

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TAGUCHİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZE EDİLEN 3B BASKI DONATILI
GEOPOLİMER KİRİŞLERİN MEKANİK VE DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA

Hülya TEMİZER

ARALIK-2025

GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TAGUCHİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZE EDİLEN 3B BASKI DONATILI
GEOPOLİMER KİRİŞLERİN MEKANİK VE DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE
MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF 3D PRINTED
REINFORCED GEOPOLYMER BEAMS OPTIMIZED USING THE TAGUCHI
METHOD**

DOKTORA

Hülya TEMİZER

**ARALIK-2025
GÜMÜŞHANE**



T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TAGUCHİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZE EDİLEN 3B BASKI DONATILI
GEOPOLİMER KİRİŞLERİN MEKANİK VE DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE
MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF 3D PRINTED
REINFORCED GEOPOLYMER BEAMS OPTIMIZED USING THE TAGUCHI
METHOD

DOKTORA

Hülya TEMİZER

Danışman: Prof. Dr. Özlem ÇAVDAR

ARALIK-2025
GÜMÜŞHANE

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Doktora Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Taguchi Yöntemiyle Optimize Edilen 3B Baskı Donatılı Geopolimer Kirişlerin Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmalarını kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kısıtlara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

09/12/2025

.....
Hülya TEMİZER

TEŞEKKÜR

“Taguchi Yöntemiyle Optimize Edilen 3B Baskı Donatılı Geopolimer Kirişlerin Mekanik ve Dayanıklılık Özelliklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı bu tez çalışmasını bana önererek, çalışmam süresince bilgisi, tecrübesi ve yol göstericiliğiyle, karşılaştığım zorlukların üstesinden gelebilmemde en büyük rol oynayan, akademik çalışma disiplini üzerine çok şey öğrendiğim değerli hocam ve danışmanım **Sayın Prof. Dr. Özlem ÇAVDAR**'a saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmam boyunca tecrübeleriyle beni destekleyen, tez izleme komitesi üyeleri olan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU ve Doç. Dr. Emre ÖZYURT'a teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmada Sivas yöresine ait endüstriyel ve madensel ürünlerin temininde destek veren Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Hülya KURŞUN ve Dr. Öğretim Üyesi Zekeriya DURAN'a, yine Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarlarını kullanmama imkan sağlayan Doç. Dr. Ahmet ŞENOL hocama şükranlarımı arz ederim. Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Selim AKSÜT'e deneysel aşamada destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım ve eğitim hayatım boyunca katkılarını esirgemeyen değerli annem, babam ve abim başta olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmalarım boyunca her türlü desteği veren ve tecrübeleri ile her zaman yanımda olan sevgili eşim Doç. Dr. İlker TEMİZER ve beni her zaman destekleyen biricik oğlum Alper'e ve biricik kızım Beren'e minnettarım.

Ayrıca, bu tez çalışmasını 2907-23.E3101.07.01 numaralı Lisansüstü Öğrenci Destek Programı ve 2901-23.F5110.01.01 numaralı Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Destek Programı kapsamında maddi/manevi olarak destekleyen Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (GÜBAP) birimine ve kıymetli çalışanlarına teşekkür ederim.

Hülya TEMİZER
GÜMÜŞHANE – 2025

ÖZET

Çimento üretiminde yüksek enerji tüketimi ve zararlı karbondioksit gazlarının salınımı nedeniyle, alternatif bağlayıcıların araştırılması gerekli hale gelmiştir. Bu çalışmada, farklı oranlarda endüstriyel atıkların kullanımı ile elde edilen geopolimer harçlar ve farklı filamentlerle üretilen 3B baskı donatılar kullanılarak üretilen kirişlerin mekanik, dayanıklılık özelliklerinin, deneysel ve sayısal olarak incelenmeleri amaçlanmıştır. Ana bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Katkı malzemesi olarak ise mermer tozu, maden atığı ve titanyum dioksit kullanılmıştır. Karışım oranlarının optimizasyonu, Taguchi L27 ortogonal matrisi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, üç farklı seviye ve altı farklı parametre değerlendirilmiştir. Alkali aktivatör olarak üç farklı molaritede (8M, 10M, 12M) sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat kullanılmıştır. Numuneler 7, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde birim kütle, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ultrasonik dalga hızı testlerine tabi tutulmuştur. En yüksek basınç dayanımının 90 günlük numunelerde 65.75 MPa olarak elde edilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) sonucunda, kür sıcaklığının mekanik performans üzerinde en etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Yapılan istatistikî analizler sonucunda elde edilen optimum oranlar belirlenmiş ve geopolimer kirişlerin performansını artırmak amacıyla üç farklı filament türü ve 3B baskı ile üç farklı model (standart, küresel ve çapraz bağlı) donatı kullanılarak numuneler üretilmiştir. Böylece pratikte uygulaması zor olup, 3B baskı yöntemi ile mümkün olabilen 3B donatı türleri üretilerek, bunların mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçları karşılaştırmak amacıyla üretilen kiriş numunelerin üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturularak sayısal analizleri yapılmıştır. PPS CF15 çapraz bağlı kirişte deneysel 1.8 mm ve sayısal 1.82 mm deformasyon değerleriyle yüksek uyum göstermesi modelin doğruluğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: 3B Baskılı donatı, Deneysel ve sayısal inceleme, Geopolimer kiriş, Mekanik ve dayanıklılık özelliği, Taguchi yöntemiyle optimizasyon

SUMMARY

Increasing costs due to high energy consumption and harmful carbon dioxide emissions in cement production have necessitated research into alternative binders. This study aims to experimentally and numerically investigate the mechanical and durability properties of beams produced using geopolymer mortars obtained by using industrial wastes at different ratios and 3D-printed reinforcements produced with different filaments. High furnace slag and fly ash were used as the main binding materials. Marble powder, mining waste, and titanium dioxide were used as additives. The optimization of the mixture ratios was performed using the Taguchi L27 orthogonal matrix, and three different levels and six different parameters were evaluated. Sodium hydroxide solution and sodium silicate were used as alkali activators. The samples were subjected to unit mass, flexural strength, compressive strength, and ultrasonic wave velocity tests at curing periods. The highest compressive strength was obtained as 65.75 MPa in 90-day specimens. As a result of the analysis of variance, curing temperature was determined to be the most influential parameter on mechanical performance. The optimal ratios obtained as a result of statistical analyses were determined, and samples were produced by 3D printing to improve the performance of geopolymer beams. Thus, 3D reinforcement types were produced, and their effect on mechanical properties was investigated. Three-dimensional finite element models of the produced beam specimens were created and numerical analyses were performed. The high agreement between the experimental 1.8 mm and numerical 1.82 mm deformation values in the PPS CF15 braced beam demonstrates the accuracy of the model.

Keywords: 3D-printed reinforcement, Experimental and numerical analysis, Geopolymer beam, Mechanical and durability properties, Optimization using the Taguchi method

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	V
SUMMARY	VI
İÇİNDEKİLER	VII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIX
1. GİRİŞ	1
1.1. Geopolimer.....	4
1.2. Geopolimerlerin Alkali Aktivasyon Süreci.....	6
1.3. Yüksek Fırın Cürufu	7
1.4. Yüksek Fırın Cürufu Üretimi	8
1.5. YFC'nin Kimyasal Kompozisyonu	9
1.6. Uçucu Küller	10
1.7. Stronsiyum	12
1.8. Mermer Tozu.....	14
1.9. Titanyum Dioksit (TiO ₂).....	14
1.10. Taguchi Optimizasyon Yöntemi	15
1.11. Filamentler ve 3B Baskı.....	18
1.12. Literatür Çalışması	20
1.12.1. Geopolimer İle İlgili Çalışmalar	20
1.12.2. Taguchi Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar.....	38
1.12.3. 3B Baskı İle Yapılan Çalışmalar.....	42
1.13. Tezin Amacı ve Kapsamı	52

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	55
2.1. Malzemeler.....	55
2.1.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	56
2.1.2. Uçucu Kül	57
2.1.3. Maden Atığı (Stronsiyum)	60
2.1.4. Mermer Tozu.....	62
2.1.5. Titanyum Dioksit (TiO ₂).....	64
2.1.6. Alkali Aktivatörler	66
2.1.7. Dere Kumu ve Su	67
2.1.8. Filamentler	67
2.2. Yöntem.....	68
2.2.1. Fiziksel ve Mekanik Deneyler	69
2.2.1.1. Birim kütle, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini	69
2.2.1.2. Kılcal Su Emme Deneyi.....	70
2.2.1.3. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini	71
2.2.1.4. Dinamik Elastisite Modülü Tayini	72
2.2.1.5. Donma Çözülme Direnci Tayini	72
2.2.1.6. Sodyum Sülfat Çözeltisi Deneyi	73
2.2.1.7. Küçük Kirişlerde Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi	74
2.2.1.8. Basınç Dayanımı Deneyi	75
2.2.1.9. Büyük Kirişlerde Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi	76
2.2.1.10. SEM ve XRD analizleri	77
2.2.1.11. Taguchi Metodu	77
2.2.1.12. 3B Donatıların Modellemesi	81
2.2.1.13. ANSYS ile Sayısal Modelleme.....	87
2.3. Ön deneyler	90
2.3.1. Ön Deney-1	90
2.3.2. Ön Deney-2	91

3. BULGULAR VE İRDELEMELER.....	94
3.1. Ön Deney-1 Sonuçları.....	94
3.2. Ön Deney- 2 Sonuçları.....	97
3.3. Taguchi Metoduna Göre Oluşturulan Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	105
3.4. Katkı Malzemelerinin Numuneler Üzerindeki Etkisi	109
3.5. Su Emme ve Boşluk Oranı Sonuçları	118
3.6. Sinyal/Gürültü Sonuçları.....	119
3.7. Anova Sonuçları.....	129
3.8. Optimum Değerler için Doğrulama Deneyleri.....	133
3.9. Donma-Çözülme Deney Sonuçları	135
3.10. Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları	140
3.11. Sülfatlı Ortama Maruz Harç Sonuçları	149
3.12. SEM Analizi.....	157
3.13. XRD Analiz Sonuçları	169
3.14. Kiriş Numunelerde Eğilme Dayanımı Sonuçları ve ANSYS ile Karşılaştırılması	174
3.15. Kiriş Numunelerde Filamentlere Ait Yük Zaman Eğrileri	209
3.16. Kiriş Numunelerde Donatı Türlerine Göre Yük-Zaman Eğrileri.....	212
3.17. Kiriş Numunelerde Donatı –Matris Arasındaki SEM Analizleri.....	215
3.18. B420C Çelik Donatılı Kiriş için Deformasyon ve Eşdeğer Gerilme Analizleri ..	224
3.19. İki Ucu Ankastre Mesnetli Kirişte Sehim Hesabı	228
3.19.1. Donatısız Kirişin Sayısal Analizi ve Donatılı Kirişler ile Karşılaştırılması	230
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	233
KAYNAKLAR	239
ÖZGEÇMİŞ	261

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Dünya Selestit Rezervleri (x1000 ton).....	13
Tablo 2. Yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler	56
Tablo 3. Uçucu kül'e ait fiziksel ve kimyasal özellikler	59
Tablo 4. Stronsiyuma ait XRF analizi.....	61
Tablo 5. Mermer tozuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	64
Tablo 6. Sodyum silikat'a ait fiziksel ve kimyasal özellikler.....	66
Tablo 7. Sodyum hidroksit'e ait fiziksel ve kimyasal özellikler	67
Tablo 8. Filamentlere ait teknik özellikler	68
Tablo 9. Taguchi metoduna göre belirlenen parametre ve seviyeler	78
Tablo 11. Geopolimer harç karışım oranları	80
Tablo 12. 3B modellere ait tasarım özellikleri.....	82
Tablo 13. Geopolimer harçlara ait karışım oranları	92
Tablo 14. Geopolimer numunelerde su emme ve boşluk oranı (%)	119
Tablo 15. 28 günlük numunelerde birim kütle ortalama yanıt değerleri.....	120
Tablo 16. 28 günlük numunelerde birim kütle için S/N oranları	122
Tablo 17. 28 günlük numunelerde eğilme dayanımı için ortalama yanıt değerleri	123
Tablo 18. 28 günlük numunelerde Eğilme dayanımı için Sinyal/ Gürültü oranı	124
Tablo 19. 28 günlük numunelerde basınç dayanımı için ortalama yanıt değerleri	125
Tablo 20. 28 günlük numunelerde basınç dayanımı S/N oranı tablosu	127
Tablo 21. 28 günlük numunelerde UPV ortalama yanıt tablosu.....	128
Tablo 22. 28 günlük numunelerde UPV S/N oranı tablosu	129
Tablo 23. 28 Günlük birim kütle Varyans analizi tablosu	130
Tablo 24. 28 Günlük eğilme dayanımı Varyans analizi tablosu	130
Tablo 25. 28 Günlük basınç dayanımı Varyans analizi tablosu.....	131
Tablo 26. 28 Günlük UPV Varyans analizi tablosu	131
Tablo 26. (Devamı)	132
Tablo 27. Taguchi metoduna göre belirlenen optimum sonuçlar	132
Tablo 28. 28 günlük numunelerde optimum deney koşulları ve doğrulama sonuçları ..	134
Tablo 29. Varyans sonuçlarına göre birim kütle, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve UPV üzerindeki parametrelerin etkileşim yüzdeleri	135
Tablo 30. Donma çözülme öncesi ve sonrası eğilme ve basınç dayanım değişimleri ..	137
Tablo 31. Donma çözülme öncesi ve sonrası kütle ve dinamik elastisite modülü.....	138

Tablo 32. Geopolimer harç numunelere ait kılcal su emme değerleri	143
Tablo 32. (Devamı)	144
Tablo 32. (Devamı)	145
Tablo 32. (Devamı)	146
Tablo 33. Geopolimer harç numunelere ait kılcal su emme katsayısı tayini(mm/s^{-2}) ..	147
Tablo 33. (Devamı)	148
Tablo 34. Kılcal su emme dayanım değişimleri	148
Tablo 34. (Devamı)	149
Tablo 35. Sodyum sülfat çözeltisi öncesi ve sonrası eğilme ve basınç dayanım değişimleri	150
Tablo 35. (Devamı)	151
Tablo 36. Geopolimer numunelerde sodyum sülfat öncesi, sonrası ve dinamik elastisite modülü değişim değerleri	153
Tablo 36. (Devamı)	154
Tablo 37. Sodyum sülfat sonrası numunelerde kütle değişimleri (%)	155
Tablo 37. (Devamı)	156
Tablo 38. Sodyum sülfat sonrası geopolimer numunelere ait kütle değişimleri	157
Tablo 39. B420C Çelik donatı ve PPS CF15 standart donatı karşılaştırması	227
Tablo 40. Donatısız kirişe ait modal analizi	230

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Portland çimentosuna ait maliyet oranları (Atabey, 2017)	2
Şekil 2. Geopolimer oluşumunun şematik gösterimi	6
Şekil 3. Yüksek fırın cürufu üretim süreci	9
Şekil 4. $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ üç fazlı diyagramı (Yıldız, 2023).....	10
Şekil 5. Filamentlere ait görüntü	20
Şekil 6. Tez çalışmasına ait şematik gösterim	55
Şekil 7. Bolu yüksek fırın cürufuna ait SEM görüntüsü	56
Şekil 8. Bolu yüksek fırın cürufuna ait EDX analizi	57
Şekil 9. Uçucu küle ait SEM görüntüsü	58
Şekil 10. Uçucu kül'e ait EDX analizi.....	59
Şekil 11. Maden atığı (stronsiyum)'na ait eleme öncesi ve sonrası görüntü	60
Şekil 12. Malzemelerin öğütüldüğü bilyalı öğütücü	60
Şekil 13. Maden atığı /stronsiyuma ait SEM görüntüsü	61
Şekil 14. Stronsiyuma ait EDX analizi	62
Şekil 15. Elenmiş mermer tozuna ait görüntü	62
Şekil 16. Mermer tozuna ait SEM görüntüsü.....	63
Şekil 17. Mermer tozuna ait EDX analizi	63
Şekil 18. Titanyum dioksite ait SEM görüntüsü	65
Şekil 19. Titanyum dioksit'e ait EDX analizi.....	65
Şekil 20. Sodyum silikat solusyonu	66
Şekil 21. 8M,10M, 12M NaOH çözeltisine ait görüntü.....	66
Şekil 22. Arşimet terazisi	69
Şekil 23. Kılcal su emme deneyi.....	71
Şekil 24. UPV cihazı	71
Şekil 25. Donma çözülme kabini	73
Şekil 26. Geopolimer harç numunelerinin donma çözülme içerisindeki görüntüsü	73
Şekil 27. Sodyum Sülfat çözeltisine ait görüntü	74
Şekil 28. Eğilme dayanımı cihazı.....	75
Şekil 29. Basınç dayanımı cihazı	76
Şekil 30. Eğilmede çekme dayanımı test cihazı.....	77
Şekil 31. Taguchi metodu ile oluşturulan numunelere ait görüntü	81
Şekil 32. Standart a), küresel b) ve çapraz bağlı c) yapıya sahip donatılara ait katı model görüntüleri	83

Şekil 33. 3B donatılı filamentlerin geopolimer harç oluşum şeması	85
Şekil 34. FDM yöntemiyle endüstriyel baskı yapılan 3B yazıcı (UltiMaker Factor 4) ve üretim aşamaları görüntüleri.....	85
Şekil 35. Filamentlere ait görüntü ABS PLUS (a), PPS CF15 (b), PA6 GF30 (c).....	86
Şekil 36. Filamentlerin kalıplara yerleştirilmesi standart (a), küresel (b), çapraz bağlı (c)	86
Şekil 37. Geopolimer harcın kiriş kalıplara yerleştirilmesi (a), kalıpların üzerinin cam ile örtülmesi (b)	86
Şekil. 38 Geopolimer harcın (a), yerleştirildiği fırın, harçların fırın içerisindeki hali (b)	87
Şekil 39. Geopolimer harç numunelerin kiriş kalıplardan çıkarılması	87
Şekil 40. Kirişin katı model olarak tasarlanması	88
Şekil 41. Geopolimer kirişe ait üç boyutlu sonlu eleman modeli	89
Şekil 42. Elde edilen 7 ve 28 günlük geopolimer numuneler	91
Şekil 43. Geopolimer numunelerin kalıplara yerleştirilmesi	93
Şekil 44. Geopolimer numunelere ait su kürü (a), etüv kürü (b) görüntüsü	93
Şekil 45. 7 günlük eğilme dayanım değerleri.....	94
Şekil 46. 7 günlük basınç dayanım değerleri	95
Şekil 47. 28 günlük eğilme dayanım değerleri.....	96
Şekil 48. 28 günlük basınç dayanım değerleri	96
Şekil 49. Farklı oranlarda ana bağlayıcı oranına sahip numunelerin birim kütle değerleri (etüv kürü)	98
Şekil 50. Farklı oranlarda ana bağlayıcı oranına sahip numunelerin birim kütle değerleri (su kürü).....	98
Şekil 51. Etüv küründe bekletilen numunelere ait sehım değerleri	99
Şekil 52. Su küründe bekletilen numunelere ait sehım değerleri.....	99
Şekil 53. Dinamik Elastisite Modülü değerleri (Etüv kürü)	100
Şekil 54. Dinamik Elastisite Modülü değerleri (Su kürü).....	101
Şekil 55. 8M numunelerde 28 günlük eğilme dayanımı	101
Şekil 56. 10M numunelerde 28 günlük eğilme dayanımı	102
Şekil 57. 12M numunelerde 28 günlük eğilme dayanımı	103
Şekil 58. 8M numunelerde 28 günlük basınç dayanımı	103
Şekil 59. 10M numunelerde 28 günlük basınç dayanımı	104
Şekil 60. 12M numunelerde 28 günlük basınç dayanımı	105
Şekil 61. Geopolimer numunelerinin 7, 28, 56, 90 günlük birim kütle değerleri	106

Şekil 62. Geopolimer numunelerinin 7, 28, 56, 90 günlük eğilme dayanımları	107
Şekil 63. Geopolimer numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımları	108
Şekil 64. Geopolimer numunelerin Dinamik Elastisite Modülü değerleri	109
Şekil 65. Mermer tozu, stronsiyum ve titanyum dioksit'e ait eğilme dayanımları	110
Şekil 66. Mermer tozu, stronsiyum ve titanyum dioksit basınç dayanımları	110
Şekil 67. 7 günlük (a) SEM, (b) EDX ve 90 günlük (c) SEM, (d) EDX mermer tozu katkılı geopolimer harca ait görüntüleri	113
Şekil 68. 7 günlük (a)SEM (b) EDX ve 90 günlük (c) SEM (d) EDX stronsiyum katkılı geopolimer harca ait görüntüleri	115
Şekil 69. 7 günlük (a) SEM (b) EDX ve 90 günlük (c) SEM (d) EDX TiO ₂ katkılı geopolimer harca ait görüntüler	118
Şekil 70. 28 günlük birim kütle ortalama yanıt grafiği	120
Şekil 71. 28 günlük birim kütle S/N oranı grafiği	121
Şekil 72. 28 günlük eğilme dayanımı ortalama yanıt grafiği	122
Şekil 73. 28 günlük eğilme dayanımı S/N oranı grafiği	124
Şekil 74. 28 günlük basınç dayanım ortalama yanıt grafiği	125
Şekil 75. 28 günlük basınç dayanım S/N oranı grafiği	126
Şekil 76. 28 günlük UPV ortalama yanıt grafiği	127
Şekil 77. 28 günlük UPV S/N oranı grafiği	128
Şekil 78. Donma çözülme eğilme dayanım grafiği	136
Şekil 79. Donma çözülme basınç dayanım grafiği	136
Şekil 80. Donma çözülme Dinamik Elastisite Modülü grafiği	138
Şekil 81. Donma çözülme sonrası numunelere ait görüntü	140
Şekil 82. Donma çözülme sonrası ölçülemeyen numunelere ait görüntü	140
Şekil 83. Sodyum sülfat deneyi sonrası geopolimer numunelere ait görüntü	151
Şekil 84. Sodyum sülfat deneyi sonrası geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı	152
Şekil 85. Sodyum sülfat deneyi sonrası geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı	152
Şekil 86. Sodyum sülfat deneyi sonrası geopolimer harç numunelerinin Dinamik Elastisite Modül değişimi	154
Şekil 87. Geopolimer numunelerde sodyum sülfat çözeltisi sonrası kütle değişimleri	156
Şekil 88. S20 (28 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme SEM analizi görüntüsü	158

Şekil 89. S20 (56 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM analizi görüntüsü	159
Şekil 90. S20 (90 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM analizi görüntüsü	160
Şekil 91. S20 (90 günlük) numunesine ait EDX analizi	160
Şekil 92. S18 (90 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM analizi görüntüsü	161
Şekil 93. S18 (90 günlük) numunesine ait EDX analizi	162
Şekil 94. S7 (90 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM görüntüsü	163
Şekil 95. S7 (90 günlük) numunesine ait EDX analizi	163
Şekil 96. Kılcal su emme öncesi S24 (90 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM analizi görüntüsü.....	164
Şekil 97. Kılcal su emme öncesi S24 (90 günlük) numunesine ait EDX analizi	164
Şekil 98. Kılcal su emme sonrası S24 (90 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM analizi görüntüsü.....	165
Şekil 99. Kılcal su emme sonrası S24 (90 günlük) numunesine ait EDX analizi.....	165
Şekil 100. Sülfat çözeltisi deneyi öncesi S1 numunesi a)1000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM analizi görüntüsü.....	167
Şekil 101. Sülfat çözeltisi deneyi öncesi S1 numunesine ait EDX analizi	167
Şekil 102. Sülfat çözeltisi deneyi sonrası S1 numunesi a)1000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM analizi görüntüsü.....	168
Şekil 103. Sülfat çözeltisi deneyi sonrası S1 numunesine ait EDX analizi	168
Şekil 104. S20 (28 Günlük) numunesi XRD analizi görüntüsü	169
Şekil 105. S20 (56 günlük) numunesi XRD analizi görüntüsü	170
Şekil 106. S20 (90 günlük) numunesi XRD analizi görüntüsü	171
Şekil 107. Kılcal su emme öncesi S24 (90 günlük) numunesine ait XRD görüntüsü ..	171
Şekil 108. Kılcal su emme sonrası S24 (90 günlük) numunesine ait XRD görüntüsü .	172
Şekil 109. Sülfat çözeltisi deneyi öncesi S1 numunesine ait XRD görüntüsü.....	173
Şekil 110. Sülfat çözeltisi deneyi sonrası S1 numunesine ait XRD görüntüsü.....	174
Şekil 112. ABS PLUS çapraz bağlı donatılı geopolimer kırışte a) kırılma öncesi b)kırılma anı c)kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi.....	176
Şekil 113. ABS PLUS çapraz bağlı geopolimer kırışe ait a) kırış deformasyon b) donatı deformasyon analizi.....	177

Şekil 114. ABS PLUS çapraz bağlı geopolimer kirişe ait (a) kiriş gerilmesi (b) donatı gerilmesi analizi.....	178
Şekil 116. ABS PLUS küresel donatılı geopolimer geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi	180
Şekil 117. ABS PLUS küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi.....	181
Şekil 118. ABS PLUS küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi	182
Şekil 120. ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b)kırılma anı c)kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi.....	184
Şekil 121. ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi.....	185
Şekil 122. ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi	186
Şekil 123. ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri	187
Şekil 124. PA6 GF30 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi.....	188
Şekil 125. PA6 GF30 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi.....	189
Şekil 126. PA6 GF30 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi	190
Şekil 127. PA6 GF30 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri	191
Şekil 128. PA6 GF30 küresel donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi.....	191
Şekil 129. PA6 GF30 küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi.....	192
Şekil 130. PA6 GF30 küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi	193
Şekil 131. PA6 GF30 küresel donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri...	194
Şekil 132. PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi.....	195
Şekil 133. PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi.....	195

Şekil 134. PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi	197
Şekil 135. PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri..	198
Şekil 136. PPS CF15 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b)kırılma anı c)kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi.....	199
Şekil 137. PPS CF15 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi.....	200
Şekil 138. PPS CF15 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi	201
Şekil 139. PPS CF15 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri	202
Şekil 140. PPS CF15 küresel donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b)kırılma anı c)kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi.....	202
Şekil 141. PPS CF15 küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi.....	203
Şekil 142. PPS CF15 küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi	204
Şekil 143. PPS CF15 küresel donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri ...	205
Şekil 144. PPS CF15 standart donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b)kırılma anı c)kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi.....	206
Şekil 145. PPS CF15 standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi.....	207
Şekil 146. PPS CF15 standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi	208
Şekil 148. Farklı filament geometrilerinden oluşan geopolimer kirişlerde a)ABS PLUS b) PA6 GF30 c) PPS CF15 malzemelere ait Yük- Zaman grafikleri.....	212
Şekil 149. Farklı donatılarından oluşan a)çapraz bağlı b)küresel ve c) standart geopolimer kirişlerde filamentlere ait Yük –Zaman grafikleri	215
Şekil 150. ABS PLUS çapraz bağlı donatının SEM analizi.....	216
Şekil 151. ABS PLUS küresel donatının SEM analizi	217
Şekil 152. ABS PLUS standart donatının SEM analizi	218
Şekil 155. PA6 GF30 standart donatının SEM analizi.....	221
Şekil 156. PPS CF15 çapraz bağlı donatının SEM analizi	222
Şekil 157. PPS CF15 küresel donatının SEM analizi	223
Şekil 158. PPS CF15 standart donatının SEM analizi	224

Şekil 159. Çelik donatılı kiriş deformasyon analizi	225
Şekil 160. Çelik donatı deformasyon analizi	225
Şekil 161. Çelik donatılı kiriş eşdeğer gerilme analizi	226
Şekil 162. Çelik donatı eşdeğer gerilme analizi.....	227
Şekil 163. Donatısız kiriş ve donatılı kirişlerin deformasyon değerleri karşılaştırması	231
Şekil 164. Donatısız kiriş deformasyon analizi	231
Şekil 165. Donatısız kiriş ve donatılı kirişlerin eşdeğer gerilme karşılaştırması	232
Şekil 166. Donatısız kiriş eşdeğer gerilme analizi	232



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AA/B	: Alkali aktivatör/bağlayıcı
AAC	: Aktive edilmiş alkali çimentonun
ABS	:Akrilonitril Bütadien Stiren
Al	:Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
ANOVA	: Analysis of variance
ASTM	: American Society for Testing and Materials International
Ba	: Baryum
BFRP	: Bazalt lif takviyeli polimer
Be	: Berilyum
BET	: Brunauer-Emmett-Teller metodu
Ca	: Kalsiyum
CaO	: Kalsiyum oksit
C ₃ A	: Trikalsiyum aluminat
C ₄ A ₃ S	: Kalsiyum sülfoaluminat
CaO ₂	: Kalsiyum dioksit
C–A–S–H	: Kalsiyum alüminyum silikat hidrat
CEM I	: Portland çimento tipi
C ₂ S	: Dikalsiyum silikat
CH	: Portlandit
CÜTAM	:Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi
ÇC	: Çelikhane cürufu
EDX	: Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektrometresi
EPS	: Genleştirilmiş polistiren
Fe ₂ O ₃	: Demir Oksit
FDM	: Fused Deposition Modeling
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
GYFC	: Granüle yüksek fırın cürufu
HA	: Hidrolik aktivite

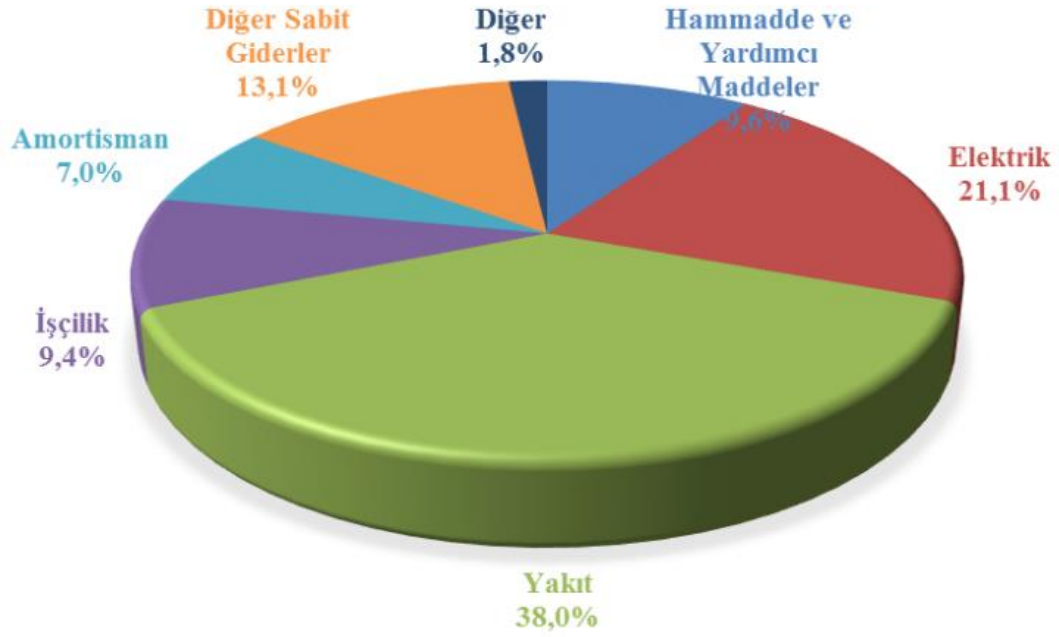
HBW	: Boşluklu tuğla atığı
HNO ₃	: Nitrik asit
ISO	: International Standart of Organization
KL	: Karbon lif
kN	: Kilonewton
KO	: Kareler Ortalaması
KOH	: Potasyum Hidroksit
KS	: Karbon siyahı
KT	: Kareler Toplamı
L27	: 27 adet ortogonal dizin
MFK	: Fırın kurusu ağırlığı
MK	: Metakaolin
Mg	: Magnezyum
MJF	: Multi Jet Fusion
MKPC	: Magnezyum potasyum fosfat çimentosu
MKYD	: Kuru yüzey doygun ağırlığı
mm	: Milimetre
MMAM	: Malzemeli katmanlı üretim
MPa	: Megapaskal
MSU	: Su içindeki ağırlığı
MT	: Mermer Tozu
N	: Newton
NaOH	: Sodyum hidroksit
Na ₂ O	: Sodyum oksit
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum silikat
O	: Oksijen
OPC	: Sıradan Portland çimentosu
ÖYFC	: Öğütülmüş yüksek fırın cürufu
PA6-GF30	: %30 Cam fiber katkılı poliamid naylon
PETG	: Polietilen Tereftalat
PFA	: Pres filtre atığı
PLA	: Polilaktik Asit

PPS-CF15	: %15 karbon fiber katkılı Polifenilen Sülfid
Pundit	: Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester)
PVA	: Polivinil alkol
Ra	: Radium
RP	: Geri dönüştürülmüş toz
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
Sd	: Serbestlik Derecesi
SD	: Silis Dumanı
SIFCON	: Dökme lif takviyeli ince beton
Si	: Silisyum
SiO ₂	: Silisyum oksit
SLA	: Stereolitografi
SLS	: Selective Laser Sintering
SLM	: Selective Laser Melting
S/N	: Sinyal/gürültü
St	: Stronsiyum
SrSO ₄	: Stronsiyum sülfat
SS	: Sodyum silikat
TAUM	: Teknolojik araştırma ve uygulama merkezi
TiO ₂	: Titanyum dioksit
TK	: Taban külü
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu kül
UKGP	: Uçucu kül bazlı geopolimer
VC	: Volkanik cüruf
VT	: Volkanik tuf
XRD	: X-Ray Diffraction
XRF	: X-ışını floresansı
YFC	: Yüksek fırın cürufu

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü uygulamalarında kullanılan malzemelerin çevreci, ergonomik ve geri dönüşebilir olması küresel iklimin korunmasını, enerji tasarrufunu ve atık yönetimini beraberinde getirecektir. Beton üretiminde önemli bir bileşen olan çimentonun çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle, günümüzde birçok araştırmacı tarafından kullanımının sorgulandığı bilinmektedir. Sera gazı emisyonlarından biri olan CO₂ gazı salınımında, çimento üretiminin payı oldukça yüksektir. Bu durumun farkında olan ülkeler Paris İklim Antlaşması kapsamında, inşaat sektörü gibi birçok alanda ek tedbirlerin alınması gerektiğinin sonucuna varmıştır. Endüstriyel üretime dayalı (yaklaşık %20 oranında) sera gazı salınımında büyük bir etkiye sahip olan çimento sektörü, küresel üretimin yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır. Üretim kaynaklı emisyonlar doğrudan veya dolaylı bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Doğrudan emisyonlar bir kuruluş veya işletmenin doğrudan kontrolü altındaki faaliyetler sonucu oluşurken, dolaylı emisyonlar ise elektrik, ısı ve güç üretimi gibi enerjiyi üretirken sistemlerin oluşturduğu salınımlardır. Bu doğrultuda ülkeler ve üreticiler tarafından 2030 yılına kadar karbondioksit emisyonunda önemli azalmaların gerçekleştirilmesini, 2050'ye kadar ise net sıfır karbon salınım değerlerine ulaşılması hedeflenmektedir. Özellikle inşaat sektörü uygulamalarında düşük karbonlu veya karbonsuz ürünlerin kullanımı, geliştirilmesi ve atıkların geri dönüşümü konuları bu noktada büyük önem taşımaktadır (Adak vd., 2014). Çimento üretiminde diğer bir dezavantaj ise yüksek enerji maliyetleridir. Özellikle günümüzde yakıt giderlerinin yüksek olması, enerjide büyük bir oranda dışa bağımlı olan ülkemizin cari dengesi bakımından da oldukça önemlidir. Şekil 1'de portland çimentosu üretim aşamasına ait farklı alanlardaki maliyet dağılımları görülmektedir. Diğer taraftan çimento üretiminde kullanılan yakıt kaynaklarının sonlu ve sınırlı olması (bunlar kömür, doğalgaz vb ürünler), inşaat sektörünü bu alanlara oldukça bağımlı hale getirmektedir.



Şekil 1. Portland çimentosuna ait maliyet oranları (Atabey, 2017).

Standart portland çimentosunun inşaat sektöründe geleneksel ve yaygın olarak kullanılan bağlayıcı malzeme olmasının yanı sıra, özellikle çevresel etkileri nedeniyle bu ürünlerin kullanımı son on yılda kapsamlı bir şekilde sorgulanmaktadır. Portland çimentosunun çevresel etkileri, yüksek üretim maliyetleri ve enerji tüketimi, diğer sektörlere olan bağımlılığı düşünüldüğünde, alternatif bağlayıcıların önemini daha da arttırmaktadır. Son zamanlarda, geopolimer beton/harç olarak adlandırılan bağlayıcıların üretimi ve kullanımı ön plana çıkmaktadır (Atabey, 2017). Portland çimentoya alternatif sayılabilecek potansiyele sahip olan geopolimer malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi, günümüzde araştırmacılarının odak noktasıdır (Tonyalı, 2021). Geopolimer beton/harç ürünlerinin endüstriyel atık maddeler kullanılarak hazırlanması durumu küresel iklimin koruması, enerji tasarrufu, atık yönetimi gibi avantajları beraberinde getirecektir. Bu nedenle yüksek performanslı, doğa dostu ve sürdürülebilir ürünlerin ve üretim yöntemlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir (Güzelküçük, 2020).

Standart portland çimentosu, 2019 yılında yaklaşık 4.2 milyar ton üretimle inşaat sektöründe kullanılan en yaygın yapı malzemesi olarak bilinmektedir (Çavdar, 2008; Ganesh ve Muthukannan, 2021). Bu sebeple, küresel ısınma gibi tehlikeli durumların ortadan kaldırılması için birçok araştırmacı tarafından çimento üretiminin azaltılması ve buna yeni malzemelerin iyileştirilmesi amacıyla çalışmalar yapılmaktadır (Çavdar ve

Yetgin, 2005). Geopolimer beton, özellikle inşaat sektöründe atık malzemelerin değerlendirilmesini mümkün kılarak sürdürülebilirliği destekler ve aynı zamanda karbondioksit emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunarak küresel ısınma ile mücadelede önemli avantajlar sağlar. Geopolimer betonun çevreye katkısının yanı sıra mekanik özelliklerinden dolayı geleneksel betona önemli bir alternatif olmaktadır (Tonyalı, 2021).

Geopolimer, yüksek dayanım özelliklerine sahip beton/harç üretiminde kullanılmak için yüksek oranda reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 bileşenlerinden oluşmuş, amorf yapıdaki alüminosilikat kaynaklı ve aktivatörlerle bağlayıcılık özellikleri kazanan malzemelere verilen isimdir. Günümüzde, endüstriyel atık malzemelerden düşük maliyetler ile üretilebilir olmaları, küresel CO_2 salınımlarına olan katkıları, çimentoya benzer karakteristik performans göstermeleri gibi birçok neden geopolimerleri ön plana çıkarmaktadır (Maraş, 2019).

Portland çimentosu ile kıyaslandığında, geopolimer bağlayıcılar ileri mühendislik özellikleri sergileyen bir malzeme grubudur. Aynı zamanda bu alternatif ürünlerin üretimi esnasında portland çimentosuna kıyasla, beş (5) kat daha az CO_2 salınımlarına neden olduğu ve %60 oranında daha düşük enerji maliyetlerine sahip olduğu belirtilmektedir (Kantarıcı, 2018).

Cüruf Çimento Birliği'ne göre, çimento yapımında portland yerine cüruf kullanılması CO_2 salınımı esnasında yaklaşık % 59, enerji tüketiminde ise yaklaşık % 42 oranında tasarruf sağlamaktadır (URL-1).

Geopolimer betonlar, kuruma rötresi etkin bir şekilde kontrol altına alındığında, ince ve narin yapı elemanlarında kullanım için uygun hale gelir. Portland çimentolu betonlara kıyasla daha düşük hidratasyon ısısına sahip olmalarının yanı sıra, donatı korozyonuna karşı daha dayanıklıdırlar ve asit saldırılarına karşı daha yüksek direnç gösterirler. Amorf yapıya sahip cam benzeri mikro yapıları sayesinde, geopolimer betonlar özellikle istinat duvarları, betonarme su depoları, barajlar, öngermeli köprü sistemleri, yangın ve yüksek sıcaklığa dayanıklı yapı malzemeleri gibi alanlarda tercih edilmektedir. Ayrıca, zararlı kimyasalların ve nükleer atıkların bertarafı ile kimyasal etkilere karşı dayanıklı yapı elemanlarının üretiminde de kullanım potansiyeli taşımaktadırlar. Kimyasal, termal ve yangına karşı direnç bakımından portland çimentosuna dayalı betonlara göre belirgin avantajlar sunan bu malzeme; savunma

sanayi, inşaat sektörü, madencilik ve atık yönetimi gibi çeşitli mühendislik alanlarında yaygın uygulama imkânı sunmaktadır (URL-2, 2020).

1.1. Geopolimer

Geopolimerler; uçucu kül, yüksek fırın cürufu, elektrik ark cürufu, metakaolin gibi kimyasal yapısında silis ve alümin içeren bileşenlerin sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit gibi alkaliler ile aktivasyonu ile oluşmuş alüminosilikat bağlayıcılar olarak bilinir.

Geopolimerizasyon teknolojisinde katı ham madde olarak kaolinit, feldispat ve uçucu kül, metalürjik cüruf, maden atıkları vb. gibi birçok endüstriyel katı atık malzemelerden yararlanılabilir olması, bu yapıların kullanıldığı bölge ve üretim şartlarına bağlı birtakım özelliklerinin farklılıklar göstermesine neden olmaktadır (Alnkaa, 2019). Geopolimerler bileşenlerdeki bu yapısal farklılıkları aynı zamanda geopolimer sentezindeki değişkenlerin yanında, silikon/alüminyum amorf molar oranına, alkali metal kation tipine ve konsantrasyonuna, su içeriğine ve kür rejimine bağlı olarakta açıklamak mümkündür (Aygörmez, 2018).

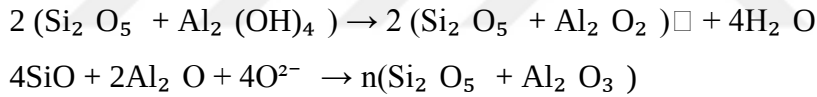
İlk olarak 1970'li yıllarda Prof. Joseph Davidovits tarafından ortaya çıkarılan geopolimer kavramı, bir alkaline çözelti ile reaksiyona giren alümina silikat tozunun sentezlenmesi sonucunda oluşmuş yapılar olarak bilinir. Daha sonraki yıllarda özellikle Avrupa'da yangınlara karşı organik termoset polimere alternatif olarak üretilen bu ürünler, kaplama malzemesi, ahşap yapıları ısıdan koruyan bir reçine veya ısıya dayanıklı bir yapıştırıcı olarak çeşitli alanlarda kullanıldığı görülmektedir (Kut, 2018).

Geopolimer aynı zamanda, kovalent bağlarla bağlı mineral molekül ağları ile karakterize edilen inorganik seramik malzemelerdir. Zengin silika ve alümina bileşenleri içeren bu bileşenler alkali çözeltiler ile reaksiyona girerek, beton için bağlayıcılık özelliği gösteren alümin silikat jellerini üretirler (Eren, 2023).

Davidovits, geopolimer sentezinin üç adımda meydana geldiğini ifade etmektedir. Bunlar;

- Si ve Al atomlarının ham maddeden hidroksit iyonlarının etkisiyle çözünmesi ve öncü iyonların oluşması,
- Hammadde iyonlarının monomerlere yoğunlaşması,
- Monomerlerin polimerik yapılara polimerize olmasıdır (Kantarıcı, 2013).

Geopolimerizasyon, içeriğinde alüminosilikatlı malzemeler kullanılan, inorganik polimer olarak bilinen, kullanışlı malzemelerin üretildiği inovatif bir teknolojidir. Geopolimerizasyon kimyasal bir reaksiyon gerçekleştirerek katı alüminosilikat oksitler ve alkali metal silikat çözeltileri arasında yüksek alkali koşullarda ve orta ısılarda, Si-O-Al ve Si-O-Si bağlarını içeren amorf, yarı-kristal polimerik yapılardan meydana gelmektedir. Geopolimerizasyon sürecinin genellikle dört temel aşamada gerçekleştiği kabul edilmektedir. İlk aşamada, güçlü bir alkali çözelti içerisinde katı haldeki alüminosilikat esaslı malzemeler çözünmeye başlar. Bunu takiben, sıvı fazda silisyum (Si) ya da alüminyum-silisyum (Si-Al) bazlı oligomerik yapıların oluşumu meydana gelir. Üçüncü aşamada, bu oligomer türleri yoğunlaşarak sıvı ortamda inorganik polimer ağlarını oluşturmaya başlar. Son aşamada ise, bu polimer yapı, ortamda çözünmeden kalan katı parçacıklarla bağ kurarak nihai geopolimer matrisini oluşturur (Bingöl, 2018). Geopolimerler, portland çimentolu betonlara benzer biçimde şekil aldıktan sonra da iç yapılarındaki kimyasal reaksiyonlarını sürdürür. Bu süreçte gerçekleşen ekzotermik reaksiyonlar sayesinde üç boyutlu oligomerik makromoleküler yapılar oluşur. Geopolimer yapının polikondensasyon (yoğunlaşma) yoluyla meydana gelişi aşağıdaki genel tepkimelerle açıklanabilir:



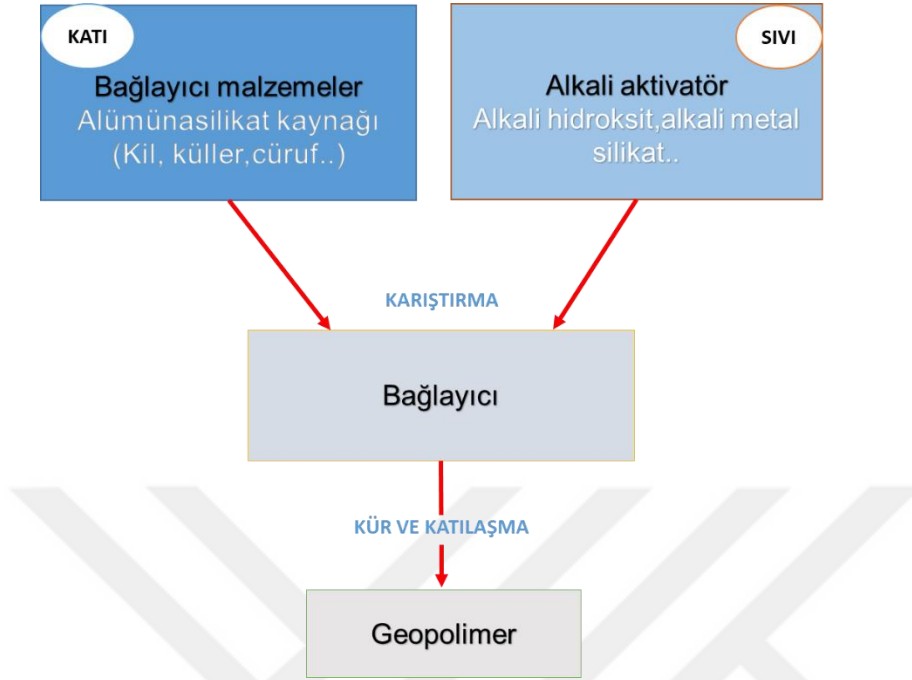
Bu tepkimeler sonucunda oluşan polisialat bileşikler kristal özellik gösterirken, polisialat silokso yapılar ise daha amorf niteliktedir. Geopolimer ağ yapısının genel kimyasal formülü aşağıdaki gibidir:



Eşitlik 1 kullanılarak elde edilen M, Sodyum (Na^+), potasyum (K^+) gibi bir alkali kasyonu, n, polikondensasyon derecesini, z ise üç boyutlu ağ yapının tekrar birim sayısını ifade etmektedir.

Söz konusu reaksiyonların buhar fazında gerçekleştiği, ayrıca ham maddeye uygulanan ön ısıtma ve yaklaşık 100 °C'ye kadar gerçekleştirilen ısıl kür işlemlerinin, geopolimerizasyon sürecini hızlandırdığı ve reaksiyona giren alümino-silikat miktarını

artırdığı belirtilmektedir (Türkmen ve Karakoç, 2014). Şekil 2'de, geopolimer bağlayıcı üretim aşamalarına ait şematik yapı görülmektedir.



Şekil 2. Geopolimer oluşumunun şematik gösterimi

1.2. Geopolimerlerin Alkali Aktivasyon Süreci

Alkali aktivasyon süreci, başlangıçta hammadde içerisindeki Si ve Al türlerinin çözünmesiyle başlar ve bu türlerin polikondensasyonu ile üç boyutlu geopolimer ağ yapısı oluşur. Kullanılan alkali çözelti türü, konsantrasyonu ve Si/Al oranı, geopolimerleşme reaksiyonlarının kinetiği üzerinde doğrudan etkilidir. Yapılan çalışmalarda, kütleme sıcaklığının artırılmasıyla geopolimerlerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısal gelişiminin olumlu yönde etkilendiği belirlenmiştir (Mermerdaş ve Ekmen, 2018). Geopolimerlerin alkali aktivasyon süreci, genellikle NaOH ve Na_2SiO_3 içeren çözeltiler ile gerçekleştirilir ve oluşan ürünler Si–O–Al bağları içeren üç boyutlu bir yapı oluşturur (Davidovits, 1991).

Geopolimerlerin oluşum süreci ekzotermik karakterde olup, bu süreçte amorf yapıdaki jel fazı oluşur. Bu jel zamanla sertleşerek, nihai malzemenin mekanik dayanım özelliklerini belirleyici rol oynar. Alkali aktivasyon mekanizmasında, özellikle 60 °C'nin üzerindeki kür sıcaklıklarının geopolimerlerin mekanik performansını olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Basit sentezlenebilirliği ve çevreye olan düşük etkisi nedeniyle,

geopolimer malzemelerin yapı sektöründe kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Uçucu kül temelli geopolimerler ise çevresel ve ekonomik avantajları, yüksek teknolojik performansları ve uygulama kolaylıklarıyla dikkat çekmektedir. Bu sistemlerde, kullanılan kimyasalların reaktifliği oldukça kritik bir faktördür. Geopolimerizasyon üzerinde etkili olan iki temel unsur; bağlayıcı malzemenin reaktif amorf içeriğe sahip olması ve kullanılan malzemenin ince tane boyutudur. Portland çimentolu sistemlerde görülen alkali-silika reaksiyonu, çimentodan kaynaklı alkali iyonları ile agregalardaki reaktif silis bileşenleri arasında gerçekleşen kimyasal bir tepkimedir. Bu reaksiyon sonucunda oluşan alkali-silika jeli çevresindeki suyu emerek genişler ve beton içinde çatlakların oluşmasına, dolayısıyla dayanım ve dayanıklılık kayıplarına yol açabilir. Geopolimer betonlarda da, silis içeren bağlayıcılarla birlikte alkali aktivatörlerin (özellikle alkali hidroksitlerin) bir arada kullanılması nedeniyle benzer bir reaksiyonun oluşma potansiyeli mevcuttur (Eryılmaz vd., 2023). Ayrıca farklı kür şartlarının geopolimer yapılar üzerinde etkisi oldukça önemli ve araştırılması gereken bir alan olduğu görülmektedir. Nitekim farklı kür şartlarının mekanik ve fiziksel özellikler üzerinde oldukça etkili olduğu vurgulanmaktadır (Altındal, 2020; Kalaycıoğlu, 2020; Topçu ve Sofuoğlu, 2020; Durak ve Şimsek, 2022).

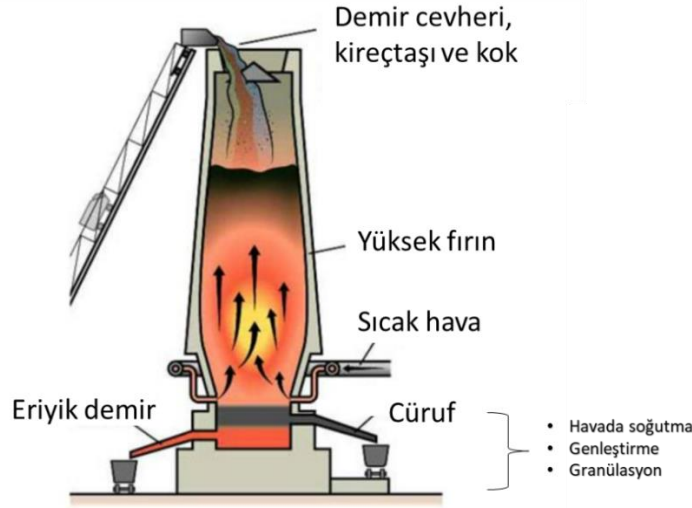
1.3. Yüksek Fırın Cürufu

Tarihte cürufların ilk kez top güllesi olarak 1589'da kullanıldığı bilinmektedir. Kayıtlara göre cüruflar Roma İmparatorluğu dönemindeki yapılarda da kullanılmıştır. 1813 yılında İngiltere'de cüruflar ile ilk modern yollar yapılmıştır (Topçu ve Toprak, 2009). Cüruf bu tarihsel gelişiminden sonra 1950'li yıllarda Amerika, İngiltere, Güney Afrika gibi birçok ülkede beton üretimi için çimento içerisine katılmaya başlanmıştır (Özcan ve Güngör, 2019). Metallerin üretimi esnasında yan ürün olarak 'cüruf' ortaya çıkmaktadır. Yüzyıllar boyunca cüruflar insanlığın faydalanacağı metallerin rafine edilmesi maksadıyla ortaya çıkmıştır. Bu işlemler sonucunda bir atıl olarak ortaya çıkan cüruf, uzun bir süre çevresel atık ürün olarak değerlendirilmiştir. Demir-çelik sektöründe yüksek miktarlarda üretilen cürufun depo edileceği alanları bulma sorunu üzerine, bu ürünlerden faydalanılabilmesi hipotezi geliştirilmiştir (Tonyalı, 2021).

1.4. Yüksek Fırın Cürufu Üretimi

Demir cevheri, doğada: hematite (Fe_2O_3), magnetite (Fe_3O_4), limonite ($\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ve siderite (FeCO_3) gibi demir oksit bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu oksitlerle beraber aynı zamanda silis, kil vb. yabancı maddeler de içermektedir (Luga, 2015). Kullanıma uygun demir elde etmek için demir oksitteki oksijenin ayrılması ve yabancı maddelerin uzaklaştırılması gerekir (Yeğin, 2020). Bu amaçla yüksek fırını olarak adlandırılan fırınlar kullanılmaktadır. Kok kömürünün karbonu ile demir cevherinin içindeki oksitler yüksek fırında 1500°C sıcaklıkta birleşerek CO_2 ve CO gazları halinde fırını terk eder (Yaddollahı, 2013; Emre, 2023). Geride eriyik durumda demir ve eriyik olarak yabancı maddeler (cüruf) kalmaktadır. Eriyik halde CaO, SiO_2 ve Al_2O_3 gibi oksitleri içeren cüruf suda ani olarak soğutulunca, iri kum taneleri boyutunda amorf yapıya dönüşerek, granüle bir yapı ortaya çıkar. Granüle yapıdaki bu parçacıklar öğütülerek ince taneli bir hale getirilirler (Topal, 2020). Şekil 3, demir cevherinin ergitilmesi sonucunda oluşan yüksek fırın cürufuna (YFC) ait üretim sürecini göstermektedir. YFC erken yaşlarda yüksek çimentolu aktivite göstermesi için portland çimentosuna kıyasla daha ince öğütülmektedir. Öğütülmüş YFC'nin inceliği, YFC'nin beton kompozitlerde erken dayanım gelişimini ve su ihtiyacını etkileyen çok önemli bir parametredir. Bilindiği gibi çimentoya benzer şekilde puzolanlarında inceliği arttıkça reaksiyon aktivitesi artmaktadır (Yıldız, 2023).

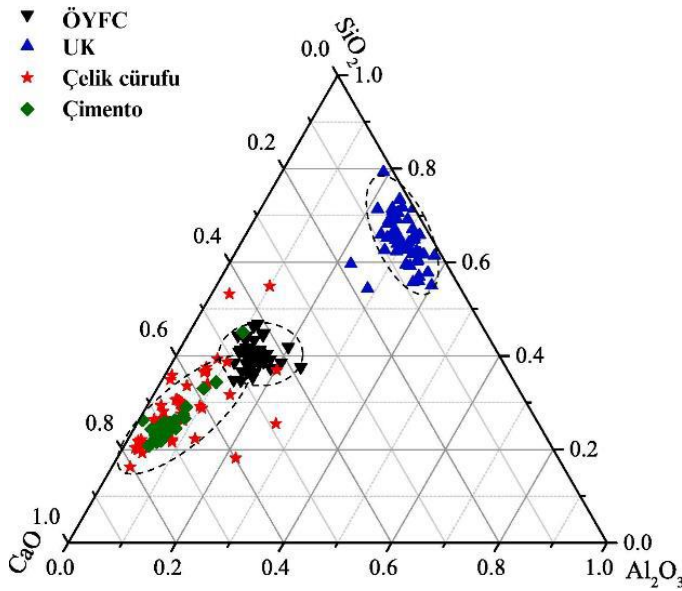
YFC'nin soğutulma yöntemi, elde edilecek malzemenin hem fiziksel ve kimyasal özelliklerini hem de kullanım alanlarını doğrudan etkilemektedir. Uygulanan ilk yöntemlerden biri olan havada soğutma işleminde, YFC doğal atmosfer koşullarında yavaşça soğutulur. Bu süreç sonucunda camsı fazı düşük ve iri kristalli bir yapıya sahip malzeme elde edilir. Bu tür cüruf, genellikle kırılarak beton ve asfalt agregası ya da zemin stabilizasyon malzemesi olarak değerlendirilir. Diğer bir yöntem olan genleştirme işleminde ise YFC, belirli oranlarda su, basınçlı hava ve buhar ile temas ettirilerek soğutulur. Bu işlem sonucunda gözenekli ve iri kristalli bir yapı oluşur; düşük yoğunluğu nedeniyle bu malzeme, hafif beton üretimi gibi alanlarda tercih edilir. Granülasyon işleminde ise, genleştirmeye kıyasla daha fazla miktarda su kullanılarak ani soğutma gerçekleştirilir. Bu hızlı soğutma sonucunda, amorf yani camsı fazca zengin, kum benzeri yapıya sahip ve hidrolik özellik gösteren granüler bir malzeme meydana gelir. Bu ürün daha sonra öğütülerek "öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu" (ÖYFC) elde edilir (Engin, 2015).



Şekil 3. Yüksek fırın cürufu üretim süreci

1.5. YFC'nin Kimyasal Kompozisyonu

YFC'nin kimyasal kompozisyonu CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve MgO olmak üzere esasen 4 farklı bileşenden oluşmaktadır. Cürufların hidrolik aktivitesi, içerisindeki CaO , Al_2O_3 ve MgO miktarındaki artış ile yükselirken, SiO_2 içeriğinin artması ile bu değer azalmaktadır. Çeşitli formülasyonlar kullanılarak, YFC'nin hidrolik aktivite (HA) tahminini yapmak mümkündür. En yaygın kullanılan bağlantı $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$ oranı olarak bilinir. Bu formül için her ülke farklı oranları kabul etmiştir. Örneğin Almanya 1,0 oranı kabul edilirken, Japonya da bu oran 1,4 kabul edilmiştir. Şekil 4'te çelik cürufu, çimento, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ve uçucu kül (UK)'ün $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ üç fazlı diyagramı verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, ÖYFC ve çimentonun genel olarak aynı alanda bulunduğu söylenebilir. Ancak, su ile karışımı esnasında ÖYFC'nin çimento'ya kıyasla reaksiyon hızının çok daha yavaş gerçekleştiği söylenir. ÖYFC'nin çimento ile birlikte reaksiyonu ise çimentonun hidratasyonu sırasında açığa çıkan hidroksil iyonlarına ve çimento içeriğindeki alkali iyonların amorf cüruf yapısını çözmesine bağlı olarak değişmektedir (Yıldız, 2023).



Şekil 4. CaO-SiO₂-Al₂O₃ üç fazlı diyagramı (Yıldız, 2023).

1.6. Uçucu Küller

Ülkemizdeki elektrik enerjisinin üretimi, çoğunlukla kömürle çalışan termik santrallerden, hidroelektrik santrallerden ve son yıllarda yaygınlaşan doğalgaz santrallerinden karşılanır. Termik santrallerde kömürün yanması sonucunda oluşan ve baca gazlarıyla sürüklenen mikron boyutundaki küller, elektro filtrelerle tutulmakta ve bu küllerin atmosfere yayılması engellenmektedir. Yanma sonrasında atık madde olarak ortaya çıkan bu küllere uçucu kül (UK) denilmektedir (URL-3, 2023).

Termik santrallerde hidrokarbon yapısındaki kömürün yakılması sonucunda oluşan bu küllerin büyük bir miktarı çok ince olmaları nedeniyle, gazlarla birlikte dışarı çıkma eğilimi göstermektedir. Endüstriyel bir atık olan uçucu küle, son yıllarda özellikle inşaat sektörü uygulamalarında rastlanılmaktadır. Amorf yapıya sahip ve çok ince taneli bu puzolanik malzemeler, nemli ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek sertleşen hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahiptirler (Köker, 2019).

İnşaat sektörü uygulamalarında UK kullanımıyla alakalı gerek laboratuvar gerekse arazi çalışmaları devam etmektedir. Devam etmekte olan çalışmalar, uçucu küllerin beton üretiminde ve yolların inşasında kullanılabileceğini göstermektedir. Aynı zamanda, termik ısı santrallerinde üretilen atık UK malzemelerinin değerlendirilmesi ile çevre zararlarının önüne geçilebileceği de vurgulanmaktadır (Emre, 2023). Termik santrallerde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan taş kömürünün % 10-15'i, linyit kömürünün ise % 20-40'ı külden oluşur. Bir termik santralde 1 kWh elektrik enerjisi üretimi sırasında

yaklaşık 110 gram kül atığı olduğu tahmin edilmektedir. Bu bağlamda, kurulu gücü 1000 MW olan bir santralin yıllık faaliyetinde yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü ortaya çıkmaktadır. Bu miktarda bir külün depolanabilmesi için yılda ortalama 60.000 m², santralin öngörülen 30 yıllık işletme süresi boyunca ise yaklaşık 1.800.000 m²'lik bir alana ihtiyaç duyulmaktadır. Termik santrallerde kömürün öğütülerek yakılması sonucunda üç farklı kül tipi elde edilmektedir. Bunlar:

Taban külü: Nispeten iri taneli olup, baca gazlarıyla taşınamayan ve doğrudan kazan tabanında biriken kül türüdür.

Ham kül: Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün su ile soğutulup ortamdan uzaklaştırılması sonucu elde edilen kül çeşididir.

Uçucu kül: Çok ince yapılı olup, yanma esnasında baca gazlarıyla birlikte taşınan ve genellikle elektrofiltrelerle toplanan kül türüdür (Kaya, 2016).

ASTM C618 standartları göre, F ve C sınıfı olmak üzere iki farklı UK bulunmaktadır. C sınıfı uçucu küller genellikle linyit veya alt bitümlü kömürden üretilir. Bu sınıf uçucu kül hem puzolanik hem de değişen derecelerde kendinden çimentolu özelliklere sahiptir. C Sınıfı uçucu küllerin çoğu %15'ten fazla CaO içerir, ancak bazı C sınıfı uçucu küller %10'a kadar az CaO içerebilirler. C sınıfı uçucu küller ağırlıklı olarak oldukça reaktif olan kalsiyum alümino-silis camı içerir. C sınıfı küldeki kristal fazlar şunları içerir: kuvars, kireç, müllit, gehlenit, anhidrit ve C₃A, C₂S ve C₄A₃S gibi çimento malzemeleridir. Bunlar ağırlıklı olarak (%70) puzolanik aktivitenin belirleyici faktörü olan kristal olmayan silikadır. Kristalin mineralleri genellikle kuvars, müllit ve spinel manyetitten oluşur. F sınıfı uçucu küller ise genellikle daha düşük CaO içeriğine sahiptir. Normalde antrasit veya bitümlü kömürün yakılmasıyla üretilirler. Bu uçucu kül sınıfı puzolanik özellik sergiler ancak nadiren kendi kendine sertleşme özelliği gösterir (Belle vd., 2018). F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürün yakılmasıyla elde edilir ve bu tür küllerin kimyasal bileşiminde SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ toplam oranı %70'in üzerinde, CaO içeriği ise %10'un altındadır. Bu nedenle, F sınıfı küller düşük kireçli olarak tanımlanır ve belirgin puzolanik özellik gösterirler. Öte yandan, C sınıfı uçucu küller linyit ya da yarı-bitümlü kömürlerin yanması sonucu oluşur. Bu sınıftaki küllerin SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ toplamı genellikle %50' nin üzerinde, CaO içeriği ise %10' dan fazladır. Bu durum, C sınıfı küllerin yüksek kireç içeriğine sahip olduğunu ve yalnızca puzolanik değil, aynı zamanda belirli bir bağlayıcı özelliğe de sahip olduklarını gösterir.

TS EN 197-1 standardına göre uçucu küller, kimyasal bileşim ve reaktivite bakımından iki gruba ayrılmaktadır: silisli (V sınıfı) ve kalkerli (W sınıfı) uçucu küller.

V sınıfı uçucu kül, çoğunlukla puzolanik karaktere sahip olup, küresel tanecikli, ince yapılı bir toz formundadır. Bu sınıftaki küller, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) içermekle birlikte, bir miktar demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri de barındırır. V sınıfı kül için reaktif kireç oranı %10'un altında, reaktif silis içeriği ise %25'in üzerinde olmalıdır.

W sınıfı uçucu kül ise hem hidrolik hem de puzolanik özellik gösterebilen ince taneli bir tozdur. Bu tür küllerin temel bileşenleri reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 olup; bunun yanı sıra demir oksit ve diğer katkı maddelerini de içerir. W sınıfı külde reaktif kireç oranı %10'un üzerinde, reaktif silis miktarı ise %25'ten fazla olmalıdır (Görür, 2015).

UK'nın sahip olduğu serbest kireç içeriği, beton örneklerinde erken priz ve daha yüksek erken yaş dayanımını beraberinde getirmektedir. Ancak, UK'deki yüksek oranlı serbest kireç ile basınç dayanımındaki gelişmenin önemi azalmaktadır. Çünkü UK'deki yüksek alkalinite beton içerisinde genişleyen (jel ürünlerinin şişmesiyle) bir alkali-silika reaksiyonunu beraberinde getirir. F sınıfı UK, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan CH (portlandit) ile reaksiyona girerek ortamdaki mevcut CH'yi bitirmek suretiyle sülfat direncini artırır. UK ile reaksiyona giren CH'ler sülfatlarla reaksiyona giremez hale gelir ve alüminosilikat-hidrat bileşiklerinin oluşumu engellenmiş olur. Fakat C sınıfı (kireç bakımından zengin) uçucu kül kendi CH'sini üretebilir bu şekilde sülfat saldırısına maruz kalma ihtimali artar. Buradan düşük kalsiyumlu UK içeren betonların yüksek kalsiyumlu UK içeren betonlara kıyasla sülfat saldırısına daha dirençlidir sonucu çıkartılabilir. Sülfat atağına benzer şekilde beton dayanıklılığını etkileyen bir diğer etken de alkali-silika reaksiyonudur (Yıldız, 2023).

1.7. Stronsiyum

Atom numarası 38 olan stronsiyum, periyodik tabloda 2A grubunda yer almakta olup; Berilyum (Be), Magnezyum (Mg), Kalsiyum (Ca), Baryum (Ba) ve Radyum (Ra) ile birlikte toprak alkali metaller sınıfında değerlendirilir (Sezer, 2018). Stronsiyum, doğada genellikle serbest halde bulunmaz; en yaygın minerali olan selestit (stronsiyum sülfat, SrSO_4) formunda yer alır. Kimyasal özellikleri bakımından Baryum ve Kalsiyum

elementlerine oldukça benzerlik gösteren bu element, çoğunlukla bu iki elementle birlikte mineralleşmiş şekilde görülmektedir.

Selestit, kalker ve kumtaşı gibi kayalar içerisinde yoğun olarak bulunur ve genellikle kayaç boşluklarında kristallenir. Ayrıca, buharlaşmanın yoğun olduğu denizel ortamlarda selestit oluşumu için uygun koşullar sağlanır. Mineralin bileşiminde yaklaşık %56.4 SrO ve %43.6 SO₃ yer almakta olup; sertliği 3-3.5, yoğunluğu ise 3.95–3.97 g/cm³ arasında değişmektedir. Renk skalası oldukça geniş olan selestit; kırmızı, yeşil, sarı, açık sarı ve mavi gibi farklı renk tonlarında bulunabilir. Kristal morfolojisi ise taneli, tabakalı, prizmatik, yassı veya toprak benzeri formda olabilir. Kimyasal çözünürlüğü açısından, sıcak asit ve bazik karbonat çözeltilerinde yavaş çözünebilen bu mineralin suda çözünürlüğü oldukça düşüktür (20 °C'de 0.0132 g/100 ml) (Koçan, 2018).

Dünya genelinde önemli selestit rezervlerine sahip ülkeler arasında Meksika, Türkiye, İspanya ve İran öne çıkmaktadır. Türkiye'deki başlıca selestit kaynakları ise Sivas ilinin Ulaş, Hafik, Kabalı, Budaklı, Demirci, Akçamescit, Tahtakeme ve Karayün bölgelerinde yer almaktadır. Türkiye'deki selestit oluşumları genellikle Oligo-Miyosen dönemine tarihlenen jipsli seviyelerde gözlenir. Bu seviyeler, tabanda konglomeralarla başlayıp üstte marn ve jips katmanlarıyla sonlanan kalın evaporitik serilerden oluşur ve pek çok ekonomik değere sahip tuz yatağını da barındırmaktadır.

Kurumakta olan denizel ortamlarda jips çökelleri ile ortamda yeterli stronsiyum konsantrasyonu oluştuğunda selestit de çökelmeye başlar. Ancak, selestit ve stronsiyanit yataklarında cevherleşmenin süreklilik göstermemesi, ekonomik kaliteye ulaşan stronsiyum oranlarının sahadan sahaya değişmesi ve içeriğinde bulunan safsızlıkların ayrıştırılmasındaki zorluklar, bu kaynakların verimli bir şekilde değerlendirilmesini güçleştirmektedir. Tablo 1, Selestit üretiminde Dünya rezervlerini göstermektedir (URL-4, 2023).

Tablo 1. Dünya Selestit Rezervleri (x1000 ton)

Meksika	İspanya	İran	Türkiye	Hindistan	Pakistan	İngiltere	Kıbrıs	Toplam
750	2000	1000	1000	1000	500	500	200	6950

1.8. Mermer Tozu

Mermer, eskiden günümüze kadar yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Mermer inşaat uygulamalarında genellikle özel dekoratif amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır. Dünya genelinde nüfus ve dolaylı olarak inşaatla yönelimin artması, son yıllarda logaritmik olarak mermer ve mermer tozu gibi atık ürünlerin kullanımını da arttırmaktadır. Türkiye'de mermer endüstrisi, ülkenin en büyük sanayi alanlarından biridir. Mermer endüstrisinde üretim süreçlerinde ortaya çıkan işlemlere bağlı olarak atık üretilmektedir. Mermer endüstrisinde yaklaşık %50 ile %60 oranlarında üretim atığı oluşabilmektedir. Bu atıklar aynı zamanda birçok çevresel toz sorununu da beraberinde getirmektedir (Chakkor, 2021). Mermer tozu atığının betonda dolgu malzemesi olarak kullanımı, numunelerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini olumlu etkilemektedir (Tammam, 2021).

İnşaat sektöründe bu ürünlerin tüketiminin sürekli artmasıyla birlikte doğal taş endüstrisi kesme ve cilalama gibi işlemlerde atık mermer tozu miktarı artmaktadır. Üretim esnasında mermer toz atıkları, çamur kıvamında su ile karışım şeklinde bulunur. Çeşitli aşamalardan geçtikten sonra bir mermer bloğunda oluşan tanecikler farklı büyüklükte olup, genellikle (%90'ı) 200 µm ve altında bir değere sahiptir (Karaşahin vd., 2024).

1.9. Titanyum Dioksit (TiO₂)

Titanyum dioksit (TiO₂), doğada yaygın olarak bulunan ve çeşitli işlemlerden geçirilerek saflaştırılan bir mineraldir. Küresel ölçekte titanyum mineral üretimi, 2000 yılında yaklaşık 4.6 milyon ton iken, 2004 yılında bu miktar 5.2 milyon tona yükselmiştir. Bu üretimin yaklaşık %95'i titanyum dioksit formunda endüstriyel hammadde olarak kullanılırken, geri kalan kısmı titanyum esaslı metal alaşımlarının üretiminde değerlendirilmektedir. Başlıca titanyum cevheri üreticileri arasında Güney Afrika (%25), Avustralya (%21), Kanada (%14), Çin (%8), Ukrayna (%7) ve Norveç (%7) yer almaktadır.

Titanyum dioksit günümüzde 170'ten fazla ülkede çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ancak, pek çok bilimsel konuda olduğu gibi TiO₂ ile ilgili de kamuoyunda farklı görüşler ve yanlış algılar bulunmaktadır. Özellikle gıda renklendiricisi olarak kullanılan formları hakkında, sağlığa zararlı olduğuna dair çeşitli iddialar gündeme gelmiştir. Buna karşın, mevcut bilimsel bulgular, titanyum dioksitin uygun koşullarda ve

belirli miktarlarda kullanıldığında insan sağlığı açısından güvenli olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, kullanım miktarları ve değerlendirme kriterleri ülkeden ülkeye farklılık göstermekte; ayrıca bazı bilimsel çalışmalarda çelişkili sonuçlara da rastlanabilmektedir (Berik, 2018). Nano-titanyum dioksit, portland çimentosunun erken yaş hidratasyonunu hızlandırarak eğilme ve basınç dayanımını iyileştirir ve betonda aşınma direncini artırır. Nano-Titanyum dioksitin karışıma eklenmesi, geopolimer betonun mikro yapısında olumlu etki gösterir ve daha az kırılmaya neden olur. Ayrıca, Nano-Titanyum dioksit karbonatlaşma direncini artırarak, büzülmeyi azaltır. Nano titanyum dioksitin geopolimer beton karışımların termal davranışlarını olumlu etkilediği sonucuna varılmıştır (Eren, 2023).

1.10. Taguchi Optimizasyon Yöntemi

1950'li yıllara kadar tarım, kimya ve ilaç sanayisinde kullanılan Taguchi yöntemi, 1950'lerin başında Genichi Taguchi tarafından geliştirilerek mühendislik uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. 1970'li yıllarda Japon sanayisindeki gelişmenin nedeni Taguchi yönteminin kullanılması olarak düşünülmektedir. Taguchi yöntemi, mühendislik tasarım ve süreçlerinin istatistiksel yöntemlerle geliştirilmesi üzerine bir optimizasyon metodudur. Taguchi, bir ürün veya sürecin kalitesinin değişken sayısında artışa bağlı olarak düştüğünü belirlemiştir. Bu nedenle, kaliteyi arttırmak için faktör olarak da bilinen tasarım parametlerinin iyi seçilmesinin önemli olduğunu vurgulamıştır. Taguchi yöntemi; sistem, parametre ve tolerans tasarımı prensibi üstüne kurulan bir deney tasarım ve optimizasyon metodudur (Saran, 2023).

Taguchi Yöntemi, birçok faktörün bağlı olduğu ürün ve sürecin kalitesini arttırmak için geliştirilmiştir. Her bir faktöre ait olabilecek tüm kombinasyonları izin verilen aralıklar içerisinde etkili bir biçimde bu test ve geliştirme stratejisi içerisinde kurulabilmektedir. Mühendislik projeleri birden fazla faktör içerdiği için, bir grubun olabilecek kombinasyonları denenemeyecek kadar geniş olmaktadır. Ayrıca zel projeler için etkili olan faktörler arasında çok fazla etkileşimin olması deneme sayısını daha da arttırmaktadır. Bunun için Taguchi zel bir tasarım geliştirmiştir. Taguchi'nin faktöriyel deneyler için özel olarak geliştirdiği bu tasarım ortogonal dizilerden oluşmaktadır. Bu tasarımların kullanılmasıyla verilen faktörlerin en az sayıda deney ile incelenmesine olanak sağlamaktadır (Pekdemir, 2022).

Taguchi felsefesi 3 basit temel kavram üzerine dayanmaktadır.

Bunlar;

- Kalite üretim aşamasında tasarlanır ve bu süreçte kontrol edilmez.
- Kalite hedefin minimum sapma ile ulaşılan en iyi sonucudur.
- Kalitenin maliyeti standart sapma ile ölçülmeli ve kayıplar sistemden ölçülmelidir (Zaimoğlu, 2003).

Bazı deney tasarımlarında ise farklı parametreler arasındaki etkileşimler de araştırma sonuçlarını etkileyebilmektedir. Bir deneydeki parametreler arasındaki etkileşimler varyans analizleri (ANOVA) ile araştırılmaktadır. Tam faktöriyel ve kısmi faktöriyel deney tasarımlarında ve analizlerinde etkileşimler genellikle dikkate alınmamaktadır. Tam faktöriyel ve kısmi faktöriyel deney tasarımlarında bazı önemli dezavantajlar bulunmaktadır. Bunlar;

- Parametrelerin ve parametre seviyelerinin çok fazla olması halinde deneylerin yapılması ve değerlendirmesi sürecinin uzun sürmesine ve çalışmaların maliyetinin artmasına sebep olur.
- Aynı deneysel çalışma için yapılan ikiden fazla tasarımlarda farklı sonuçlar elde edilebilir.
- Bu deneysel tasarımlar her bir faktörün sonuçlar üzerindeki etkisini ayrı ayrı belirleme olanağı sunmaz.
- Birden fazla faktörlü ve birden fazla seviyeli deneylerin yorumlanması da zor olabilir (Pekdemir, 2022).

Taguchi yönteminde optimizasyon kriteri olarak performans-istatistiği (Signal-noise; S/N: sinyal-gürültü oranını) kullanılmaktadır. S/N oranı, standart sapma yerine ölçülebilir bir değer olarak kullanılmaktadır. En basit hali ile S/N oranı, ortalamanın (sinyal) standart sapmaya (gürültü) oranıdır. Üç çeşit S/N oranı var, bunlar şu şekilde sıralanmaktadır: en büyük-en iyi, normal-en iyi ve en küçük-en iyidir.

Nominal en iyi olduğu durumda: Bu durumda ise, ikili toleransı olan bir karakteristiğimiz olduğunda nominal değer hedeftir. Yani bütün parçalar bu değere getirilirse, varyasyon sıfır olur ve en iyisidir. Hedef değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranını ifade eder. Örneğin: ürün boyutları gibidir. Normal en iyi S/N için kullanan Eşitlik 2'de verilmektedir.

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_o)^2 \right) \quad (\text{Eşitlik 2})$$

En küçük en iyi olduğu durumda: Bu tür problemlerde, Y'nin hedef değeri sıfırdır. En küçük değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranını ifade eder. Örneğin gürültü, zararlı maddeler, kirlenme, yüzey pürüzlülüğü, lastik aşınması ve proses arızası vb. En küçük en iyi S/N için kullanan Eşitlik 3'te verilmektedir.

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i)^2 \right) \quad (\text{Eşitlik 3})$$

En büyük (yüksek) en iyi olduğu durumda: Bu durumda ise, Y'nin değeri sonsuzluk olarak ideal bir hedefi olan negatif olmayan ölçülebilir bir özelliktir. En büyük değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranını ifade eder. Örneğin güç, beton dayanımı ve verim vb. En büyük en iyi S/N için kullanan Eşitlik 4'te verilmektedir (Liban, 2022).

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1/Y_i^2) \right) \quad (\text{Eşitlik 4})$$

Eşitlik 2, Eşitlik 3 ve Eşitlik 4 kullanılarak elde edilen 'n' deney sayısını, 'Yi' optimizasyon için hedeflenen yanıt değişkenini, 'Yo' yanıtların ortalamasını temsil etmektedir. Eşitlik 2, Nominal kombinasyonun optimizasyon için en uygun olduğunu, Eşitlik 3 daha küçük daha iyidir optimizasyonunu, Eşitlik 4 ise en büyük değerlerin optimizasyonunun en uygun olduğunu 'daha büyük daha iyidir' vurgular.

Bu çalışmada kullanılan ortogonal dizi, 27 farklı deney noktasında gerçekleştirilmiştir. Sinyal/gürültü (S/N) oranı kullanılarak gereksiz denemeler azaltılmış olunmuştur. Sinyal terimi istenilen değeri veya yanıt değişkenini, gürültü terimi ise istenmeyen değeri veya standart sapmayı gösterir. Bu orandaki yanıt değişkeni, varyasyon seviyesini ölçmek için bir metrik görevi görür. Amaç ise bu oranı optimize etmek veya maksimize etmek ve bu şekilde istenmeyen varyasyonların veya gürültü etkisini en aza indirmek ve sinyal kalitesini arttırmaktır.

1.11. Filamentler ve 3B Baskı

Filamentler, 3B baskı işlemlerinde kullanılan temel üretim malzemeleridir ve çeşitli plastikler, kimyasal bileşenler ile organik hammaddelerden üretilir. Bu malzemeler, 3 boyutlu yazıcılar için uygun çap ve uzunlukta makaralar üzerine sarılmış şekilde piyasaya sunulur. Genellikle filamentler, 0.5-2 kilogram arasında değişen ağırlıklarda ve yaklaşık 330-340 metre uzunluğunda makaralarda bulunur (Şekil 5). Kalınlık açısından ise en yaygın olanları 1.75 mm ve 2.85-3.00 mm çaplarında üretilir; bunların arasında 1.75 mm olan tip daha fazla tercih edilmektedir. Çoğu marka filamentin ağırlığı ve uzunluğu birbirine yakındır, bu da kullanıcıların malzeme seçiminde standartlık sağlar. 3B yazıcılarda kullanılan filamentler, ısıtıldığında yanmak yerine eriyerek şekillenen termoplastik polimerlerdir. Bu özellikleri sayesinde, filamentler ısıtılarak istenilen form verilmekte ve soğutulduğunda ise katı hale gelerek kalıcı bir yapı oluşturmaktadır (URL-5).

Filament, termoplastik malzemelerin 3B yazıcılar için özel olarak şekillendirilmiş formudur. Temelde, granül haldeki plastik malzeme çeşitli işlemlerden geçirilerek ince bir tel haline getirilir. Daha sonra bu plastik tel, bobin şeklinde bir makara üzerine sarılır. Görünüşte basit gibi duran bu üretim süreci, granülden filament üretimine ve ardından sarım aşamasına kadar dikkatli ve kontrollü işlemler gerektirir. Filamentin 3B yazıcıda sorunsuz ve düzenli bir şekilde akması, baskı kalitesini doğrudan etkileyen en kritik faktörlerden biridir (URL-6). Gerek endüstride gerekse işletmelerde Fused Deposition Modeling (FDM), Multi Jet Fusion (MJF) ve Selective Laser Sintering (SLS) gibi 3B baskı teknolojilerinin kullanıldığı bilinmektedir. En çok kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan FDM yönteminde, makaraya sarılı bir filament, ittiriciler yardımıyla hareket ettirilerek belirli sıcaklıkta ve üzerinde sıcaklık kontrol ünitesi bulunan nozülde geçirilerek ergitilerek, levha üzerinde biriktirilir. Günümüzde Polilaktik Asit (PLA), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), Polietilen Tereftalat (PETG) gibi termoplastik özelliklere sahip polimer yapıda birçok filament bulunmaktadır. Bu filamentlerin bir kısmı endüstride kullanıldığı gibi, büyük bir kısmının ise genellikle basit tasarım uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak, endüstrinin ihtiyaç duyduğu yüksek dayanım, yüksek aşınma direnci ve sertlik gibi birtakım fiziksel ve kimyasal özelliklerin katkılı filamentler ile karşılandığı görülmektedir. Çalışmada, termoplastik malzemelerden üretim esasına dayanan katkısız, cam takviyeli ve karbon takviyeli filamentler, endüstriyel FDM yöntemi ile üretim yapan yazıcılarda kullanılmıştır. 3B

baskının benzersiz faydaları arasında serbest biçimli işleme, uygulanabilir ve aynı zamanda etkili üretim ve konseptten üretime kadar geçen sürenin geleneksel veya eksiltici üretime göre daha kısa olması sayılabilir. Katmanlı üretim sürecinde karmaşık bir bileşeni daha basit ve hızlı hale getiren hızlı, esnek, uygun maliyetli ve sıklıkla kullanılan 3B baskı teknolojisi, erimiş biriktirme modellemesi (FDM) veya erimiş filament fabrikasyonudur. FDM ve 3B baskı, karmaşık şekillerdeki parçaları üretmek için yüksek hız ve düşük maliyetli süreçleri nedeniyle son yıllarda popülerlik kazanmıştır (Amrita vd., 2022). Katmanlı üretim teknikleri, malzemeleri uygun şekilde yönetirken çeşitli karmaşık şekiller ve yapılar oluşturabilir, bu da geleneksel üretime göre daha az atık ve çeşitli diğer avantajlarla sonuçlanır ve giderek daha popüler hale gelir. Teknik olarak FDM tekniği, üretim açısından enjeksiyon kalıplama ile aynı role sahiptir. Örneğin, kitlesel özelleştirme, bir dizi kişiselleştirilmiş ürün üretmek anlamına gelir, böylece seri üretim nedeniyle düşük fiyatlar korunurken her ürün farklı olabilir. Özelleştirilmiş ürünler için kalıp ve alet yapmanın ek maliyetlerine ihtiyaç duymaz. FDM üretim sürecinin temel konsepti, hammaddeyi eritmek ve yeni şekiller oluşturmak için şekillendirmektir. Malzeme bir ruloya yerleştirilen, bir tahrik tekerleği tarafından çekilen ve daha sonra sıcaklık kontrollü bir nozul kafasına yerleştirilen ve yarı sıvıya kadar ısıtılan bir filamenttir. Nozul, katman katman yapısal elemanlar üretmek için malzemeleri ultra ince bir katman halinde hassas bir şekilde ekstrüde eder ve yönlendirir (Kristiawan vd., 2021).

Kafes donatılı geopolimer kompozit yapılarda basınç dayanımı özelliklerinin sorgulanması ve geliştirilmesi, bu yapıları gelecekte daha önemli hale getireceği oldukça açıktır. Bunun yanında kafes yapılarının numunelere tek eksenli maksimum basınç taşıma kapasitelerini ve deformasyon kapasitelerini iyileştirmelerinin yanı sıra, elastik deformasyon aşamasındaki hasarları minimize ettiği doğrulanmıştır (Hao vd., 2023). Korozyon ortamlarda çalışılan çelik ürünlerinin yerine alternatif bu ürünlerin geliştirilmesinin, korozyon dayanımı ile kullanım ömrü, enerji tasarrufu, enerji salınımları ve yeşil binaların geliştirilmesi gibi konularda önemli katkılar oluşturacaktır.



Şekil 5. Filamentlere ait görüntü

1.12. Literatür Çalışması

1.12.1. Geopolimer İle İlgili Çalışmalar

Chindaprasirt vd. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geopolimer bağlayıcı olarak taban külü ile uçucu külün farklı aktivatörler eşliğinde kullanımı amaçlanmıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmada aktivatör olarak kullanılan NaOH çözeltisi, üç farklı molaritede (5M, 10M ve 15M) ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ kütleli olarak 1.5 oranında kullanılmıştır. Artan molarite (15 M için) değerleri ile viskozite artışının matris yapıyı yoğunlaştırdığı ve bu durumun da silis ve alümin süzelmesini engellediği tespit edilmiştir. Basınç dayanımları kıyaslandığında ise, uçucu kül numuneleri için maksimum 35 MPa, taban külü numuneleri için ise 18MPa olduğu tespit edilmiştir.

Geopolimer beton, sıvı alkali ile silika-alümina bakımından zengin bir kaynak hammaddenin reaksiyonundan oluşan yapıya verilen isimdir. Kısa ve uzun vadeli test verileri ile büyük ölçekli donatılı geopolimer yapılar göstermektedir ki; bu ürünler alt yapı sistemlerinde de kullanımının olacağı şeklindedir. 60 °C kür sıcaklığında hazırlanan 100x200 mm boyutlarında silindir numuneler üzerinde farklı kür süreleri için, zamana bağlı basınç dayanımlarında bir artış tespit edilmiştir. 96 gün sonunda en yüksek basınç dayanımının yaklaşık 81 MPa olduğu belirtilmektedir (Lloyd ve Rangan, 2010).

Çeltik üreten ülkelerde, pirinç kabuğu gibi öğütme işlemleriyle çok fazla miktarlarda üretim gerçekleştirilir. Pirinç kabuğu külü bir yakıt gibi kazan sistemlerinde kullanılabilir. Yüksek miktarlarda biyogenik silika, sürdürülebilir yapı elemanı olarak kullanılabilir. İyi bir puzolanik reaktiviteye sahiptir. Geopolimerler üretiminde pirinç kabuğu külünden de yararlanmak mümkündür. Bu yöntem ile CO_2 emisyon salınımının azaltılması, iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip atıklardan üretilebilir

yeni ürünlerin elde edilmesine imkan sağlar. Pirinç kabuğu külü ilavesinin priz süresi, basınç dayanımı, dayanıklılık, işlenebilirlik, gibi temel özellikleri araştırılmıştır (Wansom vd., 2010).

Binici vd. (2012) çalışmalarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis kumu ve pomzanın NaOH ile aktive edilerek geopolimer beton üretiminde kullanımı araştırılmıştır. Bu kapsamda, 4x4x16 cm ve 10x10x10 cm boyutlarında geopolimer harç numuneleri hazırlanmış ve 20 saat süreyle 100°C ile 150°C arasındaki sıcaklıklarda etüvde kür edilmiştir. Deney sonuçları, su emme oranı açısından en başarılı numunenin yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer beton olduğunu göstermiştir. Ayrıca, su emme oranı yüksek olan örneklerin ultrasonik ses geçiş hızlarının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufu kullanılan geopolimerlerin hem eğilme hem de basınç dayanımı açısından en üstün performansı sergilediği tespit edilmiştir. Ultrasonik ses geçiş hızları ile basınç dayanımı arasında pozitif bir ilişki olduğu, bu durumun ise daha az gözenekli yapıdaki geopolimerlerin daha yüksek basınç dayanımı sağladığını ortaya koymaktadır.

Yapılan bir başka çalışmada ise geopolimer betonun 7 günlük basınç dayanımının 35-40 MPa değerlerine kadar ulaşabileceği gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, geopolimer betonda erken dayanımın geleneksel betondan daha hızlı gerçekleştiği vurgulanmıştır (Olivia ve Nikraz, 2013).

Chi vd. (2013) yaptıkları araştırmada, farklı oranlarda yüksek fırın cürufu ve uçucu kül karışımı ile aktive edilen harçların basınç ve eğilme dayanımı, kuruma büzülmesi ile su emme özelliklerini değerlendirmişlerdir. Aktivasyon için ağırlıkça %4 ve %6 sodyum oksit (Na_2O) konsantrasyonu kullanılmış ve buna kütsel oranda sıvı sodyum silikat eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar, alkali aktivatörle aktive edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu kül harçlarının, Portland çimentoya göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve su emme gibi özelliklerde (kuruma büzülmesi hariç) daha üstün performans sergilediğini göstermiştir. Özellikle, %4 Na_2O içeren numunelerde eğilme dayanımı 9.32 MPa olarak bulunurken, %6 Na_2O içeren örneklerde bu değer yaklaşık %10 ila %16 arasında arttığı gözlemlenmiştir.

Adak vd. (2014) çalışmalarında, uçucu kül bazlı geopolimer beton/harç aktivatörün molar konsantrasyonuna bağlı olarak erken dayanım geliştirmeleri için ısı aktivasyonuna ihtiyaç duyduğunu raporlamıştır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için 3 farklı oranlarda nano silis ilavesi ile 8M, 10M ve 12M konsantrasyona sahip düşük kalsiyumlu uçucu kül geopolimeri deneysel olarak incelemiştir. Burada nano silis ilavesi, uçucu külün %0, %4,

%6, %8 ve %10'nu oluşturmaktadır. Özellikle %6 nano silis ilaveli geopolimer harcın ortam sıcaklığında 28 günde basınç, eğilme ve çekme mukavemetlerinde dikkate değer gelişmelerin olduğu vurgulanmıştır. Nano silika ile modifiye edilmiş geopolimer harcının bu gelişimi, amorf bileşiğin kristalli bileşiğe dönüştürülmesinden kaynaklandığı ifade edilmektedir.

Tsai vd. (2014) portland çimentolu kontrol numunesi ile 11 farklı çelik/demir cüruf karışımı harç numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmada, mekanik ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. 91 günlük yaşta çelik/demir cürufuna ait basınç dayanımı kontrol numuneleri ile kıyaslandığında, %80-%90 oranına ulaştığı görülmüştür. Su kürü uygulanan çelik/demir cüruf karışımı harçlarda serbest CaO ya da Ca(OH)_2 konsantrasyonlarının arttığı ve güçlü bir mikroyapı ve dayanım oluşturan kalsiyum alüminyum silikat hidrat (C-A-S-H), kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum-magnezyum alümina-silikat (C-M-A-S) gibi kristaller oluştuğu belirtilmektedir.

Görhan ve Kürklü (2014) çalışmalarında, termik santralden temin edilen F sınıfı uçucu külün geopolimer harç üretiminde kullanımını incelemişlerdir. Bu amaçla, NaOH aktivatörünün üç farklı molaritesi (3M, 6M ve 9M) ile farklı kür sıcaklıklarında (65 °C ve 85 °C) ve sürelerinde (7 günlük kür) harç numuneleri hazırlanmıştır. Yapılan eğilme ve basınç dayanımı testlerinin yanı sıra bazı fiziksel özellikler de analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kür süresi ve sıcaklığının geopolimer harçların performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, basınç dayanımlarının NaOH konsantrasyonunun artmasıyla birlikte yükseldiği tespit edilmiştir.

Phoongernkham vd. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada ise, sodyum hidroksit ve sodyum silikat aktivatörlerinin uçucu kül ve yüksek fırın cüruf bağlayıcıları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 3 farklı çözelti hazırlayarak uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve bunların karışımları denenmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarının farklı geopolimer numuneler için 42.8 MPa, 171.7 MPa ve 114.5 MPa olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar üzerinde reaksiyon ürünlerinin, alkali aktivatörler türlerinin ve reaksiyon şartlarının oldukça önemli olduğu belirtilmiştir. Büyük miktarlarda kömür uçucu külünün üretimi ve bunun çevresel etkisi nedeniyle bu ürünün alternatif kullanımları da araştırılmaktadır. Yeni bağlayıcı madde olarak alternatif hammadde kaynağı uçucu külün kullanımına ilişkin önemli adımlar atılmaktadır. Bunlar arasında en önemli yapı malzemeleri geopolimerler veya alkali ile aktifleştirilmiş malzeme türleridir.

Deb vd. (2015) yaptıkları çalışmada, uçucu kül temelli geopolimer karışımında nano silisin bağlayıcılık etkisini araştırmışlardır. Nano silis %3 ve altındaki karışım oranlarında (%0, %0.5, %1 - %1.5, %2 ve %2.5) kullanılmıştır. Bu oranlar içerisinde % 2 ve üzerinde nano silis içeren karışımlarda basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Burada, nano silislerin mikro yapıyı daha kompakt ve yoğun bir hale getirerek, mukavemet artışına neden olduğu belirtilmiştir.

Mijarsh vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, işlenmiş palm yağı yakıt külünün geopolimer harcın basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada harç, işlenmiş palm yağı yakıt külü ve mineral katkılı maddelerin ((Ca(OH)₂, Al(OH)₃, ve Silis Dumanı (SD) karışımı kullanılarak hazırlanmıştır. Aktivatör olarak ise NaOH (Sodyum Hidroksit) ve Na₂SiO₃(Sodyum silikat) kullanılmıştır. Farklı toplam oksit molar oranlar ile örnekler basınç dayanımı için test edilmiş olup, Ca(OH)₂ ile ikameli işlenmiş palm yağı yakıt külünün erken yaş basınç dayanımının önemli ölçüde iyileştiği vurgulanmıştır. İşlenmiş palm yağı yakıt külünün Al(OH)₃ ve SD ile modifikasyonu sonucu, 3 ve 28 günlerde sırasıyla %200.90 ve %175.22 oranında nispi basınç mukavemeti elde edildiği bildirilmiştir. Ayrıca, 28. günde oluşan C-S-H ve N-A-S-H bağlayıcı jellerin, 120 gün sonunda en stabil yapı olan C-A-S-H tipi jele dönüştüğü vurgulanmıştır.

Granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) geopolimer harç üretiminde bağlayıcı ve agrega olarak kullanılabilirliği araştırılan bir çalışmada, oda sıcaklığında kür işlemi uygulanmıştır. Likit/bağlayıcı (l/b) oranı 1 ve 0.7 olarak belirlenmiş; alkali aktivatör olarak NaOH ve sodyum silikat (SS) dört farklı oranla (2:1, 1:2, 3:0, 0:3) kullanılmıştır. 28. gün sonunda basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, görünür porozite, birim hacim ağırlık ile X-Ray Diffraction (XRD) , X-ışını floresansı (XRF), Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektrometresi (EDX) analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, oda sıcaklığında kür ile GYFC agrega ve öğütülmüş GYFC bağlayıcı kullanılarak geopolimer harç üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir. En yüksek eğilme dayanımı (5.1 MPa) 2:1 oranında NaOH ve SS içeren, l/b oranı 0.7 olan numunelerde; en yüksek basınç dayanımı (29.1 MPa) ise sadece NaOH (3:0) kullanılan ve l/b oranı 0.7 olan harçlarda elde edilmiştir. Granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) ana bağlayıcı ve agrega olarak kullanıldığı çalışmalarda düşük enerji tüketimi konusu da üzerinde durulan önemli konu başlıkları arasındadır (Kürklü, 2016).

Son dönemlerde çimento esaslı kompozitler kavramı, mühendislik esaslı geopolimer kompozitler olarak genişletilmiştir (Cheah vd., 2019; Eryılmaz vd., 2023;

Kubba vd., 2018; Ling vd., 2016; Pehlivan, 2023). Bu bağlamda Ling vd. (2016) tarafından yapılan bir başka çalışmada düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu kül, elyaf takviyeli geopolimer kompozit ve yüksek fırın cürufu ile geliştirme yoluna gidilmiştir. Uçucu kül yerine ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında cüruf kullanılmıştır. Cüruf karışımı numuneler, cüruf içermeyen numunelere kıyasla (uçucu kül-%0 cüruf) daha yüksek ilk çatlama mukavemetine, daha yüksek çekme elastikiyetine ve daha yüksek nihai çekme mukavemetine sahip iken, daha düşük çekme gerinim kapasitesine, daha düşük tokluğa ve daha düşük gerilim indeksine sahip olduğu belirtilmiştir. Sonuçlar, uçucu kül yerine daha fazla cüruf kullanıldıkça, numunenin daha güçlü ancak daha kırılğan hale geldiğini vurgulanmıştır.

27 °C ve 80 °C'de sentezlenen volkanik kül esaslı geopolimer harçların dayanıklılık ve mekanik özelliklerini incelenen çalışmada, 28 güne kadar su absorpsiyonu ve porozitenin belirgin şekilde arttığı, sonrasında ise sabit kaldığı gözlemlenmiştir. 27 °C'de kürlenmiş numunelerin kütle yoğunluğu zamanla azalırken, 80 °C'de bu değer önemli ölçüde değişmemiştir. 27 °C'deki numuneler 28 gün sonunda 20.5 MPa basınç dayanımına ulaşırken, 80 °C'de 90 gün sonunda maksimum 37.9 MPa dayanım elde edilmiştir. Ayrıca, 27 °C'de kürlenmiş geopolimerler sülfürik aside karşı %5 daha yüksek direnç göstermiştir. Aside maruz kalan numunelerde kalsiyum ile sülfürik asit reaksiyonu sonucu alçıtaşı oluşurken, 27 °C'deki numunelerde Na bakımından zengin jel asit direncini artırmaktadır (Djobo vd., 2016).

Naskar ve Chakraborty (2016) çalışmalarında, çevresel etkileri azaltmak amacıyla düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül bazlı geopolimer beton üretmişlerdir. Uçucu külün yerine farklı oranlarda nano malzemeler ekleyerek (%0.75, %3 ve %6 nano silis; %0.02 karbon nanotüp; %1 titanyum dioksit) çeşitli karışımlar hazırlamışlardır. Basınç dayanımı test sonuçları, nano silis ve karbon nanotüp katkılarının 7. ve 28. günlerde basınç dayanımına anlamlı bir artış sağlamadığını göstermiştir. Ancak %1 oranında titanyum dioksit katkısının 7. ve 28. günlerde sırasıyla, %33 ve %47 oranında basınç dayanımını artırdığı belirlenmiştir.

Yaprak ve Kaplan (2016) çalışmalarında, mineral katkı olarak taban külü (TK) ve yüksek fırın cürufu (YFC), alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit (NaOH, SH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_4 , SS) kullanılmıştır. Taban külü oranları %0, %25, %50, %75 ve %100, sodyum silikat oranları ise %25, %50 ve %75 seviyelerinde belirlenmiştir. Geopolimer harç numuneleri 20 °C, 30 °C ve 50 °C'de farklı sürelerde kürlenmiş, ardından

eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Kür sıcaklığının artmasıyla mekanik özelliklerde belirgin iyileşmeler gözlenmiştir. Ayrıca taban külü oranının artması, sodyum hidroksit miktarının da artmasına yol açmaktadır. Özellikle %50 TK + %50 YFC karışımının %25 SS ile aktive edilmesiyle elde edilen geopolimer harçların, endüstriyel atıkların çevresel etkilerinin azaltılmasına ve sürdürülebilirliğe önemli katkı sağladığı vurgulanmıştır.

Mahmut ve Emiroğlu (2016) çalışmalarında, çimento inceliğinde öğütülmüş Elazığ ferrokrom cürufunu NaOH ve Na_2SiO_3 alkali aktivasyonu altında geopolimer yapıya dönüştürmüşlerdir. Harçlar 40 °C, 65 °C ve 90 °C aktivasyon sıcaklıklarında ve 6M, 9M ile 12M molariteye sahip alkali aktivatörlerle, 1, 2 ve 4 günlük kür süreleriyle üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, çimento kullanılmadan yalnızca Elazığ ferrokrom cürufunun bağlayıcı olarak kullanıldığı numunelerde 15 MPa'nın üzerinde basınç dayanımı sağlayan geopolimer harçların üretilebileceği görülmüştür.

Najimi vd. (2016) tarafından yapılan bir başka çalışmada, uçucu kül bazlı alkali aktive edilmiş harçlar ile doğal puzolan bazlı harçların özellikleri kıyaslanmıştır. Alkali aktivatör olarak farklı konsantrasyonlarda (2.5M, 5M, 7.5M, 10M ve 12.5M) sodyum hidroksit kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; uçucu külün uygun bir aktivasyon için gereken minimum alkali konsantrasyon seviyesi doğal puzolana göre daha düşüktür, ancak doğal puzolanın aktivasyon hızı daha yavaştır. Alkali ile aktive edilen harçlar, portland çimento harçlarına kıyasla daha düşük dayanım sergilemiştir. Bununla birlikte, 7.5 M ile 12.5 M arasındaki sodyum hidroksit molariteli harçların yapısal uygulamalar için daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ekaputri vd. (2017) çalışmalarında, metakaolin temelli geopolimer harçların mekanik özellikleri incelenmiş, hacimce %0 ile %1 arasında değişen polivinil alkol (PVA) fiber katkısının etkisi araştırılmıştır. Buhar kürü uygulanmayan 56 günlük lifli numunelerin basınç dayanımı 67.29 MPa olarak ölçülmüştür. Ayrıca, kür sıcaklığının 80 °C'nin üzerine çıkarılmasıyla birlikte, 28 günlük mukavemette %14'ten fazla artış gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı ise, 80 °C kür sıcaklığında ve %1 fiber katkılı karışımda elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca, nano silisin Portland çimento karışımlarında mikroyapı ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanıldığına dikkat çekilmiştir.

Gao (2017) çalışmasında, çözelti olarak kullandığı sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımlarını 5 farklı geopolimer yapı için analiz etmiştir. Bu geopolimer yapıların

cüruf/uçucu kül oranlarının %30, %40, %50, %60 ve %70, %60-%40 ve %50-%50 (kütlece) olduğu karışımlarda, su/bağlayıcı oranını 0.35 olarak seçmiştir. Çalışmada, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının ise sırasıyla, 82.20 MPa ve 100.90 MPa (90/10 cüruf/uçucu kül oranında) olduğu ve karışım içerisinde ki artan uçucu kül oranı ile basınç dayanımlarının düştüğü belirlenmiştir.

Wongsa vd. (2017) yaptıkları çalışmada, katı atık fırını olarak adlandırılan ünite MSWI geopolimer tabanlı uçucu külün özellikleri üzerinde taban külü ile yüksek kalsiyumlu uçucu külün yer değiştirme etkisi incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, %20 MSWI taban külü yer değişiminde en yüksek basınç dayanımının elde edildiği (7 günlük 52.8 MPa) tespit edilmiştir ve ayrıca, MSWI taban külü %40 gibi seviyelerde uçucu külün yerine kullanılabileceği görülmüştür.

Ban vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, geleneksel alkali aktivatörler kullanılmadan kereste üretiminden elde edilen yüksek kalsiyum içeriğine sahip ağaç külü ile uçucu külün harmanlanması yoluyla aktif uçucu kül bazlı geopolimerin uygulanabilirliği incelenmiştir. Çalışmada, ağırlıkça %50'den başlayarak %10'ar artışlarla %100'e kadar değişen oranlarda yüksek kalsiyumlu ağaç külü ve uçucu kül karışımları değerlendirilmiştir. Özellikle %50 ve %60 karışım oranlarında, yüksek düzeyde gerçekleşen puzolanik reaksiyona bağlı olarak mekanik dayanım performansında artış gözlenmiştir.

Bir grup araştırmacı (Shang vd., 2018), uçucu kül (UK) ve granüle öğütülmüş yüksek fırın cürufunu (GÖYFC) geopolimer çimento sentezinde kullanmıştır. Altı farklı UK/GÖYFC oranına sahip geopolimer harçlar, işlenebilirlik, priz süresi, mukavemet gelişimi, hacim stabilitesi ve klorür geçirgenliği açısından Portland çimentosu (OPC) ve magnezyum potasyum fosfat çimentosu (MKPC) ile karşılaştırılmıştır. Yüksek GÖYFC oranı içeren geopolimer harçlar hızlı priz yapıp yüksek erken dayanım gösterirken, hacim stabilitesinin zayıf olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, GÖYFC karışımı harçların daha maliyetli MKPC harcının yerine kullanılabileceği önerilmiştir.

Geopolimer betonarmelerin pratik kullanıma dönüştürülebilmesi için karbonatlaşma direncinin belirlenmiş olması gerekir. Farklı geopolimer beton ve harçlarda karbonatlaşma derinliği farklı süreler için ölçüldüğü çalışmada, oda sıcaklığında kürlenmiş uçucu kül/yüksek fırın cüruf karışımı geopolimer betonda portland çimentosuna kıyasla, daha düşük karbonatlaşma direncinin elde edildiği ifade edilmiştir. Çimento için CO₂ emme kapasitesi beton yaşıyla birlikte artar. Fakat geopolimer betonda

karbonatlaşma derecesi tam olarak açık değildir. Alkali aktivatör, C-A-S-H ve N-A-S-H jelleri CO₂ ile reaksiyona girme ihtimali olan yapılardır. C-A-S-H ve N-A-S-H jelleri oluşukça alkali aktivatör azalır, bu nedenle zamanla geopolimer betonun CO₂ emme kapasitesinin karbonatlaşma süresiyle artıp azaldığını söylemek oldukça zordur. Geopolimer betonun karbonatlaşma direnci basınç dayanımıyla ilgilidir. Daha yüksek dayanıma sahip beton genellikle daha yüksek karbonatlaşma direncine sahip olma eğilimindedir. Ancak geopolimer betonun karbonatlaşma direnci alkalin aktivatör tipi gibi diğer faktörlerden de etkilenebilmektedir (L₁ ve L₁, 2018).

Başpınar ve Kurtuluş (2018) çalışmalarında, uçucu kül esaslı geopolimer malzemeler üzerinde köpükleştirme amacıyla hidrojen peroksit kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) karışım oranları değiştirilerek farklı örnek serileri hazırlanmıştır. Numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri test edilmiş, mineralojik ve mikroyapısal analizler XRD ve SEM yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma bulgularına göre, yüksek fırın cürufu oranının artması çatlak oluşumunu tetiklemiştir. Buna karşın iri agrega ilavesi, kuruma büzülmesini önemli ölçüde azaltmış ve çatlak oluşumunu engellemiştir. Ayrıca, iri agreganın geopolimer köpük beton bloklarının yoğunluğunu düşürerek hafifletici etkisi olduğu da gözlemlenmiştir.

Singh vd. (2018), günümüzde nano teknoloji inşaat endüstrisinin birçok alanında önemli rol oynar. Özellikle nano materyallerin beton özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Çimento temelli betona alternatif olarak sunulan uçucu kül temelli geopolimer betonun bazı nano malzemeler kullanılarak özelliklerinin değiştirilebileceği vurgulanmaktadır. Nanomateryal olarak CNT, grafem, nanosilika vb., nanomalzemeler ile bu değişikliklerin elde edilebileceği düşünülmektedir.

Zhang vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, geopolimer üretiminde birçok farklı materyal grubunun kullanılabileceği vurgulanmıştır. Bu materyallerin çevre üzerindeki olumlu etkileri ve geopolimer harç ya da betonların karakteristik özellikleri, bu malzemelerin ön plana çıkmasında önemli rol oynamaktadır. Özellikle geopolimerlerin kısa priz süresi nedeniyle yüksek erken dayanımlara ulaştığı belirtilmiştir. Geleneksel çimentoda sertleşme süresi genellikle 10-12 saat arasında olurken, geopolimerlerde bu süre 2-4 saat gibi oldukça kısa bir aralıktadır. Ayrıca, sadece 4 saatlik kürlenme ile maksimum dayanımın yaklaşık %70'ine ulaşılabilir. Bu özellikleriyle geopolimerler, hızlı sertleşen çimentoya benzer performans gösterirken, fiziksel

özellikler açısından daha üstün sonuçlar verebilmekte ve yerel kaynakların kullanımıyla birçok yapısal ve çevresel problemin çözümüne katkı sağlamaktadır.

Günümüzde, düşük kalsiyum ve yüksek kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül ile öğütülmüş yüksek fırın cürufları beton içerisinde çimentoya ek katkı maddeleri olarak kullanılmaktadır. Bu bileşenlerin birtakım fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla nano materyaller ile birlikte kullanımları da mümkündür. Düşük kalsiyum içeriğine sahip küllerde SiO_2 içeriği, Ca(OH)_2 ile raksiyona giren silikayı aktif bir SiO_2 'ye dönüştürebilir. Bu durum uçucu külü yüksek puzzolanik aktiviteye getiren bir etken olarak tanımlanır. Ortam sıcaklığı yaklaşık 20°C şartlarında reaksiyona giren uçucu kül, beton içerisinde yavaş reaksiyon gerçekleştirirken, kür süresinin artmasına bağlı olarak beton üzerindeki etkileri daha belirgin hale gelebilmektedir. Malzemelerde çap oranını azaltarak yüzey alanının artırılması mümkündür ancak, bu durumun su emme kapasitelerinde artış ve kristal yapı bozukluklarını da beraberinde getireceği düşünüleceğinden, burada öğütme işleminin önemi ortaya çıkmaktadır. Nanosilis ve NanoSiC gibi nano katkı maddelerinin uçucu kül ile birlikte kullanıldığı yol betonlarında, önemli ölçüde aşınma dirençlerinin arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek kalsiyumlu uçucu kül türlerinde ise çok daha fazla kompleks bir yapıdan bahsetmek mümkündür (Giergiczny, 2019).

Güzelkürk ve Demir (2019) çalışmalarında, CO_2 salınımını ve yüksek enerji tüketimini azaltmak amacıyla perlit içeren geopolimer kompozitler üretmiştir. Öğütülmüş perlit, sodyum hidroksit ile aktive edilerek $50\times 50\times 50$ mm boyutlarında çimentosuz perlit esaslı kompozit küp numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 24 ve 48 saatlik kür süreleriyle, 90°C ve 110°C 'de olgunlaştırılmıştır. Sonuçlarda, en iyi basınç dayanımı, çözeltinin NaOH molaritesi ve kür sıcaklığına bağlı olarak değiştiği; en yüksek dayanım 15.5 M NaOH molaritesi, 24 saat kür süresi ve 110°C kür sıcaklığında 46.76 MPa olduğu tespit edilmiştir.

Chithambaram ve Kumar (2019), geopolimer harç üretiminde uçucu külün (UK) kısmi ikamesi üzerinde öğütülmüş granül yüksek fırın cürufunun (ÖGYFC) etkisinin incelendiği bir başka çalışmada, geopolimer harçlar alkali aktivatör çözeltisi olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kombinasyonu kullanılarak üretilmiştir. Geopolimer harç temelli UK/ ÖGYFC'nin üretimi NaOH'ın 8M, 10M, 12M ve 14 M konsantrasyonları kullanılarak gerçekleştirmiştir. Aynı zamanda, %0, %10, %20, %30 ve %40 ÖGYFC ile uçucu külün yer değişimi incelenmiştir. Tek bağlayıcı olarak %100 uçucu kül içeren

geopolimer harç için 600 °C ile 1000 °C arasında değişen ısıl kürlenme aralıkları belirlenmiş ve %90 °C kürlenmiş 12M NaOH konsantrasyonuna sahip %100 uçucu külün geopolimer harç üzerindeki sonuçları incelendiğinde, maksimum 51.55 N/mm² basınç dayanımının elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, uçucu külün %30 ÖGYFC ile kısmen değiştirilmesinden sonra NaOH konsantrasyonunun 12M'ye kadar artmasıyla basınç dayanımı artmış ve maksimum 59.2 N/mm² sonucu elde edilmiştir.

Uçucu kül/yüksek fırın cürufu bağlayıcılarına farklı katkı maddelerinin etkisinin gözlemlendiği bir başka çalışmada (Liu vd., 2019), atık katkı maddesi olarak cam tozu kullanılmıştır. Çalışmada cam tozlarının reaksiyon yoğunluğunu attırdığı, özellikle 91 günlük numunelerde kalsiyum hidroksit içeriğinin azaldığı, toplam gözenekliliği ise azalttığı belirtilmektedir. Atık cam tozunun yüksek yüzey alanı ve ince parçacık boyutu, (uçucu kül/cürufa kıyasla) daha yüksek bir su emilimine neden olduğu ve bunun sonucunda düşük bir akış kabiliyeti gösterdiği belirtilmektedir. Uçucu kül, geri dönüştürülmüş atık cam tozundan daha düşük bir spesifik yoğunluk ve yüzey alanına sahiptir. Bununla birlikte, küresel şekli nedeniyle uçucu kül daha iyi sıkıştırılabilirliğe ve dolayısıyla tanecik dolgusuna katkıda bulunabilir. Dolayısıyla bu durumun, harcın yoğunluğunun artmasına neden ifade edilmiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada (İlçentap ve Örklem, 2020), F sınıfı uçucu kül bazlı geopolimer harçlarda diatomit ikamesinin etkileri incelenmiştir. Çalışmada, su/bağlayıcı oranı ağırlıkça 0.31 ve kum/bağlayıcı oranı 3.0 olarak belirlenmiştir. Aktivasyon için sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmış ve bağlayıcı malzeme ağırlığının %10' u kadar Na⁺ içerecek şekilde dozajlanmıştır. Karışımlarda uçucu külün %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında diatomit ikamesi yapılmıştır. Üretilen geopolimer harçlar 90 °C'de 24 saat sıcaklık kürüne tabi tutulmuştur. Sonuçlar, %1, %2 ve %3 oranlarındaki diatomit ikamesinin referans numuneye kıyasla daha boşluksuz bir yapı oluşturduğu; %4 ve %5 oranlarında ise daha boşluklu bir yapı meydana getirdiği görülmüştür. Ayrıca, en düşük ısı iletkenlik katsayısı %5 diatomit ikamesiyle elde edilirken, en yüksek yarma dayanımı %3 diatomit ikamesinde sağlanmıştır.

Farklı geopolimer malzemelerin kullanıldığı bir başka çalışmada ise, standart kum, su, sodyum silikat, uçucu kül ve pres filtre atığı (PFA) kullanılmıştır. Kum/bağlayıcı oranı 3.0 olacak şekilde hazırlanan numunelerde basınç dayanımları 7 günlük numunelerde 18.53 MPa, 28 günlük numunelerde 19.58 MPa ve 56 günlük numunelerde ise 19.78 MPa olarak ölçülmüştür. Numunelerde PFA oranının artması ile hem birim ağırlık değerlerinde,

hem de basınç dayanım değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir (Topçu ve Sofuoğlu, 2020) .

Kaya (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, geri dönüşümün teşvik edilmesi ve ekonomik katkı sağlanması amacıyla F ve C sınıfı uçucu külün birlikte kullanımı araştırılmıştır. Çalışmada, C sınıfı uçucu kül (UK) ile F sınıfı UK'nın %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında birbirleriyle yer değiştirilmesiyle oluşturulan bağlayıcılar, sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) ile ayrı ayrı aktive edilmiştir. UK, kum, aktivatör ve su standart çimento mikserinde karıştırılarak hazırlanan harç numuneleri, 40 mm × 40 mm × 160 mm boyutlarındaki standart kalıplara yerleştirildikten sonra 100 °C'de 24 saat süreyle aktivasyon sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Ardından numuneler 28 gün boyunca hava kürüne (22±2 °C) tabi tutulmuş ve bu sürecin sonunda fiziksel ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, %60 C sınıfı ve %40 F sınıfı UK içeren NaOH ile aktive edilen numunelerde eğilme dayanımının 3.8 MPa ve basınç dayanımının ise 28 MPa olduğu görülmüştür.

Bellum (2020) çalışmasında, öğütülmüş yüksek fırın cürufu/uçucu kül bağlayıcılarını kullanarak hazırladığı geopolimer betonun mekanik davranışları incelenmiştir. Değerleri tahmin etmek için elastisite modülü deneysel sonuçları literatür ile kıyaslanmış olup, elde edilen denklem elastisite modülü temeline dayanan deneysel basınç dayanımlarını içermektedir. Betonun basınç dayanımının artmasıyla birlikte, betonun elastite modülü tahminleri de aynı şekilde artar. Portland çimentolu beton için 28 günlük elastite değeri 22.68 GPa iken, bu değer çeşitli geopolimer beton numunelerinde 13 GPa ile 20.34 GPa arasında değiştiği görülmüştür. Bu durum, geopolimer içerisindeki değişen uçucu külün yüzdesi ile açıklanmıştır. Ayrıca, çalışmada elastite modülü tahmini için kullanılan denklemin deneysel verilerle uyumlu olduğu, geopolimer beton karışımındaki öğütülmüş cüruf içeriğinin artmasıyla birlikte elastite modülünün arttığı, kür yaşının da dayanım ve elastite modülü etkileyen önemli bir faktör olduğu belirtilmiştir.

Wang vd. (2020) tarafından yapılan siliko-alüminofosfat katkının ilave edildiği yüksek ve düşük kalsiyum içeriğine sahip iki farklı uçucu külün kullanıldığı çalışmada, yüksek kalsiyum içeren uçucu külün yapısındaki alkali kalsiyum türleri ile aktivatördeki asidik fosfat türleri arasında hidroliz ve asit-baz reaksiyonları tarafından indüklenen aktif kalsiyum yapılarının ortaya çıkarttığı, oluşan kalsiyum fosfat bileşenlerinin priz sürelerini

hızlardırdığı ve 1 ve 3 günlük mukavemet gelişimlerinin sırasıyla 15 MPa ve 29 MPa'ya yükseldiği tespit edilmiştir.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufuna, uçucu külün ilave edildiği bir başka çalışmada ise 21.26 μm partikül boyutlarına sahip yüksek kalsiyumlu uçucu kül, %100 öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren numuneler ile kıyaslanmıştır. Özellikle %40, %50 ve %60 uçucu kül içeren karışımlarda plastik viskozite, segragasyon direnci ve akıcılık gibi işlenebilirlik performanslarının arttığı belirtilmiştir (Huseien vd., 2021).

Geopolimerler, düşük sıcaklıklarda üretimi yapılabilen ve kısa sürede sertleşebilen amorf ve yarı kristal ve üç boyutlu geopolimerik yapılardan oluşan inorganik bağlayıcı malzemeler olarak bilinmektedir (Özen, 2021).

Kaya (2021) çalışmasında, kaolin bazlı geopolimer harçlarda silis dumanı (SD) ve mikro SiO_2 (MS) katkılarının dayanım üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Bağlayıcıya %3, %6 ve %9 oranlarında SD ve MS ayrı ayrı eklenmiş; NaOH aktivasyonu için %11, %13, %15 ve %17 sodyum oranları kullanılmıştır. Karışım, 110 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Sonuçta, %9 SD ile %11 Na ve %9 MS ile %17 Na içeren numunelerde basınç dayanımı sırasıyla 21.4 MPa ve 45.3 MPa olduğu tespit edilmiştir. %11 ve %13 oranlarında Na içeren numuneler için, katkıların dayanımda belirgin etkisi olmazken, %15 ve %17 oranlarında Na içeren numunelerde ise SD ve MS katkılarının dayanımı artırdığı belirtilmiştir.

İlkentapar vd. (2021) çalışmasında, genleştirilmiş polistiren (EPS) kullanılarak uçucu kül tabanlı hafif geopolimer harçları üretmiştir. EPS, hacimsel olarak %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında ırmak kumu ile ikame edilmiştir. F sınıfı uçucu kül, sabit oranlarda NaOH ile aktive edilerek, numuneler 75 °C'de 24 ve 48 saat sıcaklık kürüne tabi tutulmuştur. Sonuçlarda, 24 saat kürde birim ağırlığın 1.93–0.61 g/cm^3 , 48 saat kürde ise 1.87–0.66 g/cm^3 arasında değiştiğini tespit etmiştir. EPS oranının artmasıyla birlikte işlenebilirliğin arttığı, bunun yanında ise birim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımlarının azaldığı belirtilmiştir.

Yan Zhang vd. (2021) geleneksek iki parçalı geopolimerlerin kullanımında alkali aktivatörlerin üretimi, depolanması, transferi gibi zorlukları nedeniyle küçük ölçekli mühendislik uygulamaları ile sınırlı olduğunu belirtir. Çalışmada katı bir aktivatör kullanılarak 'tek parçalı' geopolimer ya da 'sadece su katkılı' geopolimer olarak adlandırılan ürünler geliştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, tek parçalı geopolimer harcın eğilme ve basınç mukavemetlerinin iki parçalı geopolimerin sırasıyla

%88-94 ile %65-%95'ine karşılık gelmektedir. Aynı zamanda sonuçlar susuz sodyum silikat'ın daha iyi bir katı aktivatör olduğunu göstermektedir (sulu Na_2SiO_3 ve NaOH karışımına kıyasla). Susuz sodyum silikat kullanılarak hazırlanan tek parçalı geopolimer harcın en yüksek basınç dayanımı, ortam sıcaklığında kürlenmede 7 gün sonunda 49.2 MPa değerine ulaştığını raporlanmıştır.

Hager vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, geopolimer harçların mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki yüksek sıcaklıkların etkisini incelenmiştir. Uçucu külün yüksek fırın cürufu ile dört (4) farklı oranda hazırlandığı çalışmada, cüruf ilavesi yapılmayan karışımlarla özellikle yüksek sıcaklıkta daha iyi performans değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir. 200 °C'ye kadar artış gösteren eğilme dayanımlarının, bu noktadan itibaren 600 °C kadar neredeyse lineer bir azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, artan sıcaklıkla birlikte dehidrasyon gelişiminden kaynaklı olduğu ifade edilmiştir.

Potasyum hidroksit ve sodyum silikat alkalilerinden oluşturulan çözelti ile aktive edilmiş uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin bağlayıcıları geopolimer harç üretiminde kullanılmıştır. Optimize edilen harç numunesinde basınç dayanımının 5.65 MPa, eğilme çekme dayanımının ise 1.73 MPa olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, hibrit geopolimer olarak adlandırılan harçların, duvarların ve yapıların iç ve dış kaplamalarında veya bozulmuş kaplamaların onarılmasında harç olarak kullanım üzerinde durulmuştur (Kretzer vd., 2021).

Büyük miktarlarda kömür uçucu külünün üretimi ve bunun çevresel etkisi nedeniyle bu ürünün alternatif kullanımları araştırılmaktadır. Yeni bağlayıcı madde olarak alternatif hammadde kaynağı uçucu külün kullanımına ilişkin önemli adımlar atılmaktadır. Bunlar arasında en önemli yapı malzemeleri geopolimerler veya alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerdir. Bu kapsamda, geopolimerler sentezi için alüminosilikat kaynağı olarak metakaolin (MK) ve kömür uçucu külü (UK), farklı ağırlık oranlarında (25-75; 50-50 ve 75-25) kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. MK-UK karışımı geopolimerlerin bir miktar daha düşük basınç dayanımlarına ve termal iletkenliğe sahip olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, 7 günlük kürlenme sonunda artan miktarlarda UK ile kütle yoğunluğunun arttığı, görünür porozite ile su absorpsiyonun ise azaldığı raporlanmıştır. Ancak 28 günlük kürlenme sonunda, UK içeriğindeki artış ile su absorpsiyonu ve kitle gözenekliliğinde artış, hacimsel yoğunlukta ise (kütle yoğunluğu) azalmalar belirlenmiştir. Karışımı

geopolimerlerin basınç dayanımı ve termal iletkenliğinde sadece UK veya MK kullanımında bir miktar düşüş sergilediği belirtilmiştir (Casero vd., 2022).

Uçucu kül içeren geopolimer beton, çimentolu bir malzeme olarak kullanılan geleneksel betona alternatif çevre dostu bir türdür. Ancak literatürde, farklı malzeme kombinasyonlarında UK'nın bağ davranışları ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli eksikliklerin bulunduğu da oldukça açıktır. Abdulrahman vd. (2022) tarafından, alkali aktivatörün bağlayıcıya oranındaki (AA/B) rolü değerlendirilmeye çalışılmıştır. Çekme numunelerinin ana değişkenleri basınç dayanımı ve beton kaplama-çubuk çapı oranı olarak gösterilmiştir. Çalışma sonuçları göstermektedir ki; hem basınç hem de yarmada çekme dayanımı AA/B oranındaki azalma ile artmaktadır. Çalışmada deneysel sonuçlara bağlı olarak, basınç dayanımından yarmada çekme dayanımını tam olarak tahmin etmek için bir model önerilmiştir. Aynı zamanda, uçucu kül geopolimer betonun yüksek bir bağ dayanımına sahip olduğu ve bu betonun hem Cc/bd oranından hem de basınç dayanımından etkilendiği belirtilmiştir. Bir bağ kayma modeli geliştirmek için literatürde mevcut olan bağ-kayma sonuçları kullanılmış ve öngörülen bağ tepkilerinin bu çalışmada deneysel olarak elde edilenlerle iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur.

Casero vd. (2022) çalışmalarında, metakaolin yerine geopolimer sentezi için alüminosilikat kaynağının kullanılma potansiyelini değerlendirmek için UK ağırlıkça %20-%75 gibi değişen oranlarda kullanılmıştır. Geopolimerlerin sentezi için alüminosilikat kaynağı olarak metakaolin, kömür uçucu kül ve metakaolin, farklı ağırlık oranlarına (25-75; 50-50 ve 75-25) sahip kömür uçucu külü ile birlikte kullanılmıştır. Sonuçlar MK ve UK geopolimerlerin benzer mekanik, termal özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, MK-UK karışımli geopolimerlerin bir miktar daha düşük basınç dayanımlarına ve termal iletkenliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda, 7 günlük kürlenme sonunda artan UK oranı ile kütle yoğunluğunda artışlar ve görünür porozite ile su absorpsiyonunda azalmalar görülmüştür. Ancak, 28 günlük kürlenme sonunda UK içeriğindeki artış ile su absorpsiyonu ve kitle gözenekliliğinde artış, hacimsel yoğunluk değerlerinde ise (kütle yoğunluğu) azalmalar görülmüştür.

İpek vd. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, beton, bazalt, granit, mermer ve seramik karo gibi inşaat atıklarından elde edilen beş farklı tür geri dönüştürülmüş kum, doğal kumun yerine uçucu kül bazlı geopolimer harçlarda %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ikame edilmiştir. Deney sonuçları, geri dönüştürülmüş kumların geopolimer harçların özelliklerini önemli ölçüde etkilemediğini ve bu malzemelerin kontrollü şekilde

geopolimer harç üretiminde kullanılabileceği göstermiştir. Endüstriyel atık bazlı geopolimerlerin mekanik özellikleri; alkali çözelti konsantrasyonu, kalsiyum içeriği, kür sıcaklığı ve yaşı ile Si/Al oranları ve katkı maddelerinden etkilenme düzeyleri gibi birçok özelliğin ortaya koyulması gerektiği yapılan çalışmada vurgulanmaktadır (Lıban, 2022).

Bingöl (2022) çalışmasında, yüksek fırın cürufu (YFC) ile çelikhane cürufunu (ÇC) farklı oranlarda (%80 YFC + %20 ÇC ve %60 YFC + %40 ÇC) çimento yerine ikame edilerek çevre dostu geopolimer harçları üretmiştir. Bağlayıcı aktivasyonu için bağlayıcı miktarının %3, %5, %7.5 ve %9'u oranlarında sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Kontrol olarak portland çimentosu (CEM I 42.5 R) ile karşılaştırılmıştır. 7 ve 28 günlük su kürlerinin ardından yapılan testlerde, %80 YFC + %20 ÇC içeren geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımlarının %7.5 ve %9 sodyum oranları için (Portland çimentosuna göre) sırasıyla, %16 ve %47 daha yüksek olduğu, dayanım değerlerinin ise 59.87 MPa ve 76.25 MPa ölçüldüğü raporlanmıştır.

Akyüncü vd. (2022) çalışmasında, yüksek fırın cürufu (YFC) ile alkali aktivasyonlu harçların mekanik ve fiziksel özelliklerini incelenmiştir. Çalışmada, su/bağlayıcı oranı 0.5, kum/bağlayıcı oranı 3 olarak sabit tutulmuştur. Uçucu kül (UK), YFC yerine %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ikame edilmiştir. Numuneler iki farklı kür rejimine tabi tutulmuştur. Birinci seride 28 gün boyunca 21 ± 1 °C'de sızdırmazlık kürü; ikinci seride ise önce 2 gün 105 ± 5 °C'de ısıl kür, ardından 26 gün 21 ± 1 °C'de sızdırmazlık kürü uygulanmıştır. Numunelerde yayılma, su emme, boşluk oranı, eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde, her iki kür serisinde de %10 UK içeren (UKF10) harç numunesinin YFC (YFC100) numunesine en yakın basınç dayanımı gösterdiği belirtilmiştir.

Gültekin vd. (2022) çalışmalarında, hacimce %5 çelik lif içeren uçucu kül tabanlı geopolimer SIFCON (dökme lif takviyeli ince beton) kompozitler üretilmiştir. Bu kompozitlerin eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve tokluk özellikleri, hem yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış numunelerde hem de 900 °C'ye kadar ısıl etkide bulunmuş numunelerde incelenmiştir. Ayrıca, benzer eğilme dayanımına sahip olan geleneksel çimento bazlı SIFCON kompozitler de kıyaslama amacıyla değerlendirilmiştir. Sonuçlar, uçucu kül bazlı geopolimer SIFCON'ların yüksek sıcaklık etkisi sonrası, çimento bazlı SIFCON'lardan daha yüksek eğilme dayanımı ve tokluk değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, benzer eğilme dayanımlarında geopolimer SIFCON'ların daha yüksek basınç dayanımı sergilediği belirlenmiştir.

Şenol ve Çağatay (2023) tarafından yapılan çalışmada, ana malzeme olarak yüksek fırın cürufu (YFC) ve polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı, bağlayıcı ağırlığının %0, %1, %1,5 ve %2'si oranlarında kullanılmıştır. Agrega/bağlayıcı oranı 1.5, su/bağlayıcı oranı ise 0.30 olarak belirlenmiş; 40x40x160 mm boyutlarında hazırlanan geopolimer harçlar 7 ve 28 gün boyunca laboratuvar ortamında (22 ± 2 °C) kürlenmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı testleri sonucunda, %2'ye kadar akışkanlaştırıcı kullanımının işlenebilirliği artırdığı, ancak %1,5 ile %2 oranlarında işlenebilirliklerin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Akışkanlaştırıcı miktarının artmasıyla birlikte eğilme ve basınç dayanımlarında bir miktar azalma olduğu belirtilmiş olup, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin 7 günde 45.2 MPa, 28 günde ise 50.5 MPa değerine ulaştığı raporlanmıştır.

Çavuş ve Bingöl (2023) çalışmalarında, bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufu ve alkali aktivatör olarak 4 farklı molariteye sahip 5 M, 10 M, 15 M ve 20M KOH kullanarak, farklı kür sıcaklıklarında 50 °C, 75 °C ve 100 °C geopolimer harçlar elde etmiştir. Elde edilen geopolimer harçların birtakım fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Geopolimer harçların karışımlarında yüksek fırın cürufu ve agrega miktarı sabit tutulmuştur. Hazırlanan harçlar 40x40x160 mm prizma kalıplara dökülerek belirlenen sıcaklıklarda 24 saat kürlenmiştir. Numunelerin 1, 7 ve 28 günlük dayanımları ölçülmüş, ayrıca 28 günlük harçların su emme, boşluk oranı, birim ağırlık ve ultrases geçiş hızı gibi fiziksel özellikleri değerlendirilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre, en iyi performans 50 °C'de kürlenene ve %20M KOH çözeltisiyle hazırlanan numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca, en düşük boşluk oranı ve su emme değerlerinin de ideal kür sıcaklığı olarak 50 °C'de gerçekleştiği belirlenmiştir.

Pehlivan (2023) çalışmasında, Antakya'dan temin edilen volkanik cüruf (VC) ve Manisa Gördes'ten temin edilen volkanik tuf (VT) kayaçlarının geopolimer harç üretiminde kullanımı araştırılmıştır. Alkali aktivasyon için %8 sodyum konsantrasyonunda NaOH kullanılarak 40x40x160 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. ASTM-C618 puzolanik incelik kriterine uygun öğütülen malzemelerle üretilen harçlar, 80 °C'de 36 saat, 72 saat ve 96 saat olmak üzere farklı sürelerde ısıtılmıştır. 96 saatlik 80 °C kür sonunda VT12.5 numunesi ile en yüksek eğilme dayanımı 7.8 MPa olarak, basınç dayanımı ise 44.3 MPa olarak ölçülmüştür.

Aygün vd. (2023) çalışmasında, uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu (UK-ÖGYFC) esaslı geopolimer kompozitler farklı kürlenme yöntemleri (oda koşulları, ısıt ve elektrikle kürlenme) ve değişen NaOH konsantrasyonlarında (6M-14M) Na₂SiO₃ ile aktive

edilerek üretilmiştir. İlk aşamada, üç kür koşulunda 1 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. İkinci aşamada, en yüksek dayanım gösteren numunelere %1, %2 ve %3 karbon siyahı (KS) eklenmiştir. Üçüncü aşamada ise, en iyi KS'li karışımlara %0.25, %0.50 ve %0.75 karbon lif (KL) ile atık erezyon teli (ATE) ilave edilerek 7 günlük basınç ve eğilme dayanımları ile ultrases geçiş hızı testleri yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı 12M NaOH ve %0.5 KL katkılı geopolimer harçlarda (7 günlük) 50.7 MPa olduğu raporlanmıştır.

Marvila vd. (2023) tarafından yüksek fırın cürufu aktive edilmiş alkali çimentonun (AAC) mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada, %2.5-%15 gibi farklı kütle konsantrasyonlarında sodyum hidroksit tarafından aktive edilmiş geopolimerler kullanılmıştır. Oda sıcaklığında kürlenme, 65 °C'de termal kürlenme, damıtılmış su ile çözelti kürlenme (saturated curing), hidratlı kireç (kireç kürlenme), sodyum hidroksit kürlenme (sodyum kürü) ve birleşik kürlenme işlemleri gerçekleştirilmiştir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarına göre AAC'nin OPC (Sıradan Portland çimentosu)'ye kıyasla daha üstün bir performans sergilediği, AAC'den alkali iyonlarının kaybını önleyen sodyum çözeltisi kürü ve termal enerji sağlayan termal kür işlemlerinin kürlenme mekanizmalarında ön plana çıkmıştır. Alkali aktivasyon oranındaki artış ile hidrotalsit ve tobermorit oluşumlarının arttığı belirtilmiştir.

Venkitasamy vd. (2024) tarafından yürütülen çalışmada, %15 uçucu kül içeren çimentolu numunelerde erken yaşlarda %100 portland çimento ile karşılaştırılabilir basınç dayanımlarının elde edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca, oransal olarak daha yüksek miktarlarda uçucu kül ve cüruf içeren numunelerde istenilen dayanım seviyelerinde basınç dayanımlarının elde edilebildiği, ancak bu durum için daha uzun kür sürelerine ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Bununla beraber uzun kür süreleri için numunelerde çekme dayanımlarının da arttığı belirtilmiştir. Cüruf numunelerinde yüksek kalsit içeriğinin (uçucu küle kıyasla), karbonatlanabilir malzeme içeriğini (C-S-H karbonatlaşmasından dolayı) arttırdığı belirtilmiştir.

Mohammed ve Yaltay (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, atık pomza tozu/cüruf içeren geopolimerler üzerinde gerçekleştirilen farklı parametrelerin etkisi kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Cüruf ve pomza taşı tozu farklı oranlarda (100:0, 90:10, 80:20, 70:30 ve 60:40 oranlarında) bağlayıcılar ve 65 °C için 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde 12M ve 14M sodyum hidroksit ile aktive edilmiştir. Cüruf oranı yüksek olan bağlayıcılarda basınç dayanımlarının nispeten yüksek gerçekleşmesinin, C-S-H ve C-A-

S-H jel fazlarının ve mikroyapının yoğunluğundan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Mikroyapı analizlerine göre ise, yüksek cüruf içeren numunelerde amorf bir yapı ile birlikte suolunit, termonatrit, laumontit sodyum silikat hidrat gibi hidratların daha yoğun bir kristal yapıya sahip olması ile daha homojen ve yoğun bir yapının elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, pomza içeriğinin artmasıyla Ca/Si oranının azalmasına bağlı olarak basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir.

Aksüt vd. (2024) çalışmalarında, endüstriyel atıklar (volkanik kaya tozu ve yüksek fırın cürufu) kullanılarak üretilen alkali aktive betonlarda farklı lif türlerinin (çelik ve polyester) mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Lif oranları %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 olacak şekilde belirlenmiş ve kıvam, birim hacim ağırlığı, su emme, basınç dayanımı, elastisite modül ve aşınma dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Bulgular, çelik liflerin basınç dayanımı ve elastisite modülde daha etkili olduğunu, polyester liflerin ise işlenebilirlik ve aşınma dayanımını iyileştirdiğini göstermektedir. Hibrit lif kullanımı bazı özelliklerde denge sağlamıştır. Çalışmanın sonucunda farklı lif türlerinin geopolimer betonun dayanıklılık ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı şekilde ortaya koymaktadır. Çelik liflerin yüksek mukavemete, polyester liflerin ise dayanıklılığa katkı sağladığı görülmüştür.

Çavdar ve Temizer (2024) yaptıkları çalışmada, farklı kürlenme koşulları altında farklı oranlarda puzolanik atıklar içeren geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmayı amaçlamaktadır. Termal kürlenme ve su kürlenme uygulanmış ve üç farklı molar oranında (8M, 10M ve 12M) sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Sonuçlar, reaksiyon ürünlerinin, alkali aktivatörlerin türlerinin ve reaksiyon koşullarının geopolimer harçlarda önemli faktörler olduğunu göstermiştir. Kaydedilen en yüksek basınç dayanımı, %95 yüksek fırın cürufu (YFC) ve %5 uçucu kül (UK) içeren geopolimer numunesinde 84.7 MPa olarak ölçülmüştür. Ayrıca, iki farklı bağlayıcı katkı maddesi (mermer tozu ve stronsiyum) kullanılmış ve bunların ana bağlayıcı üzerindeki zamana bağlı etkileri analiz edilmiştir.

Geopolimer sentezinde kullanılan ürünlerin kimyasal özelliklerinin yanı sıra boy/tanecik yapısı ve şekli gibi birtakım fiziksel özelliklerinin de önemli bir parametre olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda, uçucu kül tanelerinin yüzey alanı/hacim ölçütlerinin belirlenmesi de oldukça önemlidir (Zhu vd., 2024).

1.12.2. Taguchi Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar

Artan nüfus ve endüstriyelleşme beraberinde geleneksel çimentolu betona alternatif ürünlerin ortaya çıkarılmasını zorunlu kılmaktadır (Ali vd., 2019). Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmada, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu bentonit ve dolomit minarelleri ile harmanlanmış olup, Taguchi yöntemi kullanılarak, farklı parametreler üzerinde optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. L16 ortoganol deney serisinin tamamlandığı yöntemde, %10 bentonit ve dolomit ikamesinde 0.55 alkalin bağlayıcı oranı, 12 NaOH çözeltisi 425 kg/m³ çimento malzemesi içeren karışım optimum numune olarak değerlendirilmiştir. Granüle öğütülmüş yüksek fırın cürufu seviyesi, alkali çözelti/bağlayıcı oranı, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı, çimento miktarı ve alkali çözelti molaritesi gibi 5 farklı parametrenin 4 farklı seviyesi belirlenmiştir. Seçilen parametrelerin sinyal/gürültü oranının varyans analizi sonuçlarına göre, seçilen tüm parametreler arasında GGBS miktarı (bağlayıcı kütlece %) ikamesinin her iki kür süresinde basınç dayanımının gelişiminde büyük bir etkisi olduğu vurgulanmıştır. 14 ve 28 günlük kür sürelerinde sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının basınç dayanımları üzerinde farklı sonuçlar oluşturduğu, bulunda literatür kaynaklarındaki farklı sonuçlar ile benzer geliştiği vurgulanmıştır.

Taguchi dinamik yaklaşımı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bir başka çalışmada (Onoue, 2019), Japonya'nın Kyushu bölgesindeki iki farklı termik santralde üretilen uçucu kül kullanılarak uçucu kül bazlı geopolimer (UKGP) harç karışım oranlarının ve üretim koşullarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (ÖYFC) da aktivasyon tozu olarak kullanıldığı çalışmada, giriş değeri olarak tozun alkali aktive edici çözeltiye hacim oranı ve çıkış değerleri olarak eğilme ve basınç dayanımlarının bulunduğu bir sistemin tasarım parametreleri, sinyal-gürültü oranının hesaplanmasına dayalı olarak optimize edilmiştir. Sonuç olarak, sodyum silikat çözeltisinin sodyum hidroksit çözeltisine kütle oranı, sodyum hidroksit çözeltisinin konsantrasyonu, ÖYFC ikame oranı, karıştırma süresi, kürleme sıcaklığı ve ısıtma kürlemede kümülatif sıcaklık için optimum değerler elde edilmiştir. Optimize edilmiş uçucu kül tabanlı geopolimer harcının basınç dayanımının 2 günde 28.8 N/mm² ile 47.1 N/mm² arasında değiştiği ve ayrıca, optimize edilmiş UKGP harcının 91 güne kadar pratik amaçlar için yeterli mukavemet kararlılığına ve sülfürik asit direncine sahip olduğu doğrulanmıştır.

Prusty ve Pradhan (2020), geopolimer uygulamalarında birçok bileşen ve üretime bağlı parametrenin varlığını farklı istatistiksel hesaplamalara dayandırmaktadırlar. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmada, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu/uçucu kül karışımlarının geopolimer betonun basınç dayanımı, işlenebilirlik ve priz süresi üzerinde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı, bağlayıcı içeriği, NaOH molaritesi, su/bağlayıcı oranlarının etkisi Taguchi-Grey analizi kullanılarak optimize edilmiştir. Brunauer-Emmett-Teller (BET) metodu kullanılarak ölçülen yüzey alanları, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu için sırasıyla $898 \text{ m}^2/\text{kg}$ ve $3066 \text{ m}^2/\text{kg}$ değerlerinde, partikül büyüklükleri ise yine sırasıyla $24.98 \text{ }\mu\text{m}$ ve $23,89 \text{ }\mu\text{m}$ boyutlarındadır. FESEM görüntülerinde uçucu külün daha küresel ve pürüzsüz yüzeylere sahip olduğu, yüksek fırın cürufunun ise daha köşeli ve pürüzlü bir yapıda olduğu belirtilmiştir. Uçucu kül kuvars, mullit gibi kristal fazlardan oluşmuş amorf yapılı bir bileşik iken, yüksek fırın cürufunun kalsit ve kuvars yapıdan oluşmuş amorf yapılı bir bileşen olduğu gösterilmiştir. L16 ortogonal deney serisi kullanılarak hazırlanan karışımlarda farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir.

Bir başka çalışmada, uçucu külden elde edilen geopolimer beton üzerinde farklı parametrelerin etkisi Taguchi metodu kullanılarak incelenmiştir. Portland çimento ile ikame edilmiş uçucu kül karışimli betonun basınç dayanımı üzerinde kür süresi, kür sıcaklığı, bekleme süresi, alkali aktivatör oranı, NaOH molaritesi gibi farklı parametrelerin etkisi 36 karışım üzerinde incelenmiştir. Aynı zamanda, dikkate alınan parametrelerle ilgili olarak geopolimer numunelerin basınç dayanımını belirlemek için bir regresyon denklemi geliştirilmiştir. L36 ortogonal deney serisi kullanılarak hazırlanan numunelerde, portland çimentonun ilavesinin basınç dayanımları üzerinde en etkili faktör olduğu, bunu kür süresi, bekleme süresi, alkali çözelti oranı, molarite gibi faktörler takip etmiştir (Raja vd., 2021).

Geopolimer bağlayıcılar olarak atık seramik tozu ve granüle yüksek fırın cürufunun kullanıldığı çalışmada (Chokkalingam vd., 2022), bağlayıcı içeriği, ana bağlayıcı oranları, alkali aktivatör çözelti oranları ve molarite gibi değişken parametrelerin etkisini irdelenmiştir. Sonuçlar, tek başına bağlayıcı olarak seramik tozunun etkisinin oldukça zayıf olduğunu ancak cüruf ile karışım oluşumunun beraberinde önemli kazanımlar sağladığı belirtilmiştir. 5 faktörlü ve 4 seviyeli L16 ortogonal dizisinin geliştirildiği çalışmada, ANOVA sonuçları 28 günlük basınç dayanımları üzerinde alkali aktivatörün /bağlayıcı oranı ve cüruf yüzdesi değişiminin en önemli faktör olduğu, bağlayıcı içeriği ve molaritenin en düşük etki oranına sahip olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda mikro

yapı analizleri incelendiğinde, benzer kalsiyum hidratları ve silikat fazlarını yansıtan neredeyse eşit Ca/Si ve Si/Al oranlarını göstermiştir. Bununda geopolimer betonun mikro yapısını yoğunlaştıran C-S-H ve C-A-S-H jellerinin oluşumuna yol açtığı söylenmiştir. Yapı içerisinde Ca/Si'ye göre daha yüksek Na/Si oranı, N-A-S-H jelinin C-A-S-H jelleri üzerinde daha baskın olmasına neden olabileceği, bu sonucu ile edilen mermer tozunun bir yansıması olduğu vurgulanmıştır.

Maherian vd. (2023) çalışmalarında, Taguchi deney tasarım matrisi kullanarak, nano-silika ve uçucu kül yüzdesi, toplam bağlayıcı miktarı ile su/bağlayıcı oranı olmak üzere dört parametrenin geopolimer harçların basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Her parametre için dört seviye belirlenmiş ve L16 ortogonal deney matrisi uygulanmıştır. 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları analiz edilerek sinyal/gürültü oranları hesaplanmıştır. Sonuçlar, uçucu kül yüzdesinin basınç dayanımı üzerinde en etkili parametre olduğunu göstermiştir.

Taguchi optimizasyon yöntemi farklı ürün grupları ve katkı içeriklerinin belirlenmesinde kullanılan etkili bir optimizasyon yöntemidir (Litu vd., 2024; Soltani vd., 2024). Endüstriyel yan ürünlerin geopolimer betona dönüştürülmesi, çevre açısından sürdürülebilir yapı elemanlarının ortaya çıkartılması bakımından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda Raj vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, alümina-silikat bazlı materyaller olarak dolomit ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve alkali aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltisi kullanılmıştır. Geopolimer beton üretiminde birçok parametrenin etken olduğu vurgulanan çalışmada, optimum numunenin tespit edilmesi için çok fazla sayılarda deneyin yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu nedenle çalışmada Taguchi istatistiksel metodu kullanılarak, geopolimer beton üretiminde etkili olan parametreler ve optimum numuneler belirlenmiştir. L9 deney serisi üzerinden karışım oranı, molarite, aktivatör oranı gibi değişken olan etken parametreler kendi içerisinde kıyaslanmıştır. Geopolimer numuneler üzerinde işlenebilirlik, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı gibi sonuçlar incelendiğinde, numunelerin bağlayıcı oranlarının en etkili parametre olduğu ifade edilmiş olup, SEM mikro yapı analizlerinde bu yapıların daha kompakt oldukları gösterilmiştir.

Obeidy vd. (2024) Taguchi yöntemini kullanarak alüminat ve silikat kaynağı olarak modifiye edilmiş metakaolin bazlı optimum geopolimer karışımını bulmak için bir yöntem belirlenmiştir. Metakaolin, silika dumanı (SF) gibi silika bakımından zengin

malzemelerin veya %5, 10 ve 15 kalsiyum oksit (CaO) gibi kalsiyum bakımından zengin malzemelerin farklı içerikleri kullanılarak modifiye edilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde sodyum hidroksit konsantrasyonunun basınç dayanımları üzerinde diğer parametrelere kıyasla daha belirleyici etken olduğu sonucu vurgulanmıştır. Ayrıca Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) görüntüleri ile metakaolinin ağırlıkça %5 oranında silika ve CaO ile yer değiştirmesinin, daha az ve daha küçük gözeneklere kaynak oluşturabileceği ve mikro çatlakların genişliğinin azaltılabileceği gösterilmiştir.

Alkali ile aktive edilen atık malzemelerin kullanımı sürdürülebilirlik ve çevresel sorunların çözümüne katkıda sağlaması bakımından oldukça büyük önem taşımaktadır. Bağlayıcı olarak boşluklu tuğla atığı (HBW) ile alkali ile aktive edilmiş kompozitlerin (AAC) üretildiği çalışmada, 6M, 8M ve 10M NaOH konsantrasyonları 0.30, 0.35 ve 0.40 aktivatör/bağlayıcı oranları kullanılarak atıl tuğla tozları kullanılmıştır. Çalışmada optimum karışım oranlarının belirlenmesinde Taguchi L9 deney serisi kullanılmıştır. En yüksek en iyidir olan sinyal/gürültü oranı dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerde, optimum numunelerde en yüksek basınç dayanımı 63.669 MPa, eğilme dayanımı ise 6.629 MPa olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre 6M konsantrasyonu ve 0.30 oranının en yüksek basınç ve eğilme dayanımı performansı sergilediği belirtilmiştir (Yıldız, 2024).

Temizer ve Çavdar (2024) yaptıkları çalışmada, ana bağlayıcı olarak %85 yüksek fırın cürufu ve %15 uçucu kül içeren numuneler hazırlamışlardır. Ayrıca, geopolimer ana bağlayıcılara ikame olarak maden atığı, mermer tozu ve titanyum dioksit kullanmışlardır. Taguchi optimizasyon yöntemini kullanarak geopolimer numuneler üzerinde üç farklı seviye ve 6 farklı parametrenin etkisini gözlemlemektir. Buna göre, L27 ortogonal matrisi oluşturulmuştur. Alkali aktivatör olarak üç farklı molar oranında (8M, 10M ve 12M) sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltisi kullanılmıştır. 7, 28, 56 ve 90 günlük numuneler üzerinde eğilme mukavemeti, basınç mukavemeti, su emme ve boşluk oranı gibi fiziksel ve bazı mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Gözlemlenen en yüksek basınç dayanımı S20 numunelerinde 65.75 MPa'ya ulaşmıştır. Taguchi ve ANOVA istatistiksel analizleri, kürleme sıcaklığının geopolimer numunelerini etkileyen en önemli parametreler olduğunu belirlemiştir.

1.12.3. 3B Baskı İle Yapılan Çalışmalar

İnşaat sektörü uygulamalarında geopolimer ürünler gibi alternatif bağlayıcıların üretimi ve kullanılabilirliğinin yanı sıra, yeni donatı elemanlarının kullanımı da araştırmacılarının üzerinde durduğu konuların başında gelmektedir. Bu doğrultuda, 3B baskı yöntemi ile üretilmiş kalıp ve donatı elemanlarının inşaat uygulamalarındaki avantaj ve dezavantajları günümüzde irdelenmekte olup, 3B işlemlerinde kullanılan hammaddenin gelişimine paralel olarak daha dayanıklı yapı elemanlarının istenilen şekillerde ve tasarımlarda üretiminin yakın gelecekte sıklıkla kullanılacağı görülmektedir. 3B baskılı yöntemle oluşturulan yapı elemanlarının, geleneksel çelik donatılılara kıyasla mekanik özellikleri bakımından zayıf olmalarına karşın, bu ürünlerin farklı geometrik tasarımlarla kolay üretilebiliyor olmaları oluşan birtakım dezavantajları en aza indirebilir.

Lin vd. (2010) çalışmalarında, kısa karbon lif takviyeli geopolimer matris kompozitler (Cf/geopolimer) üzerinde yapılan üç noktalı eğilme testlerinde çatlak oluşumu ve ilerlemesi yerinde FESEM ile incelenmiştir. Başlangıç aşamalarında yük-deplasman eğrisi elastik davranış sergilerken, kompozitler belirgin deformasyon göstermektedir. Yük arttıkça, çok sayıda mikro çatlak oluşmakta ve kompozit yüzeyine yayılmaktadır. Ana çatlak oluşurken mikro çatlakların ilerlemesi durmakta ve kısmen kapanmaktadır. Liflerin köprüleme etkisi, hem mikro hem de ana çatlaklarda kompozitin bütünlüğünü korumakta ve yük taşımasını sağlamaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, Cf/geopolimer kompozitlerin katastrofik kırılma göstermeyen, yüksek deformasyon kapasitesine sahip ve lif köprüleme etkisi sayesinde bütünlüğünü koruyan bir mekanik davranış sergilediğini yansıtmaktadır. Ayrıca, karbon liflerinin mikro çatlakları stabilize ederek eğilme dayanımını artırdığını göstermektedir.

Elgabbas vd. (2016) yaptıkları bu çalışmada, nervürlü bazalt lif takviyeli polimer (BFRP) çubuklarla güçlendirilmiş beton kirişlerin eğilme davranışı ve servis performansı deneysel olarak incelenmiştir. Sekiz adet beton kiriş üretilmiş ve dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Ortalama bağ dayanımı katsayısı (k_b) 0.83 olarak bulunmuştur. Testler, BFRP çubukların aksenal rijitliğinin kirişlerin deformasyon ve taşıma kapasitesini doğrudan etkilediğini göstermiştir, aynı rijitliğe sahip kirişlerin beton dayanımından bağımsız olarak benzer davranış sergilemesi beklenir. Daha küçük çaplı BFRP çubuklar, yüksek bağ dayanımı sayesinde çatlak oluşumunu azaltabilir. Tüm BFRP takviyeli kirişler, beton ezilmesi nedeniyle kırılmış, kırılmadan önce yüksek

deformabilite (deformabilite faktörü ≥ 4) elde edilmiştir. Bu sonuçlar, BFRP çubukların beton kirişlerde hem mukavemet hem de süneklik açısından etkili olduğunu ve tasarımda dikkatle kullanılmasının gerekli olduğunu göstermektedir.

Autay vd. (2019) tarafından, farklı ağırlık yüzdelerinde kısa cam lif takviyeli PA 66 kompozitlerin çekme, eğilme, sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Üç noktalı eğilme ve tek yönlü çekme testleri ile mekanik davranış; karşılıklı kaymalı sürtünme ve aşınma testleri ile sürtünme-aşınma davranışı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, cam lif takviyesinin mekanik ve sürtünme-aşınma performansı önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Lif oranının artması, nihai çekme dayanımını, eğilme dayanımını ve elastik modülü artırırken, kopma uzamasını azaltmıştır. Ayrıca lif oranının yükselmesi sürtünme katsayısını düşürmüş ve aşınma hızını artırmıştır. Lif yönelimi sürtünme davranışında belirleyici olmuş; kaymanın cam lif yönüne paralel olduğu durumlarda sürtünme katsayısı dik yöndekine göre daha düşük bulunmuştur. Aşınma mekanizması taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile desteklenmiştir.

Chukov vd. (2019) çalışmalarında, yüksek sıcaklığa dayanıklı termoplastik ile emprenye edilmiş tek yönlü karbon lif kompozitlerinin mekanik, termal ve ara yüzey özelliklerini incelemiştir. Araştırmada, karbon liflerin yüzeyinde uygulanan termal ve kimyasal oksidasyonun, lifler ile polisülfon ve polifenilen sülfid arasındaki etkileşim ile kompozitlerin mekanik ve termal performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, karbon lif-polimer matris etkileşiminin hem yüzey işlemine hem de polimer tipine bağlı olduğunu göstermiş; kimyasal oksidasyon ile iyi bir ara yüzey etkileşimi sağlanmış ve en yüksek mekanik performans, polifenilen sülfid ile emprenye edilen liflerde elde edilmiştir. Özellikle nitrik asitte (HNO_3) 3 saat kimyasal modifikasyona tabi tutulan karbon lif takviyeli PPS kompozitlerde nihai çekme dayanımı ve Young modülü iki katına çıkmıştır. Yüzey modifikasyonu, lif-matris etkileşimini iyileştirerek polimer zincirlerinin daha etkili immobilizasyonunu sağlamış ve böylece modifiye lif takviyeli kompozitlerde daha yüksek cam geçiş sıcaklığı gözlenmiştir. Hem PPS/CF hem de PSU/CF kompozitlerinde lif yüzey modifikasyonu, mekanik ve termal özelliklerde belirgin bir iyileşmeye yol açmıştır.

Xu vd. (2021) tarafından yapılan polimerik kafes yapılarının kullanıldığı bir çalışmada, derecelendirilmiş takviye kafes elemanlarının kullanılarak yüksek bir süneklik ve daha az malzeme kullanımının mümkün olabileceği görülmüştür. Çalışmada RL15 olarak adlandırılan kafes yapısı ile en az donatıya ihtiyaç duyulacağı ve sünek kopma

mukavemetinin %57.18 olabileceği ifade edilmiştir. Simülasyon testlerinde ise donatı materyalinin mukavemetinin artırılması ile enerji ihtiyacının karşılanabilmesi vurgulanmıştır. 3B polimerik malzemelerin elastisite modüllerinin sınırlı olmalarından dolayı, baskı teknolojisi ve mukavemetlerinin gelişmesi konularının araştırmaya ihtiyaç alanlar olduğu vurgulanmıştır. Bu nedenle, gerinim sertleştirmesine sahip çimentolu kompozitlerin mukavemeti artırılan polimerik donatılar ile mümkün olabileceği belirtilmiştir.

Huang vd. (2021) bazalt lif takviyeli polimer (BFRP) donatılı beton kirişlerin kuazi-statik ve darbe yükleri altındaki davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, eğilme-kritik kirişlerin darbe yükleri altında eğilme-kesme birleşik kırılma moduna geçtiği, kesme-kritik kirişlerin ise daha şiddetli diyagonal kesme kırılması ve beton parçalanması sergilediği belirtilmiştir. Ayrıca yüksek dayanımlı betonun artan kırılma eğilimi nedeniyle darbe performansını olumsuz etkileyebileceği, sayısal analizlerin deneysel verilerle uyumlu olduğu ve BFRP donatılı kirişlerin darbe dayanımının çelik donatılı kirişlerle karşılaştırılabilir seviyede olduğu bildirilmiştir.

Hou vd. (2021) yaptıkları çalışmada, sürdürülebilir 3B yazdırılmış harç (3BPM) üretmek amacıyla çimentonun bir kısmını geri dönüştürülmüş toz (RP) ile değiştirilmiştir. Farklı ikame oranlarında (%10, %20 ve %30) RP ile hazırlanan taze 3BPM'nin akışkanlığı, priz süresi, mekanik özellikleri ve hidrasyon ısısı incelenmiştir. Sonrasında 3B yazıcı kullanılarak RP içeren 3BPM'nin ekstrüzyon ve yapım kabiliyeti değerlendirilmiştir. Bulgular, RP'nin akışkanlık kaybı oranını artırdığını, açık süreyi ve priz süresini kısalttığını, ayrıca zamanla penetrasyon direnci gerilmesini hızla artırdığını göstermiştir. RP'nin ilavesi, hidrasyon ısını ve ilk yaşlardaki mekanik dayanımı artırarak yapım kabiliyetini geliştirmiştir.

Skoratto vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, geleneksel donatı teknikleri kullanılarak yapılması zor olan tasarımlar, 3B yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Test edilen plastik-harç elemanlarının özellikleri bakımından oldukça yüksek kaliteli oldukları ve fiber donatılı beton kalitesine yakın özellikler taşıdığı vurgulanmıştır. Özellikle plastik-harç elemanlarının esneklik özelliklerinin çelik donatılar için testinin oldukça kıyaslanabilir olduğu belirtilmiştir. Bu doğrultuda, prizma numuneler (40mmx40mmx160mm) ve küp numuneler (100mmx100mmx100mm) olmak üzere farklı numune türleri üzerinden birtakım testler gerçekleştirilmiştir. Prizma küplerde basınç ve eğilme dayanımları incelenirken, küp numunelerde yarmada çekme dayanımları

ve dinamik elastite modülündeki değişimler araştırılmıştır. 3B baskı cihazında 225 °C erime noktasına sahip ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren)türü filament kullanılmıştır. Dört farklı dolgu yoğunluğunda (%10, %20, %30 ve %40 olacak şekilde) üretilen donatılılar içinde, %10 yoğunlukta harç donatılı numenin yapısında %0.3 oranında kritik eğilme yük sapması elde edilirken, %15, % 20 ve %25 için bu değer sırasıyla, %0.9, %1.2 ve %1.8 değerlerinde tespit edilmiştir.

Çelik vd. (2023) çalışmasında, uçucu kül bazlı geopolimer beton (GPC) kirişlerin mekanik davranışını, portland çimentosu beton (OPC) kirişlerle karşılaştırmalı olarak sayısal analizler yoluyla incelemiştir. Çalışmada, 110×20×15 cm boyutlarında GPC kirişler farklı basınç ve çekme donatı kombinasyonlarıyla modellenmiş, yük–deplasman eğrileri, eğilme ve kesme rijitlikleri ile çatlak gelişimi incelenmiştir. FEM analizleri, deneysel sonuçlarla yüksek uyum göstermiştir; örneğin 2Φ8 basınç ve 3Φ14 çekme donatılı kirişlerde maksimum yükler yaklaşık 160–180 MPa arasında olup OPC kirişlerin maksimum dayanımı biraz daha yüksek bulunmuştur. İlk çatlak GPC-FEM modelinde 3,5 mm deplasman sonrası oluşurken, deneysel modelde 1 mm'de gözlenmiştir. Plastik deformasyon GPC kirişlerde 7,5 mm'de başlarken, OPC kirişlerde 10 mm'de başlamıştır. Sonuçlar, GPC kirişlerin mekanik davranış ve kırılma modlarının OPC kirişlerle karşılaştırılabilir olduğunu, FEM modellerinin deneysel verileri güvenilir şekilde yansıttığını ve geopolimer beton kirişlerin çevre dostu bir alternatif olarak yapısal elemanlarda kullanılabileceğini göstermektedir.

Çelik ökzetik (auxetic) yapıdaki kafes donatılar kullanılarak çimento/harç materyalleri için yeni bir yöntemin araştırıldığı başka bir çalışmada (Tzortzinis vd., 2022), donatı olarak bir çelik ökzetik içeren yeni bir kompozitin birim hücresi baz alınarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. 3B baskı yöntemiyle üretilen çelik kafeslerin harçlarla kaplandığı eksenel sıkıştırma testlerinde, kafes yapısının normal harçlara kıyasla önemli mukavemet artışları sergilediği ve sünek bir davranış/yüksek kalıcı dayanımlar sergilediği tespit edilmiştir. Çalışmada, özellikle deprem gibi aşırı yükleme şartları altında çalışan yapıların, 3B baskılı farklı geometrik kafes yapılarıyla önemli avantajlar oluşturabileceği üzerinde durulmuştur. Ayrıca kafes yapıdaki donatılar kullanılarak, numunelerin basınç dayanımlarında %140'a varan artışların sağlandığı belirtilmiştir.

Nazir vd. (2023) yaptıkları çalışmada, çok malzemeli katmanlı üretim (MMAM) teknolojilerine dair son altı yıldaki gelişmeleri sistematik şekilde ele almaktadır. Doğadan

esinlenen hücresel metamalzemelerin AM teknikleriyle üretilmesinin çok işlevlilik, çevresel adaptasyon ve mekanik performans açısından önemli faydalar sağladığı vurgulanmaktadır. Çalışmada, MMAM için kullanılan malzeme türleri (metal-metal, metal-polimer, polimer-polimer vb.), modelleme stratejileri, üretim süreçleri, sayısal analiz yaklaşımları, son işlem adımları ve endüstriyel uygulama alanları detaylı biçimde tartışılmıştır. Ayrıca MMAM sürecinde karşılaşılan yazılım eksiklikleri, ara yüzey problemleri ve üretim hatalarına dair çözüm önerileri sunulmuş, gelecek yönelimler değerlendirilmiştir.

Hao vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada yapı elemanlarında 3B teknolojisinin kullanıldığı kafes donatılı kompozitlerin süneklik ve kırılmalık gibi bir takım mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu doğrultuda, altı (6) farklı kafes yapısına sahip çimento esaslı bileşenlerde, poliamid (naylon olarak bilinen) filament yapıdan elde edilmiş donatılar kullanılmıştır. Kafes donatılar birim hücre olarak adlandırılan farklı geometrik şekillerde oluşabilmektedir. Bunlardaki esas amaç, yük altında farklı hücre deformasyon mekanizmaları ile kafes yapısının etkinliğinin artırılmasıdır. Güçlendirilmiş sekizgen kafes yapısına sahip kompozit numunelerde, kontrol numunesine kıyasla, %71.36 daha yüksek en yüksek basınç taşıma kapasitesine sahip olduğu vurgulanmıştır. Bunun yanında eşkenar dörtgen numunelerde en zayıf basınç taşıma kapasitelerinin elde edildiği ancak kontrol numunesine kıyasla %30.80'lik bir artışla sınırlı kaldığı görülmüştür.

Moazzenchi ve Vatani Oskouei (2023) yaptıkları çalışmada, İran maden toprağı kullanılarak üretilen geopolimer beton kirişlerin çelik ve FRP donatılarla güçlendirilmiş hâli ile standart çimento beton kirişler karşılaştırılmıştır. 24 adet kiriş üzerinde dört noktalı eğilme testi gerçekleştirilmiş ve başlangıç çatlağı, nihai yük, çatlak sayısı ve genişliği, yük-deplasman davranışı, deformasyon dağılımı, etkili moment ataletleri ve süneklik incelenmiştir. Geopolimer beton kirişlerin nihai yükleri, aynı donatı oranında OPC beton kirişlerle yaklaşık eşdeğer olup, orta açıklık deformasyonu çelik takviyeli kirişlerde %43, FRP takviyeli kirişlerde %20 daha fazla gözlenmiştir. GFRP takviyeli kirişler, aynı donatı oranında çelik takviyeli kirişlere göre akma öncesinde daha fazla deformasyon göstermiştir, ancak nihai yükler benzerdir. Süneklik, donatı oranı arttıkça hem FRP hem de çelik takviyeli kirişlerde azalmış, ancak geopolimer beton kirişlerin sünekliği OPC kirişlerden daha yüksek bulunmuştur. Çelik takviyeli geopolimer kirişlerde %34, FRP takviyeli kirişlerde %5 artış sağlanmıştır.

Özellikle günümüzde birçok alanda hız ve pratik malzeme tedariği için kullanılan 3B baskılı ürün türleri içerisinde de farklı doluluk oranları, baskı hızları gibi optimum parametrelerin belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir (Tunçel, 2024).

Ziada vd. (2024) çalışmalarında uçucu kül ve silis dumanı içeren, 3B yazıcıyla üretilmiş PVA lif takviyeli geopolimer harçlarda bakteriyel çatlak iyileştirme incelenmiştir. Numunelerde %0, %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında PVA lif kullanılmış ve 28 günlük kürün ardından eğilme dayanımı testiyle çatlak oluşturulmuştur. Yarı numuneler Sporosarcina pasteurii bakterisi ile enjeksiyon yöntemiyle iyileştirilmiş, kalanlar kontrol grubu olarak bırakılmıştır. Eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve su emme testleri yapılmış, mikroyapısal değişimler SEM, EDS ve FTIR analizleri ile incelenmiştir. Enjeksiyonla uygulanan iyileştirme, çatlakları CaCO_3 ile doldurarak %36.23 oranında eğilme dayanımı artışı ve %11.57 oranında kapiler su emme azalışı sağlamıştır. 3B yazıcıyla üretilen PVA takviyeli geopolimer harçların çatlaklarının bakteriyel olarak iyileştirilebileceğini göstermiştir. Lif katkısı eğilme dayanımını artırırken, bakteriyel iyileştirme hem mekanik hem de su geçirimsizlik performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir.

Ananda vd. (2024) ANSYS yazılımını kullanarak yaptıkları çalışmada, geopolimer beton (GPC) kompozit kiriş ve döşemelerin eğilme davranışı iki noktalı statik eğilme testi ile incelenmiştir. Doğrulan FE modeli literatürdeki referans modellerle iyi bir uyum göstermektedir. HPC kiriş ve döşemeler, GPC kompozit kiriş ve döşemelere kıyasla daha düşük rijitliğe sahiptir. GPC, HPC'ye kıyasla dayanımı artırırken, HPC deplasman açısından hâlâ daha iyi performans göstermektedir. Cam ve çelik liflerin eklenmesiyle hem HPC hem de GPC'nin dayanımı artmakta ve deplasman kontrol altına alınmaktadır. GPC, HPC'ye kıyasla daha yüksek gerilme değerlerine sahiptir, bu da kırılmadan önce daha fazla deformasyona uğrayarak sünekliği artırmaktadır. Doğrusal olmayan FE analizi, optimum mesh yoğunluğuna ulaşmak için ön deneme analizlerinin gerekli olduğunu göstermektedir.

Roviello vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada, düşük sıcaklıkta kürlenmiş geopolimerik sistemlere organik bileşenler (PDMS, Epojet gibi) entegre edilerek hibrit ve kompozit köpükler üretilmiş ve mekanik, termal, yapısal özellikleri detaylıca analiz edilmiştir. PDMS içeren hibrit köpükler, Epojet içeren kompozit köpüklere göre daha yüksek basma dayanımı göstermiştir. Mikroyapısal incelemelerde ise PDMS ve Epojet içeren örneklerde gözlenen porozite farklılıkları, malzemenin mekanik dayanımını

doğrudan etkilemektedir. Hibrit sistemler daha homojen boşluk dağılımı gösterirken, kompozit sistemler heterojen faz ayrımı nedeniyle daha kırılmandır.

Ngo vd. (2025), tasarım özgürlüğü, kitlesel özelleştirme, atık azaltma, karmaşık yapı imalatı ve hızlı prototipleme dahil olmak üzere eklemeli imalatın (3B baskı) avantajlarını incelemişlerdir. Çalışmada FDM, SLA ve SLS/SLM gibi başlıca yöntemlerin yanı sıra ABS, PA ve PLA gibi polimerlerin yanı sıra metal alaşımları, seramikler ve betonun kullanımı da değerlendirilmiştir. Yazarlar ayrıca boşluk oluşumu, anizotropik davranış, CAD sınırlamaları ve katman katman yüzey görünümü gibi devam eden zorlukları da vurgulamıştır.

Shweiki vd. (2025) yaptıkları çalışmada, FDM 3B yazıcı ile üretilen PLA ve PETG polimer takviyelerin, çimentolu harç kırıışlerin eğilme dayanımı ve deformasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. PETG takviyeli numuneler, ultimate yük ve deformasyon açısından PLA'ya göre daha iyi performans göstermiştir. Ortalama eğilme kapasitesi PETG'de PLA'nın neredeyse iki katı, deformasyon ise üç kat daha fazladır. PETG'nin yüksek sünekliği, kırılmadan sonra daha yüksek eğilme dayanımı ve enerji emilimi sağlamıştır. PLA takviyeli numuneler daha gevrek davranmış ve daha düşük deformasyon ve yük değerlerinde kırılmıştır. Bu sonuçlar, 3B yazıcı ile üretilen polimer takviyelerin harçlarda enerji emilimini ve sünekliği artırmada etkili olduğunu ve büyük ölçekli inşaatlarda uygulanabilirliğinin araştırılması gerektiğini göstermektedir.

Purba vd. (2025) yaptıkları bu çalışmada, normal beton, uçucu kül bazlı geopolimer beton ve metakaolin bazlı geopolimer beton kırıışlerinin eğilme davranışlarını deneysel testler ve Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) analizi ile incelemiştir. Deneysel sonuçlar, normal beton kırıışlerinin çatlama yükü, akma yükü ve maksimum yük açısından en yüksek performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Normal beton yüksek dayanım ve süneklik sergileyerek, yük altında önemli deformasyonlara izin vermektedir. Uçucu kül bazlı geopolimer beton, normal betona göre daha düşük dayanım göstermiş, ancak metakaolin bazlı geopolimer betondan daha iyi performans sergilemiştir. Uçucu kül bazlı geopolimer beton, plastik bölge sonrasında gevrek davranış göstermiştir. Metakaolin bazlı geopolimer beton kırıışleri en düşük mekanik performansı sergilemiş ve yetersiz kür nedeniyle gevrek kalmıştır. SEM analizleri, deneysel sonuçlara kıyasla yük taşıma kapasitelerini ve deformasyonları genellikle yüksek tahmin etmiş, ancak eğilme davranış trendleri hakkında faydalı bilgiler sağlamıştır. Çalışma, geopolimer betonun özellikle uçucu kül bazlı olanlarının sürdürülebilir bir alternatif olarak umut vadettiğini, mekanik

performansın uygun kür koşullarına bağlı olduğunu ve gelecekte kür proseslerinin optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Li vd. (2025) çalışmalarında, 3B beton baskı (3BCP) teknolojisini kullanarak takviye dolguları üretmek ve çimentolu kompozitlerin lif yönelimini kontrol etmek için yeni bir strateji sunmuşlardır. Önerilen stratejinin 3BCP takviye dolgusu ekleyerek harç kirişlerin eğilme mukavemetini, tokluğunu ve sertliğini artırdığı kanıtlanmıştır. Bu stratejiye göre üç desenli (dikdörtgen, üçgen ve Hilbert eğrisi) çelik elyaf takviyeli 3BCP dolgular üretilmiş ve harç kirişlerine dökülmüştür. Dört noktalı eğilme testlerinin sonuçlarına göre, çelik elyafları dikdörtgen deseninde düzenlemek, kirişlere çelik elyafları rastgele dağıtmaya kıyasla eğilme mukavemetini ve tokluğu %100'den fazla artırabilir. Ek olarak, çelik liflerin üçgen kafes benzeri bir şekilde düzenlenmesi, aynı donatı oranına sahip kalıp döküm kirişlere kıyasla eğilme sertliğini %59 arttırmıştır. Ayrıca Mikro-CT ve Dijital Görüntü Korelasyon analizi, kompozit kirişlerin performansının arayüz gözenekliliğinin azaltılmasıyla daha da iyileştirilebileceğini göstermiştir.

Mostert ve Kruger (2025) yaptıkları çalışmada, ara katman yapışmasını arttırmak ve mekanik performansı iyileştirmek için yeni bir birbirine kenetlenen filament yaklaşımını incelemişlerdir. Çalışmada dört makro ölçekli takviyeli 3BCP kiriş (ikisi geleneksel düz katmanlı, ikisi kilitli katmanlı) üretilmiş ve farklı kesme açıklıklarıyla dört noktalı eğilme altında test edilmiştir. Deney sonuçları, birbirine kenetlenen ara katmanların yapısal performansı önemli ölçüde arttırdığını ve birbirine kenetlenen kirişlerin kesme kapasitesinin referans kirişlere kıyasla %97.6'ya kadar arttığını göstermektedir. Ayrıca, kenetlenen kirişler daha iyi süneklik ve gecikmeli ara katman delaminasyonu sergilemiş, eğilme mukavemeti %10.7'ye kadar artmıştır. Sonuçlar, katmanlar arası bağlanma stratejilerinin optimize edilmesine ilişkin içgörüler sağlayarak, yapısal olarak verimli, sünek ve güvenilir 3BCP elemanlarının geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Jain ve Mıshra (2025), geleneksel analitik yöntemle ve ayrıca karmaşık yapıların incelenmesi ile ilgilenen gelişmiş bir simülasyon tekniği olarak kabul edilen “ANSYS yazılımı” kullandıkları çalışmada, kirişlerdeki yerel sapma ve gerilimi belirlemişlerdir. Bu yaklaşım, her iki yaklaşımın doğruluk ve güvenilirlik karşılaştırmasını daha somut hale getirmek için ANSYS simülasyonları gerçekleştirilerek sonuçların doğrulanması ve güvenilirliği açısından karşılaştırma yapılmıştır. Sonlu elaman modeli kullanılarak

yapılan bu çalışmada karmaşık analizlerin %1 ie %3 oranında hata payı olduğu sonucuna varılmıştır.

Chen vd. (2025) çalışmalarında, geleneksel etriyelerin zıvana-geçme bağlantılara sahip mekanik olarak kenetlenen parçalara yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. 3B baskılı beton ile üretilen kirişlerde montajlı donatı kafesi (ASC) kullanılarak donatı entegrasyonu sağlamışlardır. 4 farklı kiriş üzerinde hem deneysel hem de sayısal simülasyonlar gerçekleştirilerek bazı sonuçlar elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre ASC ile güçlendirilmiş 3B baskılı kirişlerin, etriyesiz 3B baskılı kirişlere kıyasla daha iyi bir performans gösterdiği, ilk çatlama yükünde %127 iyileşme ve tepe yükünde %20 artış sağlamıştır. Geleneksel kiriş ve ASC ile güçlendirilmiş kirişin tepe yüklerinin sırasıyla %86 ve %93'e ulaştığı sonucuna varılmıştır. ASC sistemi yapısal olarak güvenilir olmakla beraber 3B beton baskı için çözüm sunmaktadır.

Yassin vd. (2025), üç farklı senetetik elyaf türünü birleştirerek üç boyutlu beton baskı için CEM II/A-P çimento kullanarak deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışma çeşitli elyaf türlerini (polipropilen, yüksek modüllü poliakrilonitril ve alkali dirençli cam elyaflar) bir araya getiren üç kombinasyonun yanı sıra elyaf içermeyen bir referans karışımı da içermektedir. Ayrıca sayısal analizler ANSYS 2023 R2 sonlu elemanlar yazılımı ve Menetrey –Wilam modeli kullanılarak deneysel sonuçları doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda CEMII/A-P karışımlarında sentetik lif ilavesinin özellikle alkali lif takviyeli karışımlarda dayanımlarda artışların olduğu gözlemlenmiştir. Sayısal sonuçlar ise farklı lif türlerine sahip kirişlerin eğilme davranışı ile benzer sonuçlar ortaya koyduğunu göstermiştir.

Ahadi ve López (2025) yaptıkları çalışmada, 3BCP'de işlem içi ara katman takviyesi olarak sınıflandırılabilir zikzak takviye yöntemi kullanılmıştır. Bu takviye tekniğinin etkisini araştırmak için, Abaqus sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analitik bir çalışma yapılmıştır. Farklı takviye konfigürasyonlarına sahip dört kiriş modeli ele alınmıştır. Bunlar takviyesiz kontrol numunesi, iki Nitinol takviyeli kiriş (biri süperelastik davranış, diğeri şekil hafızası etkisi sergileyen) ve çelik takviyeli kiriş olarak belirlenmiştir. Ayrıca üç noktalı eğilme testleri simüle edilmiştir. Sonuçlar, zikzak takviyenin esnekliği arttırdığını ve ani arızaları önlediğini göstermiştir. Süperelastik davranış gösteren Nitinol takviyeli numune 2.67 mm'lik bir yer değiştirmede kırılmıştır. Bu, takviyesiz kirişin 0.07 mm'lik kırılma yer değiştirmesinden yaklaşık 37 kat daha fazladır. Genel olarak, zikzak takviye numunelerin mekanik performansını önemli ölçüde

arttırdığı ve 3B beton baskıda kullanılmak üzere umut vaat eden bir takviye tekniği olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Hematibahar vd. (2025), 3B baskılı betonarme kirişler ve Fiber takviyeli beton olmak üzere iki farklı vaka üzerinden yaptıkları çalışmada, 3B baskı betonarme örneğinde, evrimsel bir proje dizisi, etkisiz hiperboloid kabuk yapılarından (basınç ve çekme mukavemetini azaltan) Warren ve Howe kafesleri gibi optimize edilmiş kafes desenlerine geçişi göstermektedir. Bu desenler, eğilme mukavemetini %14'ün üzerinde arttırmıştır. Daha fazla iyileştirme, kirişin altından 10 mm uzaklıkta bal peteği dolgusu gibi baskı geometrisi ve yerleşiminde yeniliklere yol açmış ve bu da eğilme mukavemetini %25 arttırmıştır. Buna karşılık, fiber takviyeli beton çalışmaları (örneğin, bazalt ve çelik fiber entegrasyonu) birbirinden kopuk bulgular vermiştir. Örneğin, %0.5–1.2 bazalt fiber çekme ve eğilme mukavemetini arttırırken, çelik fiberler sünekliği ve basınç performansını arttırmıştır. Sonuç olarak bu algoritmanın proje temelli uygulanabilirliği mümkün olmakla beraber sürdürülebilir mühendislik tasarımlarına örnek olmaktadır.

Jayaprakash vd. (2025) çalışmalarında, çelik ve GFRP çubuklarla güçlendirilmiş 100 mm × 150 mm × 1000 mm boyutlarında dört tam boy kirişi incelemişlerdir. Dört noktalı yükleme testi kapsamında, çalışma eğilme davranışını ve yük ile sapma, eğilme kapasitesi ve kırılma şekli arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Deneysel araştırma, ilk çatlak yükünün %2 oranında arttığını göstermektedir. Deneysel araştırma, ilk çatlak yükünün CBCP kirişler için %2 ve GFRPCP için %7.3 arttığını göstermektedir. Benzer şekilde, yük taşıma kapasitesindeki yüzde artış, ince agrega için %24 granit tozu ikamesi olan GFRPCP için %6.3'tür. GFRP çubuklar için %6.3'tür. Benzer şekilde, %24 granit tozu ile ince agrega ikamesi yapılmış GFRP çubuklarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin maksimum sapması, çelik çubuklarla güçlendirilmiş kirişlere kıyasla daha azdır. Bu çalışmadaki önemli bir yenilik, hem dayanıklılığı hem de sürdürülebilirliği arttırmak amacıyla korozyona uğramayan GFRP çubukları ve granit atıklarının birlikte kullanılmasıdır. Çalışma ayrıca ANSYS kullanarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli (FEM) geliştirmiş ve doğrulamıştır.

Juracka vd. (2025) yaptıkları çalışmada, optimize edilmiş 3B baskılı kirişlerin mekanik özellikleri sayısal ve deneysel olarak analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Numuneler dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuş ve aynı zamanda karşılık gelen sayısal modeller oluşturulmuştur. Kirişler 3B baskı kullanılarak basılmış ve dış duvarlara

doğru kademeli olarak artan değişken kalınlıkta bir iç uzamsal ızgara kullanılarak ağırlıkları azaltılmıştır. Bu yaklaşım, üretim sırasında hammadde tüketimini en aza indirirken malzeme mukavemetinin etkili bir şekilde optimize edilmesini sağlar. Elde edilen bulgulara göre lifler arasındaki nihai mukavemet, kırılma şekli ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar ile sayısal model arasındaki yüksek uyumun belirlenmesi olmuştur. Optimize edilmiş kiriş, benzer yük taşıma kapasitesini korurken yaklaşık %60 ağırlık azaltımı sağlamıştır. Elde edilen bilgiler, 3B baskı teknolojisi kullanılarak bu yapıların geliştirilmesi ve optimize edilmesi metodolojisine de önemli bir katkı sağlamaktadır.

Kirthiga ve Elavenil (2025), dış güçlendirme teknikleri kullanılarak bozulmuş yapı elemanlarının yük kapasitesini geri kazanmak ve artırmak için beton yapıların güçlendirilmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada tarımsal endüstriyel atıkların fiber takviyeli polimer (FRP) levhalar için bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Ayrıca cam elyaf takviyeli çimentolu matrisin (GFRCM) önceden çatlamış, güçlendirilmiş betonarme (RC) kirişlerin eğilme ve kesme eksiklikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için deneysel testler ve sonlu elemanlar analizi (FEA) yapılmıştır. Sonuçlar, yük taşıma kapasitesinde %2 ile %32 arasında ve sapmada %4 ile %22 arasında artışlarla yapısal performansta önemli iyileşmeler olduğunu göstermiştir. Yük taşıma kapasitesindeki bu iyileşmeler, yük taşıma kapasitesini ve genel performansı etkili bir şekilde artıran çift katmanlı GFRCM kullanımına atfedilebilir. FEA tahminleri, deneysel bulgularla iyi bir uyum göstererek, GFRCM katmanlarının sayısının artırılmasının, güçlendirilmiş RC kirişlerin yapısal kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını doğrulamıştır.

1.13. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu konuyla ilgili olarak daha önceki çalışmalar incelendiğinde, geopolimer numuneleri hazırlamak için farklı atık malzemelerin ve yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Bu tez çalışmasının amacı, yüzey alanı, yoğunluk değerleri, Fe, Si ve Al bileşenleri gibi farklı özelliklere sahip farklı oranlarda endüstriyel atıkların kullanımı ile elde edilen geopolimer harçlarla ve farklı filamentlerle üretilen 3B baskı donatılar kullanılarak üretilen kirişlerin mekanik, dayanıklılık özelliklerinin, deneysel ve sayısal olarak incelenmesidir. Bu amaca yönelik olarak yapılan çalışmalarda; yüksek fırın cürufu ile etkileşim, C sınıfı uçucu kül kullanılarak araştırılmıştır. Bu bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Üç farklı molarite ve iki

farklı k rleme koşulu altında farklı c r f türlerinin etkisi de araştırılmıştır. Ayrıca çalışmada, endüstriyel ve mineral atık malzemelerin ana bağlayıcı üzerindeki etkileri incelenmiş ve bunların basınç dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Amaç, doğal olarak oluşan bu atık katkı maddelerini kullanarak ve geri dönüşüm ile sürdürülebilirliğini artırmak ve maliyetleri düşürmektir. Ayrıca deney sayısını en aza indirirken çeşitli faktörlerin ve seviyelerin optimum kombinasyonlarını belirlemek için tasarlanmış istatistiksel bir yaklaşım olan Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, deneysel tasarımıla ilişkili maliyetleri etkili bir şekilde azaltmakta, kaliteyi arttırmakta ve sağlam tasarım analizlerine katkıda bulunmaktadır. Altı parametrenin etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada k r süresi, kür sıcaklığı, molarite ve üç farklı katkı maddesi olarak maden atığı (stronsiyum), mermer tozu ve titanyum dioksit gibi endüstriyel atık malzemelerden elde edilen geopolimerler üzerinde farklı kür sıcaklıkları, farklı kür süreleri, farklı molarite oranları ve farklı oranlarda katkı maddelerinin etkileri üzerinde odaklanılmıştır. Sinyal/gürültü oranları tespit edilip en etkili parametre elde edilmiştir. Ayrıca parametreler arasındaki etki yüzdelelerini tespit etmek için varyans analizleri yapılmıştır. Çalışmada, 100x100x400mm ölçülerindeki kalıplar kullanılarak optimum veriler sonucu elde edilen parametre ve seviyelerde donatılı yapıya sahip kiriş numune dökümleri gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç, pratikte uygulaması zor olup, 3B baskı yöntemi ile mümkün olabilen farklı türde 3B baskı filamentleri ile donatılmış geopolimer kirişlerin mekanik performansını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemektir. Geleneksel donatıların yerine kullanılabilecek polimer esaslı malzemelerin yapısal davranışa etkileri araştırılarak, sürdürülebilir ve yüksek performanslı yapı elemanlarının geliştirilmesine katkı sağlanması hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında, ABS PLUS, PA6 GF30 ve PPS CF15 filamentleri kullanılarak üretilmiş geopolimer kiriş numuneleri hazırlanmış, bu numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen yük–deformasyon ve kuvvet–zaman eğrileri incelenmiş, gerilme–şekil değiştirme davranışları ortaya konulmuştur. Ayrıca, farklı filament türleri farklı donatı geometrilerinin ( apraz bağlı, küresel ve standart) etkisi birlikte incelenmiştir. Çalışmada kullanılan bu değişken yapıların, kirişlerin mekanik performansına etkileri değerlendirilmiştir. Sayısal analizlerde ise ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak deneysel koşullar modellenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, yük taşıma kapasiteleri, deplasman dağılımları, gerilme bölgeleri ve kırılma mekanizmaları incelenmiştir. Bunlara

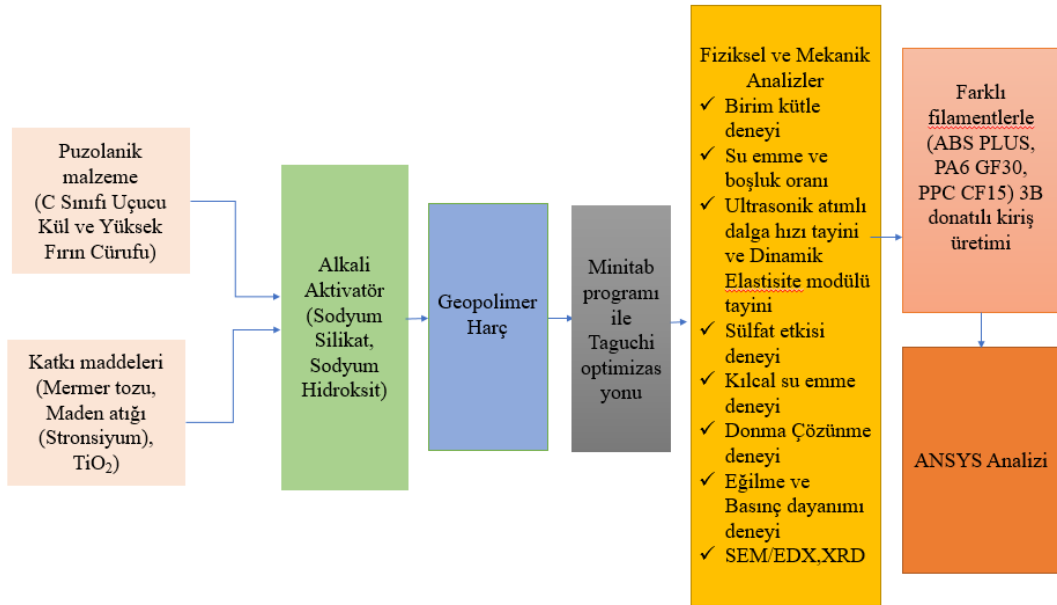
ek olarak, numunelerin mikro yapısal özelliklerini ortaya koymak amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiş, oluşan jel fazları, boşluk yapısı ve donatı-matris etkileşimleri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile hem deneysel hem de sayısal analizler birlikte ele alınarak, 3B filament donatılı geopolimer kirişlerin mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliği ve dayanım mekanizmaları kapsamlı bir şekilde ortaya konulmuştur.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde deneysel çalışma kapsamında yapılan çalışmalar Şekil 6'da gösterildiği şekilde belirlenmiştir. Tezin deneysel çalışmalar kısmı 5 aşamadan oluşmaktadır.

1. aşamada kullanılan malzemelerin temini ve ön deneme çalışmaları,
2. aşamada Taguchi metodu ile optimum numunelerin belirlenmesi,
3. aşamada dayanıklılık (durabilite) deneyleri,
4. aşamada ise 3B yazıcı ile üretilmiş donatıların optimum numuneler üzerindeki etkisi
5. aşamada sayısal modelleme sonlu elemanlar metodunu kullanan paket program ANSYS Static Structural programı (ANSYS Workbench) ile karşılaştırmaları yapılmıştır.



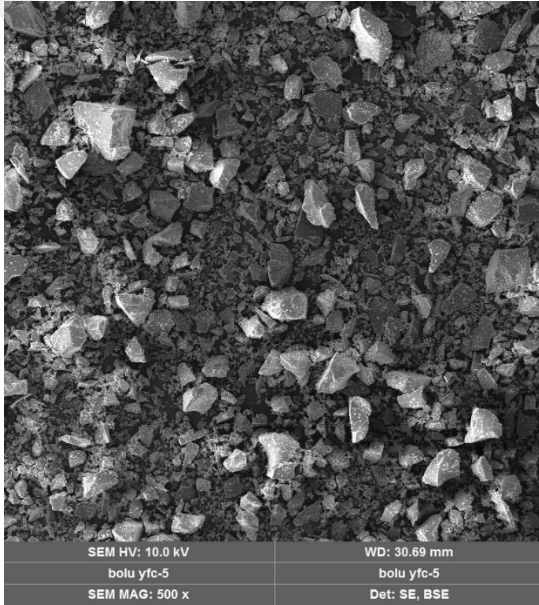
Şekil 6. Tez çalışmasına ait şematik gösterim

2.1. Malzemeler

Bu tez çalışması kapsamında ana bağlayıcı malzeme olarak C sınıfı uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Katkı malzemesi olarak mermer tozu, stronsiyum ve titanyum dioksit ana bağlayıcıya belirli oranlarda ikame edilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmış olup agrega olarak dere kumu kullanılmıştır. Deneysel çalışmaya ait şematik gösterim Şekil 6'da verilmiştir.

2.1.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, demir çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda demirin üretim aşamasında ortaya çıkan bir yan üründür. Yüksek fırın cürufu aniden soğutulması sonucu amorf bir yapı ortaya çıkmaktadır. Granüle halde olan yüksek fırın cürufu öğütülerek toz haline getirilerek beton ve harç üretimlerinde kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Bolu Çimento Sanayi A.Ş'den temin edilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8'de yüksek fırın cürufuna ait SEM görüntülerini ve EDX analizini göstermektedir. Yüksek fırın cürufunun köşeli, ince yapılı ve camsı olduğu SEM analizlerinde görülmektedir. Ayrıca ince taneli olması sebebiyle daha fazla yüzey alanına sahip olması reaksiyona girmesi açısından avantaj olduğu düşünülmektedir. Yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2'de verilmiştir.



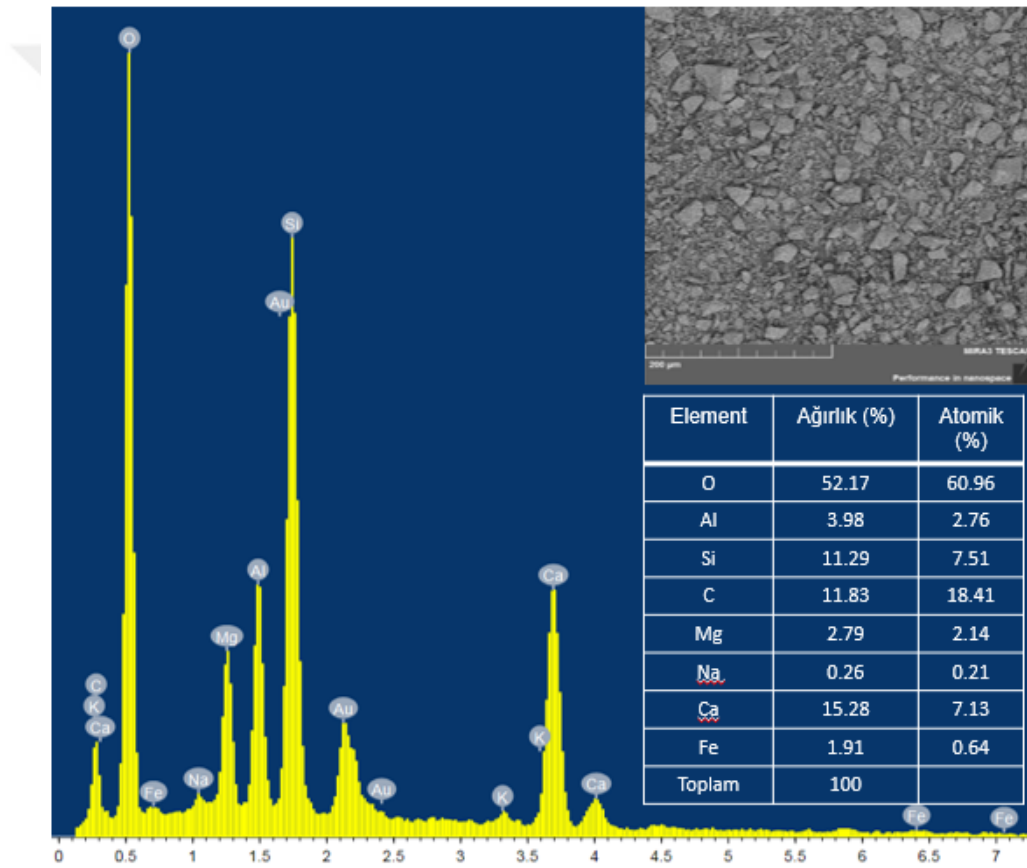
Şekil 7. Bolu yüksek fırın cürufuna ait SEM görüntüsü

Tablo 2. Yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Bileşen	(%)
SiO ₂	40.5
Al ₂ O ₃	12.8
Fe ₂ O ₃	1.11
CaO	35.5
MgO	5.81

Tablo 2. (Devamı)

Bileşen	(%)
K ₂ O	0.6
SO ₃	0.22
TiO ₂	0.71
Na ₂ O	0.7
TOPLAM	97.95
Özgöl Yüzey (cm ² /g)	5384
Nem (%)	0.1

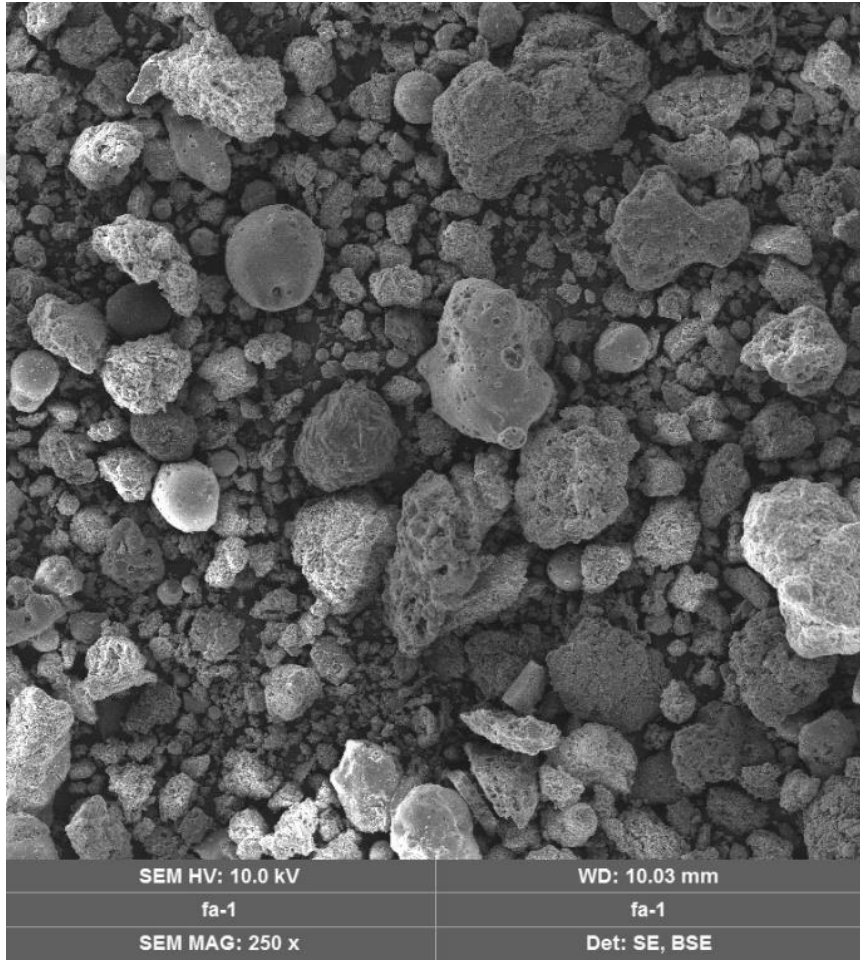


Şekil 8. Bolu yüksek fırın cürufuna ait EDX analizi

2.1.2. Uçucu Kül

Deneyde kullanılan C sınıfı Uçucu Kül, Sivas Kangal termik santralinden temin edilmiştir. Uçucu kül içerisinde bulunan SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarı > %50 olduğu için bu kül C sınıfı (yüksek kireçli) uçucu kül olarak bilinmektedir (TS EN 450-1). C sınıfı

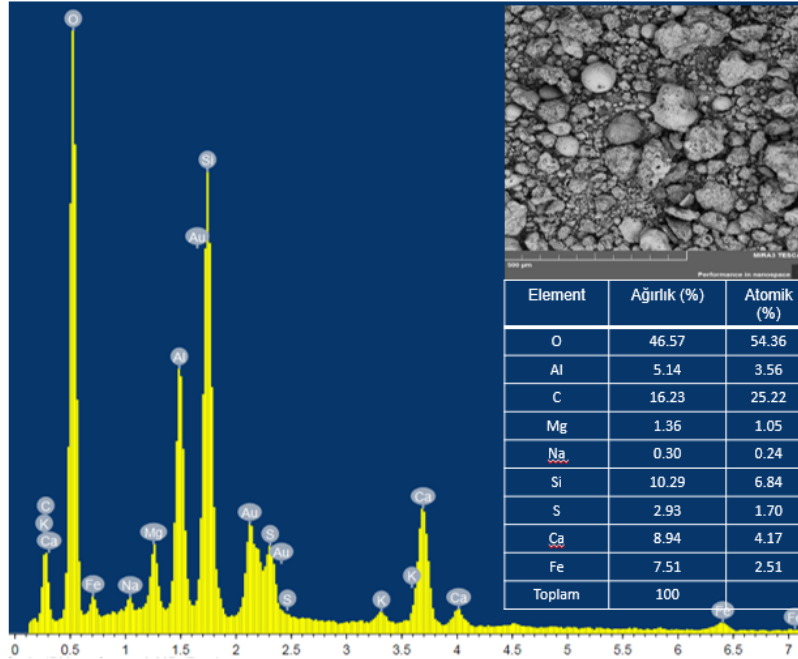
uçucu küllerde $\text{CaO} > \% 10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küllerin tipik kristal fazları; anhidrit (CaSO_4), trikalsiyum alüminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), kireç (CaO), kuvarz (SiO_2), periklas (MgO), mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), merwinite ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$) ve ferrite ($(\text{Mg, Fe}) (\text{Fe}_3\text{Al})_2\text{O}_4$)'dir (Görhan vd., 2009). Uçucu küle ait SEM ve EDX analizleri Şekil 9 ve Şekil 10'da görülmektedir. Burada uçucu külün yapısının küresel, camsı ve düzensiz olduğu SEM analizinde görülmektedir (Şekil 9). Kangal termik satralinden elde edilen uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 9. Uçucu kül'e ait SEM görüntüsü

Tablo 3. Uçucu kül'e ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Bileşen	(%)
MgO	3.12
Al ₂ SO ₃	14.2
SiO ₂	35.01
SO ₃	7.56
Na ₂ O	1.21
K ₂ O	1.06
CaO	25.75
Fe ₂ SO ₃	5.42
Çözünmez kalıntı	24.21
Kızdırma kaybı	6.02
TOPLAM	99.35
Fiziksel kompozisyon	
Özgül ağırlık(ton/m ³)	2.72
45 mikron elek bakiyesi(%)	44.3
Blain özgül yüzey (cm ² /gr)	3320



Şekil 10. Uçucu kül'e ait EDX analizi

2.1.3. Maden Atığı (Stronsiyum)

Çalışmada kullanılan Stronsiyum Sivas ilinde bulunan maden sahalarından elde edilmiş atık malzeme olarak yapısında stronsiyum cevheri olarak %37.76 SrO içermektedir. Minerolojik kompozisyonu içerisinde sölestin, kalsit, mika ve diğer mineraller bulundurmaktadır. Stronsiyum içerikli mineralin yoğunluğu 3.54 gr/cm³'tür. Şekil 11'de minerale ait öğütme öncesi ve sonrası çekilen fotoğraflar görülmektedir. Kurutma ve bilyalı öğütme işlemlerinden sonra 200 nolu elek yardımıyla eleme işlemi gerçekleştirilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 12).

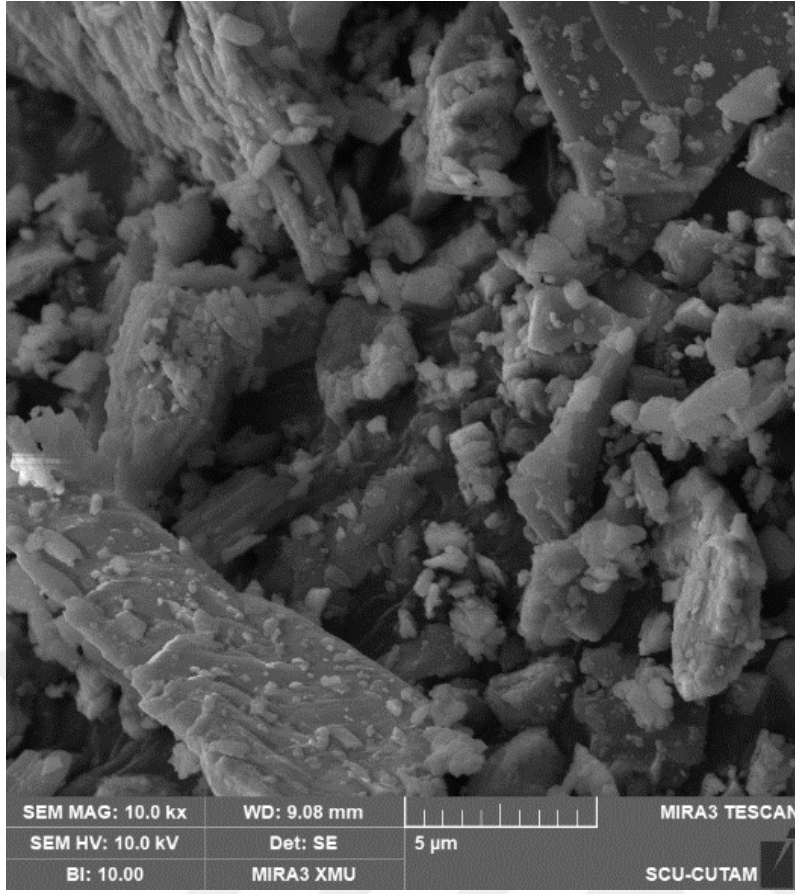


Şekil 11. Maden atığı (stronsiyum)'a ait eleme öncesi ve sonrası görüntü



Şekil 12. Malzemelerin öğütüldüğü bilyalı öğütücü

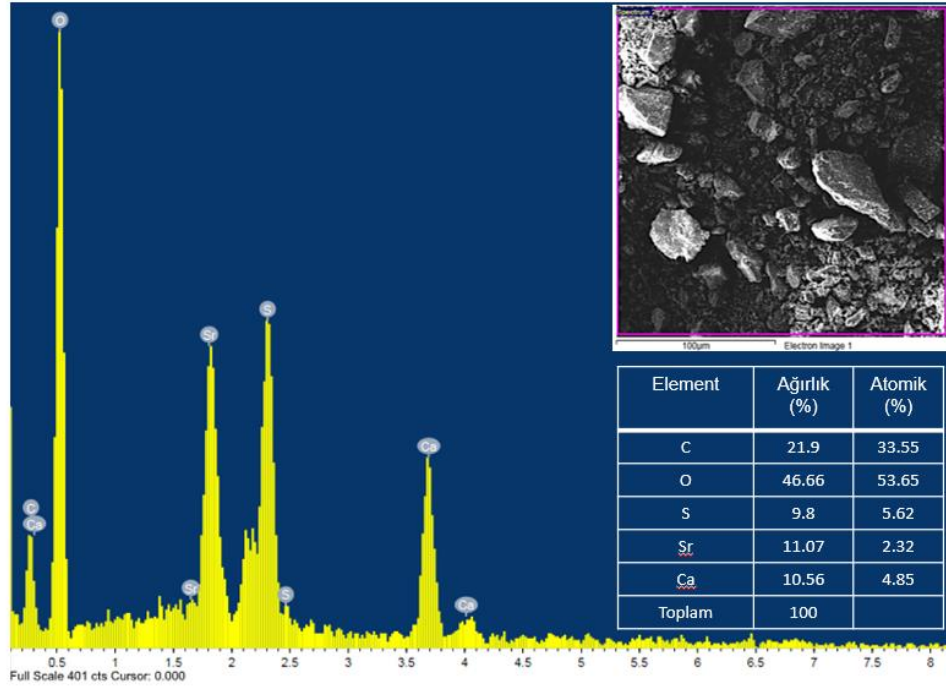
Stronsiyuma ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 4'te gösterilmiştir. Şekil 13 stronsiyum mineralina ait 10.000 kez büyütmede SEM görüntüsünü, Şekil 14 ise EDX analizini yansıtmaktadır. Yapısal olarak farklı büyüklüklere ait tane yapısı gözlemlenmiştir. Bunun yanında farklı geometrik şekil yapılarından meydana geldiği görülmüştür. Aynı zamanda Erciyes Üniversitesi teknolojik araştırma ve uygulama merkezinde (TAUM), X-ışını floresan spektrometresi (XRF) yöntemiyle bu minerale ait yarı kantitatif mineral analizi yapılmış olup Tablo 4'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Maden atığı /stronsiyuma ait SEM görüntüsü

Tablo 4. Stronsiyuma ait XRF analizi

Bileşenler	%
SrO	37.76
SO ₃	38.63
CaO	14.42
BaO	0.43
SiO ₂	0.18
Al ₂ O ₃	0.084
TiO ₂	0.103
Fe ₂ O ₃	0.091



Şekil 14. Stronsiyuma ait EDX analizi

2.1.4. Mermer Tozu

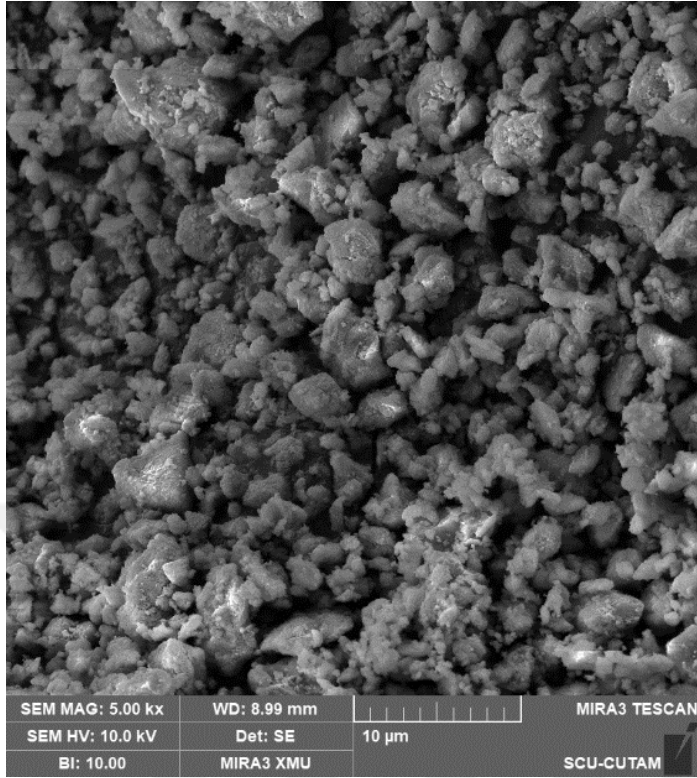
Endüstriyel atık olarak çalışmada geopolimer kompozit içerisinde kullanılan mermer tozu, Sivas ilinde bulunan Özmersan mermer işletme tesisinden temin edilmiştir. Kurutma ve öğütme işlemlerinden sonra 200 nolu elek yardımıyla eleme işlemi gerçekleştirilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 15).



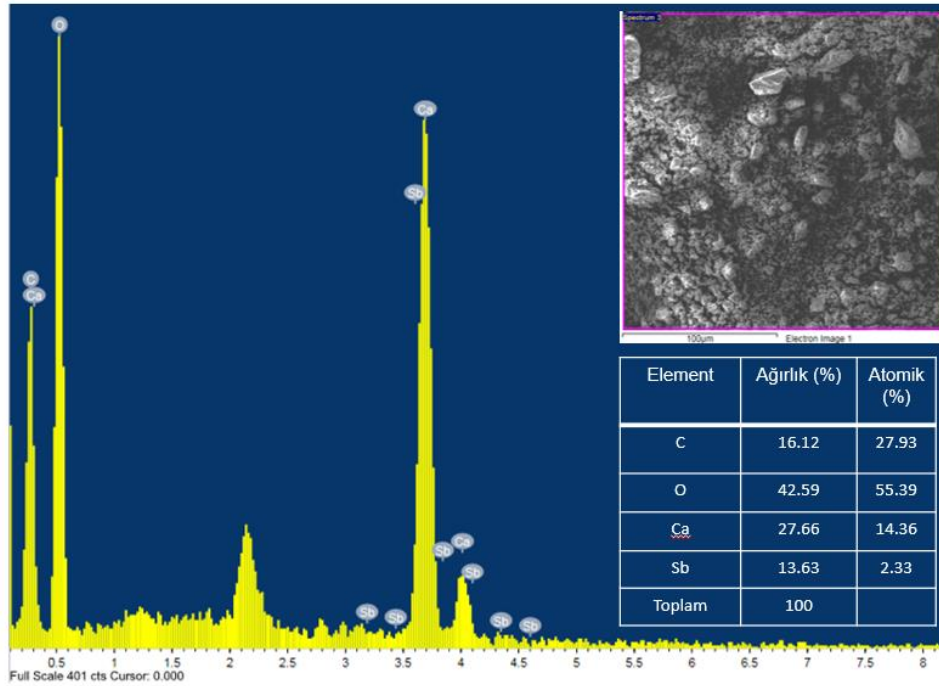
Şekil 15. Elenmiş mermer tozuna ait görüntü

Eleme sonrası deneylerde kullanılmaya hazır hale getirilen mermer tozuna ait SEM ve EDX analizleri sırasıyla Şekil 16 ve Şekil 17'de görülmektedir. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (CÜTAM) merkezinde gerçekleştirilen bu analizlerde mermer tozunun yarı küresel şekilde, birbirine benzer yapıda ve farklı büyüklüklerdeki taneciklerden meydana geldiği görülmektedir. Fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından incelendiğinde ise, yapı içerisindeki sahip olduğu

yüksek CaO oranı dikkat çekmektedir. Mermer tozuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 16. Mermer tozuna ait SEM görüntüsü



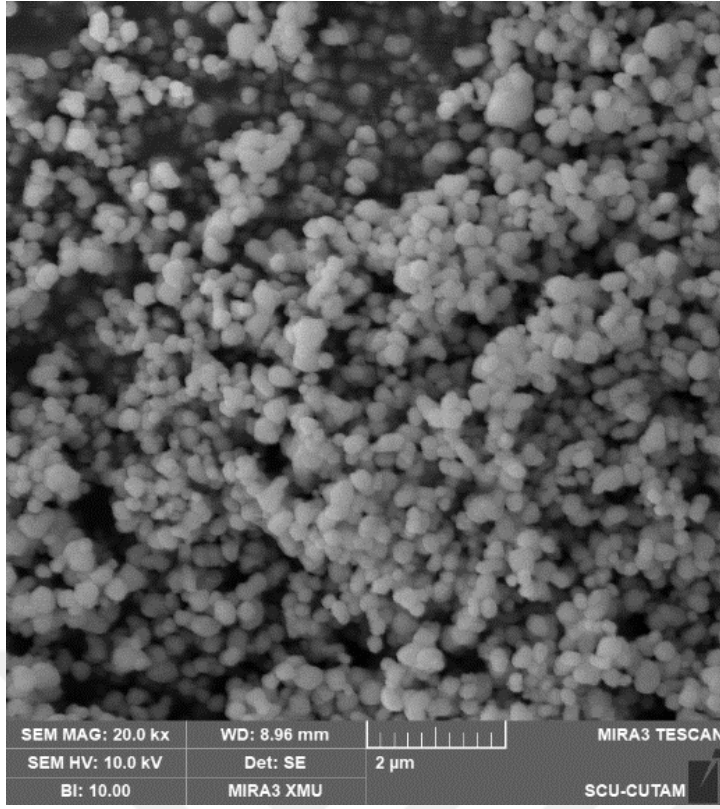
Şekil 17. Mermer tozuna ait EDX analizi

Tablo 5. Mermer tozuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler
NOCHE – Traverten

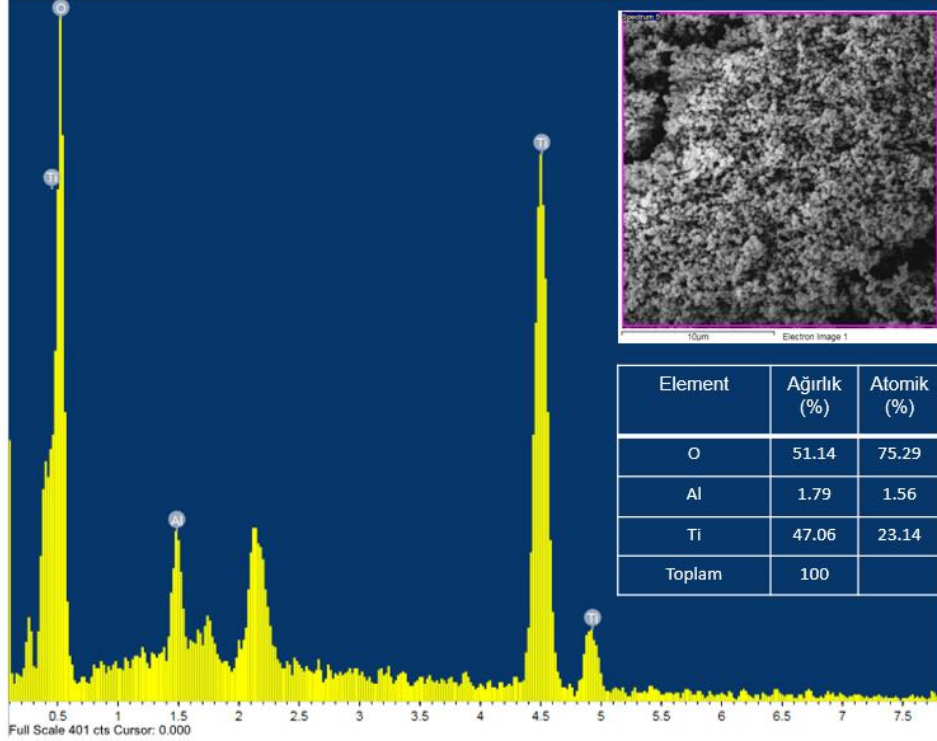
Bileşenler	%
Al ₂ O ₃	0.22
CaO	54.51
FeO ₃	0.11
MgO	0.41
SiO ₂	0.87
Yoğunluk (g/cm ³)	2.69

2.1.5. Titanyum Dioksit (TiO₂)

Titanyum dioksit nanotaneceklerinin spesifik yüzey alanları 200-220m²/g olup, tanecik boyutları da 25 nm altında ve erime sıcaklıkları da 1825 °C'dır (Erem ve Özcan, 2015). TiO₂ genellikle üç farklı kristal yapıya (rutil, anataz, brokit) sahiptir (Mengeloğlu ve Çavuş, 2019). Deneylerde kullanılan titanyum dioksit Mega Analitik firmasından temin edilmiştir. TiO₂'ye ait özellikler SEM görüntüleri Şekil 18'de, EDX analizi ise Şekil 19'da gösterilmiştir. SEM görüntüleri TiO₂'nin kristal bir yapıya sahip olduğunu ve küresel şekillerde olduğunu göstermektedir.



Şekil 18. Titanyum dioksit'e ait SEM görüntüsü



Şekil 19. Titanyum dioksit'e ait EDX analizi

2.1.6. Alkali Aktivatörler

Çalışmada iki farklı alkali aktivatör kullanılmıştır. Bunlardan birisi sodyum hidroksit (NaOH), diğeri ise sodyum silikat (Na_2SiO_3)'tır. NaOH katı pulcuk şeklinde temin edilip laboratuvar ortamında önceden hazırlanarak çözelti haline getirilmiştir. Sodyum silikat ise 1kg'lık bidonlarda solüsyon halinde temin edilmiştir (Şekil 20). Tekkim firmasından tedarik edilen alkali aktivatörlere ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 6 ve Tablo 7'de verilmiştir.



Şekil 20. Sodyum silikat solusyonu

Tablo 6. Sodyum silikat'a ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Sodyum silikat	Su	Çözünürlük	pH	Yoğunluk (20 ⁰ C)	Kaynama Noktası (° C)
%35-40	%60-65	%100	11-12.4	1.3-1.5 g/cm ³	102



Şekil 21. 8M,10M, 12M NaOH çözeltisine ait görüntü

Tablo 7. Sodyum hidroksit'e ait fiziksel ve kimyasal özellikler

NaOH (%)	99
Na ₂ CO ₃ (%)	0.3
SO ₄ (%)	≤0.01
Cl (%)	≤0.01
Al (%)	≤0.002
Fe (%)	≤0.002
pH	14
Yoğunluk (g/cm ³)	2.13
Kaynama Noktası (°C)	1388

2.1.7. Dere Kumu ve Su

Çalışmada kullanılan dere kumu Sivas Kızılırmak deresinden temin edilmiştir. Dere kumu 4mm'lik elekten elenerek harç içerisinde kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, karışımlarda kullanılan su, şehir şebekesinden alınan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır.

2.1.8. Filamentler

Tez çalışması kapsamında, bu bölümde ilk olarak 3 (üç) farklı filament türü ve bu filamentlerle oluşturulmuş 3 (üç) farklı geometrik model belirlenmiştir. Filamentlere ait teknik özellikler Tablo 8'de verilmektedir. Kullanılan filamentler ABS PLUS (Akrilonitril Bütadien Stiren), PPS CF 15 (%15 karbon fiber katkılı Polifenilen Sülfittir), PA6 GF 30 (%30 Cam fiber katkılı poliamid naylon)'dir. ABS Plus, Akrilonitril, Bütadien ve Stiren gibi üç polimerden elde edilen amorf yapılı bir malzemedir. Termoplastik yapıda bulunan bu filament otomotiv, iş makinaları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. ABS Plus filament türü, ABS filamentin sağladığı darbe dayanıklılığı, esnekliği ve yüksek sıcaklık gibi özelliklerinin daha güçlü bir kimyasal formülasyonla oluşturulduğu türüdür (URL-7). PA olarak bilinen (Poliamid/Nylon) ve makine endüstrisinde çoğunlukla kullanılan katkılı PA6 GF30 türüdür. ABS filament türlerine kıyasla oldukça yüksek dayanım ve aşınma direncine sahip bir mühendislik filamentidir. PA6-GF30, Poliamid malzemeye %30 oranında cam-elyaf katkısı ilave edilmiş daha

üstün özelliklere sahip katkılı bir filament türüdür. Bu katkı sayesinde, daha yüksek çekme dayanımı ve kimyasal direnç özelliğinin kazandırılması istenmiştir (URL-8). PPS-CF15 olarak bilinen karbon fiber katkılı Polifenilen Sülfittir. Çalışmada kullanılan PPS-CF15, %15 karbon-elyaf takviyeli filament, ısı ve kimyasal direnci diğer filament türlerine kıyasla oldukça yüksek endüstriyel bir filament malzemesidir. Sert karbon fiber içeriğinden dolayı, 3B baskı işlemlerinde özel çelik ya da geliştirilmiş enjeksiyon nozul gereksinimi oluşturması, katkılı filament türleri için endüstriyel eklemeli imalat prosesi gerektirmektedir (URL-9). Çeşitli polimer yapılar ile geopolimer matris arasında yapışma/birleşme enerjisi elbette ki farklılıklar gösterecektir.

Tablo 8. Filamentlere ait teknik özellikler

Teknik Özellikler	ABS PLUS	PPS-CF15	PA6-GF30
Nozul Sıcaklığı (° C)	240-260	310-340	220-280
Erime Sıcaklığı (° C)	-	330	206
Filament çapı (mm)	1.75	1.75	1.75
Yazdırma Hızı (mm/s)	40-80	40-60	30-60
Çekme Mukavemeti (MPa), (ISO 527)	29.5	120	102
Elastisite Modülü (MPa), (ISO 527)	1379	11000	7400
Eğilme Dayanımı (MPa), (ISO 178)	48.3	170	166
Eğilme Modülü(MPa), (ISO 178)	1406	9000	6100

2.2. Yöntem

Bu tez çalışması kapsamında öncelikle farklı deneylere tabi tutulan 40x40x160mm ölçülerinde prizmatik kalıplar kullanılmış ve numuneler üretilmiştir. 28 günlük numunelerden elde edilen veriler kullanılmıştır. Üretilen bu numuneler mekanik deneylere tabi tutularak eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca her numuneye ultrases dalga hızı tayini, birim kütle tayini yapılmıştır. Geopolimer numunelere durabilite deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde kılcal su emme, donma çözülme etkisi ve sodyum sülfat çözelti etkisi altında numunelerin uğradığı değişiklikler tespit edilmiştir. Sonrasında Taguchi metodu kullanılarak optimum sonuçlar elde edilmiştir. Optimum sonuçlar üzerinde tekrar numuneler üretilip deneyler tekrarlanmıştır.

Doğruluğu ispatlanan veriler kullanılarak 100x100x400mm'lik ölçülerinde kiriş kalıplar kullanılarak numuneler üretilmiştir. ABS Plus, PA6 GF30 ve PPS CF15 filamentleri kullanılarak 3 farklı model (standart, küresel ve çapraz bağlı) 3B baskı yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen bu numunelere dayanıklılık ve mekanik deneyler uygulanarak eğilme dayanım sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar metodunu esas alan ANSYS programında üç boyutlu modeller oluşturularak elde edilen veriler kıyaslanmış ve kontroller yapılmıştır. Sonrasında numunelere (XRD), (SEM/EDX) analizleri ile yapılarak içyapıları incelenmiştir.

2.2.1. Fiziksel ve Mekanik Deneyler

2.2.1.1. Birim kütle, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini

Geopolimer harçların fırın kurusu kütlesi, kuru yüzey doymun kütlesi ve su içindeki kütlesi ASTM C642, 2013'e göre belirlenmiştir. 28 günlük kür işlemi tamamlanan $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ prizmatik harç numuneleri, $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de su içinde 24 saat bekletilerek suya doymun hale getirilmiştir. Bu süreçte numunelerin su içerisindeki kütlesi Arşimet terazi yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 22). Daha sonra numunelerin dış yüzeyleri kurutularak kuru yüzey doymun kütleleri belirlenmiştir. Ardından, numuneler $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilerek kurutulmuş ve kuru kütleleri tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak numunelerin birim kütle, su emme ve boşluk oranları aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır (Eşitlik 5, Eşitlik 6 ve Eşitlik 7).



Şekil 22. Arşimet terazisi

$$\text{Birim k\u00fctle (g/cm}^3\text{)} = M_{FK} / \text{Numune Hacmi} \quad (\text{E\u015fitlik 5})$$

$$\text{Bo\u015fluk oran\u0131 (\%)} = 100 \times (M_{KYD} - M_{FK}) / (M_{KYD} - M_{SU}) \quad (\text{E\u015fitlik 6})$$

$$\text{Su emme oran\u0131 (\%)} = 100 \times (M_{KYD} - M_{FK}) / (M_{FK}) \quad (\text{E\u015fitlik 7})$$

E\u015fitlik 5, 6 ve 7 kullan\u0131larak elde edilen M_{FK} , fır\u0131n kuru s\u00fctlesini (g), M_{KYD} , kuru y\u00fczey doygun k\u00fctlesini (g), M_{SU} ise su i\u00e7indeki k\u00fctleyi (g) ifade etmektedir.

2.2.1.2. Kılcal Su Emme Deneyi

Kılcal su emme deneyi, sadece tek bir y\u00fczeyden suya temas eden numunelerde kılcal bo\u015fluklardan suyun kapiler bir \u015fekilde emili olarak tanımlanmaktadır. ASTM C 1585-13 Standardında belirtilen esaslar dikkate alınarak 40x40x160 mm \u00f6l\u00e7\u00fclerindeki prizmatik kalıplarda har\u00e7 numuneler hazırlanmıştır. Taguchi metoduna g\u00f6re hazırlanan numuneler deney \u00f6ncesinde sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuştur. Daha sonra tek bir y\u00fczeyi a\u00e7ık kalacak \u015fekilde diğ\u00e7er yan y\u00fczeyleri ve \u00fcst y\u00fczeyinin havadaki nemden ve sudan etkilenmemesi i\u00e7in al\u00fcminyum folyo ile kaplanmıştır. Yan y\u00fczeylerde 2 ± 1 mm a\u00e7ıklık bırakılarak sabit seviyede su ile teması sağılanmıştır. \u015ekil 23'te g\u00f6r\u00fcld\u00fcğ\u00fc gibi cam bir havuz hazırlanarak numunelerin alt y\u00fczeylerinin (40x160 mm'lik y\u00fczey) suya temas edilmesi mesnetler ile sağılanmıştır. Birincil kılcallık deneyi i\u00e7in 1, 5, 10, 20, 30. dakikada ve 1, 2, 3, 4, 5, 6. saatte, ikincil kılcallık katsayısı tayini i\u00e7in de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8. g\u00fcnde k\u00fctle okumaları yapılmıştır. Kılcal su emme miktarını tespit edebilmek amacıyla, numuneler belirtilen s\u00fcrelerde sudan \u00e7ıkarılarak, her defasında su ile temas eden y\u00fczey kurulanmış ve tartılarak k\u00fctleleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu k\u00fctle değıerleri her numunenin su ile temas eden y\u00fczey alanına b\u00f6l\u00fcnerek, zamana bağılı emdiğı su miktarları a\u015ağıda verilen form\u00fcl kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I = \frac{mt}{a \times d} \quad (\text{E\u015fitlik 8})$$

Eşitlik 8 kullanılarak elde edilen I, absorbe edilen su miktarını (mm), a, suyla temas eden yüzey alanını (mm²), mt, t sürede emilen su miktarını (g), d ise suyun yoğunluğunu (g/mm³) göstermektedir.



Şekil 23. Kılcal su emme deneyi

2.2.1.3. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini

ASTM C 595 standardına uygun şekilde Pundit (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) adı verilen bir cihaz ile ölçümler yapılmıştır (Şekil 24). Bu cihazda alıcı ve verici olmak üzere iki adet transduser bulunmaktadır. Verici transduser tarafından gönderilen ultrasonik ses dalgaları numune içerisinde geçerek alıcı transduser tarafından alınır ve cihaz tarafından ultrasonik sinyallerin alış-veriş süresi μ s cinsinden hassas olarak ölçülür. Isıl kür işlemlerinin ardından numunelerin oda sıcaklığına gelmesi ile 160 mm boyu doğrultusunda bu işlem gerçekleşir. Numunelerin boşluk, çatlak yoğunluk, sıvı ya da kuru olması gibi birçok değişkene bağlı olarak değişen ultrasonik atımlı dalga hızı numunenin kalitesi açısından önemli verilerin elde edilmesine yardımcı olacaktır.



Şekil 24. UPV cihazı

2.2.1.4. Dinamik Elastisite Modülü Tayini

Dinamik elastisite modülü hesaplaması için ASTM C597-16 standardı kullanılarak ve aşağıdaki eşitlikler aracılığıyla hesaplama yapılmıştır. Literatür çalışmaları göz önünde bulundurularak poisson oranı 0.2 olarak belirlenmiştir.

$$E_d = V^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

Eşitlik 9 kullanılarak elde edilen E_d , dinamik elastisite modülünü (MPa), ρ , yoğunluk değerini (kg/m^3), V , ultrases dalga hızını (km/s), ν ise poisson oranını göstermektedir.

2.2.1.5. Donma Çözülme Direnci Tayini

Harç numuneleri, donma-çözülme dayanımını belirlemek amacıyla ASTM C666 (2015) standardının Prosedür A metoduna uygun olarak hazırlanmıştır. Numuneler, $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarında prizmatik kalıplarda üretilmiş ve 28 günlük kür sürecinden sonra donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Donma-çözülme çevrimleri, otomatik olarak bu işlemi gerçekleştirebilen bir cihaz kullanılarak uygulanmış ve Taguchi metoduyla hazırlanan toplam 27 numuneye 50 çevrim gerçekleştirilmiştir. Şekil 25'te görüldüğü gibi tüm numuneler, donma-çözülme deney kabiniindeki haznelere yerleştirilmiş ve -18 ± 2 °C ile $+4 \pm 2$ °C arasında çevrimlere maruz bırakılmıştır (Şekil 26). Her bir donma-çözülme çevrimi 2 ila 5 saat arasında tamamlanmıştır. Çevrimlerin tamamlanmasının ardından, numunelere donma-çözülme öncesi ve sonrası fiziksel ve mekanik testler uygulanmıştır. Bu testler arasında dinamik elastisite modülü, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı analizleri yer almış ve elde edilen sonuçlardaki değişimler detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 25. Donma çözülme kabini



Şekil 26. Geopolimer harç numunelerinin donma çözülme içerisindeki görüntüsü

2.2.1.6. Sodyum Sülfat Çözeltisi Deneyi

Sodyum sülfat çözeltisi deneyinde 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik kalıplarda, geopolimer harç numuneleri hazırlanmıştır. ASTM C 1012'de belirtilen esaslara göre numuneler, sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisi içerisine konulmuştur (Şekil 27). Hazırlanan sodyum sülfat çözeltisi için 10 litre çözelti hazırlanmıştır. %5 derişimli çözelti için 0.5 kg Na_2SO_4 - 9500 ml saf su içerisinde çözdürülmüştür. Numuneler çözelti içerisinde 6 ay süreyle bekletilmiştir. Çözelti içerisine konulan numuneler her 2 ayda bir değiştirilerek çözelti yenilenmiştir ve her çözelti değişimi esnasında kütle ölçümleri yapılmıştır. Deney sonrasında eğilme, basınç dayanım değerleri ve dinamik elastisite modülü değerleri elde edilmiştir.



Şekil 27. Sodyum Sülfat çözeltisine ait görüntü

2.2.1.7. Küçük Kirişlerde Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

TS EN 1015-11 standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmada, 40×40×160 mm boyutlarındaki geopolimer harç numunelerine, Şekil 28'de gösterildiği gibi, mesnet açıklığı 100 mm olacak şekilde tek noktadan yükleme uygulanmıştır. Numuneler test cihazına yerleştirilirken, üretim sırasında kalıbın üst kısmında oluşan pürüzlü yüzeyin mesnetlere ve yükleme noktasına temas etmemesine özen gösterilmiştir. Yükleme hızı, standartta belirtildiği üzere, 50 N/s olarak ayarlanmış ve eğilme dayanımı testi bu hızda gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımdan 3 adet numune üretilmiş, eğilme dayanımı ölçülmüş ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak, eğilmeye bağlı çekme dayanımı olarak raporlanmıştır. Bu yöntem, numunelerin mekanik performansını standart koşullar altında karşılaştırılabilir şekilde belirlemek amacıyla uygulanmıştır.

$$\sigma_{\text{ç}} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (\text{Eşitlik 10})$$

Eşitlik 10 kullanılarak elde edilen $\sigma_{\text{ç}}$, eğilme dayanımını, (N/mm²), b, numunenin enini, (mm), d, numunenin yüksekliğini, (mm), L, iki mesnet arasındaki mesafeyi, (100mm), P ise numuneye uygulanan yükü, (Newton) göstermektedir.



Şekil 28. Eğilme dayanımı cihazı

2.2.1.8. Basınç Dayanımı Deneyi

TS EN 196-1 standardı kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, 40×40×160 mm boyutlarında prizmatik numunelere basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı deneyi sonucunda kırılan her numuneden elde edilen iki parça üzerinde ayrı ayrı basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Basınç dayanımı testi sırasında, otomatik test cihazının basınç aparatına bağlı 40×40 mm yüzey alanına sahip basma başlığı, numunenin pürüzsüz yüzeyi üzerine tam temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 29'da gösterildiği gibi, test cihazı ile basınç dayanımı testi uygulanmış ve cihazın yükleme hızı 500 N/s olarak ayarlanmıştır. Deney sonunda, numunenin kırılma yükü (N), basınç kuvvetinin uygulandığı yüzey alanına (mm²) bölünerek (MPa cinsinden) basınç dayanımı değeri hesaplanmıştır. Her karışımdan elde edilen 3 numunenin kırılması sonucu toplam 6 parçaya basınç dayanımı testi ayrı ayrı uygulanmış ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak, ilgili karışımın basınç dayanımı sonucu olarak kaydedilmiştir.

$$\sigma_b = \frac{P}{b^2} \quad (\text{Eşitlik 11})$$

Eşitlik 11 kullanılarak elde edilen σ_b , basınç dayanımını, (N/mm²), b, numunenin enini, (mm), P ise numuneye uygulanan yükü, (Newton) göstermektedir.



Şekil 29. Basınç dayanımı cihazı

2.2.1.9. Büyük Kirişlerde Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

100x100x400 mm boyutlarında üretilen geopolimer kiriş numuneler ASTM C1609 (2019) standardına uygun olarak üç noktadan yüklemeli eğilme deneyi yapılmıştır. Mesnet açıklığı 350 mm ve cihaz yükleme başlığı kiriş numunelerinin mesnet açıklığının ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. 28 günlük numuneler üzerinde yapılan eğilmede çekme dayanımı deneyi Şekil 30'da gösterilmiştir. Deney numunelerinin orta nokta sehim değerleri cihaz tarafından 1µm hassasiyetinde otomatik olarak ölçülmüştür. Deney sırasında ani enerji boşalmasını önlemek ve yük-sehim eğrilerini kaydetmek için prese geri beslemeli olarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan yük hücresi 20 kN kapasiteli ve hassasiyeti $\pm \% 0.5$ 'tir.



Şekil 30. Eğilmede çekme dayanımı test cihazı

2.2.1.10. SEM ve XRD analizleri

Geopolimer harç numunelerden alanı 10x10 mm, yüksekliği 3 mm olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Erciyes üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERÜ TAUM) laboratuvarında Panalytical marka ve Empyrean model X-ışını difraktometresi cihazı ile hamur halindeki geopolimer harç numuneleri toz haline getirilerek analizleri gerçekleştirilmiştir. XRD kırınım desenleri 0.0260 dalga boyunda ve 5-89 °(2 θ) tarama aralığında tayin edilmiştir. Geopolimer harç numunelerde kristal faz oluşumu 45kV-40 mA'lı çalışan Cu tüp radyasyonu ile belirlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, Cumhuriyet Üniversitesi Teknolojik Araştırma ve Uygulama Merkezinde (CÜTAM) TESCAN MIRA3 XMU cihazı ile yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilen analizler 1000X, 5000X, 10000X büyütme yapılmıştır.

2.2.1.11. Taguchi Metodu

Çalışmanın bu bölümünde ana bağlayıcılar olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Bu bağlayıcılar üzerinde mermer tozu, maden atığı (stronsiyum) ve TiO₂

gibi katkı maddelerinin etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda kür süresi, kür sıcaklığı, molarite ve katkı maddeleri gibi değişkenler çalışma parametreleri olarak tanımlanmıştır. Bu her bir parametreye ait 3 (üç) farklı seviye belirlenmiştir. Bu seviyeler katkı malzemesi olarak kullanılan maden atığı için 25g, 50g ve 75g, mermer tozu için 25g, 50g ve 75g, TiO_2 için ise 5g, 7.5g ve 10g olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda, kür süresi için 24, 48 ve 72 saat, kür sıcaklığı için $75^{\circ}C$, $90^{\circ}C$ ve $105^{\circ}C$, molarite için 8M, 10M ve 12 M seviyeleri kullanılmıştır (Tablo 9).

Tablo 9. Taguchi metoduna göre belirlenen parametre ve seviyeler

Parametre	Seviye		
	1	2	3
Kür süresi (t)	24	48	72
Kür sıcaklığı ($^{\circ}C$)	75	90	105
Molarite (M)	8	10	12
Maden atığı(Stronsiyum) (%)	5	10	15
Mermer tozu (%)	5	10	15
TiO_2 (%)	1	1.5	2

Tablo 10'da verilmiş olan $L_{27}(3^6)$ 6 parametrelili ve 3 seviyeli ortogonal dizisi parametre ve parametre seviyelerini göstermektedir. P1, P2, P3, P4, P5 ve P6 çalışmada seçilen parametreleri, her deney numarası satırında verilen rakamlar ise parametrelerin seviyelerini göstermektedir.

Tablo 10. Ortogonal Dizin $L_{27}(3^6)$

Deney no	Parametre ve parametre seviyeleri					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
L1	1	1	1	1	1	1
L2	1	1	1	1	2	2
L3	1	1	1	1	3	3
L4	1	2	2	2	1	1
L5	1	2	2	2	2	2
L6	1	2	2	2	3	3
L7	1	3	3	3	1	1

Tablo 10. (Devamı)

Deney no	Parametre ve parametre seviyeleri					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
L8	1	3	3	3	2	2
L9	1	3	3	3	3	3
L10	2	1	2	3	1	2
L11	2	1	2	3	2	3
L12	2	1	2	3	3	1
L13	2	2	3	1	1	2
L14	2	2	3	1	2	3
L15	2	2	3	1	3	1
L16	2	3	1	2	1	2
L17	2	3	1	2	2	3
L18	2	3	1	2	3	1
L19	3	1	3	2	1	3
L20	3	1	3	2	2	1
L21	3	1	3	2	3	2
L22	3	2	1	3	1	3
L23	3	2	1	3	2	1
L24	3	2	1	3	3	2
L25	3	3	2	1	1	3
L26	3	3	2	1	2	1
L27	3	3	2	1	3	2

Bu doğrultuda MiniTab programı Taguchi metodu kullanılarak L27 (3^6) ortogonal matrisi oluşturulmuştur. Tablo 11'de gösterildiği gibi, 27 adet numune kodu belirlenmiştir. Dolayısıyla 7, 28, 56 ve 90 günlük numunelerde toplamda 324 adet numune hazırlanmıştır (Şekil 31). Analizler 28 günlük numuneler üzerinden gerçekleştirilmiş olup, S/N oranları ve Anova istatistiksel verileri elde edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde eğilme dayanımı, basınç dayanımı, birim kütle ve ultrasonik dalga hızları üzerinden S/N oranları ve ANOVA analizleri ile birçok veri yorumlanmıştır. Taguchi metodu, üretimdeki kaliteyi arttırmak için tasarlanan istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntem ile en az deneyle en anlamlı sonuçlara ulaşılmaya çalışılır ve en uygun çözümü sunar (Ünverdi, 2021).

Tablo 11. Geopolimer harç karışım oranları

Numune Kodu	Kür süresi (t)	Kür sıcaklığı (° C)	Molarite (M)	Yüksek fırın cürufu (g)	Uçucu kül (g)	Maden atığı (Stronsiyum) (g)	Mermer tozu (g)	TiO ₂ (g)
S1	24	75	8	370	75	25	25	5
S2	24	75	8	342.5	75	25	50	7.5
S3	24	75	8	315	75	25	75	10
S4	24	90	10	345	75	50	25	5
S5	24	90	10	317.5	75	50	50	7.5
S6	24	90	10	290	75	50	75	10
S7	24	105	12	320	75	75	25	5
S8	24	105	12	292.5	75	75	50	7.5
S9	24	105	12	265	75	75	75	10
S10	48	75	10	317.5	75	75	25	7.5
S11	48	75	10	290	75	75	50	10
S12	48	75	10	270	75	75	75	5
S13	48	90	12	367.5	75	25	25	7.5
S14	48	90	12	340	75	25	50	10
S15	48	90	12	320	75	25	75	5
S16	48	105	8	342.5	75	50	25	7.5
S17	48	105	8	315	75	50	50	10
S18	48	105	8	295	75	50	75	5
S19	72	75	12	340	75	50	25	10
S20	72	75	12	320	75	50	50	5
S21	72	75	12	292.5	75	50	75	7.5
S22	72	90	8	315	75	75	25	10
S23	72	90	8	295	75	75	50	5
S24	72	90	8	267.5	75	75	75	7.5
S25	72	105	10	365	75	25	25	10
S26	72	105	10	345	75	25	50	5
S27	72	105	10	317.5	75	25	75	7.5



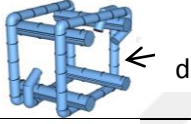
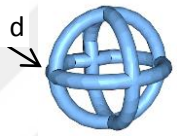
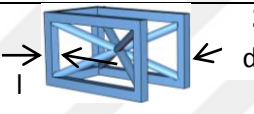
Şekil 31. Taguchi metodu ile oluşturulan numunelere ait görüntü

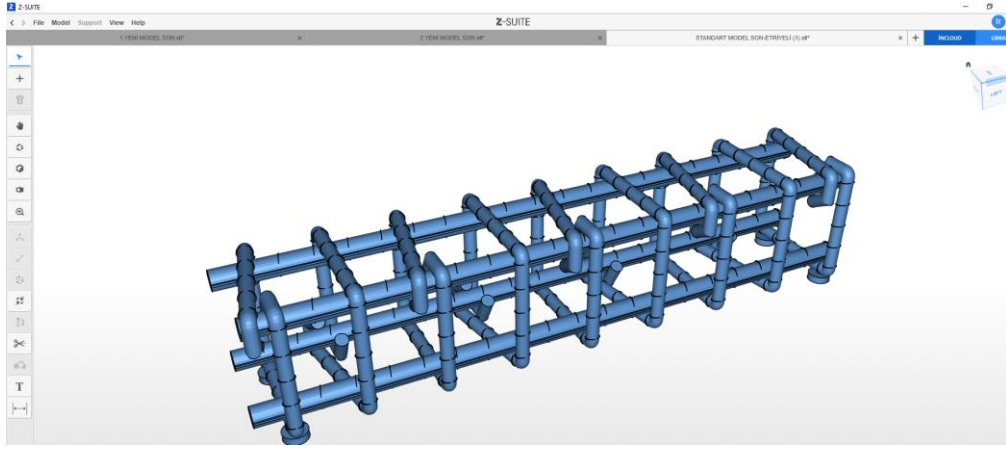
2.2.1.12. 3B Donatıların Modellemesi

Çalışmada, standart donatılı modelin yanı sıra küresel ve çapraz bağlı hücrelerden oluşan toplam 3 farklı donatı geometrisi üzerinde durulmuştur. Bu doğrultuda ilk olarak 100x100x400 mm ölçütlerine sahip kiriş kalıp yapısı esas alınarak, standart model için donatı hesabı yapılmıştır. Şekil 32-a, standart, Şekil 32-b küresel ve Şekil 32-c çapraz bağlı kafes yapılarına sahip donatı elemanlarını göstermektedir. Böylece pratikte uygulaması zor olup, 3B baskı yöntemi ile mümkün olabilen 3B donatı türleri üretilerek, bunların mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Tasarlanan model geometrileri 3 boyutlu olarak Autocad 2024 programında çizilerek, stl formatında 3B yazıcı arayüz programına aktarılmıştır. Oluşturulan standart donatılı model toplam dokuz (9) adet etriyeye sahip olup, yaklaşık 340000 mm³ bir hacme sahiptir. Bu hacim referans alınarak, diğer iki yeni model tasarlanmıştır. Buradaki amaç, geopolimer beton içerisinde farklı yapısal formlardan meydana gelmiş kafesli donatı yapıların eğilme ve basınç yükleri etkisi altındaki performanslarını kıyaslamaktır. Bu modellerden ilki, beş (5) farklı hücreden meydana gelen küresel yapıli donatıdır. Çalışmada kullanılan kiriş kalıp ölçüleri (uzunluk, genişliği ve yükseklik) baz alınarak hazırlanan yeni modellerde, eksenel, radyal ve teğetsel kuvvetler etkisi altında yüksek performansın gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan yeni modeller iç içe geçmiş bütünleşik hücrelere sahip olup, her

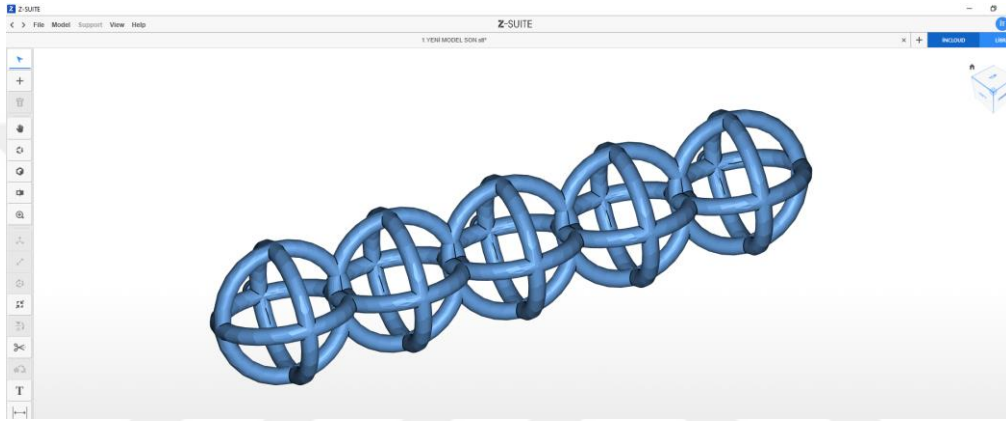
biri için et kalınlıkları yaklaşık 1 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kalınlık değeri FDM yöntemiyle 3 boyutlu baskı özelliklerine göre belirlenmiş olup, bu değerin altındaki baskılıma işlemlerinde olası sorunların önüne geçilmiştir. Bir diğer geometri ise gelen yükleri köşe-kenar bağlantıları ile dağıtmayı amaçlayan çapraz bağlı yapıdır. Çapraz bağlı yapıya sahip kafes yapısı toplam üç (3) hücreden oluşmaktadır ve her bir hücresinde sekiz (8) adet köşegen bağlantısı bulunmaktadır. Geopolimer kompozit numunesi için kullanılan kalıp hacmi 100x100x400 (mm) ve toplam hacmi 4000000 mm³ şeklindedir (Tablo12). Tasarlanan donatı elemanları bu hacmin yaklaşık %8.5'ini oluşturmaktadır.

Tablo 12. 3B modellere ait tasarım özellikleri

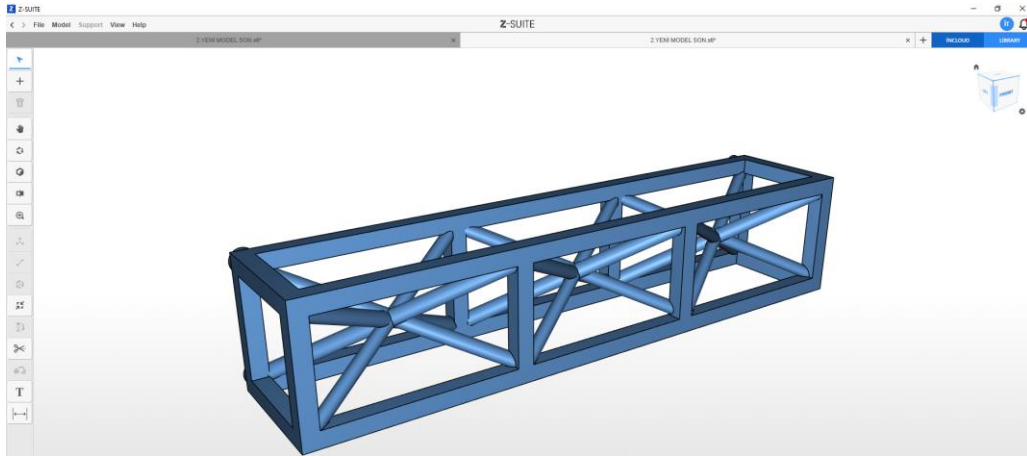
Donatı numarası	Kafes hücre tipi	Birim hücre yapısı	Hücre sayısı	d yada l(mm)	Ölçütler (mm)	Toplam Hacim (mm ³)
1	Standart		8 adet	10 mm	80.57x384x84	339079
2	Küresel		5 adet	10 mm	90x388x95	341484
3	Çapraz bağ		3 adet	10 mm	80x380x84.5	342604



a)



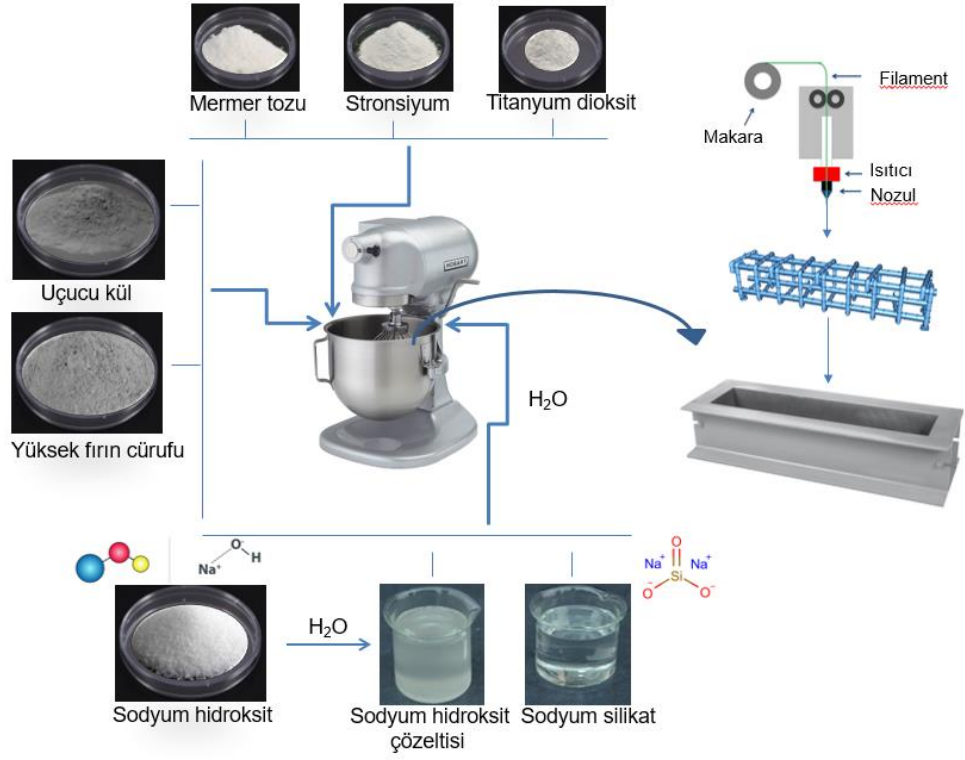
b)



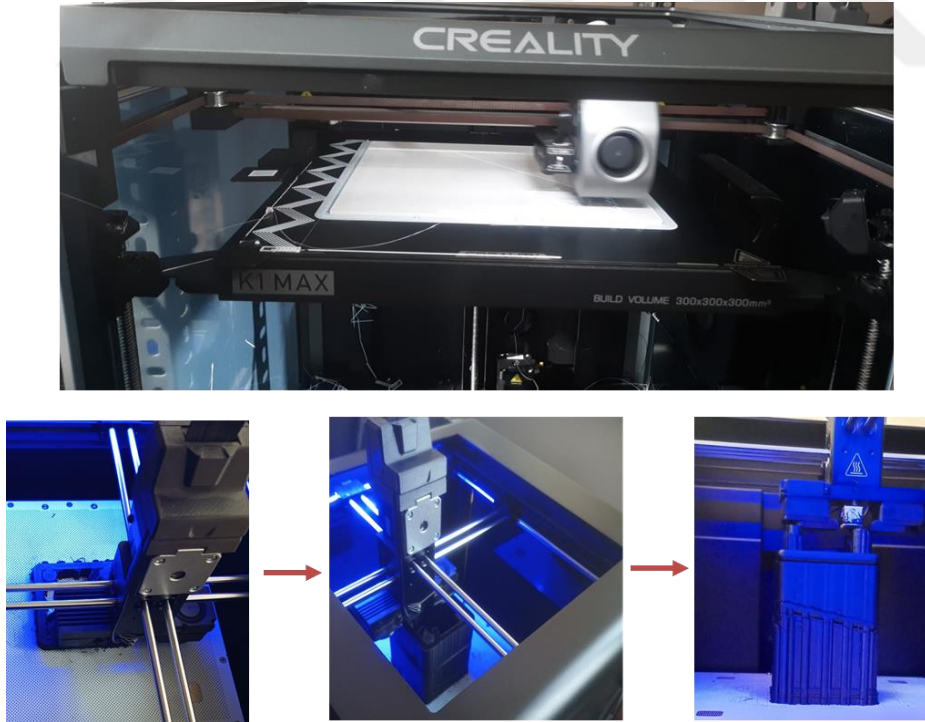
c)

Şekil 32. Standart a), küresel b) ve çapraz bağlı c) yapıya sahip donatılara ait katı model görüntüleri

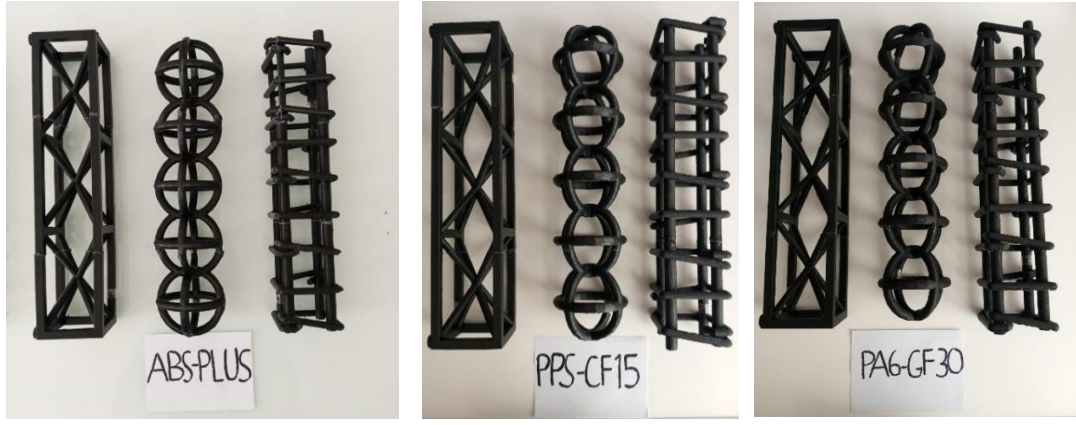
Çalışmada kullanılan 3B baskılı filament donatıların üretimi, 3dörtgen firması tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 34). Filamentli donatılar ABS PLUS çapraz bağlı, ABS PLUS küresel, ABS PLUS standart (birinci grup), PA6 GF30 çapraz bağlı, PA6 GF30 küresel, PA6 GF30 standart (ikinci grup), PPS CF15 çapraz bağlı, PPS CF15 küresel, PPS CF15 standart (üçüncü grup) olarak adlandırılacak ve bu şekilde kullanılacaktır (Şekil 35). TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanan geopolimer numuneler ise hobart mikseri kullanılarak üretilmiştir. Karıştırma kabına öncelikli olarak dere kumu ve ana bağlayıcı olarak kullanılan yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve katkı malzemeleri belirlenen oranlarda konulmuştur. 1. Devirde 60 sn kuru karışım homojen olarak karıştırılmıştır. Daha sonra alkali aktivatör olarak belirlenen sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat üzerine su ilave edilerek karışıma eklenmiştir ve 1. Devirde 90 sn daha karıştırılmıştır. Daha sonra sıvı malzemeler olan sodyum hidroksit, sodyum silikat ve su miksere dökülüp homojen bir karışım elde edilmiştir. 2. Devirde 90 sn daha karıştırıldıktan sonra mikser durdurularak karışım spatula yardımıyla homojen bir karışım sağlamak için karıştırılmıştır. Sonra mikser 3. Devire alınarak 60 sn daha karıştırılmıştır ve ardından 2. Devire alınarak 60 sn daha karıştırılıp mikser durdurulmuştur. 100x100x400 mm boyutlarındaki kalıplar gres yağı ile yağlanarak donatılar kalıp içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 33). Hazırlanan harç kalıp içerisine standartlara uygun şekilde yerleştirilmiştir. Kalıpların üzeri cam levhalarla kapatılıp hava alması engellenmiştir (Şekil 36 ve Şekil 37). 24 saat 75 ° C sıcaklıkta etüvde bekleyen numuneler kür süresi sonunda fırından çıkarılmıştır (Şekil 38 ve Şekil 39). Kalıplardan çıkarılan kiriş numuneler 28 gün boyunca hava almayacak şekilde kapatılarak deneylerin yapılacağı güne kadar bekletilmiştir. Sonrasında eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımları test edilmiştir.



Şekil 33. 3B donatılı filamentlerin geopolimer harç oluşum şeması



Şekil 34. FDM yöntemiyle endüstriyel baskı yapılan 3B yazıcı (UltiMaker Factor 4) ve üretim aşamaları görüntüleri



a)

b)

c)

Şekil 35. Filamentlere ait görüntü ABS PLUS (a), PPS CF15 (b), PA6 GF30 (c)



a)

b)

c)

Şekil 36. Filamentlerin kalıplara yerleştirilmesi standart (a), küresel (b), çapraz bağlı (c)



a)

b)

Şekil 37. Geopolimer harcın kiriş kalıplara yerleştirilmesi (a), kalıpların üzerinin cam ile örtülmesi (b)



a)



b)

Şekil. 38 Geopolimer harcın (a), yerleştirildiği fırın, harçların fırın içerisindeki hali (b)

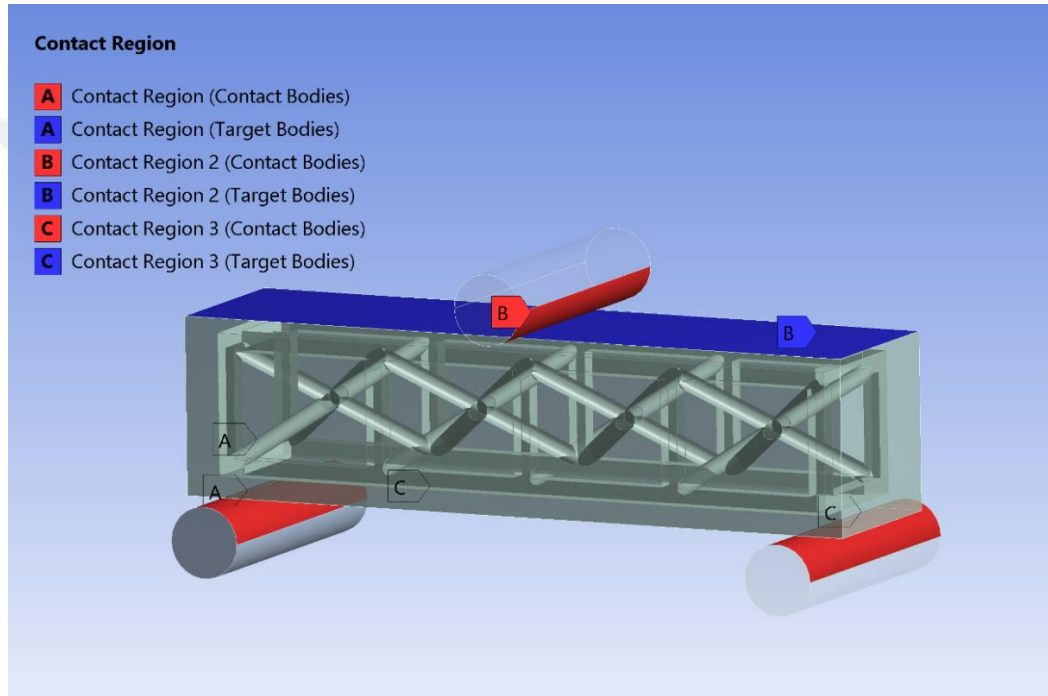


Şekil 39. Geopolimer harç numunelerin kiriş kalıplardan çıkarılması

2.2.1.13. ANSYS ile Sayısal Modelleme

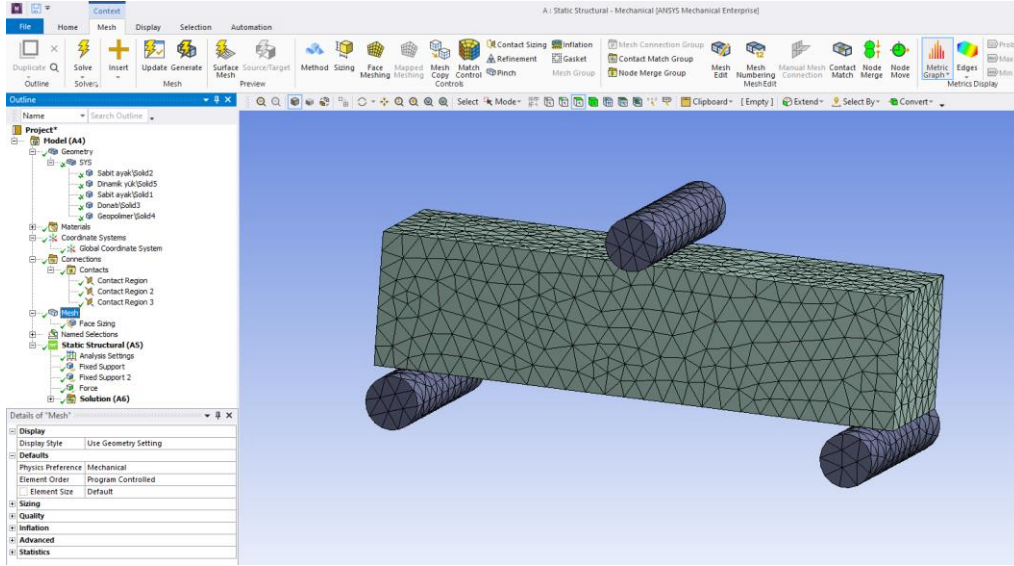
Çalışmanın bu bölümünde sonlu elemanlar metodu, ANSYS (ANSYS INC., 2015) kullanılarak geopolimer yapıdan meydana gelen filament donatılı kirişlerin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Geometrik model, tek noktadan yüklemenin gerçekleştiği ve iki adet sabit mesnet arasında gerçekleştirilen eğilme testlerinde olduğu gibi birebir (mesnet mesafesi, yükleme noktası vb) modellenmiştir. Geopolimer kiriş yapısının içerisine

yerleştirilen üç farklı donatılı yapı, üç farklı filament malzeme türü seçilerek analiz edilmiştir. Şekil 40'ta görüldüğü gibi, AutoCAD programında (AutoCAD 2025) katı model olarak çizilen geometri .sat uzantısı ile ANSYS Geometry bölümüne tanıtılmıştır. Ardından 3 noktada temas yüzeyleri belirlenerek bu bölgeler kontak bölgeleri olarak tanıtılmıştır. Kiriş numunesine uygulanan yük zamanla değişen bir şekilde tanımlanmıştır. Yani yük sabit olmayıp, analiz süresi boyunca belirli bir fonksiyon doğrultusunda artan bir biçimde uygulanmıştır. Bu yaklaşım, numune üzerinde gerçekçi dinamik yükleme koşullarının modellenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 40. Kirişin katı model olarak tasarlanması

İki adet sabit mesnet üzerine yerleştirilen geopolimer kirişin tam orta noktasında tıpkı eğilme testlerinde olduğu gibi dinamik yükleme rulosu tarafından (zamana bağlı) yük uygulanmıştır. Filament türleri ve geopolimer harçlara ait kiriş özellikleri ise programa harici olarak girilmiştir. Programda oluşturulan donatılı geopolimer kirişin örnek bir modeli Şekil 41'de görülmektedir.



Şekil 41. Geopolimer kirişe ait üç boyutlu sonlu eleman modeli

Tez çalışmasında deneye tabi tutulan geopolimer donatılı kirişlerin analizi, aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemi yazılımı ile sayısal olarakta incelenmiştir. Deneysel çalışmada uygulanan yük değişimi programa girilmiş ve farklı deplasmanlar için gerilme ve deformasyon analizleri yapılmıştır. Deneyler kullanılan yöntemin birebir simülasyonu için sabit ve hareketli olmak üzere çelik üç adet küresel rulo (40x165mm, çelik), geopolimer kiriş ve her bir analizde değişen geometri malzeme türleri için filament tanımlanmıştır. Böylece farklı geometrik yapı ve malzemelere ait yer değiştirme kapasiteleri incelenmiştir. Filament türlerinin belirlenmesinde ANSYS malzeme kütüphanesinde yer alan filament türlerinin her bir filament türü için ayrı ayrı tanımlanmış ve bu filamentlere ait teknik özellikler programa girilmiştir. Deneysel çalışmada olduğu gibi, sayısal analizlerde de geopolimer kompozitli kiriş içerisine yerleştirilen filamentler pas payları dikkate alınarak yerleştirilmiştir. Yapılan sayısal analizlerde statik yapısal analiz türü kullanılmıştır. Ayrıca modellemeye üç boyutlu katı (SOLID) eleman kiriş ve donatı kullanılmıştır. ANSYS paket programında ağ oluşturma işlemi serbest ağ ve düzgün ağ olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Serbest ağ, eleman şekliyle kısıtlı olmayıp modele özgü uygulanma şekli bulunmamaktadır. 9 mm aralığında ağ işlemi yaklaşık 80000 elemanlı ve 120000 düğüm noktası ağ sayılarında çözülmüştür. Katı model olarak oluşturulan kiriş, beton eleman özellikleri tanımlanarak elastisite modülü 17000 MPa olarak kabul edilmiştir. Bütün analizlerde sürtünme katsayısı hesaba katılmamıştır. Çözüm yapılırken lineer olmayan çözüm için ‘*Newton-Raphson*’ metodu kullanılarak

özmler elde edilmiştir. Doğrusal olmayan çözümler için kullanılan Newton Raphson yönteminde dış yükler etkisinde yer değiştirme yapan sistemin düğüm noktalarında oluşacak kuvvet farkı baz alınır. Ayrıca ilk yerdeğiştirmeler yapının şekil değiştirmemiş konumunda hesaplanan rijitlik matrisinden elde edilir. Sonraki adımlarda ise şekil değiştirmiş konumu dikkate alınarak teğet rijitlik matrisi hesaplanarak çözümler elde edilir. Mesnetler sınır koşulları için, mesnetler programın ara yüzünde bulunan ankastre mesnet koşulu kullanılmıştır. Bu sınır koşulları için mesnetlere yapısal elik malzemesi atanarak modellemeler yapılmıştır.

2.3. Ön deneyler

2.3.1. Ön Deney-1

Tez çalışmasının deneysel ön aşamasında, geopolimer harç üretiminde ilk olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan ana bağlayıcı oranı %75 yüksek fırın cürufu ve %25 uçucu kül (75YFC25UK) olarak belirlenmiştir. Oluşturulan harçlar iki farklı kür ortamında (etüv kürü ve su kürü) bekletilmiştir. Katı halde bulunan sodyum hidroksit, çözelti haline getirilerek, farklı molarite oranları (10M, 12M ve 14M) elde edilmiştir. NaOH'nin mol kütlesi 40 g/mol olup, bu da 1 mol NaOH'nin 40 grama karşılık geldiği anlamına gelmektedir. Buna bağlı olarak 10M NaOH özeltisi için 400 g NaOH, 12M NaOH özeltisi için 480 g NaOH, 14M NaOH özeltisi için ise 560 g NaOH tartılmış, üzerine yeterli miktarda saf su eklenmiş ve çözeltinin hacmi 1 litreye tamamlanarak çözelti hazırlanmıştır. Sodyum hidroksit su ile temas ettiğinde ısı ortaya çıkardığı için, soğuması için 1 gün önceden cam kaplarda hazırlanmış ve bekletilmiştir. Diğer bir alkali aktivatör olan sodyum silikat ise solüsyon halinde olup, sodyum hidroksit ile karıştırlarak karışımelerde kullanılmıştır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat sırası ile 70 ve 180 g olacak şekilde, toplamda 250 g alkali aktivatör olarak karışımelerde kullanılmıştır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2.5 olacak şekilde sabit tutulmuştur ve tüm karışımelerde bu oranlarda kullanılmıştır. Su oranı, sabit olacak şekilde (50g olarak) ön deneylerde kullanılmıştır. Sivas Kızılırmak'tan elde edilen dere kumu ise 1350 g olacak şekilde sabit tutulmuştur. Hazırlanan harçlar 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara dökülmüştür (şekil 42).



Şekil 42. Elde edilen 7 ve 28 günlük geopolimer numuneler

2.3.2. Ön Deney-2

Tez çalışması kapsamında yapılan diğer bir ön çalışma ise ana bağlayıcı olarak kullanılan yüksek fırın cürufu ve uçucu külü farklı oranlarda kullanarak ana bağlayıcı oranını belirlemek olmuştur. İki farklı kür yönteminde de (etüv kürü, su kürü) 14M NaOH çözeltisi ile düşük dayanım değerleri ve üretim esnasındaki zorluklar nedeniyle, 10M ve 12M çözeltilere ek olarak 8M çözeltiye sahip numuneler hazırlanmıştır. Geopolimer çalışmalarında 8 M, 10 M ve 12 M NaOH çözeltileri, alüminosilikat kaynaklı malzemelerin çözünmesini ve jel oluşumunu kontrol etmek için seçilir. Düşük molaritelerde reaksiyon yetersiz kalırken, çok yüksek molaritelerde fazla Na^+ iyonu gözenekliliği artırır ve dayanımı düşürür. Bu nedenle 8M ve 12 M aralığı, literatürde optimum aktivasyon bölgesi olarak kabul edilir. Bu aralık, hem yeterli çözünmeyi hem de yoğun ve dayanıklı bir geopolimer matris oluşumunu sağlar. Böylelikle çalışmada belirlenen bu 3 farklı molariteye sahip NaOH çözeltileri kullanılarak devam edilmiştir. Aktivatör olarak kullanılan NaOH ve Na_2SiO_3 oranı 2.5 olarak sabit tutulmuştur. Çalışmasının bu aşamasında iki farklı kür yöntemi denenmiştir (Etüv kürü ve su kürü). İki farklı kür şartları için ana bağlayıcı oranları %75 Yüksek Fırın Cürufu+%25 Uçucu Kül (75YFC25UK), %85Yüksek Fırın Cürufu+%15 Uçucu Kül (85YFC15UK), %95Yüksek Fırın Cürufu+%5 Uçucu Kül (95YFC5UK), %100 Yüksek Fırın Cürufu (100YFC) olarak seçilmiştir. 4 farklı ana bağlayıcı ve 3 farklı molariteye sahip geopolimer harç numunelerine ait karışım oranları Tablo 13'te verilmiştir.

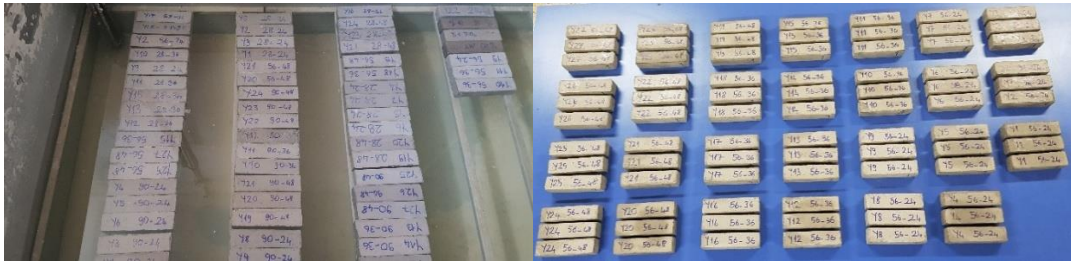
Tablo 13. Geopolimer harçlara ait karışım oranları

Numune Adı	YFC (g) (kütlece %)	UK (g) (kütlece %)	Molarite (M)	Kum (g)	Sıvı/ Bağlayıcı	Su (g)	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)
75YFC	375	125	8	1350	0.6	50	2.5	70	180
25UK	(75%)	(25%)							
85YFC	425	75	8	1350	0.6	50	2.5	70	180
15UK	(85%)	(15%)							
95YFC	475	25	8	1350	0.6	50	2.5	70	180
5UK	(95%)	(5%)							
100YFC	500	0	8	1350	0.6	50	2.5	70	180
	(100%)	(0%)							
75YFC	375	125	10	1350	0.6	50	2.5	70	180
25UK	(75%)	(25%)							
85YFC	425	75	10	1350	0.6	50	2.5	70	180
15UK	(85%)	(15%)							
95YFC	475	25	10	1350	0.6	50	2.5	70	180
5UK	(95%)	(5%)							
100YFC	500	0	10	1350	0.6	50	2.5	70	180
	(100%)	(0%)							
75YFC	375	125	12	1350	0.6	50	2.5	70	180
25UK	(75%)	(25%)							
85YFC	425	75	12	1350	0.6	50	2.5	70	180
15UK	(85%)	(15%)							
95YFC	475	25	12	1350	0.6	50	2.5	70	180
5UK	(95%)	(5%)							
100YFC	500	0	12	1350	0.6	50	2.5	70	180
	(100%)	(0%)							

Tabloda verilen harç oranlarına göre hazırlanan numuneler hobart mikseri TS EN 196-1 standardına uygun olarak üretilmiştir. Üretilen numuneler önceden yağlanan 40x40x160mm'lik prizmatik kalıplara harç dökülmüştür (Şekil 43). Suda bekleyecek numuneler ise 1 gün kalıpta bekletilmiştir. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler 23 ± 2 °C deki su tankında 28 gün bekletilmiştir (Şekil 44-a). Etüvde bekleyecek numunelerin üzeri cam bir plaka ile kapatılarak kalıp ile etüve konulmuştur (Şekil 44-b). Etüvde 24 saat bekleyen numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra hava almayacak şekilde sarılarak 28 gün boyunca bekletilmiştir. Kür süresi tamamlanan numunelere eğilme dayanımı, basınç dayanımı, dinamik elastisite modülü ve birim kütle deneyleri uygulanmıştır.



Şekil 43. Geopolimer numunelerin kalıplara yerleştirilmesi



a)

b)

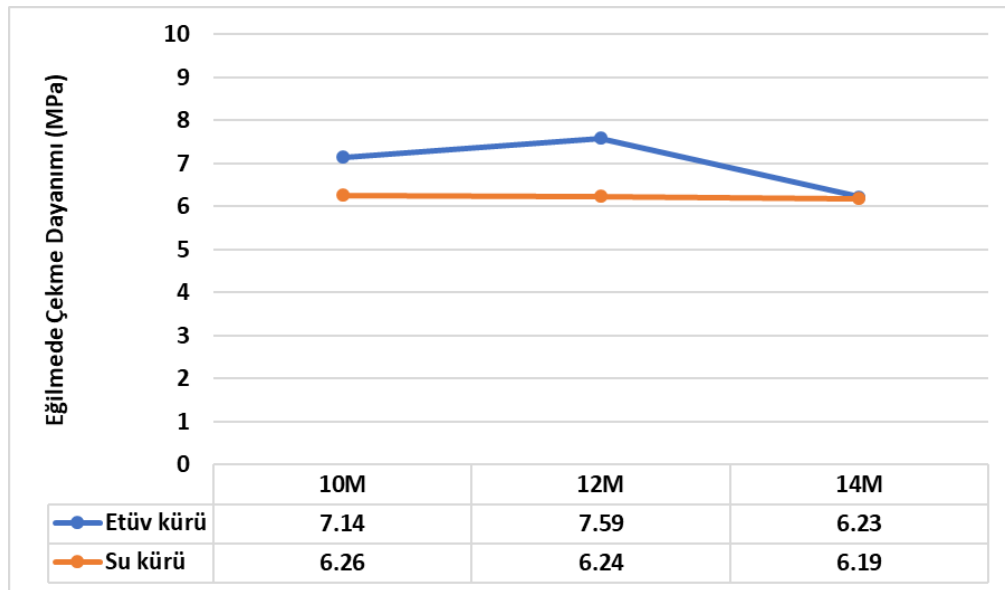
Şekil 44. Geopolimer numunelere ait su kürü (a), etüv kürü (b) görüntüsü

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

Çalışmanın bu bölümünde, farklı mineral içeriklerden elde edilen geopolimer harçlara ön deney 1 ve ön deney 2 olmak üzere 2 farklı ön çalışma yapılmıştır. Burada ön deney 1 kapsamında 2 farklı kür ortamında, 3 farklı molarite kullanılarak kür ortamı ve molaritenin etkisi gözlemlenmiştir. Ön deney 2'de ise 3 farklı molarite, 4 farklı bağlayıcı oranları ve 2 farklı kür ortamı uygulanarak en uygun dayanım sonuçlarını veren ana bağlayıcı oranı tespit edilmeye çalışılmıştır. Geopolimer numunelere ait birtakım fiziksel ve mekanik özellikleri tespit etmek amacıyla bazı testler gerçekleştirilmiştir. İlk numune seti 24 saat boyunca 75 ° C'de termal kürlemeye tabi tutulmuştur. Diğer numuneler 23±2° C'de su kürüne tabi tutulmuştur. Deney gününe kadar bekletilen numunelere eğilme ve basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

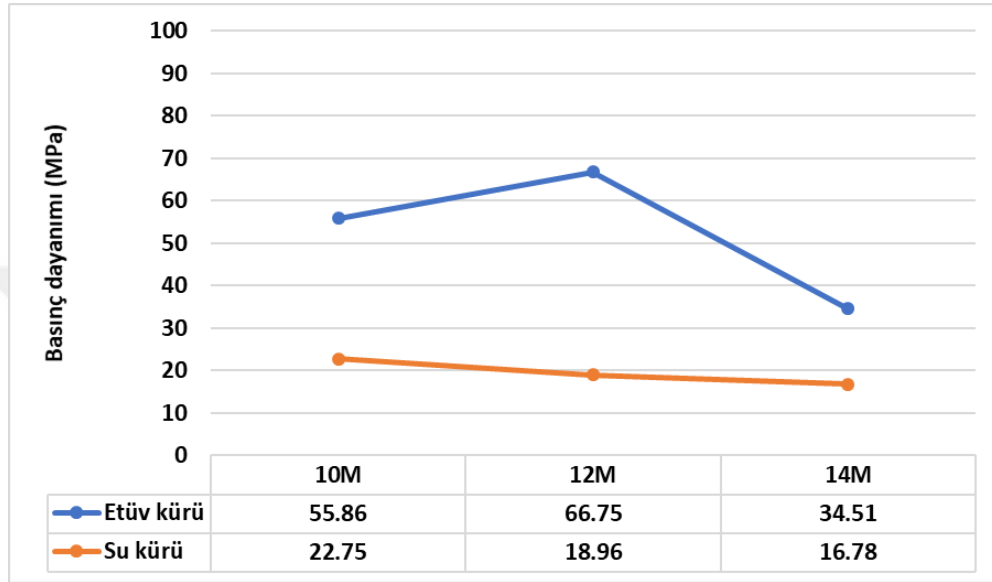
3.1. Ön Deney-1 Sonuçları

Ön deney-1 çalışması kapsamında 3 farklı molarite (10M, 12M ve 14M) dikkate alınarak üretilen ve iki farklı kür yöntemi uygulanarak üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 45'te görüldüğü gibi, 7 günlük eğilme dayanım sonuçlarına göre 14M numunelerde en düşük değerlere ulaşılmıştır. Diğer taraftan su küründe bekletilen numuneler incelendiğinde ise etüv küründe bekleyen numunelere kıyasla, daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir.



Şekil 45. 7 günlük eğilme dayanım değerleri

7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde ise en yüksek basınç dayanım değerinin, etüv küründe bekletilen 12M numunesinde elde edildiği görülmüştür. Genel olarak su kürüne maruz kalan numunelerde dayanım değerlerinin etüvde bekletilen numunelere kıyasla daha düşük sonuçlar verdiği görülmüştür. Geopolimer numuneler içinde en düşük basınç dayanımı (14M su küründe bekletilen numunede) 16.78 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 46).

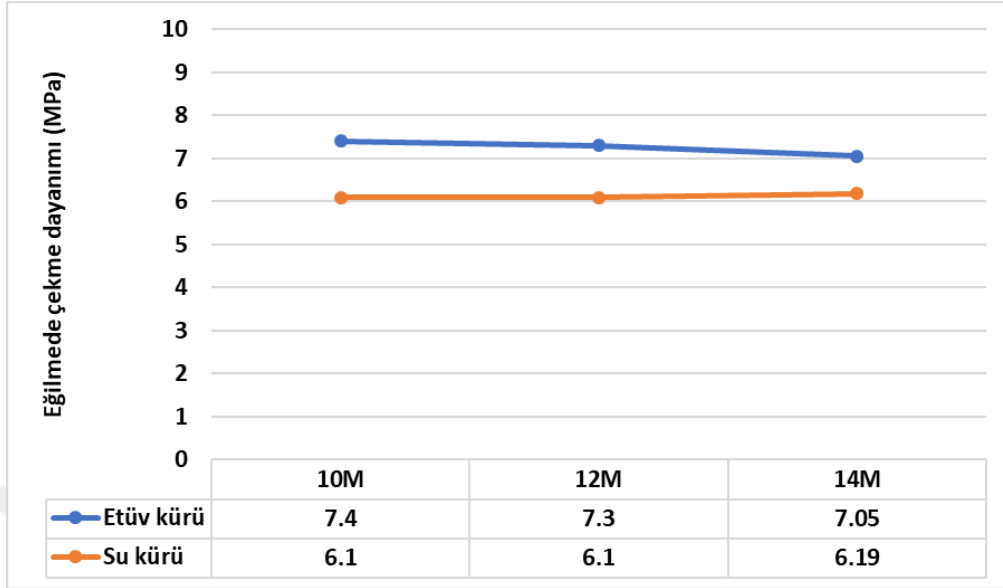


Şekil 46. 7 günlük basınç dayanım değerleri

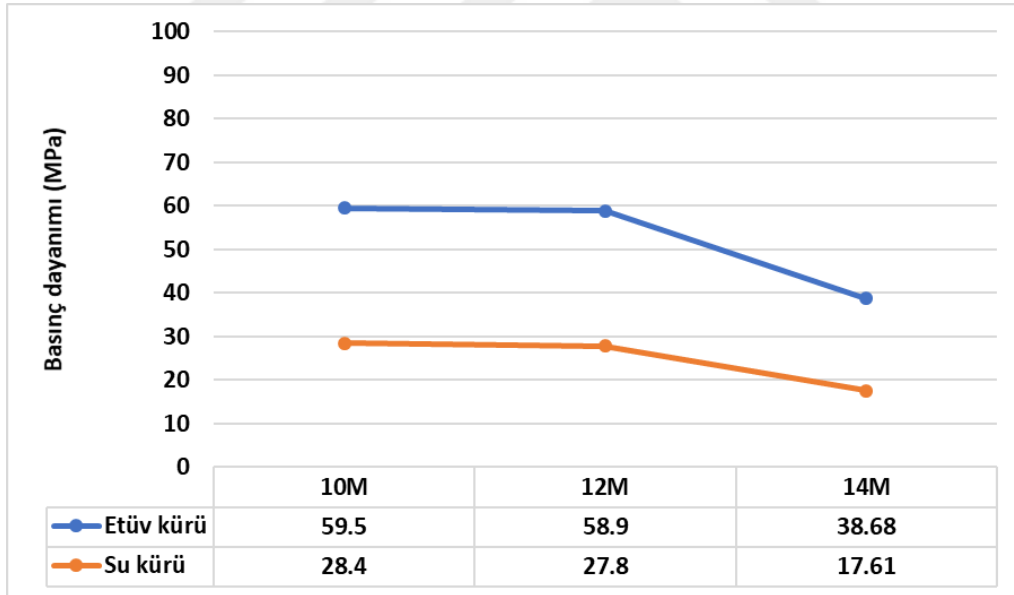
Ön deneme çalışmalarında 7 ve 28 günlük numuneler hazırlanarak, bekleme süresinin etkisi araştırılmıştır. Şekil 47’de 28 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre su küründe bekletilen numunelerde, etüvde bekletilen numunelere kıyasla az da olsa düşüş gözlemlenmiştir.

Basınç dayanımları incelendiğinde, 28 günlük hem etüv, hem de su küründe bekletilen 14 M numunelerde en düşük değerlere ulaşılmıştır (Şekil 48). Etüv küründe bekletilen numuneler su kürü ile kıyaslandığında ciddi farkların olduğu görülmüştür. Genel olarak, yapılan bu ön deney çalışması sonucunda 14M numunelerde en düşük dayanım değerlerinin olduğu görülmüştür. Benzer şekilde geopolimerlerin sentezinde NaOH molaritesinin kritik rol oynadığını ve özellikle 14 M çözeltisiyle hazırlanan numunelerde basınç dayanımının belirgin şekilde düştüğü görülmektedir (Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009). En yüksek dayanım değerleri dikkate alınarak yapılan ön deney çalışmasında, her iki kürleme yönteminde de en düşük değerlere 14M numunelerde

görüldüğü için bir sonraki aşama da farklı molarite değeri denenerek ön deneylere devam edilmiştir.



Şekil 47. 28 günlük eğilme dayanım değerleri

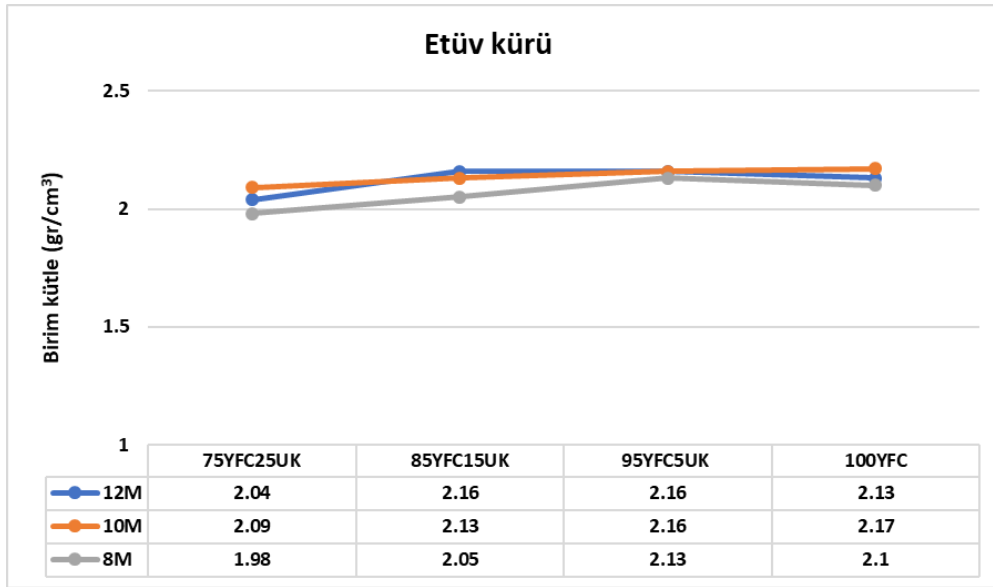


Şekil 48. 28 günlük basınç dayanım değerleri

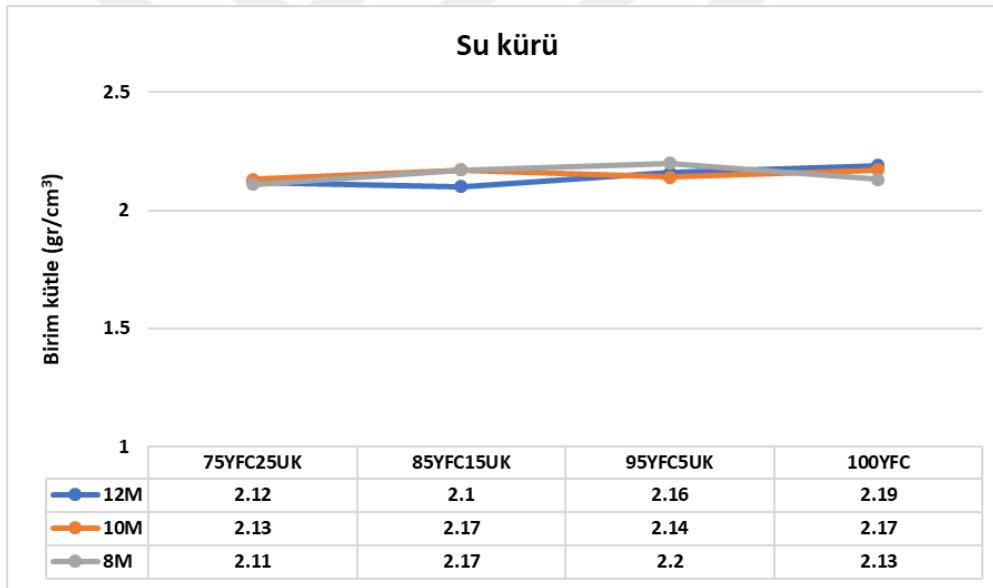
3.2. Ön Deney- 2 Sonuçları

Ön deney-2 çalışması kapsamında yapılan deneylerde, 4 farklı orana sahip ana bağlayıcıların (75YFC25UK, 85YFC15UK, 95YFC5UK ve 100YFC), 3 farklı molar oranda (8M,10M ve 12M) NaOH çözeltisi ile birlikte kullanılarak üretildiği geopolimer harç numuneleri, yine iki farklı kür ortamında bekletilmiştir. Deney sonrasında numunelere birim kütle, dinamik elastisite modülü, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımına göre hangi kür ortamının daha etkili bir sonuç verdiği ve en etkili ana bağlayıcı malzeme oranının sonucu dikkate alınarak çalışmalara devam edilmiştir.

Birim kütle sonuçları incelendiğinde, etüv ve su kürü ile hazırlanan numunelerde benzer birim kütle değerlerine ulaşıldığı Şekil 49 ve Şekil 50'de görülmektedir. 4 farklı oranda ana bağlayıcı ve 3 farklı molarite ile oluşturulan numunelerde etüv kürü şartlarında en yüksek birim kütle değerine (2.17 g/cm^3), 100YFC ve 10M numunesinde ulaşılmıştır. Karışım içerisindeki yüksek fırın cüruf oranının artması ile birim kütle değerlerinde artış gözlemlenmiştir. En düşük birim kütle değerinin ise (1.98 g/cm^3) 75YFC25UK ve 8M numunesinde olduğu görülmüştür. Su kürü ile hazırlanan numunelerde en yüksek birim kütle değerine (2.2 g/cm^3) ise 95YFC5UK ve 8M numunesinde ulaşılmıştır. Genel olarak, karışım içerisindeki yüksek fırın cürufu artışı ile birim kütle artışlarının paralel geliştiği görülmüştür. En düşük birim kütle değerine ise (2.1 g/cm^3) 85YFC15UK ve 12M numunesinde ulaşılmıştır.



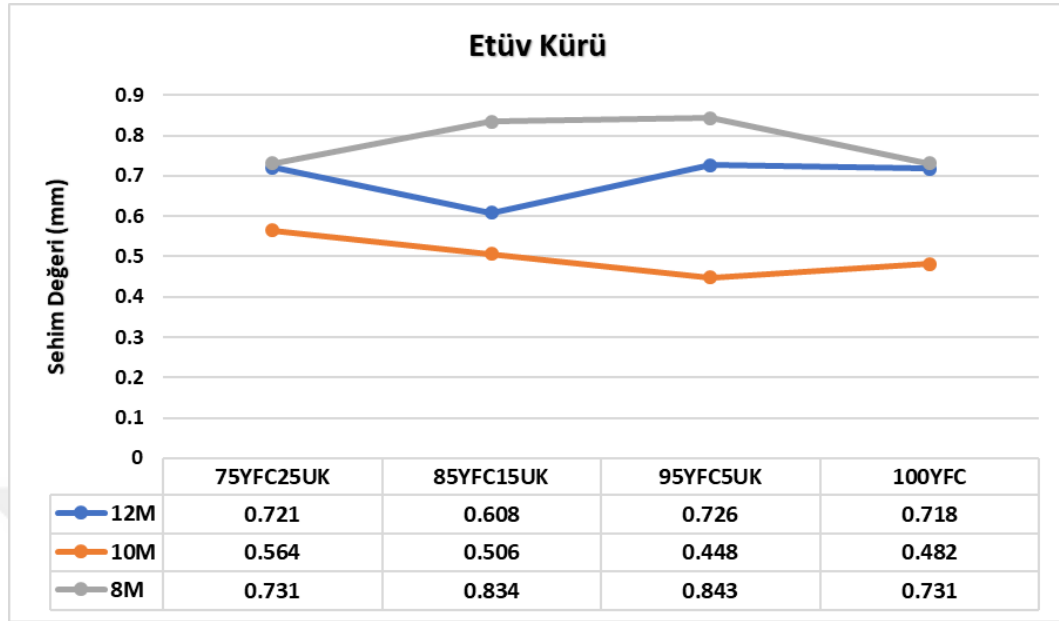
Şekil 49. Farklı oranlarda ana bağlayıcı oranına sahip numelerin birim kütle değerleri (etüv kürü)



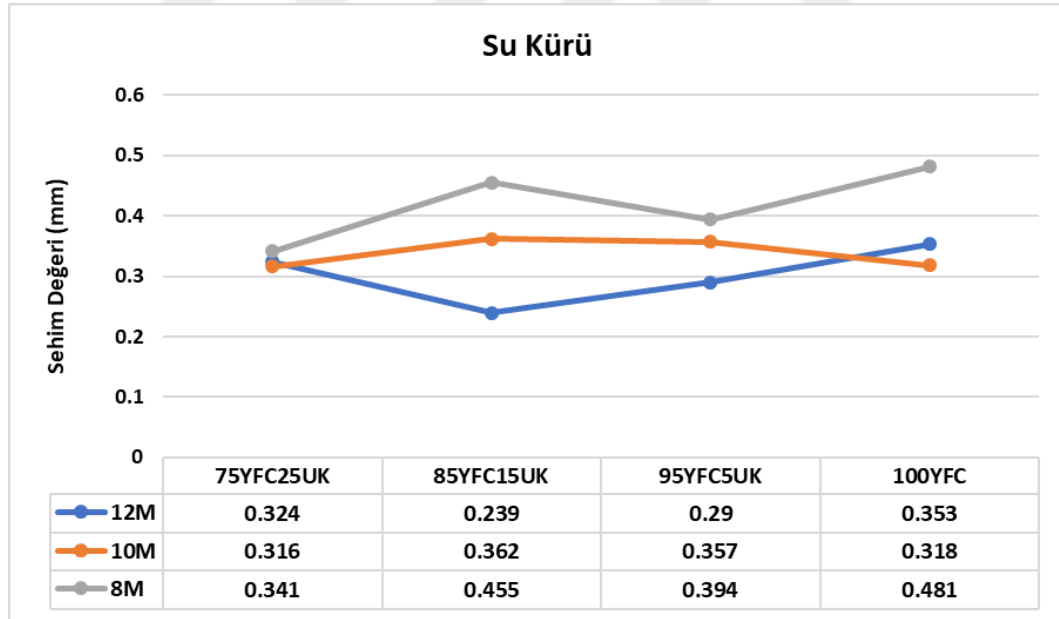
Şekil 50. Farklı oranlarda ana bağlayıcı oranına sahip numunelerin birim kütle değerleri (su kürü)

28 günlük eğilme dayanımı deneylerinde komparatör yardımıyla kırılma anındaki orta nokta sehim artış değerleri ölçülen numunelere ait sonuçlar Şekil 51 ve Şekil 52'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, özellikle etüv küründe bekletilen 95YFC5UK ve 8M numunesi için en yüksek sehim değerinin elde edildiği görülmüştür (Şekil 51). Sehim artışının eğilme dayanımı ile doğrusal bir artış içinde olduğu söylenebilir. $23 \pm 2^{\circ}$ C su

küründe bekletilen numunelerin sehîm değêrlerinde ise molarite azalmasına baēlı olarak sehîm değêrlerinde genel bir artışın meydana geldiēi sôylenabilir.



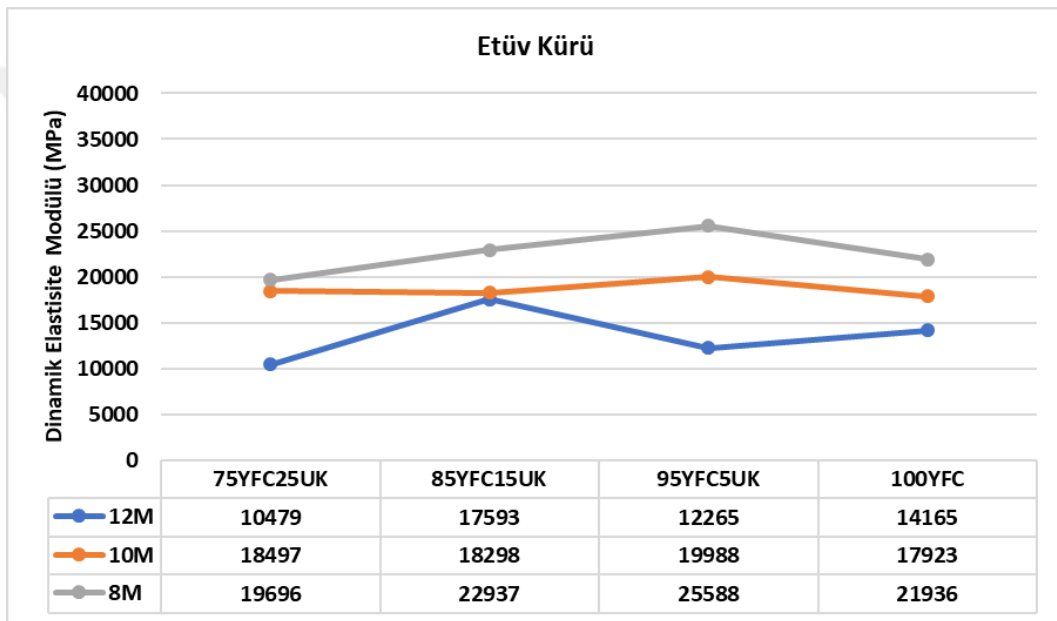
Şekil 51. Etûv küründe bekletilen numunelere ait sehîm değêrleri



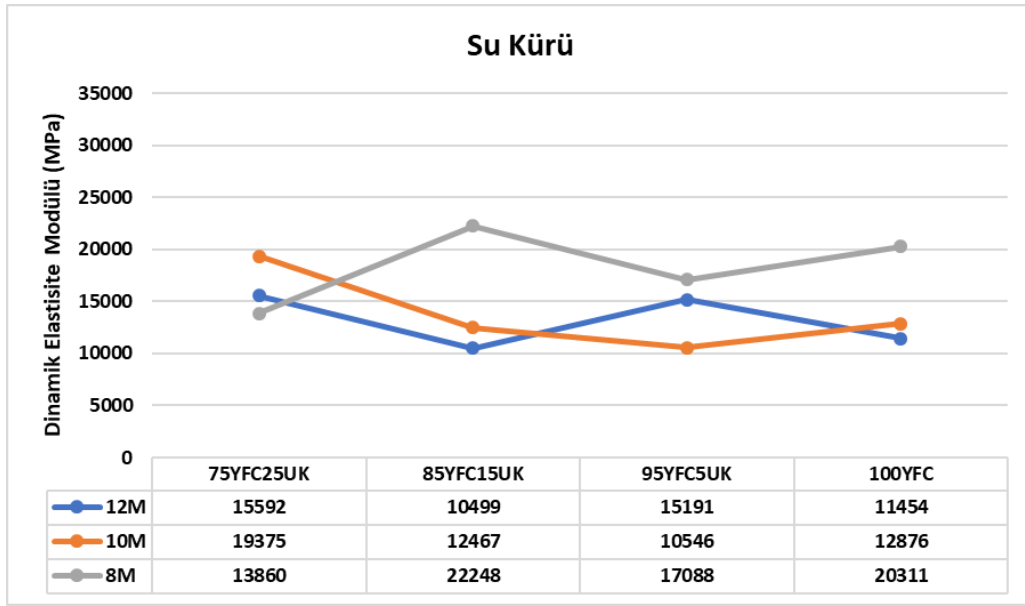
Şekil 52. Su küründe bekletilen numunelere ait sehîm değêrleri

Alkali aktivatör ile aktivite edilen numunelere ait dinamik elastisite modûlü sonuçları Şekil 53 ve Şekil 54'te gösterilmektedir. 4 farklı baēlayıcı ve 3 farklı molar oranda hazırlanan, 75 ° C etûvde 24 saat ısı kûre tabi tutulan numuneler için molarite

azalmasına bağı olarak hesaplanan dinamik elastisite modülü değerlerinde bir artışın olduğu görülmektedir. Ayrıca karışım içerisinde yüksek fırın cürufu oranındaki artışa paralel olarak, dinamik elastisite modülü değerlerinde genel bir artışın olduğu söylenebilir. Ancak geopolimer yapı içerisinde UK tamamıyla kullanılmaması durumunda her ne kadar YFC oranı artmış olsa da, yapının elastikiyet değerini belirli oranları için iyileştirdiği söylenebilir. Bu durumun uçucu külün en düşük oranda yer aldığı 95YFC5UK numunesi sonuçlarına yansıdığı görülmektedir. Dinamik elastisite modülü değerlerinin basınç dayanımı ile doğrusal bir ilişki içinde olduğu görülmektedir. Etüv ve su kürüne tabi tutulan numunelerde sonuçların genel olarak benzer olduğu görülmektedir.

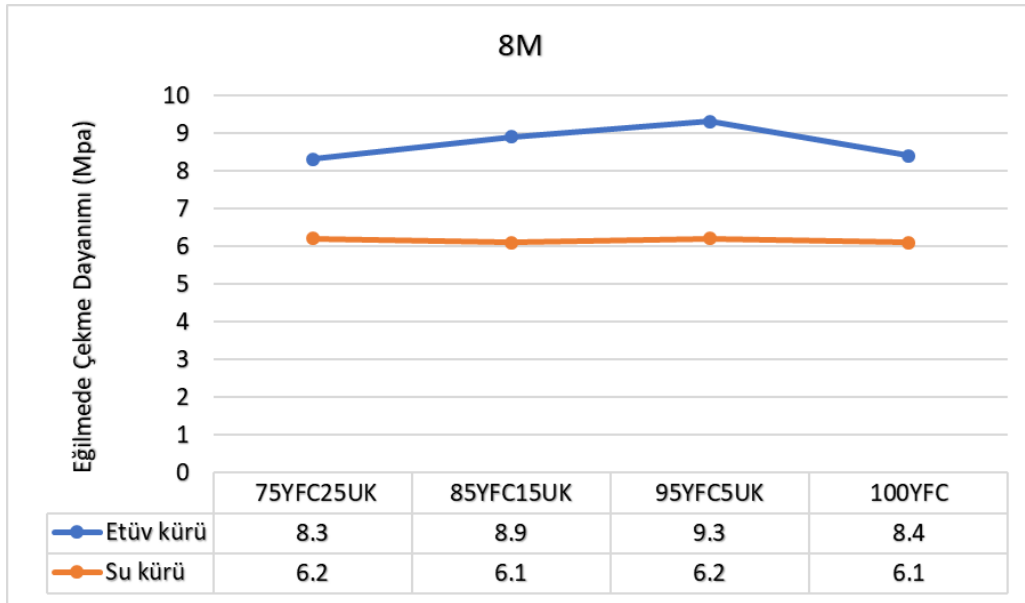


Şekil 53. Dinamik Elastisite Modülü değerleri (Etüv kürü)



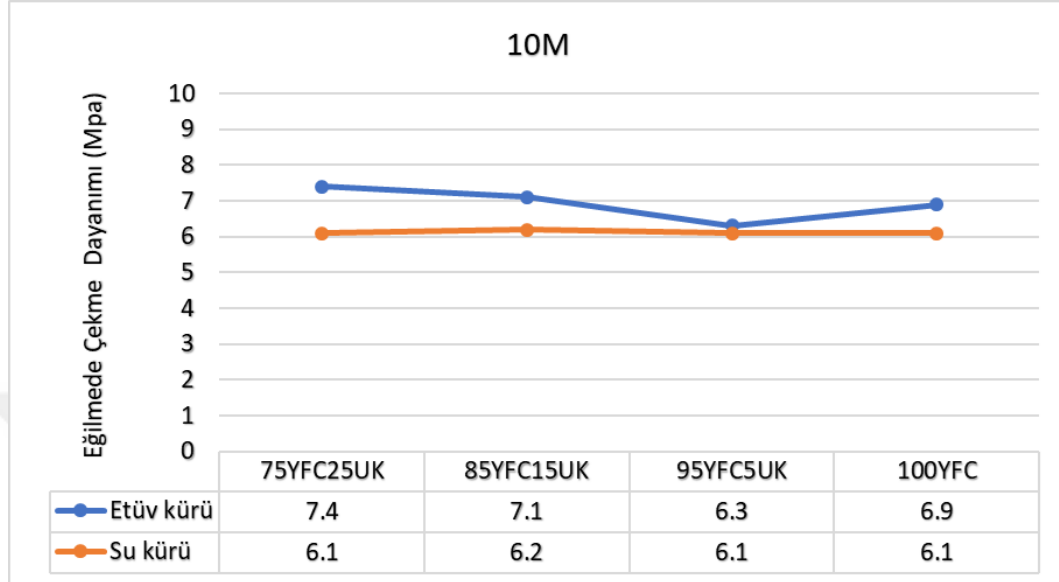
Şekil 54. Dinamik Elastisite Modülü değerleri (Su kürü)

4 farklı ana bağlayıcı oranı kullanılarak hazırlanan numunelerde 8M numunelerde iki farklı kür tipi uygulanmıştır. Su küründe en yüksek eğilme dayanımı 6.2 MPa olarak 75YFC25UK ve 95YFC5UK numunelerinde elde edilirken, etüv kürüne tabi tutulan numunelerde en büyük eğilme dayanımı 9.3MPa olarak 95YFC5UK numunesinde elde edilmiştir (Şekil 55). İki farklı küre tabi tutulan numunelerde eğilme dayanımı en büyük olan numunelerde %33.3'lük bir dayanım farkı olduğu görülmektedir.



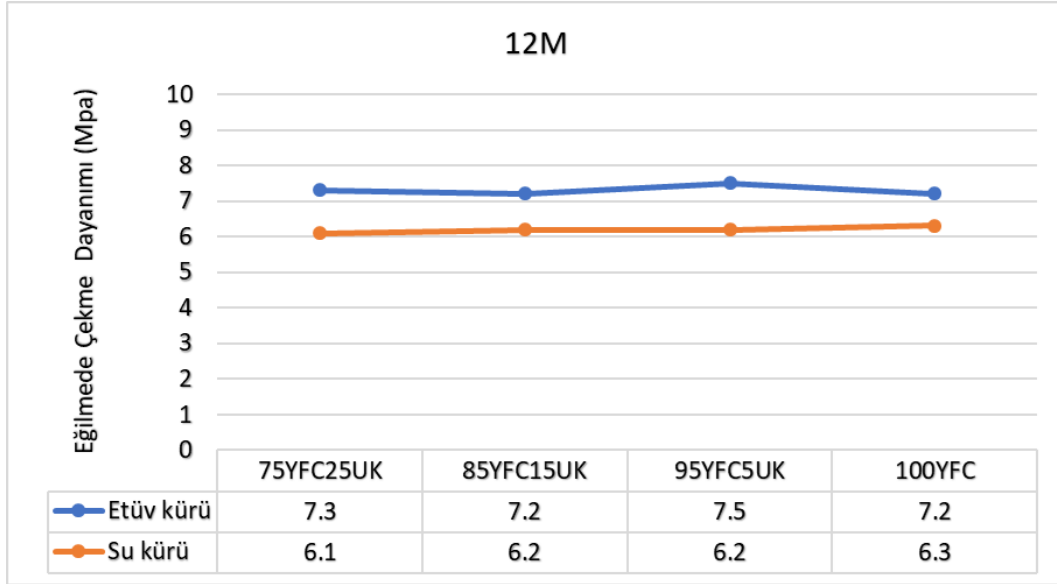
Şekil 55. 8M numunelerde 28 günlük eğilme dayanımı

10M NaOH çözeltisi ile hazırlanmış numunelerde eğilme dayanımı sonuçlarına bakıldığı zaman en büyük dayanım değeri 7.4 MPa ile 75YFC25UK numunesinde etüv kürüne tabi tutulan numunede elde edildiği görülmektedir (Şekil 56.).



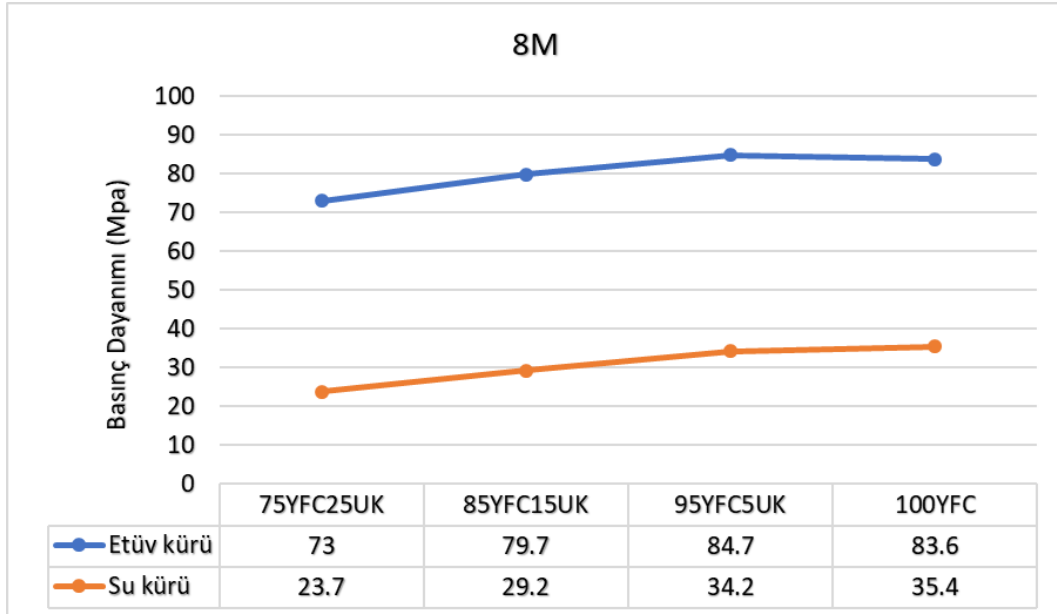
Şekil 56. 10M numunelerde 28 günlük eğilme dayanımı

12M numunelerde eğilme dayanımının en büyük değeri 95YFC5UK numunesinde 7.5 MPa olarak ölçülmüştür. Eğilme dayanımı değerlerinde yüksek fırın cürufu artışının dayanım değerlerinde artışa sebep olduğu, uçucu külün azalmasının da dayanım değerlerine katkısı olduğu görülmektedir (Şekil 57).



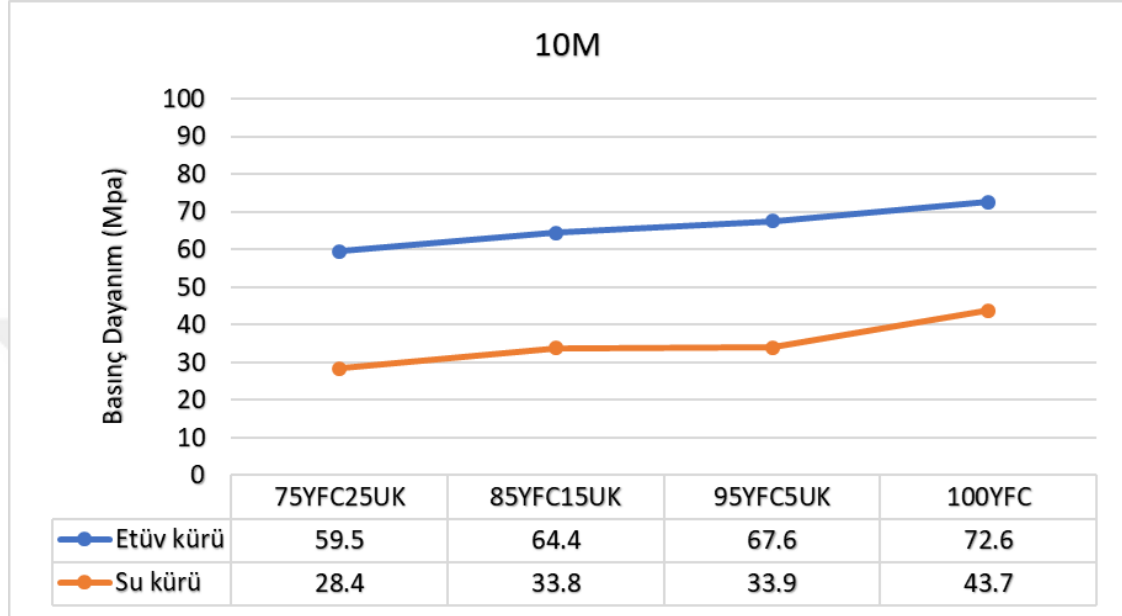
Şekil 57. 12M numunelerde 28 günlük eğilme dayanımı

Basınç dayanımları bakımından etüv kürü ve su kürü kıyaslandığında önemli azalmaların olduğu görülmektedir. Etüv küründe bekletilen numuneler incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı 95YFC5UK numunesinden 84.7MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 58). Uçucu kül miktarında azalma ve yüksek fırın cürufu miktarındaki artışın basınç dayanımlarında önemli artış sağladığı görülmüştür.



Şekil 58. 8M numunelerde 28 günlük basınç dayanımı

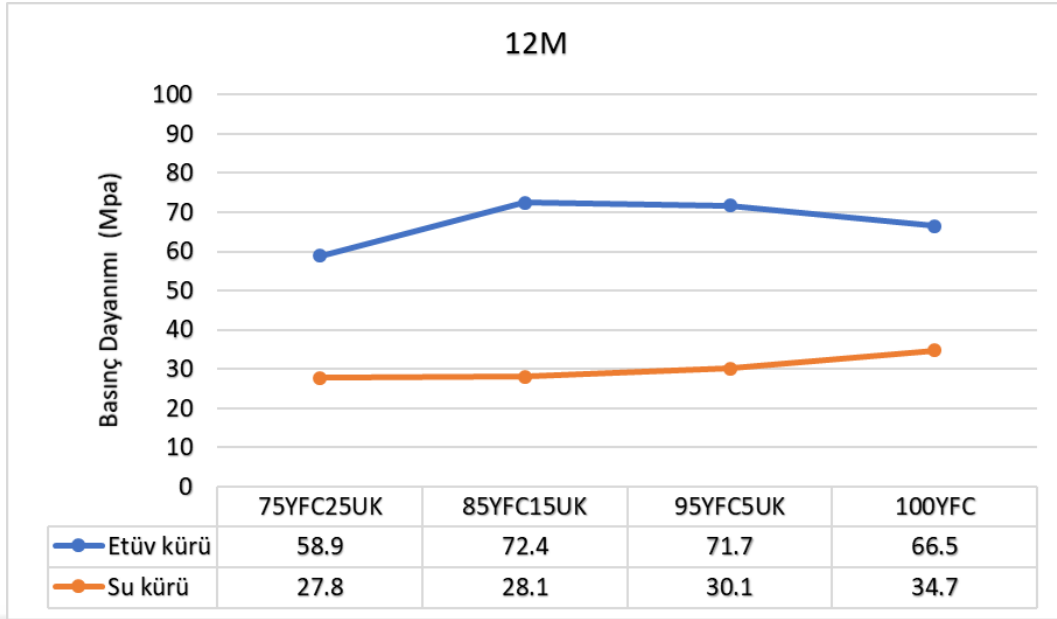
10M numunelerde benzer şekilde en büyük basınç dayanımı değeri 100 YFC numunesinde 72.6 MPa olarak ölçülmüştür. Yine iki farklı kür tipi kıyaslandığında önemli farkların gözlemlendiği Şekil 59'da görülmektedir. Her iki kürleme yönteminde (etüv kürü ve su kürü) sırası ile en düşük değerlere 75YFC25UK numunelerinde 59.5MPa, 28.4 MPa olarak ulaşılmıştır.



Şekil 59. 10M numunelerde 28 günlük basınç dayanımı

12M numunelerde en yüksek basınç dayanımı değeri 85YFC15UK numunesinde 72.4 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 60). Genel olarak ana bağlayıcı olarak kullanılan yüksek fırın cürufunun artışına bağlı olarak dayanımlarda artışlar gözlemlenmiştir. 100 YFC numunelerinde genel bir azalmanın olmasının sebebi olarak, uçucu külün kullanılmamış olması söylenebilir. Karışım içerisindeki uçucu kül oranının fazla olması genel olarak basınç dayanımlarında düşüşe sebep olsa da, genel olarak karışım içerisinde belirli miktarlarda uçucu külün yer alması geopolimer yapının dayanımı üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu söylenebilir. Bunun yanında yüksek fırın cürufunun ise etkisinin fazla olması, özgül yüzey alanının fazla olması ile ilişkilendirilebilir.

Ayrıca bu bölümde ön deney çalışma kapsamında en yüksek dayanım değerleri hedeflendiği için iki farklı kür yöntemi denenmiş ancak suda bekleme kürü ile üretilen numunelerde istenilen sonuçlara ulaşılamamıştır. Bu yüzden bundan sonraki çalışmalara etüv kürü ile devam edilmiştir.



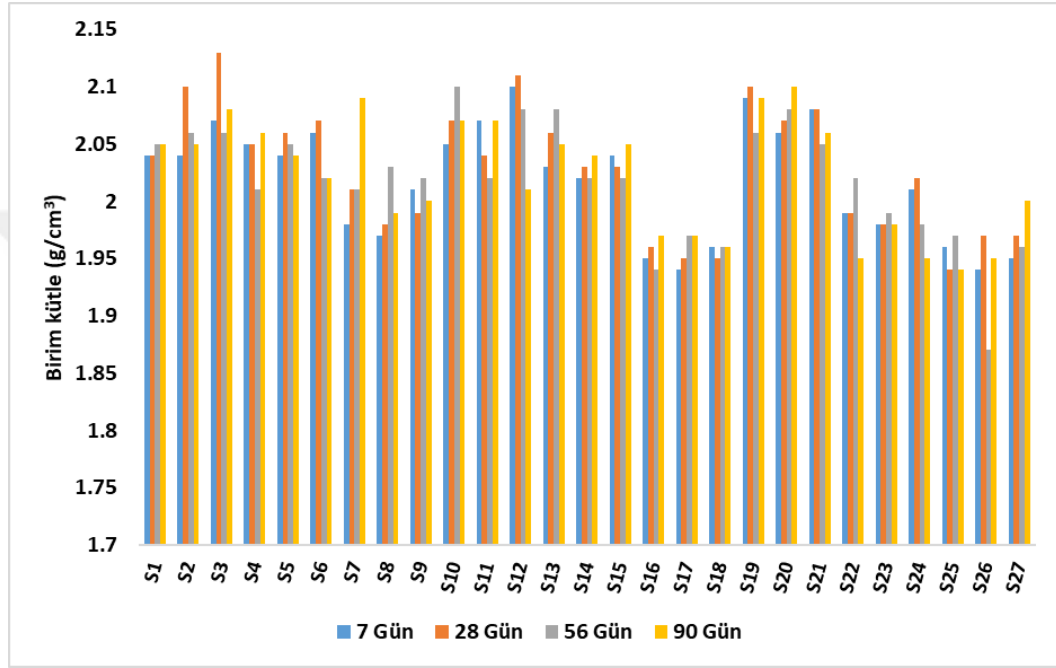
Şekil 60. 12M numunelerde 28 günlük basınç dayanımı

3.3. Taguchi Metoduna Göre Oluşturulan Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Ön deney-1 ve ön deney-2 çalışmaları sonucu molarite ve ana bağlayıcı oranlarının literatürdeki çalışmalarında dikkate alınmasıyla kullanılacak oranları elde edilmiştir. NaOH çözeltisi ile oluşturulan 8M, 10M ve 12M çözeltiler çalışmanın sonraki aşamalarında kullanılmaya devam edilmiştir. Ayrıca ana bağlayıcı olarak %85 oranında yüksek fırın cürufu ve %15 oranında uçucu kül (85YFC15UK) kullanılmış olup çalışmalara bu oran kullanılarak devam edilmiştir. Taguchi metoduna göre oluşturulan geopolimer harçlar 40x40x160mm kalıplarda dökümü yapılmıştır. 7, 28, 56 ve 90 gün hava almayacak şekilde bekletilen numunelere birim kütle, eğilme dayanımı, basınç dayanım ve dinamik elastisite modülü testleri yapılmıştır.

L27 deney serisi üzerinden elde edilen toplam 324 farklı numuneye ait elde edilen basınç dayanımları Şekil 61'de görülmektedir. Deneylerde kür süresi, kür sıcaklıkları, katkı maddeleri ve molarite gibi çok fazla değişkeni içeren geopolimer numuneler içinde en optimum numunelerin elde edilmesi amacıyla kullanılan L27 deney serisine ait toplam 324 farklı numune üzerinden birim kütle, eğilme dayanımı, basınç dayanımları ve dinamik elastisite modülü değerleri ölçülmüştür. Şekil 61, farklı kür sürelerine maruz kalan 324 adet geopolimer numunelere ait basınç dayanımlarını göstermektedir. Buradan

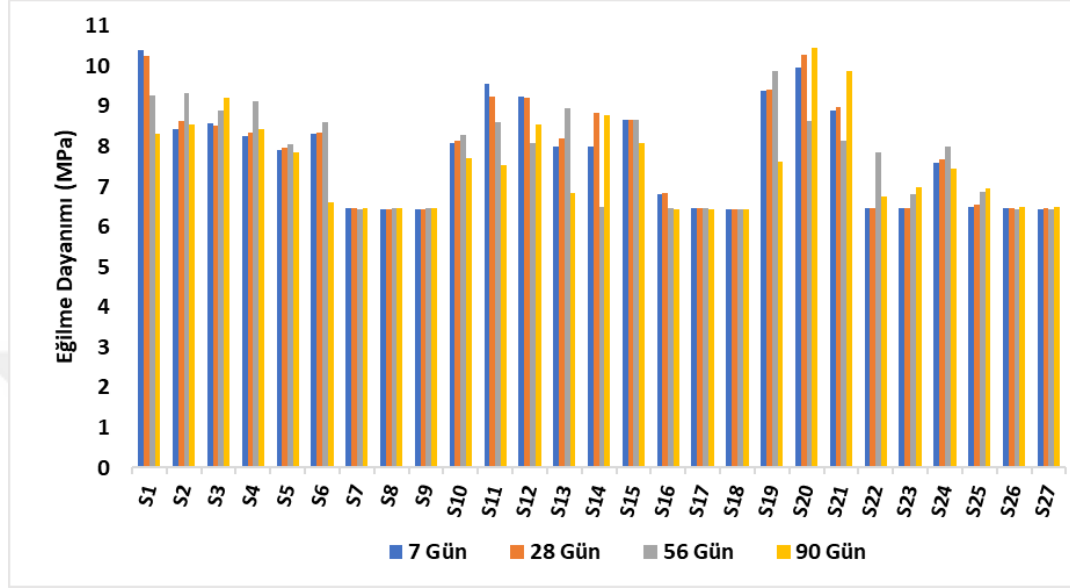
elde edilen veriler aynı zamanda Taguchi yöntemine göre hesaplama yapılan analizler için istenilen giriş sınır şartlarının oluşturmaktadır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, birim kütle değerleri 7, 28, 56 ve 90 günlük numunelerde 1.94-2.13 g/cm³ aralığında kalmıştır. Bu durum karışımların birim kütle bakımından dengeli olduğunu göstermektedir. En yüksek birim kütle değerleri S3 (2.13 g/cm³, 28. gün) ve S12 (2.11 g/cm³, 28. gün) 'de ulaşılmıştır. Bu, bağlayıcı ve katkıların daha kompakt bir mikroyapı oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 61. Geopolimer numunelerinin 7, 28, 56, 90 günlük birim kütle değerleri

7, 28, 56 ve 90 günlük geopolimer numunelerde eğilme dayanımı değerleri 6.4 ile 10.4 MPa aralığında değişmektedir. 28 günlük numunelerde en yüksek dayanım elde edilmiştir. 56 günlük numunelerde 28 günlük numunelere göre bir miktar dayanımlarda düşüş gözlemlenmiştir. Fakat 90 günlük numunelerde yine dayanımda artışlar görülmektedir. Bu sonuçlar geopolimer harçlarda karşılaşılabilen durumlardır. Erken yaşta yüksek dayanım sonrasında çatlak oluşumlarına bağlı dayanımlarda düşüş yaşanabilmektedir. Fakat uzun vadede geopolimerizasyon oluşumuna bağlı dayanımlarda artışlar gözlemlenmiştir. En yüksek dayanım 90 günlük S20 numunesinden 10.46 MPa elde edilmiştir (Şekil 62). Yine S20 numunesi 10.28 MPa ile 28 günlük numuneden elde edilmiştir. En düşük eğilme dayanımı değerleri 56 günlük S18 ve S27 numunelerinde

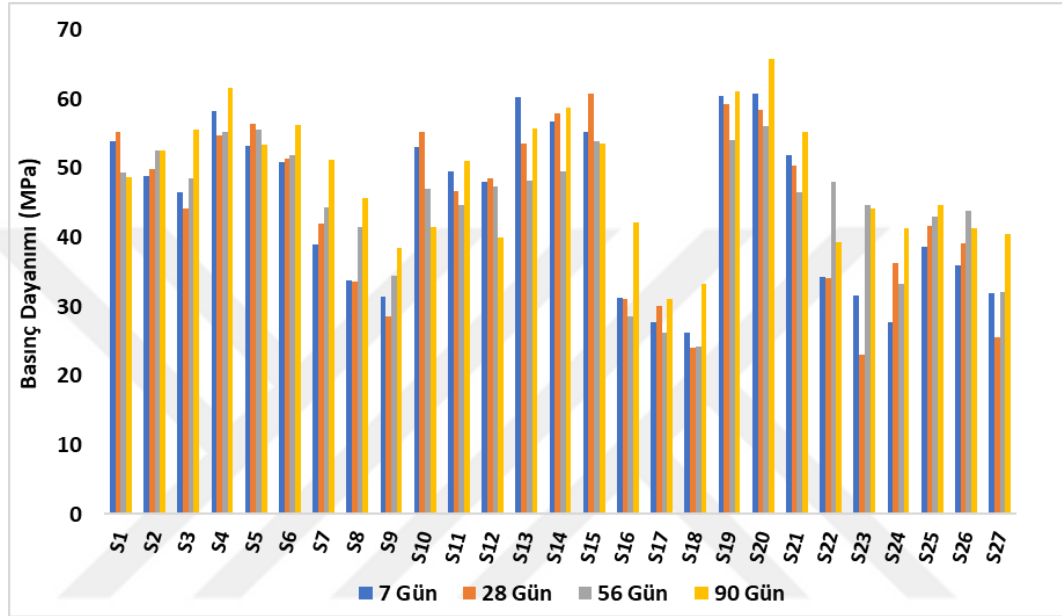
6.42MPa olarak görülmüştür. Bu sonuçlara göre, geopolimer kırımlarında eğilme dayanımı değerlerinin karışım içerisindeki malzemelerin oranlarına, kür koşullarına ve kür sıcaklığı gibi birçok etkene bağlı olduğu söylenebilir. Bunun bir sebebi olarak S1, S19, S20 numunelerinde yüksek dayanım gözlemlenirken, S18, S26, S27 numunelerinde düşük dayanımlar oluşmaktadır.



Şekil 62. Geopolimer numunelerinin 7, 28, 56, 90 günlük eğilme dayanımları

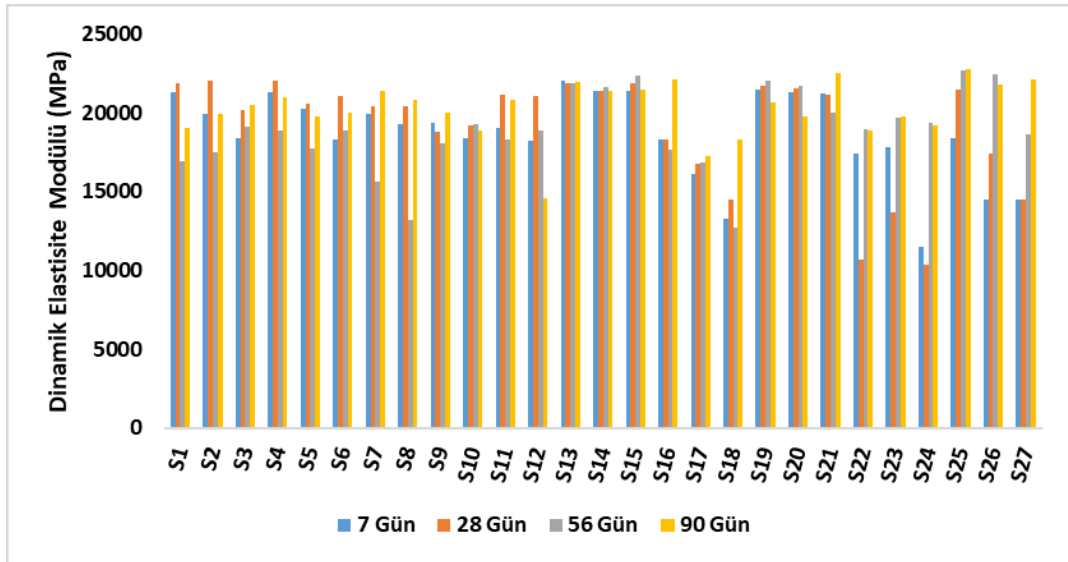
Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, farklı parametrelerin dayanım değişiminde önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Kür süreleri incelendiğinde, 24 saat kür edilen numunelerde ilk aşamada yüksek dayanımı elde edilmiş olsa bile, ilerleyen zamanlarda dayanımlarda azalmalar görülmüştür. 48 saat kür edilen numunelerde dayanım değerlerinde kür sıcaklığına bağlı olarak dayanımlarda değişimler gözlemlenmiştir. Özellikle 90°C kür sıcaklığında ve 12M NaOH çözeltisi ile hazırlanmış numunelerde daha dengeli bir dayanım değişimi gözlenmiştir. En yüksek dayanım değerleri 72 saat kür edilen numunelerde gözlemlenmiştir. Özellikle S20 numunesi 90 günde 65.74 MPa ile en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır (Şekil 63). Bunun temel sebebi, 72 saatlik uzun kür süresi, optimum sıcaklık olan 75 °C, yüksek molarite (12 M) ve yüksek fırın cürufu ile katkı malzemelerinin dengeli oranlarda kullanılmasıdır. Malzeme bileşimi olarak 320 g yüksek fırın cürufu, 75g uçucu kül, 50g stronsiyum, 50g mermer tozu ve 5g TiO₂ içermektedir. S18 numunesi, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımı açısından en düşük performansı göstermiştir. Bunun temel sebepleri, kısa kür süresi (48 saat) ve yüksek sıcaklık (105 °C) ile birlikte düşük molarite (8 M)

kullanılmasıdır. Ayrıca, yüksek fırın cürufunun düşük oranlarda kullanılması geopolimerleşme süresinde dayanım yeteneğini olumsuz etkilemiştir. Bu nedenle, S18 numunesi, 48 saatlik kür süresi, 105 °C kür sıcaklığı ve 8 M NaOH molaritesi ile hazırlanmıştır. Malzeme bileşimi olarak 295 g yüksek fırın cürufu, 75 g uçucu kül, 50 g stronsiyum, 75 g mermer tozu ve 5 g TiO₂ içermektedir. Bu oranlar sonucunda S18'in 28 günlük basınç dayanımı 24.02 MPa olarak ölçülmüştür ve en düşük dayanım değerine sahip numune olmuştur.



Şekil 63. Geopolimer numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımları

Dinamik elastisite modülü sonuçları değerlendirildiğinde S13, S15 ve S25 numuneleri 90 günde sırasıyla 21950 MPa, 21490 MPa ve 22800 MPa ile en yüksek dinamik elastisite modülüne ulaşmıştır. Bu numunelerde YFC oranının fazla olması dikkat çekmektedir. S18 ve S24 numuneleri ise düşük YFC miktarı ile 90 günlük kür sürelerinde 18300 MPa ve 19170 MPa değerleri elde edilmiştir (Şekil 64). Bu durum, geopolimerleşme reaksiyonlarını olumsuz etkileyerek elastisite modülünü azaltmıştır.

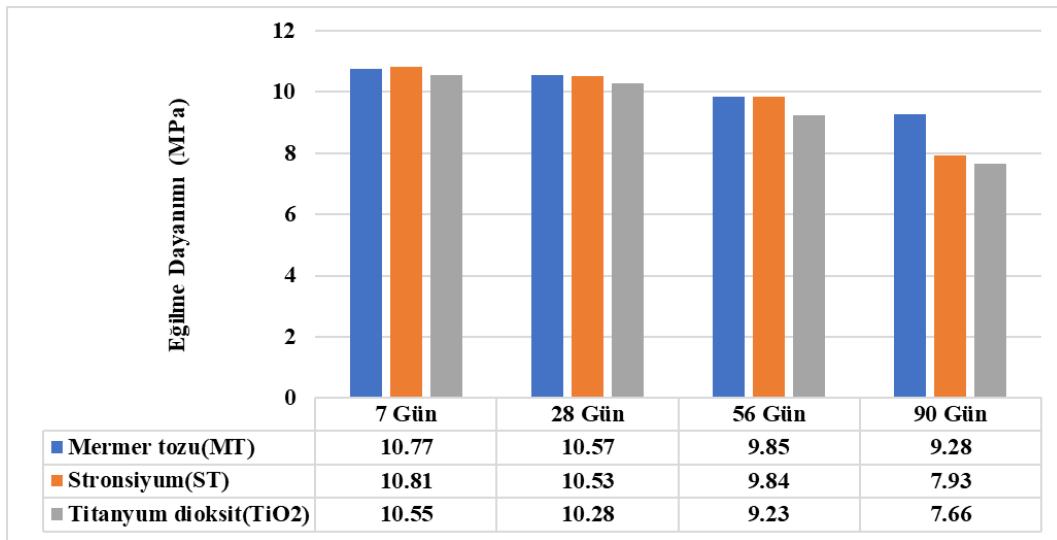


Şekil 64. Geopolimer numunelerin Dinamik Elastisite Modülü değerleri

3.4. Katkı Malzemelerinin Numuneler Üzerindeki Etkisi

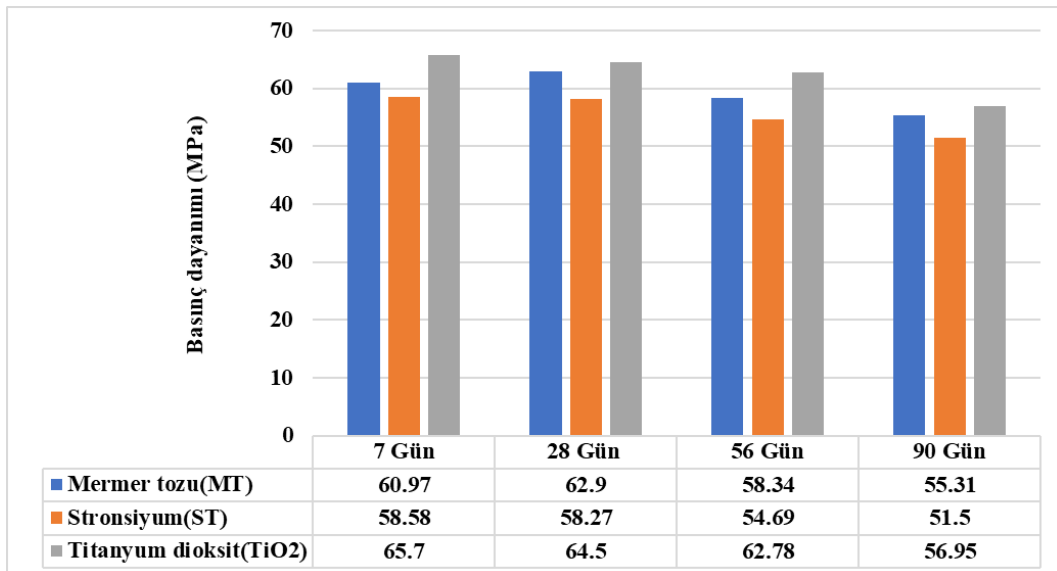
Çalışmada kullanılan katkı malzemeleri olan mermer tozu stronsiyum ve titanyum dioksitin etkisinin incelenmesi amacıyla katkı malzemelerinin tek başına etkileri incelenmiş ve dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Burada 85YFC15UK oranlarında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. 75 °C'de 10M NaOH çözeltisi kullanılarak 24 saat etüvde bekleyen numuneler üzerinde ve %5 oranında mermer tozu, %5 oranında stronsiyum ve %1 oranında titanyum dioksit hepsi ayrı ayrı ilave edilerek kullanılmıştır.

7, 28, 56 ve 90 günlük numunelerde eğilme dayanımı sonuçları Şekil 65'te verilmektedir. Burada eğilme dayanımlarında zamana bağlı bir azalma olduğu görülmektedir. Eğilme dayanımı en yüksek değerlere 7 günlük numunelerde 10.81MPa ile stronsiyum katkılı numuneden elde edilmiştir. En düşük eğilme dayanımı ise 90 günlük numunelerde 7.66 MPa ile titanyum dioksit katkılı numuneden elde edilmiştir.



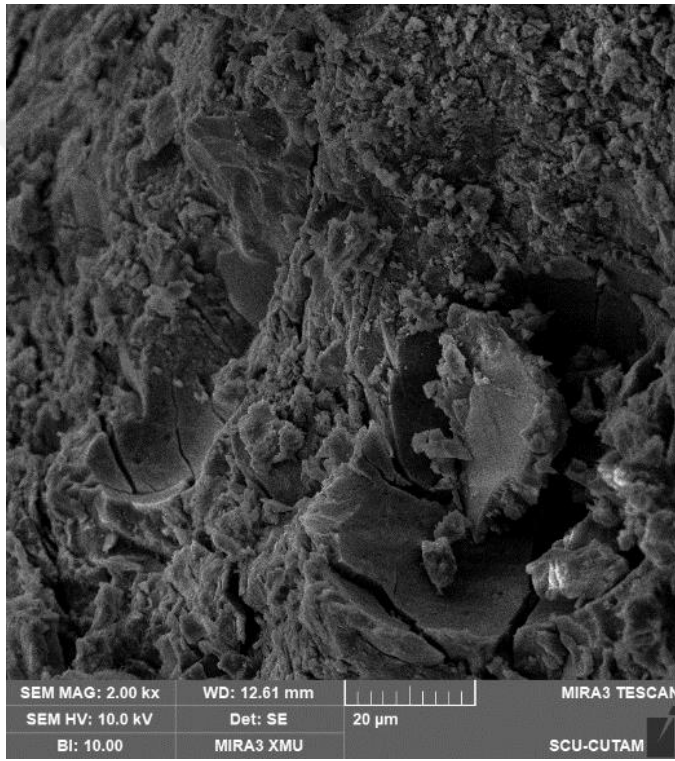
Şekil 65. Mermer tozu, stronsiyum ve titanyum dioksit'e ait eğilme dayanımları

Basınç dayanımları incelendiğinde ise en yüksek basınç dayanımına 7 günlük numunelerde 65.7MPa ile titanyum dioksitten elde edilmiştir (Şekil 66). En düşük basınç dayanımı ise 90 günlük numunelerden 51.5 MPa ile stronsiyumdan elde edilmiştir. Genel olarak basınç dayanımlarında titanyum dioksitin diğer katkı malzemeleri arasından en yüksek basınç dayanımlarına ulaştığı görülmektedir. Düşük oranda %1 titanyum dioksit kullanılmasının basınç dayanımları üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir (Naskar ve Chakraborty, 2016).

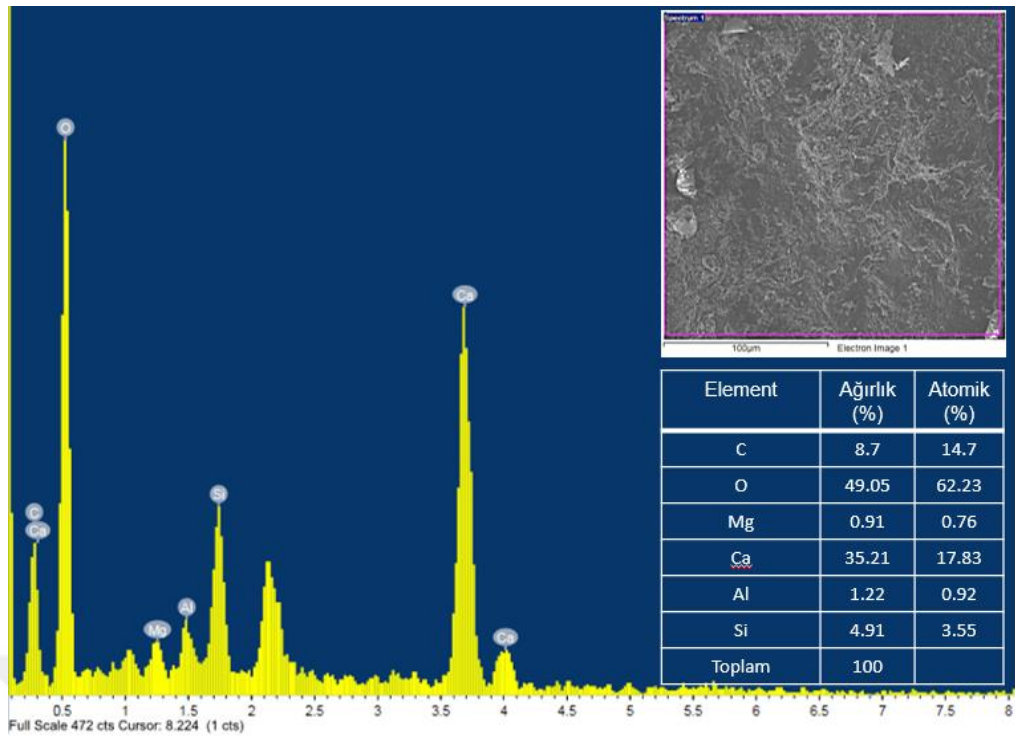


Şekil 66. Mermer tozu, stronsiyum ve titanyum dioksit basınç dayanımları

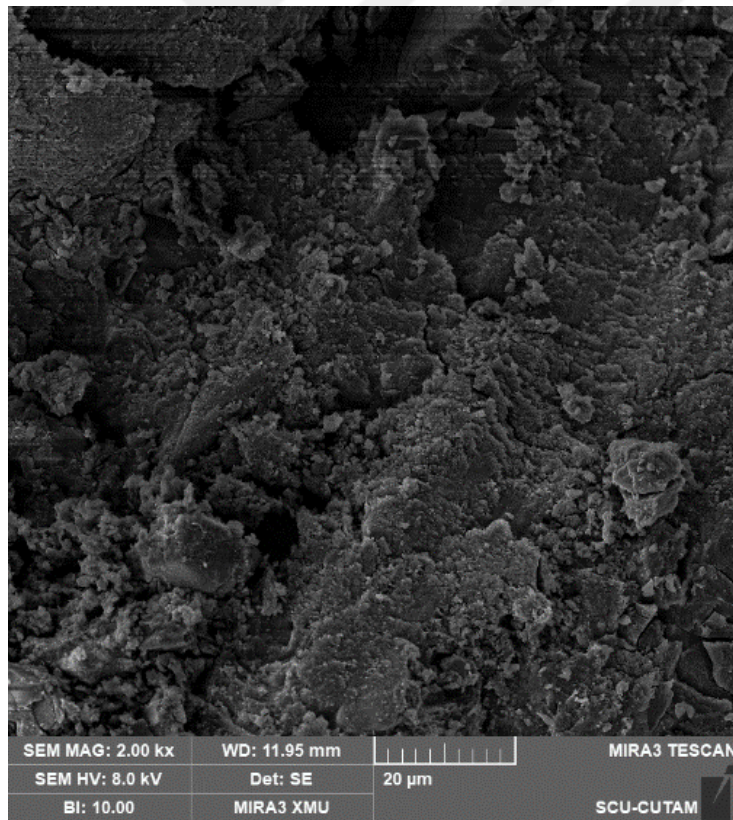
7 ve 90 günlük mermer tozu katkılı geopolimer harçlara ait SEM/EDX görüntüleri Şekil 67'de verilmiştir. Mermer tozu katkılı geopolimer harçların 7 ve 90 günlük kür süreleri boyunca mikro yapıları ve kimyasal değişimleri şekilde görülmektedir. 7 günlük kür süresine sahip mermer tozu katkılı geopolimer harçta (Şekil 67-a, Şekil 67-b) SEM/EDX görüntüleri incelendiğinde SEM görüntüleri, daha yoğun bir mikro yapı ve daha az gözenekli bir yapının oluştuğu görülmektedir. 90 günlük kür süresine sahip harçta ise (Şekil 67-c, Şekil 67-d), düzensiz yüzey morfolojisine rastlanmıştır. Bu gözlemler, harç içerisindeki geopolimerleşme süreçlerinde meydana gelen mikro yapısal bozulmayı göstermektedir.



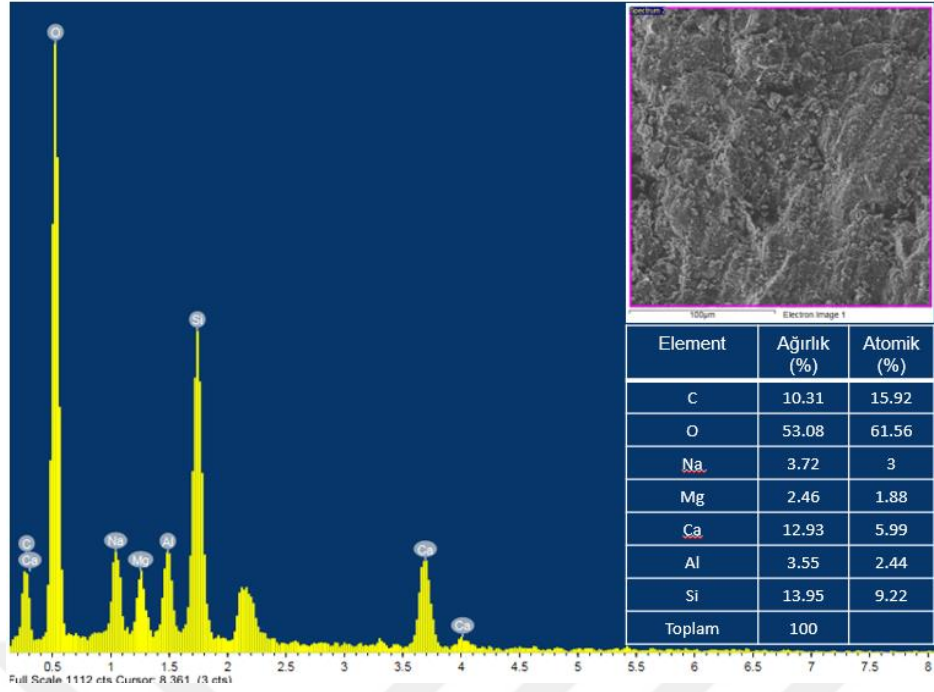
a)



b)



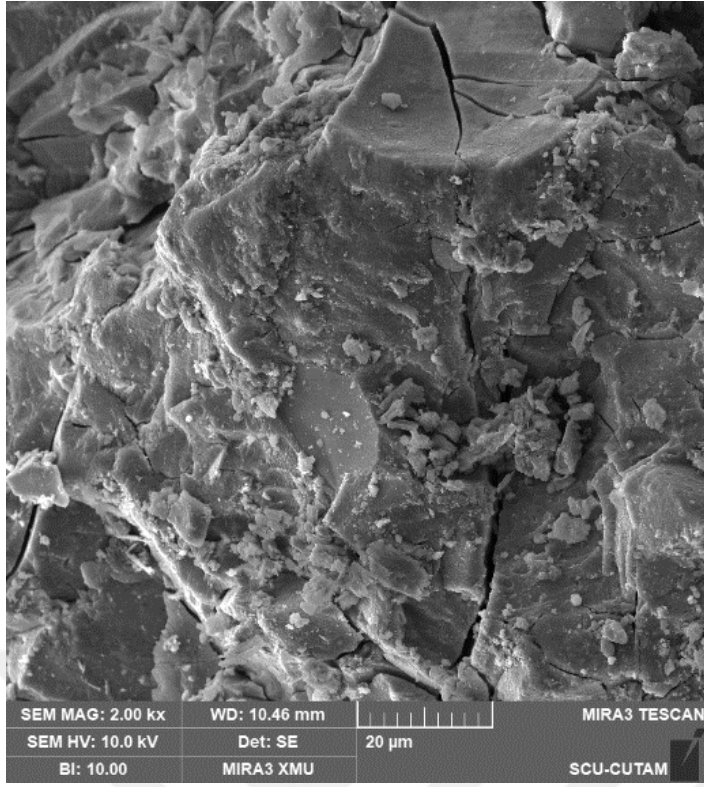
c)



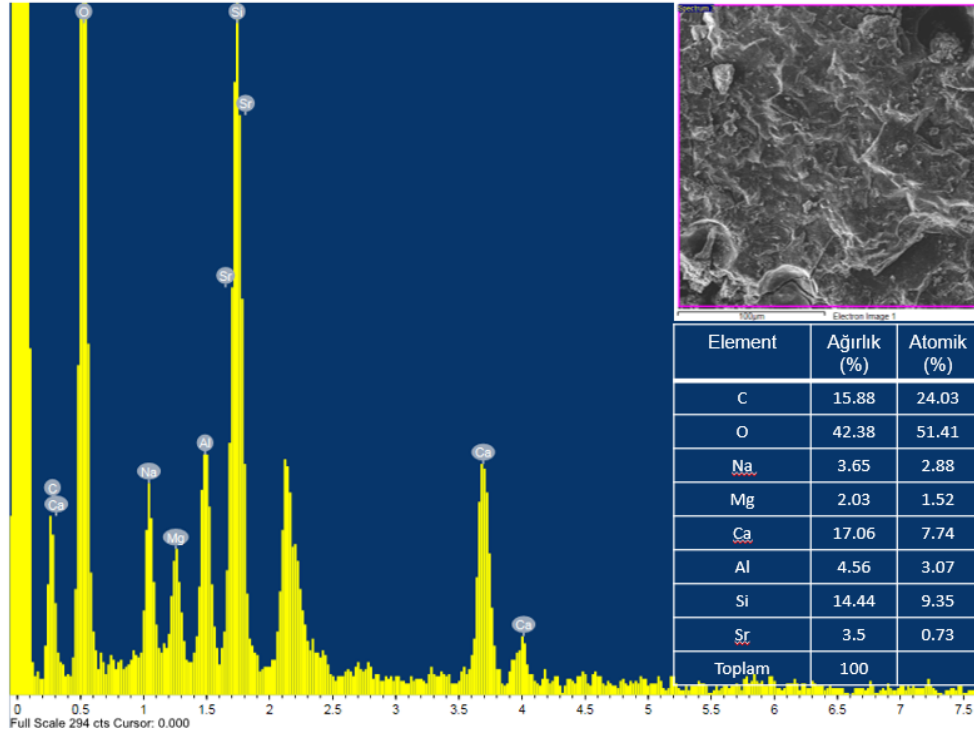
d)

Şekil 67. 7 günlük a) SEM, b) EDX ve 90 günlük c) SEM, d) EDX mermer tozu katkıli geopolimer harca ait görüntüleri

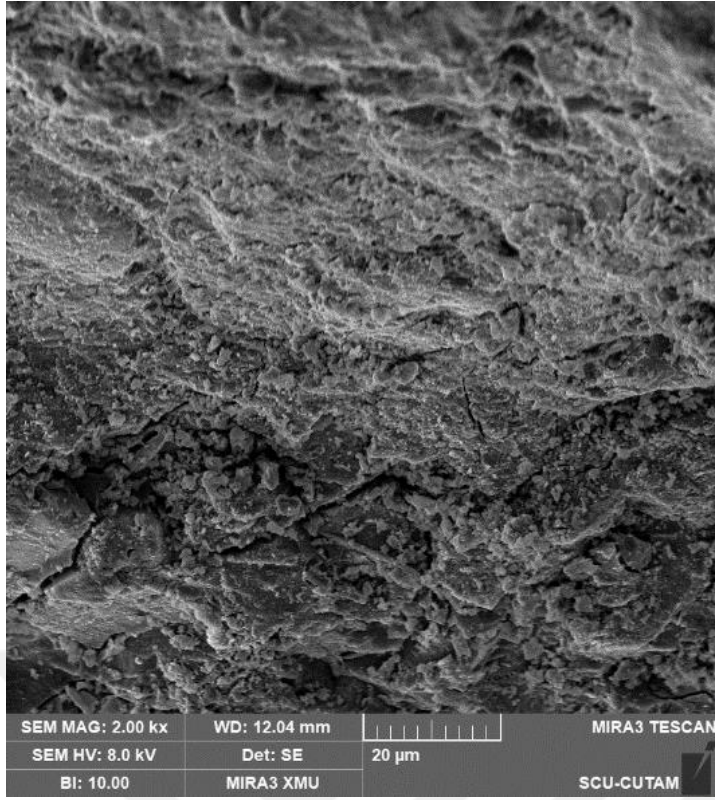
7 ve 90 günlük stronsiyum katkıli geopolimer harçlara ait SEM/EDX görüntüleri Şekil 67'de verilmiştir. Stronsiyum katkıli geopolimer harçların 7 ve 90 günlük kür süreleri boyunca mikro yapıları ve kimyasal değişimleri şekilde görülmektedir. 7 günlük numunenin SEM/EDX görüntüsünde çatlak oluşumları gözlemlenirken yüzey morfoloji homojen bir dağılım göstermektedir (Şekil 68-a, Şekil 68-b). Bu, erken yaşlarda geopolimer jelinin oluştuğunu göstermektedir. 90 günlük stronsiyum katkıli numunelerde ise mikro çatlakların varlığı, ilerleyen yaşlarda dayanım kayıplarına sebep olabilecek zayıf bölgeleri işaret etmektedir (Şekil 68-c, Şekil 68-d).



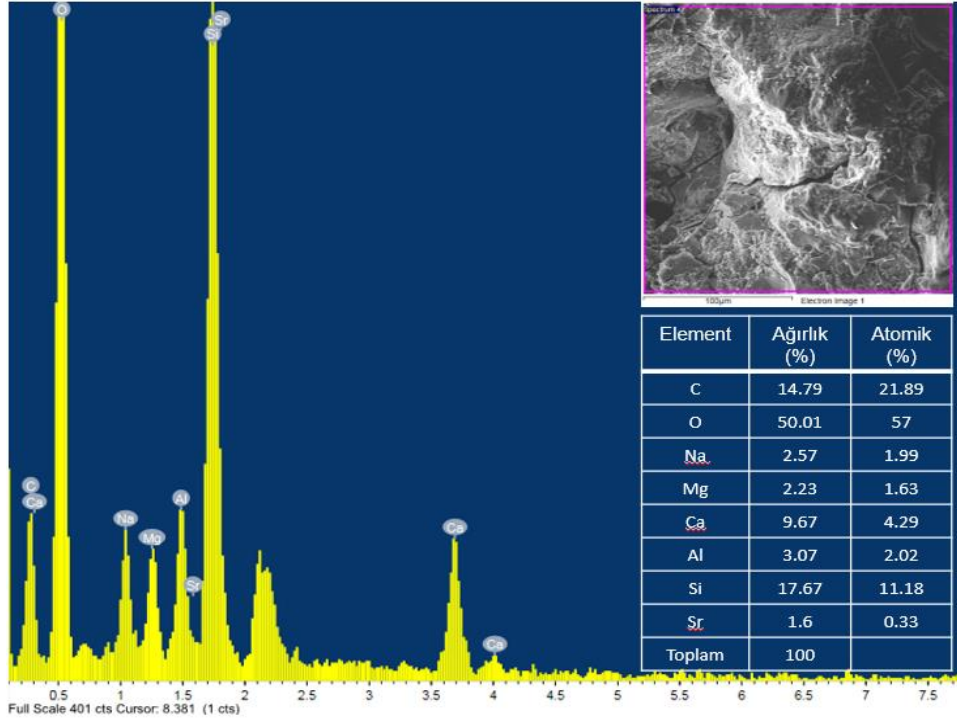
a)



b)



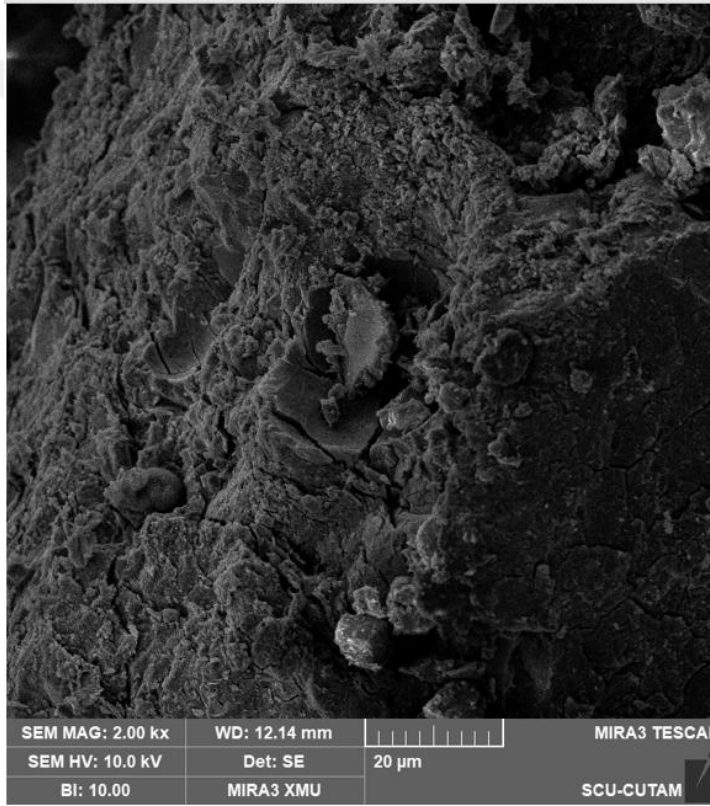
c)



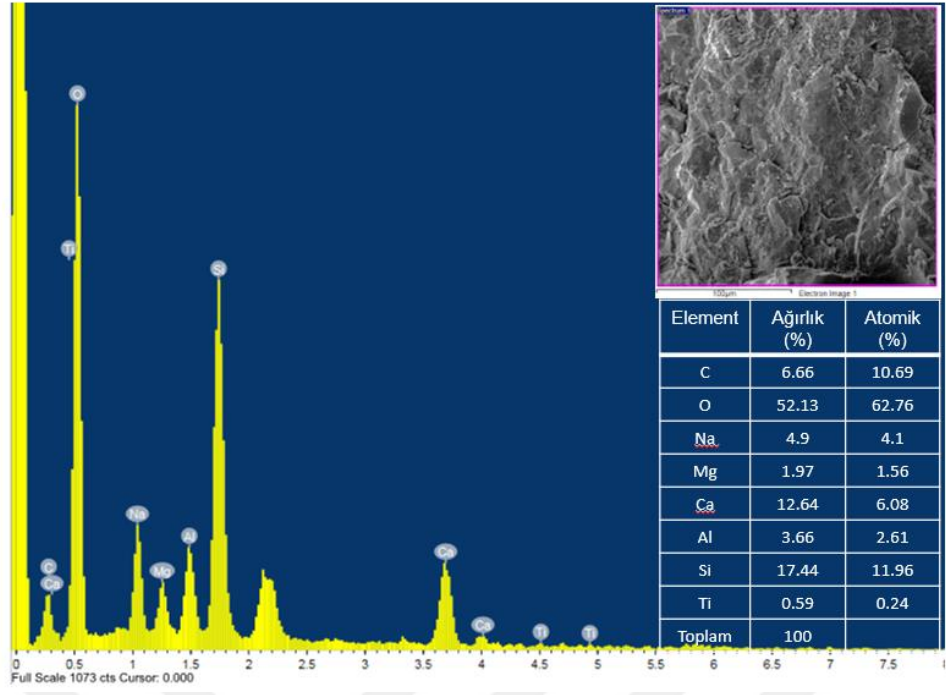
d)

Şekil 68. 7 günlük (a)SEM (b) EDX ve 90 günlük (c) SEM (d) EDX stronsiyum katkıli geopolimer harca ait görüntüleri

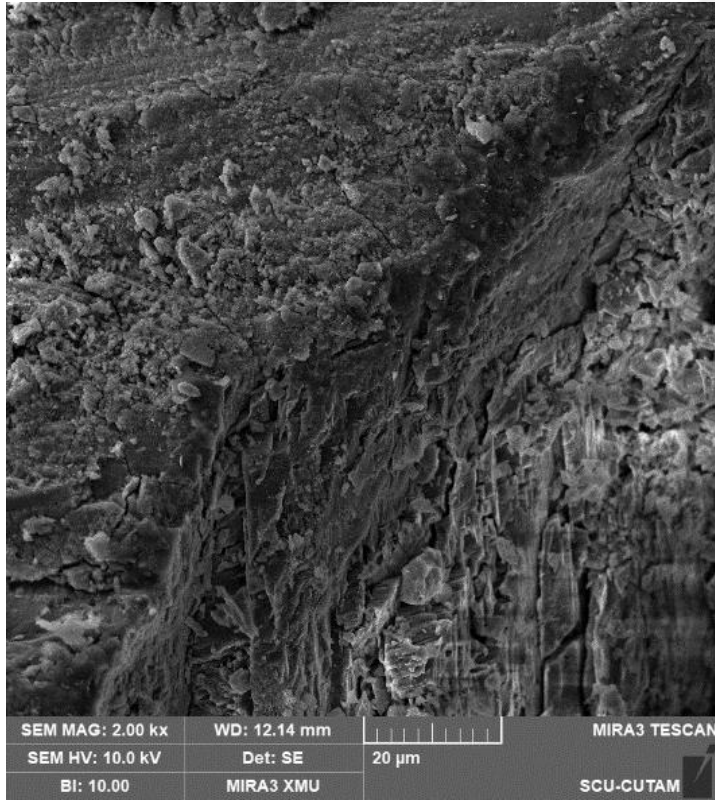
7 ve 90 günlük TiO_2 katkılı geopolimer harçlara ait SEM/EDX görüntüleri Şekil 67'de verilmiştir. TiO_2 katkılı geopolimer harçların 7 ve 90 günlük kür süreleri boyunca mikro yapıları ve kimyasal değişimleri şekilde görülmektedir. 7 günlük TiO_2 katkılı geopolimer harçların SEM görüntüleri incelendiğinde erken yaşta matriste daha yoğun, homojen bir yapı oluşumları gözlemlenmiştir (Şekil 69-a, Şekil 69-b). Bunun sebebinin TiO_2 'nin yüksek özgül yüzey alanına sahip olduğu düşünülmektedir. 90 günlük numunede ise mikro çatlaklar ve düzensiz bir yapı geliştiği görülmektedir (Şekil 69-c, Şekil 69-d). TiO_2 'nin aşırı ince yapısı, ilerleyen yaşlarda yoğun fakat gevrek bir yapı oluşturduğundan çatlak ilerlemesine daha açık hâle gelmiş ve dayanım kaybı fazla yaşanmıştır.



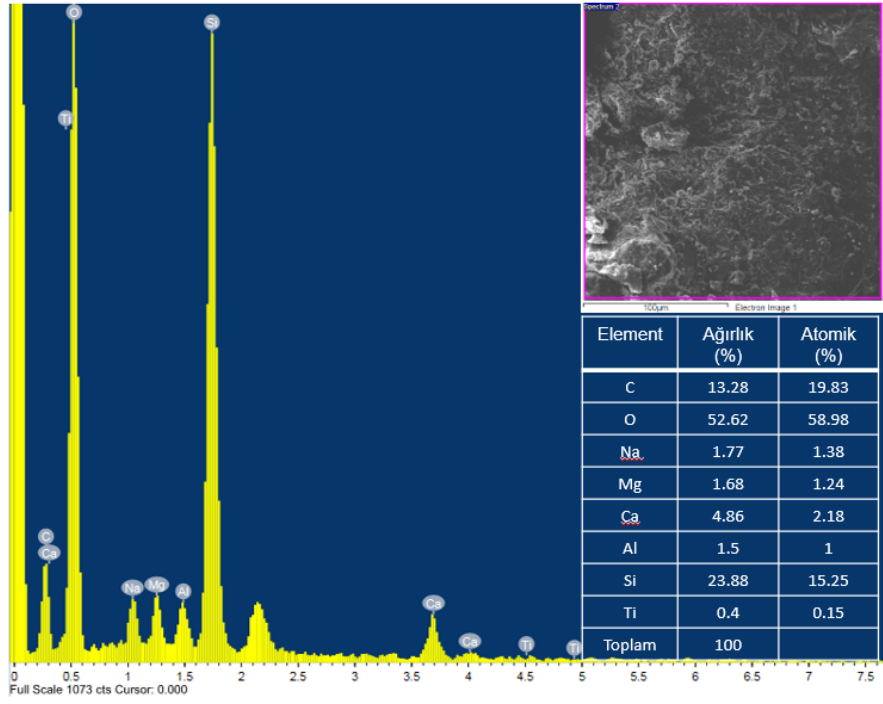
a)



b)



c)



d)

Şekil 69. 7 günlük a) SEM b) EDX ve 90 günlük c) SEM d) EDX TiO₂ katkılı geopolimer harca ait görüntüler

3.5. Su Emme ve Boşluk Oranı Sonuçları

27 farklı deney serisinden elde edilen su emme ve boşluk oranı sonuçları Tablo 14'te gösterilmiştir. Su emme oranları %0.82 ile %10.66 arasında değişmektedir. En düşük su emme oranı S4 numunesinde oluşurken en yüksek su emme oranı S22 numunesinde gerçekleşmiştir. Boşluk oranları ise %1.83 ile %20.82 arasında değişmektedir. Benzer şekilde en düşük boşluk oranı S4 numunesinde oluşurken, en yüksek boşluk oranı S22 numunesinde gerçekleşmiştir. Burada en düşük su emme ve boşluk oranına sahip S4 numunesi 24 saat kür süresi ve 90 °C sıcaklıkta etüv kürü uygulanmış, en yüksek su emme ve boşluk oranına sahip S22 numunesi 72 saat kür süresi ve 90 °C sıcaklıkta etüv kürü uygulanmıştır. Burada kür süresinin numunelerdeki su emme ve boşluk oranları üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Tablo 14. Geopolimer numunelerde su emme ve boşluk oranı (%)

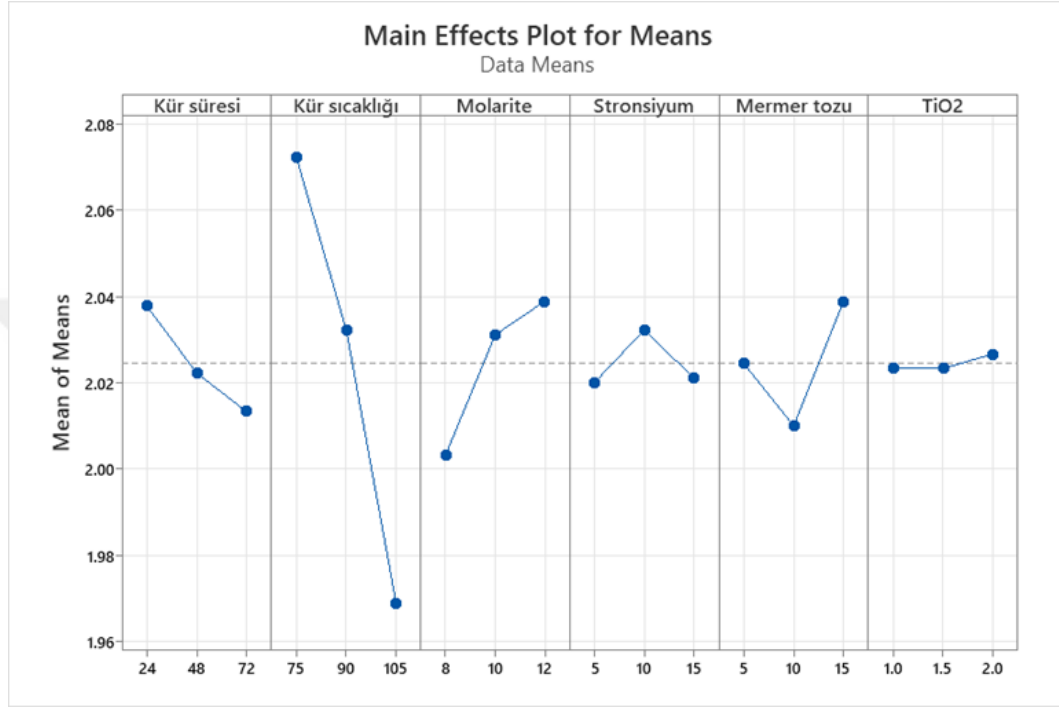
	Su emme (%)	Boşluk oranı (%)
S1	2.73	5.90
S2	3.95	8.41
S3	3.33	7.30
S4	0.82	1.83
S5	2.06	4.59
S6	3.63	7.84
S7	3.57	7.79
S8	3.89	8.46
S9	4.03	8.71
S10	3.23	7.07
S11	2.17	4.68
S12	3.05	6.63
S13	1.91	4.14
S14	3.06	6.61
S15	3.54	7.62
S16	7.48	15.57
S17	8.82	18.10
S18	8.33	17.15
S19	3.97	8.66
S20	1.90	4.16
S21	5.92	12.66
S22	10.66	20.82
S23	3.33	7.27
S24	4.25	9.21
S25	8.32	17.19
S26	9.22	18.83
S27	8.03	16.63

3.6. Sinyal/Gürültü Sonuçları

Bu bölümde 27 farklı deney serisi ile oluşturulmuş 6 farklı parametre ve 3 farklı seviyeli ortogonal matrise ait ortalama yanıt değerleri, S/N oranları ve Varyans analizleri tartışılmıştır. Yapılan deneylerde, 28 günlük veriler kullanılarak S/N oranları, en büyük-en iyi (the bigger the better) sinyal-gürültü (S/N) baz alınarak Eşitlik 4'e göre hesaplanmıştır. S/N oranları hesaplandıktan sonra grafik olarak çizilecektir ve S/N'yi maksimum yapan parametre seviyesi bu parametrenin optimum seviyesi olacaktır (Liban, 2022).

28 günlük numunelerin birim kütle ortalama yanıt değerleri Şekil 70'te gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde araştırılan parametrelerin birim kütle üzerindeki etki sırası kür sıcaklığı, molarite, mermer tozu, kür süresi, TiO₂ şeklinde sıralanmaktadır. Kür sıcaklığının delta değeri 0.103 olup, 1. seviyede en yüksek değere

ulaşmaktadır. Parametrelerin önem derecesi S/N analizinden elde edilen ortalama yanıt tablosundaki delta değerinden anlaşılabilir (Tablo 15). Delta değeri, ilgili parametre için elde edilen S/N oranlarından en büyük ve en küçük olanın farkı ile bulunmaktadır. Delta değeri büyük olan parametre sonuçlar üzerinde daha fazla etkili olmaktadır (Yenginar, 2020).



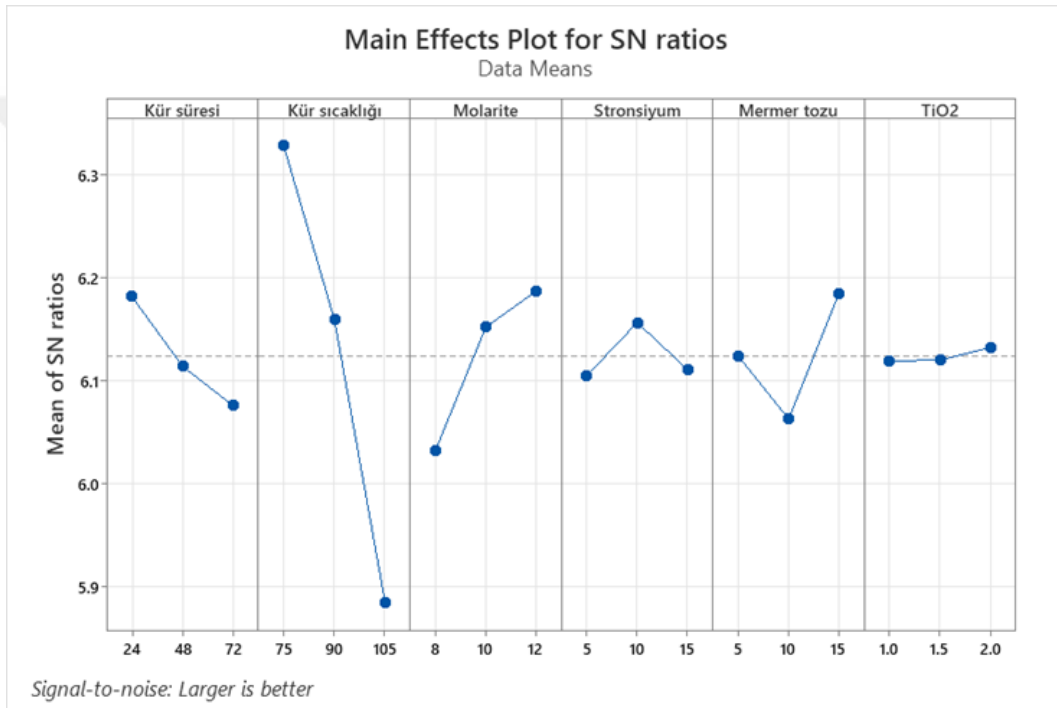
Şekil 70. 28 günlük birim kütle ortalama yanıt grafiği

Tablo 15. 28 günlük numunelerde birim kütle ortalama yanıt değerleri

Seviye	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO ₂
1	2.038	2.072	2.003	2.020	2.024	2.023
2	2.022	2.032	2.031	2.032	2.010	2.023
3	2.013	1.969	2.039	2.021	2.039	2.027
Delta	0.024	0.103	0.036	0.012	0.029	0.003
Sıralama	4	1	2	5	3	6

Birim kütleye ait sinyal/gürültü oranı grafiği incelendiğinde kür süresi arttıkça S/N oranı azalmıştır. Şekil 71'de, 28 günlük numunelerde birim kütle için S/N oranlarını

görülmektedir. Kür süresinin 1. Seviyesi olan 24 saat olduğu durumda S/N oranı maksimum değere ulaşmış olup, kür süresi arttıkça S/N oranı azalmaya başlamıştır. Kür sıcaklığının 1. Seviyesi olan 75 °C olduğu durumda S/N oranı maksimum değere ulaşmış ancak sıcaklık arttıkça S/N oranı azalmıştır. Molarite oranı 3. Seviyede 12M'da maksimum değere ulaşmıştır. Molarite değeri azaldıkça S/N oranı da azalmıştır. Stronsiyum 2. seviye olan %10 oranında kullanıldığında maksimum değere ulaşırken, %5 ve %15 oranında kullanıldığında S/N oranı azalmıştır. Mermer tozu 3. Seviye olan %15 oranında kullanıldığında maksimum seviyeye ulaşmıştır. TiO_2 3. Seviyesi olan %2 oranında maksimum seviyeye ulaşmıştır. Bu oran azaldıkça S/N oranı azalmıştır.



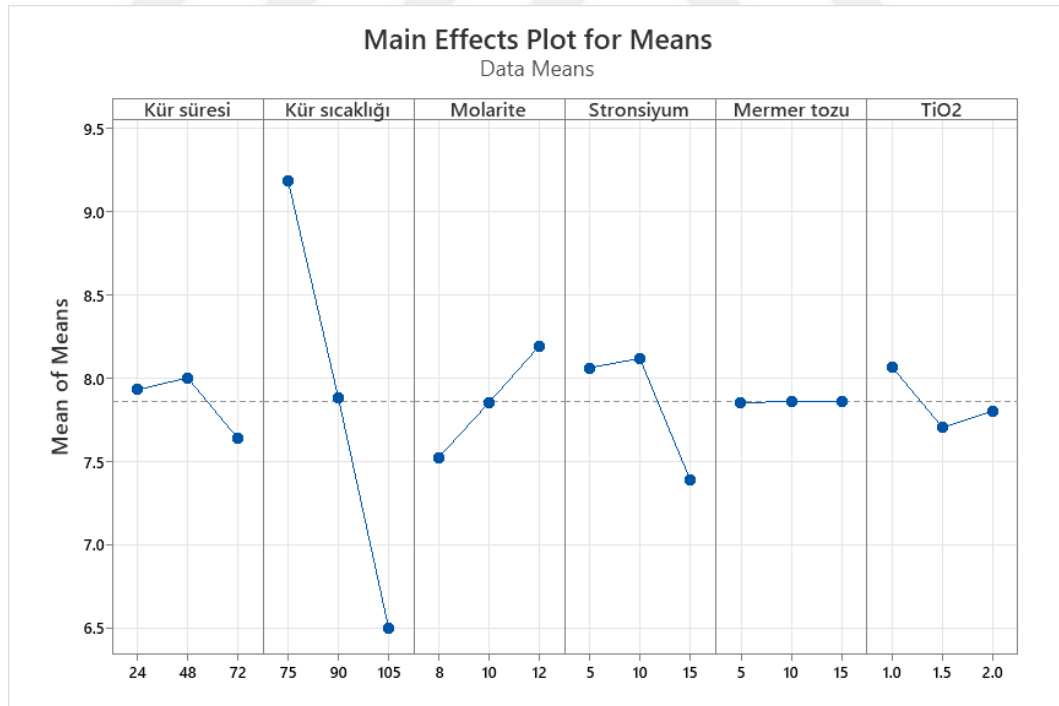
Şekil 71. 28 günlük birim kütle S/N oranı grafiği

Parametrelere ait Sinyal/gürültü oranları dikkate alındığında etki sırası kür sıcaklığı, molarite, mermer tozu, kür süresi, TiO_2 şeklindedir (Tablo 16). Ortalama yanıt değerinin maksimum yapan parametre seviyeleri optimum seviyelerdir. S/N oranlarına göre kür süresi 1. seviyede, kür sıcaklığı 1. seviyede, molarite 3. seviyede, stronsiyum 2. seviyede mermer tozu 3. seviyede, TiO_2 3. seviyede optimum olduğu söylenebilir.

Tablo 16. 28 günlük numunelerde birim kütle için S/N oranları

Seviye	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO ₂
1	6.181	6.327	6.032	6.104	6.123	6.119
2	6.113	6.158	6.152	6.156	6.062	6.119
3	6.075	5.884	6.186	6.110	6.184	6.132
Delta	0.106	0.443	0.154	0.052	0.122	0.013
Sıralama	4	1	2	5	3	6

28 günlük eğilme dayanımları üzerinde tüm seviyelerde her bir parametrenin ortalama yanıt değerleri verilmektedir (Tablo 17). 27 farklı geopolimer numune üzerinde gerçekleştirilen eğilme dayanımı sonuçlarına göre optimum parametrelerin belirlenmesinde etki sırası, kür sıcaklığı, stronsiyum, molarite, kür süresi, TiO₂, mermer tozu şeklindedir. Ortalama yanıt değerlerine göre kür süresi 2. Seviyesinde, kür sıcaklığı 1. seviyesinde, molarite 3. seviyesinde, stronsiyum 2. seviyesinde mermer tozu 2. seviyesinde TiO₂ ise 1. seviyesinde optimum olduğu söylenebilir (Şekil 72).

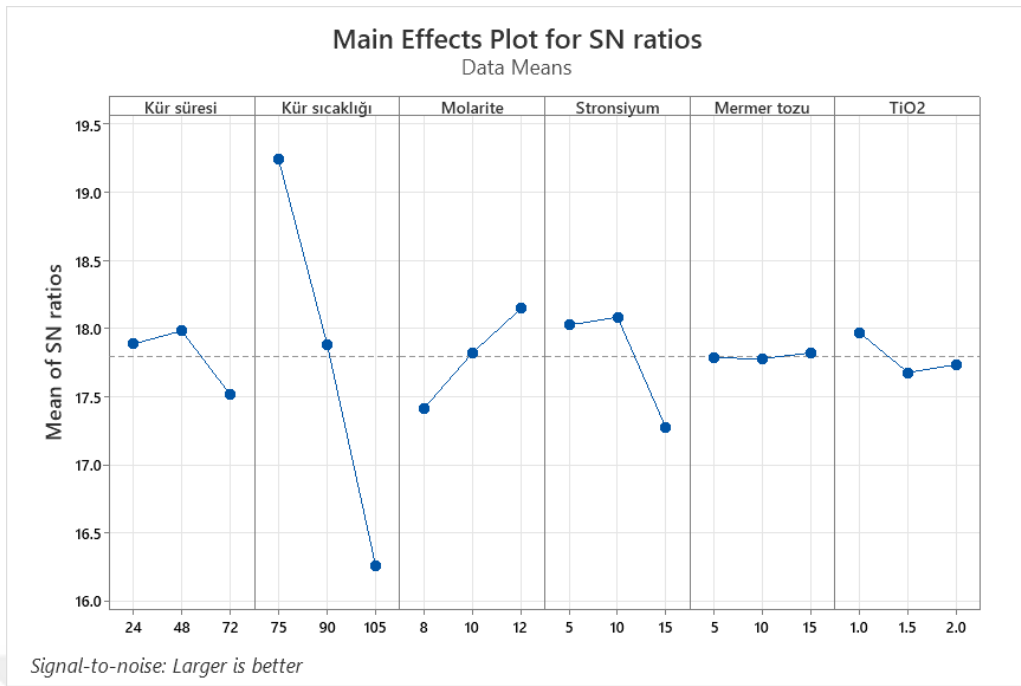


Şekil 72. 28 günlük eğilme dayanımı ortalama yanıt grafiği

Tablo 17. 28 günlük numunelerde eğilme dayanımı için ortalama yanıt değerleri

Seviye	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO ₂
1	7.929	9.184	7.523	8.061	7.849	8.063
2	8.001	7.882	7.852	8.117	7.861	7.701
3	7.637	6.501	8.191	7.389	7.857	7.802
Delta	0.364	2.683	0.668	0.728	0.012	0.362
Sıralama	4	1	3	2	6	5

Eğilme dayanımı sonuçlarına ait S/N oranı grafiği (Şekil 73)'te gösterilmektedir. Taguchi optimizasyonuna göre ‘en büyük en iyidir’ hedefinin alındığı bu sonuçlarda yatay ekseninde parametrelere ait seviyeler karşılığında, S/N oranları sunulmuştur. Eğilme dayanımına ait S/N oranı grafiğine göre kür süresi 48 saat olduğu durumda S/N oranı maksimum olmuştur. Kür süresi arttıkça S/N oranı azalmıştır. Kür sıcaklığı 1. Seviyesi olan 75 °C’de maksimum değere ulaşmıştır. Kür sıcaklığı arttıkça S/N oranı azalmıştır. Molarite oranı 3. Seviyesi olan 12M değerinde maksimum değere ulaşmış olup molarite değeri azaldıkça S/N oranı da azalmıştır. Stronsiyum 2. Seviyesi olan % 10 oranında kullanıldığında maksimum seviyeye ulaşmıştır. %15 oranında kullanıldığında ise S/N oranı azalmıştır. Mermer tozu 3. Seviyesi olan %15 oranında kullanıldığında S/N oranı maksimum seviyeye ulaşmıştır. TiO₂ ise 1. Seviyesi olan %1 oranında kullanıldığında maksimum S/N oranına ulaşmıştır.



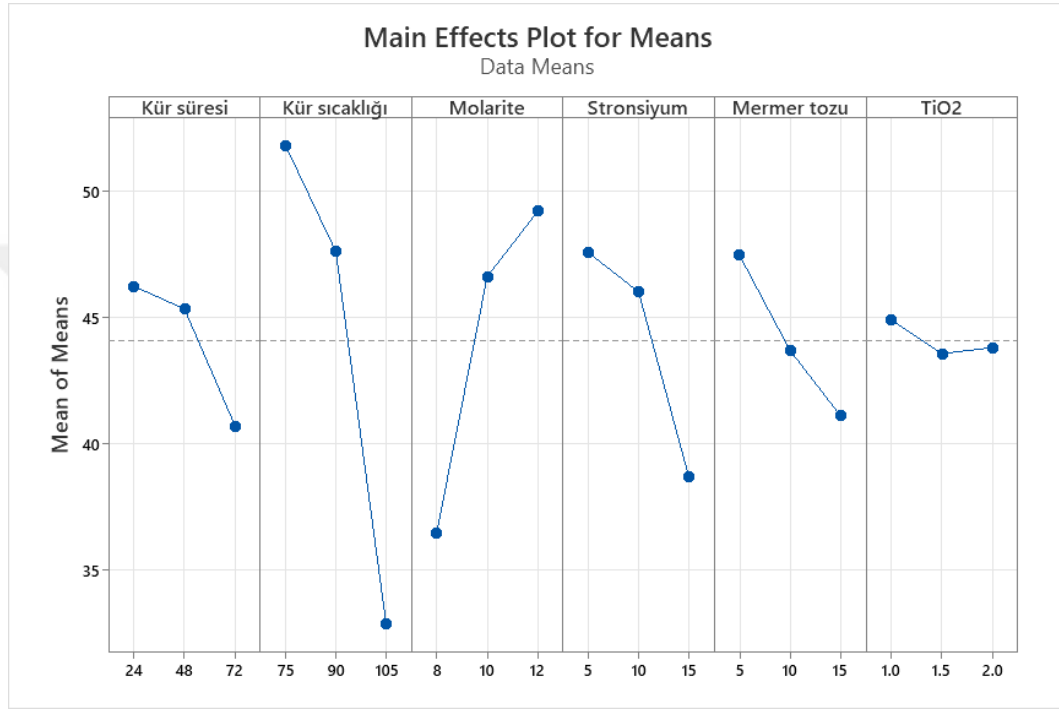
Şekil 73. 28 günlük eğilme dayanımı S/N oranı grafiği

28 günlük eğilme dayanımına sahip numunelerde S/N oran değerlerine ait parametre ve seviyeleri (Tablo 18)'de gösterilmektedir. Buna göre optimum parametrelerin belirlenmesinde etki sırası kür sıcaklığı, stronsiyum, molarite, kür süresi, TiO₂, mermer tozu şeklindedir. Eğilme dayanımı S/N oranına göre kür süresi 2. seviyede kür sıcaklığı 1. seviyede, molarite 3. seviyede, stronsiyum 3. seviyede, mermer tozu 3. seviyede, TiO₂ 1. seviyede optimum olduğu söylenebilir.

Tablo 18. 28 günlük numunelerde Eğilme dayanımı için Sinyal/ Gürültü oranı

Seviye	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO ₂
1	17.88	19.24	17.41	18.02	17.78	17.97
2	17.98	17.88	17.82	18.08	17.78	17.67
3	17.51	16.26	18.14	17.27	17.82	17.73
Delta	0.47	2.98	0.73	0.81	0.04	0.30
Sıralama	4	1	3	2	6	5

Basınç dayanımına ait ortalama yanıt değerleri Tablo 19'da gösterilmektedir. Basınç dayanımına ait optimum parametrelerin belirlenmesinde etki sırası kür sıcaklığı, molarite, stronsiyum, mermer tozu, kür süresi, TiO_2 şeklindedir. Basınç dayanımı ortalama yanıt değerlerine göre kür süresi 1. seviyede, kür sıcaklığı 1. seviyede, molarite 3. seviyede, stronsiyum 1. seviyede, mermer tozu 1. seviyede, TiO_2 1. seviyede optimum olduğu söylenebilir (Şekil 74).

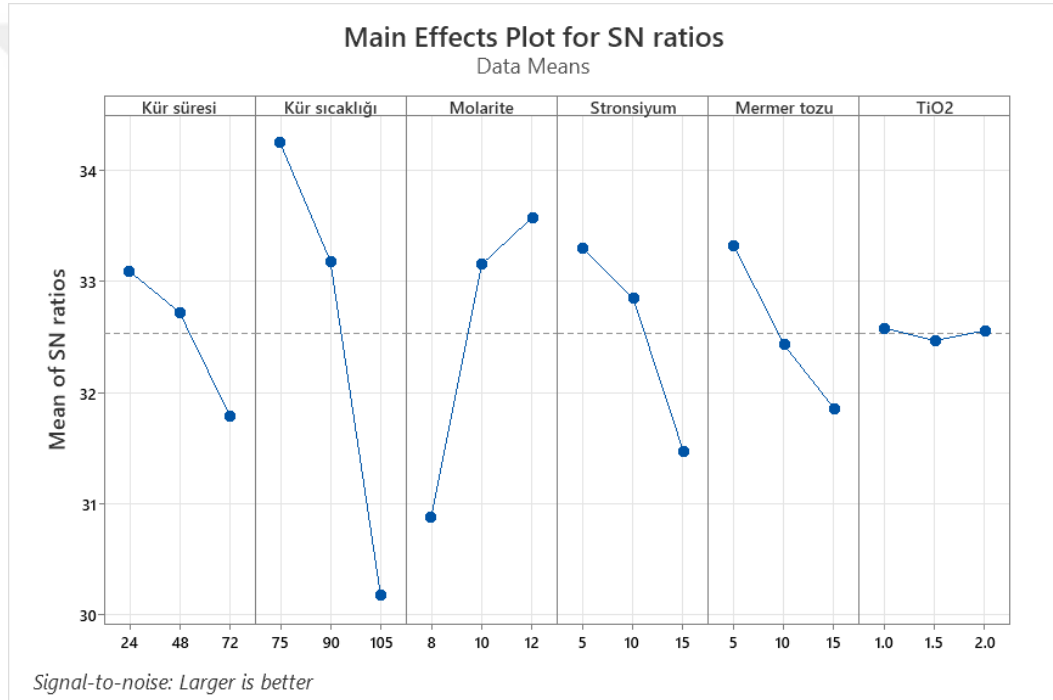


Şekil 74. 28 günlük basınç dayanım ortalama yanıt grafiği

Tablo 19. 28 günlük numunelerde basınç dayanımı için ortalama yanıt değerleri

Seviye	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO_2
1	46.22	51.77	36.44	47.54	47.45	44.88
2	45.32	47.58	46.60	45.99	43.68	43.55
3	40.69	32.87	49.18	38.69	41.09	43.79
Delta	5.53	18.90	12.74	8.86	6.36	1.32
Sıralama	5	1	2	3	4	6

‘En büyük en iyidir’ kriteri kullanılarak oluşturulmuş 28 günlük basınç dayanım grafiğine göre 1. Seviye olan 24 saat kür süresinde S/N oranı maksimum seviyeye ulaşmıştır (Şekil 75). Kür süresi arttıkça S/N oranı azalmıştır. Kür sıcaklığı 75 °C de 1. Seviyede maksimum seviyeye ulaşmıştır. Kür sıcaklığı arttıkça S/N oranı azalmıştır. Molarite oranı maksimum seviyeye 12M'de 3. Seviyede ulaşmıştır. Molarite oranı azaldıkça S/N oranı da azalmıştır. Stronsiyum % 5 oranında kullanıldığında 1. Seviyede maksimum orana ulaşmıştır. Stronsiyum oranı arttıkça S/N oranı azalmıştır. Mermer tozu %5 oranında kullanıldığında 1. Seviyede maksimum değere ulaşmıştır. Mermer tozu oranı arttıkça S/N oranı azalmıştır. TiO₂ %1 oranında kullanıldığında 1. Seviyede maksimum değere ulaşmıştır.



Şekil 75. 28 günlük basınç dayanım S/N oranı grafiği

Geopolimer numunelerden elde edilen basınç dayanımı sonuçları optimum parametrelerin etki sırası kür sıcaklığı, molarite, mermer tozu, kür süresi, TiO₂ şeklindedir (Tablo 20). Basınç dayanımı S/N oranına göre kür süresi 1. seviyede, kür sıcaklığı 1. seviyede, molarite 3. seviyede, stronsiyum 1. seviyede, mermer tozu 1. seviyede TiO₂ 1. seviyede optimum olduğu söylenebilir (Şekil 76).

Tablo 20. 28 günlük numunelerde basınç dayanımı S/N oranı tablosu

Seviye	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO ₂
1	33.09	34.24	30.87	33.29	33.32	32.58
2	32.72	33.18	33.15	32.84	32.43	32.46
3	31.79	30.17	33.57	31.47	31.85	32.56
Delta	1.30	4.07	2.70	1.83	1.47	0.12
Sıralama	5	1	2	3	4	6



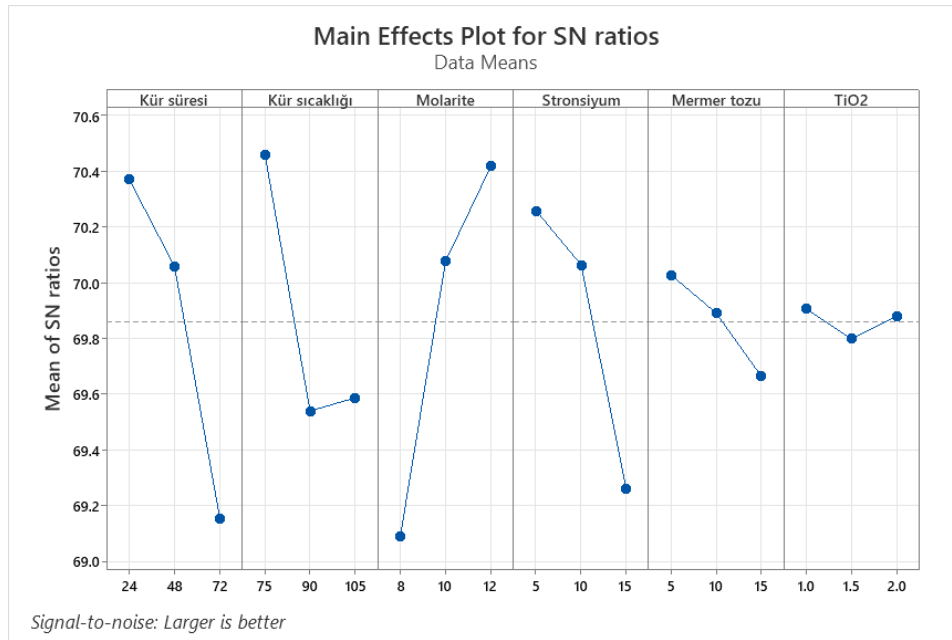
Şekil 76. 28 günlük UPV ortalama yanıt grafiği

Ultrasonik dalga hızı ortalama yanıt tablosuna göre optimum parametrelerin belirlenmesinde etki sırası molarite, kür süresi, stronsiyum, kür sıcaklığı, mermer tozu, TiO₂ şeklindedir (Tablo 21.). UPV ortalama yanıt tablosuna göre kür süresi 1. seviyede, kür sıcaklığı 1. seviyede, molarite 3. seviyede, stronsiyum 1. seviyede, mermer tozu 1. seviyede, TiO₂ 1. seviyede optimum olduğu söylenebilir.

Tablo 21. 28 günlük numunelerde UPV ortalama yanıt tablosu

Seviye	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO ₂
1	3302	3334	2880	3267	3195	3147
2	3193	3041	3198	3194	3137	3110
3	2903	3022	3320	2936	3065	3140
Delta	398	311	440	331	130	36
Sıralama	2	4	1	3	5	6

Ultrasonik dalga hızı S/N oranı grafiği incelendiğinde, S/N oranı kür süresi 24 saat 1. Seviyede olduğunda maksimum değere ulaşılmıştır (Şekil 77). Kür süresi arttıkça S/N oranı azalmıştır. Kür sıcaklığı 1. Seviyesi olan 75 °C'de maksimum seviyeye ulaşmıştır. Molarite oranı 12M'da 3. Seviyede maksimum değere ulaşmıştır. Molarite oranı azaldıkça S/N oranı da azalmıştır. Stronsiyum %5 oranında kullanıldığında 1. Seviyede maksimum değere ulaşmıştır. Stronsiyum oranı arttıkça S/N oranı azalmıştır. Mermer tozu 1. Seviyede, %5 oranında kullanıldığında maksimum S/N oranına ulaşmıştır. Mermer tozu oranı arttıkça S/N oranı azalmıştır. TiO₂ 1. seviyede %1 oranında kullanıldığında S/N oranı maksimum seviyeye ulaşmıştır. Bu oran %2 olduğunda ise 3. seviyede en düşük S/N oranına elde edilmiştir.



Şekil 77. 28 günlük UPV S/N oranı grafiği

Ultrasonik dalga hızı, S/N oranı tablosuna göre optimum parametrelerinin belirlenmesinde etki sırası molarite, kür süresi, stronsiyum, kür sıcaklığı, mermer tozu, TiO₂ şeklindedir (Tablo 22). UPV, S/N oranına göre kür süresi 1. seviyede, kür sıcaklığı 1. seviyede, molarite 3. seviyede, stronsiyum 1. seviyede, TiO₂ 1. seviyede optimum olduğu söylenebilir.

Tablo 22. 28 günlük numunelerde UPV S/N oranı tablosu

Seviye	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO ₂
1	70.37	70.46	69.09	70.26	70.26	69.91
2	70.06	69.54	70.08	70.06	69.89	69.80
3	69.15	69.59	70.42	69.26	69.66	69.88
Delta	1.22	0.92	1.33	1.00	0.36	0.11
Sıralama	2	4	1	3	5	6

3.7. Anova Sonuçları

Bu bölümde birim kütle, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ultrasonik dalga hızı sonuçlarından elde edilen varyans analizleri sunulmuştur. Burada bütün parametrelere ait serbestlik derecelerinin 2 olduğu görülmektedir. Serbestlik dereceleri (seviye-1) olarak hesaplanmaktadır. Parametrelerin önemini değerlendirmek için p değeri kullanılır ve bu p değeri 0.05'ten küçük ise istatistiksel olarak anlamlı kabul edilir (Sharif vd.,2020). Burada SD: Serbestlik Derecesi, KT: Kareler Toplamı, KO: Kareler Ortalamasını göstermektedir.

Birim kütle sonuçlarına göre hazırlanan Varyans analizleri Tablo 23'te sunulmuştur. Birim kütle varyans analizine göre etki yüzdesi en yüksek olan parametre %67.62 ile kür sıcaklığı olduğu ve p değerinin 0.05'ten küçük olması sebebiyle birim kütle ile bu parametre arasında anlamlı bir ilişki olduğu görülmektedir. Yüzdelik etkinin en fazla olduğu bir diğer faktör ise %8.70 ile molarite olduğu ve bunun da 0.0303 p değeri ile yine birim kütle ile bu parametre arasında anlamlı bir ilişki olduğu düşünülmektedir. Diğer faktörlere bakıldığında zaman, etki derecelerinin az olduğu ve aynı zamanda p değerinde 0.05 in üzerinde değerler olduğu ve bu bakımdan anlamlı olmadığı değerlendirilmektedir.

Tablo 23. 28 Günlük birim kütle Varyans analizi tablosu

Kontrol faktörler	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	Etki yüzdesi
Kür süresi	2	0.0027	0.0013	1.99	0.1740	%3.81
Kür sıcaklığı	2	0.0488	0.0244	35.22	0.0000	%67.62
Molarite	2	0.0062	0.0031	4.53	0.0303	%8.70
Maden atığı (Stronsiyum)	2	0.0008	0.0004	0.59	0.5661	%1.14
Mermer tozu	2	0.0037	0.0018	2.71	0.1014	%5.20
TiO ₂	2	0.0000	0.0000	0.05	0.9532	%0.09
Hata	14	0.0097	0.0006			%13.44
Toplam	26					%100

28 günlük eğilme dayanımı varyans analizi Tablo 24'te gösterilmektedir. Burada ki Anova sonuçları değerlendirildiğinde etki yüzdesi en yüksek parametre %75,47 ile kür sıcaklığı olduğu görülmektedir. P değeri 0.05 in çok altında olması sebebiyle eğilme dayanımının bu parametre ile anlamlı bir ilişkisi olduğu bilinmektedir. İkinci en etkili parametre ise % 6.88 oranı ile stronsiyum olduğu görülmektedir ayrıca p değeri de 0.025 olduğu ve 0.05'ten küçük olduğu için anlamlı bir ilişki olduğu söylenebilir.

Tablo 24. 28 Günlük eğilme dayanımı Varyans analizi tablosu

Kontrol faktörler	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	Etki yüzdesi
Kür süresi	2	0.6676	0.3338	1.09	0.362	%1.55
Kür sıcaklığı	2	32.4064	16.2032	53.05	0.000	%75.47
Molarite	2	2.0053	1.0027	3.28	0.068	%4.67
Maden atığı (Stronsiyum)	2	2.9551	1.4775	4.84	0.025	%6.88
Mermer tozu	2	0.0007	0.0003	0.00	0.999	%0.00
TiO ₂	2	0.6283	0.3142	1.03	0.383	%1.46
Hata	14	4.2763	0.3054			%9.96
Toplam	26					%100

28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre varyans analizi Tablo 25'te verilmiştir. Basınç dayanımı varyans analizi sonuçlarına göre etki yüzdesi en yüksek parametre %47.85 ile kür sıcaklığı olduğu aynı zamanda p değerinin 0,05'ten çok küçük olması basınç dayanımının kür sıcaklığı ile anlamlı bir ilişkisinin olduğunu göstermektedir. Etki

yüzdesi %22.01 oranı ile ikinci öneme sahip olan molarite parametresi ise yine 0,05'ten çok küçük olması sebebiyle basınç dayanımının molarite ile anlamlı bir ilişkisinin olduğunu göstermektedir. Etki yüzdesi %10.86 ile 3. sırada yer alan parametre ise stronsiyum ile elde edilmiş olup p değeri 0.005 ile yine basınç dayanımını stronsiyum ile anlamlı bir ilişki içerisinde olduğu görülmektedir.

Tablo 25. 28 Günlük basınç dayanımı Varyans analizi tablosu

Kontrol faktörler	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	Etki yüzdesi
Kür süresi	2	158.46	79.229	3.06	0.079	%4.27
Kür sıcaklığı	2	1773.89	886.943	34.21	0.00000	%47.85
					4	
Molarite	2	816.11	408.056	15.74	0.00026	%22.01
Maden atığı (Stronsiyum)	2	402.54	201.269	7.76	0.005	%10.86
Mermer tozu	2	184.37	92.187	3.56	0.056	%4.97
TiO ₂	2	8.95	4.474	0.17	0.843	%0.24
Hata	14	362.98	25.927			%9.79
Toplam	26					%100

Ultrasonik dalga hızı varyans analizi sonuçları değerlendirildiğinde etki yüzdesi en yüksek parametre %29.65 ile molarite olduğu görülmektedir (Tablo 26). Molariteye ait p değeri 0.00003 ile anlamlı olduğu ve 0.05'ten küçük olması sebebiyle molaritenin UPV ile anlamlı bir ilişkisinin olduğu düşünülmektedir. Etki yüzdesi en fazla olan ikinci ve üçüncü sıradaki parametreler sırası ile kür süresi % 24.37 ve kür sıcaklığı 17.53% olup p değerlerlerinde 0.05'ten düşük olması sebebiyle UPV ile bu parametreler arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu söylenebilir.

Tablo 26. 28 Günlük UPV Varyans analizi tablosu

Kontrol faktörler	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	Etki yüzdesi
Kür süresi	2	762947	381473	20.28	0.00007	%24.37
Kür sıcaklığı	2	548687	274344	14.59	0.00038	%17.53
Molarite	2	927950	463975	24.67	0.00003	%29.65
Maden atığı (Stronsiyum)	2	544032	272016	14.46	0.00039	%17.38
Mermer tozu	2	76510	38255	2.03	0.1676	%2.44

Tablo 26. (Devamı)

Kontrol faktörler	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	Etki yüzdesi
TiO ₂	2	6739	3370	0.18	0.8378	%0.22
Hata	14	263297	188807			%8.41
Toplam	26					%100

Taguchi ve Anova sonuçlarına göre 27 farklı ortogonal matris ile oluşturulan ve elde edilen deneysel veriler doğrultusunda, 6 farklı parametre ve 3 farklı seviyeli geopolimer numuneler için optimum sonuçlar Tablo 27'de verilmiştir.

- Birim kütle sonuçlarına göre incelendiğinde: Kür süresinin 24 saat olduğu, kür sıcaklığının 75 °C, molaritenin 12M, maden atığının %10, mermer tozunun %15 ve TiO₂ nin %2 oranında olduğu,
- Eğilme dayanımı için optimum sonuçlar incelendiğinde: Kür süresinin 48 saat olduğu, kür sıcaklığının 75 °C, molaritenin 12M, maden atığının %10, mermer tozunun %15 ve TiO₂ nin %1 oranında olduğu,
- Basınç dayanımı sonuçlarına göre: Kür süresinin 24 saat olduğu, kür sıcaklığının 75 °C, molaritenin 12M, maden atığının %5, mermer tozunun %5 ve TiO₂ nin %1 oranında olduğu,
- Ultrasonik dalga hızı sonuçlarına göre: Kür süresinin 24 saat olduğu, kür sıcaklığının 75 °C, molaritenin 12M, maden atığının %5, mermer tozunun %5 ve TiO₂ nin %1 oranında kullanıldığında optimum değerlere ulaşılabileceği tespit edilmiştir.

Tablo 27. Taguchi metoduna göre belirlenen optimum sonuçlar

	Kür süresi (t)	Kür sıcaklığı (°C)	Molarite (M)	Maden atığı (Stronsiyum) %	Mermer tozu (%)	TiO ₂ (%)	Optimizasyon kriteri
Birim kütle	24	75	12	10	15	2	En büyük en iyidir
Eğilme Dayanımı	48	75	12	10	15	1	En büyük en iyidir
Basınç Dayanımı	24	75	12	5	5	1	En büyük en iyidir
Ultrasonik Dalga Hızı	24	75	12	5	5	1	En büyük en iyidir

3.8. Optimum Değerler için Doğrulama Deneyleri

Geopolimer harç numunelerinde birim kütle, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ultrasonik dalga hızı değerleri üzerinde Taguchi optimizasyon yöntemiyle ayrı ayrı optimum değerleri elde edilmiştir. Optimum değerler üzerinde tekrar deneyler yapılarak hedeflenen sonuçlar elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen parametre ve seviye kombinasyonu en iyi performans karakteristiği değerine ulaşırsa istenen durum gerçekleşmiş olur ve deney amacına ulaşmış olur. Elde edilen hedef sonuçlar ile optimum elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak deneylerin doğrulukları ispatlanmıştır.

Geopolimer harç numunelerde Taguchi optimizasyon yöntemiyle elde edilen optimum sonuçlara ait doğrulama değerleri Tablo 28'de verilmiştir. Burada birim kütleye ait optimum sonuç 2.13 g/cm^3 olarak elde edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler sonucu, birim kütleye ait doğrulama deneyi yapılmış olup 2.12 g/cm^3 sonucu elde edilmiştir. Doğrulama deneylerinde elde edilen sonuçlar deneysel elde edilen sonuçlara göre % 0.47'lik bir azalma söz konusudur. Bu sonuçlar kabul edilebilir bir oran olduğu söylenebilir ve sonuçların doğruluğu ispatlanmış olmaktadır (Yenginar, 2020). Eğilme dayanımı sonucu en büyük en iyidir kriteri kullanılarak elde edilen optimum değer 10.24 MPa olarak bulunmuştur. Burada doğrulama deneyi sonucu elde edilen dayanım değeri 10.09 MPa bulunmuştur. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar ile deneysel verilerden elde edilen sonuçlara göre % 1.48'lik bir azalma olmuştur. Deneysel verilerden elde edilen optimum basınç dayanımı 65.74 MPa bulunmuştur. Doğrulama deneyi sonrası elde edilen basınç dayanımı ise 65.53 MPa bulunmuştur. Doğrulama deneyi elde edilen sonuçlar ile deneysel elde edilen sonuçlar kıyaslandığında % 0.32'lik bir azalma olmuştur. Ultrasonik dalga hızı sonuçlarına göre elde edilen optimum değer 3459 mm/s olarak elde edilmiştir. Doğrulama deneyi sonrası ultrasonik dalga hızı sonucu ise 3440 mm/s olarak tespit edilmiştir. Doğrulama deneyi sonuçları, deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında % 0.55'lik bir azalma görülmektedir. Genel olarak doğrulama deney sonuçları ile deneysel sonuçların birbirine yakın değerler elde edildiği görülmektedir ve bu sonucun kabul edilebilir bir sonuç olduğu ispatlanmıştır.

Tablo 28. 28 günlük numunelerde optimum deney koşulları ve doğrulama sonuçları

Deney	Kür süresi (s)	Kür sıcaklığı (C)	Molarite (M)	Maden atığı (stronsiyum) (%)	Mermer tozu (%)	TiO ₂ (%)	Taguchi Optimum sonuçlar	Doğrulama deney sonuçları
Birim kütle (g/cm ³)	24	75	12	10	15	2	2.13	2.12
Eğilme dayanımı (MPa)	48	75	12	10	15	1	10.24	10.09
Basınç dayanımı (MPa)	24	75	12	5	5	1	65.74	65.53
UPV (mm/s)	24	75	12	5	5	1	3459	3440

Varyans analizi sonuçları, birim kütle, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve UPV üzerinde etkili olan parametrelerin etkileşim yüzdelерini ortaya koymaktadır (Tablo 29). Elde edilen sonuçlar, farklı parametrelerin geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki baskın etkilerini açıkça göstermektedir. Kür sıcaklığı tüm parametreler içinde en yüksek etkiyi göstermiştir. Özellikle eğilme dayanımı varyans etkileşimi %75.47 ve birim kütle varyans etkileşimi %67.62 ile belirleyici bir rol oynamıştır. Bu durum, kür sıcaklığının artmasına bağlı olarak geopolimerizasyon oluşumuna katkı sağlamış ve yapı içerisinde homojen bir dağılım sağladığı düşünülmektedir. Basınç dayanımı açısından ise kür sıcaklığı varyans etkileşimi %47.85 ile en etkili parametre olmakla birlikte, molarite varyans etkileşimi %22.01 ile önemli bir katkı sağlamıştır. UPV sonuçlarında en etkili parametre molarite %29.65 olarak belirlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda yüksek molariteye sahip numunelerde homojen bir yapının oluştuğu bununda ultrasonik dalga hızını daha iyi iletebildiği düşünülmektedir. Katkı malzemeleri açısından değerlendirildiğinde, stronsiyumun özellikle basınç dayanımı varyans etkileşimi %10.86 ve eğilme dayanımı varyans etkileşimi %6.88 ile üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Mermer tozu ve TiO₂ katkılarının ise genel etkisinin sınırlı olduğu, yalnızca mermer tozunun birim kütle varyans etkileşimi %5.20 ile kısmi bir etki yarattığı görülmektedir.

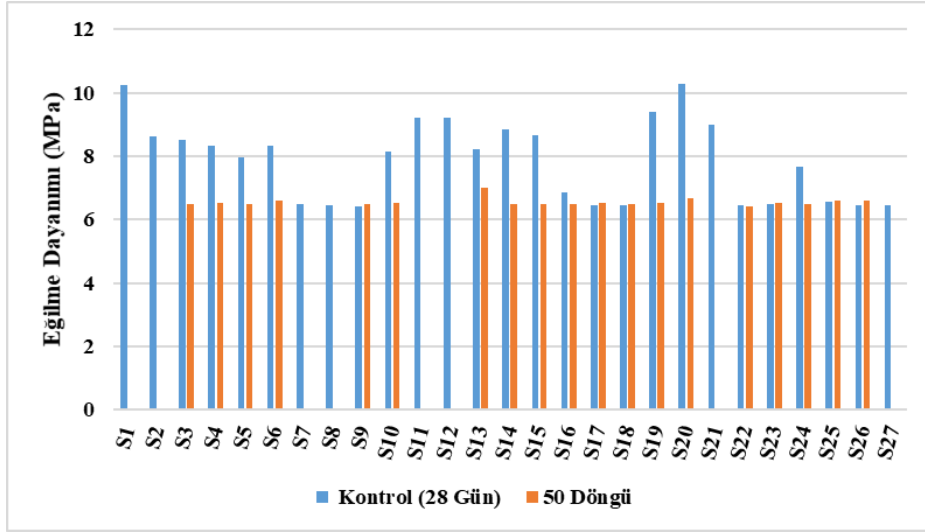
Tablo 29. Varyans sonuçlarına göre birim kütle, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve UPV üzerindeki parametrelerin etkileşim yüzdeleri

Parametreler	Birim kütle (%)	Eğilme dayanımı (%)	Basınç dayanımı (%)	UPV (%)
Kür süresi	%3.81	%1.55	%4.27	%24.37
Kür sıcaklığı	%67.62	%75.47	%47.85	%17.53
Molarite	%8.70	%4.67	%22.01	%29.65
Maden atığı (Stronsiyum)	%1.14	%6.88	%10.86	%17.38
Mermer tozu	%5.20	%0.00	%4.97	%2.44
TiO ₂	%0.09	%1.46	%0.24	%0.22

3.9. Donma-Çözülme Deney Sonuçları

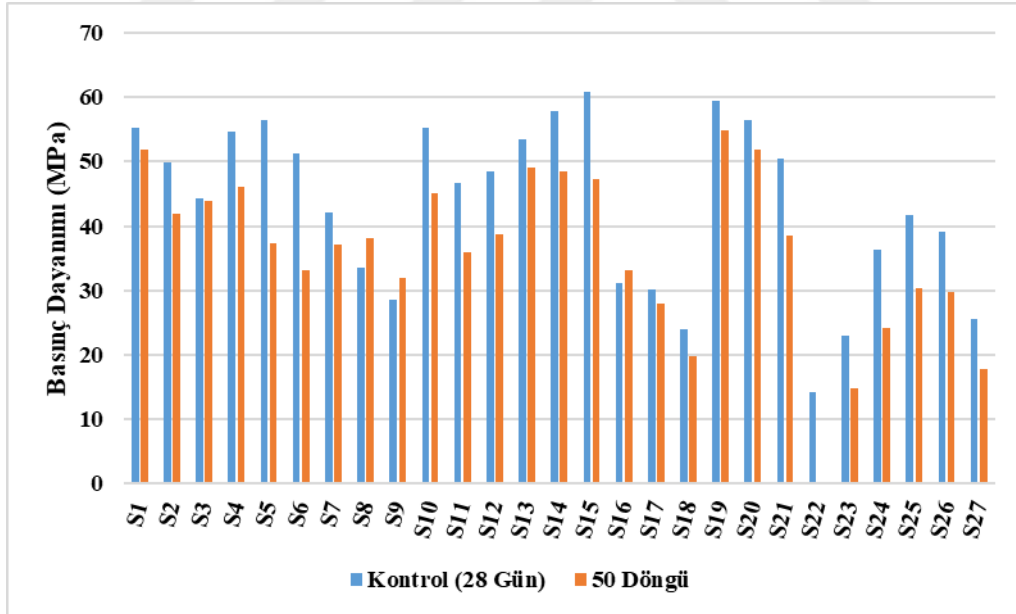
Donma çözülme deneyi kapsamında Taguchi metoduna göre hazırlanan 27 adet numune üzerinde deney ASTM C666 (2015) standardına uygun şekilde yapılmıştır. Numuneler 28 gün boyunca $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$ ile $+4\pm 2^{\circ}\text{C}$ arasında donma-çözülme çevrimlerine tabi tutulmuşlardır. Bir çevrim süresi 2 ile 5 saat arasında olacak şekilde donma çözülme çevrimleri tamamlanmıştır. Numunelerde 50 çevrim sonrası bozulmalar yaşandığı için 50 çevrim sonundan deney sonlandırılmıştır. 50 çevrim öncesi ve sonrası numunelerde eğilme dayanımı, basınç dayanım ve dinamik elastisite modülü gibi bazı fiziksel ve mekanik analizler uygulanmıştır.

28 günlük numunelerin kür edildikten sonra donma çözülme deneyine tabi tutulmasıyla elde edilen numuneler üzerinde en fazla eğilme dayanımı değişimi %35.01 ile S20 numunesinde geliştiği görülmüştür. En az eğilme dayanımı değişimi yaşanan hatta donma çözülme sonrası en fazla eğilme dayanım artışı yaşanan numune S26 numunesi olmuştur (Tablo 30). Ayrıca S1, S2, S7, S8, S11, S12, S21 ve S27 numunelerinden veri alınamayacak derecede bozulmalar yaşanmıştır ve ölçüm yapılamamıştır (Şekil 78).



Şekil 78. Donma çözülme eğilme dayanım grafiği

Basınç dayanım sonuçları incelendiğinde en fazla basınç dayanımındaki azalma %35.79 ile S23 numunesinde elde edilmiştir. Dayanım azalmasının en az olduğu numune ise %0.81 ile S3 numunesinden elde edilmiştir. S22 numunesinde ise yine bozulmalar yaşanmasından dolayı veri alınamamış ve sonuç elde edilememiştir (Şekil 79).

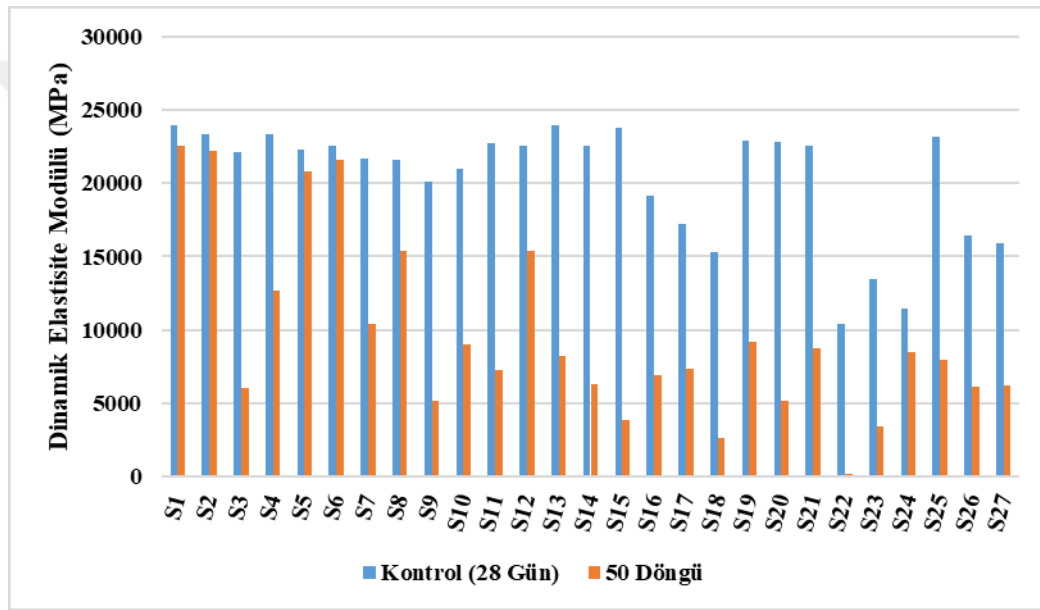


Şekil 79. Donma çözülme basınç dayanım grafiği

Tablo 30. Donma çözülme öncesi ve sonrası eğilme ve basınç dayanım değişimleri

NUMUNE KODU	Eğilme Dayanımı Öncesi (MPa)	Eğilme Dayanımı Sonrası (MPa)	Eğilme Dayanımı Değişimleri (%)	Basınç Dayanımı Öncesi (MPa)	Basınç Dayanımı Sonrası (MPa)	Basınç Dayanımı Değişimleri (%)
S1	10.24	0	Ölçülemedi	55.22	51.82	-6.15
S2	8.63	0	Ölçülemedi	49.8	41.84	-15.98
S3	8.52	6.47	-24.06	44.24	43.88	-0.81
S4	8.34	6.52	-21.82	54.73	46.04	-15.87
S5	7.96	6.47	-18.71	56.43	37.41	-33.70
S6	8.34	6.59	-20.98	51.34	33.12	-35.48
S7	6.47	0	Ölçülemedi	42.02	37.2	-11.47
S8	6.44	0	Ölçülemedi	33.55	38.18	13.80
S9	6.42	6.47	0.15	28.62	32.02	11.87
S10	8.14	6.52	-19.90	55.33	45.09	-18.50
S11	9.23	0	Ölçülemedi	46.66	35.83	-23.21
S12	9.21	0	Ölçülemedi	48.46	38.74	-20.05
S13	8.2	7.01	-14.51	53.5	49.08	-8.26
S14	8.84	6.47	-26.80	57.92	48.52	-16.22
S15	8.66	6.47	-25.28	60.79	47.27	-22.24
S16	6.84	6.47	-5.40	31.05	33.06	6.47
S17	6.45	6.52	-0.31	30.12	27.91	-7.33
S18	6.44	6.47	-0.46	24.02	19.71	-17.94
S19	9.41	6.52	-30.71	59.36	54.88	-7.54
S20	10.28	6.68	-35.01	56.46	51.82	-8.21
S21	8.99	0	Ölçülemedi	50.4	38.42	-23.76
S22	6.45	6.42	-0.46	14.17	0	Ölçülemedi
S23	6.47	6.52	0.77	23.05	14.8	-35.79
S24	7.67	6.47	-15.64	36.32	24.15	-33.50
S25	6.55	6.59	0.61	41.69	30.42	-27.03
S26	6.45	6.59	2.17	39.13	29.78	-23.89
S27	6.45	0	Ölçülemedi	25.61	17.87	-30.22

Dinamik elastisite modülü donma çözülme deneyi öncesi ve sonrası değişimler Şekil 80'de gösterilmiştir. Donma çözülme sonrası bütün numunelerde donma çözülme öncesi duruma göre azalmalar görülmektedir. Bu azalmaların geopolimerin içyapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dinamik elastisite modülü sonuçlarına göre en fazla azalma yaşanan numuneler S22 numunesinde %98.08, S15 numunesinde %83.88 ve S18 numunesinde %82.58 olarak ölçülmüştür. Donma çözülme sonrası en az dinamik elastisite modülü azalması yaşanan numuneler S6 numunesinde %4.03 olarak elde edilmiştir (Tablo 31). Bazı numunelerde ise donma çözülme sonrası şekilde bozulmalar yaşandığı görülmüştür (Şekil 81 ve Şekil 82).



Şekil 80. Donma çözülme Dinamik Elastisite Modülü grafiği

Tablo 31. Donma çözülme öncesi ve sonrası kütle ve dinamik elastisite modülü değişimleri

NUMUNE KODU	Dinamik Elastisite Modülü Öncesi (MPa)	Dinamik Elastisite Modülü Sonrası (MPa)	Dinamik Elastisite Modülü Değişimleri (%)
S1	23910	22510	-5.85
S2	23340	22220	-4.79
S3	22150	6050	-72.68
S4	23340	12670	-45.71

Tablo 31. (Devamı)

NUMUNE KODU	Dinamik Elastisite Modülü Öncesi (MPa)	Dinamik Elastisite Modülü Sonrası (MPa)	Dinamik Elastisite Modülü Değişimleri (%)
S5	22260	20770	-6.69
S6	22530	21620	-4.03
S7	21700	10430	-51.93
S8	21610	15400	-28.73
S9	20140	5190	-74.23
S10	20940	9060	-56.73
S11	22710	7300	-67.85
S12	22530	15400	-31.64
S13	23910	8230	-65.57
S14	22510	6290	-72.05
S15	23770	3830	-83.88
S16	19140	6910	-63.89
S17	17230	7400	-57.05
S18	15330	2670	-82.58
S19	22910	9230	-59.71
S20	22840	5210	-77.18
S21	22510	8760	-61.08
S22	10440	200	-98.08
S23	13490	3390	-74.87
S24	11460	8480	-26.00
S25	23190	8000	-65.50
S26	16440	6120	-62.77
S27	15880	6230	-60.76



Şekil 81. Donma çözülme sonrası numunelere ait görüntü



Şekil 82. Donma çözülme sonrası ölçülemeyen numunelere ait görüntü

3.10. Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları

Geopolimer harç numunelerin 28 günlük kür süresi sonunda birincil kılcallık katsayısı ve ikincil kılcallık katsayısı tayini ASTM C1585-13 standardında belirtilen esaslar dikkate alınarak yapılmıştır. Birincil kılcallık katsayısı tayini için 1, 5, 10, 20, 30. dakikada ve 1, 2, 3, 4, 5, 6. saatteki okumaları yapılmıştır. İkincil kılcallık katsayısı tayini için ise 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. gün sonundaki kütle okumaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 32'de gösterilmiştir.

I= Absorbe edilen su miktarı (mm)

Tablo 32. Geopolimer harç numunelere ait kılcal su emme değerleri

		1.	5.	10.	20.	30.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	SÜRE	dk	dk	dk	dk	dk	saat	saat	saat	saat	saat	saat
S1	Su emme (g)	6.36	13.16	17.21	21.35	24.58	25.23	25.51	25.75	25.77	26.78	26.84
	I(mm)	0.99	2.05	2.68	3.33	3.84	3.94	3.98	4.02	4.02	4.18	4.19

Tablo 32. (Devamı)

		1.	5.	10.	20.	30.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	SÜRE	dk	dk	dk	dk	dk	saat	saat	saat	saat	saat	saat
S2	Su emme (g)	4.79	9.08	12.19	15.61	18.55	21.89	22.82	23.08	23.26	24.26	24.43
	I(mm)	0.74	1.41	1.90	2.43	2.89	3.42	3.56	3.60	3.63	3.79	3.81
S3	Su emme (g)	4.98	10.12	13.2	16.61	19.67	23.07	24.45	25.02	25.49	26.36	26.77
	I(mm)	0.77	1.58	2.06	2.59	3.07	3.60	3.82	3.90	3.98	4.11	4.18
S4	Su emme (g)	5.4	10.93	14.61	17	18.49	20.38	21.75	22.26	22.28	22.32	22.42
	I(mm)	0.84	1.70	2.28	2.65	2.88	3.18	3.39	3.47	3.48	3.48	3.50
S5	Su emme (g)	5.29	10.27	13.75	16.53	19.56	22.2	23.26	24.22	24.26	25.14	25.56
	I(mm)	0.82	1.60	2.14	2.58	3.05	3.46	3.63	3.78	3.79	3.92	3.99
S6	Su emme (g)	7.01	13.13	17.02	20.05	21.56	24.09	24.67	25.29	25.47	25.8	26.07
	I(mm)	1.09	2.05	2.65	3.13	3.36	3.76	3.85	3.95	3.97	4.03	4.07
S7	Su emme (g)	7	14.09	17.76	20.9	23.42	26.13	26.76	27.4	27.54	28.35	28.38
	I(mm)	1.09	2.20	2.77	3.26	3.65	4.08	4.18	4.28	4.30	4.42	4.43
S8	Su emme (g)	8.22	16.56	21.54	24.92	27.26	28.15	28.68	28.82	29.38	31.48	31.87
	I(mm)	1.28	2.58	3.36	3.89	4.25	4.39	4.48	4.50	4.59	4.91	4.97
S9	Su emme (g)	11.1 9	18.67	23.32	26.92	29.31	30.32	30.73	30.98	31.36	32.44	32.58
	I(mm)	1.74	2.91	3.64	4.20	4.57	4.73	4.80	4.84	4.9	5.06	5.09
S10	Su emme (g)	8.38	15.21	19.33	23.17	25.75	27.72	28.47	28.73	28.8	29.04	30.21
	I(mm)	1.30	2.37	3.02	3.62	4.02	4.33	4.45	4.48	4.50	4.53	4.72

Tablo 32. (Devamı)

		1.	5.	10.	20.	30.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	SÜRE	dk	dk	dk	dk	dk	saat	saat	saat	saat	saat	saat
S11	Su emme (g)	6.07	11.34	14.03	17.01	19.77	22.77	23.97	25.31	25.63	26.88	27.23
	I(mm)	0.94	1.77	2.19	2.65	3.08	3.55	3.74	3.95	4.00	4.2	4.25
S12	Su emme (g)	11.4 6	8.39	22.04	24.21	26.3	28.16	29.32	30.02	33.33	33.53	33.64
	I(mm)	1.79	1.31	3.44	3.78	4.10	4.40	4.58	4.69	5.20	5.23	5.25
S13	Su emme (g)	6.83	12.18	16.19	19.87	22.2	23.18	23.45	23.48	23.5	23.75	23.79
	I(mm)	1.06	1.90	2.52	3.10	3.46	3.62	3.66	3.66	3.67	3.71	3.71
S14	Su emme (g)	6.44	11.2	14.58	17.49	19.07	21.14	21.56	21.61	21.62	22.04	22.13
	I(mm)	1.00	1.75	2.27	2.73	2.97	3.30	3.36	3.37	3.37	3.44	3.45
S15	Su emme (g)	8.4	9.02	12.4	15.31	16.89	18.96	19.38	19.43	19.44	19.86	19.95
	I(mm)	1.31	1.40	1.93	2.39	2.63	2.96	3.02	3.03	3.03	3.10	3.11
S16	Su emme (g)	8.4	17	22.64	27.67	30.63	31.26	31.67	31.73	31.76	32.42	32.44
	I(mm)	1.31	2.65	3.53	4.32	4.78	4.88	4.94	4.95	4.96	5.06	5.06
S17	Su emme (g)	6.04	16.45	24.36	31.66	34.37	35.02	35.11	35.64	36.53	37.24	37.38
	I(mm)	0.94	2.57	3.80	4.94	5.37	5.47	5.48	5.56	5.70	5.81	5.84
S18	Su emme (g)	8.99	19.29	27.22	33.44	34.44	34.72	35.19	35.22	35.24	35.35	35.36
	I(mm)	1.40	3.01	4.25	5.20	5.38	5.42	5.49	5.50	5.50	5.52	5.52
S19	Su emme (g)	5.21	10.3	13.5	16.52	18.88	21.21	21.71	22.29	22.5	23.37	23.46
	I(mm)	0.81	1.60	2.10	2.58	2.95	3.31	3.39	3.48	3.51	3.65	3.66

Tablo 32. (Devamı)

		1.	5.	10.	20.	30.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	SÜRE	dk	dk	dk	dk	dk	saat	saat	saat	saat	saat	saat
S20	Su emme (g)	4.77	9.13	11.07	14.8	17.16	19.08	19.43	19.75	19.77	20.03	20.63
	I(mm)	0.74	1.42	1.72	2.2	2.68	2.98	3.03	3.08	3.08	3.12	3.22
S21	Su emme (g)	4.34	9.2	11.61	13.72	15.94	18.87	19.28	19.74	20	20.49	21.43
	I(mm)	0.67	1.43	1.81	2.14	2.49	2.94	3.01	3.08	3.12	3.20	3.34
S22	Su emme (g)	8.17	14.79	18.77	22.91	26.09	29.68	30.61	31.31	31.6	32.88	33.12
	I(mm)	1.27	2.31	2.93	3.57	4.07	4.63	4.78	4.89	4.93	5.13	5.17
S23	Su emme (g)	5.75	13.32	18.34	23.7	27.52	30.51	31.15	31.67	31.84	32.28	32.64
	I(mm)	0.89	2.08	2.86	3.70	4.30	4.76	4.86	4.94	4.97	5.04	5.10
S24	Su emme (g)	7.09	15.71	21.69	27.38	31.26	33.49	33.74	33.78	33.97	34.74	34.77
	I(mm)	1.10	2.45	3.38	4.27	4.88	5.23	5.27	5.27	5.30	5.42	5.43
S25	Su emme (g)	7.89	15.98	23.23	28.37	30.49	30.53	31.02	31.22	31.92	32.66	32.8
	I(mm)	1.23	2.49	3.62	4.43	4.76	4.77	4.84	4.87	4.98	5.10	5.12
S26	Su emme (g)	8.55	17.4	23.95	29.6	31.36	31.46	31.59	31.68	31.77	31.87	32.09
	I(mm)	1.33	2.71	3.74	4.62	4.90	4.91	4.93	4.95	4.96	4.97	5.01
S27	Su emme (g)	9.92	19.43	26.3	30.51	30.69	30.8	30.93	31.36	31.41	31.52	31.67
	I(mm)	1.55	3.03	4.10	4.76	4.79	4.81	4.83	4.90	4.90	4.92	4.94

Tablo 32. (Devamı)

SÜRE		1.gün	2.gün	3.gün	4.gün	5.gün	6.gün	7.gün	8.gün
S1	Su emme (g)	26.89	26.93	27.21	27.42	27.52	27.57	28.28	28.34
	I(mm)	4.20	4.20	4.25	4.28	4.30	4.30	4.41	4.42
S2	Su emme (g)	24.5	24.73	25.05	25.39	25.6	25.95	26.06	26.16
	I(mm)	3.82	3.86	3.91	3.96	4.00	4.05	4.07	4.08
S3	Su emme (g)	26.84	26.85	26.89	26.9	26.96	27.08	27.35	27.36
	I(mm)	4.19	4.19	4.20	4.20	4.21	4.23	4.27	4.27
S4	Su emme (g)	22.59	22.86	23.21	24.11	24.31	24.34	24.4	24.47
	I(mm)	3.52	3.57	3.62	3.76	3.79	3.80	3.81	3.82
S5	Su emme (g)	25.64	26.42	26.53	26.54	26.64	26.66	26.67	26.67
	I(mm)	4.00	4.12	4.14	4.14	4.16	4.16	4.16	4.16
S6	Su emme (g)	26.11	26.69	27.31	27.35	27.43	27.45	27.46	27.47
	I(mm)	4.07	4.17	4.26	4.27	4.28	4.28	4.29	4.29
S7	Su emme (g)	28.52	28.53	28.54	28.59	28.62	28.64	28.65	28.65
	I(mm)	4.45	4.45	4.45	4.46	4.47	4.47	4.47	4.47
S8	Su emme (g)	32.18	32.2	32.38	32.7	33.0	33.11	33.18	33.2
	I(mm)	5.02	5.03	5.05	5.10	5.15	5.17	5.18	5.18
S9	Su emme (g)	33.38	33.39	33.4	33.41	33.41	33.42	33.42	33.42
	I(mm)	5.21	5.21	5.21	5.22	5.22	5.22	5.22	5.22
S10	Su emme (g)	30.66	30.76	30.77	30.77	30.79	30.8	30.81	30.81
	I(mm)	4.79	4.80	4.80	4.80	4.81	4.81	4.81	4.81

Tablo 32. (Devamı)

	SÜRE	1.gün	2.gün	3.gün	4.gün	5.gün	6.gün	7.gün	8.gün
S11	Su emme (g)	28.07	28.1	28.11	28.3	28.42	28.84	28.85	28.86
	I(mm)	4.38	4.39	4.39	4.42	4.44	4.50	4.50	4.50
S12	Su emme (g)	33.73	34.22	34.68	34.73	34.82	34.91	34.93	35.02
	I(mm)	5.27	5.34	5.41	5.42	5.44	5.45	5.45	5.47
S13	Su emme (g)	24.83	25.12	25.53	25.55	25.82	26.46	26.51	26.54
	I(mm)	3.87	3.92	3.98	3.99	4.03	4.13	4.14	4.14
S14	Su emme (g)	22.59	22.89	23.12	23.22	23.75	23.98	24.66	24.71
	I(mm)	3.52	3.57	3.61	3.62	3.71	3.74	3.85	3.86
S15	Su emme (g)	26.97	27.03	27.2	27.29	27.43	27.45	27.54	27.55
	I(mm)	4.21	4.22	4.25	4.26	4.28	4.28	4.30	4.30
S16	Su emme (g)	32.44	32.46	32.58	32.82	32.88	33.35	33.46	33.47
	I(mm)	5.06	5.07	5.09	5.12	5.13	5.21	5.22	5.22
S17	Su emme (g)	37.43	37.49	37.51	37.57	37.59	38.33	38.42	38.43
	I(mm)	5.84	5.85	5.86	5.87	5.87	5.98	6.00	6.00
S18	Su emme (g)	35.38	35.39	35.4	35.79	35.82	35.94	36.11	36.21
	I(mm)	5.52	5.52	5.53	5.59	5.59	5.61	5.64	5.65
S19	Su emme (g)	23.52	23.54	23.61	23.61	23.66	24.38	24.4	24.4
	I(mm)	3.67	3.67	3.68	3.68	3.69	3.80	3.81	3.81
S20	Su emme (g)	21.04	21.25	21.33	21.38	21.58	21.65	21.66	21.67
	I(mm)	3.28	3.32	3.33	3.34	3.37	3.38	3.39	3.39
S21	Su emme (g)	21.44	21.71	21.78	21.92	22.02	22.34	22.44	22.44
	I(mm)	3.35	3.39	3.40	3.42	3.44	3.49	3.50	3.50

Tablo 32. (Devamı)

SÜRE	1.gün	2.gün	3.gün	4.gün	5.gün	6.gün	7.gün	8.gün	
S22	Su emme (g)	33.59	33.65	33.67	33.69	33.71	33.74	33.74	33.76
	I(mm)	5.24	5.25	5.26	5.26	5.26	5.27	5.27	5.27
S23	Su emme (g)	32.66	33.06	33.16	33.19	33.22	33.26	33.28	33.28
	I(mm)	5.10	5.16	5.18	5.18	5.19	5.19	5.20	5.20
S24	Su emme (g)	34.83	34.98	35.3	35.33	35.36	35.38	35.4	35.4
	I(mm)	5.44	5.46	5.51	5.52	5.52	5.52	5.53	5.53
S25	Su emme (g)	33.17	33.22	33.43	33.70	33.94	34.03	34.15	34.16
	I(mm)	5.18	5.19	5.22	5.26	5.30	5.31	5.33	5.33
S26	Su emme (g)	32.86	32.97	33.67	33.74	34.75	34.79	34.82	34.94
	I(mm)	5.13	5.15	5.26	5.27	5.27	5.27	5.28	5.30
S27	Su emme (g)	32.02	32.62	32.69	32.86	32.9	32.91	32.92	32.92
	I(mm)	5.00	5.09	5.10	5.13	5.14	5.14	5.14	5.14

Geopolimer harç numunelerden elde edilen kılcal su emme katsayısı tayini sonuçları Tablo 33'te verilmiştir. 28 günlük numunelerden elde edilen Taguchi metodu kullanılarak üretilen numunelere birincil kılcallık katsayısı tayini için 1, 5, 10, 20, 30. dakikada ve 1, 2, 3, 4, 5, 6. saatte, ikincil kılcallık katsayısı tayini için de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8. günde kütle okumaları yapılmıştır. Ardından hesaplamalar yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Birincil kılcal su emme katsayısı tayini sonucu en düşük su emme katsayısı 0,0176 değeri ile S14 ve S20 numunelerinden elde edilmiştir. Birinci su emme katsayısı en yüksek numune ise 0.0309 değeri S17 numunesinden elde edilmiştir. İkincil su emme katsayısı tayini sonucu en düşük su emme katsayısı S7 ve S22 numunesinden elde edilmiştir. İkincil su emme katsayısı en fazla olan numune ise 0,0006 değeri ile S4 ve S24 numunesinden elde edilmiştir (Tablo 33).

Tablo 33. Geopolimer harç numunelere ait kılcal su emme katsayısı tayini(mm/s⁻²)

NUMUNE KODU	Birincil Kılcal Su Emme Katsayısı	İkincil Kılcal Su Emme Katsayısı
S1	0.0215	0.0004
S2	0.0222	0.0005
S3	0.0244	0.0002
S4	0.0187	0.0006
S5	0.0225	0.0002
S6	0.0209	0.0004
S7	0.0234	0.00005
S8	0.0242	0.0004
S9	0.0236	0.00001
S10	0.0239	0.00004
S11	0.0239	0.0003
S12	0.0258	0.0003
S13	0.0186	0.0005
S14	0.0176	0.0006
S15	0.0202	0.0002
S16	0.0251	0.0004
S17	0.0309	0.0003
S18	0.0264	0.0003
S19	0.0200	0.0003
S20	0.0176	0.0002
S21	0.0183	0.0003
S22	0.0281	0.00005
S23	0.0287	0.0002
S24	0.0291	0.0002

Tablo 33. (Devamı)

NUMUNE KODU	Birincil Kılcal Su Emme Katsayısı	İkincil Kılcal Su Emme Katsayısı
S25	0.0254	0.0003
S26	0.0239	0.0003
S27	0.0218	0.0006

28 gün kür edildikten sonra kılcal su emme deneyi uygulanan numunelerde en fazla eğilme dayanımındaki azalma %37.66 ile S20 numunesinde olmuştur. Eğilme dayanımındaki azalma en az %0.15 ile S27 numunesinde olmuştur. Ayrıca geopolimer numunelerde basınç dayanımındaki azalma en fazla %22.92 ile S24 numunesi ve %22.16 ile S16 numunesinden elde edilmiştir. Basınç dayanımındaki azalma en az %0.45 ile S10 numunesinde olmuştur (Tablo 34). Betonların kılcallık özelliği betonun dayanıklılığı açısından önemlidir ve betonun boşluk yapısına bağlıdır (Karahan, 2006).

Tablo 34. Kılcal su emme dayanım değişimleri

Numune Kodu	Eğilme Dayanımı Öncesi (MPa)	Eğilme Dayanımı Sonrası (MPa)	Eğilme Dayanımı Değişimleri (%)	Basınç Dayanımı Öncesi (MPa)	Basınç Dayanımı Sonrası (MPa)	Basınç Dayanımı Değişimleri (%)
S1	8.32	6.84	-17.78	48.75	39.8	-18.35
S2	8.54	6.75	-20.96	52.49	44.79	-14.66
S3	9.2	6.8	-26.08	55.51	45.76	-17.56
S4	8.42	6.68	-20.66	61.67	52.6	-14.7
S5	7.86	6.68	-15.01	53.37	53.02	-0.65
S6	6.61	6.47	-2.11	56.19	46.78	-16.74
S7	6.47	6.45	-2.42	51.17	47.57	-7.03
S8	6.47	6.45	-0.3	45.62	38.36	-15.91
S9	6.47	6.45	-0.3	38.43	32.92	-14.33
S10	7.71	6.59	-14.52	41.46	41.27	-0.45
S11	7.53	6.59	-12.48	50.99	43.52	-14.64
S12	8.53	6.59	-22.74	39.91	31.13	-21.99

Tablo 34. (Devamı)

Numune Kodu	Eğilme Dayanımı Öncesi (MPa)	Eğilme Dayanımı Sonrası (MPa)	Eğilme Dayanımı Değişimleri (%)	Basınç Dayanımı Öncesi (MPa)	Basınç Dayanımı Sonrası (MPa)	Basınç Dayanımı Değişimleri (%)
S13	6.83	6.59	-3.51	55.83	52.13	-6.62
S14	8.77	6.63	-24.4	58.73	55.02	-6.31
S15	8.07	6.56	-18.71	53.58	44.66	-16.64
S16	6.42	6.4	-0.31	42.14	32.8	-22.16
S17	6.42	6.4	-0.31	31.02	27.79	-10.41
S18	6.42	6.4	-0.31	33.21	29.07	-12.46
S19	7.61	6.52	-14.32	58.95	54.68	-7.24
S20	10.46	6.52	-37.66	65.74	55.16	-16.09
S21	9.86	6.52	-33.87	55.33	52.99	-4.22
S22	6.74	6.52	-3.26	39.34	34.89	-11.31
S23	6.98	6.63	-5.01	44.19	36.9	-16.49
S24	7.44	6.52	-12.36	41.4	31.91	-22.92
S25	6.94	6.63	-4.46	44.72	39.38	-11.94
S26	6.5	6.47	-0.46	41.25	38.37	-6.98
S27	6.48	6.47	-0.15	40.52	34.18	-15.64

3.11. Sülfatlı Ortama Maruz Harç Sonuçları

28 gün kür edilen geopolimer harçlar %5 oranında sodyum sülfat (Na_2SO_4), çözeltilerine bırakılmıştır. 6 ay boyunca sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler her ay çözelti değiştirilerek yenilenmiştir. 28 günlük numunelerle sodyum sülfat çözeltisi öncesi ve sonrası basınç dayanımı, eğilme dayanımı, birim kütle ve dinamik elastisite modülü sonuçları elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sodyum sülfat deneyi sonrası numunelere ait görüntü Şekil 83'te verilmiştir.

28 gün kür edilen numunelerde sülfat çözeltisi deneyi sonunda eğilme dayanımı değişimleri Tablo 35'te belirlenmiştir. Sodyum sülfat çözeltisi sonucu eğilme dayanımı değişimi %0.3 ile %28.83 arasında değişmektedir. Bu verilere göre en fazla eğilme dayanımındaki azalma %28.83 ile S1 numunesi, %28.78 ile S2 numunesi ve üçüncü olarak %26.36 ile S13 numunesinde görülmüştür. Sodyum sülfat çözeltisi deneyi sonrası 180 günlük sodyum sülfat çözeltisinde bekleyen numunelerin eğilme

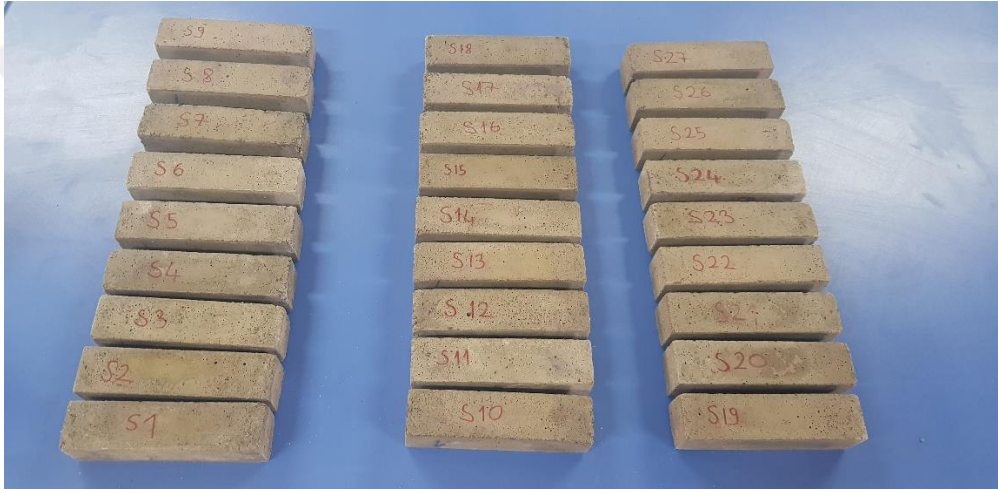
dayanımlarında ciddi azalmalar görülmüştür. 6 aya kadar sodyum sülfat çözeltisinde bekleyen numunelerde gözle görülür şekil değişimlerine rastlanmamıştır. Ayrıca numunelerin yüzeylerinde dökülme, makro çatlaklar ya da yüzey erozyonu gibi yapısal bir değişim gözlemlenmemiştir (Tammam, 2021). Ayrıca, yüksek CaO içeriğine sahip yüksek fırın cürufunun sülfat saldırılarından daha fazla etkilendiğine dikkat çekmiştir (Pehlivan, 2023).

Tablo 35. Sodyum sülfat çözeltisi öncesi ve sonrası eğilme ve basınç dayanım değişimleri

Numune Kodu	Eğilme Dayanımı Öncesi (MPa)	Eğilme Dayanımı Sonrası (MPa)	Eğilme Dayanımı Değişimleri (%)	Basınç Dayanımı Öncesi (MPa)	Basınç Dayanımı Sonrası (MPa)	Basınç Dayanımı Değişimleri (%)
S1	9.26	6.59	-28.83	49.37	16.94	-65.68
S2	9.31	6.63	-28.78	52.5	30.73	-41.46
S3	8.88	6.75	-23.98	48.57	30.55	-37.1
S4	9.13	6.59	-27.82	55.18	24.23	-56.08
S5	8.06	6.63	-17.74	55.67	31.65	-43.14
S6	8.59	6.59	-23.28	51.96	31.53	-39.31
S7	6.44	6.40	-0.62	44.37	17.63	-60.26
S8	6.47	6.42	-0.77	41.54	15.98	-61.53
S9	6.47	6.40	-1.08	34.52	22.55	-34.67
S10	8.29	6.59	-20.5	46.97	21.63	-53.94
S11	8.59	6.59	-23.28	44.67	19.49	-56.36
S12	8.09	6.63	-18.04	47.38	28.76	-39.29
S13	8.95	6.59	-26.36	48.2	20.88	-56.68
S14	6.48	6.45	-0.46	49.48	32.96	-33.38
S15	8.67	6.63	-23.52	53.84	34.55	-35.82
S16	6.47	6.45	-0.3	28.63	28.50	-0.45
S17	6.47	6.45	-0.3	26.28	14.00	-46.72
S18	6.42	6.40	-0.31	24.21	13.81	-47.45
S19	9.86	6.59	-33.16	49.83	34.64	-30.48
S20	8.63	6.63	-23.17	56.16	20.81	-62.94
S21	8.15	6.84	-16.07	46.55	28.34	-39.11

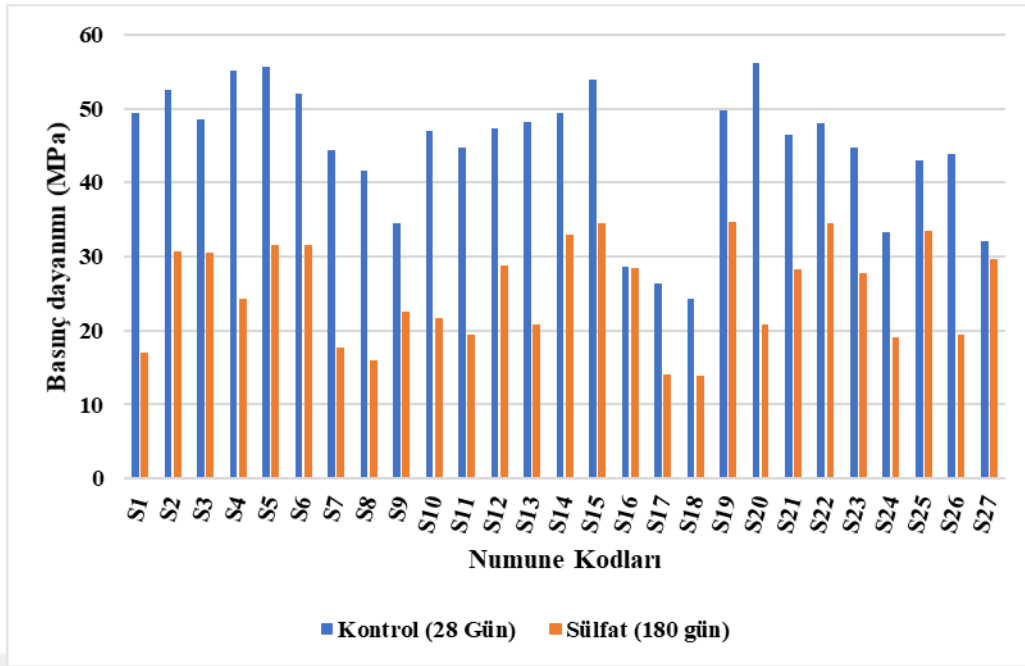
Tablo 35. (Devamı)

Numune Kodu	Eğilme Dayanımı Öncesi (MPa)	Eğilme Dayanımı Sonrası (MPa)	Eğilme Dayanımı Değişimleri (%)	Basınç Dayanımı Öncesi (MPa)	Basınç Dayanımı Sonrası (MPa)	Basınç Dayanımı Değişimleri (%)
S22	7.86	6.59	-16.15	48.1	34.48	-28.31
S23	6.80	6.59	-3.08	44.71	27.73	-37.97
S24	7.99	6.59	-17.52	33.3	19.13	-42.55
S25	6.88	6.63	-3.63	43.03	33.49	-22.17
S26	6.44	6.40	-0.62	43.83	19.40	-55.73
S27	6.42	6.40	-0.31	32.08	29.66	-7.54



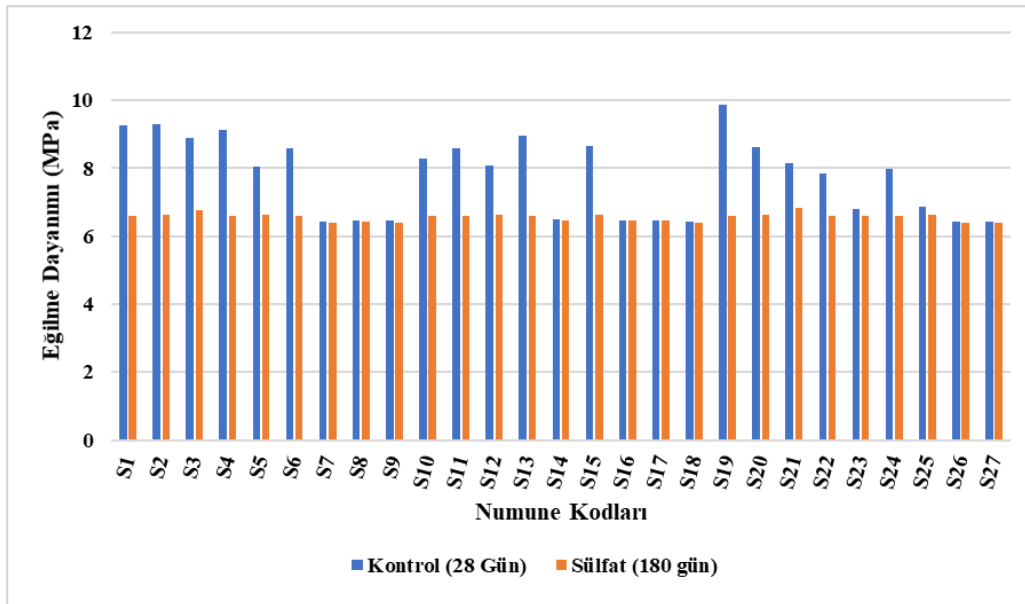
Şekil 83. Sodyum sülfat deneyi sonrası geopolimer numunelere ait görüntü

Geopolimer numunelere ait basınç dayanım değişimleri incelendiğinde ise %0.45 ile %65.68 arasında değişmektedir. Numunelerde basınç dayanımındaki azalmanın en az olduğu numune %0.45 ile S16 numunesidir (Tablo 35). Basınç dayanımındaki azalmanın en fazla olduğu numune ise %65.68 ile S1 numunesinde görülmüştür (Şekil 84).



Şekil 84. Sodyum sülfat deneyi sonrası geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı

28 günlük sodyum sülfat deneyi sonrası 180 günlük numunelere ait eğilme dayanımı sonuçları Şekil 85'te gösterilmektedir. Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde dayanımlarda genel olarak azalmalar görülmektedir. Basınç dayanımı sonuçlarındaki kadar büyük değişimler olmasa da genel olarak sodyum sülfat deneyi sonrasında azalmalar görülmüştür.



Şekil 85. Sodyum sülfat deneyi sonrası geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı

Sülfat etkisi altında, harç içindeki boşluklar başlangıçta sülfat tuzlarıyla dolarak numuneler üzerinde olumlu bir etki oluşturabilir. Bu dönemde hem mukavemet hem de dinamik elastisite modülü ve harçların kütlesi artar. Ancak zamanla, boşluklar sülfat tuzlarıyla doldukça çatlamlar oluşur ve mekanik özelliklerde kayıplar başlar. Bu süreçte dinamik elastisite modülü azalırken, kütleler de kesitlerdeki değişimler nedeniyle düşer. Dolayısıyla Tablo 36'da en yüksek rijitlik değişimi S7 ve S8 numunelerinde gözlenmiş olup, elastisite modülü sırasıyla 15609 MPa'dan 11129 MPa'a ve 13236 MPa'dan 9270 MPa'a düşerek yaklaşık %28.7 ve %29.96 oranında azalmıştır. En düşük rijitlik değişimi ise S10 numunesinde gerçekleşmiştir.

Dinamik elastisite modülü sonuçları değerlendirildiğinde yaşanan değişim oranları %0.18 ile %29.96 arasında değişmektedir (Tablo 36). Dinamik elastisite modülündeki azalmanın en az olduğu numune %0.18 ile S23 numunesinde olmuştur. Dinamik elastisite modülündeki azalmanın en fazla olduğu numune ise %29.96 ile S8 numunesinden elde edilmiştir. Dinamik elastisite modülü sonuçlarına göre sodyum sülfat deneyi sonrası numunelerde genel olarak kayıplar yaşanmıştır (Şekil 86).

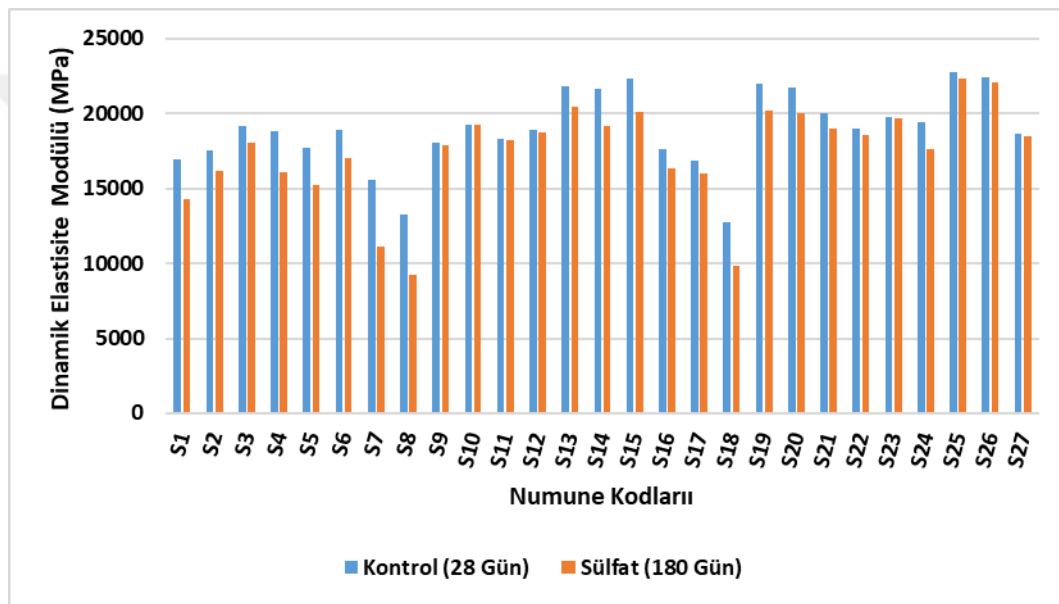
Tablo 36. Geopolimer numunelerde sodyum sülfat öncesi, sonrası ve dinamik elastisite modülü değişim değerleri

Numune	Kontrol (MPa)	Sülfatlı Ortam (MPa)	Dinamik Elastisite Modülü Değişimleri
S1	16908	14280	-15.54
S2	17530	16143	-7.91
S3	19154	18033	-5.85
S4	18853	16102	-14.59
S5	17739	15216	-14.22
S6	18887	17037	-9.79
S7	15609	11129	-28.7
S8	13236	9270	-29.96
S9	18060	17920	-0.77
S10	19297	19279	-0.09
S11	18322	18270	-0.28
S12	18912	18741	-0.9
S13	21848	20419	-6.54
S14	21627	19193	-11.25
S15	22356	20115	-10.02
S16	17664	16360	-7.38
S17	16881	15977	-5.35
S18	12753	9813	-23.05

Tablo 36. (Devamı)

Numune	Kontrol (MPa)	Sülfatlı Ortam (MPa)	Dinamik Elastisite Modülü Değişimleri
S19	22012	20182	-8.31
S20	21737	20061	-7.71
S21	20047	18962	-5.41
S22	18983	18540	-2.33
S23	19733	19697	-0.18
S24	19411	17586	-9.4
S25	22734	22347	-1.7
S26	22431	22067	-1.62
S27	18617	18486	-0.7

Dipnot: $E_d = V^2 \cdot p \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$



Şekil 86. Sodyum sülfat deneyi sonrası geopolimer harç numunelerinin Dinamik Elastisite Modül değişimi

28 günlük numuneler ve 180 günlük sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan numunelere ait kütle değişim sonuçları Tablo 37'de gösterilmektedir. Burada 2 aylık 4 aylık ve 6 aylık sonuçlar rapor edilmiş olup 28 günlük sonuçlar ile karşılaştırma yapılmıştır. Burada numuneler incelendiğinde, 2 aylık numunelere ait kütle değişiminin %1.07 ile %9.92 arasında olduğu görülmektedir. En fazla kütle değişimi yaşanan numune S27 numunesinde olmuştur. 4 aylık numunelere ait kütle değişimi incelendiğinde %1.59 ile %10.85 arasında olduğu tespit edilmiştir. 6 aylık numuneler incelendiğinde ise kütle

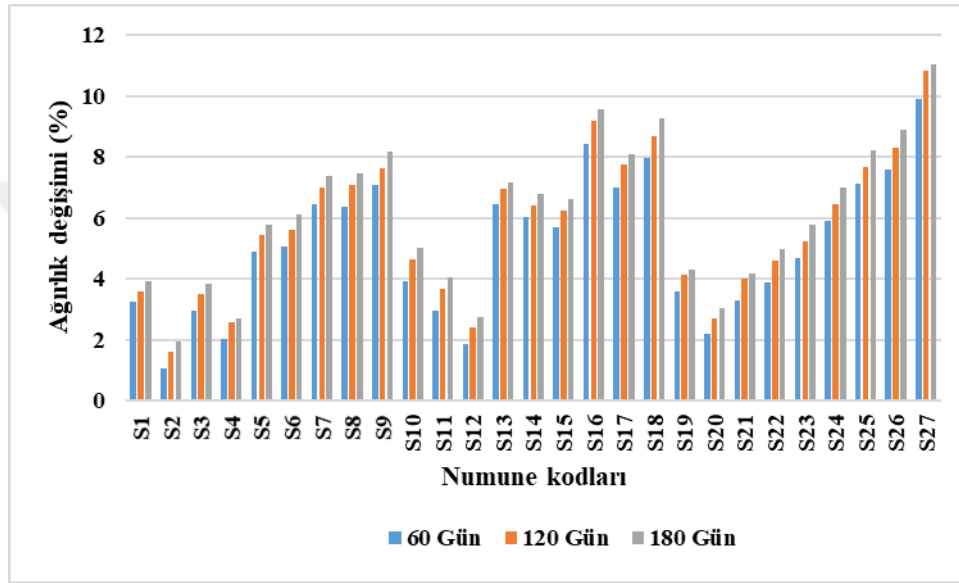
değişimleri %1.94 ile %10.85 arasında gerçekleşmiştir. Kütle değişiminin en fazla olduğu numune ise, S27 numunesi olarak belirlenmiştir (Şekil 87).

Tablo 37. Sodyum sülfat sonrası numunelerde kütle değişimleri (%)

Numune Kodu	2.ay (%)	4.ay (%)	6. ay (%)
S1	3.23	3.58	3.93
S2	1.07	1.59	1.94
S3	2.97	3.51	3.86
S4	2.01	2.59	2.72
S5	4.89	5.43	5.78
S6	5.05	5.59	6.13
S7	6.44	6.99	7.36
S8	6.37	7.1	7.46
S9	7.1	7.65	8.19
S10	3.94	4.65	5.01
S11	2.97	3.68	4.03
S12	1.88	2.41	2.76
S13	6.43	6.97	7.15
S14	6.05	6.41	6.77
S15	5.71	6.25	6.6
S16	8.45	9.19	9.55
S17	7	7.74	8.11
S18	7.95	8.7	9.26
S19	3.59	4.12	4.3
S20	2.18	2.71	3.06
S21	3.29	3.99	4.17
S22	3.9	4.6	4.96
S23	4.67	5.22	5.77

Tablo 37. (Devamı)

Numune Kodu	2.ay (%)	4.ay (%)	6. ay (%)
S24	5.89	6.44	6.99
S25	7.13	7.68	8.23
S26	7.58	8.32	8.88
S27	9.92	10.85	11.03



Şekil 87. Geopolimer numunelerde sodyum sülfat çözeltisi sonrası kütle değişimleri

Sodyum sülfat sonrası geopolimer numunelere ait kütle değişimlerini Tablo 38'de görülmektedir. Bunun sebebi yukarıda da ifade edildiği üzere sülfat etkisi altında, harç içindeki boşluklar başlangıçta sülfat tuzlarıyla dolarak numuneler üzerinde olumlu bir etki oluşturur. Bu dönemde hem mukavemet hem de dinamik elastisite modülü ve harçların kütlesi yükselir. Kütle değişimi en fazla olan S27 numunesi incelendiğinde kütlesi başlangıçta 536 g iken 6 ay sonunda 596 g olarak ölçülmüştür. Burada kütle artışı en fazla olan numune %10.85 oranı ile S27 numunesi olmuştur.

Tablo 38. Sodyum sülfat sonrası geopolimer numunelere ait kütle değişimleri

Numune kodu	Kütle değişimi (g)			
	Kontrol (28 gün)	2.ay	4.ay	6.ay
S1	571	590	592	594
S2	578	585	588	590
S3	562	579	582	584
S4	569	581	584	585
S5	561	589	592	594
S6	554	582	585	588
S7	546	582	585	587
S8	552	588	592	594
S9	549	588	591	594
S10	563	586	590	592
S11	563	580	584	586
S12	570	581	584	586
S13	555	591	594	595
S14	557	591	593	595
S15	560	592	595	597
S16	544	590	594	596
S17	539	577	581	583
S18	537	580	584	587
S19	557	577	580	581
S20	571	584	587	589
S21	569	588	592	593
S22	564	586	590	592
S23	550	576	579	582
S24	546	579	582	585
S25	543	582	585	588
S26	537	578	582	585
S27	536	590	595	596

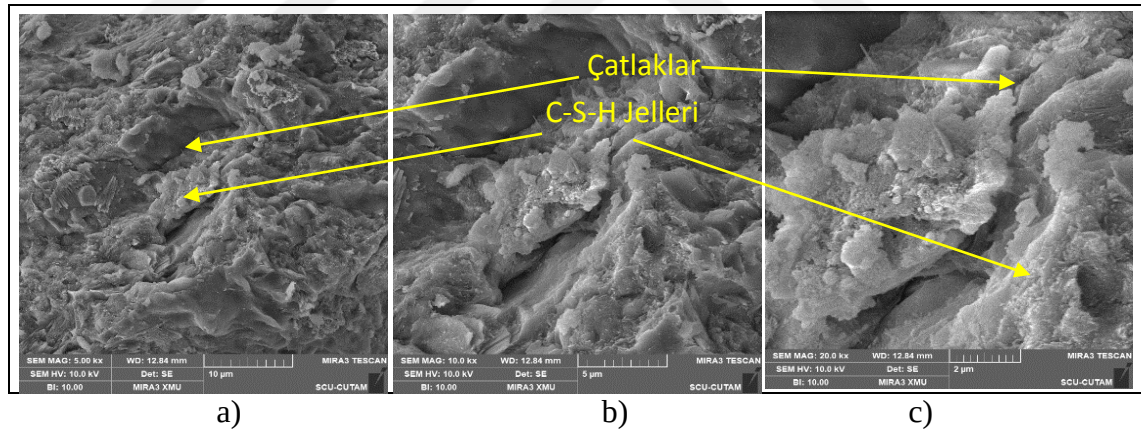
3.12. SEM Analizi

Geopolimer harçlarda mikroyapının incelenmesi amacıyla seçilen bazı numunelerin SEM görüntüleri incelenmiştir. İlk olarak, en yüksek basınç dayanımına sahip S20 numunesi üzerinde, zamana bağlı kür sıcaklığının mikroyapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 88, Şekil 89 ve Şekil 90 sırasıyla 28, 56 ve 90 günlük S20 numunesine ait farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntülerini yansıtmaktadır. Şekil 92 ise, en düşük basınç dayanımına sahip S18 numunesine ait farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntülerini göstermektedir. Böylelikle deneysel bulgular eşliğinde geopolimer harçlarda ortaya çıkan farklı sonuçların nedenleri mikroyapısal olarak irdelenmiştir. Bunun yanı sıra Taguchi optimizasyon sonuçlarına göre en etkili parametre kür

sıcaklığının olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle 75 °C kür sıcaklığında hazırlanan S20 numunesinin yanı sıra, 105 °C kür sıcaklığında üretilmiş S7 numunesinde farklı büyütmelerde SEM görüntüleri Şekil 94'te gösterilmiştir. Böylelikle aynı molariteye sahip fakat farklı sıcaklık etkilerinde üretilmiş geopolimer numuneler kıyaslanmıştır.

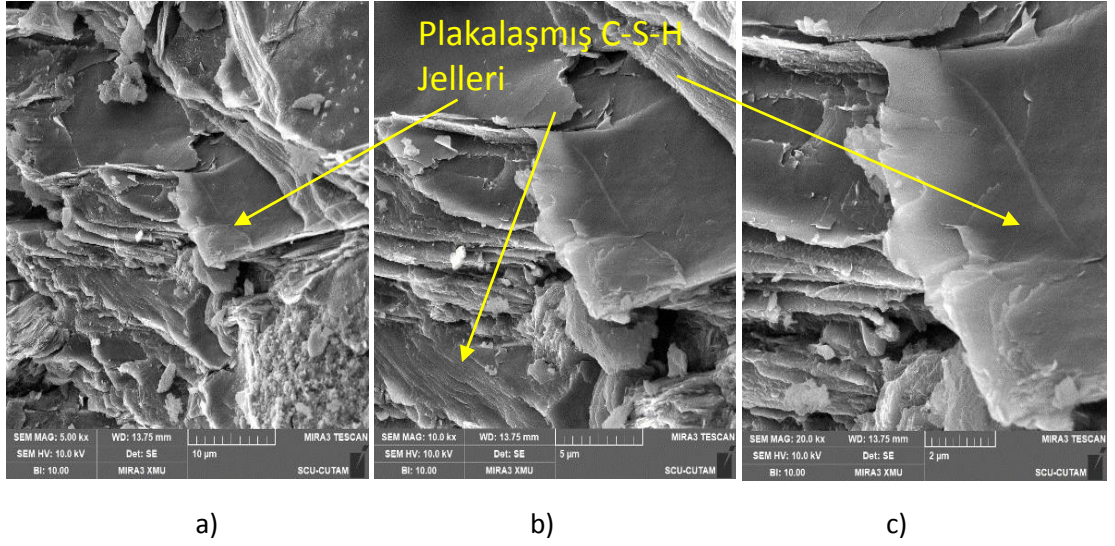
S20 numunesine ait 28, 56 ve 90 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde, zamana bağlı mikroyapı içerisinde homojen bir yapının oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 88-90). SEM analizleri ile gerçekleştirilen mikro yapı görüntülerinde, alkali aktivatör eşliğinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun hidrasyonu tarafından oluşan birçok geopolimer jelin yoğun bir mikroyapının ortaya çıkmasına neden olduğu belirtilmiştir (Hamed ve Demiröz 2024).

28 günlük geopolimer harçlarda S20 numunesine ait 3 farklı büyütmede SEM analizi (Şekil 88)'de görülmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde S20 numunesinde amorf benzeri düzensiz bir yapının oluştuğu, kristal fazların ise yani düzenli yapının belirsiz olduğunu düşünülmektedir. Bu düzensiz yapının oluşması geopolimerizasyon reaksiyonunun tam olarak tamamlanamadığını göstermektedir.



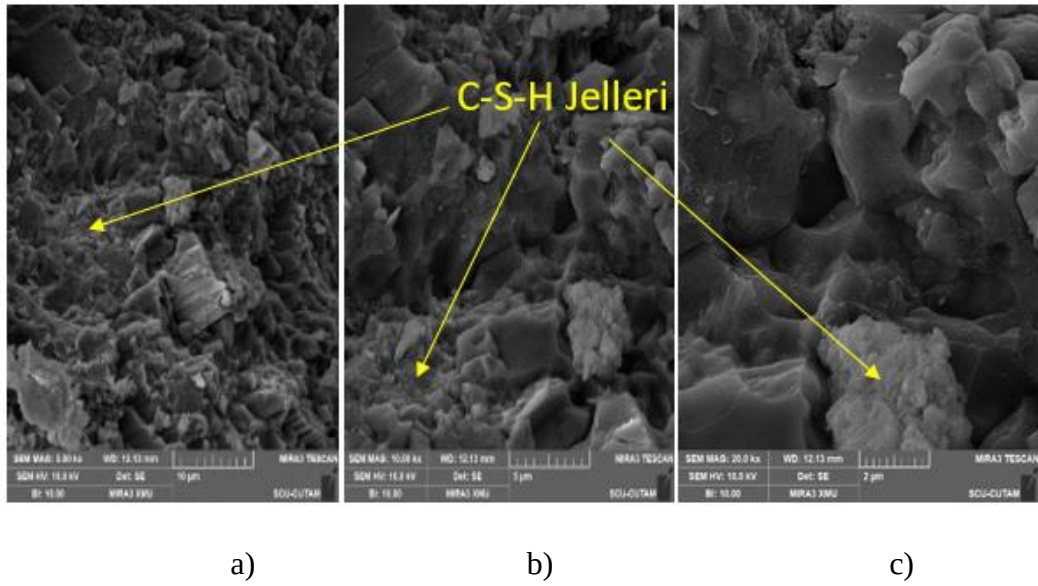
Şekil 88. S20 (28 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme SEM analizi görüntüsü

S20 numunesine ait 3 farklı büyütmede SEM analizleri Şekil 89'da görülmektedir. 56 günlük geopolimer harçlar ile elde edilen SEM görüntülerinde daha düzenli bir yapı oluşmuş ve plaka yapılar gözlemlenmiştir. Yapı içerisinde geopolimerleşme oluşmaya başlamış ve mikro yapı daha düzenli hale gelmiştir.

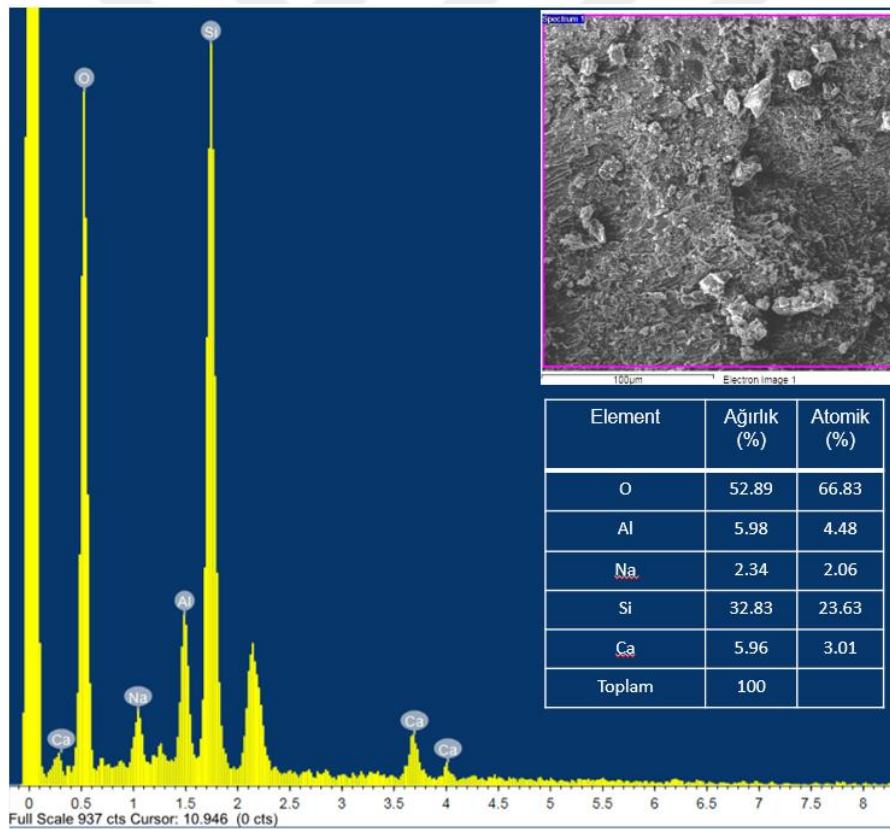


Şekil 89. S20 (56 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütmeyle ait SEM analizi görüntüsü

90 günlük S20 numunesine ait 3 farklı büyütmede SEM analizleri (Şekil 90)'da görülmektedir. Burada gözeneklilik azalmış ve kristalimsi yapılar artmıştır. Yapı içerisindeki düzensizlikler azalmaya başlamış ve yapı daha düzenli bir hale gelmiştir. Buna bağlı olarak C-A-S-H faz oluşumları gözlemlenmiştir. Ayrıca EDX analizinde belirlenen Ca ve Al elementlerinin varlığı C-A-S-H jel oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir (Şekil 91).

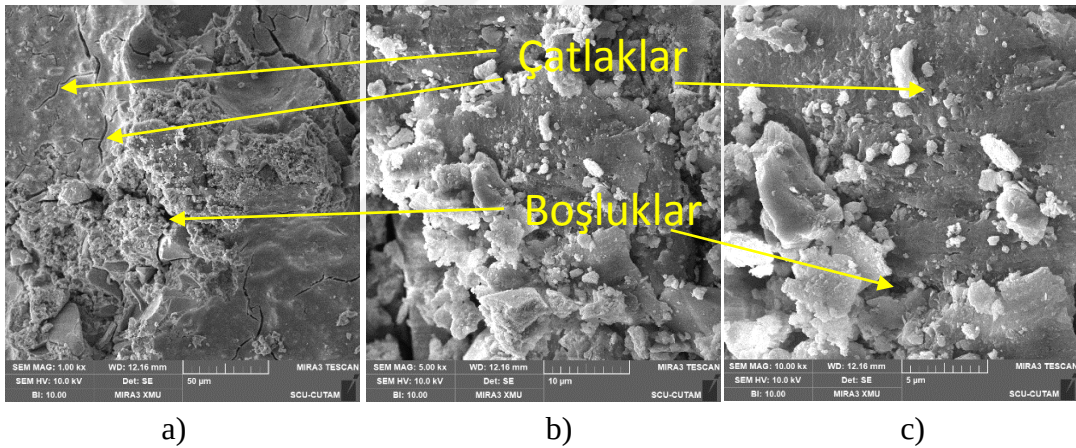


Şekil 90. S20 (90 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM analizi görüntüsü

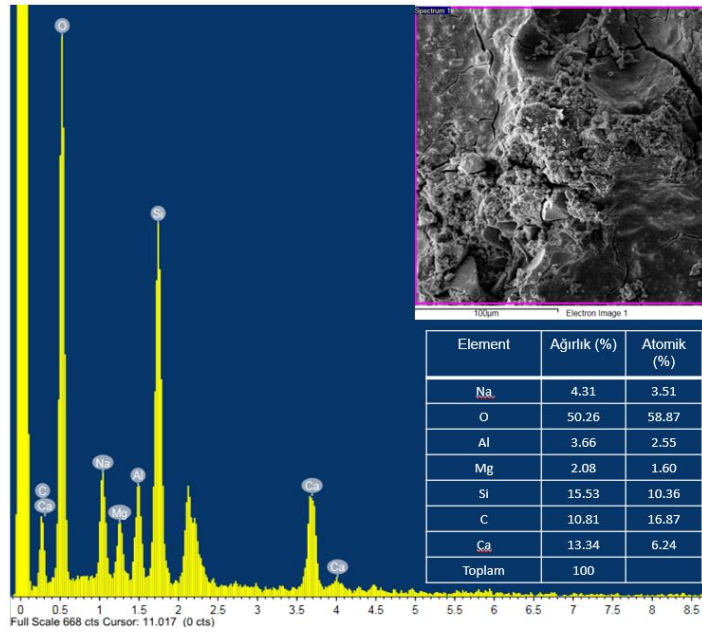


Şekil 91. S20 (90 günlük) numunesine ait EDX analizi

En düşük basınç dayanıma sahip S18 numunesi için reaksiyona girmemiş veya kısmi reaksiyona girmiş uçucu kül ve yüksek fırın cürufu taneleri görülmüştür (Şekil 92). Ayrıca yüzey üzerinde fazlar arasında farklı boyut ve genişliklerde büyüklüklerde çatlakların oluştuğu görülmüştür. S20 numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde ise, daha homojen bir yapının ve beraberinde jelleşme oluşumunun gerçekleştiği bir morfolojinin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca S20 numunesinde farklı kür süreleri içinde, yoğun C-A-S-H jellerinin oluştuğu ve bununda yüksek fırın cürufundaki CaO'ten kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 93). EDX analizlerinde Si/Al oranının S20 numunesi için 5.48, S18 numunesinde ise 4.24 olduğu tespit edilmiş olup, bu oranın C-A-S-H jel oluşumunu tetiklediği bilinmektedir (Chokkalingam vd., 2022). Burada, S20 numunesinde basınç dayanımının 65.74 MPa ile en yüksek değere ulaşmasında, yapı üzerinde görülen yüksek yoğunluklu C-A-S-H oluşumunun bir sonucu olduğu değerlendirilmektedir.

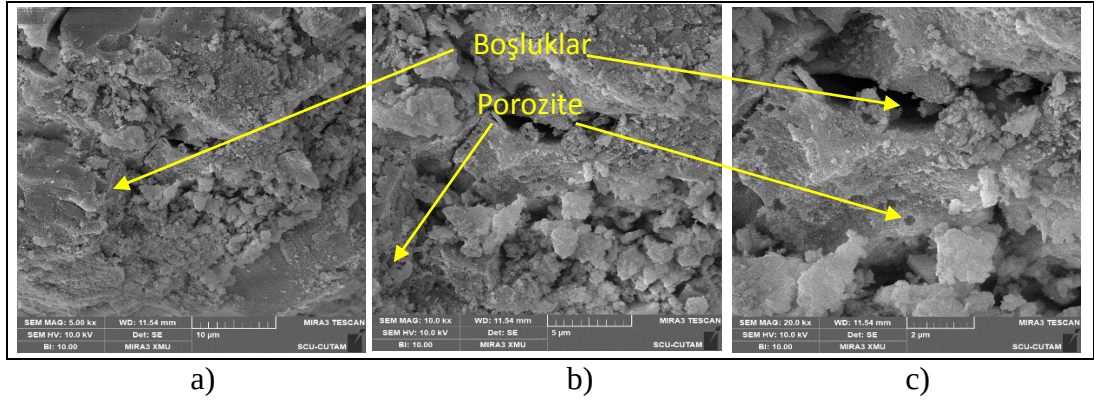


Şekil 92. S18 (90 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM analizi görüntüsü

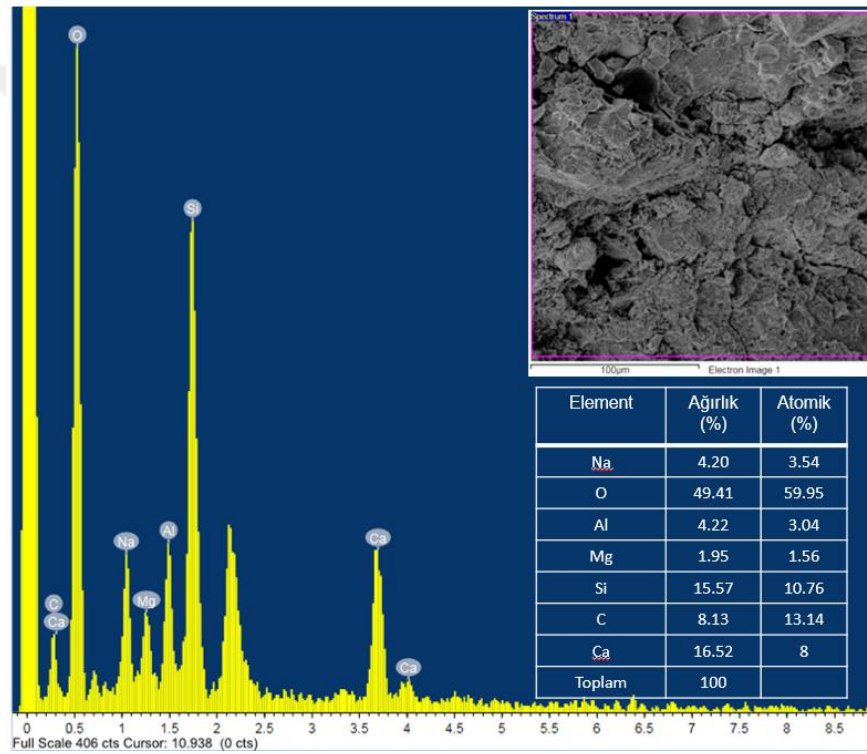


Şekil 93. S18 (90 günlük) numunesine ait EDX analizi

Geopolimer numuneler üzerinde gerçekleştirilen Taguchi optimizasyon sonuçları doğrultusunda, en etkili parametre olan kür sıcaklığının yüzey morfolojisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla S7 ve S20 numunelerinin birbirleriyle kıyaslaması yapılmıştır. S7 numunesine ait SEM ve EDX analizleri sırasıyla Şekil 94 ve Şekil 95'te sunulmuştur. Şekil 95 EDX analiz sonuçları incelendiğinde, S7 numenesi için Si/Al oranının 3.68 olduğu görülmektedir. S7 numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde yüzey üzerinde jel yapılarının oluştuğu ve ayrıca çok sayıda porozitenin oluştuğu görülmüştür. Bu durumun yüksek sıcaklık etkisi ile oluşan gaz çıkışlarının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Kür sıcaklığı başlangıçta geopolimerizasyon oluşumunu hızlandırmış olsa da, sıcaklığın yükselmesi ile birlikte yapıda hızlı sertleşme ve gözenekliliğin artması nedeniyle homojen bir yapının ortaya çıkmasını engelleyebilmektedir. Ayrıca artan sıcaklıklarla birlikte erken yaşlarda oluşabilecek nem kayıplarının reaksiyon derecesi üzerinde etkili olduğu ve buharlaşma kayıplarına bağlı olarak basınç dayanımlarını düşürdüğü söylenebilir (Zhang, 2020; Heah vd., 2012; Fang ve Kayali, 2013; Rovnaník, 2010) .



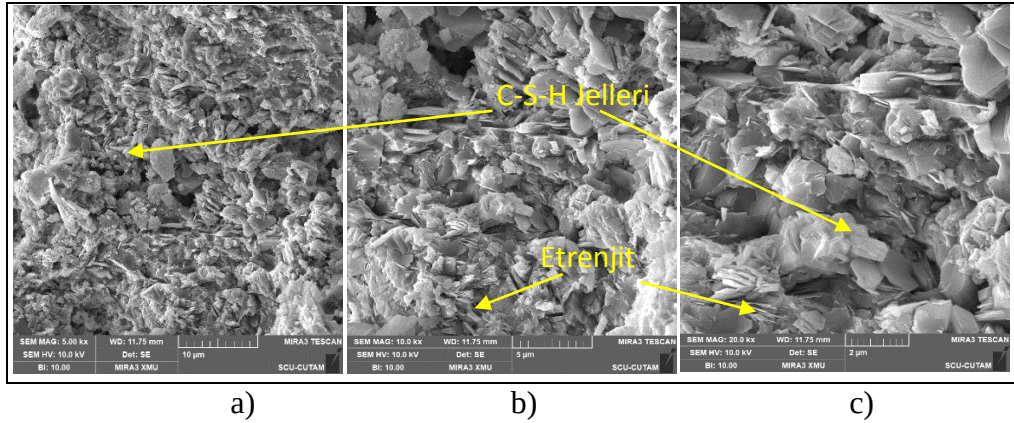
Şekil 94. S7 (90 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyütme ait SEM görüntüsü



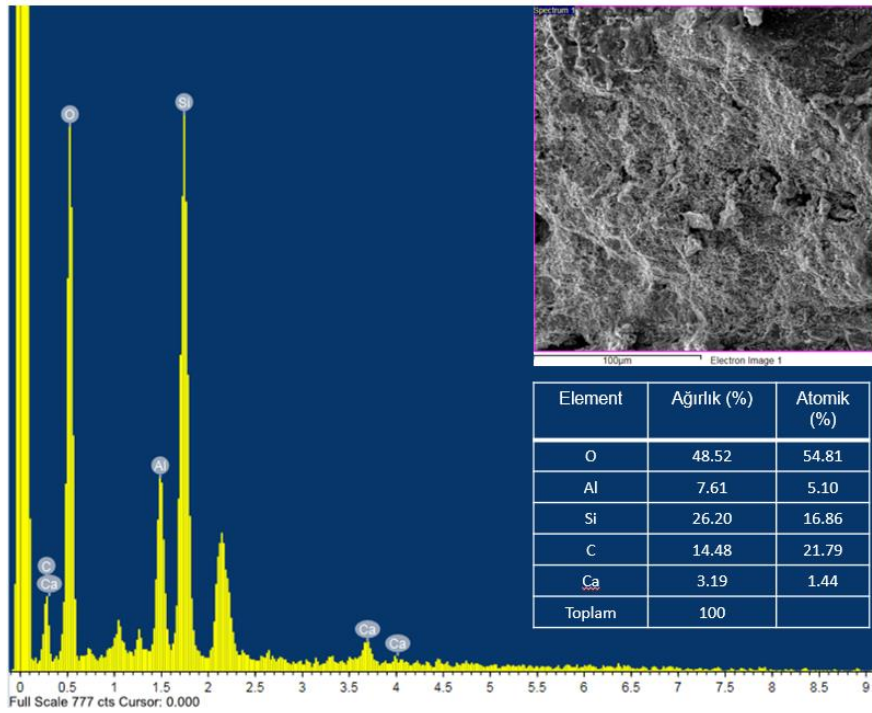
Şekil 95. S7 (90 günlük) numunesine ait EDX analizi

Durabilite deneyleri sonrası kılcal su emme ve sülfat çözeltisi deneyleri sonrası geopolimer yapı üzerinde oluşan yüzey morfolojisine ait SEM/EDX analizleri yapılmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak kılcal su emme numuneleri içerisinde en fazla basınç dayanım değişiminin gözlemlendiği S24 numunesine ait SEM ve EDX analizleri Şekil 96 ve Şekil 97'de sırasıyla görülmektedir. Kılcal su emme deneyi öncesi S24 numunesinde homojen bir yapının olduğu ve daha az boşlukların olduğu

görülmektedir. EDX analizinde özellikle Si oranının yüksekliğinin jel oluşumunda etkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 97).



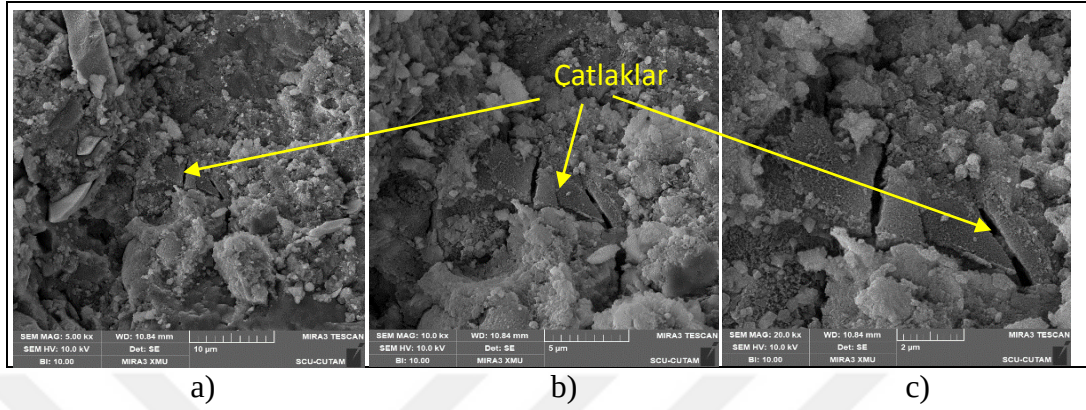
Şekil 96. Kılcal su emme öncesi S24 (90 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyötmeye ait SEM analizi görüntüsü



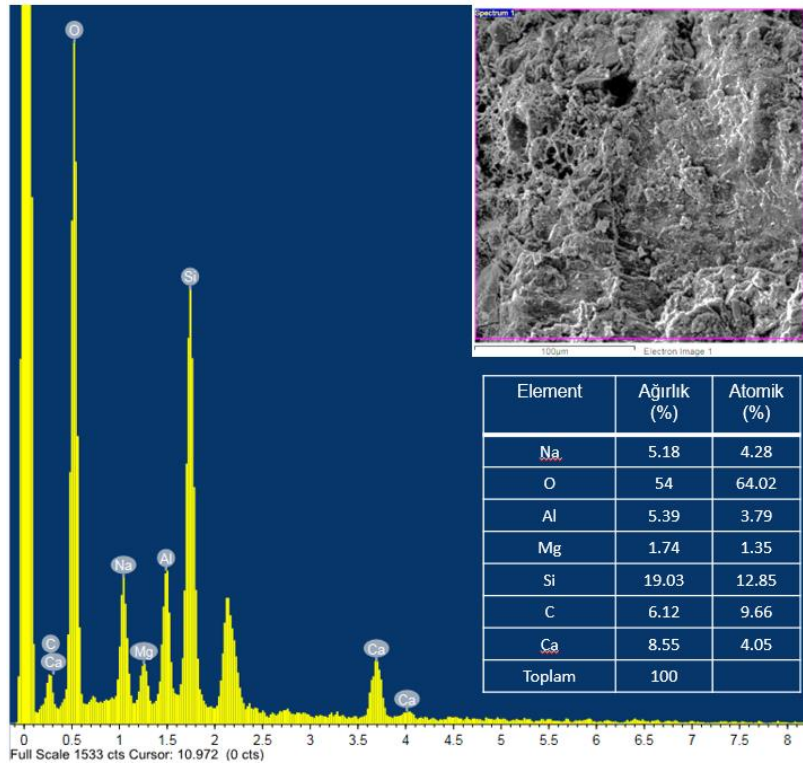
Şekil 97. Kılcal su emme öncesi S24 (90 günlük) numunesine ait EDX analizi

Kılcal su emme deneyleri sonrası S24 numunesine ait SEM analizleri incelendiğinde, suya maruz kalan numunede her ne kadar jelleşme yapıları görölse de bu yapılarla birlikte mikro ve makro çatlaklar görölmüştür (Şekil 98). Bunun sebebi olarak

yapı üzerinde gözenekler oluşmuş ve yapıda çatlak oluşumu artmıştır. Bu durumun numune içerisine nüfuz eden suyun, yapıyı olumsuz etkilemiş olabileceğini göstermektedir. EDX analizleri sonucu kılcal su emme sonrası oluşan bazı elementler (Na ve Mg gibi) bu durumu desteklemektedir (Şekil 99).

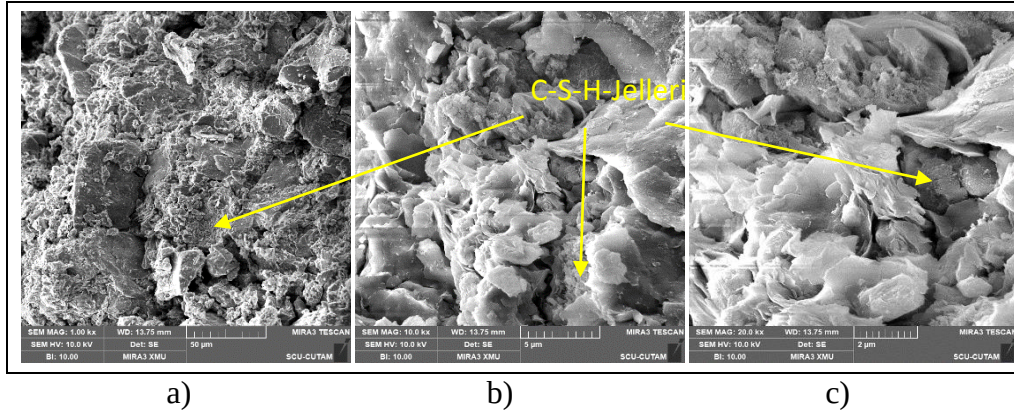


Şekil 98. Kılcal su emme sonrası S24 (90 günlük) numunesi a)5000X b)10000X c)20000X büyötmeye ait SEM analizi görüntüsü

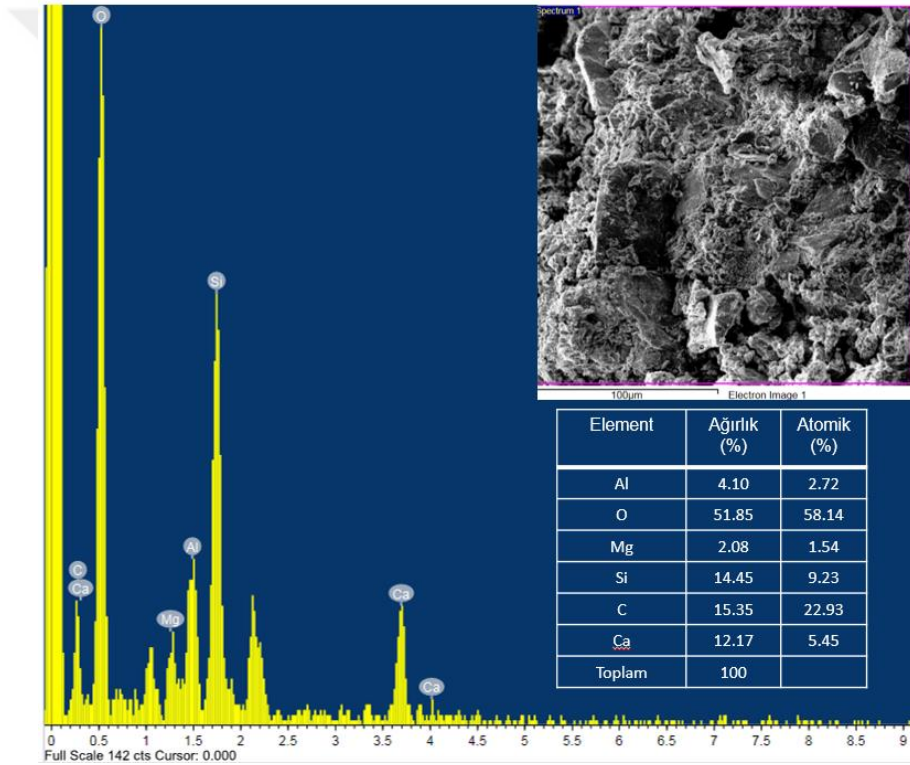


Şekil 99. Kılcal su emme sonrası S24 (90 günlük) numunesine ait EDX analizi

Geopolimerik malzemelerin sülfatlara karşı mükemmel direnci daha düşük bir Ca içeriğine bağlı alüminosilikat polimer yapısına sahip olan kaynak malzemeye bağlıdır. Sülfat çözeltilerinde uzun süre sülfat tuzlarına maruz kalan numunelerde alkali geçişlerin oluşması sonucu yapıda bozulmalar ve dayanım değerlerinde azalmalar olabilmektedir. Ancak basınç dayanımlarında artışların görüldüğü çalışmalara bakıldığında ise geopolimer ve çözelti arasındaki reaksiyon sonucunda oluşan ve daha sonra sertleşerek boşluk yapıları dolduran tortuların bu artışlar üzerinde etkili olduğunu belirtilmektedir (Lıban, 2022). Şekil 100 ve Şekil 101 sülfat deneyleri öncesi S1 numunesine ait SEM ve EDX görüntülerini (sırasıyla), Şekil 102 ve Şekil 103 ise sülfat deneyleri sonrası S1 numunesine ait SEM ve EDX görüntülerini (sırasıyla) göstermektedir. Taguchi optimizasyon yöntemine göre dökümü gerçekleştirilen 27 farklı geopolimer yapının tamamında sülfat deneyleri sonunda basınç dayanımlarında kayıplar gözlemlenmişti. Geopolimer numuneler sülfat çözeltisine maruz kaldıktan sonra oluşan jel benzeri yapıların zamanla değişimlere uğradığı söylenebilir. Sodyum sülfat çözeltisinin numune iç yapısına doğru nüfus etmesiyle, harç yapısı içerisinde dış ortama doğru serbest Ca atomlarının geçişi gerçekleşebilir. Geopolimer yapı içerisindeki bu Ca difüzyonunun, Jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve etrenjit $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$ oluşumlarına neden olduğu düşünülmektedir. Yüzey gözeneklerinde alçıtaşı ve etrenjit oluşumuna bağlı olarak oluşan kılcal çatlakların basınç dayanımlarında görülen düşüşleri etkilediği bilinmektedir (Thokchom vd.,2010). Bu nedenle, bütün geopolimer numunelerde basınç dayanımlarında düşüşlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Örnekler içerisinde en fazla basınç dayanım değişiminin görüldüğü S1 numunesine ait SEM analizleri incelendiğinde, yapının oldukça homojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir (Şekil 100). Sülfat çözeltisi deneyi öncesinde daha homojen bir yapının oluştuğu, sülfat deneyleri sonrasında ise çok daha gözenekli ve boşluklu bir yapının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yapı içerisinde reaksiyona girmemiş partiküllerin oluştuğu düşünülmektedir.



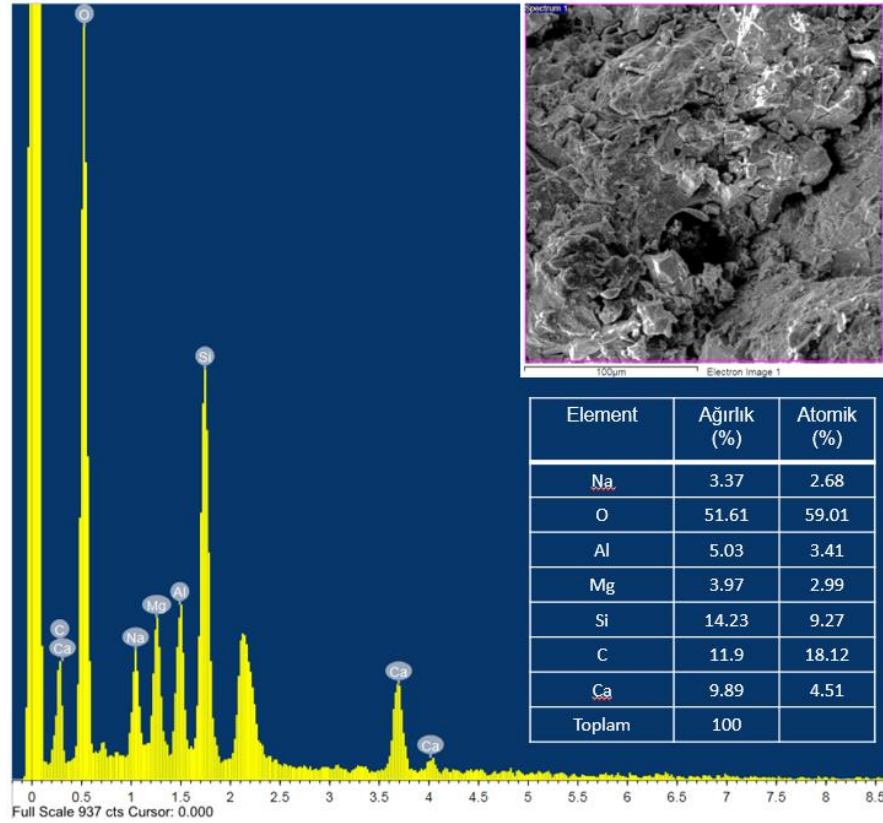
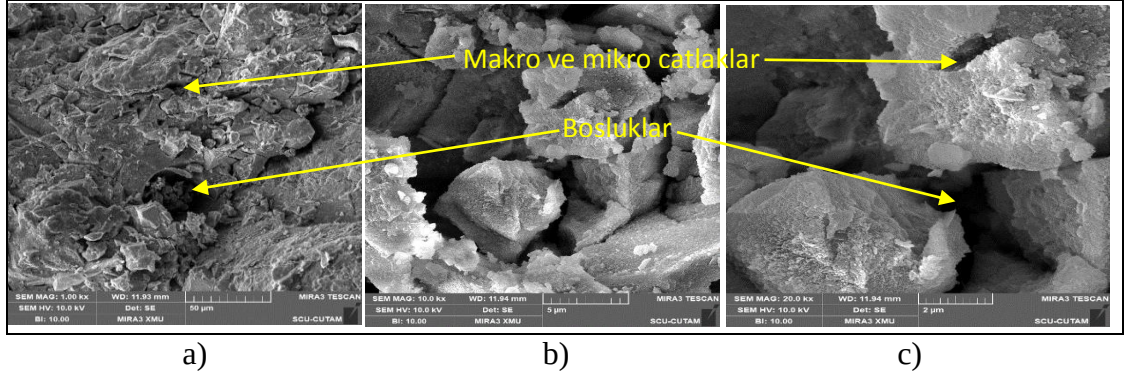
Şekil 100. Sülfat çözeltisi deneyi öncesi S1 numunesi a)1000X b)10000X c)20000 büyültmeye ait SEM analizi görüntüsü



Şekil 101. Sülfat çözeltisi deneyi öncesi S1 numunesine ait EDX analizi

S1 numunesinde sodyum sülfat çözeltisi sonrası dayanım değerinde gözlemlenen %60 oranında ki azalma, SEM analizlerindeki düzenli yapının azalması ile ilişkilendirilebilir (Şekil 102). Sülfat içerisinde bulunan iyonlar jel yapısının bozulmasına ve yapıda genel olarak bozulmalara neden olduğu düşünülmektedir ve bunun da basınç dayanımları üzerinde önemli azalmalara neden olduğu söylenebilir. EDX analizlerindeki

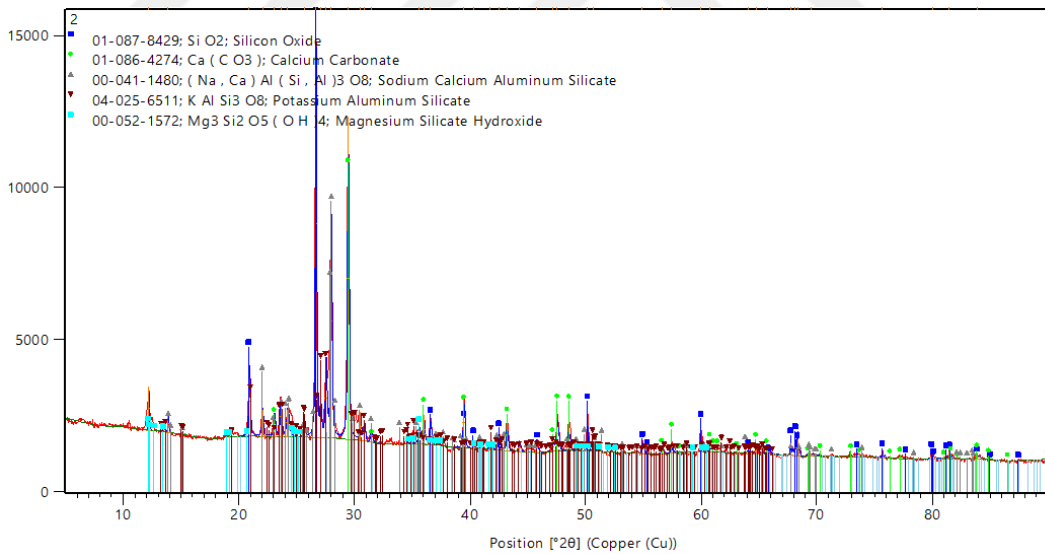
Ca elementindeki azalmanında basınç dayanımları üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 103).



Şekil 103. Sülfat çözeltisi deneyi sonrası S1 numunesine ait EDX analizi

3.13. XRD Analiz Sonuçları

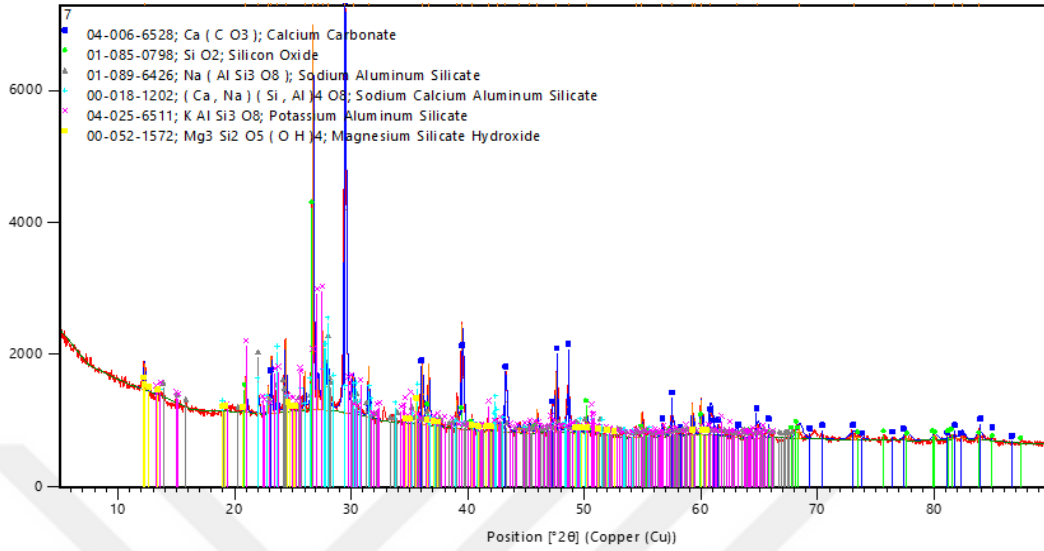
Geopolimer numuneler üzerinde basınç dayanımı sonrası S20 (28 günlük), S20 (56 günlük), S20 (90 günlük) ve kılcal su emme öncesi ve kılcal su emme sonrası S24 numunesi, sodyum sülfat deneyi öncesi ve sodyum sülfat deneyi sonrası S1 numunesi üzerinde XRD analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen mineraller Kuvars (SiO_2), Kalsit (CaCO_3), Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Mikrokin (KAlSi_3O_8), Antigorit ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Andesine ($\text{Ca}_{0.421}\text{Na}_{0.559}\text{K}_{0.02}\text{Si}_{2.58}\text{Al}_{1.42}\text{O}_8$), Graftonit ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$) şeklindedir. XRD analizleri 0.026° adım genişliği ile, 5° – 89° (2θ) aralığında ve Cu K α ($\lambda = 0.15406$ nm) radyasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 28 günlük numunede amorf bir kubbe gözlemlenmiş ve kalsit, kuvars gibi kristalin fazlara rastlanmıştır (Şekil 104). Bu aşamada geopolimer jel fazı henüz tam olarak kristalleşmemiştir. Kalsiyum içeren malzemeler ile kısmen C-A-S-H benzeri yapılar oluşmaya başladığı düşünülmektedir. Kırınım desenlerinde görülen CaCO_3 (kalsit) oluşumu geopolimer harçlarda erken mukavemetin oluşması için katkıda bulunabilir. Kalsit oluşumunun görülmesi, C sınıfı uçucu kül içindeki yüksek kalsiyum bileşimine atfedilebilir (Altawıl, 2022).



Şekil 104. S20 (28 Günlük) numunesi XRD analizi görüntüsü

56 günlük geopolimer numuneler üzerinde jel fazların kristalleşmeye başladığı görülmektedir (Şekil 105). Burada C-A-S-H jelinden oluşan kalsiyum kaynaklı alüminasilikat fazları daha düzenli bir duruma gelmeye başladığı söylenebilir. Havadaki

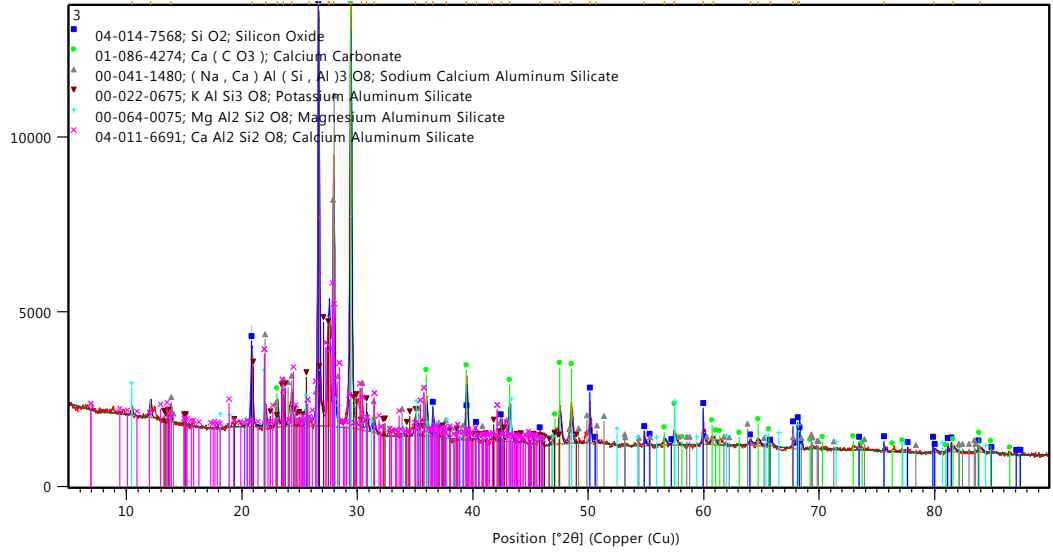
CO₂'in, Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek karbonatlaşma oluşumu sonucunda Kalsit pikinin oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 105. S20 (56 günlük) numunesi XRD analizi görüntüsü

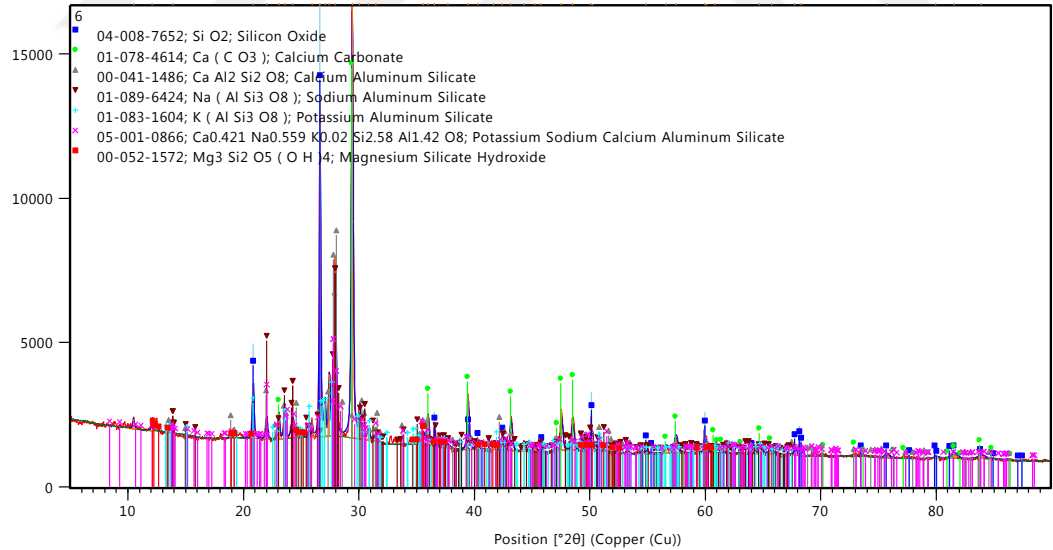
90 günlük numunede ise kristalleşme daha da ilerlemiş, kalsit, anortit fazları belirgin hale gelmiştir (Şekil 106). Bu fazlar, geopolimer harçlardaki oluşan jel yapısının zamanla kristal bir yapıya dönüşerek dayanımlarda artışa sebep olduğu düşünülmektedir. Keskinleşen pikler amorf yapıdan kristal yapıya geçişi doğrulamaktadır.

90 günlük S20 numunesinde kuvars fazı ile geopolimerizasyon oluşumları artmış ve alkali aktivatörün reaksiyona girmesinin C-S-H jel oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu jeller, alüminyum tuzları ve kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerini oluşturmaktadır (Alkwanadlı, 2023).



Şekil 106. S20 (90 günlük) numunesi XRD analizi görüntüsü

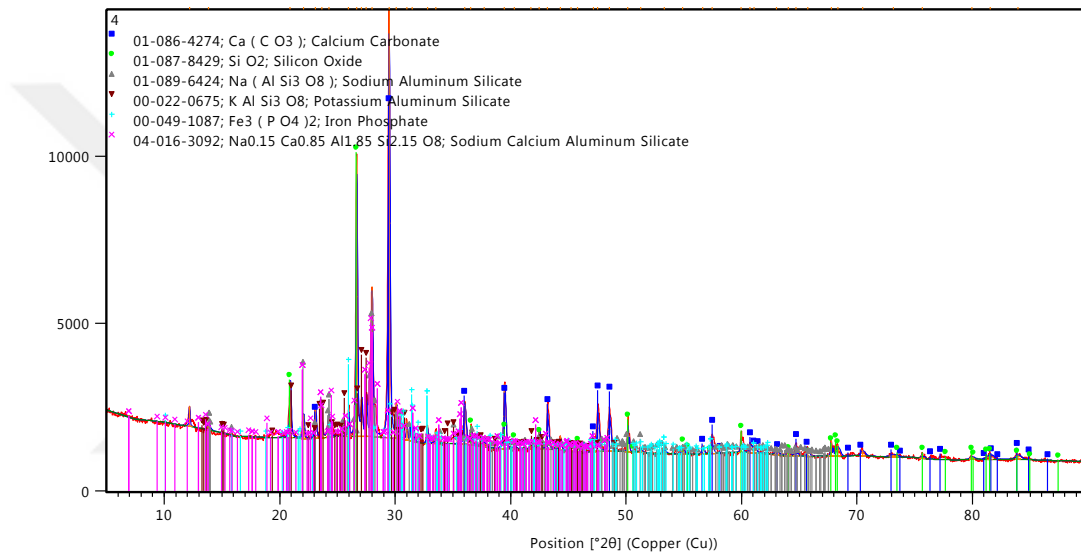
Kılcal su emme deneyi öncesi ve kılcal su emme deneyi sonrası S24 numunesi üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Kılcal su emme öncesi ve sonrası XRD desenlerinde 20° – 35° 2θ aralığında geniş bir amorf tepe gözlemlenmiş olup bu durum, geopolimer yapının düzensiz bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 107).



Şekil 107. Kılcal su emme öncesi S24 (90 günlük) numunesine ait XRD görüntüsü

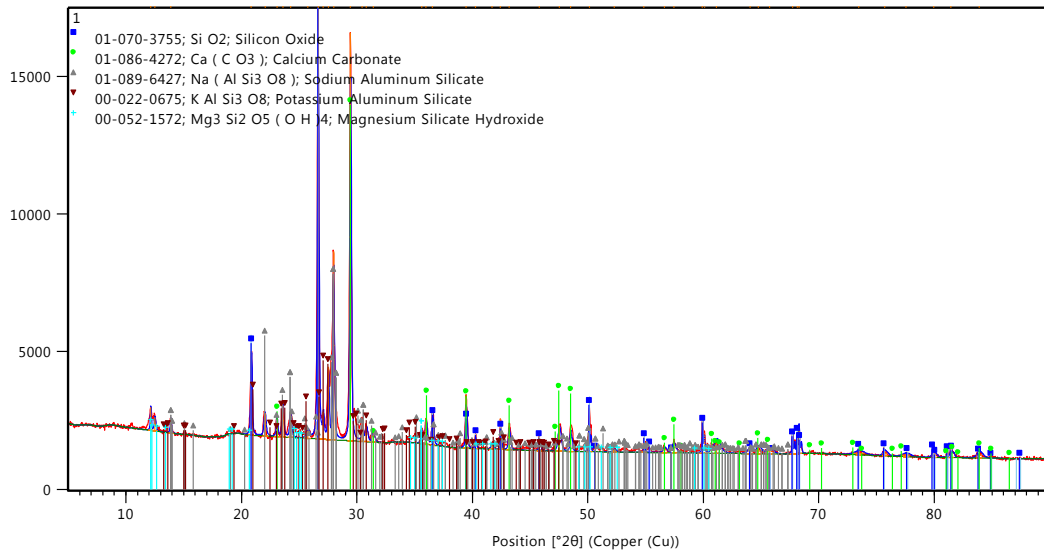
Kılcal su emme sonrası amorf bölgelerin daha belirgin bir hale dönüşmesi, matris yapısında oluşan değişimlerin göstergesidir (Şekil 108). SiO_2 (kuvars) fazı kılcal su emme öncesi ve kılcal su emme sonrası değişmeyen kristalin faz olmuştur. CaCO_3 fazı, suyun

etkisiyle kısmen çözünmüş ve matris içinde jel oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu durum XRD desenlerinde pik azalmaları olarak görülür (Meng vd., 2025). CaCO_3 (Kalsit) fazında kılcal su emme sonrasında azalmaların olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu faz oluşumunun mermer tozu katkısından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Anortit($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), faz oluşumlarının ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile oluşabileceği düşünülmektedir. Bu fazların kristalliklerinin kılcal su emme sonrası arttığı gözlemlenmiştir. Graftonit ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$) fazının ise sadece kılcal su emme sonrası olduğu görülmüştür. Bu yeni fazın oluşumunun suyun etkisiyle iyon taşınımından kaynaklanabilmektedir (He, 2013).



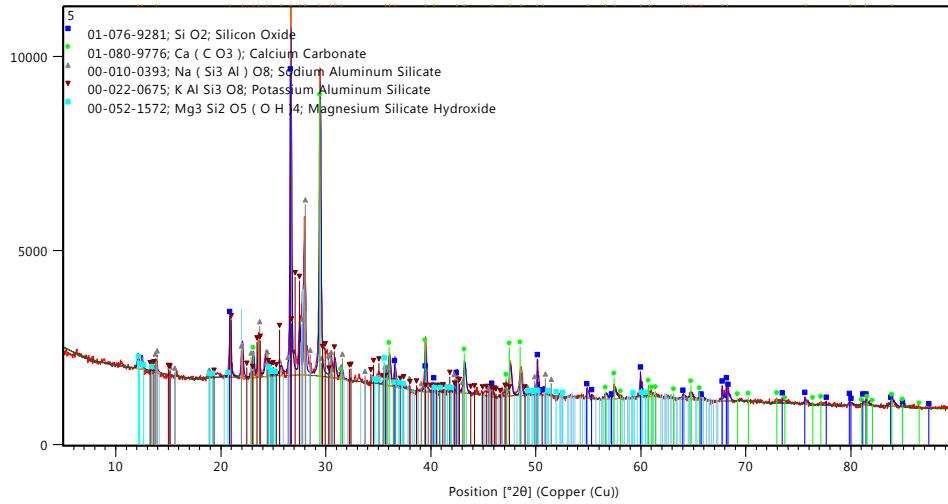
Şekil 108. Kılcal su emme sonrası S24 (90 günlük) numunesine ait XRD görüntüsü

Sodyum sülfat deneyi öncesi ve sodyum sülfat deneyi sonrası S1 numunesi üzerinde de XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sülfat çözeltisi öncesi SiO_2 (kuvars) fazı ve CaCO_3 (kalsit) fazı baskın fazlar olarak belirlenmiştir (Şekil 109).



Şekil 109. Sülfat çözeltisi deneyi öncesi S1 numunesine ait XRD görüntüsü

XRD analizi sonucu, sülfat çözelti deneyi sonrası kristalin fazlarda azalmaların olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak sülfat iyonlarının, alkali aktivasyon ile oluşan jel yapılarını bozduğunu ve dayanım değişimine sebep olduğunu düşünülmektedir (Şekil 110). Yapılan çalışmalarda yüksek fırın cürufu kullanılan geopolimer harçlarda, sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin dayanımında %50'ye varan azalmalar olduğu tespit edilmiştir, bu durumun N-A-S-H (sodyum alümino silikat hidrat) yapılarının çözünmesiyle ilişkili olduğunu bildirmiştir (Lee ve Lee, 2013). Ayrıca sülfat iyonlarının özellikle Ca içeren geopolimer harçlarda etrenjit veya diğer sülfatlı hidrat fazları oluşturarak genişleme ve çatlamaya yol açtığını ve ayrıca kristal fazlarda bozulmaların gerçekleştiği belirtilmiştir (Fernández vd., 2005). Geopolimer yapılarda XRD desenlerinde amorf yapıdaki artışın ve dayanımlardaki azalmanın sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde ve düşük kür sıcaklığında olduğu bildirilmiştir (Temuujin, 2011).

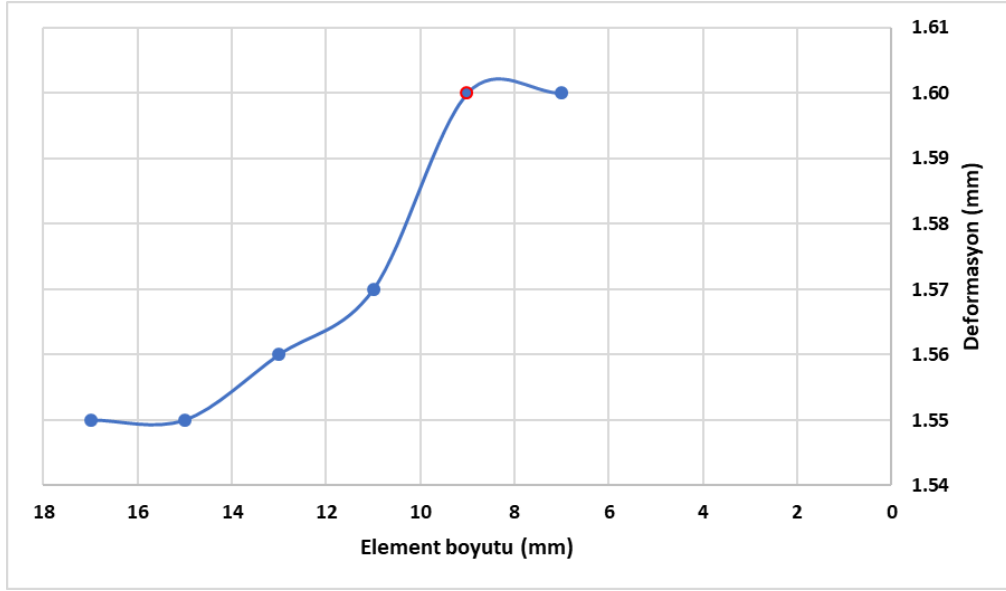


Şekil 110. Sülfat çözeltisi deneyi sonrası S1 numunesine ait XRD görüntüsü

3.14. Kiriş Numunelerde Eğilme Dayanımı Sonuçları ve ANSYS ile Karşılaştırılması

Bu bölümde 100x100x400mm boyutlarında kiriş kalıplar kullanılarak, optimum sonuçların dikkate alınmasıyla ASTM C1875 standartlarına uygun olarak, donatılı geopolimer harç kiriş numuneler üretilmiştir. 3 farklı filamentle 3 farklı donatı şekli üretilerek toplamda 9 adet numune için eğilmede çekme dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilmede çekme dayanımı sonrası numunelerde deneysel ve sayısal yük- deformasyon ilişkisi, eğilme anında kirişte ve donatıda oluşan gerilme birikim noktaları tespit edilmiştir. Kiriş numunelerinde uygulanan yük altında oluşan toplam deformasyon dağılımı renk skalası ile gösterilmiştir. Renk skalası, minimum deformasyondan (mavi bölgeler) maksimum deformasyona (kırmızı bölgeler) doğru artan bir şekilde düzenlenmiştir. Gerilme analizlerinde Equivalent stress (eşdeğer gerilme), numune üzerinde oluşan çekme ve basınç gerilmelerini tek bir birleşik gerilme değeri olarak ifade etmektedir.

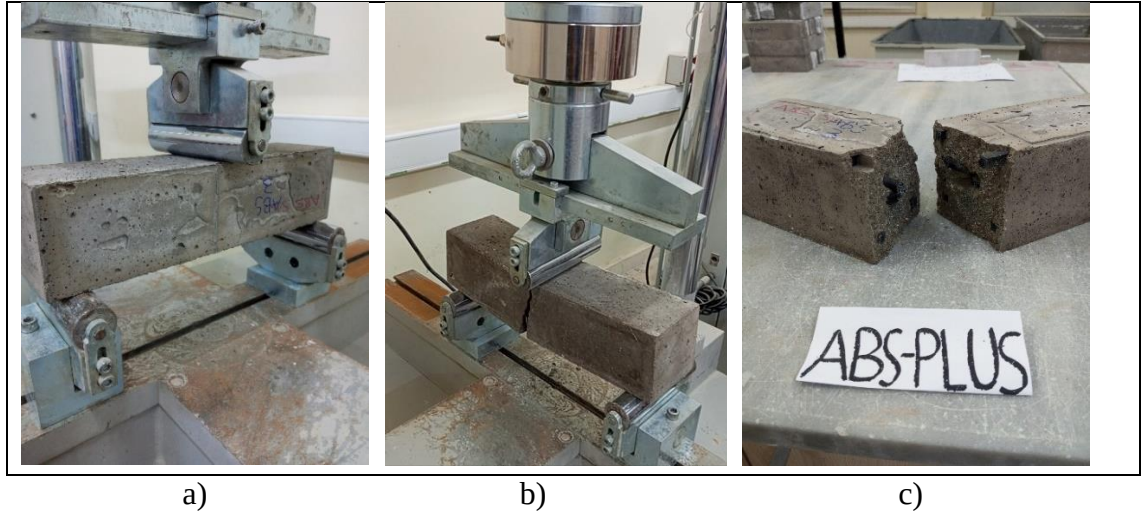
Sayısal analizlere başlamadan önce uygun ağ aralığını bulmak için ağ yakınsaması yapılmıştır. Şekil 111, ağ yakınsama grafiğini göstermektedir. Burada farklı ağ sayıları ve boyutlarında denemeler yaparak ağ boyutunun yataya en yakın olduğu yer, en uygun ağ aralığı olmuştur. 9 mm ve yaklaşık 80000 ağ aralığı analizler için en uygun aralık olarak belirlenmiş ve tüm analizler bu boyut ve sayılarda yapılmıştır.



Şekil 111. Element boyutu ve ağ yakınsama kontrolü

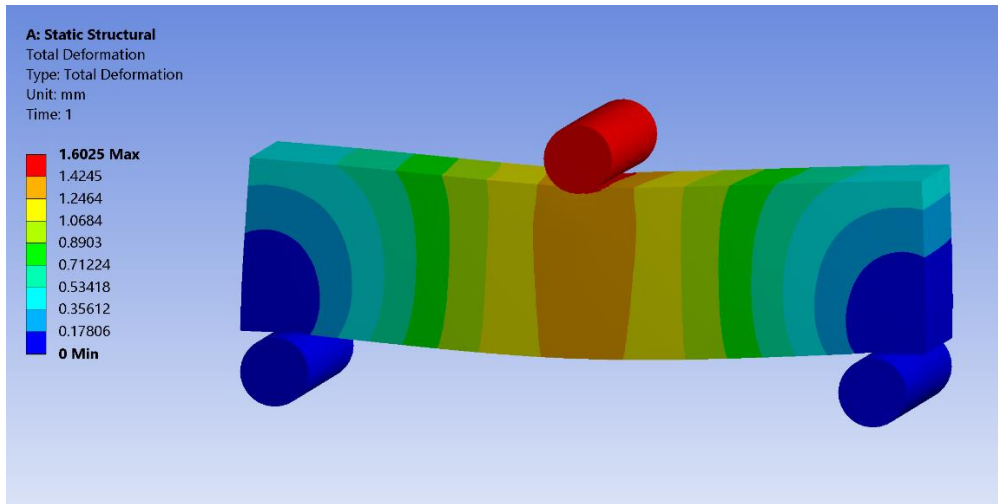
Eğilmede çekme deneyleri gerçekleştirilen ilk olarak ABS PLUS filamentinden üretilmiş üç farklı donatı geometrisine (çapraz bağlı, küresel ve standart) sahip kirişlerde çatlak oluşumu, kırılma ve ayrışma aşamaları incelenmiştir. Şekil 112, ABS PLUS filament yapısına sahip çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte kırılma öncesi, kırılma anı ve kırılma sonrasına ait şekilleri göstermektedir. Şekil 113, ABS PLUS çapraz bağlı geopolimer kirişe ait kiriş deformasyon ve donatı deformasyon analizini göstermektedir. Şekil 114, ABS PLUS çapraz bağlı geopolimer kirişe ait kiriş gerilmesi ve donatı gerilmesi analizini göstermektedir. Şekil 115 ise tek noktadan (orta noktadan) yükleme yapılan kirişte oluşan deplasman değişimlerini göstermektedir.

ABS PLUS filamentine sahip çapraz bağlı donatının, kiriş üzerinde çatlama görüldükten sonra orta açıklıkta tek bir büyük çatlak geliştiği söylenebilir. Yükün uygulandığı eksen boyunca gelişen bu çatlak kırılma anına kadar ilerlemiştir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde aderans eksikliğine dayalı bir sıyrılma tespit edilmemiştir (Şekil 111).

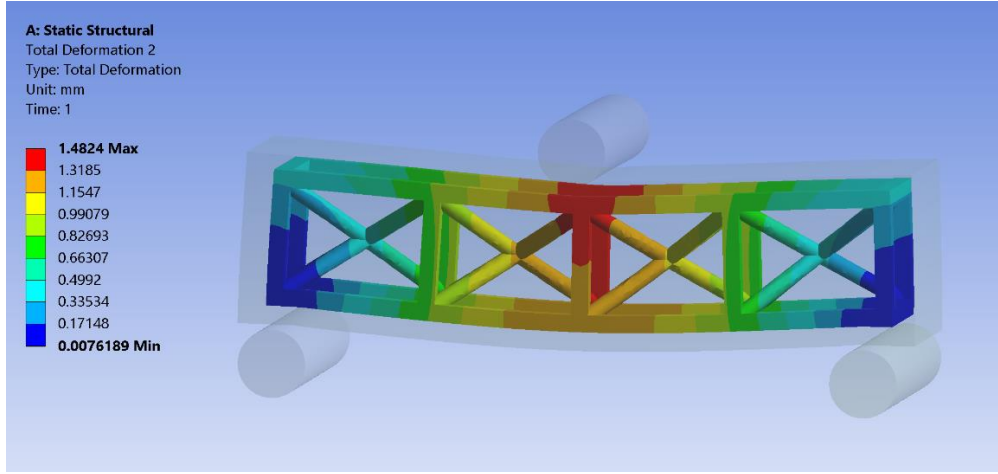


Şekil 112. ABS PLUS çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasında ait eğilmede çekme deneyi

ABS PLUS filamentine sahip çapraz bağlı donatılı kirişin sayısal sonuçları (ANSYS) incelendiğinde (Şekil 113-a), yapının tamamı için kirişteki maksimum deplasmanın 1.52 mm, sadece donatı yapısı için ise 1.4824 mm gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 113-b). Bu yükler altında deneysel sonuçlara bakıldığında ise, kırılma öncesindeki maksimum deplasman miktarı ABS PLUS çapraz bağlı geometride 1.48 mm olarak ölçülmüştür.



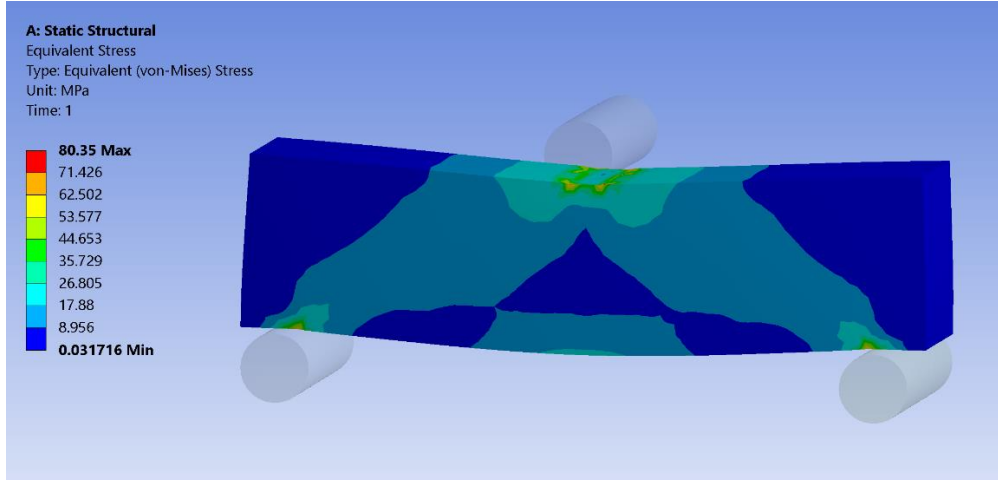
a)



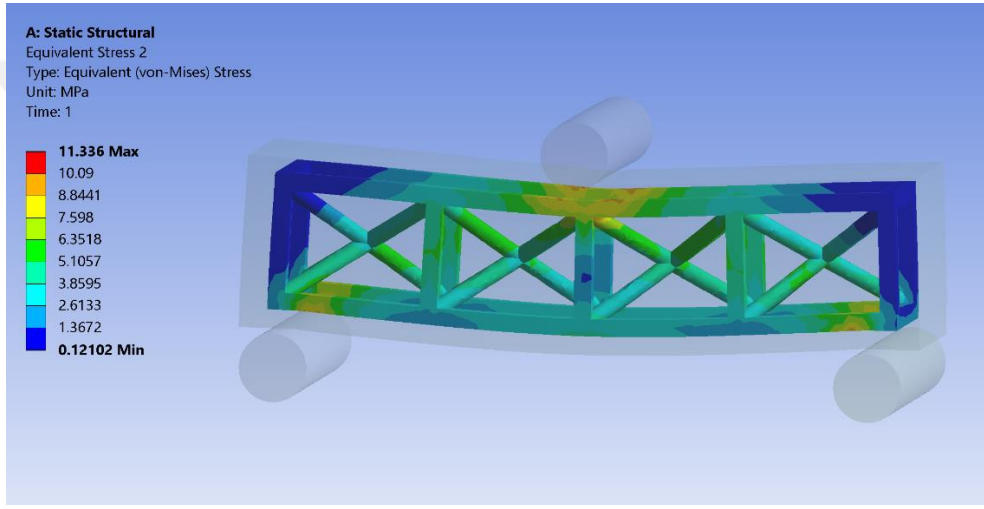
b)

Şekil 113. ABS PLUS çapraz bağlı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi

ABS PLUS çapraz bağlı kiriş, düşük elastisite modülüne rağmen matris, donatı etkileşimi sayesinde oldukça dengeli bir davranış sergilemiştir. Kirişteki maksimum eşdeğer gerilme yaklaşık 80.35 MPa seviyesinde olup, gerilme dağılımı genel olarak orta açıklık bölgesinde yoğunlaşmıştır (Şekil 114-a). Üst donatılarda basınç etkisi, alt donatılarda çekme etkisi oluşarak gerilmeler, kirişin alt yüzeyinden başlayarak orta kısımda simetrik şekilde yayılmıştır. Çapraz bağlı donatıda gerilmelerin 11.33 MPa seviyesinde kalması, yükün büyük bölümünün kiriş tarafından taşındığını göstermektedir. Çapraz bağlı donatının ise yapı içerisinde çatlak ilerlemesini geciktirdiği düşünülmektedir (Şekil 114-b). Çapraz bağ geometrisi sayesinde donatı, sadece yük yönünde değil, aynı zamanda yük doğrultusuna dik bileşenlerde de gerilme etkisi oluşturmuş ve böylece kirişin sünek davranış göstermesini sağlamıştır.



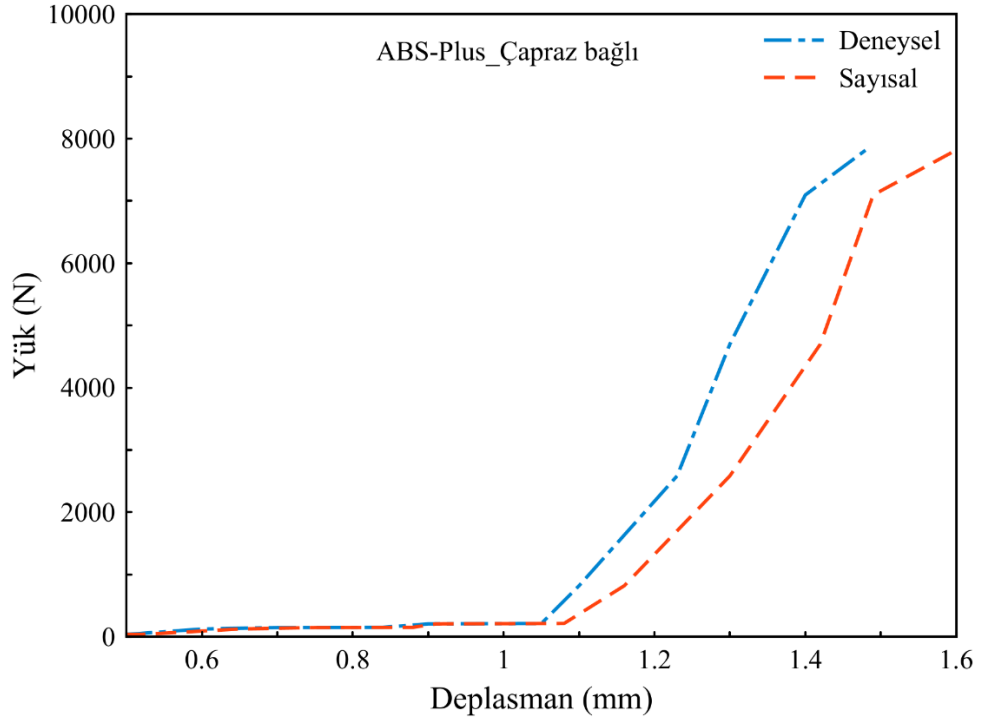
a)



b)

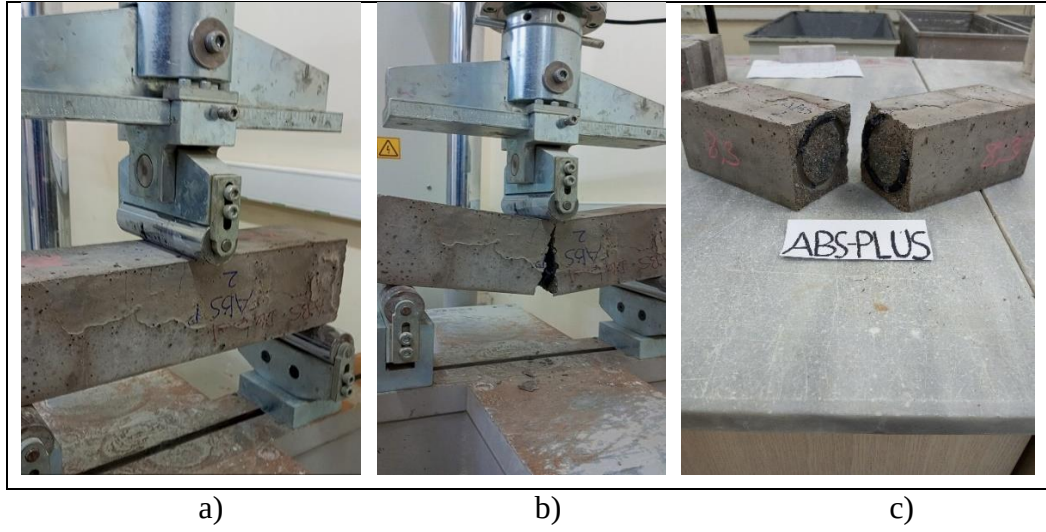
Şekil 114. ABS PLUS çapraz bağlı geopolimer kirişe ait (a) kiriş gerilmesi (b) donatı gerilmesi analizi

ABS Plus donatılı yük-deplasman eğrileri içerisinde en yüksek tepe yüküne 7817 N olarak çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte ulaşıldığı görülmüştür (Şekil 115). Deneysel sonuçlar incelendiğinde, maksimum deformasyon 1.48 mm iken sayısal sonuçlara göre maksimum deformasyon 1.52 mm olarak elde edilmiştir. Yüklemenin başlangıcında artan yük ile doğrusal olmayan bir davranış göstermiştir. Fakat 1mm'lik deplasman sonunda artan yük ile beraber daha lineer bir eğrinin oluştuğu görülmüştür.



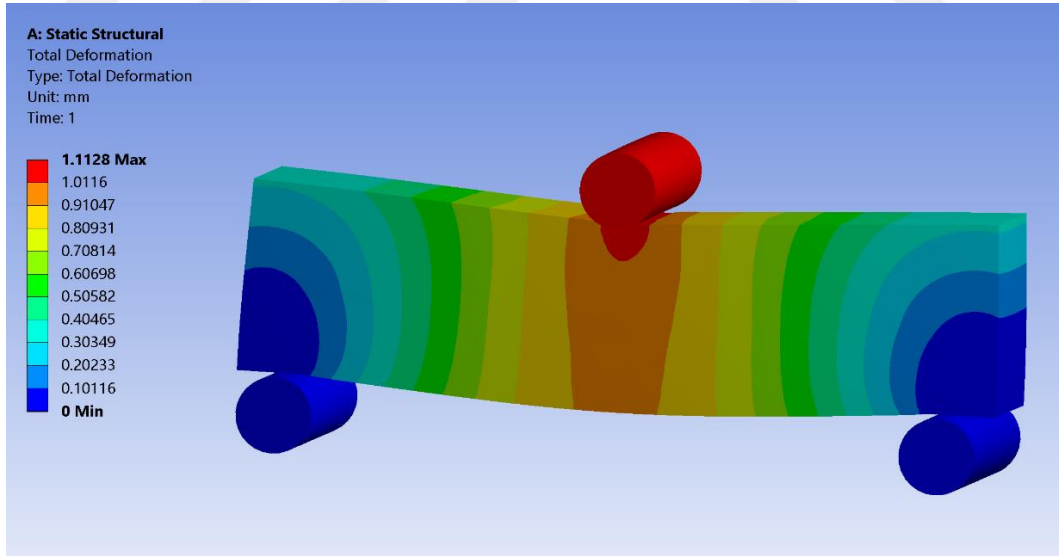
Şekil 115. ABS PLUS çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri

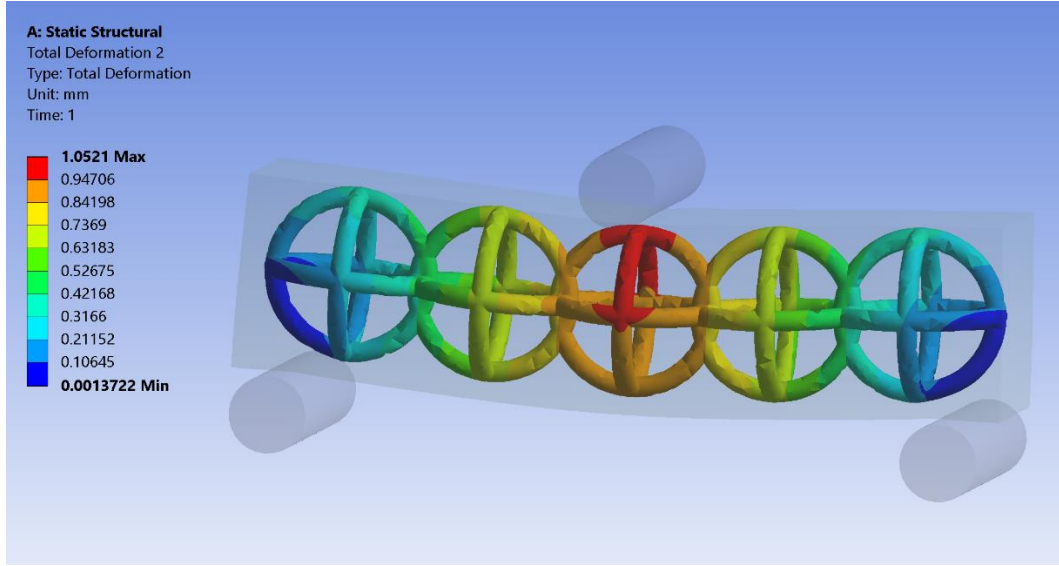
ABS PLUS küresel donatıya ait deneysel görseller Şekil 116'da sunulmaktadır. Burada kırılma öncesi, kırılma anı ve kırılma sonrası şekiller görülmektedir. ABS Plus filamentine sahip küresel donatının, kiriş üzerinde çatlama görüldükten sonra orta açıklıkta tek bir büyük çatlak geliştiği söylenebilir. Yükün uygulandığı eksen boyunca gelişen bu çatlak kırılma anına kadar ilerlemiştir.



Şekil 116. ABS PLUS küresel donatılı geopolimer geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi

ABS Plus filamentine sahip küresel donatılı geopolimer kirişlerde yapının tamamı için kirişteki maksimum deplasmanın 1.07 mm, sadece donatı yapısında ise 1.052 mm olduğu görülmektedir (Şekil 117-a, Şekil 117-b).

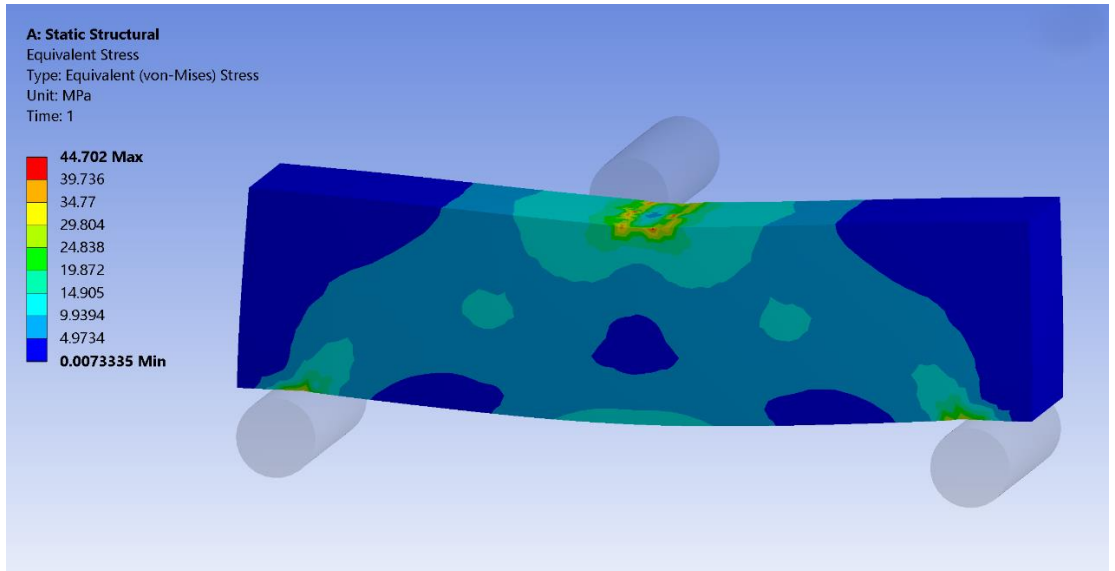




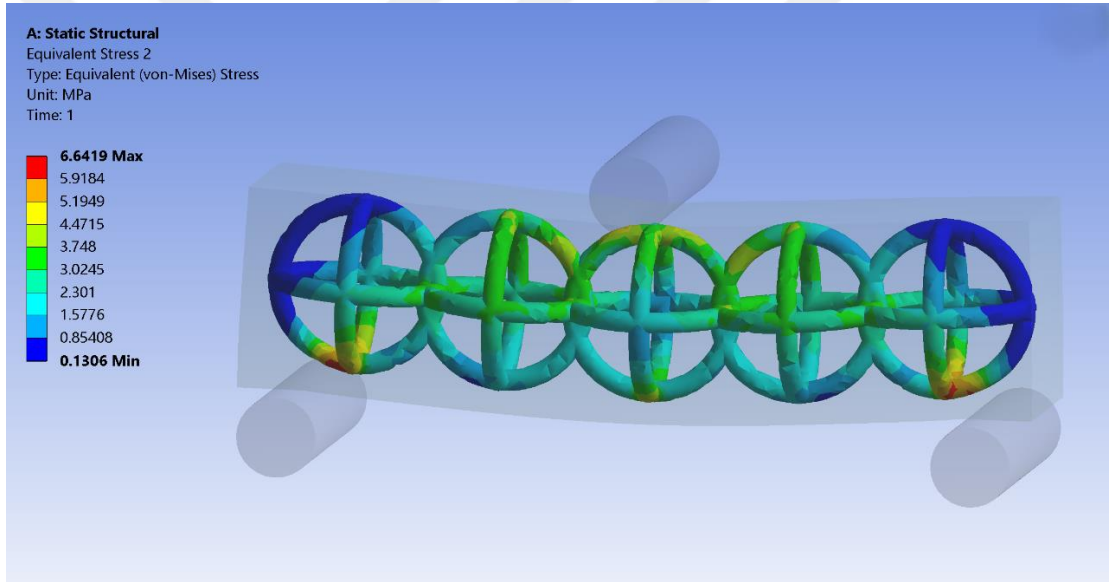
b)

Şekil 117. ABS PLUS küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi

ABS PLUS küresel geopolimer kirişteki gerilme dağılımları incelendiğinde ise, en yüksek gerilme yaklaşık 44.7 MPa olarak elde edilmiştir. Gerilmeler özellikle kirişin orta kısmında yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 118-a). ABS PLUS küresel kiriş, düşük gerilme ve sınırlı deformasyon değerleriyle dengeli bir davranış göstermiştir. ABS PLUS küresel donatı içinde oluşan maksimum gerilme yaklaşık 6.64 MPa olarak tespit edilmiştir (Şekil 118-b). Bu değer, kirişte ölçülen maksimum gerilmeden oldukça düşüktür. Bu durum, yükün büyük kısmının kiriş tarafından taşındığı, küresel donatının ise yapıyı destekleyici bir görev üstlendiği düşünülmektedir.



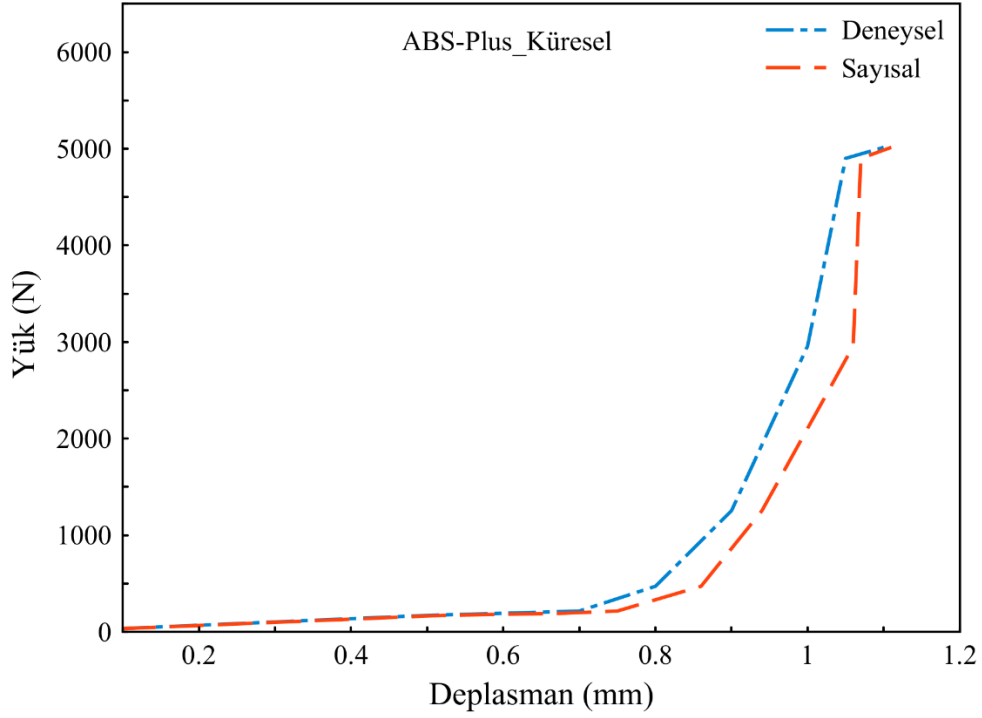
a)



b)

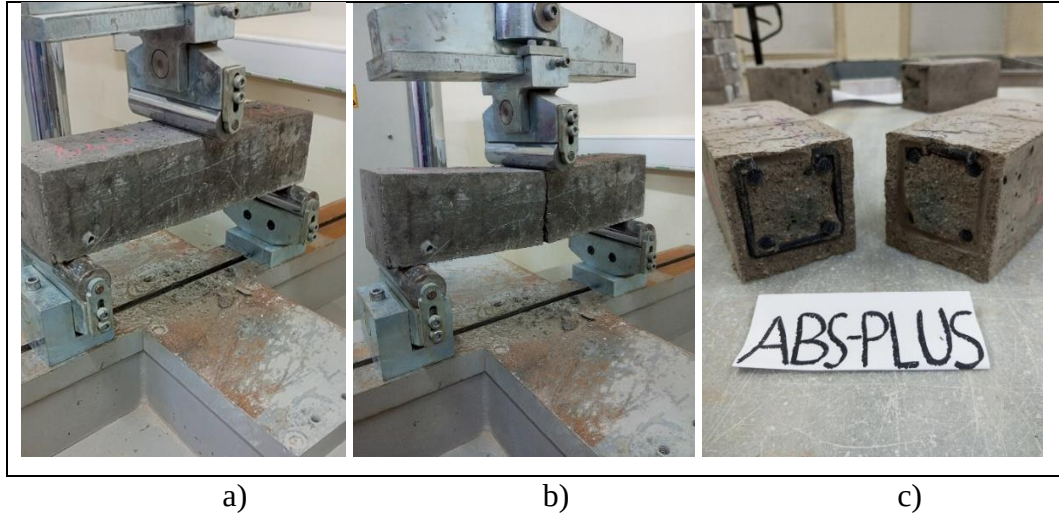
Şekil 118. ABS PLUS küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi

ABS PLUS küresel donatılı geopolimer kirişe ait yük deplasman eğrileri (Şekil 119)'da görülmektedir. Burada ABS Plus küresel donatılı kirişte maksimum yük 5014 N olarak bulunmuştur. Bu yük değerine karşılık gelen maksimum deneysel deformasyon 1.1 mm iken, sayısal deformasyon değeri 1.07 mm ile maksimum değere ulaşmıştır.



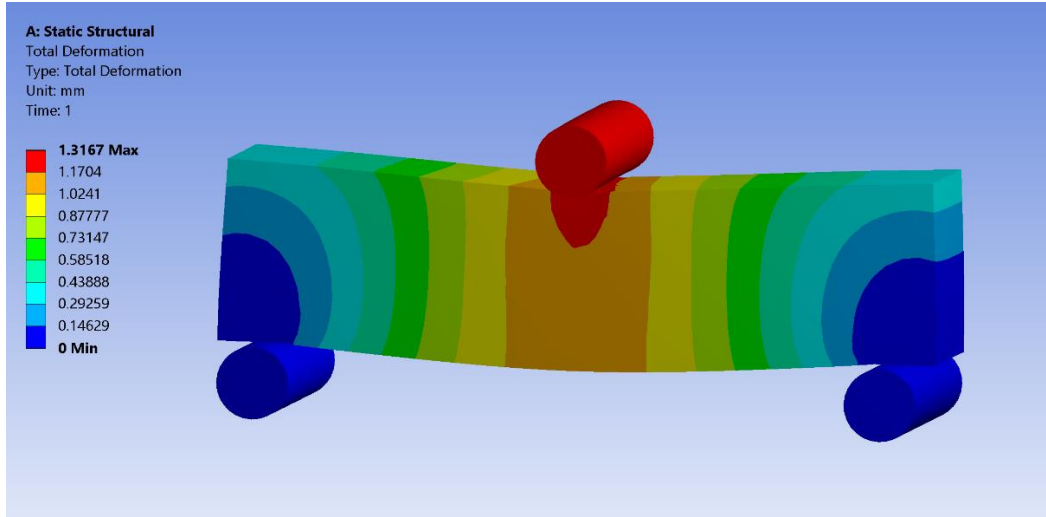
Şekil 119. ABS PLUS küresel donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri

ABS PLUS standart donatıya ait kırılma öncesi, kırılma anı ve kırılma sonrası şekiller görülmektedir (Şekil 120). ABS Plus filamentine sahip standart donatının, kiriş üzerinde çatlama görüldükten sonra orta açıklıkta tek bir büyük çatlak geliştiği söylenebilir. Yükün uygulandığı eksen boyunca gelişen bu çatlak kırılma anına kadar ilerlemiştir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde aderans eksikliğine dayalı bir sıyrılma tespit edilmemiştir.

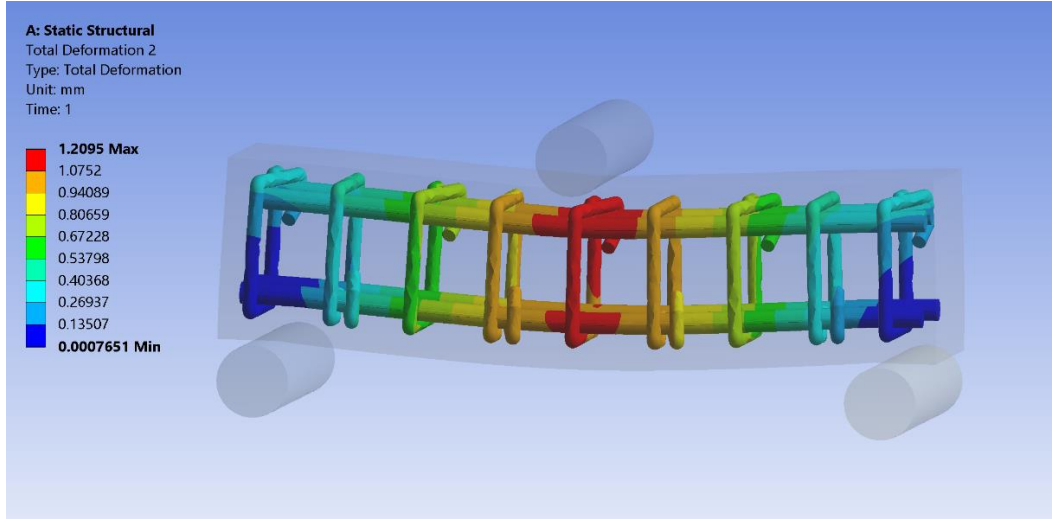


Şekil 120. ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi

ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişe ait kiriş deformasyon ve donatı deformasyon analizlerinde 7109N yük altında, ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişte sayısal sonuçlara ait kirişteki maksimum deformasyon değeri 1.25 mm iken, donatıya ait maksimum deformasyon değeri 1.2095 mm olarak gerçekleşmiştir (Şekil 121-a, Şekil 121-b).



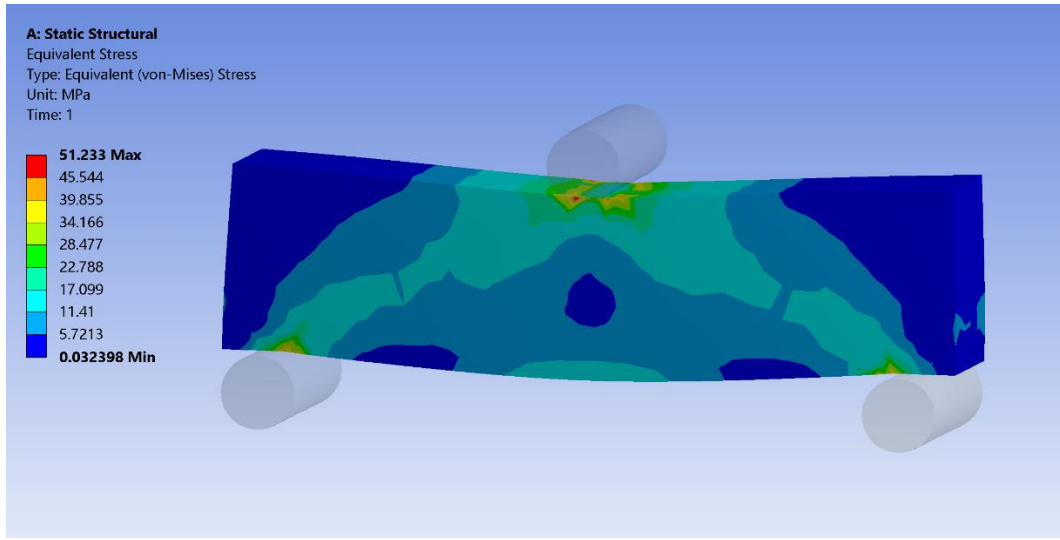
a)



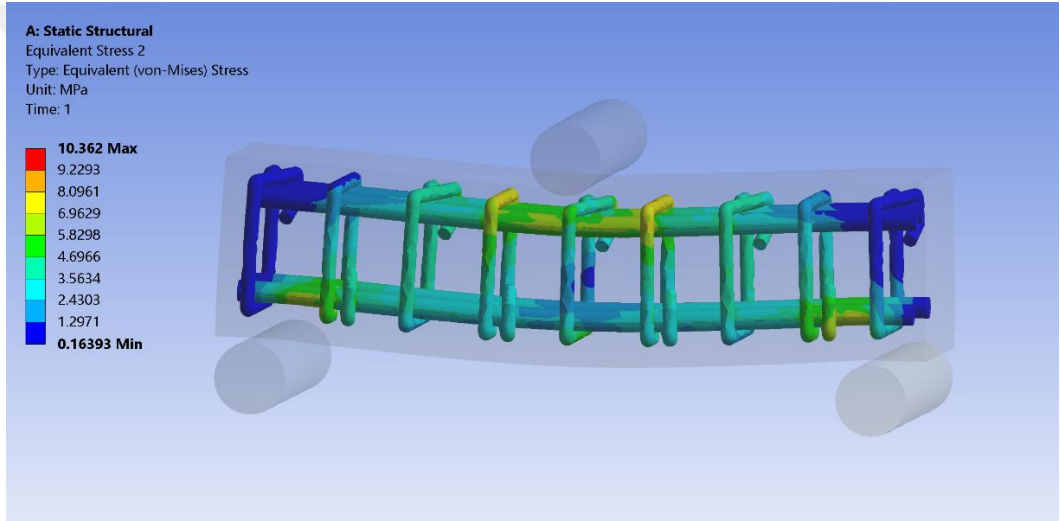
b)

Şekil 121. ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi

ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişteki gerilim dağılımları incelendiğinde, kirişin orta kısmında yaklaşık 51.23 MPa maksimum gerilme oluşmuştur. Bu değer, ABS PLUS küresel donatısına göre daha yüksek gerilme seviyelerine ulaştığını göstermektedir. Kirişteki gerilme dağılımının alt kısımlarda yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 122-a). ABS PLUS standart donatıda görülen maksimum gerilme değeri yaklaşık 10.36 MPa olarak tespit edilmiştir (Şekil 122-b). ABS PLUS küresel donatı kirişin yük altında deformasyonuna katkı sağlamış, fakat yüksek gerilme bölgelerinde yükü tam olarak taşıyamamıştır.



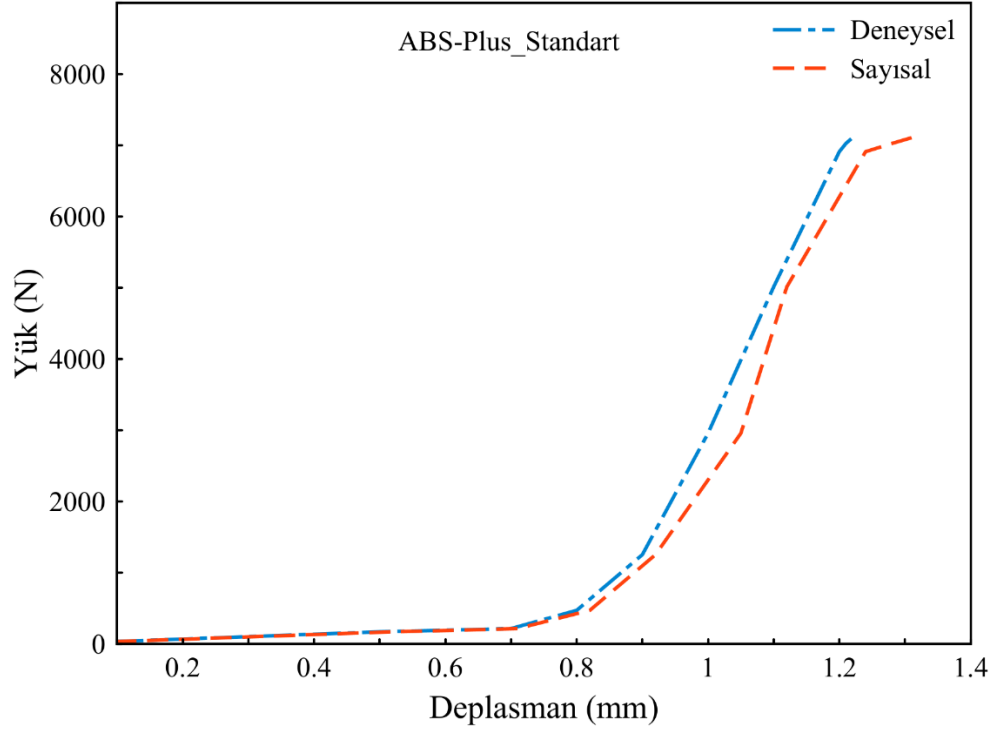
a)



b)

Şekil 122. ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi

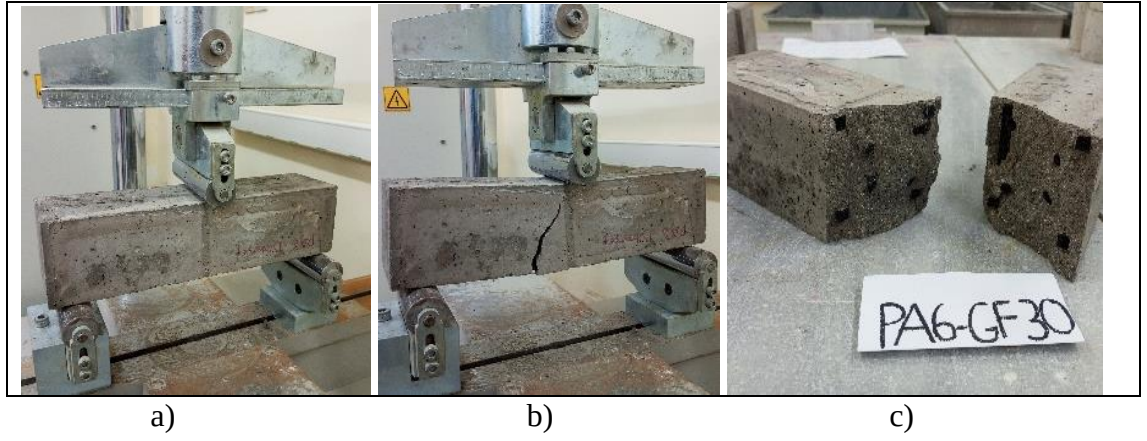
ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişe ait yük deformasyon analizleri Şekil 123'te görülmektedir. 7109N yük altında, ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişte deneysel ve sayısal sonuçlar incelendiğinde, deneysel maksimum deformasyon değeri 1.22 mm iken, sayısal maksimum deformasyon değerinin 1.25 mm olduğu tespit edilmiştir. Gerek yük taşıma kapasitesi gerekse deplasman miktarları bakımından, küresel ve standart donatılı kafes yapısına kıyasla, çapraz bağlı geometrinin daha iyi bir performans gösterdiği söylenebilir.



Şekil 123. ABS PLUS standart donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri

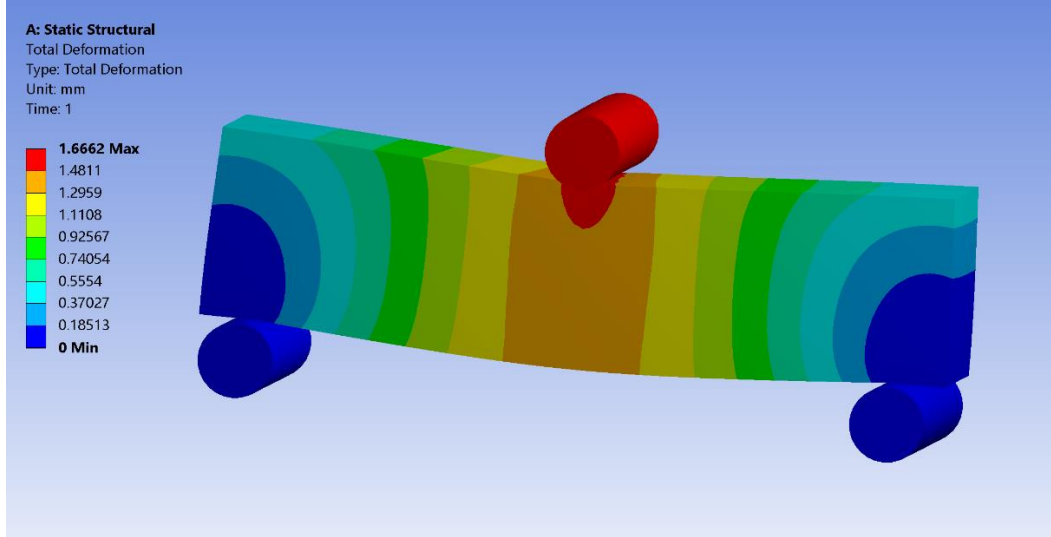
İkinci olarak eğilmede çekme deneyleri PA6 GF30 filamentinden üretilmiş üç farklı donatı geometrisine (çapraz bağlı, küresel ve standart) sahip kirişlerde çatlak oluşumu, kırılma ve ayrışma aşamaları incelenmiştir. Şekil 124, PA6 GF30 filament yapısına sahip çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte kırılma öncesi, kırılma anı ve kırılma sonrasına ait şekilleri göstermektedir. Şekil 125, PA6 GF30 çapraz bağlı geopolimer kirişe ait kiriş deformasyon ve donatı deformasyon analizini göstermektedir. Şekil 126 ise PA6 GF30 çapraz bağlı geopolimer kirişe ait kiriş gerilmesi ve donatı gerilmesi analizini göstermektedir. Şekil 127, tek noktadan (orta noktadan) yükleme yapılan kirişte oluşan deplasman değişimlerini göstermektedir.

PA6 GF30 filamentine sahip çapraz bağlı donatının, kiriş üzerinde çatlama görüldükten sonra orta açıklıkta tek bir büyük çatlak geliştiği söylenebilir. Yükün uygulandığı eksen boyunca gelişen bu çatlak kırılma anına kadar ilerlemiştir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde aderans eksikliğine dayalı bir sıyrılma tespit edilmemiştir (Şekil 124).

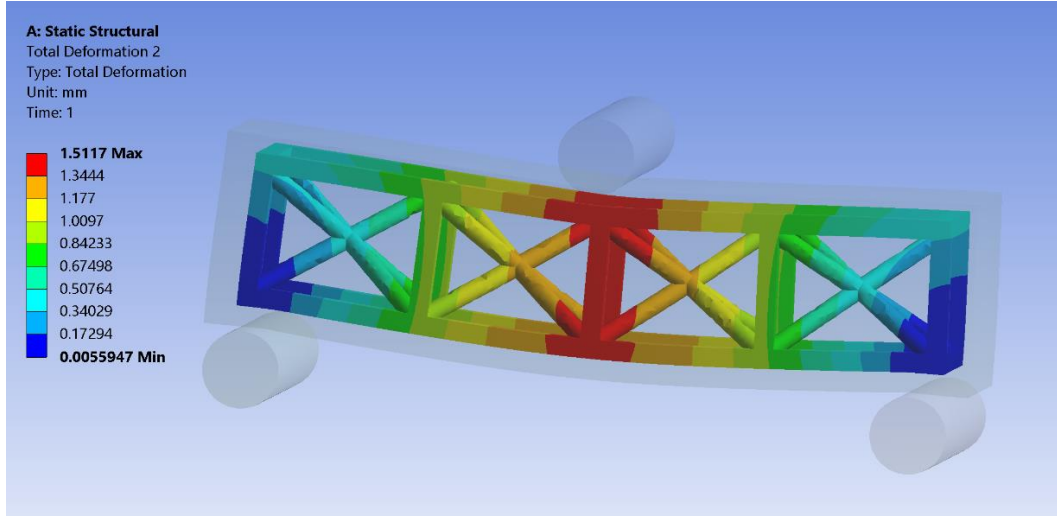


Şekil 124. PA6 GF30 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi

PA6 GF30 filamentine sahip çapraz bağlı donatılı kirişin sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, kirişteki maksimum deformasyon miktarının 1.58 mm olduğu görülmüştür. Donatı yapısı için ise bu değer 1.511 mm olmaktadır (Şekil 125-a, Şekil 125-b).



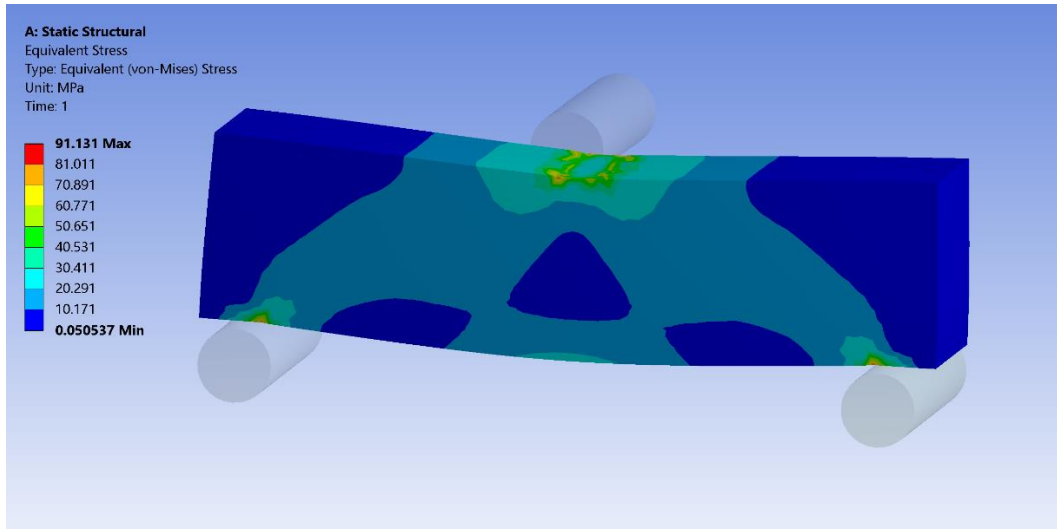
a)



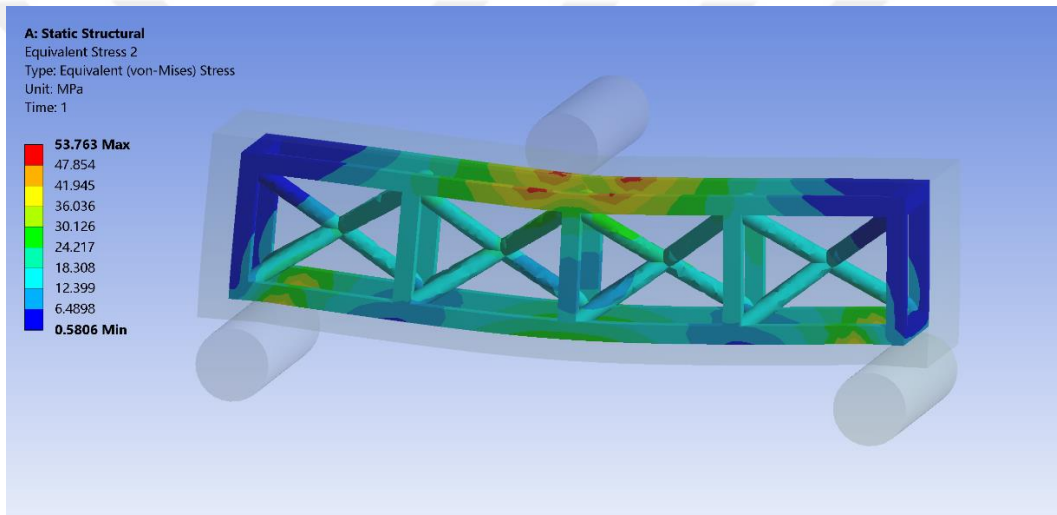
b)

Şekil 125. PA6 GF30 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi

PA6 GF30 çapraz bağlı donatılı kirişte, en yüksek gerilme değeri yaklaşık 91.13 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer, ABS PLUS kirişlere göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. PA6 GF30 kirişin cam elyaf katkısı sayesinde oldukça rijit bir davranış sergilediği düşünülmektedir (Şekil 126-a). Gerilme dağılımı kiriş boyunca dengeli bir şekilde dağılmıştır. Bu durumun, çapraz bağlı donatının yük aktarımına katkı sağladığı ve kiriş içerisinde gerilme yığılmalarını azalttığı düşünülmektedir. PA6 GF30 çapraz bağlı donatıda gözlemlenen maksimum gerilme değeri 53.76 MPa olarak tespit edilmiştir (Şekil 126-b). PA6 GF30 çapraz bağlı donatı, yüksek elastisite modülü sayesinde kirişin taşıma kapasitesine büyük ölçüde katkı sağlamış ve yükün hem kiriş hem de donatı tarafından paylaşıldığını ortaya koymuştur. Bu durum sonucunda maksimum yük altında iyi bir deformasyon sağlamıştır.



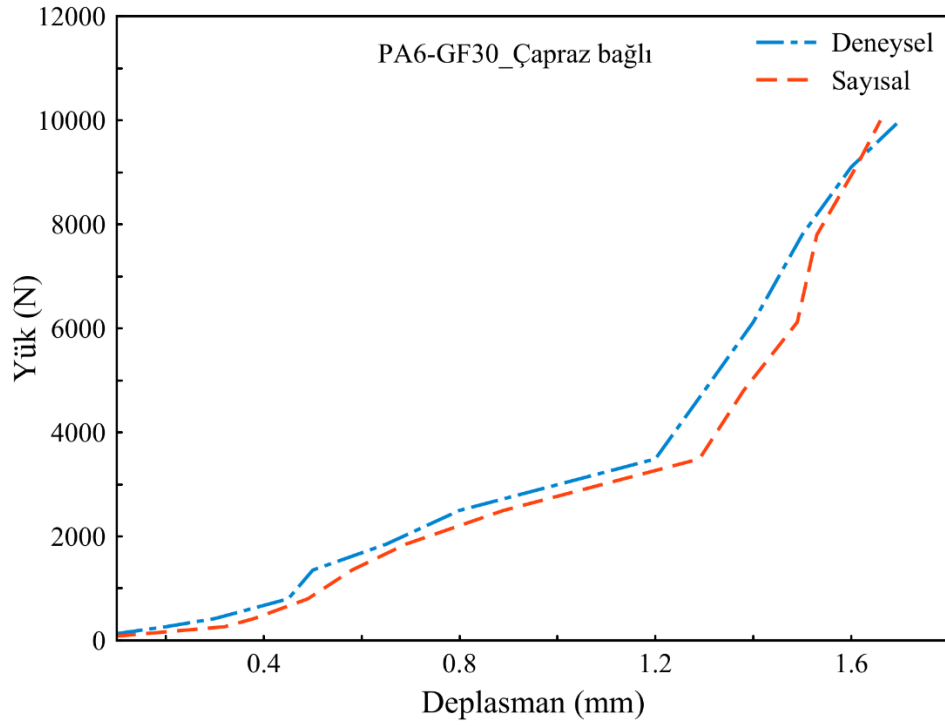
a)



b)

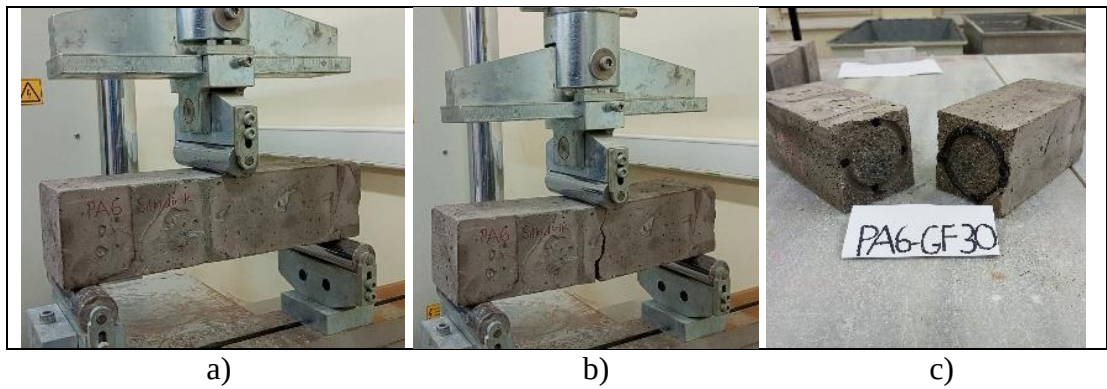
Şekil 126. PA6 GF30 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi

PA6 GF30 çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait yük deformasyon analizleri Şekil 127'de görülmektedir. 10000 N yük altında, PA6 GF30 çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte deneysel ve sayısal sonuçlar incelendiğinde deneysel maksimum deformasyon değeri 1.7 mm iken, sayısal maksimum deformasyon değerinin 1.58 mm olduğu görülmektedir (Şekil 127).



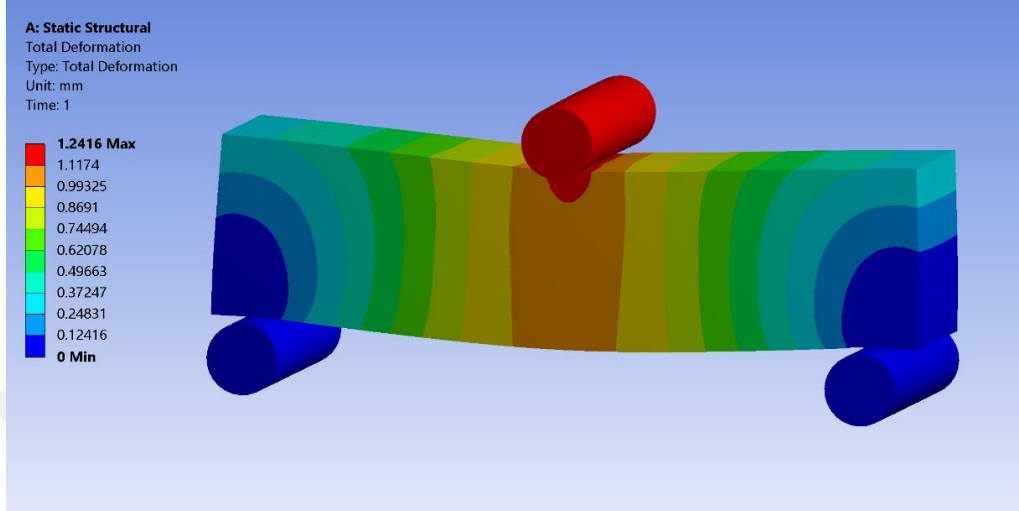
Şekil 127. PA6 GF30 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri

PA6 GF30 filamentine sahip küresel donatının, kiriş üzerinde çatlama görüldükten sonra orta açıklıkta tek bir büyük çatlak geliştiği söylenebilir. Diğer kirişlerde olduğu gibi bu kirişte de yükün uygulandığı eksen boyunca gelişen bu çatlak kırılma anına kadar ilerlemiştir (Şekil 128).

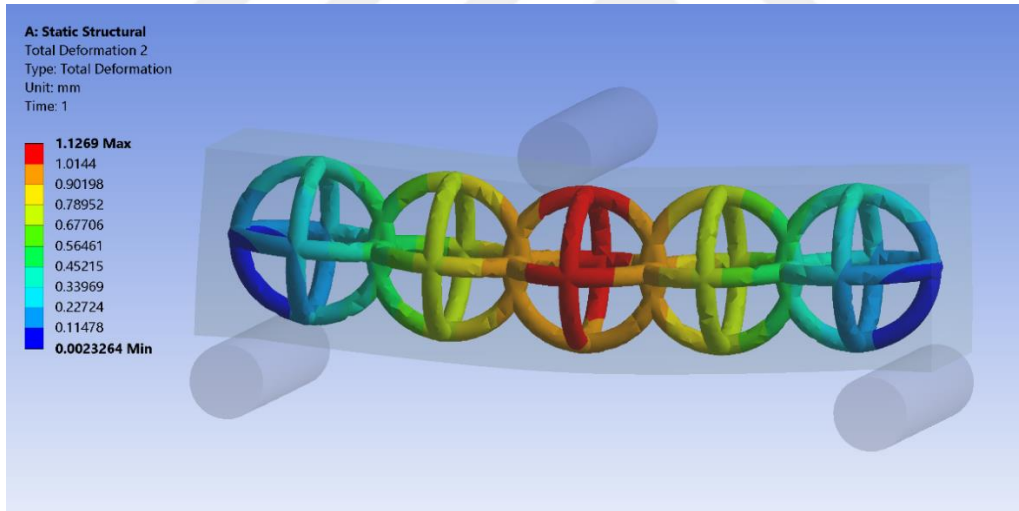


Şekil 128. PA6 GF30 küresel donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi

PA6 GF30 filamentine sahip küresel donatılı kirişin sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, kirişteki maksimum deformasyon miktarının 1.19 mm, donatı yapısı için ise bu değerin 1.126 mm değerinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 129-a, Şekil 129-b).



a)

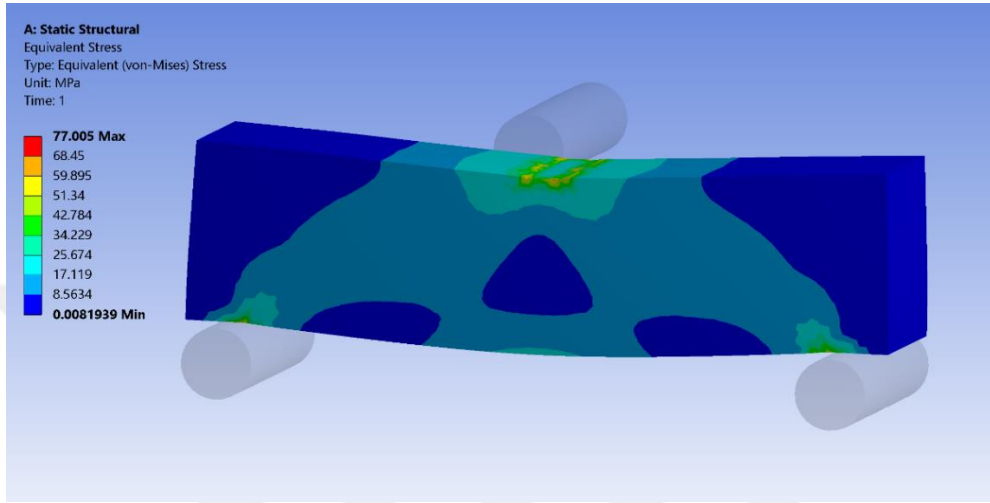


b)

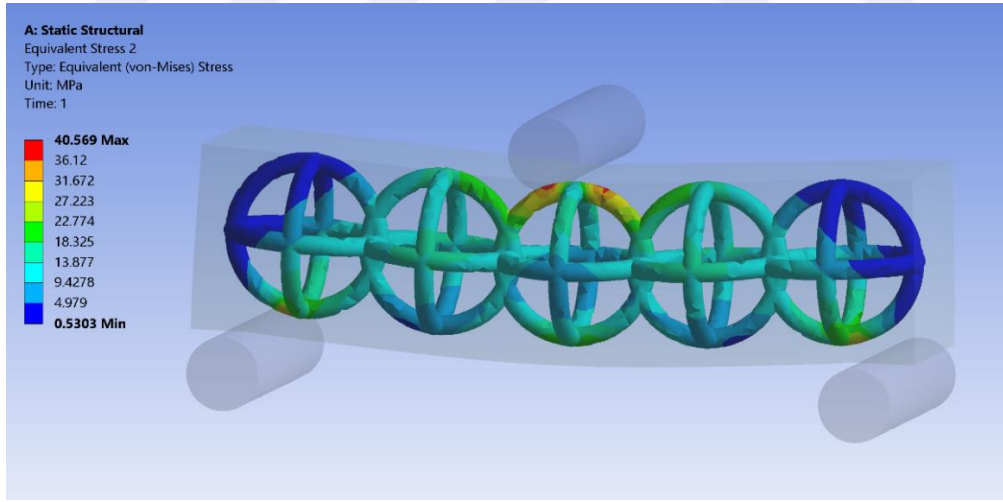
Şekil 129. PA6 GF30 küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi

PA6 GF30 küresel donatılı kiriş üzerinde yapılan analizlerde, maksimum gerilme değeri yaklaşık 77 MPa olarak belirlenmiştir. Bu gerilme değeri, PA6 GF30 malzemesinin cam elyaf takviyesi sayesinde yüksek dayanım sağladığını göstermektedir.

Gerilme dağılımı genel olarak orta açıklıkta ve alt kısımlarda yoğunlaşmıştır (Şekil 130-a). PA6 GF30 küresel donatıda hesaplanan maksimum gerilme değeri yaklaşık 40.56 MPa elde edilmiştir (Şekil 130-b). PA6 GF30 küresel donatı, yüksek elastisite modülü ile yük taşımada ve deformasyon bakımından etkili olmuştur. Donatının, kirişin rijitliğini artırarak yapının genel dayanımına doğrudan katkı sağladığı düşünülmektedir.



a)

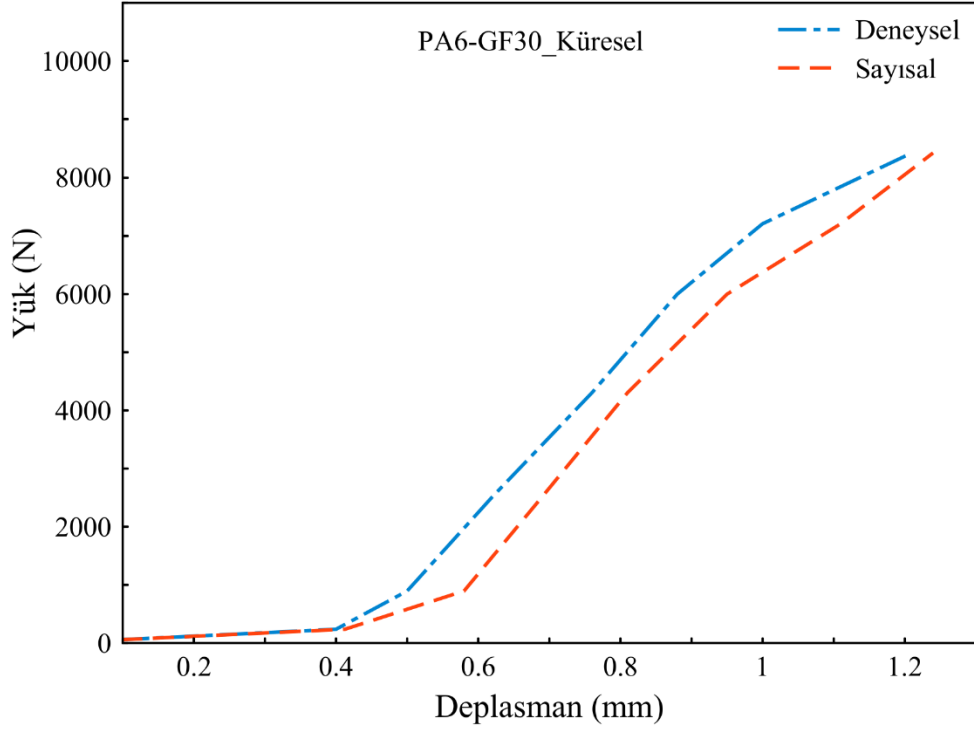


b)

Şekil 130. PA6 GF30 küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi

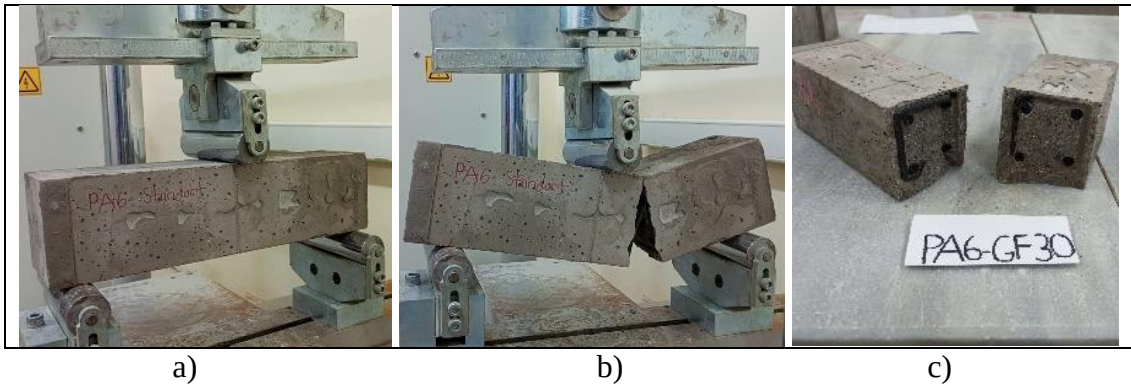
PA6 GF30 küresel donatılı geopolimer kirişe ait yük deformasyon analizleri Şekil 131'de görülmektedir. 8423 N yük altında, PA6 GF30 küresel donatılı geopolimer kirişte

deneysel ve sayısal sonuçlar incelendiğinde, deneysel maksimum deformasyon değeri 1.21 mm iken, sayısal maksimum deformasyon değeri 1.19 mm olarak ölçülmüştür.



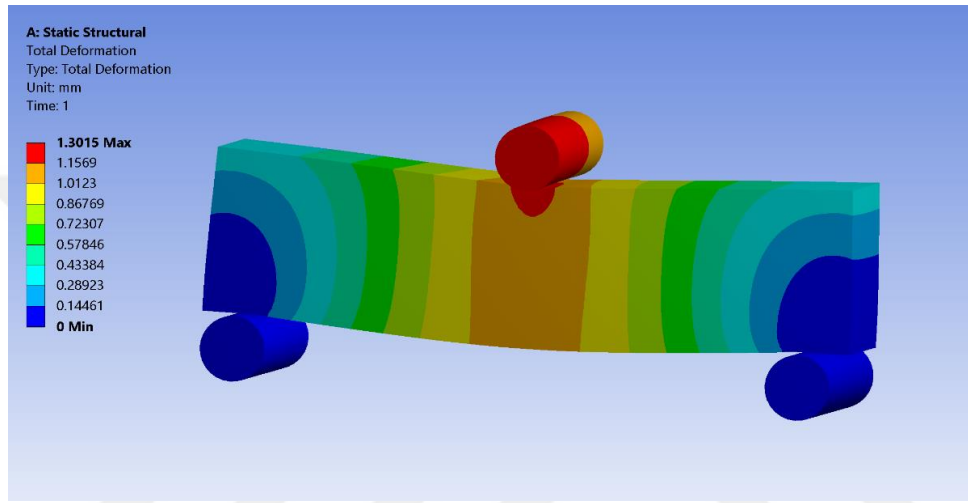
Şekil 131. PA6 GF30 küresel donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri

PA6 GF30 filamentine sahip standart donatının, kiriş üzerinde çatlama görüldükten sonra orta açıklıkta tek bir büyük çatlak geliştiği söylenebilir. Diğer kirişlerde olduğu gibi bu kirişte de yükün uygulandığı eksen boyunca gelişen bu çatlak kırılma anına kadar ilerlemiştir (Şekil 132).

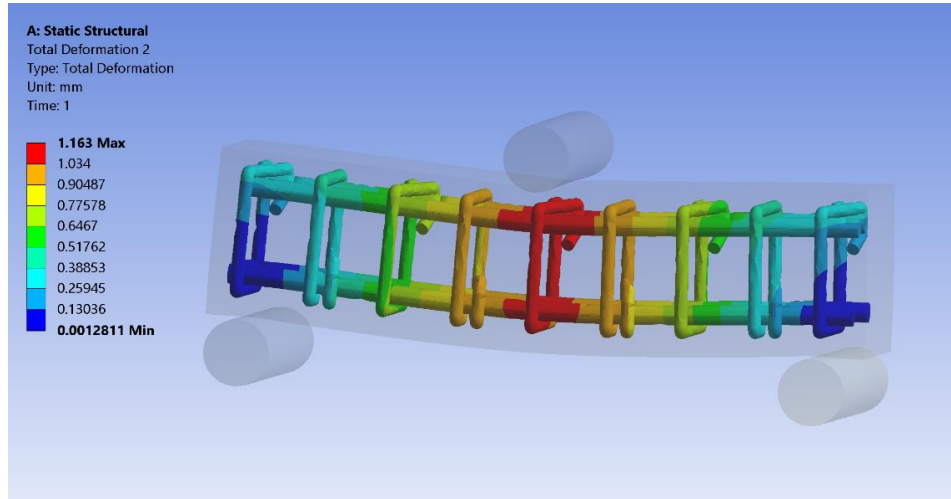


Şekil 132. PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi

PA6 GF30 filamentine sahip standart donatılı kirişin sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, kirişteki maksimum deformasyon miktarı 1.22 mm olarak tespit edilmiştir. Donatı yapısı için ise bu değerin 1.163 mm olduğu görülmektedir (Şekil 133-a, Şekil 133-b).



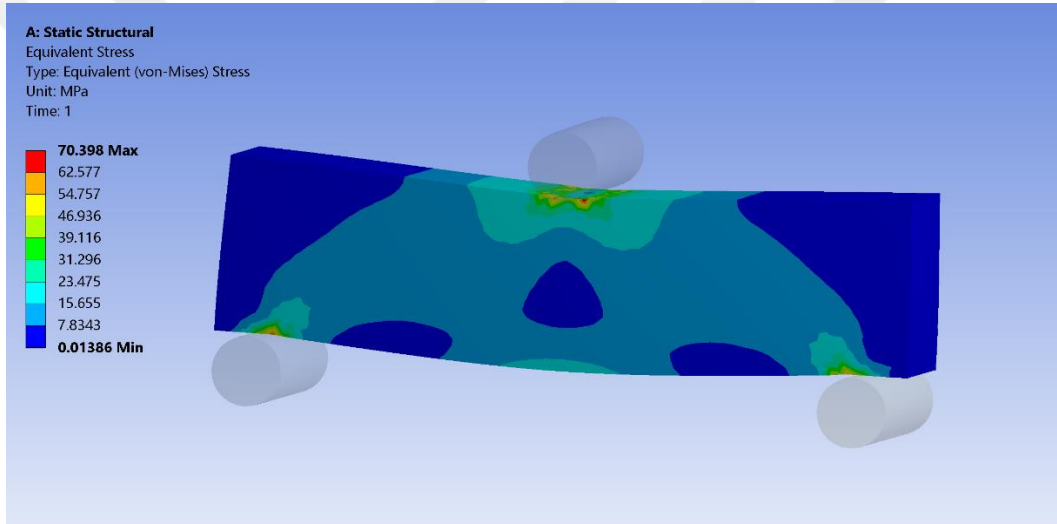
a)



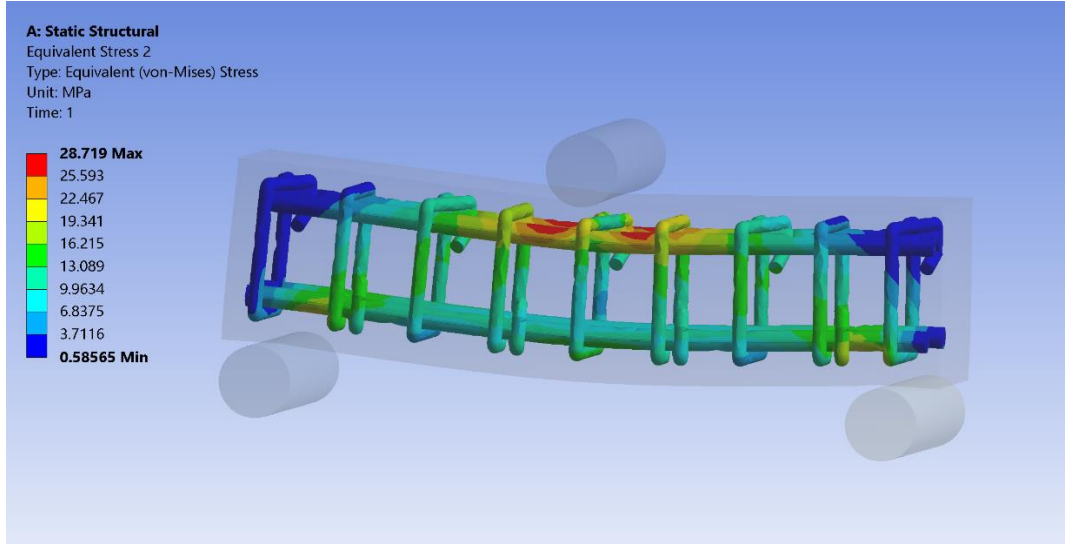
b)

Şekil 133. PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi

PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişte maksimum gerilme değeri yaklaşık 70.39 MPa olarak tespit edilmiştir (Şekil 134-a). PA6 GF30 standart donatılı kirişi diğer kirişlerle karşılaştırıldığında (çapraz bağlı 91 MPa, küresel 77 MPa), standart yapının en düşük gerilme dayanımını gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durum, standart donatının maksimum yük altında daha az etkili bir gerilme dağılımı oluşturduğu düşünülmektedir. PA6 GF30 standart donatıdan elde edilen 28.71 MPa'lık maksimum gerilme, bu malzemenin yük paylaşımında etkisinin daha az olduğunu, gerilmenin büyük kısmının kiriş tarafından taşındığını göstermektedir (Şekil 134-b).



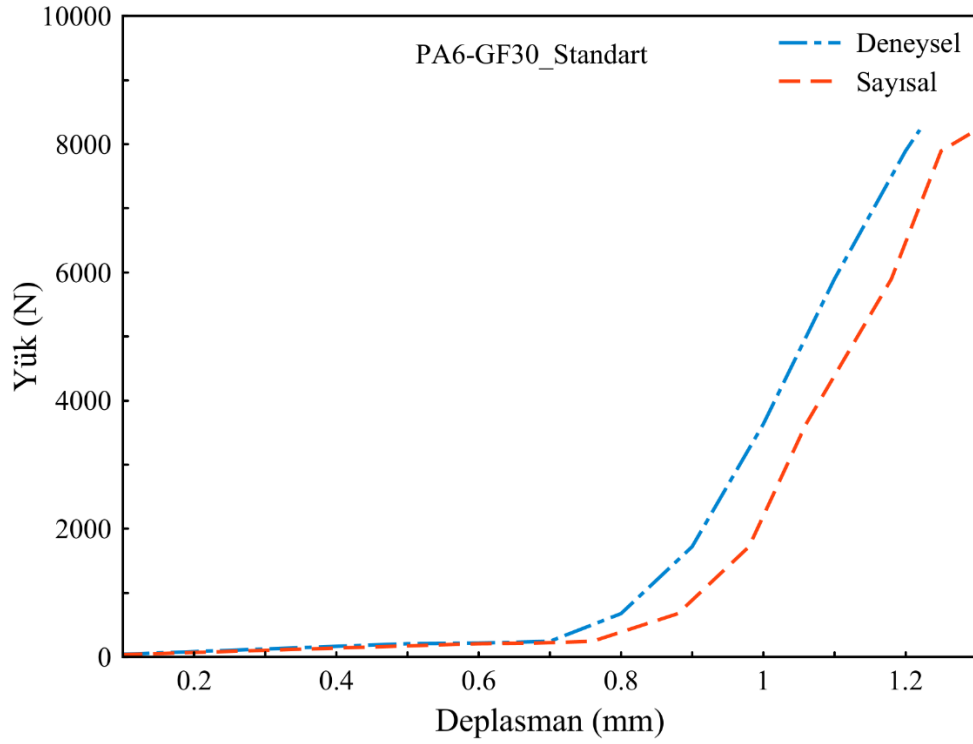
a)



b)

Şekil 134. PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi

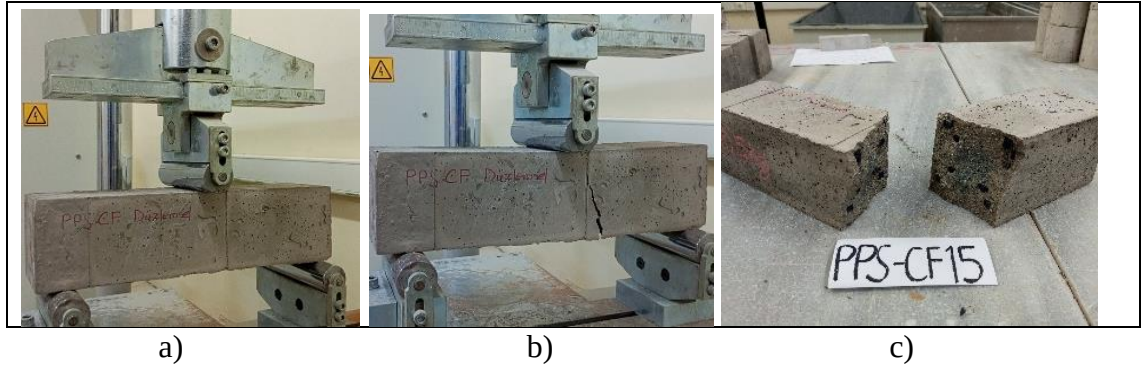
PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişe ait yük deformasyon analizleri Şekil 135'te görülmektedir. 8224 N yük altında, PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişte deneysel ve sayısal sonuçlar incelendiğinde, deneysel maksimum deformasyon değeri 1.22 mm iken sayısal maksimum deformasyon değerinin 1.22 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 135. PA6 GF30 standart donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri

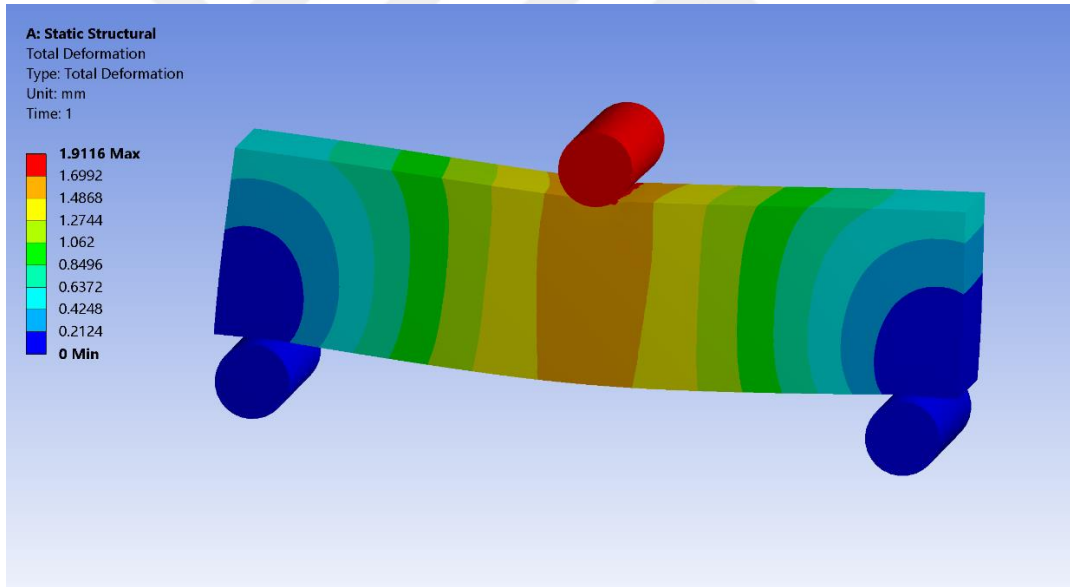
Son olarak eğilmede çekme deneyleri PPS CF15 filamentinden üretilmiş üç farklı donatı geometrisine (çapraz bağlı, küresel ve standart) sahip kirişlerde çatlak oluşumu, kırılma ve ayrışma aşamaları incelenmiştir. PPS CF15 filament yapısına sahip çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte kırılma öncesi, kırılma anı ve kırılma sonrasına ait şekilleri göstermektedir. Şekil 136, PPS CF15 çapraz bağlı geopolimer kirişe ait kiriş deformasyon ve donatı deformasyon analizini göstermektedir. Şekil 137, PPS CF15 çapraz bağlı geopolimer kirişe ait kiriş gerilmesi ve donatı gerilmesi analizini göstermektedir. Şekil 138 ise tek noktadan (orta noktadan) yükleme yapılan kirişte oluşan deplasman değişimlerini göstermektedir.

PPS CF15 filamentine sahip çapraz bağlı donatının, kiriş üzerinde çatlama görüldükten sonra orta açıklıkta tek bir büyük çatlak geliştiği söylenebilir. Yükün uygulandığı eksen boyunca gelişen bu çatlak kırılma anına kadar ilerlemiştir (Şekil 136).

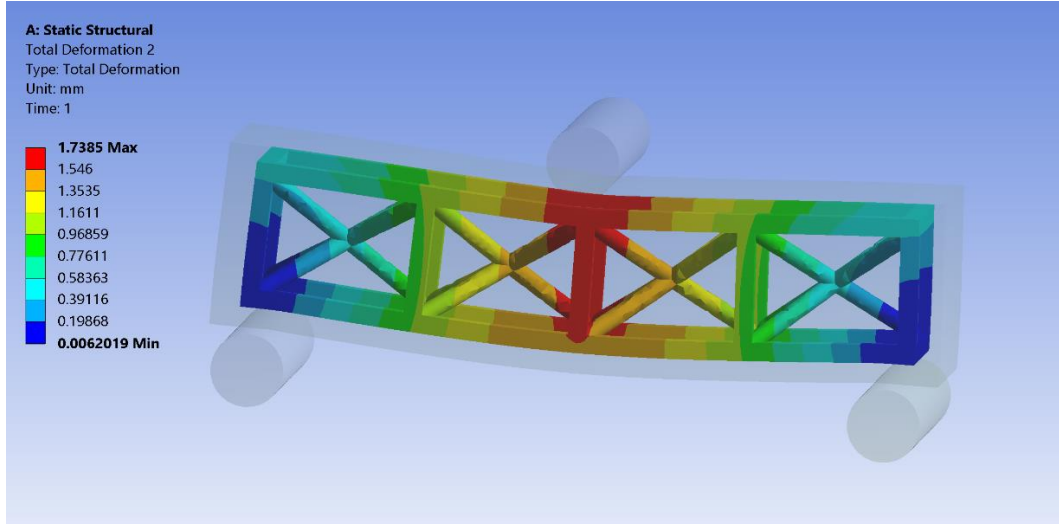


Şekil 136. PPS CF15 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi

PPS CF15 filamentine sahip çapraz bağlı donatılı kirişin sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, kirişteki maksimum deformasyon miktarının 1.82 mm, donatı yapısı için ise bu değerin 1.738 mm olduğu belirlenmiştir (Şekil 137-a, Şekil 137-b).



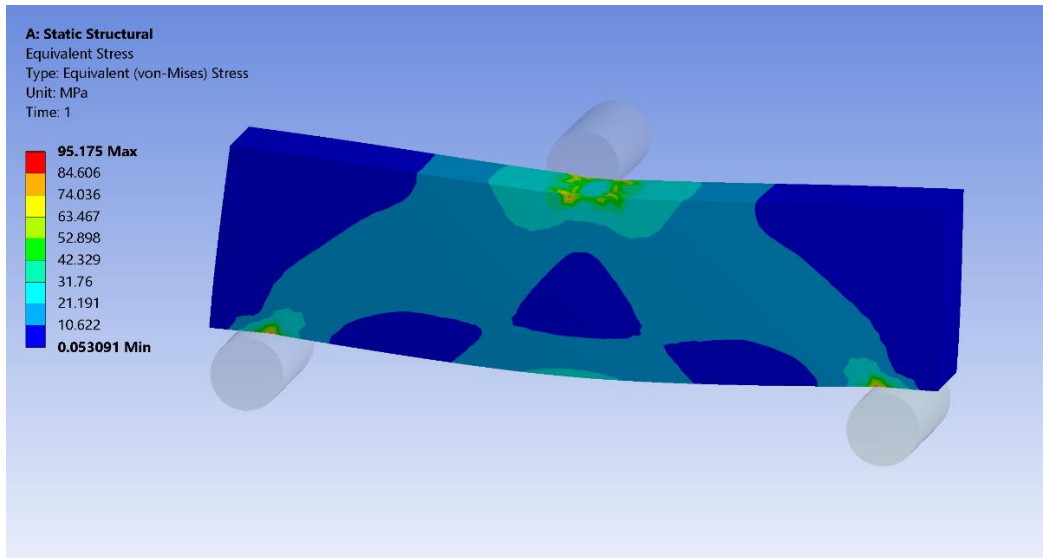
a)



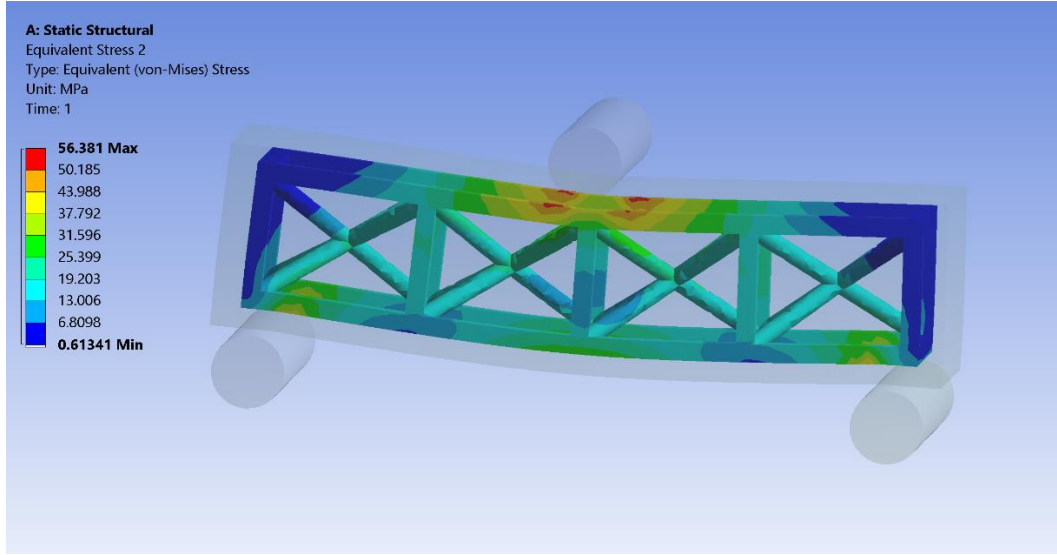
b)

Şekil 137. PPS CF15 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi

PPS CF15 çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte maksimum gerilme değeri yaklaşık 95.17 MPa olarak tespit edilmiştir (Şekil 138-a). PPS CF15 çapraz bağlı donatıdaki maksimum gerilme yaklaşık 56.38 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 138-b). PPS CF15 çapraz bağlı donatıdan elde edilen bu değer ile çapraz bağlı donatının yük paylaşımına etkisinin olduğunu düşünülmektedir.



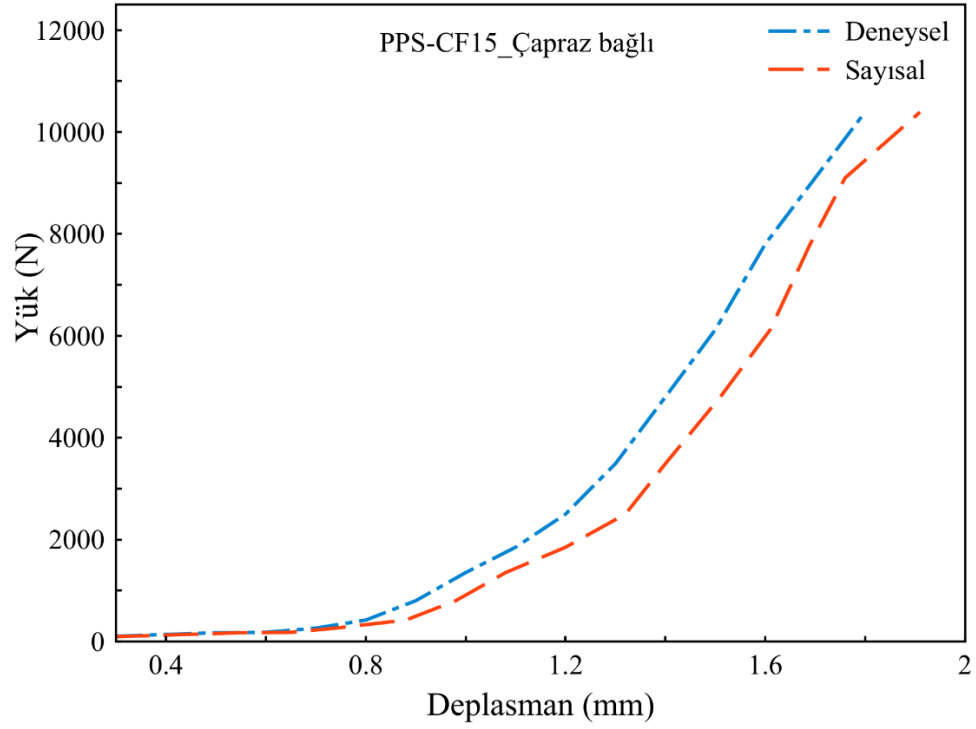
a)



b)

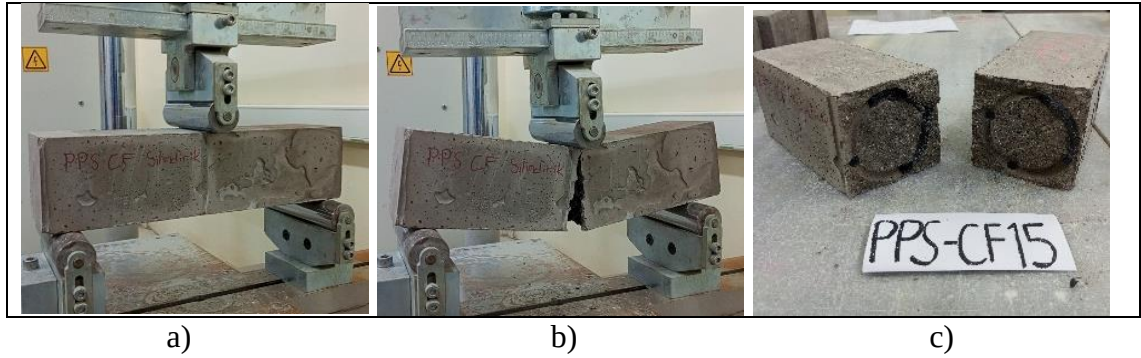
Şekil 138. PPS CF15 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi

PPS CF15 çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait yük deformasyon analizleri Şekil 139'da görülmektedir. 10392 N yük altında, PPS CF15 çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişte deneysel ve sayısal sonuçlar incelendiğinde, deneysel maksimum deformasyon değeri 1.8 mm iken sayısal maksimum deformasyon değerinin 1.82 mm olduğu tespit edilmiştir. Tek eksenel uygulanan yük-deformasyon eğrisi incelendiğinde ise eksenel yük altında çapraz bağlı donatılı modelin bütün filament çalışmalarında en yüksek yük taşıma kapasitene ulaştığı görülmüştür. Diğer donatı türleri ile kıyaslandığında, çapraz bağlı donatılı geopolimer numunelerin sahip oldukları gerilme alanı sayesinde elastik deformasyon aşamasında çoğu alanın sıkıştırıldığını ve yanal genişlemenin sınırlandırıldığını söylenebileriz (Hao vd., 2023).



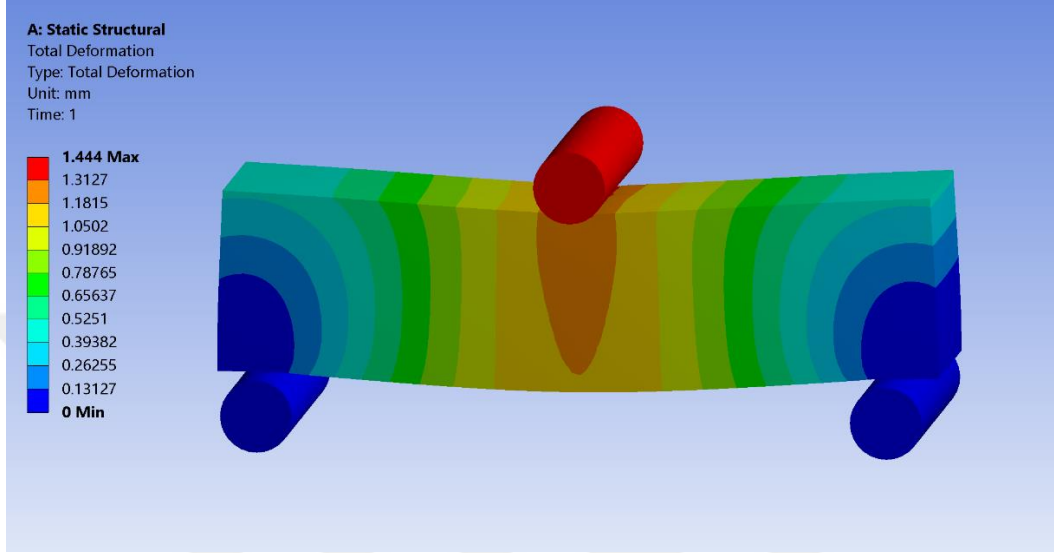
Şekil 139. PPS CF15 Çapraz bağlı donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri

PPS CF15 filamentine sahip küresel donatının, kiriş üzerinde çatlama görüldükten sonra orta açıklıkta tek bir büyük çatlak geliştiği söylenebilir. Yükün uygulandığı eksen boyunca gelişen bu çatlak, kırılma anına kadar ilerlemiştir (Şekil 140).

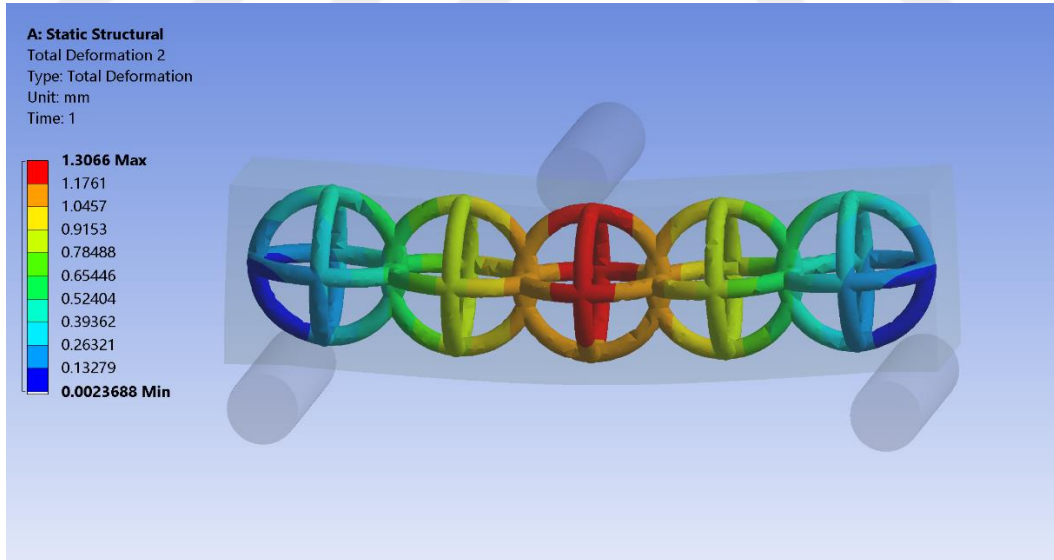


Şekil 140. PPS CF15 küresel donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi

PPS CF15 filamentine sahip küresel donatılı kirişin sayısal analiz sonuçları incelendiğinde ise, kirişteki maksimum deformasyon miktarının 1.377 mm olduğu görülmektedir. Donatı yapısı için ise bu değerin 1.306 mm ile sınırlandığı tespit edilmiştir (Şekil 141-a,Şekil 141-b).



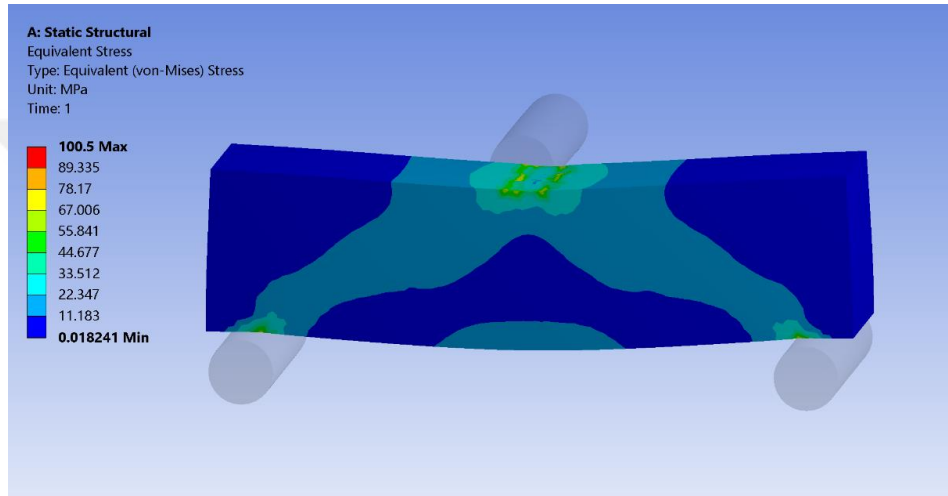
a)



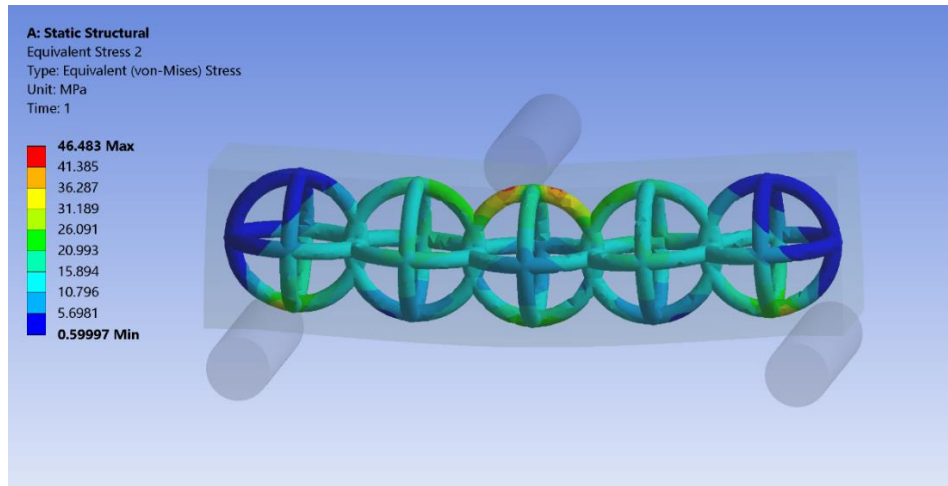
b)

Şekil 141. PPS CF15 küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi

PPS CF15 küresel donatılı geopolimer kirişte maksimum gerilme değeri yaklaşık 100.5 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 142-a). Bu değer, kirişin yükü büyük oranda taşıdığını göstermektedir. Küresel yapıda kiriş, yük altında daha fazla zorlanmakta ve gerilmenin çoğu kiriş üzerinde oluşmaktadır. PPS CF15 küresel donatıda maksimum gerilme değeri 46.48 MPa olarak tespit edilmiştir (Şekil 142-b). Bu değer, donatının yük taşıma görevine katkı sağladığı ancak kiriş kadar etkili olmadığını göstermektedir. Küresel donatı yapısı, kirişe göre daha az zorlanmakta, yani yükün büyük kısmı kiriş üzerinde oluşmaktadır.



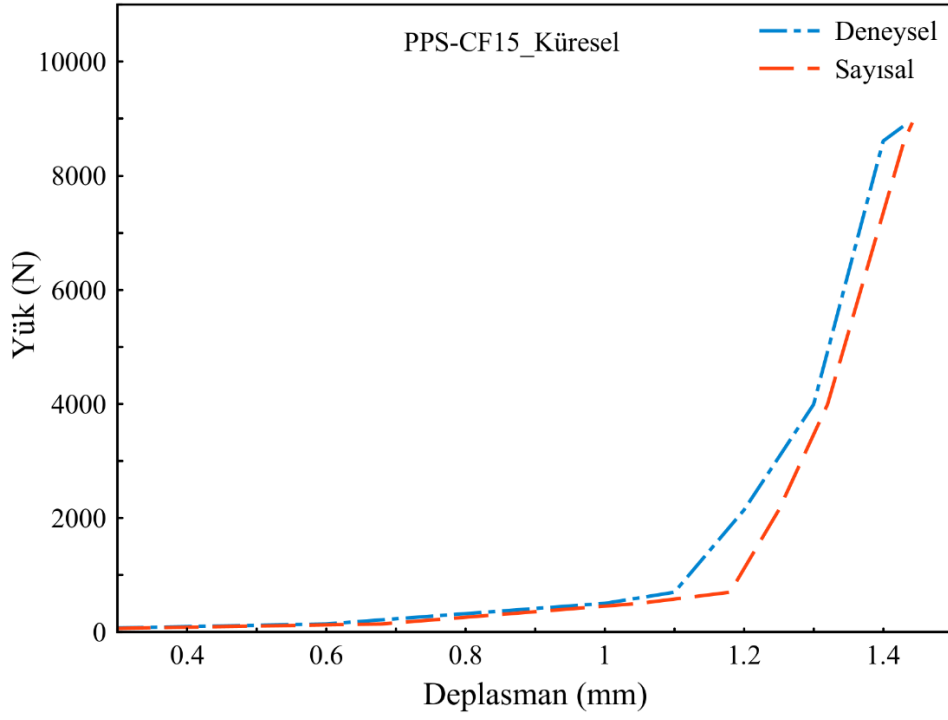
a)



b)

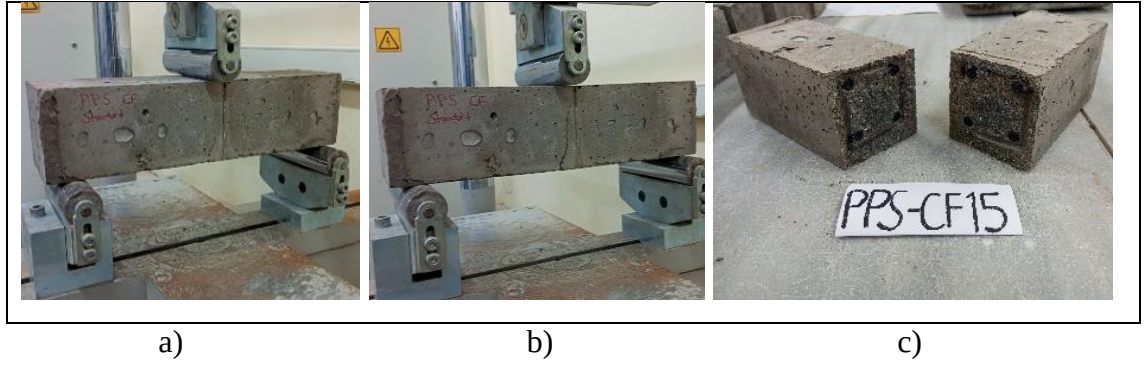
Şekil 142. PPS CF15 küresel donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi

PPS CF15 küresel donatılı donatılı geopolimer kirişe ait yük deformasyon analizleri Şekil 143'te görülmektedir. 8932 N yük altında, PPS CF15 küresel donatılı geopolimer kirişte deneysel ve sayısal sonuçlar incelendiğinde, deneysel maksimum deformasyon değeri 1.44 mm iken sayısal maksimum deformasyon değeri 1.37 mm'dir.



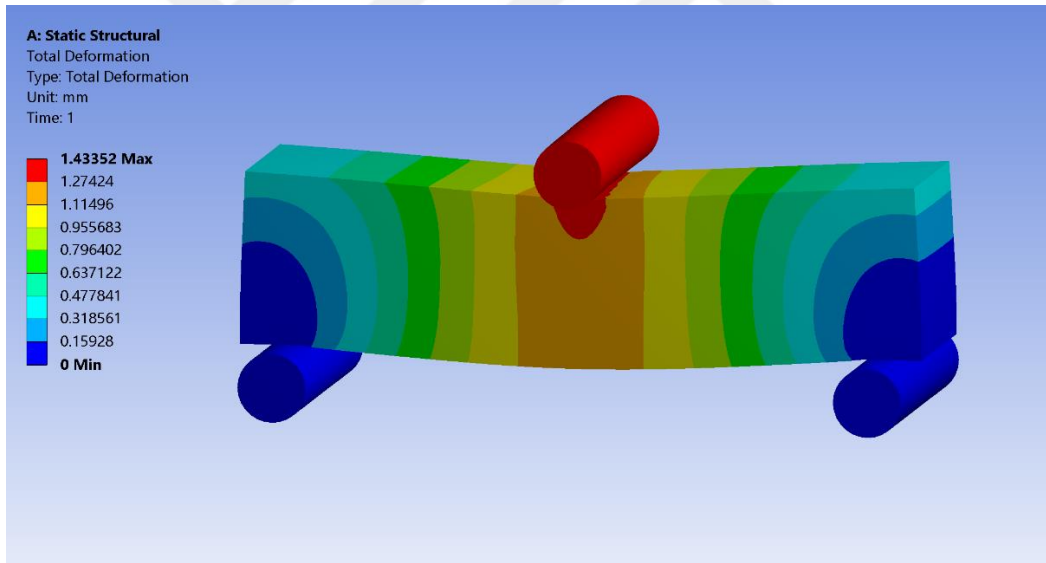
Şekil 143. PPS CF15 küresel donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri

PPS CF15 filamentine sahip standart donatının, kiriş üzerinde çatlama görüldükten sonra orta açıklıkta tek bir büyük çatlak geliştiği söylenebilir. Yükün uygulandığı eksen boyunca gelişen bu çatlak kırılma anına kadar ilerlemiştir (Şekil 144).

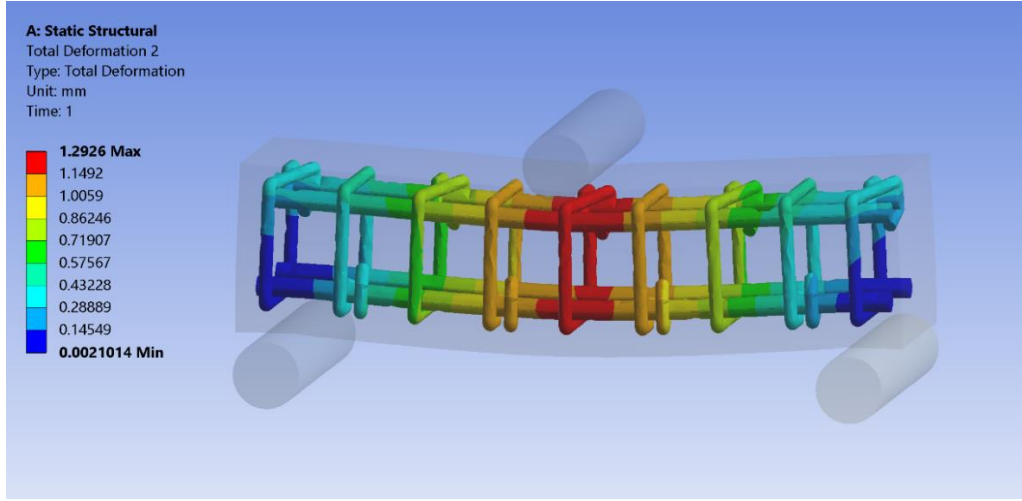


Şekil 144. PPS CF15 standart donatılı geopolimer kirişte a) kırılma öncesi b) kırılma anı c) kırılma sonrasına ait eğilmede çekme deneyi

PPS CF15 filamentine sahip standart donatılı kirişin sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, kirişteki maksimum deformasyon miktarının 1.36 mm, donatı yapısı için ise bu değerin 1.292 mm ile sınırlandığı görülmüştür (Şekil 145-a, Şekil 145-b).



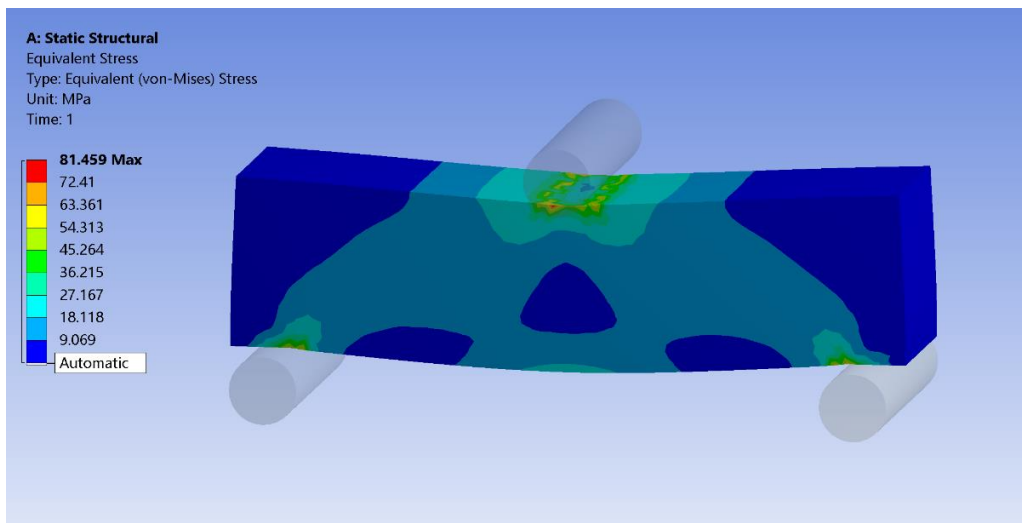
a)



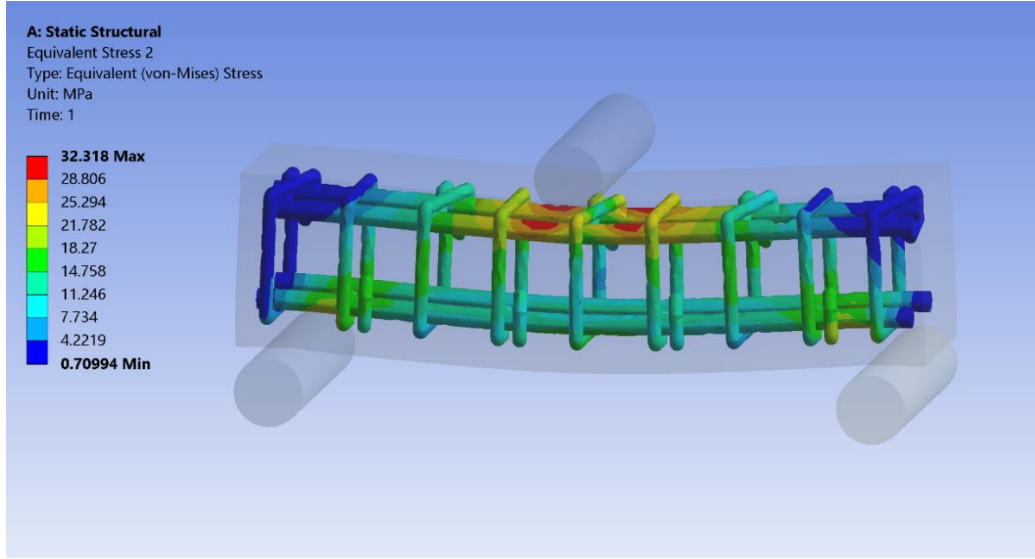
b)

Şekil 145. PPS CF15 standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş deformasyon b) donatı deformasyon analizi

PPS CF15 standart donatılı geopolimer kirişte maksimum gerilme değeri yaklaşık 81.45 MPa olarak tespit edilmiştir (Şekil 146-a). Bu değer, PPS CF15 malzemesi için oldukça yüksek bir gerilme değeridir. Yükün büyük kısmının kiriş tarafından taşındığını göstermektedir. Standart donatı yapısında, yük aktarımının büyük ölçüde kiriş üzerinde oluşması, donatı-matris etkileşiminin sınırlı olduğunu ve gerilme paylaşımının eşit olmadığını göstermektedir. PPS CF15 standart donatıda elde edilen maksimum eşdeğer gerilme 32.31 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 146-b).



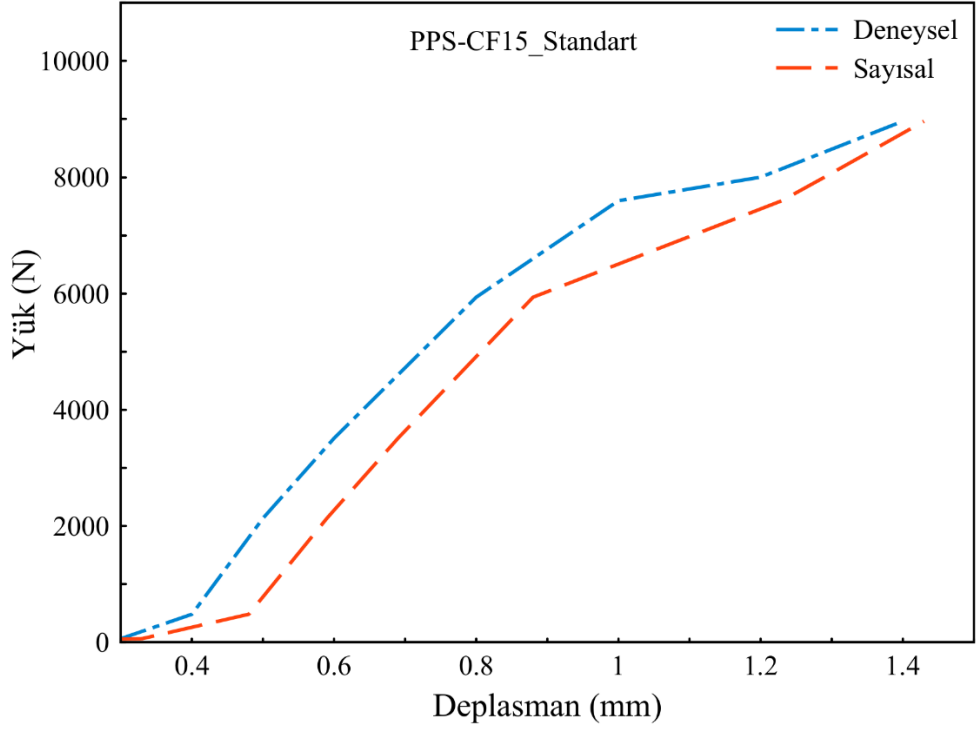
a)



b)

Şekil 146. PPS CF15 standart donatılı geopolimer kirişe ait a) kiriş gerilme b) donatı gerilme analizi

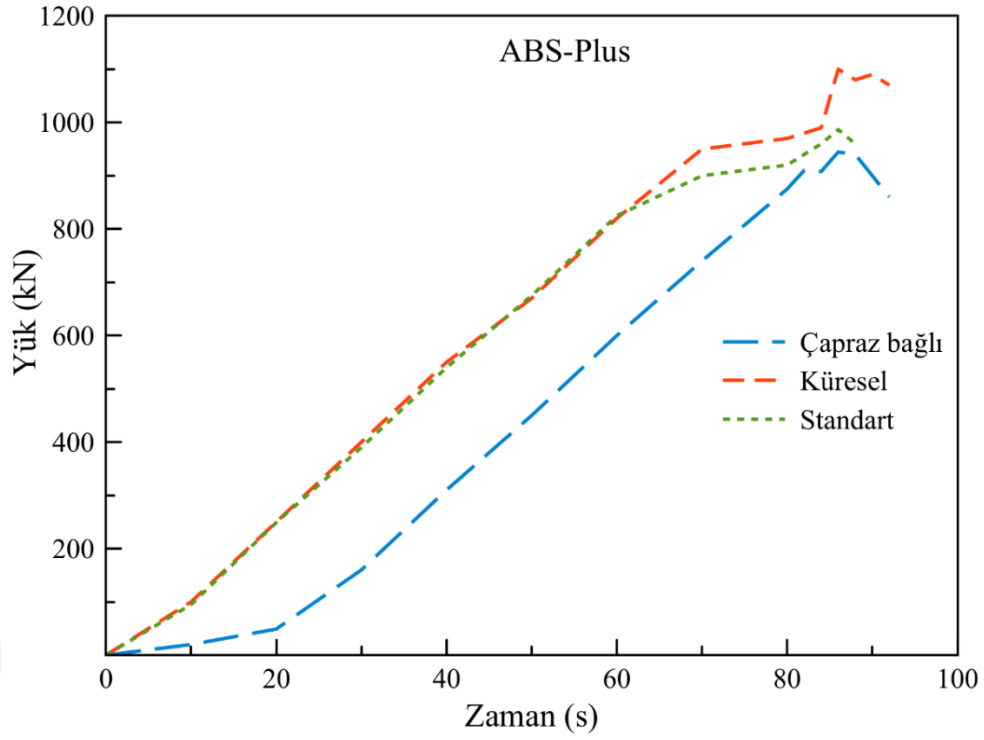
PPS CF15 standart donatılı donatılı geopolimer kirişe ait yük deformasyon analizleri Şekil 147'de görülmektedir. 8963 N yük altında, PPS CF15 standart donatılı geopolimer kiriş için yapılan analizler incelendiğinde, deneysel olarak maksimum deformasyon değerinin 1.4 mm, sayısal maksimum deformasyon değerinin ise 1.36 mm olduğu görülmüştür. Diğer taraftan PPS CF15 filamenti, filament türleri içerisinde en iyi performansı sergilemiştir. Bu durumun PPS CF15 filamentinin ABS Plus ve PA6 GF30 türlerine kıyasla üstün mekanik özelliklerinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir (Junaid vd., 2022).



Şekil 147. PPS CF15 standart donatılı geopolimer kirişe ait yük/deplasman eğrileri

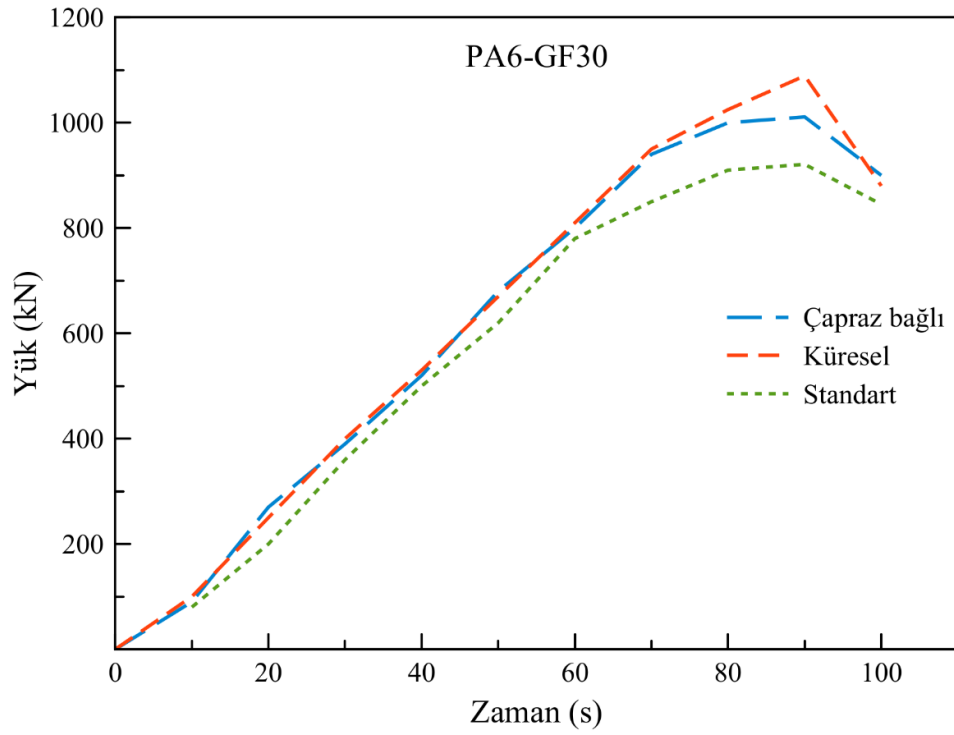
3.15. Kiriş Numunelerde Filamentlere Ait Yük Zaman Eğrileri

Bu bölümde üç farklı filament (ABS PLUS, PA6 GF30 ve PPS CF15) ve üç farklı donatı geometrisi (çapraz bağlı, küresel, standart) ile üretilmiş geopolimer kirişlerin zamana bağlı yük taşıma kapasiteleri incelenmiştir. ABS PLUS ile üretilen (çapraz bağlı küresel ve standart) filamentlere ait kuvvet zaman eğrisi (Şekil 148-a)'da gösterilmektedir. Küresel donatı en yüksek taşıma kapasitesine ulaşarak yaklaşık 1100 kN değerinde maksimum yük taşımıştır. Bu sonuç, küresel donatının kırılma öncesi daha yüksek kapasite sunduğunu göstermektedir. Standart donatı yaklaşık 950 kN yük taşıma kapasitesi ile orta düzey performans sergilemiştir. Çapraz bağlı donatı ise maksimum 944 kN kapasitesi ile en düşük yük taşıma kapasitesine sahip olmuştur.



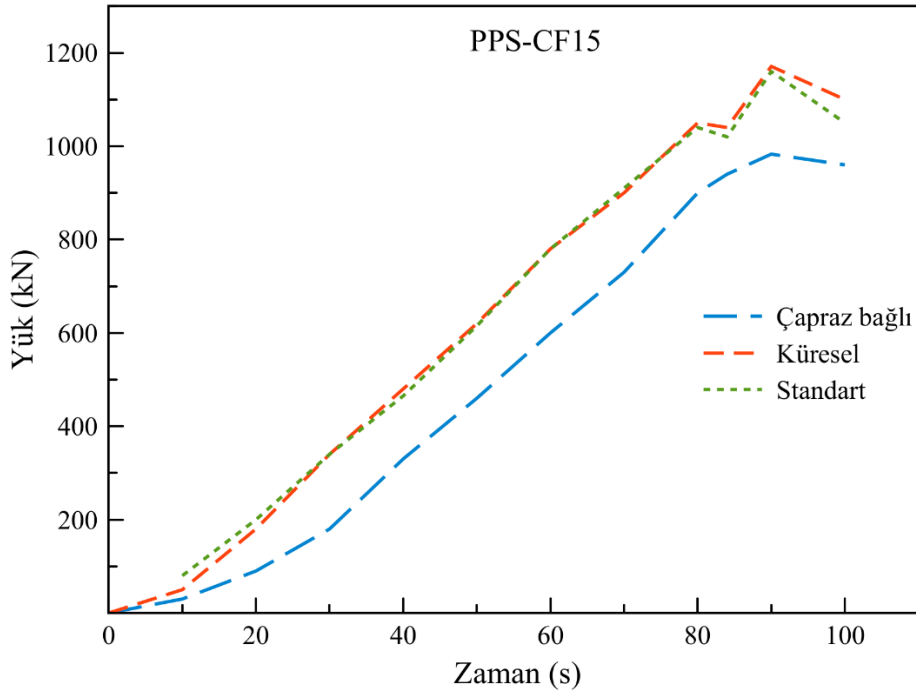
a)

PA6 GF30 küresel donatı 1025 kN ile maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Çapraz bağlı donatı 1000 kN, standart donatı ise 910 kN ile maksimum yük taşıma seviyesindedir. PA6-GF30 dengeli yük taşıma davranışı gösterirken, özellikle standart donatı, her aşamada daha düşük yük taşıma kapasitesine sahip olup en zayıf performansı göstermiştir (Şekil 148-b).



b)

PPS-CF15 filament ise karbon fiber katkısı sayesinde en yüksek taşıma kapasitesine 1171 KN değerinde, küresel donatı ile ulaşmıştır (Şekil 148-c). Çapraz bağlı donatı 983 KN ile standart donatı ise 1160KN ile maksimum taşıma gücüne sahiptir. Tepe yükü sonrası ani düşüşler, bazı filament-donatı kombinasyonlarında yapının ani kırılma davranışı sergilediğini göstermektedir.

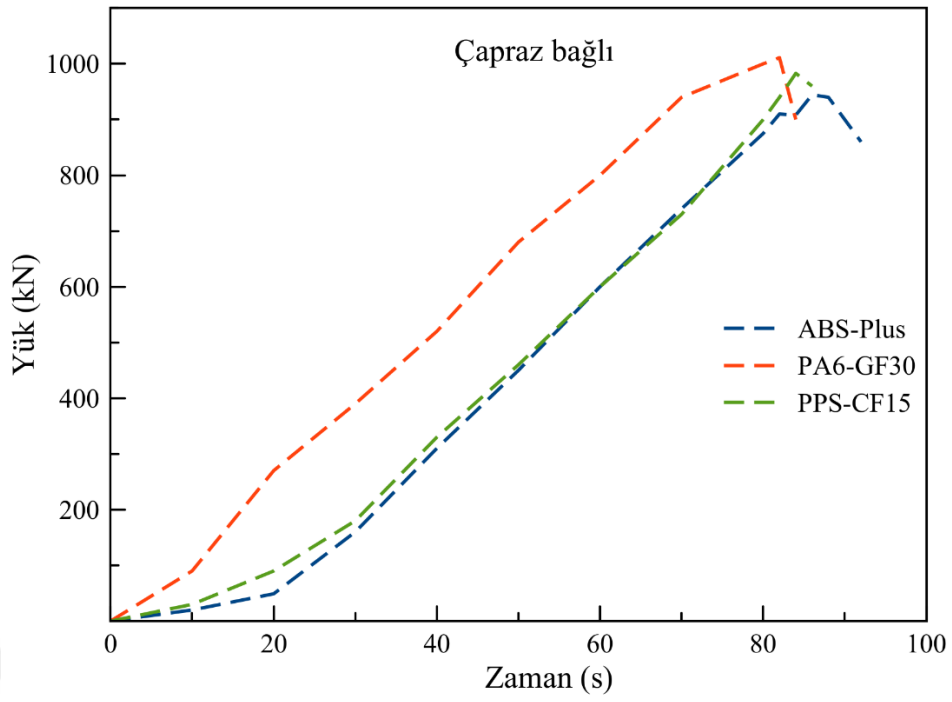


c)

Şekil 148. Farklı filament geometrilerinden oluşan geopolimer kirişlerde a)ABS PLUS b) PA6 GF30 c) PPS CF15 malzemelere ait Yük- Zaman grafikleri

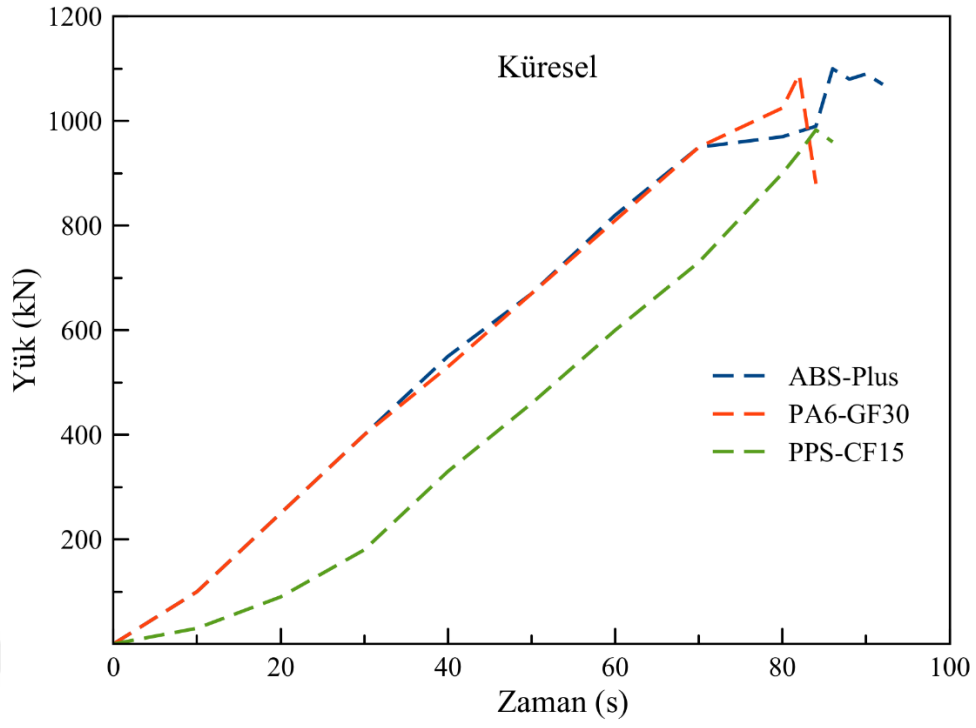
3.16. Kiriş Numunelerde Donatı Türlerine Göre Yük-Zaman Eğrileri

3 farklı donatı tipine sahip (çapraz bağlı, küresel, standart) geopolimer kirişlerde 3 farklı filamentin (ABS PLUS, PA6 GF30, PPS CF15) etkisini görmek amacıyla yük zaman eğrileri çizilmiştir (Şekil 149). Çapraz bağlı donatı tipinde en yüksek tepe yüküne PA6 GF30 filamenti sahipken PPS CF15 filamenti ikinci en yüksek tepe yüküne sahip olmuştur. ABS PLUS filamenti ise en düşük tepe yüküne sahip olmuştur (Şekil 149-a).



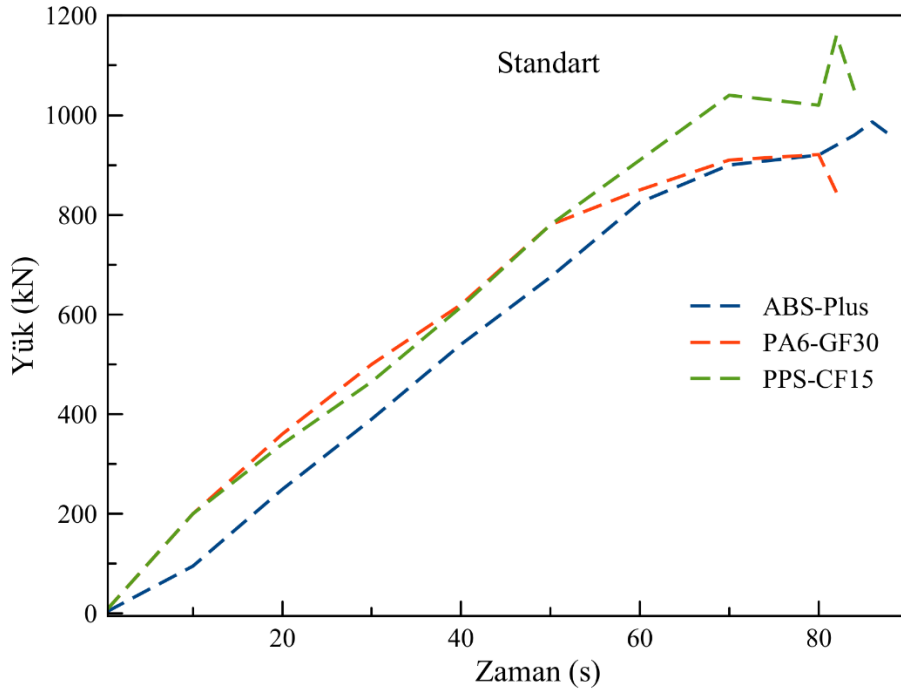
a)

Küresel donatı tipine sahip kirişte, 3 farklı filament türüne ait yük zaman eğrisi (Şekil 149-b)'de görülmektedir. Küresel donatı tipinde en yüksek tepe yüküne sahip filament ABS PLUS ve PA6 GF30 filamentinde oluşurken, en düşük tepe yükü ise PPS CF15 filamentinde elde edilmiştir.



b)

Standart donatı tipine sahip kirişte 3 farklı filament türüne ait yük zaman eğrisi (Şekil 149-c)'de görülmektedir Standart donatı tipinde en yüksek tepe yüküne sahip filament PPS CF15 iken en düşük tepe yüküne sahip filament PA6 GF30 olduğu belirlenmiştir.

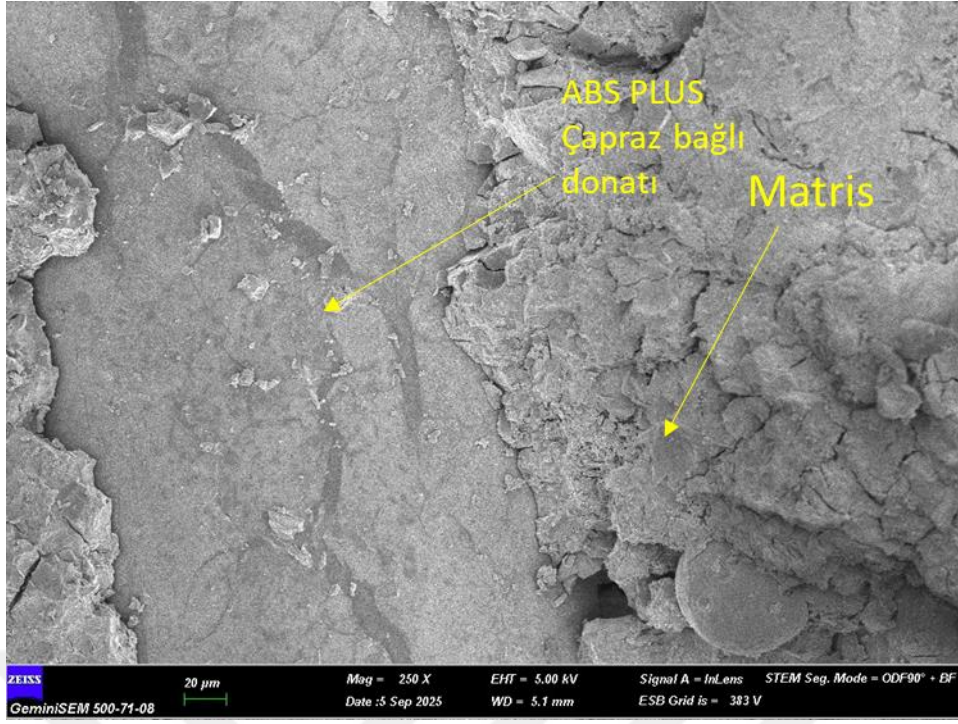


c)

Şekil 149. Farklı donatılardan oluşan a)çapraz bağlı b)küresel ve c) standart geopolimer kirişlerde filamentlere ait Yük –Zaman grafikleri

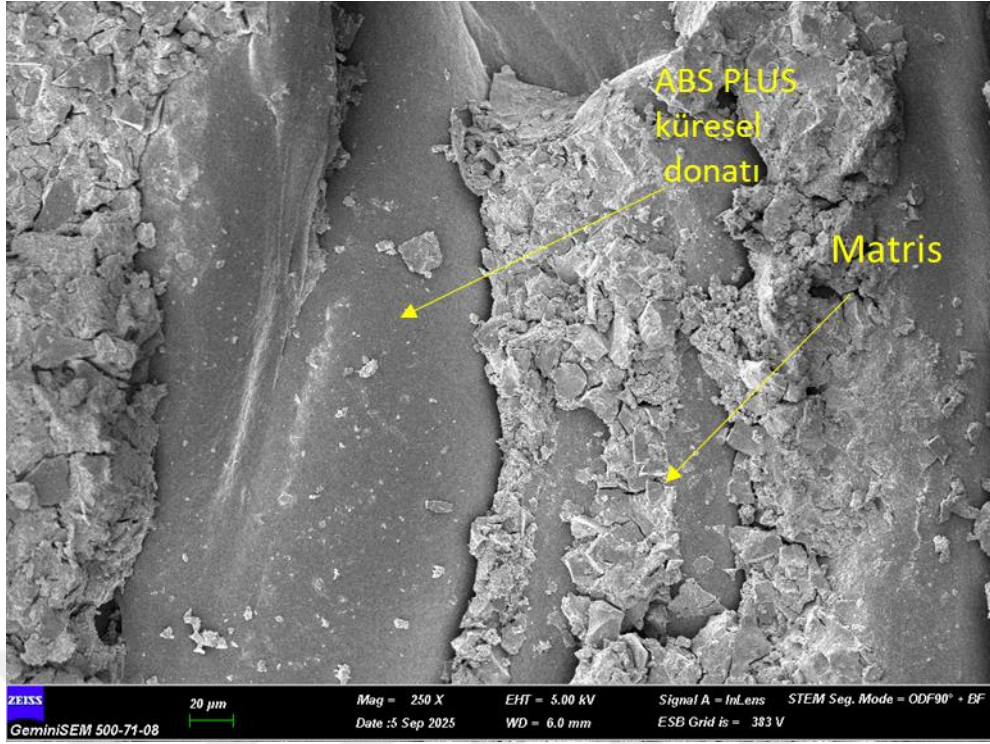
3.17. Kiriş Numunelerde Donatı –Matris Arasındaki SEM Analizleri

ABS PLUS çapraz bağlı donatının 250X büyütmede SEM analizi gerçekleştirilmiştir. ABS PLUS çapraz bağlı donatı ile geopolimer matris arasındaki bağ SEM analizinde görülmektedir (Şekil 150). 7817 N yük altında 1.48 mm deformasyon oluşması ile birlikte çapraz bağlı donatının da yükü taşıdığı düşünülmektedir. Matris yüzeyinde homojen bir dağılımla birlikte mikro çatlakların oluştuğu gözlemlenmektedir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde ise aderans eksikliğine bağlı bir sıyrılmanın oluşmadığı tespit edilmiştir.



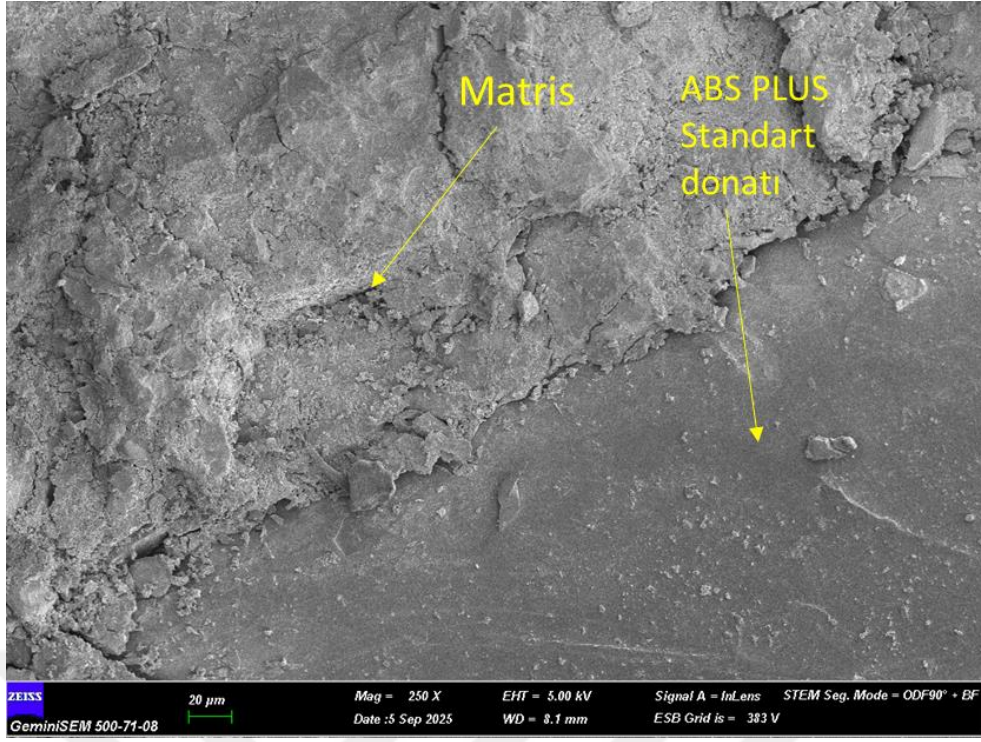
Şekil 150. ABS PLUS çapraz bağlı donatının SEM analizi

ABS PLUS küresel donatı ile matris arasındaki SEM analizi Şekil 151'de görülmektedir. 5014 N yük altında 1.1 mm deformasyon oluşan kirişin yük taşıma kapasitesi, küresel donatıda oluşan yük taşıma kapasitesine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun matris ve donatı arasında boşlukların oluşmasının bir sonucu olabileceği düşünülmektedir. SEM analizlerinde ABS PLUS donatı ve matris arasında yetersiz bağlanma, düşük taşıma kapasitesi ve deformasyon direnci açısından yetersiz kaldığı düşünülmektedir.



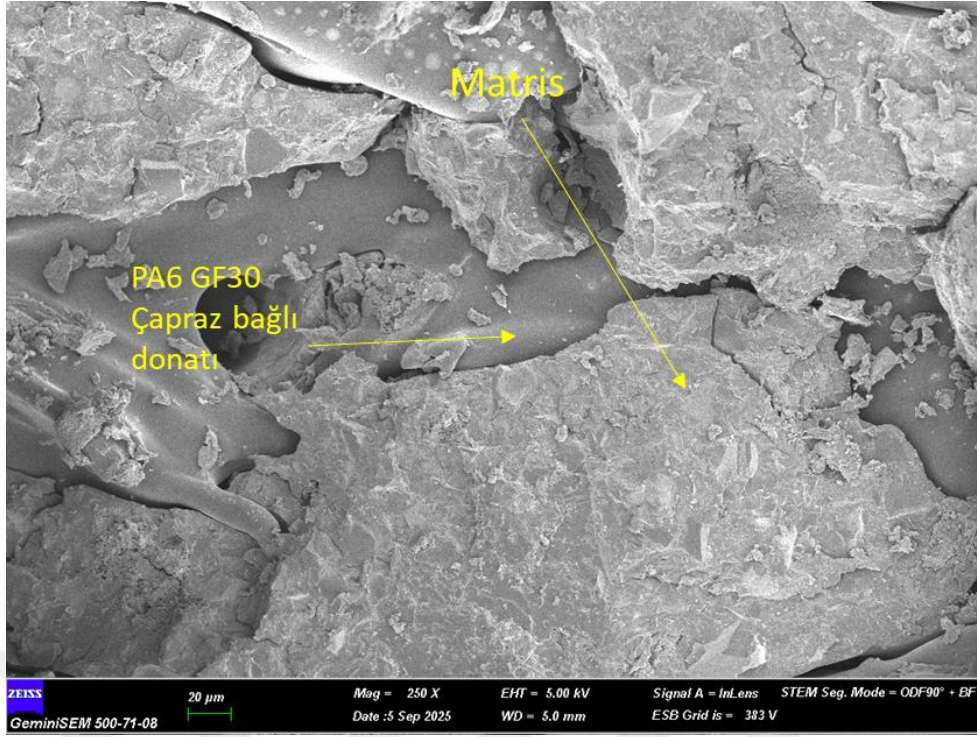
Şekil 151. ABS PLUS küresel donatının SEM analizi

ABS PLUS standart donatı ile matris arasındaki SEM analizleri Şekil 152'de görülmektedir. 7109 N yük altında 1.22 mm deformasyon oluşan geopolimer kirişte, çapraz bağlı donatıya göre daha düşük yük taşıma kapasitesine sahiptir. SEM analizlerinde matris üzerinde mikro çatlakların olduğu gözlemlenmiştir. Donatı ve matris arasındaki boşluklar nedeniyle bağ oluşumunun zayıf olduğu düşünülmektedir. Bu durumun yük taşıma kapasitesi açısından sınırlı kaldığı ve çatlak oluşumlarının oluşabileceği düşünülmektedir.



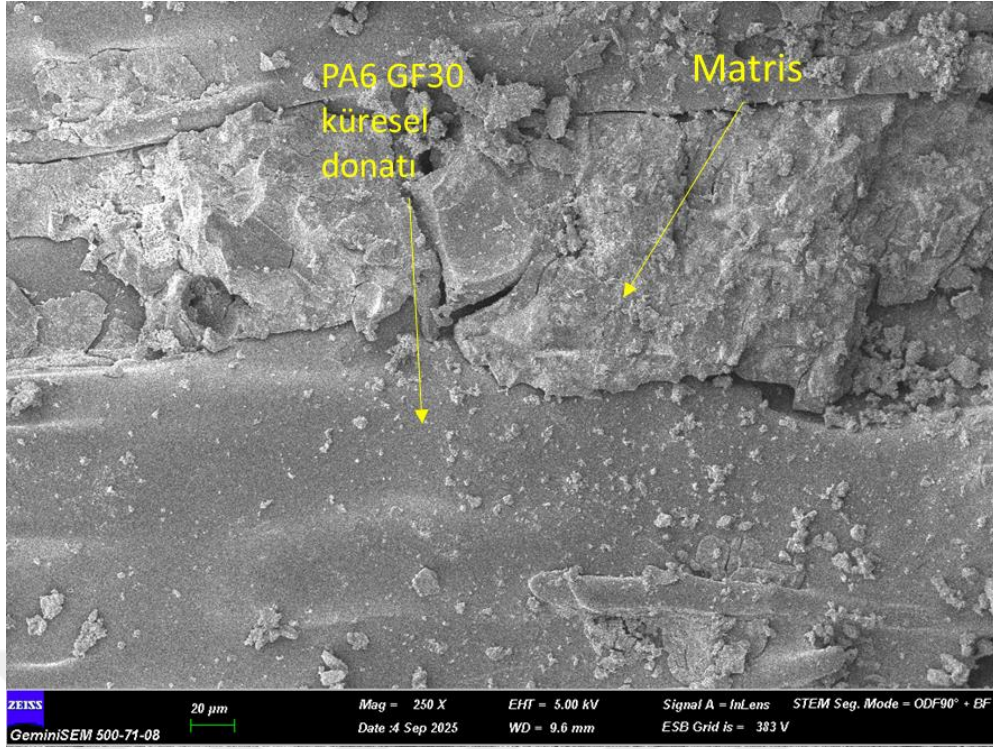
Şekil 152. ABS PLUS standart donatının SEM analizi

PA6 GF30 çapraz bağlı donatı ve matris arasındaki SEM analizi Şekil 153'te görülmektedir. 10000 N yük altında 1.7 mm deformasyon ile yük taşıma kapasitesi açısından iyi bir performans göstermiştir. SEM analizlerinde donatı ve matris arasında iyi bir bağ olduğu gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak kirişte oluşan deformasyon oluşumunun yükün çapraz bağlı donatıya aktarılması bakımından etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu durumun çatlak oluşumu ve ilerlemesi açısından sınırlı kalabileceği düşünülmektedir. PA6 GF30 filamentinin elastisite modülü değerinin yüksek olması ve içerisindeki cam elyaf katkısının etkisi görülmektedir.



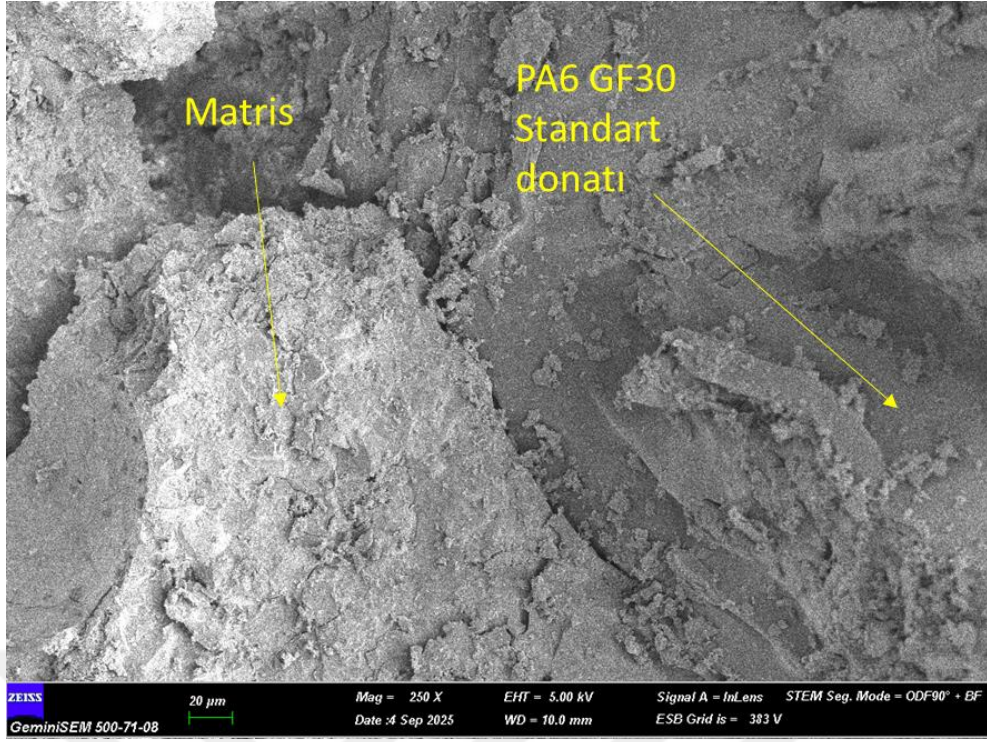
Şekil 153. PA6 GF30 çapraz bağlı donatının SEM analizi

PA6 GF30 küresel donatı ve matris arasındaki SEM analizi Şekil 154'te görülmektedir. 8423 N yük altında 1.21 mm deformasyon ile yük taşıma kapasitesinin iyi olduğunu ve küresel donatının yük transferine katkı sağladığı düşünülmektedir. SEM görüntülerinde çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Çatlak oluşumlarının, PA6 GF30 küresel donatı sayesinde yükü etkili bir şekilde aktararak çatlak ilerlemesini yavaşlatabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte daha fazla çatlak oluşumunu engelleyeceği düşünülmektedir.



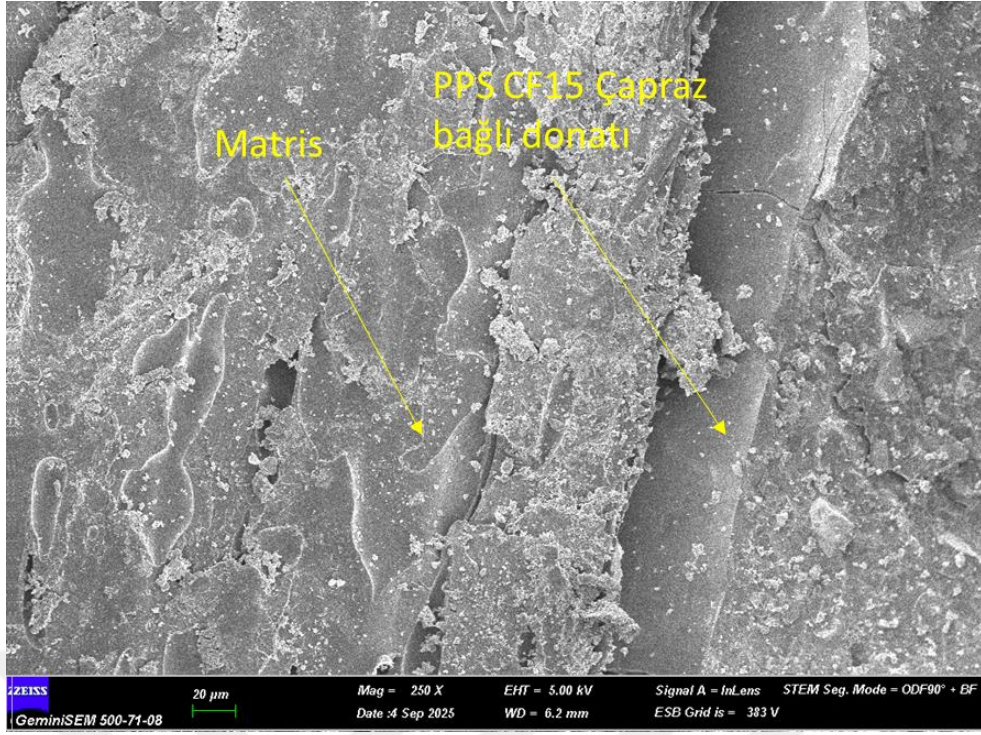
Şekil 154. PA6 GF30 küresel donatının SEM analizi

PA6 GF30 standart donatı ve matris arasındaki SEM analizi Şekil 155'te görülmektedir. 8224 N yük altında 1.22 mm deformasyon göstererek, küresel donatıya göre daha düşük yük taşıma kapasitesine rağmen daha fazla deformasyon göstermiştir. Bunun PA6 GF30 standart donatının matris ile daha etkin bir şekilde yük taşıdığını göstermektedir. Sem görüntülerinde matrisin homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Donatı ve matris arasında aderansa bağlı sıyrılmalara rastlanmıştır ve sıkı bir şekilde kenetlenme gözlemlenmiştir.



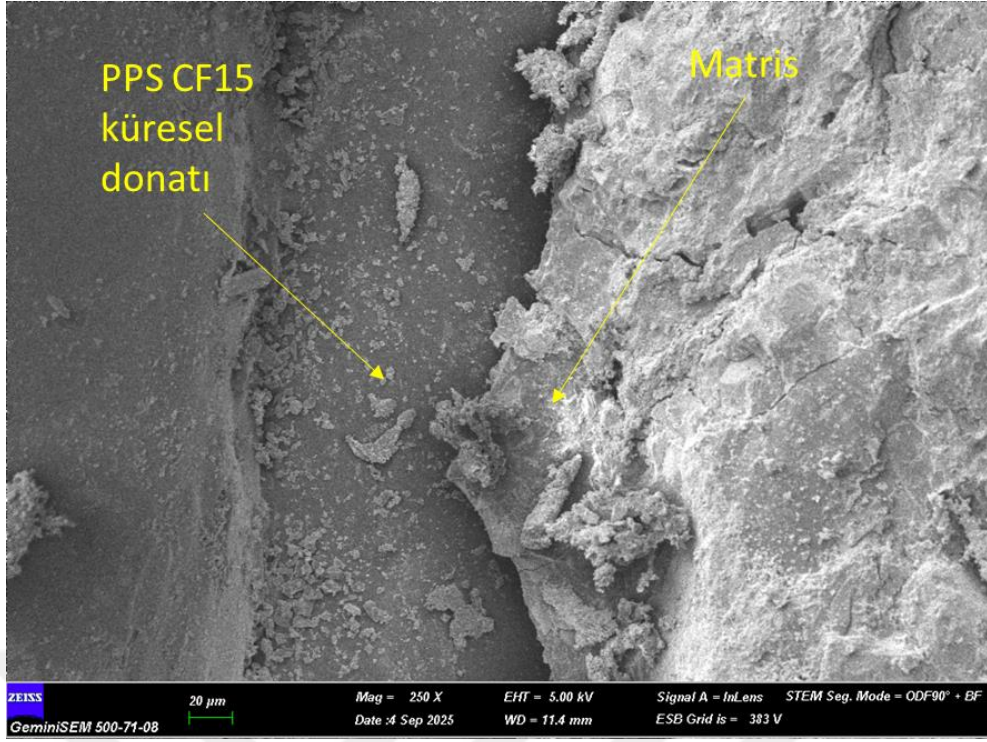
Şekil 155. PA6 GF30 standart donatının SEM analizi

PPS CF15 çapraz bağlı donatı ve matris arasındaki SEM görüntüleri Şekil 156'da görülmektedir. 10392 N yük altında 1.8 mm deformasyon gösteren çapraz bağlı donatı en büyük yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Rijitlik malzemenin elastik davranış altında ne kadar direnç göstereceğini ifade eder. Bununda PPS CF15 filamentinin yüksek elastisite modülüne sahip olması ve çapraz bağlı yapısıyla hem esnek hem de rijit bir davranış sergilediğini göstermektedir. Yük aktarımı hem kiriş hem de PPS CF15 çapraz bağlı donatı üzerinde eşit şekilde paylaşılmıştır. SEM analizlerinde matrisin donatı ile iyi bir bağ oluşturduğu düşünülmektedir. Çapraz bağlı donatı yanal yönde yük aktarımı sağlayarak mekanik dayanıma katkı sağlamıştır.



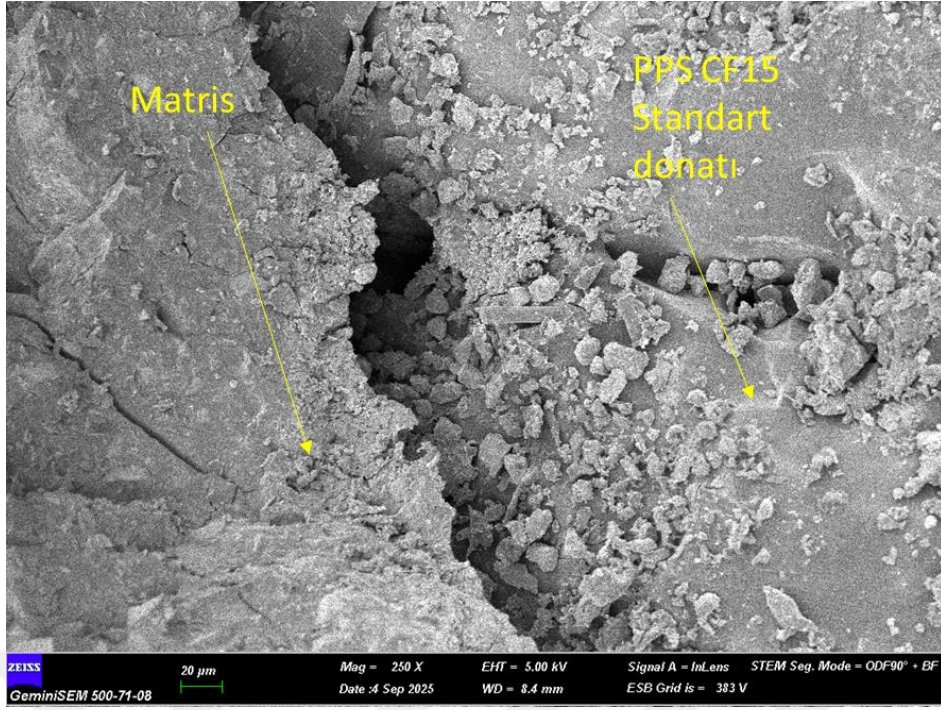
Şekil 156. PPS CF15 çapraz bağlı donatının SEM analizi

PPS CF15 küresel donatı ve matris arasındaki SEM görüntüleri Şekil 157'de görülmektedir. 8932 N yük altında 1.44 mm deformasyon göstererek yük taşıma kapasitesi açısından çapraz bağlı donatıya göre daha sınırlı olduğunu göstermektedir. Küresel donatının yük aktarımını çapraz bağlı donatı kadar etkili bir şekilde yapamadığını ortaya koymaktadır. SEM görüntülerinde matris ve küresel donatı arasında sınırlı bir bağlanma olduğu görülmektedir. Ayrıca matris üzerinde mikro çatlaklar gözlemlenmiştir.



Şekil 157. PPS CF15 küresel donatının SEM analizi

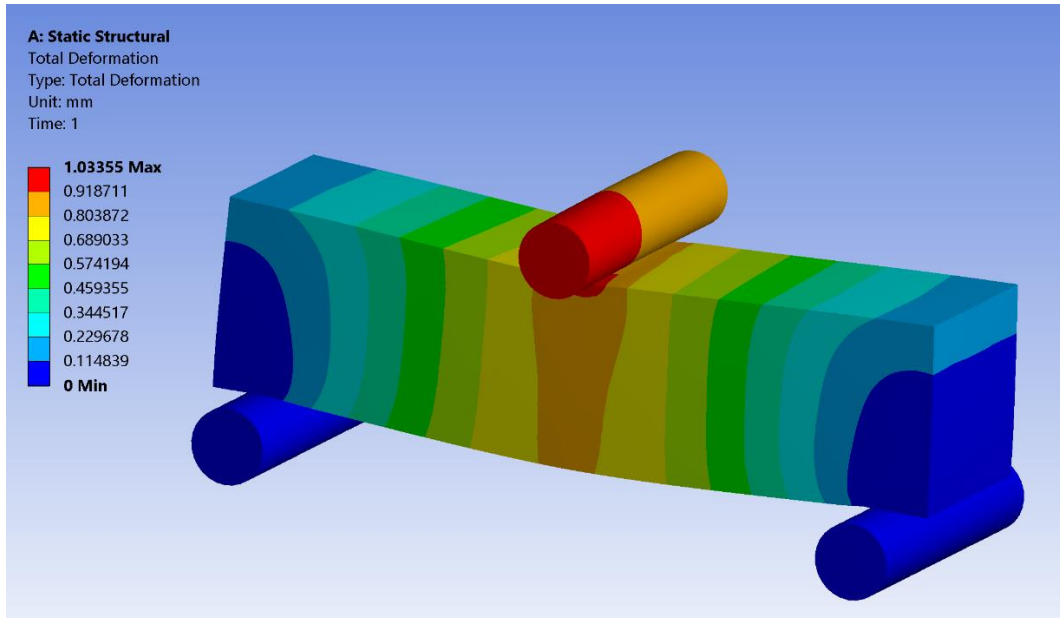
PPS CF15 standart donatı ve matris arasındaki SEM görüntüleri Şekil 158’de görülmektedir. 8963 N yük altında 1.40 mm deformasyon göstererek yük taşıma kapasitesi açısından küresel donatıyla benzerlik göstermiştir. PPS CF15 standart donatının yük taşıma kapasitesi küresel donatıya göre daha yüksek olmasına rağmen daha düşük bir deformasyon göstermiştir. Bunun sebebi olarak standart donatının yük aktarımında daha az etkili olabileceği düşünülmektedir. PPS CF15 standart donatıya ait SEM analizi incelendiğinde matris ve donatı arasında sınırlı bir bağ olduğu gözlemlenmiştir. Matris üzerinde çatlak oluşumları ve boşluklar olduğu görülmektedir. Standart donatı geometrisinin çapraz bağlı ve küresel donatı geometrisine kıyasla daha düşük bir mekanik kenetlenme oluşturduğu düşünülmektedir.



Şekil 158. PPS CF15 standart donatının SEM analizi

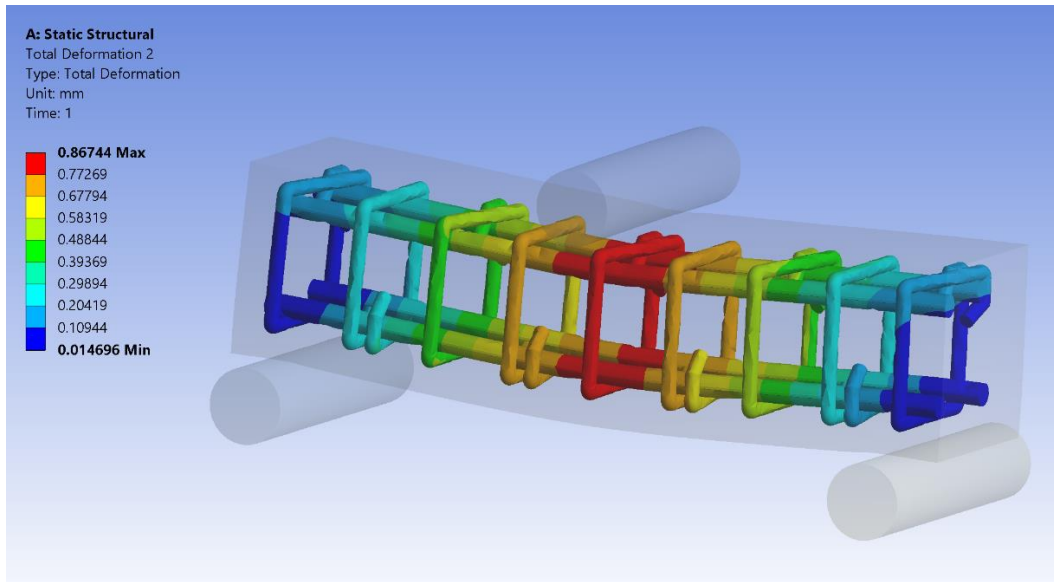
3.18. B420C Çelik Donatılı Kiriş için Deformasyon ve Eşdeğer Gerilme Analizleri

Bu bölümde sonlu eleman metodu ile B420C çeliği kullanılarak standart model donatı ile oluşturulmuş kirişlerin kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda daha önce analizi yapılmış olan PPS CF15 standart model ile B420C çeliği kullanılarak oluşturulan standart model yapıdaki kirişe ait deformasyon, eşdeğer gerilme, yük taşıma ve maliyet hesabı karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 159, B420C çelik donatı ile oluşturulmuş kirişe ait deformasyon değerini göstermektedir. 8963N yük altında PPS CF15 standart donatılı kiriş 1.36 mm deformasyon gösterirken, B420C çelik donatılı kiriş 1.03 mm deformasyon göstermiştir.



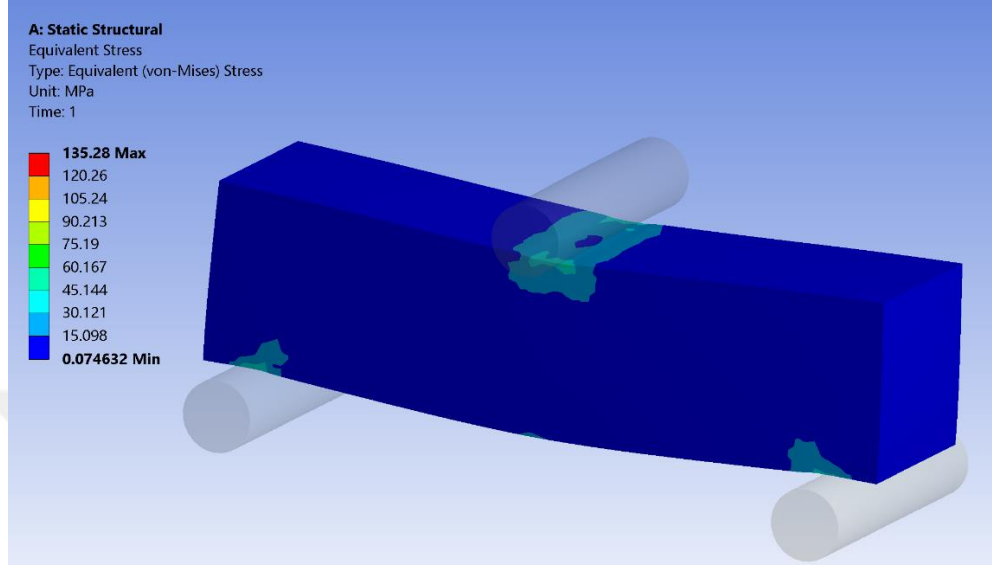
Şekil 159. Çelik donatılı kiriş deformasyon analizi

PPS CF15 Standart donatının deformasyon değeri 1.29 mm iken çelik donatıya ait deformasyon değeri 0.86 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 160). Burada PPS CF15 filamentinin elastisite modül değeri 11000 MPa iken, B420C çelik elastisite modül değerinin 210000 MPa olması donatının etkisini ortaya koymaktadır.



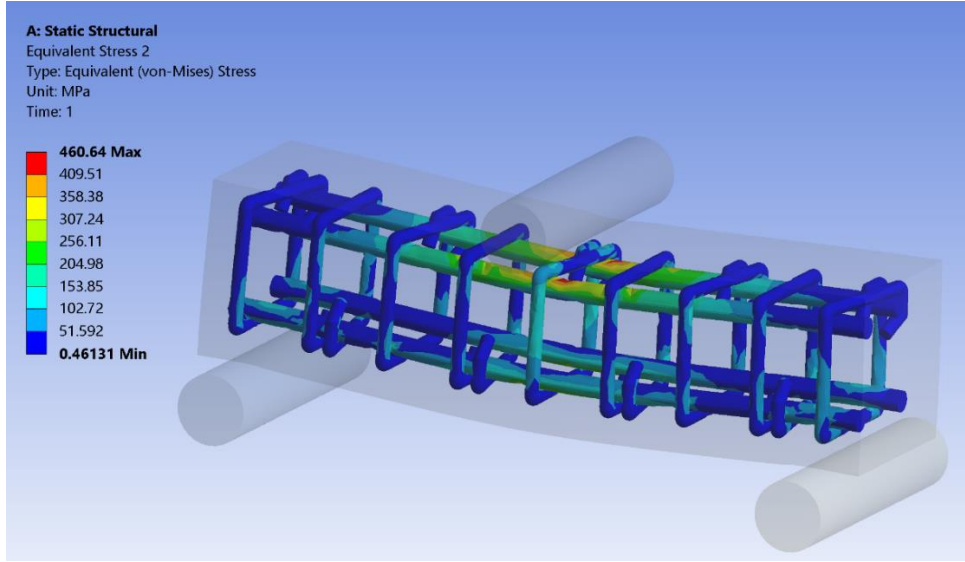
Şekil 160. Çelik donatı deformasyon analizi

B420C çelik donatılı kirişe ait eşdeğer gerilme analizi Şekil 161’de verilmektedir. Çelik donatılı kirişe ait eşdeğer gerilme değeri 135.28 MPa olarak belirlenmiştir. PPS CF15 standart donatılı kiriş eşdeğer gerilme değeri ise 70.3 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 161. Çelik donatılı kiriş eşdeğer gerilme analizi

Sonuçlar incelendiğinde, çelik donatıya ait eşdeğer gerilme değeri 460.64 MPa, PPS CF15 standart donatıya ait eşdeğer gerilme değeri ise 28.7 MPa olduğu görülmektedir (Şekil 162). B420C çelik donatının yüksek elastisite modülüne sahip olması kiriş içinde daha fazla iç kuvvet taşıdığını göstermektedir. Bu sebeple eşdeğer gerilme değerlerinin PPS CF15 standart donatılı kirişe kıyasla daha yüksek geliştiği görülmektedir. Fakat PPS CF15 standart donatılı modelin düşük elastisite modülüne sahip olması sebebiyle daha fazla deformasyon gösterdiği ve daha düşük eşdeğer gerilmeye sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 162. Çelik donatı eşdeğer gerilme analizi

B420C çelik donatı ve PPS CF15 standart donatılı kirişler için karşılaştırma değerleri Tablo 39’da verilmiştir. Burada aynı yük altında yerdeğiştirme, eşdeğer gerilme ve maliyet verileri sunulmuştur. Kirişe ait yerdeğiştirme değerleri incelendiğinde yaklaşık % 32 farkın olduğu görülmektedir. Donatıya ait yerdeğiştirme değerleri incelendiğinde ise bu fark yaklaşık % 50 olarak elde edilmiştir. Kirişe ait eşdeğer gerilme değeri incelendiğinde % 40 azalma olduğu, donatıya ait eşdeğer gerilme arasındaki farkın ise % 93 azalmış olduğu görülmüştür. Maliyet sonuçları incelendiğinde PPS CF15 standart donatılı kiriş için yaklaşık 3100 TL olan bu değer, B420C çelik donatılı kiriş için yaklaşık 250 TL olmaktadır. Burada B420C çelik donatı daha düşük maliyet ve daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olmasına karşın, 3B baskı yöntemiyle üretimi mümkün olmamaktadır. PPS CF15 çatlak kontrolü açısından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca PPS CF15 filamenti korozyona karşı etkili sonuçlar vererek daha uzun ömürlü ve daha dayanıklı olduğu düşünülmektedir.

Tablo 39. B420C Çelik donatı ve PPS CF15 standart donatı karşılaştırması

Donatı türü	Yük taşıma kapasitesi (N)	Yerdeğiştirme Kiriş (mm)	Yerdeğiştirme (mm)	Eşdeğer gerilme (kiriş) (MPa)	Eşdeğer gerilme (donatı) (MPa)	Maliyet (TL)
B420C Çelik donatı	8963	1.03	0.86	135.28	460.64	250
PPS CF15	8963	1.36	1.29	81.45	32.31	3100

3.19. İki Ucu Ankastre Mesnetli Kirişte Sehim Hesabı

Yapılan sayısal analizlerde mesnet sınır koşulları dikkate alınarak modellemeler oluşturulmuştur. Bu bölümde iki ucu ankastre mesnet hesabı, TS 500 betonarme kiriş hesabı dikkate alınarak yapılmıştır. İki ucu ankastre mesnet hesabı yapıldıktan sonra sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre her iki yönteminde birbirine yakın sonuçlar verdiği ve sayısal analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermiştir.

100x100x400 mm boyutlara sahip kiriş için sehim hesabı yapılmıştır. Yapılan teorik hesaplamada kiriş boyutları, atalet momenti, uygulanacak kuvvet, elastisite modülü gibi parametreler dikkate alınarak hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılmıştır. Geopolimer betona ait elastisite modülü değeri ön deneylerde 85YFC15UK oranlarında ana bağlayıcı kullanılan numuneden elde edilen dinamik elastisite değeri kullanılmıştır.

$$I: \frac{bh^3}{12} \quad (Eşitlik 12)$$

$$I: \frac{100 \times 100^3}{12} : 8.33 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Burada; I: Atalet momenti b: Kirişin genişliği h: Kirişin yüksekliğini göstermektedir.

$$\delta: \frac{PL^3}{192EI} \quad (Eşitlik 13)$$

$$\delta: \frac{100000 \times 400^3}{192 \times 17 \times 10^3 \times 8.33 \times 10^6} : 0.23 \text{ mm}$$

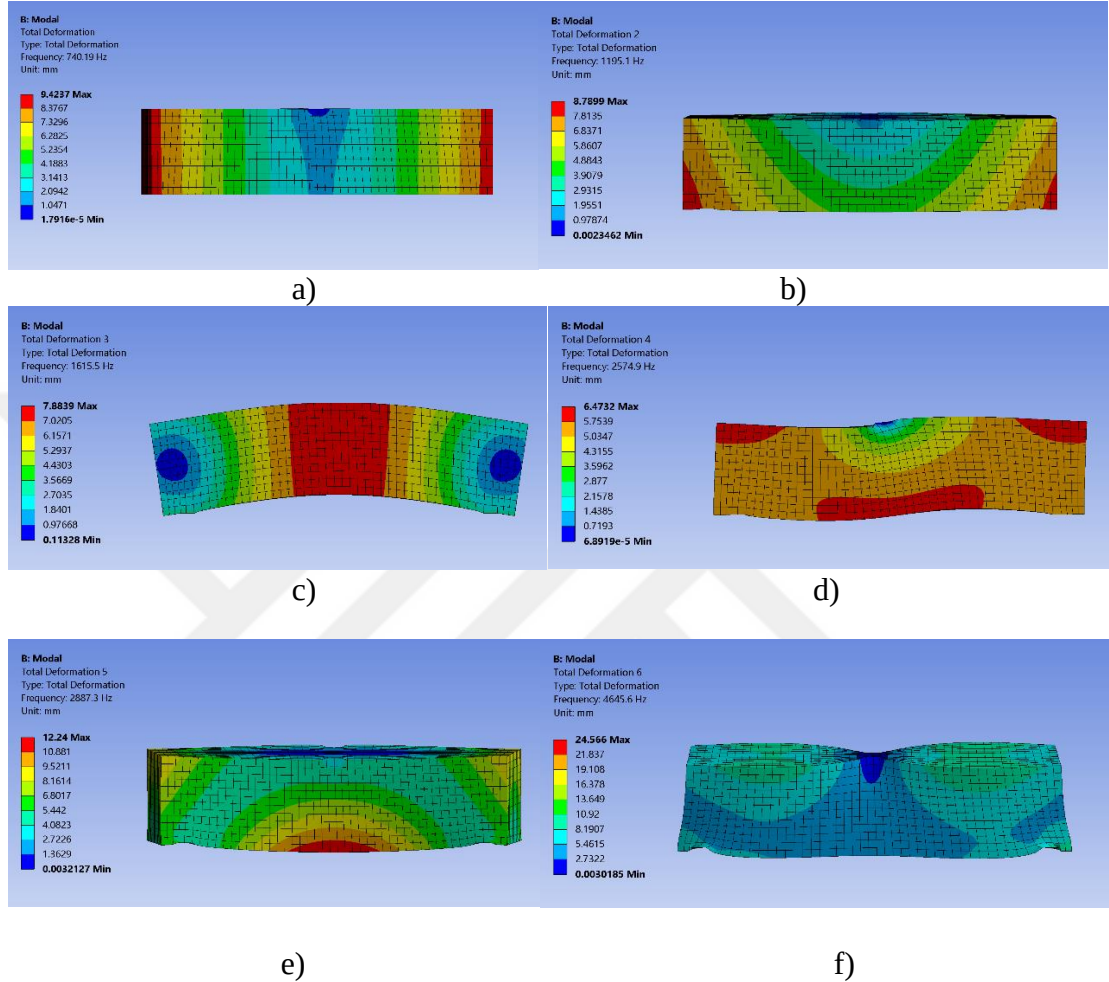
Burada; δ : Maksimum sehim (mm), P: Ortadaki tekil yük (N), L: Kiriş açıklığı, E: Geopolimer beton elastisite modülü (MPa), I: Atalet momenti (mm⁴) göstermektedir.

TS 500'e göre izin verilen sehim;

L/300 olursa, 0.23 < 1.33 mm sehim değeri yönetmeliğe uygun ve güvenlidir.

Donatısız kirişe ait modal analiz değerleri Şekil 167'de verilmektedir. Burada kirişe ait 6 farklı moda karşılık gelen frekans değerleri görsel olarak verilmiştir. Şekil

167-a, 1. düşey eğilme modunu, Şekil 167-b, 1. yan eğilme modunu, Şekil 167-c, 2. eğilme modunu, Şekil 167-d, burulma modunu, Şekil 167-e, eğilme ve burulma modunu, Şekil 167-f ise yüksek frekanslı eğilme ve burulma modunu göstermektedir.



Şekil 167. Donatısız kirişe ait mod şekilleri

Ayrıca donatısız kirişe ait frekans değerleri ve kütle katılım oranları Tablo 40'ta verilmiştir. Kirişin 1. Moddaki hareket, temel düşey eğilme modunu, 2. moddaki hareket diğer düzlemde eğilmeyi, 3. moddaki hareket mekanizması 2. düşey eğilme modunu ifade etmektedir. 4. moddaki hareket mekanizması bir kenarı aşağıda bir kenarı yukarıda olup burulma modunu göstermektedir. 5. moddaki hareket mekanizması, hem eğilme hem de burulma hareketinin birlikte görüldüğü bir titreşim hareketini göstermektedir. 6. moddaki hareket mekanizması ise eğilme ve burulma hareketinin aynı anda olduğunu ve yüksek frekanslı bir titreşim oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca kütle katılım oranları X yönü için

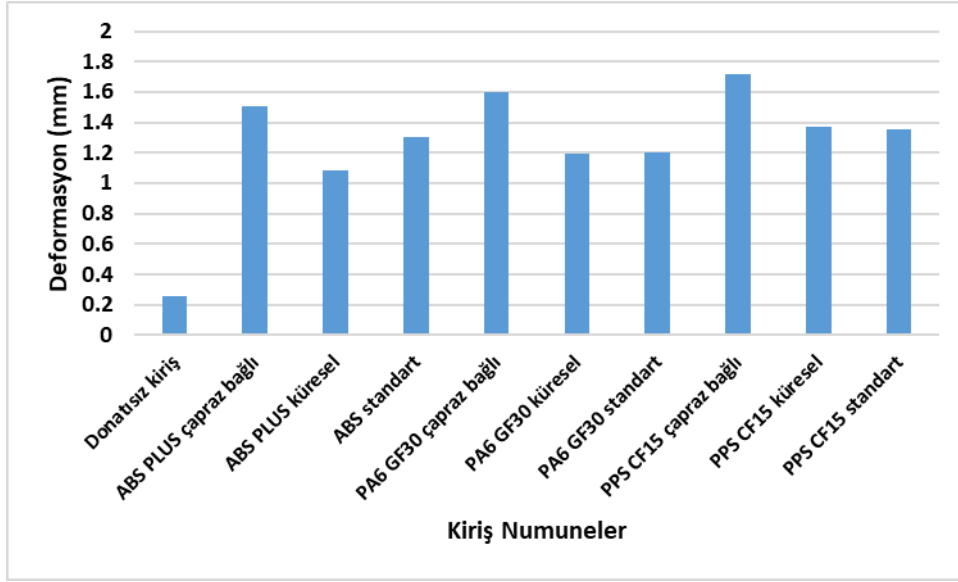
4. Modda %88.35, Y yönü için 2. Modda 80.29, Z yönü için ise 3. Modda 60.68 olarak elde edilmiştir.

Tablo 40. Donatısız kirişe ait modal analizi

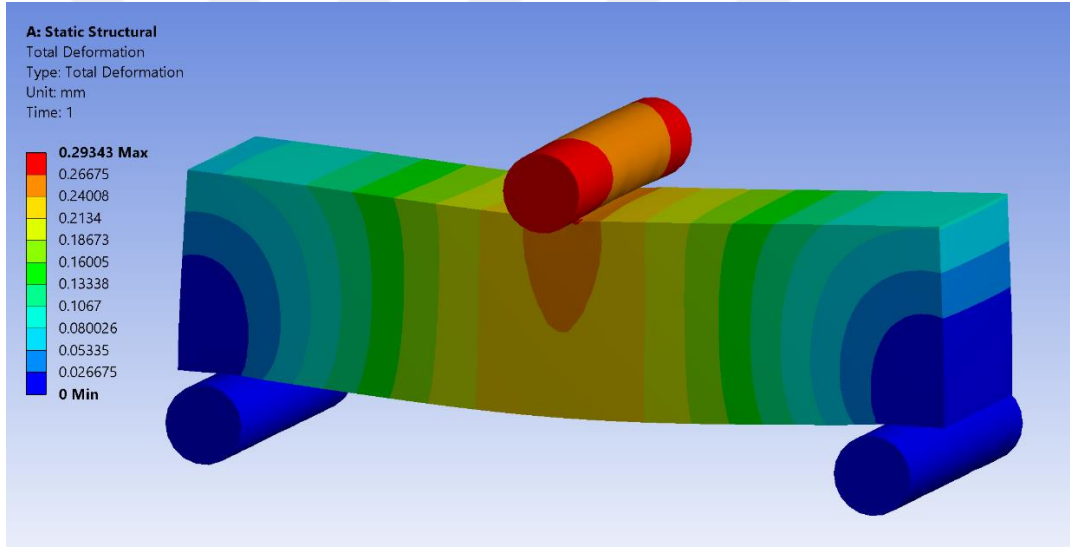
Mod	Frekans Değerleri (Hz)	Katılım oranı (X yönü) %	Katılım oranı (Y yönü) %	Katılım oranı (Z yönü) %
1.Mod	740.19	0.00	0.01	0.00
2. Mod	1195.1	0.00	80.29	0.00
3.Mod	1615.5	0.00	0.00	60.68
4.Mod	2574.9	88.35	0.00	0.00
5.Mod	2887.3	0.00	3.33	0.00
6.Mod	4645.6	0.00	6.44	0.01

3.19.1. Donatısız Kirişin Sayısal Analizi ve Donatılı Kirişler ile Karşılaştırılması

100x100x400 mm boyutlarında donatısız olarak modellenen kirişin sayısal deformasyon değeri kiriş üzerinde 0.26 mm olarak bulunmuştur. 3B donatı ile modellenen filamentli kirişler ile kıyaslandığında 1.52 mm deformasyona sahip ABS PLUS çapraz bağlı donatılı kiriş ile % 484, 1.07 mm deformasyona sahip ABS PLUS küresel donatılı kiriş ile % 311, 1.25 mm deformasyona sahip ABS PLUS standart donatılı kiriş ile % 380 yüzdelik fark olduğu görülmektedir. 1.58 mm deformasyona sahip PA6 GF30 çapraz bağlı donatılı kiriş ile % 508, 1.19 mm deformasyona sahip PA6 GF30 küresel donatılı kiriş ile % 358, 1.22 mm deformasyona sahip PA6 GF30 standart donatılı kiriş ile % 370 yüzdelik fark oluşmaktadır. 1.82 mm deformasyona sahip PPS CF15 çapraz bağlı donatılı kiriş ile % 600, 1.37 mm deformasyona sahip PPS CF15 küresel donatılı kiriş ile % 427 ve 1.36 mm deformasyona sahip PPS CF15 standart donatılı kiriş ile % 423 yüzdelik fark ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar donatısız geopolimer kirişlerin gevrek davranış sergilediğini ve ilk çatlakla beraber taşıma kapasitesinin hızla düştüğünü göstermektedir. Donatılı geopolimer kirişlerde ise donatının yük taşıma kabiliyeti sayesinde sünek davranış göstermesi ile yüksek deformasyon yeteneğinin daha da geliştiği düşünülmektedir.



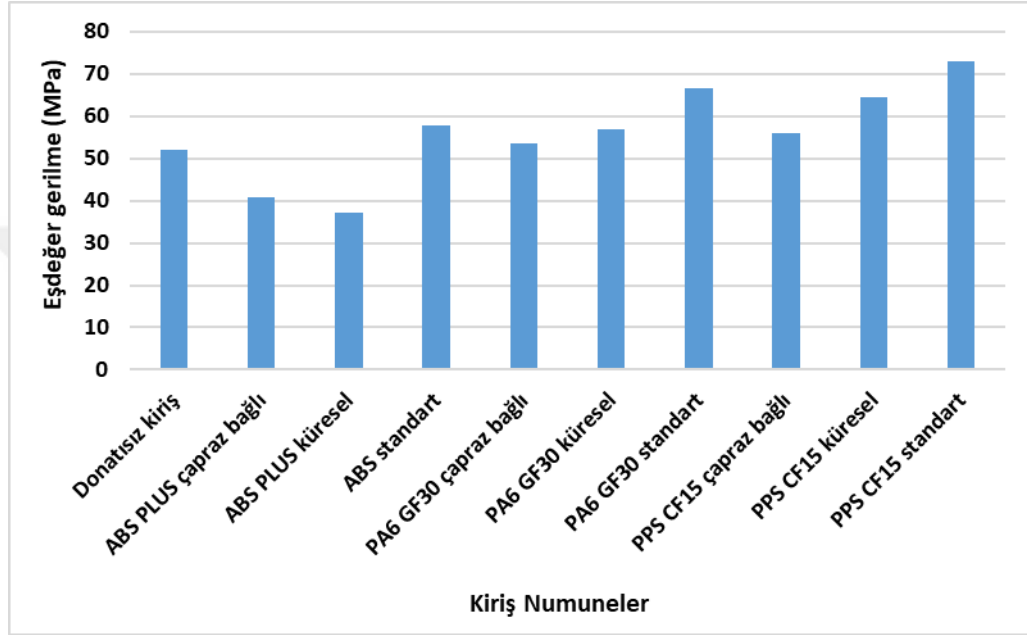
Şekil 163. Donatısız kiriş ve donatılı kirişlerin deformasyon değerleri karşılaştırması



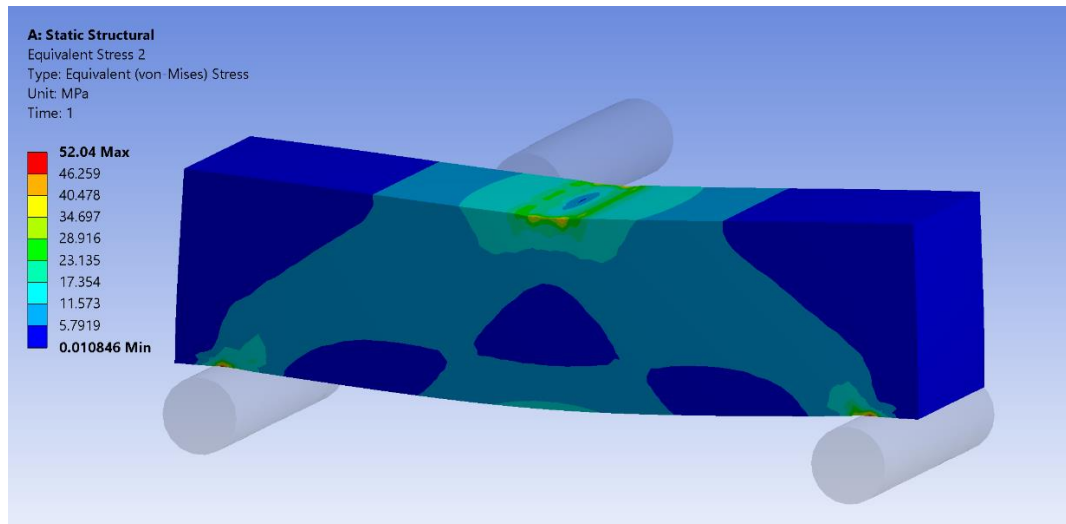
Şekil 164. Donatısız kiriş deformasyon analizi

Donatısız geopolimer kiriş ve donatılı kirişte yapılan eşdeğer gerilme analiz karşılaştırmasına göre donatısız kirişte eşdeğer gerilme değeri 52.04 MPa olarak elde edilmiştir. Donatısız kirişe kıyasla, ABS PLUS çapraz bağlı kirişte 80 MPa değeri ile % 54 daha yüksek eşdeğer gerilme değeri, ABS PLUS küresel kirişte 44.7 MPa değeri ile %14.1 daha düşük eşdeğer gerilme ve ABS PLUS standart kirişte 51.23 MPa değeri ile %1.55 daha düşük eşdeğer gerilme değeri elde edilmiştir. PA6 GF30 çapraz bağlı kirişte 91.13 MPa değeri ile %75 daha yüksek eşdeğer gerilme, PA6 GF30 küresel kirişte 77 MPa değeri ile % 48 daha yüksek eşdeğer gerilme, PA6 GF30 standart kirişte 70.3 MPa

değeri ile %35 daha yüksek eşdeğer gerilme değeri elde edilmiştir. PPS CF15 çapraz bağlı kirişte 95.1 MPa değeri ile %83 daha yüksek eşdeğer gerilme, PPS CF15 küresel kirişte 100 MPa değeri ile %92 daha yüksek eşdeğer gerilme ve PPS CF15 standart kirişte 81.4 MPa değeri ile %56 daha yüksek eşdeğer gerilme değeri elde edilmiştir. ABS PLUS donatılı kirişlerde genel olarak daha düşük gerilme değerleri elde edilme sebebi, ABS PLUS malzemesinin geopolimerden daha düşük elastisite modülüne sahip olması ve yapı içerisinde süreksizlik meydana getirmesi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 165. Donatısız kiriş ve donatılı kirişlerin eşdeğer gerilme karşılaştırması



Şekil 166. Donatısız kiriş eşdeğer gerilme analizi

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, Taguchi yöntemi ile optimize edilen 3B baskı donatılı geopolimer kirişlerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin deneysel ve sayısal olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ön deney 1 kapsamında, farklı NaOH molaritelerinde (8M, 10M, 14M) ve 75YFC25UK oranlı karışımlar için eğilme ve basınç dayanımları 7 ve 28 günlük periyotlarda ölçülmüştür. Ön deney 2’de ise üç farklı NaOH molaritesi (8M, 10M, 12M) ve dört farklı geopolimer harç karışımı (75YFC25UK, 85YFC15UK, 95YFC5UK, 100YFC) kullanılarak mekanik performans incelenmiştir. Bu deneysel veriler ışığında, L27 ortogonal matrisi kullanılarak 6 parametre ve 3 seviye ile tasarlanan geopolimer numuneler üretilmiş ve Taguchi ile ANOVA yöntemleri kullanılarak istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. “En büyük en iyidir” optimizasyon kriteri ile belirlenen ideal karışım oranları seçilmiş ve doğrulama deneyleri ile sonuçlar doğrulanmıştır. 27 adet numune üzerinde kılcal su emme, donma–çözülme ve sodyum sülfat çözeltisi dayanıklılık testleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında, optimize edilen karışım oranları kullanılarak 100×100×400 mm boyutlarında geopolimer kirişler üretilmiş, bu kirişler üç farklı filament türü ve her filament için üç farklı model ile donatılmıştır. 3 noktalı eğilme deneyi ile elde edilen yük–deplasman eğrileri, ANSYS Workbench programı ile gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak deneysel ve sayısal veriler bütüncül bir şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca, SEM analizleri ile donatı–matris arayüzündeki etkileşimler mikroyapısal düzeyde incelenmiş ve görüntülenmiştir. Bu kapsamlı yaklaşım hem mekanik performans hem de mikroyapısal davranış açısından geopolimer harçların optimizasyonuna ışık tutmaktadır.

- *Ön Deneylerden elde edilen sonuçlar:*

1. Kırılma koşullarının mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelendiğinde, etüv kürü, su kürü ile kıyaslandığında basınç dayanımı için yaklaşık %88 ve eğilme dayanımı için yaklaşık %20 daha yüksek değerler verdiği görülmüştür. Birim kütle değerleri ise yaklaşık olarak aynıdır.

2. Molarite değişiminin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelendiğinde, özellikle su kürü ile önemli bir fark gözlenmemiştir. Ancak etüv kürü etkisiyle 8M numunelerin eğilme dayanımı 10M ve 12M numunelere göre yaklaşık %24 daha yüksektir. Basınç dayanımı için ise yine bu fark 8M için yaklaşık %6-10 daha fazladır.

3. 8M NaOH ile hazırlanan numunelerde daha yüksek basınç dayanımı elde edilmesinin nedeni, bu molaritenin geopolimerleşme reaksiyonları için optimum aktivasyon seviyesini sağlamasıdır. Bu nedenle 8M NaOH, reaktivite ve mikro yapı kararlılığı arasında en uygun dengeyi sağlayarak en yüksek basınç dayanımının elde edilmesine olanak tanımıştır.

4. Basınç dayanımı sonuçları 75 ° C etüv kürüne maruz bırakılan numuneler arasında en yüksek basınç dayanım değeri ise 84.7 MPa ile 8M-95YFC5UK numunesinden elde edilmiştir.

- *Taguchi metodundan elde edilen sonuçlar:*

1. Taguchi metoduna göre hazırlanan 27 farklı numune üzerinden elde edilen en yüksek basınç dayanımı 65.74 MPa ile S20 numunesinden olduğu tespit edilmiştir. S20 numunesi 320g YFC, 75g UK, 50g Stronsiyum, 50g mermer tozu ve 5g titanyum dioksit içermektedir. Ayrıca S20 numunesi 75 ° C kür sıcaklığında 72 saat kür edilerek 12M NaOH kullanılarak üretilmiştir.

2. Eğilme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, 27 farklı numune arasından en yüksek eğilme dayanımına sahip numune 10.46 MPa ile S20 numunesinden elde edilmiştir.

3. Basınç dayanımına göre elde edilen optimum faktör 75 ° C kür sıcaklığı olarak elde edilmiştir. S/N sonuçlarına göre, kür süresi:24 saat, kür sıcaklığı: 75 ° C, Molarite: 12M, maden atığı: %5oranında, mermer tozu: %5 oranında, titanyum dioksit: %1 oranında kullanıldığında optimum sonuçların elde edildiği belirlenmiştir.

4. Eğilme dayanımı Anova sonuçlarına göre %60.03 etki değeri ile kür sıcaklığı en etkili faktör olmuştur.

5. Basınç dayanımı Anova sonucuna göre %34.95 oranı ile en etkili faktör kür sıcaklığı olmuştur.

6. 90 günlük S20 numunesine ait SEM görüntülerinde gözeneklilik azalmış ve kristalimsi yapılar artmıştır. Amorf kubbe daralmış ve Ca içeriği yüksek katkılar sayesinde C-A-S-H fazı alüminasilikat ağ yapısını güçlendirmiştir.

7. Yapılan XRD analizleri sonucunda 90 günlük S20 numunesinde kristalleşme daha da ilerlemiş, kalsit, anortit fazları belirgin hale gelmiştir.

- *Durabilite deney sonuçları:*

1. Donma çözülme basınç dayanım sonuçları incelendiğinde en fazla basınç dayanımındaki azalma %35.79 ile S23 numunesinden elde edilmiştir. Eğilme dayanımı değerleri bakımından en fazla azalma, %35.01 ile S20 numunesinde tespit edilmiştir. Dinamik elastisite modülü sonuçlarına göre en fazla azalma S22 numunesinde %98.08, S15 numunesinde %83.88 ve S18 numunesinde %82.58 olarak ölçülmüştür.

2. Kılcal su emme deneyi sonrası geopolimer numunelerde en fazla basınç dayanımındaki azalma %22.92 ile S24 numunesi ve %22.16 ile S16 numunesinden elde edilmiştir.

3. Sodyum sülfat etkisi deneyi sonrası en fazla basınç dayanımındaki azalma %65.68 ile S1 numunesinden elde edilmiştir. S1 numunesi; 24 saat kür süresi, 75 °C kür sıcaklığı, 8 M NaOH aktivatörü, 370 g yüksek fırın cürufu, 75 g uçucu kül, 25 g stronsiyum, 25 g mermer tozu ve 5 g TiO₂ içeriğine sahiptir.

4. Kılcal su emme deneylerine ait SEM analizlerinde, kılcal su emme deneyi öncesi S24 numunesinde yoğun ve morfolojik bir yapının oluştuğu ve boşlukların az olduğu görülmektedir.

5. Kılcal su emme sonrası XRD analizi incelenecek olursa, Anortit (CaAl₂Si₂O₈), Albit (NaAlSi₃O₈), faz oluşumları gerçekleşmiştir.

6. Sodyum sülfat deneyi öncesi XRD analizlerinde, SiO₂ (kuvars) fazı ve CaCO₃ (kalsit) fazı baskın fazlardır.

- *3B baskı ile üretilmiş geopolimer kiriş donatıların, filamentlerin sonuçları:*

1. ABS PLUS çapraz bağlı donatılı geopolimer kiriş, yük-deplasman eğrileri içerisinde maksimum 7817 N yük altında deneysel deformasyon değeri 1.48 mm, sayısal deformasyon değeri ise 1.52 mm olarak bulunmuştur.

2. PA6 GF30 çapraz bağlı donatılı geopolimer kiriş, yük-deplasman eğrileri içerisinde maksimum 10000N yük altında deneysel deformasyon değeri 1.7 mm, sayısal deformasyon değeri ise 1.58 mm olarak bulunmuştur.

3. PPS CF15 apraz bağlı donatılı geopolimer kiriş üzerinde, yük-deplasman eğrileri içerisinde maksimum 10392N yük altında deneysel deformasyon değeri 1.8 mm, sayısal deformasyon değeri ise 1.82 mm olarak bulunmuştur.

4. PPS CF15 yüksek elastisite modülüne sahip olmasına rağmen daha fazla deformasyon göstermesi yalnızca elastisite modülünün etkili olmadığını, donatı modelinde etkili olabileceğini göstermiştir. Burada apraz bağlı donatının kiriş boyunca farklı yönlerde lifler içerdiği ve böylelikle yükü yalnızca tek doğrultuda değil aynı zamanda çapraz ve yatay bileşenlerle dağıtarak, maksimum deformasyonu sağladığı düşünülmektedir. Aynı şekilde ABS PLUS apraz bağlı ve PA6 GF30 apraz bağlı donatı içinde aynı durumlar geçerli olmuştur.

5. Burada ABS PLUS filamenti için; deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında en düşük fark standart donatılı kirişte (%2.4) elde edilmiştir. Bu, deneysel ve sayısal sonuçların neredeyse birebir örtüştüğünü ve sonlu eleman modellemesinin yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir. Çapraz bağlı donatılı kirişte (%2.63) fark kabul edilebilir düzeydedir ve sayısal modelin güvenilirliğini göstermektedir. Küresel donatılı kirişte (%2.8) fark en yüksek düzeydedir.

6. PA6 GF30 filamenti için; çapraz bağlı donatılı kiriş için deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında (%7.59 fark) olduğu görülmektedir. Küresel donatılı kirişte fark %1.68 olup, aderans farklılıkları ve donatı geometrisinin oluşturduğu gerilme dağılımı nedeniyle deneysel ve sayısal sonuçlar arasında orta düzeyde bir sapma vardır. Standart donatılı kiriş ise %0 fark ile birebir doğruluk göstermektedir.

7. PPS CF15 filamenti için ise; PPS CF15 donatılı kirişler, hem çapraz bağlı, hem küresel hem de standart donatı modellerinde sırası ile %1.09, %5.1 ve %2.94 oranlarında bir fark göstermiştir.

8. Gerek filament türleri gerekse farklı geometrik donatılar içerisinde (yük-deplasman eğrileri bakımından) en yüksek tepe yüküne 10392 N ile PPS CF15 apraz bağlı donatılı kirişte ulaşılmıştır. Diğer taraftan PPS CF15 filamenti, filament türleri içerisinde en iyi performansı sergilemiştir.

9. PPS CF15 standart donatılı geopolimer kirişlerde matris-donatı arasındaki bağ sınırlı kalmış, yük aktarımı tam anlamıyla sağlanamamıştır.

10. Yük aktarımı hem kiriş hem de PPS CF15 apraz bağlı donatı üzerinde eşit Şekilde paylaşılmıştır. SEM analizlerinde matrisin donatı ile iyi bir bağ oluşturduğu düşünülmektedir. Çapraz bağlı donatı yanal yönde yük aktarımı sağlayarak mekanik dayanıma katkı sağlamıştır.

11. Donatısız kiriş ile donatılı kirişler kıyaslandığında, 1.82 mm deformasyona sahip PPS CF15 apraz bağlı donatılı kiriş ile % 600 fark oluştuğu görülmektedir.

12. B420C elik donatılı kiriş deformasyonu ile PA6 GF30 standart donatılı kiriş deformasyonu kıyaslandığında ise %32 fark olduğu grlmştir.

- *Çalışmanın bütününden çıkarılabilecek sonuçlar:*

1. Bu tez çalışmasında, endüstriyel atık malzemeler kullanılarak üretilmiş geopolimer harçlar ve bu harçlardan üretilmiş kirişler incelenmiştir. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların geopolimer matrisin dayanımı ve mikro yapısı üzerindeki etkileri değerlendirilmiş, katkı malzemelerinin performansı ve durabilite üzerindeki rolü ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, uygun katkı oranlarının, kr süresi ve kr sıcaklığının, malzemenin mekanik performansını üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

2. Taguchi ortogonal tasarımında S/N oranları ve ANOVA analizleri kullanılarak, parametrelerin ve seviyelerin belirlenmesinde optimum şartların mekanik dayanım bakımından etkisini belirlemiştir. Böylelikle sistematik bir yaklaşım ile performansı artıracak parametreler güvenilir bir Şekilde tespit edilmiştir.

3. Çalışmanın bir diğer önemli yönü, 3B yazıcı filamentleri (ABS PLUS, PA6 GF30, PPS CF15) ve farklı donatı geometrilerinin geopolimer kirişler üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Filament tipi ve donatı geometrisi, kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve deformasyon davranışını doğrudan etkilemiş, deneysel ve sayısal analizler arasında uyum sağlanmıştir. Bu bulgular, sayısal modelleme ile geopolimer kirişlerin davranışlarının güvenilir Şekilde tahmin edilebileceğini göstermektedir.

4. Sonuç olarak, bu çalışma, endüstriyel atık bazlı geopolimerlerin mekanik performansını artırmak için katkı malzemeleri ve kr koşullarının optimizasyonunu ortaya koymakta ve 3B filamentli kirişlerin davranışını sistematik olarak değerlendiren nadir araştırmalardan biri olduğu söylenebilir.

- *Bundan sonraki gelecek çalışmalara katkı sağlayacağını düşünülen öneriler ise şu şekildedir:*

1. Geopolimer üretiminde farklı aktivatör türleri (örneğin KOH veya NaOH–KOH karışımları) kullanılarak mekanik ve durabilite özellikleri karşılaştırılabilir.

2. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül esaslı karışımlara nano-silika, nano-alümina veya metakaolin gibi farklı katkı malzemeleri eklenerek mikro yapı iyileştirmeleri araştırılabilir.

3. Farklı donatı türleri ve farklı filamentler denenerek mekanik özellikleri incelenebilir.

4. Deneysel çalışmalar farklı sayısal modeller ile desteklenerek sonuçların doğruluğu artırılabilir.

5. Laboratuvar ortamında daha büyük boyutlu kirişler oluşturularak saha uygulama potansiyeli test edilebilir.

6. 3 boyutlu baskı donatılı geopolimer kirişlerin eğilme dayanımlarının hesaplanabilmesi için basit ve güvenilir yöntemler geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdulrahman, H., Muhamad, R., Visintin, P. ve Shukri, A. A. (2022). Mechanical properties and bond stress-slip behaviour of fly ash geopolymer concrete. *Construction And Building Materials*, 327, 126909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126909>
- Adak, D., Sarkar, M. ve Mandal S. (2014). Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar. *Construction And Building Materials*, 70, 453–459. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.093>
- Ahadi, B. López, M. V. (2025). Zigzag reinforcement method for 3d concrete printing, *Buildings*, 15, 1721. <https://doi.org/10.3390/buildings15101721>
- Akbulut, F., Polat, R. ve Karagöl, F. (2021). Erzurum pasinler bölgesi perlitinin geopolimer üretiminde kullanımının araştırılması. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10, (1), 37-45. <https://doi.org/10.46810/tdfd.798972>.
- Aksüt, Y. S., Külekçi, G., Çullu, M. ve Yetgin, Ş. (2024). Performance of different fibre types in alkaline- activated concrete produced with industrial wastes: volcanic rock powder and blast furnace slag. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2357682>
- Akyüncü, V ve Avşar, Y. E. (2022). Farklı tipte uçucu kül kullanılarak üretilen alkaliyle aktive edilmiş harçların fiziksel ve mekanik özellikleri, *European Journal of Engineering and Applied Sciences*. 5 (1), 16-21. <https://doi.org/10.55581/ejeas.1125144>
- Ali, A., Khan, Q. Z., Mehboob, S. S., Tayyab, A. Hayyat, K. Khan, D., ... Qureshi, Q. B. I. (2024). Enhancing multi-objective mix design for ggbs-based geopolymer concrete with natural mineral blends under ambient curing: A Taguchi-Grey Relational Optimization, *Ain Shams Engineering Journal* 15, 102708. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102708>
- Alkwanadoli, M. I. A.(2023). Yol temel malzemesi olarak killi zemin - geri dönüşüm malzemeleri - Geopolimer karışımlarının kullanılması, *Selçuk Üniversitesi, Fen*

Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Konya, Türkiye.

Alnkaa, A.A. (2019). Farklı kür koşullarının geopolimer harçların özelliklerine etkisi. Kastamonu Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Kastamonu.

Altawıl, H. A.H. (2022). Geopolimer kazıkların üretimi ve performansını etkileyen faktörlerin deneysel olarak araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Konya, Türkiye.

Altındal, İ. (2020). Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kür koşulları altında basınç dayanımının değişimi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.

Amrita., Manoj, A. ve Panda, R. C. (2022). Biodegradable filament for 3d printing process: A Review, Engineered Science. 18, 11–19. <https://doi.org/10.30919/es8d616>

Ananda, K., Mohiyuddin, C.S. ve Zai, S.A.K. (2024). Finite element analysis of geopolymer composite beams and slabs for flexural loading. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, e-ISSN: 2582-5208.

ANSYS®. (2015). ANSYS Workbench R15.0 [Computer software]. Ansys Inc. <https://www.ansys.com>

ASTM C642-13. (2013). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

ASTM C1585-13. (2013). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.

ASTM C666/C666M-15, (2015). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. American Society For Testing and Material.

ASTM C597-16. (2016). Standard test method for pulse velocity through concrete.

ASTM C1012/C1012M-18. (2018). Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortar and Concrete Exposed to a Sulfate Solution

ASTM C1609/C1609M-19. (2019). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete.

Atabey, İ. İ. (2017). *F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, Doktora Tezi, Kayseri.*

Autay, R., Missaoui, S., Mars, J. ve Dammak, F. (2019). Mechanical and tribological study of short glass fiber-reinforced PA 66. *Polymers and Polymer Composites*, 1–10. <https://doi.org/10.1177/0967391119853956>

Autodesk. (2025). AutoCAD (Version 2025, English) [Computer software]. Autodesk Inc. <https://www.autodesk.com>

Aygörmez, Y. (2018). *Kolemanit atığı ve silis dumanı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer harcın mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, İstanbul.*

Aygün, B. F., Bilir, T. ve Uysal, M. (2023). Farklı lifler içeren uçucu kül-cüruf esaslı geopolimer kompozitlerde farklı kür yönteminin etkisiyle mekanik özelliklerin incelenmesi, Beton 2023 Kongresi Bildirileri 8-10 Kasım 2023, İstanbul, ss.606-615.

Ban, C.C., Wei Ken P. ve Ramli, M. (2017). Mechanical and durability performance of novel self activating geopolymer mortars. *Procedia Engineering*, 171, 564-571. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.374>

Başpınar, S. ve Kurtuluş, C. (2018). Kompozisyon değişiminin geopolimer köpük beton temel özelliklerine etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 1 (1), 5-11.

Beglarigale, A. ve Yazici, H. (2014). Mitigation of detrimental effects of alkali-silica reaction in cement-based composites by combination of steel microfibers and ground-granulated blast-furnace slag, *Journal of Materials in Civil Engineering*. 26(12), 04014091. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001005](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001005)

Belie, N.D., Soutsos, M. ve Gruyaert, E. (2018). *Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials: State-Of-The-Art Report Of The RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4. K.*

- Sideris., H. Justnes., M. Soutsos., Sui T. Fly Ash (Ss.55-98). New York, NY: Springer.
- Bellum, R. R., Muniraj, K. ve Madduru, S. R. C. (2020). Investigation on modulus of elasticity of fly ash-ground granulated blast furnace slag blended geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 27,2,718-723. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.299>
- Berik, N. (2018). Possible harmful effects of titanium dioxide and nano titanium dioxide use on aquatic products, *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Marine Sciences and Fisheries*. 1(2), 59-65 E-ISSN 2651-5326.
- Bingöl, Ş. (2018). *Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Kayseri.*
- Bingöl, Ş.(2022). Farklı cüruf türlerinden geopolimer harç üretimi, *Bandırma Onyediyül Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 4 (2), 173 - 178.
- Binici, H., Eken, M. ve Aksoğan, O. (2012). Cüruf, uçucu kül, silis kumu ve pomza esaslı geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve radyasyon geçirgenlik özellikleri. *Electronic Journal Of Construction technologies*, 8 (2), 12-25.
- Casero, M. A. G., Arana, C. D. D., Rodriguez, J. S. B. ve Villarejo, L.P. (2022). Physical, mechanical and thermal properties of metakaolin-fly ash geopolymers. *Sustainable Chemistry And Pharmacy*, 26,100620. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100620>
- Chakkor, Q. (2021). *Kırmızı Çamur Ve Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, Türkiye.*
- Chen, Y. Zhang, W. Zhang, Y. Liu, Z. Liu, C. Zhang, Y. ve Chen, M. (2025). A novel in-process rebar integration method for 3D printing reinforced concrete beams and performance evaluation. *Virtual And Physical Prototyping*. VOL. 20, NO. 1, e2536556 (20 pages). <https://doi.org/10.1080/17452759.2025.2536556>
- Cheah, C. B., Tan, L. E. ve Ramli, M. (2019). The engineering properties and microstructure of sodium carbonate activated fly ash/ slag blended mortars with silica fume. *Composites Part B*, 160, 558–572. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.056>

- Chi, M ve Huang, R. (2013). Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construction and Building Materials*, 40, 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.003>
- Chindaprasirt,P., Jaturapitakkul, C., Chalee,W. ve Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management*, 29,2,539-543. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.023>
- Chithambaram, S. J. Kumar, S. ve Prasad., M. M. (2019). Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar, *Construction And Building Materials*, 213, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.051>
- Chokkalingam, P., El-Hassan,H., El-Dieb, A ve El-Mir, A.(2022). Development and characterization of ceramic waste powder-slag blended geopolymer concrete designed using taguchi method. *Construction And Building Materials*, 349, 128744. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128744>
- Chukov, D., Nematulloev, S., Zadorozhnyy, M., Tcherdyntsev, V., Stepashkin, A. ve Zhrebtssov, D. (2019). Structure, mechanical and thermal properties of polyphenylene sulfide and polysulfone impregnated carbon fiber composites. *Polymers*, 11 (4), 684. <https://doi.org/10.3390/polym11040684>
- Çavdar, A. ve Yetgin, Ş. (2005). Doğal puzolan katkı oranının çimentonun dayanım, işlenebilirlik, katılaşma ve hacim genleşmesi özelliklerine etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*,17 (4), 687-692.
- Çavdar, A. (2008). *Farklı puzolanik bileşime ve hamur yapısına sahip çimento harç örneklerinin, sülfat içeren ortam ve/veya aşınma etkilerine karşı dayanıklılığının incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.*
- Çavdar, Ö. ve Çavdar, A. (2024). Availability of sedimentary and volcanic rock deposits on Northeastern Turkey as concrete aggregates. *Physics and Chemistry of the Earth*, 134, 103567. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103567>
- Çavdar, Ö. ve Temizer, H. (2025). The regression analysis and determination of mechanical and physical properties on geopolymer composites under thermal and water curing. *Thermal Science*, 29(2), <https://doi.org/10.2298/TSCI250216091C>

- Çavuş, M ve Bingöl, Ş. (2023). Farklı molaritelere sahip koh çözeltisi kullanılarak üretilen cüruf esaslı geopolimer harçlarda kür sıcaklığı etkisinin incelenmesi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (3), 1959 – 1970.
- Çelik, A. İ., Özbayrak, A., Şener, A., ve Acar, M. C. (2023). Numerical analysis of flexural and shear behaviors of geopolimer concrete beams. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1116561>.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37 (8), 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Deb, P. S., Sarker, P. K. ve Barbhuiya, S.(2015). Effects of nano-silica on the strength development of geopolimer cured at room temperature. *Construction And Building Materials*, 101, 675–683. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.044>
- Djobo, J. N.Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K. ve Kumar, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolimer mortars. *Construction And Building Materials*, 124, 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.141>
- Durak, U ve Şimşek, A. A. (2020). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu temelli geopolimer sistemlerde atık demir tozunun agrega yerine kullanımının araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5 (2), 812-828.
- Ekaputri, J., Junaedi, S. ve Wijaya, S. (2017). Effect of curing temperature and fiber on metakaolin-based geopolimer. *Procedia Engineering*, 171, 572-583. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.376>
- Elgabbas, F., Ahmed, E. A. ve Benmokrane, B. (2016). Flexural behavior of concrete beams reinforced with ribbed basalt-FRP bars under static loads. *Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000752](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000752).
- El-Hassan, H., Shehab, E. ve Al-Sallamin, A. (2018). Influence of different curing regimes on the performance and microstructure of alkali-activated slag concrete, *J. Mater. Civil Eng.* 30 (9), 04018230. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002436](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002436)

- Emre, T.E. (2023). *Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçlarda aktivatör türünün ve uçucu kül tipinin mekanik özelliklere etkisi*. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, Türkiye.
- Erem, A. D. ve Özcan, G. (2015). Polipropilen/titanyum dioksit nanokompozit liflerin üretimi ve karakterizasyonu, *Tekstil ve Mühendis*, 22 (99) ,1-6. <https://doi.org/10.7216/130075992015229901>
- Eren, N. A. (2023). Nano-malzemelerin geopolimer betonun termal davranışlarına etkisi, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 15(2), 80-94. <https://doi.org/10.55974/utbd.1223938>
- Eryılmaz, K., Polat, R., Karagöl, F., ve Turhan, D. (2023). Geopolimer beton atıklarından elde edilen agregaların geopolimer betonda kullanılabilirliğinin araştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 419-431. <https://doi.org/10.21597/jist.1159137>
- Fang, Y. ve Kayali, O. (2013). The fate of water in fly ash-based geopolymers. *Construct. Build. Mater.* 39, 89-94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.024>
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, J. G., ve Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research* 29, 1313–1321.
- Gao, X. (2017). *Alkali Activated Slag-Fly Ash Binders: Design, modeling and application*, eindhoven university of technology. Doktora Tezi, Netherlands, 229p.
- Ganesh, A.C. ve Muthukannan, M. (2021). Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength. *Journal of Cleaner Production*, 282,124543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124543>
- Giergiczny, Z.(2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 124,10582. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105826>
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S. ve Demir, İ. (2009). Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (2), 33-42.

- Görhan, G. ve Kürklü, G. (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites:PartB*,58, 371-377. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.082>
- Görür, E.B.(2015). *Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer betonun dayanım ve durabilite özelliklerinin araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Kayseri, Türkiye.*
- Gültekin, A. ve Ramyar, K., (2022). Uçucu kül tabanlı geopolimer sıfcon'ların eğilme dayanımı ve tokluk özelliklerinin incelenmesi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9 (1), 311-324. <https://doi.org/10.31202/ecjse.973668>
- Güzelküçük, S ve Demir, İ. (2019). Perlit esaslı geopolimer kompozitlere kür süresi ve sıcaklığın etkisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(2), 730-737. <https://doi.org/10.29137/umagd.558983>
- Güzelküçük, S. (2020). *Isı yalıtım kabiliyetine sahip perlit esaslı geopolimer bağlayıcılı harçların geliştirilmesi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, , Kırıkkale.*
- Hager, I., Sitarz, M. ve Mróz, K. (2021). Fly-ash based geopolymer mortar for high-temperature application-effect of slag addition. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128168>
- Hamed, E ve Demiröz, A.(2024). optimization of geotechnical characteristics of clayey soils using fly ash and granulated blast furnace slag-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 441,137488. Doi:10.1016/j.conbuildmat.
- Hao,W., Junwei Liu, J.ve Kanwal, H. (2023).Compressive properties of cementitious composites reinforced by 3d printed pa 6 lattice. *Polymer Testing*, 117,107811. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107811>
- Hou, S., Xiao, J. Duan, Z. ve Ma, G. (2021). Fresh properties of 3d printed mortar with recycled powder. *Construction and Building Materials* 309, 125186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125186>
- He, J., Zhang, J., Yu, Y. ve Zhang, G. (2013). The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A

- comparative study. *Construction and Building Materials*, 30, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.011>
- Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar., ... Liew, Y. M., (2012). Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers. *Construct. Build. Mater.* 35, 912-922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.102>
- Hematibahar, M., Kharun, M., Bhowmik, A. ve Valentin, R. (2025). The SADRA Algorithm as a Framework for Sustainable Innovation: A Review of Case Studies on 3D-Printed Reinforced Concrete Beam and Fiber-Reinforced Concrete. *Engineering Reports*, 7:e70208. <https://doi.org/10.1002/eng2.70208>
- Huang, Z., Chen, W., Tran, T. T., Pham, T. M., Hao, H., Chen, Z., ve Elchalakani, M. (2021). Experimental and numerical study on concrete beams reinforced with basalt FRP bars under static and impact loads. *Composite Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113648>
- Huseien, G.F., Sam, A.R.M.S. ve Alyousef, R. (2021). Texture, morphology and strength performance of self-compacting alkali-activated concrete: Role of fly ash as gbfs replacement. *Construction And Building Materials*, 270, 121368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121368>
- İlkentapar, S. ve Eren, H. (2021). EPS ile ikame edilmiş uçucu küllü geopolimer hafif harcın fiziksel, mekanik ve ısıl geçirimsizlik özelliklerinin incelenmesi, *Academic Platform Journal of Engineering and Science* 9 (1), 28-38. <https://doi.org/10.21541/apjes.713547>
- İlkentapar, S. ve Örklemmez, E. (2020). Uçucu kül esaslı geopolimer harçlara diatomit ikamesinin ısı iletkenliğe etkisi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 36 (3).
- İpek, S. ve Ekmen, Ş. (2022). Yapı malzemelerinin geopolimer harç üretiminde kum olarak geri dönüştürülmesinin incelenmesi, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 17, 404-419. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.1085538>
- Jain, N. J. ve Mishra, S. S. (2025). Comprehensive analysis of structural beams: Theoretical calculations and simulation analysis using ANSYS. *Materials Research Proceedings* 48, 50-59. <https://doi.org/10.21741/97816449034>

- Jayaprakash, S., Pandimani, Jegatheeswaran, D., Subbaram, S., Dhamodharan, M. Ramasamy, V., ... Adjei-Fio, F. (2025). Microstructure Morphology Behaviors of Reinforced Concrete Beams With Glass Fiber Reinforced Polymer Bars. *Engineering Reports*, 7:e70304. <https://doi.org/10.1002/eng2.70304>
- Junaid, M.T., Shweiki, A., Barakat, S., Alhalabi, M., ve Mostafa, O. (2022). Flexural characterization and ductility assessment of small-scale mortar beams reinforced with 3d-printed polymers, *Structures*, 45, 1751–1761. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.007>
- Juracka, D., Lehner, P., Kawulok, M., Bujdos, D., ve Krejsa, M. (2025). 3D Printed Beam with Optimized Internal Structure—Experimental and Numerical Approach, *Materials*, 18, 5512. <https://doi.org/10.3390/ma18245512>
- Kantarci, F.(2013). *Elazığ Ferrokrom Cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, , Malatya.*
- Kalaycıklı, İ.E. (2020). *farklı geopolimer betonların dayanımlarının zamanla değişimi ve durabilitesi. İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.*
- Kantarci, F. (2018). *Nano silis, mikro silis ve polimer katkıları içeren volkanik tüf esaslı geopolimer beton üretimi ve özelliklerinin araştırılması. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, , Malatya.*
- Karahan, O. (2006). *Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Adana.*
- Karşahin, M., Yıldız, A.H., ve Taciroğlu, M.V. (2024). Atık mermer tozu ile zemin stabilizasyonunun mekanistik-amprik tasarım yöntemine göre incelenmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 39 (3), 1621-1636. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1125457>
- Kaya, M. (2016). *Farklı tür uçucu küller kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.*

- Kaya, M. (2021). Kaolin esaslı geopolimer harçlarda silis dumanı ve mikro SiO₂ katkısının dayanım özellikleri üzerine etkisi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi (NÖHÜ) Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (2), 640-647. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.886863>
- Kaya, M. (2020). Yüksek ve düşük kalsiyum içeren uçucu küller ile üretilen geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9 (2), 96-104. <https://doi.org/10.46810/tdfd.782054>
- Kirthiga, R., ve Elavenil, S. (2025). Structural Performance of Flexural and Shear- Deficient Pre- cracked Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Knitted Glass Fabric- Reinforced Cementitious Matrix. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 19 (80). <https://doi.org/10.1186/s40069-025-00816>
- Koçan, F. (2018). Sivas bölgesi selestit cevherinin asit ve baz çözeltileri ile çözünme kinetiği ve SRCO₄ üretimi, *Kimya Anabilim Dalı, Fizikokimya Bilim Dalı, Doktora Tezi, Manisa, Türkiye*.
- Köker, T.Ş.(2019). Hafif agrega katkılı geopolimer harçların mekanik ve durabilite özellikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde, Türkiye*.
- Kubba, Z., Huseien, G.F., Sam, A.R., Wei, S., Asaad, M., Ismail, M., ... Mirza, J. (2018). Impact of curing temperatures and alkaline activators on compressive strength and porosity of ternary blended geopolymer mortars. *Case Studies In Construction Materials*, 9,00205. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00205>
- Kut, U. (2018). Yapılarda ısı yalıtımı için geopolimer malzeme üretimi ve karakterizasyonu, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye*.
- Kürklü, G. (2016). Oda sıcaklığında kür edilen granüle yüksek fırın cürufllu geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*,16, 2, 356 – 367.
- Kretzer, M. B., Effting, C., Schwaab, S. ve Schackow, A. (2021). Hybrid geopolymer-cement coating mortar optimized based on metakaolin, fly ash, and granulated

- blast furnace slag. *Cleaner Engineering And Technology*, 4, 100153. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100153>
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan D. ve Sabino, U. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3d printing: filament processing, materials, and printing parameters, *Open Engineering*, 11, 639–649, De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>
- Lee, N. K. ve Lee, H. K. (2013). Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construction and Building Materials*, 47, 1201–1209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.107>
- L₁, Z ve L₁, S. (2018). Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete. *Construction And Building Materials*, 163, 668-680. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.127>
- Li, S., Khieu, H. H., Black, J. R., Xuan, H. N. ve Tran, P. (2025). Two-scale 3D printed steel fiber reinforcements strategy for concrete structures. *Construction and Building Materials*, 458,139626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139626>
- Liban, R. I. (2022). *Taguchi yöntemi ile uçucu kül ve kalker katkılı zeolit esaslı geopolimer harçların tasarlanması, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya, Türkiye.*
- Lin, T., Jia, D., He, P. ve Wang, M. (2010). In situ crack growth observation and fracture behavior of short carbon fiber reinforced geopolymer matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 527 (9–10), 2404–2407. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.02.043>
- Ling,Y., K., Li,W., Shi,G. ve Lu, P. (2019). Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ashbased engineered geopolymer composites. *Composites Part B*, 164, 747–757. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092>
- Litu, L., Buema, G., Mosoarca, G. ve Harja, M. (2024). Copper ion removal by adsorption using fly ash-based geopolymers: process optimization insights from taguchi and anova statistical methods, *Materials*, 17, 3992. <https://doi.org/10.3390/ma17163992>
- Liu, G., Florea, M.V.A. ve Brouwers, H. J. H. (2019). Characterization and performance of high volume recycled waste glass and ground granulated blast furnace slag or fly

ash blended mortars. *Journal of Cleaner Production*, 235, 461-472.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.334>

Lloyd, N. ve Rangan, V. (2010). Geopolymer concrete with fy ash. In proceedings of the second international conference on sustainable construction materials and technologies. uwm center for by-products utilization, 22 Ocak 2023 Tarihinde <http://hdl.handle.Net/20.500.11937/3540> adresinden erişildi.

Luga, E.(2015). *Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu geopolimer harçların özellikleri. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Kayseri, Türkiye.*

Maherian, M. F., Bıçakçı, S. N., Baran, Ş. ve Atahan, H. N. (2023). Taguchi tasarım metodu kullanılarak, uçucu kül ve nano-silika içeren karışımların basınç dayanımının belirlenmesi, *Beton 2023 Kongresi Bildirileri*, 8-10 Kasım 2023,İstanbul, ss.229-238.

Mahmut, O ve Emiroğlu, M. (2016). Elazığ ferrokrom cürufunun alkali aktive edilmiş harç üretiminde kullanım potansiyelinin araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28 (1), 23-34.

Maraş, M. M. (2019). *Geogrid geopolimer panellerle güçlendirilmiş yığma duvarların yapısal davranışının incelenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Kahramanmaraş.*

Marvila, M.T., Azevedo, A. R. D., Júnior, J. A. T. L. ve Vieira, C. M. F. (2023). Activated alkali cement based on blast furnace slag: Effect of curing type and concentration of na2o. *Journal Of Materials Research And Technology*, 23, 4551-4565.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.088>

Meng, T., Jia, Y., Dai, D., Wang, Z., Lai, J., Lai, Z., ... He, K. (2025). Effect of nano- CaCO_3 on metakaolin geopolymers at different Na/Al ratios: Early performance, microstructure, and hydration process. *Construction and Building Materials*, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141789>

Mengeloğlu, F. ve Çavuş, V. (2019). Titanyumdioksit'in (Nm Ve μm TiO_2) odun plastik kompozitlerin bazı mekanik özelliklerine etkisi, *Mas 10th International European*

Conference On Mathematics-Engineering-Natural&Medical Sciences-X, December 14-15, İzmir-Türkiye.

- Mermerdaş, K. ve Ekmen, Ş. (2018). Alkali aktivatör parametrelerinin ve test koşullarının geopolimer betonların büzülme ve sünme davranışı üzerine etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 93-101.
- Mijarsh, M. J. A., Megat Johari M. A. ve Ahmad, Z. A. (2015). Compressive strength of treated palm oil fuel ash based geopolimer mortar containing calcium hydroxide, aluminum hydroxide and silica fume as mineral additives. *Cement And Concrete Composites*, 60, 65–81. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.007>
- Moazzenchi, S., ve Vatani Oskouei, A. (2023). A Comparative Experimental Study on the Flexural Behavior of Geopolymer Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 11(1), 21-42. <https://doi.org/10.22075/JRCE.2022.25157.1569>
- Mohammed, D.T. ve Yaltay, N. (2024). Strength and elevated temperature resistance properties of the geopolimer paste produced with ground granulated blast furnace slag and pumice powder. *Ain Shams Engineering Journal*, 15 (3), 102483. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102483>
- Mostert, J. P. ve Kruger, J. (2025). Improving shear and flexural performance of macroscale 3D printed concrete beams through filament interlocking. *Journal of Building Engineering* 111, 113159. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113159>
- Najimi, M., Ghafoori, N., Radke, B., Sierra, K. ve Sharbaf, M. (2016). Properties of alkali-activated natural pozzolan and fly ash mortars: A comparative study. *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, August 7-11, Las Vegas USA, s. 1-13. <https://doi.org/10.18552/2016/SCMT4S313>
- Naskar, S ve Chakraborty, A. K. (2016). Effect of nano materials in geopolimer concrete. *Perspectives in Science*, 8, 273-275. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.049>
- Nazir, A. Gökçekaya, O. Masum Billah, K.M. Ertuğrul, O. Jiang, J. Sun, J. ve Hussain, S. (2023). Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular

- metamaterials. *Materials Design* 226, 111661.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111661>
- Ngo, T. D. Kashani, A. Imbalzano, G. Nguyen, K.T.Q. ve Hui, D.(2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B, Engineering*.143(15), 172-196.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- Obeidy, N. A. Khalil, W. I. ve Ahmed, H. K. (2024). Optimization of local modified metakaolin-based geopolymer concrete by Taguchi method, *Open Engineering* 14, 20220561. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0561>
- Olivia, M. ve Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by taguchi method. *Materials Design*, 191-198.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.036>
- Onoue, K., Iwamoto, T. ve Sagawa, Y. (2019). Optimization of the design parameters of fly ash-based geopolymer using the dynamic approach of the taguchi method, *Construction and Building Materials* 219, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.177>
- Özcan, U. ve Güngör, S. (2019). Sürdürülebilir bir yöntem / betonda puzolan kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15,176-182.
- Özen, S. (2021). Volkanik tüf esaslı geopolimerlerin basınç dayanımına kür süresi ve sıcaklığın etkileri. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11 (2), 530-536.
<https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.866828>
- Pehlivan, H. (2023). Sodyum hidroksit ile aktive edilmiş farklı volkanik orijinli kayac esaslı geopolimer harçların mekanik özellikleri, *Euroasia Journal Of Mathematics, Engineering, Natural Ve Medical Sciences*, 10 (26), 105-116.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.7771748>
- Pehlivan, H. (2023). Nano silis katkılı trakitik tüf esaslı geopolimer harçların farklı kür ortamlarında özelliklerinin incelenmesi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3):580-594. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1265856>

Pekdemir, Y.(2022). *Donma-Çözölme Ve Katkı Maddelerinin Donmuş Zeminin Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Erzurum.*

Phoongernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S. ve Chindaprasirt, P. (2015). Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer. *Elsevier BV*, 91, *Linguagem: Inglês*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.001>

Prusty, J. K. ve Pradhan, B. (2020). Multi-response optimization using Taguchi-grey relational analysis for composition of fly ash-ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete. *Construction And Building Materials*, 241, 118049. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118049>

Purba, L. H., Bartholomeus, S.E. ve Angin, S. P. (2025). Experimental and numerical study on the comparative flexural behavior of geopolymer concrete beams based on metakaolin and fly ash. *INERSIA*, 21(1). <https://doi.org/10.21831/inersia.v21i1.78027>

Raj, P. K. A., Damdoaran, S., Nagarajan, P. ve Thomas B.S. (2024). A simplified mix design for ggbs–dolomite geopolymer concrete using the taguchi method. *Iranian Journal Of Science And Technology, Transactions Of Civil Engineering*, 48, 3189–3212. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01354-4>

Raj, S. R., Arulraj, P. G., Anand, N., Balamurali, K. ve Gokul, G. (2021). Influence of various design parameters on compressive strength of geopolymer concrete: a parametric study by taguchi method, *International Journal of Engineering*, 34, (10),ss. 2351-2359. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.10a.16>

Rattanasak, U., ve Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073–1078. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.022>.

Roviello, G., Occhicone, A., Gregorio, E.D., Ricciotti, L., Cioffi , R., Ferone, C. ve Tarallo, O (2025). Geopolymer-based composite and hybrid materials: The synergistic interaction between components. *Sustainable Materials and Technologies*, 44 e01404. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01404>

- Rovnaník, P., (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 24, 1176-1183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023>
- Saran, O. (2023), *Bazalt Fiber Ve Mineral Katkıların Kohezyonlu Zeminlerin Geoteknik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, Doktora Tezi, Konya, Türkiye.*
- Sezer, R.(2018). *Yerli selestit cevherinden al-sr master alaşım üretimi ve özelliklerinin araştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, Türkiye.*
- Shang, J., Dai, J.G., Zhao T.J., Guo, S.Y., Zhang, P. ve Mu, B. (2018). Alternation of traditional cement mortars using fly ash-based geopolymer mortars modified by slag. *Journal Of Cleaner Production*, 203, 746-756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.255>
- Sharifi, E., Sadjadi, S. J., Aliha, M. R. M. ve Moniri, A. (2020). Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method. *Construction and Building Materials*, 236,117547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117547>.
- Shweiki, A., Junaid, M.T. ve Barakat, S. (2019). Flexural characteristics of mortar cement reinforced with 3D-printed polymer. *Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*. ICSECT 154. <https://doi.org/10.11159/icsect19.154>
- Singh, N. B., Saxena S. K. ve Kumar, M. (2018). Effect of nanomaterials on the properties of geopolymer mortars and concrete. *Materials Today Proceedings* 5, 9035–9040. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.018>
- Skoratko, A., Szatkiewicz, T., Katzer, J. ve Jagoda, M. (2022). Mechanical properties of mortar beams reinforced by gyroid 3d printed plastic spatial elements. *Cement And Concrete Composites*, 134, 104809. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104809>
- Soltani, A., Tarighat, A., Rostami, R., Tavakoli, D. ve Moradi, A., (2024). Investigation of mechanical properties of concrete with clinoptilolite and silica fume using taguchi method. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9 (77). <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01362-3>

- Şenol, A. F ve Demiral, N.Ç. (2023). Akışkanlaştırıcı katkı kullanımının yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçların özelliklerine etkisi, *1st International Conference On Scientific And Innovative Studies*, 18-20 Nisan, Konya, ss. 273-278. <https://doi.org/10.59287/icsis.612>
- Tammam, Y.(2021). *Farklı tür mineral katkıların uçucu kül tabanlı geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, Türkiye.*
- Temizer, H. ve Çavdar, Ö. (2024). Investigation of the effects of various operating parameters on geopolimer mortars made from natural minerals and industrial waste materials. *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials*, 2024, 54 (4), 292 – 301.
- Temuujin, J., Riessen, A. V. ve Williams, R. (2011). Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolimer pastes. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1–3), 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.121>
- Thokchom, S. Ghosh, P. ve Ghosh, S. (2010). Performance of fly ash based geopolimer mortars in sulphate solution, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 3 (1), 36-40. <https://doi.org/10.25103/jestr.031.07>
- Tonyalı, T. (2021). *Farklı tür atık malzemeler kullanılarak üretilen geopolimer harçların mekanik ve kalıcılık özelliklerinin incelenmesi. İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, İstanbul, Türkiye.*
- Topal, Ö.(2020). *Yüksek Fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların yangın dayanımına geri dönüştürülmüş agreganın etkisinin araştırılması. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Malatya, Türkiye.*
- Topçu, İ.B. ve Toprak, M.U. (2009). Alkalilerle aktive edilen taban küllü hafif harç üretimi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 2. 153-164.
- Topçu, İ.B ve Sofuoğlu, T.(2020). Pres filtre atığı ve uçucu kül ile elde edilen geopolimer harçların farklı koşullar altında birim ağırlığı ve basınç dayanımının değerlendirilmesi. *El-Cezerî Journal Of Science And Engineering*, 7 (2). <https://doi.org/10.31202/ecjse.699997>

- Türk Standardları Enstitüsü. (2000). TS EN 1015-11: Kagit harcı deney metotları – Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2012). TS EN 196-1: Çimento deney metotları – Bölüm 1: Dayanım tayini.
- Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. (2015). Yüksek fırın cürufu el kitabı [PDF]. <https://www.betonvecimento.com/wp-content/uploads/2015/02/Y%C3%BCksek-F%C4%B1r%C4%B1n-C%C3%BCrufu-El-Kitab%C4%B1.pdf>
- Tsai, C.J., Huang, R., Lin, W.T. ve Wang, H.N. (2014). Mechanical and cementitious characteristics of ground granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag blended mortar. *Materials Design*, 60, 267-273. DOI:10.1016/j.matdes.2014.04.002
- Tunçel, O. (2024). Optimization of charpy impact strength of tough pla samples produced by 3d printing using the taguchi method, *Polymers* 2024, 16, 459. <https://doi.org/10.3390/polym16040459>
- Türkmen, K ve Karakoç, B. (2014). Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Geopolimer Çimento Üretiminin Araştırılması. *Tübitak*, 15 Mayıs 2023 Tarihinde. <https://App.Trdizin.Gov.Tr/Proje/Tvrnek16vte/Elazig-Ferrokrom-Curufundan-Alkali> adresinden erişildi.
- Tzortzinis, G., Gross, A. ve Gerasimidis, S. (2022). Auxetic Boosting Of Confinement In Mortar By 3D Reentrant Truss Lattices For Next Generation Steel Reinforced Concrete Members. *Extreme Mechanics Letters*, 52, 101681. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2022.101681>
- URL-1, <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/08/Demir-Celik-Sektorunde-Atik-Yonetimi-Yasin-Ocal.pdf>. 3 Haziran 2024.
- URL-2, <https://insapedia.com/geopolimer-nedir-geopolimerbeton-ve-malzeme-cesitleri/> adresinden erişildi. 5 Temmuz 2020.
- URL-3, <https://volkanatabey.com.tr/ucucu-kul-uretimi-kullanim-alanlari-ve-siniflandirilmasi/>. 20 Eylül 2023.
- URL-4, <https://madencilikrehberi.files.wordpress.com/2012/02/selestit.doc>. 21 Eylül 2023.

- URL-5,<https://www.robocombo.com/blog/icerik/filament-nedir-filament-cesitleri?srsltidAfmBOooiKH802XAcFbZk5wzRHOJC4cAF9jzehCAohbUAZWzsCru3yD>. 5 Mart 2024.
- URL-6,<https://www.onlinefilament.com/blog/icerik/filament-nedir-filament-cesitleri-nelerdir?srsltid=AfmBOoo0tC6Pgb3T5F94ozxLS9Qzd4tjyqlxnoSGlv15x8Hw3ZIm0>. 5 Mart 2024.
- URL-7,<https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/engineering-filaments/ultrafuse-abs-fusion/> 5 Mart 2024.
- URL8,<https://www.onlinefilament.com/class/INNOVAEditor/assets/Ultrafuse%20XSTRAND%20GF30-PA6.pdf> 5 Mart 2024.
- URL9,https://cdn.shopify.com/s/files/1/0762/2839/files/TDS_pps-cf-9938-bk-filament_en_iso.pdf?v=1622387081 5 Mart 2024.
- Ünverdi, A. (2021). *Yüksek sıcaklık ve yangın etkisindeki kimyasal katkılı harçların mekanik özelliklerinin istatistiksel yöntemlerle modellenmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Eskişehir.*
- Venkitasamy, V., Santhanam, M., Rao, B. P. C., Balakrishnan, S. ve Kumar, A. (2024). Mechanical and durability properties of structural grade heavy weight concrete with fly ash and slag. *Cement And Concrete Composites*, 145, 105362. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105362>
- Wang, Y. S. Alrefaei, Y. ve Dai, J. G. (2020). Influence of coal fly ash on the early performance enhancement and formation mechanisms of silico-aluminophosphate geopolymer. *Cement And Concrete Research* 127, 105932. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105932>
- Wansom, S. Janjaturaphan, S. ve Sinthupinyo, S. (2010). Characterizing pozzolanic activity of rice husk ash by impedance spectroscopy. *Cem. Concr. Res.* 40 (12) 1714–1722.) <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.013>
- Wongsa, A. Boonserm, K. Waisurasingha, C. Sata, V. ve Chindaprasirt, P. (2017). Use of municipal solid waste incinerator (mswi) bottom ash in high calcium fly ash

- geopolymer matrix, *Journal Of Cleaner Production* 148, 49-59.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.147>
- Xu, Y., Zhang, H., Gan, Y. ve Šavija, B. (2021). Cementitious composites reinforced with 3d printed functionally graded polymeric lattice structures: Experiments and modelling. *Additive Manufacturing*, 39, 101887.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101887>
- Yaddollah, M. M. (2013). *Hasankale pomzasından alkali aktivasyon yöntemiyle geopolimer çimentosunun üretilebilirliğinin araştırılması. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Erzurum, Türkiye.*
- Yan, J., Zhu, Z., Liu, R., Chen, M., Shao, C., Zhang, C. ve Li, X. (2024). A multi-perspective study on the influence of physical and chemical properties of 5 types of fly ash on the performance of high-volume blended fly ash cementitious slurry. *Construction And Building Materials*, 411, 134301.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134301>
- Yan Z. H. Liu, J. C. ve Wu, B. (2021) . Mechanical properties and reaction mechanism of one-part geopolymer mortars, *Construction And Building Materials* 273, 121973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121973>
- Yaprak, H ve Kaplan, G. (2016). Farklı kür koşullarının taban külü katkılı geopolimerlerin termal ve mekanik özelliklerine etkisi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 9, 3, 41-51.
- Yassin, A.M. Hafez, M. A. ve Aboelhassan, M.G. (2025). Experimental and Numerical Investigation on the Effect of Different Types of Synthetic Fibers on the Flexure Behavior and Mechanical Properties of 3D Cementitious Composite Printing Provided with Cement CEM II/A-P, *Buildings* 15, 1201.
<https://doi.org/10.3390/buildings15071201>
- Yeğin, Y.(2020). *Isparta gölcük yöresi volkanik külünden üretilen geopolimer betonun özelliklerinin fabrika atıkları ve nano malzemeler ile iyileştirilmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Erzurum, Türkiye.*

- Yenginar, Y.(2020). *Derin karıştırma kolonlarının performansını etkileyen faktörlerin model deneylerle araştırılması*, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, , Konya.
- Yıldız, S.(2023). *Endüstriyel yan ürünlerle üretilmiş geopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Kocaeli, Türkiye.
- Yıldız, M. K. (2024). Designing hollow brick waste based alkali activated composites by taguchi method, *Sakarya University Journal of Science*, 28, (1), 73-84. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.1314703>
- Yüksek, S.ve Kaya, S. (2017). Kömür baca külü, kireç ve jips ürünlerinden yapı malzemesi yapımı, *Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems*, 5-3 (2017) 58-70. <https://doi.org/10.21541/apjes.292066>
- Zaimoğlu, A. Ş. (2003). *Bentonit, uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonu karışımlarında fiziksel ve mekanik özelliklerin taguchi yöntemi ile incelenmesi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum, Türkiye.
- Zhanga, P., Zheng, Y., Wang, K. ve Zhang, J. (2018). A review on properties of fresh and hardened geopolymers mortar. *Composites Part B: Engineering*,152,79-95. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.031>
- Zhang, Y. Xiao, R. Jiang, X. Li, W. Zhu, X. ve Huang, B. (2020). Effect of particle size and curing temperature on mechanical and microstructural properties of waste glass-slag-based and waste glassfly ash-based geopolymers, *Journal Of Cleaner Production* 273, 122970. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122970>
- Ziada., M. Tanyıldızı, H. Seleoğlu, M. ve Coşkun, A. (2024). Bacteria-based crack healing of 3d printed pva fiber reinforced geopolymer mortars. *Journal of Building Engineering* 86 (2024) 108934. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108934>

ÖZGEÇMİŞ

Hülya TEMİZER, İlk ve orta öğrenimini Mersin'de tamamladı. Fırat Üniversitesi Yapı Eğitimi ve Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümlerinden mezun oldu. 2013 yılında Fırat Üniversitesi Yapı Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimi sonrası, 2020 yılında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora başladı. Evli ve 2 çocuk annesi olup, İngilizce bilmektedir. Temizer'in lisansüstü süresince yapmış olduğu çalışmalar aşağıda yer almaktadır.

Çavdar, Ö., ve Temizer, H. (2024). Investigation of The Effects of Various Operating Parameters on Geopolymer Mortars Made From Natural Minerals and Industrial Waste Materials. *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials*. 54 (4), 292 – 301.

Çavdar, Ö., ve Temizer, H. (2025). The regression analysis and determination of mechanical and physical properties on geopolymer composites under thermal and water curing. *Thermal Science*. <https://doi.org/10.2298/TSCI250216091C>.

Çavdar, Ö., ve Temizer, H. (2025). Investigation of Mechanical Properties of Geopolymer Beams Reinforced with 3D Printed Filaments with Different Types and Geometries, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Under Review.

Çavdar, Ö., ve Temizer, H. (2024). Effects on geopolymer mortars of the blast-furnace slags obtained from different regions. *3rd International Conference on Academic Research. All Sciences Proceedings*. November 10-11, Konya.

Temizer, H. ve Çavdar, Ö., (2025). Microstructural investigation of geopolymer mortars obtained from recyclable waste materials. *European Mechanical Science*, 9(2): 196-206. <https://doi.org/10.26701/ems.1695691>

Çavdar, Ö., Temizer, H., ve Aksüt, Y. S. (2026). Endüstriyel/madensel atıklardan elde edilen geopolimer bileşenler üzerinde Taguchi metodu yardımıyla farklı üretim

parametrelerinin etkisinin belirlenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (1), 268 – 291.
<https://doi.org/10.47495/okufbed.1690102>

Çavdar, Ö., ve Temizer, H. (2023). Endüstriyel Atık Kullanılarak Üretilen Geopolimer Harçların Durabilite Özellikleri. *3rd International Conference on Innovative Academic Studies , All Sciences Proceedings*. September 26-28, Konya.

Çavdar, Ö., ve Temizer, H. (2023). Mineral içerikli atık malzemelerin geopolimer harçlar üzerindeki etkisi. *2nd International Conference on Recent Academic Studies. All Sciences Proceedings*. October 19-20, Konya.

Çavdar, Ö., ve Temizer, H. (2024). Ülkemizde Farklı İşletmelerden Elde Edilen Öğütülmüş Yüksek Fırın Cüruflarının Geopolimer Harçlar Üzerindeki Etkileri. *3rd International Conference on Academic Research. All Sciences Proceedings*. November 10-11, Konya.