T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK KÜRÜ UYGULANMIŞ METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yusuf GÖKÇEGÖZ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Mücteba UYSAL

İkinci Danışman

Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Ocak, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK KÜRÜ UYGULANMIŞ METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yusuf GÖKÇEGÖZ tarafından hazırlanan tez çalışması 30.01.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mücteba UYSAL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
İkinci Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mücteba UYSAL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Orhan CANPOLAT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Anıl NİŞ, Üye
İstanbul Gelişim Üniversitesi _____

Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Furkan ŞAHİN, Üye
İstanbul Medipol Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Mücteba UYSAL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Elektrik Kürü Uygulanmiş Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yusuf GÖKÇEGÖZ

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FDK-2022-5153” numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam sırasında bana her zaman destek olan ve kendisiyle çalışmalarımı yürütmek benim için büyük bir onur olan, bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan değerli hocam **Sn. Prof. Dr. Mücteba UYSAL'a**,

Tez çalışmam kapsamında değerli fikirleri benimle paylaşmaktan hiçbir zaman çekinmeyen, çalışmalarım sırasında daima yardımcı olan **Sn. Prof. Dr. Orhan CANPOLAT'a**,

Elektrik kürünün hem teorik aşamasında hem pratik uygulamasında çok değerli katkılarını hiç esirgemeyen **Elektrik Mühendisi Sn. M.Akif YAZAR**, **Elektronik Mühendisi Sn. Mehmet FIRAT** ve **Elektrik Teknisyeni Sn. Hamza BOYRAZ'a**,

Doktora tez çalışmam ve akademik çalışma hayatımda benim her zaman yanımda olan, her türlü konuda maddi ve manevi desteklerini hissettiğim anneme, babama ve tüm aileme teşekkür ederim.

Ocak, 2026

Yusuf GÖKÇEGÖZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Geopolimerlerin Kullanımı 1
1.1.1 Metakaolin 2
1.1.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufu 3
1.1.3 İletkenliği Arttırıcı Elyaf Malzemeler 4
1.2 Malzemeler ve Yöntemler 7
1.2.1 Malzemelerin Karakterizasyonu 7
1.2.2 Deney Prosedürü 9
2 FİZİKSEL ÖZELLİKLER VE MEKANİK SONUÇLAR 15
2.1 Fiziksel Özellikler 15
2.1.1 Özgül Ağırlık, Gözeneklilik ve Su Emme 15
2.1.2 Ultrasonik Darbe Hızı (UPV Testi) 18
2.1.3 Aşınma Direnci 20
2.2 Ön Testler Kapsamında Farklı Molaritelerle Numunelerin Basınç Dayanımı Sonuçları 22
2.3 Elyaf Katkılı Numunelerin Mekanik Özellikleri 28
2.3.1 Basınç Dayanımı 28

2.3.2 Eğilme Dayanımı 30

2.3.3 Yarmada ve Doğrudan Çekme Dayanımı 33

2.4 Mikroyapısal Analiz 35

2.4.1 Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) 35

2.4.2 X-Işını Kırınımı (XRD) 36

2.4.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 37

2.4.4 Enerji Dağılım X-ışını Spektroskopisi (EDS) 38

2.5 Çok Kriterli Karar Destek Yöntemi (HD Yöntemi) ile Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi, En İyi Geopolimer Harçların Seçimi 40

2.6 Farklı Kürleme Rejimleri ve Takviye Türlerinin Çevresel Etki Değerlendirmesi 43

3 DURABILITE DENEYLERI **50**

3.1 Yüksek Sıcaklık Etkisi 50

3.2 Sülfat Etkisi 54

3.3 Donma-Çözülme Etkisi 58

3.4 Mikroyapısal Analiz 59

3.4.1 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) 59

3.4.2 X Işını Kırınımı (XRD) 64

3.4.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 69

3.4.4 Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) 77

4 SONUÇ **81**

KAYNAKÇA **85**

A NUMUNELERİN FARKLI BÜYÜTMELERDE SEM GÖRÜNTÜLERİ **92**

B HD YÖNTEMI HESAP METODU **102**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **104**

SİMGE LİSTESİ

A	Akım
σ	Eğilme dayanımı
V	Gerilim
L	Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık
B	Prizma kesitinin eni
D	Prizma kesitinin yüksekliği
P	Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet

KISALTMA LİSTESİ

AET	Atık Erozyon Teli
B/A	Bağlayıcı/Aktivatör
ÇF	Çelik Fiber
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GYFC	Granüle Yüksek Fırın Curufu
KF	Karbon Fiber
KS	Karbon Siyahı
MK	Metakaolin
MPa	Megapascal
PÇ	Portland Çimentosu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SH	Sodyum Hidroksit
SS	Sodyum Silikat
UPV	Ultrasonik Darbe Hızı Testi
XRD	X Işını Kırınımı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Liflerin SEM görüntüleri (a) KF, (b) ET ve (c) ÇF **9**

Şekil 1.2 Elektrik kürleme deney sistemi ve test düzeneği **12**

Şekil 1.3 Elektrik kürleme deney sistemi örneği **12**

Şekil 2.1 Tüm geopolimer numunelerinin fiziksel özellikleri **17**

Şekil 2.2 Aşınma direnci sonuçları **22**

Şekil 2.3 Ön testlerin basınç deneyi sonuçları (6M) **23**

Şekil 2.4 Ön testlerin basınç deneyi sonuçları (8M) **24**

Şekil 2.5 Ön testlerin basınç deneyi sonuçları (10M) **25**

Şekil 2.6 Ön testlerin basınç deneyi sonuçları (12M) **26**

Şekil 2.7 Ön testlerin basınç deneyi sonuçları (14M) **27**

Şekil 2.8 Lifli numunelerin basınç deneyi sonuçları **30**

Şekil 2.9 Lifli numunelerin eğilme deneyi sonuçları **33**

Şekil 2.10 Yarmada çekme ve doğrudan çekme deneyi sonuçları **35**

Şekil 2.11 MK-GYFC geopolimer numunelerinin FTIR spektrumları **36**

Şekil 2.12 MK-GYFC geopolimer numunelerinin X-ışını difraksiyon desenleri **37**

Şekil 2.13 Taramalı Elektron Mikroskobu mikrografları: (a) Kontrol, (b) AET, (c) KF, (d) ÇF ve (e) KS **38**

Şekil 2.14 Enerji Dağılım X-ışını Spektroskopisi: (a) Kontrol, (b) AET, (c) KF, (d) ÇF ve (e) KS **39**

Şekil 3.1 Yüksek sıcaklık etkisinde basınç deneyi sonuçları **51**

Şekil 3.2 Yüksek sıcaklık etkisinde eğilme deneyi sonuçları **52**

Şekil 3.3 Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızı sonuçları **53**

Şekil 3.4 Sülfat etkisinde basınç deneyi sonuçları **56**

Şekil 3.5 Sülfat etkisinde eğilme deneyi sonuçları **57**

Şekil 3.6 Sülfat etkisinde ultrases geçiş hızı sonuçları **57**

Şekil 3.7 Donma-Çözülme etkisinde basınç ve eğilme deneyi sonuçları **59**

Şekil 3.8 Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin FTIR analizi **60**

Şekil 3.9 Sülfat etkisinde kontrol numunesinin FTIR analizi **61**

Şekil 3.10 Yüksek sıcaklık etkisinde KF numunesinin FTIR analizi **62**

Şekil 3.11 Yüksek sıcaklık etkisinde AET numunesinin FTIR analizi.....**63**

Şekil 3.12 Sülfat etkisinde AET numunesinin FTIR analizi.....**64**

Şekil 3.13 Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin X-ışını difraksiyon desenleri.....**65**

Şekil 3.14 Sülfat etkisinde kontrol numunesinin X-ışını difraksiyon desenleri...**66**

Şekil 3.15 Yüksek sıcaklık etkisinde KF numunesinin X-ışını difraksiyon desenleri.....**67**

Şekil 3.16 Yüksek sıcaklık etkisinde AET numunesinin X-ışını difraksiyon desenleri.....**68**

Şekil 3.17 Sülfat etkisinde AET numunesinin X-ışını difraksiyon desenleri **69**

Şekil 3.18 Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin SEM görüntüleri (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C.....**70**

Şekil 3.19 Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 AET numunesinin SEM görüntüleri (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C.....**72**

Şekil 3.20 Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 KF numunesinin SEM görüntüleri (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C.....**75**

Şekil 3.21 Sülfat etkisinde kontrol numunesinin SEM görüntüleri (a) Na_2SO_4 ve (b) $MgSO_4$.....**76**

Şekil 3.22 Sülfat etkisinde 0,75 AET numunesinin SEM görüntüleri (a) Na_2SO_4 ve (b) $MgSO_4$.....**77**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 İnce agrega granülometrisi **8**

Tablo 1.2 Liflerin fiziksel özellikleri **9**

Tablo 1.3 Geopolimer harçların karıştırma oranları (birimler gram cinsindendir) .. **13**

Tablo 2.1 Geopolimer harçların özgül ağırlık, gözeneklilik ve su emilimindeki göreceli değişiklikler **17**

Tablo 2.2 UPV sonuçları **19**

Tablo 2.3 Lif katkılı numunelerin maksimum akım değerleri **29**

Tablo 2.4 EDS/EDX'e göre geopolimer numunelerinin atomik yüzdeleri **39**

Tablo 2.5 HD Yöntemi Sonuçları **42**

Tablo 2.6 Kontrol ve en iyi geopolimer karışımının fiziksel ve mekanik özellikleri **42**

Tablo 2.7 Farklı kürleme rejimleri ve takviye türleri altında MK–GYFC geopolimer harçların LCA sonuçları **46**

Tablo 3.1 Yüksek sıcaklık etkisinde lifli numunelerde ağırlık kaybı **53**

Tablo 3.2 Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin EDS analizi **78**

Tablo 3.3 Sülfat etkisinde kontrol numunesinin EDS analizi **79**

Tablo 3.4 Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 KF numunesinin EDS analizi **79**

Tablo 3.5 Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 AET numunesinin EDS analizi **80**

Tablo 3.6 Sülfat etkisinde 0,75 AET numunesinin EDS analizi **80**

ÖZET

Elektrik Kürü Uygulanmiş Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi

Yusuf GÖKÇEGÖZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mücteba UYSAL

İkinci Danışman: Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Metakaolin (MK) ve granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) esaslı geopolimer harçların yerinde kürlenmesi, erken dayanım geliştirmede termal işleme kıyasla önemli bir engel olmaya devam etmektedir ve burada elektriksel kürleme, oldukça ölçeklenebilir ve enerji açısından verimli bir alternatif teknoloji olarak önerilmektedir. % 0-100 MK/GYFC bağlayıcı oranlarına sahip geopolimer harçlar, aşağıdaki molaritelerdeki sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) çözeltileri kullanılarak aktive edilmiştir: 6, 8, 10, 12 ve 14 M. Üç farklı bağlayıcı/aktivatör oranı kullanılmıştır: 1,40, 1,25 ve 1,00. Geopolimer matrisin elektro-iletken verimliliğini artırmak için seçilen molaritede çelik elyaf (ÇF), karbon elyaf (KF), atık erozyon teli (AET) ve karbon siyahı (KS) mikro dolgu maddeleri olarak eklenmiştir. Numuneler 10 V ve 20 V AC altında elektriksel kürlemeye tabi tutulmuş ve 23°C ortam koşulları ve 70°C termal koşullar ile karşılaştırılmıştır. Bulgular, liflerin dahil edilmesinin iletkenlik seviyesini ve mekanik performansı önemli ölçüde artırdığını, 28 günlük basınç dayanımlarının

88,30 MPa'ya (% 0,50 AET, 20 V) ve eğilme dayanımlarının 22,24 MPa'ya (% 0,50 KF, 7 gün) kadar çıktığını ve çeşitli durumlarda geleneksel kürleme sonuçlarını aştığını ortaya koymuştur. Lifli iyi bağlanmış geopolimer harçlara dayalı mikro yapısal çalışmalar, zararlı lif-matris etkileşimleri olmadan elektriksel kürleme yoluyla düzgün geopolimerizasyonu göstermiştir. 273 parametreye dayalı çok kriterli karar verme yaklaşımı (HD yöntemi), grup bazında optimumlar olarak % 0,50 KF, % 0,75 ÇF, % 0,75 AET ve % 1,00 KS'nı belirlemiş ve en iyi performans gösteren kombinasyon olarak % 0,75 AET'ni seçmiştir. Çalışmanın durabilite kısmında yüksek sıcaklık, sülfat (180 gün % 5 $MgSO_4$ ve % 5 Na_2SO_4 çözeltileri kullanılmıştır) ve donma-çözülme etkilerinde (120 döngü) en iyi performansı yine % 0,75 AET göstermiştir. Dolayısıyla geopolimer harçlarda elektriksel kürleme için hem mekanik hem de durabilite açısından en uygun seçeneğin % 0,75 AET olduğu tespit edilmiştir. Mikroyapı testleri de lif katkısının elektrik küründe kullanımının geopolimerler için uygun olduğunu göstermiştir. Bulgular, elektriksel kürlemenin, Avrupa Yeşil Mutabakatının iklim açısından nötr yapı malzemesi hedefi doğrultusunda hedeflenen dayanım derecelerine ulaşma potansiyeline sahip, düşük karbonlu, düşük maliyetli ve sahada uygulanabilir bir kürleme teknolojisi olduğunu doğrulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çok kriterli karar verme yöntemi, elektriksel kür, erozyon teli, geopolimer harçlar.

ABSTRACT

Investigation of The Mechanical and Durability Properties of Electrically Cured Metakaolin Based Geopolymer Mortars

Yusuf GÖKÇEGÖZ

Department of Civil Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Mücteba UYSAL
Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Oktay ARIKAN

On-site curing of metakaolin (MK)- and granulated blast furnace slag (GBFS)-based geopolymer mortars remains a major bottleneck compared to thermal treatment for early strength development, and electrical curing is proposed here as a highly scalable and energy-efficient alternative technology. Geopolymer mortars with 0–100% MK/GBFS binder ratios were activated using sodium silicate (SS) and sodium hydroxide (SH) solutions of the following molarities: 6, 8, 10, 12, and 14 M. Three different binder/activator ratios were used: 1.40, 1.25, and 1.00. Steel fiber (SF), carbon fiber (CF), waste erosion wire (EW), and carbon black (CB) microfiller were incorporated to enhance the electro-conductive efficiency of the geopolymer matrix. Specimens were subjected to electrical curing under 10 V and 20 V AC and were compared with benchmarking under ambient conditions of 23°C and thermal conditions of 70°C. The findings established that the incorporation of fibers substantially boosted the level of conductivity and mechanical performance, with 28-day compressive strengths of up to 88.30 MPa (0.50% EW, 20 V) and flexural strengths of up to 22.24 MPa (0.50% CF, 7 days), exceeding the results of conventional curing in various instances. Microstructural

studies based on well-bonded geopolymer gels with fibers indicated uniform geopolymerization through electrical curing without deleterious fiber–matrix interactions. A multi-criteria decision support approach (the HD method) based on 273 parameters established 0.50% CF, 0.75% SF, 0.75% EW, and 1.00% CB as the group-wise optima and chose 0.75% EW as the single-best performing combination. In the durability section of the study, 0.75% EW demonstrated the best performance under high temperature, sulfate (180 day % 5 $MgSO_4$ and % 5 Na_2SO_4 solutions were used), and freeze-thaw effects (120 cycle). Therefore, it was determined that 0.75% EW is the most suitable option for electrical curing in geopolymer mortars in terms of both mechanical and durability aspects. Microstructure tests have also demonstrated that the use of fiber reinforcement in the electrical curing process is suitable for geopolymers. The findings confirm that electrical curing is a low-carbon, cost-effective, and field-applicable curing technology with the potential to achieve target strength ratings, in line with the European Green Deal's climate-neutral building material goal.

Keywords: Electrical curing, erosion wire, geopolymer mortars, multi-criteria decision support.

1
GİRİŞ

1.1 Geopolimerlerin Kullanımı

Düşük ve sıfır karbon teknolojileri, düşük maliyet ve enerji gereksinimleri ile küresel ekonomiyi şekillendirmekte ve büyümeyi teşvik etmektedir. Bu konu günümüzde karar vericiler ve araştırmacılar için bir öncelikli bir araştırma alanı haline gelmiştir [1]. Avrupa Birliği'nin 100 akıllı ve iklim nötr şehri, Horizon 2030'da büyük etki yaratan bir plan olarak bulunmaktadır. Bu plan, gelecekteki şehirleri, özellikle binaları tasarlamaktadır. Horizon 2030'a göre, araştırmacılar/tasarımcılar geleceği şekillendirmek için araştırmalarını sunmaya teşvik edilmektedir. Düşük karbon teknolojileri (yani geopolimerler gibi yapı malzemeleri açısından) günümüzde önem kazanmıştır ve bu konu son gelişmelere ve gelecekteki projelere katkıda bulunmaktadır [1, 2].

Portland çimentosu (PÇ), inşaat sektöründe en yaygın kullanılan bağlayıcı malzemedir. Bu nedenle, düşük karbonlu teknolojiler ve malzemeler kullanarak geleceği şekillendirmek, çimentoyu ortadan kaldırmak ve onu çevre dostu alternatiflerle değiştirmekle başlar. Çimento endüstrisi, küresel toplam enerjinin yaklaşık % 3,8 'ini tüketmektedir [3]. Beton üretiminde alternatif bağlayıcılar dünya çapında araştırılmaya başlanmıştır. Bu amaçla, geopolimerler çevresel faydaları, % 40 ila % 80 arasında enerji tasarrufu, ekonomik faydaları ve üstün mekanik dayanıklılık özellikleri sayesinde 40 yılı aşkın bir süredir yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Bu malzemeler, PÇ'nin ekolojik etkisini azaltmada ve

endüstriyel atıkların değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamakta ve bu da onları değerli yeni mühendislik malzemeleri haline getirmektedir [4-7]. Geopolimer bağlayıcılar, çevre dostu olmalarının yanı sıra, yüksek erken mukavemet, düşük büzülme ve asit ve sülfat saldırısına karşı dirençleri nedeniyle PÇ bağlayıcılarına alternatif olarak ortaya çıkmıştır [8, 9]. Seramik benzeri mikro yapıları ve özellikleri sayesinde, geopolimerler aşırı sıcaklıklara maruz kaldıklarında mükemmel termal-fiziksel ve mekanik özelliklere sahip oldukları genel olarak kabul edilmektedir. [10, 11]

Geopolimer harçlar 300, 600 ve 900 °C'lik sıcaklıklara maruz bırakıldığında, geopolimer harçların 900 °C'de bile stabilitelerini korudukları tespit edilmiştir [12].

Uçucu kül ve cürufların sünmede önemli azalmalara yol açabileceği belirtilmektedir. İnce mineral katkı maddeleri olan silika dumanı ve metakaolin ilavesinde, % 15'e kadar olan ikame seviyelerinde sünmede daha büyük azalmalar görülür [13].

1.1.1 Metakaolin

Metakaolin (MK), yüksek sıcaklıklarda (550-800 °C) oluşan bir kil mineralidir. Bu nedenle MK, kolay bulunabilirliği ve üretimi nedeniyle kullanılmaktadır [14]. 28 gün içinde 100 MPa'ya kadar hızlı basınç dayanımı, mükemmel termal dayanıklılık ve alkali çözeltilerde iyi reaksiyon göstermesi nedeniyle onarım malzemesi olarak seçilmiştir [7, 15, 16]. Çok sayıda araştırma, MK esaslı geopolimer kaplamanın 800 °C'de yüksek yangın direncine sahip olduğunu göstermiştir. [16]

Supit ve ark. metakaolin esaslı geopolimer üretiminde sodyum silikat ve sodyum hidroksiti 1,5, 2,0 ve 2,5 olmak üzere üç farklı oranda denemiş ve en uygun olarak 2,0 olarak tespit etmiştir. Çimento yerine MK kullanılması, kullanılan toz MK miktarı arttıkça daha yüksek viskoziteli beton elde edildiğini, çimento harcı

içindeki CH, CSH ve alüminatın varlığı da, genişleme ve çatlamaya neden olan etrenjit ve alçıtaşı oluşumuna yol açan faktörlerden olduğunu ve bu nedenle, sülfat saldırısına maruz kaldığında parçalanma ve bozulma oluşabileceğini bildirmişlerdir [17].

Owaid ve ark. da MK-GYFC esaslı geopolimer üretiminde SS/SH oranı için 2,5 değerini ve SH molaritesi için 12M'yi uygun bulmuşlardır. Yüksek MK içeriği (≥30 %) harcın viskozitesini artırarak hava hapsolmasına ve daha yüksek gözenekliliğe neden olabileceği ve yüksek MK içeriği (>20 %) C–A–S–H jel oluşumu için kullanılabilir kalsiyumun azalması, su ihtiyacının artması ve sınırlı aktivatör mevcudiyeti nedeniyle MK'nin bir kısmının reaksiyona girmeden kalmasına neden olabileceği ifade edilmiştir [18].

% 20 MK ikamesi içeren enjeksiyon restorasyon malzemesi, sülfat ve sülfürik asit saldırısına karşı mükemmel dayanıklılık gösterdiği berlirtilmiştir [19].

Bu, metakaolin bazlı geopolimer harçların, aşındırıcı ortamlarda inşaatlarda yüzey kaplaması veya onarım harcı olarak kullanılma potansiyelini göstermektedir.

1.1.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufu

GYFC, yüksek fırınlarda pik demir üretiminin bir yan ürünüdür ve kireçtaşı, demir cevheri ve koktan oluşur [14]. Birçok puzolanik malzemenin geopolimerlerin üretiminde ana bileşen olduğu araştırılmıştır ve sonuçlara göre, metakaolin-cüruf bazlı geopolimerler, kabul edilebilir mekanik ve dayanıklılık performansı ile ekolojik açıdan en iyi üretilen kompozitlerdir. MK bazlı geopolimerlere % 20 GYFC eklemek, akışkanlığı ve basınç dayanımını artırırken, priz alma süresini önemli ölçüde azaltır [20].

Genel olarak, geopolimerler geleneksel etüv kürü ve ortam kürü yöntemleri kullanılarak sertleştirilir. Reaksiyon sıcaklığı, geopolimer üretiminde kritik bir faktördür. Reaksiyon hızı ortam sıcaklığında çok düşüktür ve priz almanın gecikmesi nedeniyle kürlenme olasılığı düşüktür [21, 22]. Ancak, kürleme

sıcaklıkları 40 °C'den 85 °C'ye çıktıkça reaksiyon hızı önemli ölçüde artar. Farklı öncüllerle hazırlanan erken dayanım kazancı, 28. günün basınç dayanımının 70-100 MPa aralığına ulaşabileceği belirtilmektedir [20, 23]. Geopolimer harçlarda kullanılan alüminosilikat malzemelerin kimyasal özellikleri, iletkenliklerini önemli ölçüde etkiler. Çalışmalar, uçucu kül ve metakaolin ile hazırlanan numunelerin iletkenliğinin iyi olduğunu ve metakaolinin çok daha iyi termoelektrik davranış gösterdiğini belirtmektedir. Elektrikle kürleme, daha hızlı dayanım gelişimi, daha düşük işletme maliyetleri, iyileştirilmiş kalite kontrolü sağlar ve düşük voltajlarda katkı maddeleri kullanıldığında taze betonun donmasını önler [24-27]. NaOH konsantrasyonunun ve su içeriğinin artırılmasının hem fiziksel hem de elektriksel özellikleri iyileştirdiği belirtilmektedir [28, 29]. Ek olarak, geopolimerlerin işlenebilirliği, geopolimerlerin üretimi sırasında ana kriterdir ve yüksek işlenebilirlik, karışımın kompaktlığını artırabilir ve hava kabarcıklarını azaltabilir [1]. Gerekli önlemler alınmadıkça, önemli sorunlar sıkıştırmayı zorlaştırır ve nihai yapıyı zayıflatır. Kovarik ve ark. [30], polialümino-sialatların kürleme işlemi olarak elektrik güçlendirmenin, diferansiyel tarama kalorimetrisi ile potasyum silikat ile aktive edilmiş kil kalıntılarının araştırılmasına yardımcı olabileceğini araştırmıştır. Mekanik özelliklerin, elektrikle ve normal şekilde kürlenmiş numuneler arasında eğilme dayanımında hiçbir fark göstermediğini sonucuna varmışlardır.

GYFC bazlı geopolimerler ayrıca hızlı erken mukavemet gelişimi ve üstün asit direnci gösterir.

MK–GYFC karışımları, geleneksel Portland Çimento harçlarına kıyasla daha yüksek basınç, çekme ve eğilme mukavemetleri elde eder [18].

1.1.3 İletkenliği Arttırıcı Elyaf Malzemeler

KF, uygun fiyatı, yüksek elastikiyet modülü, çekme dayanımı ve tokluğu nedeniyle betonda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneklerin elektrik direncinin, artan gerilimle birlikte azalan bir eğilim sayesinde düştüğünü açıklamaktadırlar.

Payakaniti ve ark. [6] ve Dehghanpour ve ark. [31], KF ilavesinin iletkenliği ve basınç dayanımını artırdığını belirtmiştir. Vaidya ve Allouche [32], sağlık izleme amacıyla geopolimerlerin elektriksel iletkenliğini artırmak için KF kullanmıştır. ÇF, dayanıklılığı, eğilme dayanımını ve yüksek sıcaklık, darbe ve dinamik yüklere karşı direnci artırmak ve çatlamayı önlemek için harç ve betonlarda en çok kullanılan liflerden biridir. ÇF, diğer liflere kıyasla yüksek çekme dayanımı, elastisite modülü ve gerilme özelliklerine sahiptir [33, 34]. Atık lastiklerden piroliz yöntemi ile elde edilen KS, iletkenliği ve mekanik özellikleri artırmak için çimentolu kompozitlerde en çok kullanılan malzemelerden biridir. KS, yüksek iletkenliği, düşük maliyeti ve nanogözenekli aglomerat yapısı nedeniyle tercih edilmektedir. Wen ve Chung [35] ile Monteiro ve ark. [36], KS ilavesinin optimum oranının çimentoyu % 4 oranında değiştirmek olduğunu öne sürmüştür. Isıtma kapasitesini öğrenmek için Cai ve ark. [21], uçucu kül bazlı geopolimerlerde KS ve ÇF'yi birlikte kullanmıştır. Kendinden elektrikli ısıtmanın, daha düşük enerji ve daha yüksek kürleme kapasitesi sayesinde ekonomik verimliliği artırabileceğini bildirmişlerdir. Elektrotermal enerji ile kesilerek elde edilen AET, metal işleme endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ipek [37], AET ile yapılan çalışmaların betonun mekanik özelliklerini artırdığını ve çelik liflerden daha ekonomik olduğunu ortaya koymuştur. Dehghanpour ve Yilmaz [38], iletken betonun ekonomik değerlendirmesini yapmak için % 20 ağırlıkça KS ve % 0,5-1 hacimce KF kullanmış ve döşeme numuneleri için 95-120 V voltajlar seçmiştir.

Geopolimer sistemleri son yirmi yılda daha geniş bir ilgi görmüş olsa da, araştırma eğilimleri hala bu tür malzemelerin gerçekçi saha koşullarında, özellikle soğuk veya enerji kıtlığı olan koşullarda kullanımına ilişkin çok boyutlu sorunları etkili bir şekilde ele almamaktadır. Hızlı geopolimerizasyon için termal kürleme yöntemleri, yalnızca kontrollü ortamlarda ve yüksek girdi enerjileriyle etkili olmaya devam etmektedir. Benzer şekilde, geopolimer sistemlerinin tepkisi esas

olarak izole mekanik veya dayanıklılık ölçütleri açısından incelendiğinden, kimyasal reaksiyonların, mikroyapısal sıkıştırmanın, ısı ve kütle transferinin geçici fenomenlerinin ve elektromekanik davranışların yüksek derecede birbirine bağlı doğasına çok az dikkat edilmiştir. Ayrıca, geopolimerik öncü karışımların veya aktivatör karışımlarının çoğunda, aşamalı değişiklikler, belirli operasyonel ve çevresel kısıtlamalar için uygun karışım seçimini tahmin etmek için kullanılabilecek bütünsel, karar odaklı değerlendirme yöntemlerinin yokluğuna neden olmakta ve bu bakımdan, bu malzemelerin bilimsel ilerlemelerini ve endüstriyel uygulamalarını engelleyen parçalı bir veritabanı oluşturmaktadır. Bu nedenle, yenilikçi kürleme teknolojileri, çok kriterli performans değerlendirmesi ve stratejik malzeme mühendisliği arayüzünde, sistematik yöntemlerin neredeyse hiç bulunmadığı geniş ve derin bilimsel, metodolojik ve teknolojik boşluklar bulunmaktadır. Bu boşlukları doldurmak, sadece eşlik eden temel anlayışı geliştirmek için değil, aynı zamanda laboratuvar ölçeğinde oluşturulan yenilikleri sahadaki gerçeklerle etkili ve verimli bir şekilde birleştirmek için de gereklidir. Bu doğrultuda, bu çalışma, hızlı ve verimli matris konsolidasyonunu kolaylaştırmak için fiber tabanlı iletkenlik artışını kullanan düşük voltajlı elektriksel konsolidasyon ile çok boyutlu entegre performans analizini bütünsel, veriye dayalı bir değerlendirme paradigmasına tabi tutan yenilikçi bir kombinasyon önermektedir. Mikro yapısal gelişmeler ile makroskopik özellikler ve karar destek çıktıları arasında köprü kurarak, bu çalışma geleneksel çalışmalardaki önceki parametre odaklı muadillerinin ötesinde yeni bir metodolojik ve teknolojik çerçeve sunmaktadır. Bu çalışma, gelecekte birinci dereceden akademik araştırma temel referansı olmanın ötesinde, olgunlaşan çevre düzenlemeleri ve politika rejimlerinin ardından PC tabanlı sistemlerin yerine sürdürülebilir, yüksek performanslı çözümler arayışında olan mühendisler ve karar vericiler için doğrudan kullanılabilir bilgiler de sunmaktadır.

Bu bağlamda, yukarıda belirtilen eksikliklerin üstesinden gelmek için iletken fiberlerle doğrudan elektriksel kürleme uygulanarak alternatif bir metodolojik ve teknolojik çerçeve önerilmiştir. Deneysel çalışmanın ilk aşamasında, MK ve GYFC bazlı geopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. İkinci aşamada, elektriksel iletkenliği ve dolayısıyla geopolimer harçların özelliklerini iyileştirmek için farklı oranlarda fiberler eklenmiştir. Elektrikle kürleme sırasında, numunelerden geçen akım, nihai prize kadar ampermetreler kullanılarak izlenmiştir. Reaksiyon ürünlerinin mikro yapısını karakterize etmek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılım X-ışını Spektroskopisi (EDS), X-ışını Difraksiyonu (XRD) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) gibi mikro yapısal analizler ve gözlemler yapılmıştır. Son aşamada, fiziksel özellikler, mekanik özellikler, kimyasal özellikler ve akım değeri gibi parametreler kullanılarak bir HD yöntemi uygulanır. Buna karşılık, elektriksel kürleme, en iyi geopolimeri objektif ve bütünsel olarak değerlendirmek için kullanılır. AB'nin Horizon 2030 programı, 100 akıllı ve iklim nötr şehri kapsayacak ve elektriksel kürleme, net sıfır malzemeler için önemli bir potansiyel barındırmaktadır. Bu konu, Avrupa Yeşil Anlaşması'na ve iklim nötr şehirlerin yeşil malzemeler konusuna katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Birincil akademik referans olmasının yanı sıra, sensör ağları ve akıllı izleme sistemlerine dayalı entegrasyonu için uygulanabilir protokoller de sunarak, geopolimer kompozitleri daha geniş akıllı altyapı ve akıllı şehir çerçevesine yerleştirir; bu çerçeve için performansının gerçek zamanlı izlenmesi, adaptasyon kontrolü ve enerji verimliliği, sürdürülebilir binaların temel unsurlarıdır.

1.2 Malzemeler ve Yöntemler

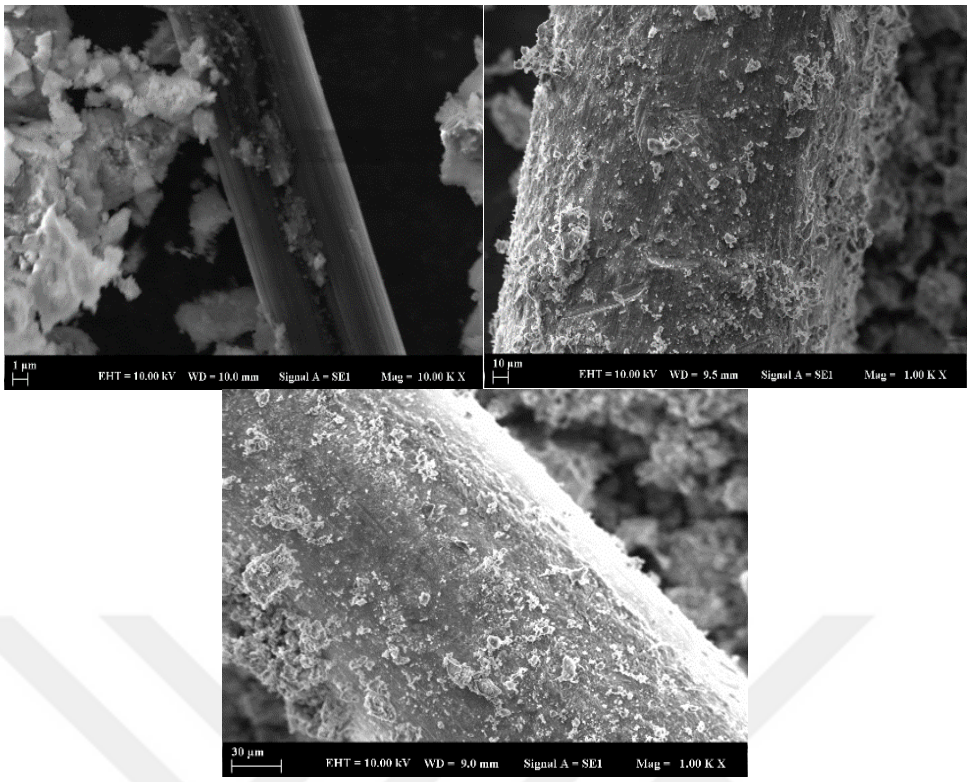
1.2.1 Malzemelerin Karakterizasyonu

MK, Kaolin Endüstriyel Maden Şirketi (İzmit, Türkiye) tarafından tedarik edilmiştir. MK'nin özgül ağırlığı 2520 kg/m^3, yüzey alanı 8600 m^2/kg ve SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 oranı % 97,18'dir, bu da yüksek puzolanik aktivite anlamına

gelmektedir. MK, 45 μm elek üzerinde kalan miktarı % 0,70 olup ince taneli bir malzemedir. MK, Si-Al malzeme kaynağı olarak seçilmiştir. GYFC'nin birim hacim ağırlığı 2910 kg/m^3, yüzey alanı 410 m^2/kg ve SiO_2 + Al_2O_3 + CaO oranı % 88,96'dır. GYFC, 45 μm elek üzerinde kalan miktarı % 1,40 olup ince taneli bir malzemedir. GYFC, Si-Ca malzeme kaynağı olarak kullanılmıştır. SS ve SH yaygın olarak kullanılan alkali reaktif çözeltileridir ve Na bazlı malzemeler, daha ekonomik ve faydalı oldukları için geopolimer üretiminde tercih edilmektedir [20, 23]. Torgal ve ark. [39], en uygun alkali aktivatörlerin hidroksitler ve çözünür silikalar olduğunu öne sürmüştür. Sodyum silikat (Na_2SiO_3), % 8 Na_2O, % 27 SiO_2 ve % 65 H_2O içeren üç modüllü bir formdur. Geopolimer hazırlamak için doğal silisli nehir kumundan 2 mm 'den daha küçük ince agrega seçildi. Bu kumun birim ağırlığı 1352 kg/m^3, saflığı % 99, özgül ağırlığı 2563 kg/m^3 ve doygun kuru yüzey durumundadır. Kumun elek analizi Tablo 1.1'de verilmiştir. Ayrıca, liflerin geometrik ve elektriksel özellikleri ile SEM analizleri sırasıyla Tablo 1.2 ve Şekil 1.1'de sunulmuştur.

Tablo 1.1 İnce agrega granülometrisi

Elek boyutu (mm)	**Kümülatif toplam (%)**
2	3,72
1,60	9,88
1,00	15,76
0,50	50,10
0,16	95,90
0,08	96,30



Şekil 1.1 Liflerin SEM görüntüleri (a) KF, (b) ET ve (c) ÇF

Tablo 1.2 Liflerin fiziksel özellikleri

Lif Türü	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	l/d Oranı	Elektrik Direnci (Ω·cm)
KF	0,007	12	1714	0,00155
ÇF	0	25	62,5	—
ET	0,4	25	62,5	0,00256

Not: "—" işareti, çelik lifler için elektrik direnci ölçümü yapılmadığını gösterir.

1.2.2 Deney Prosedürü

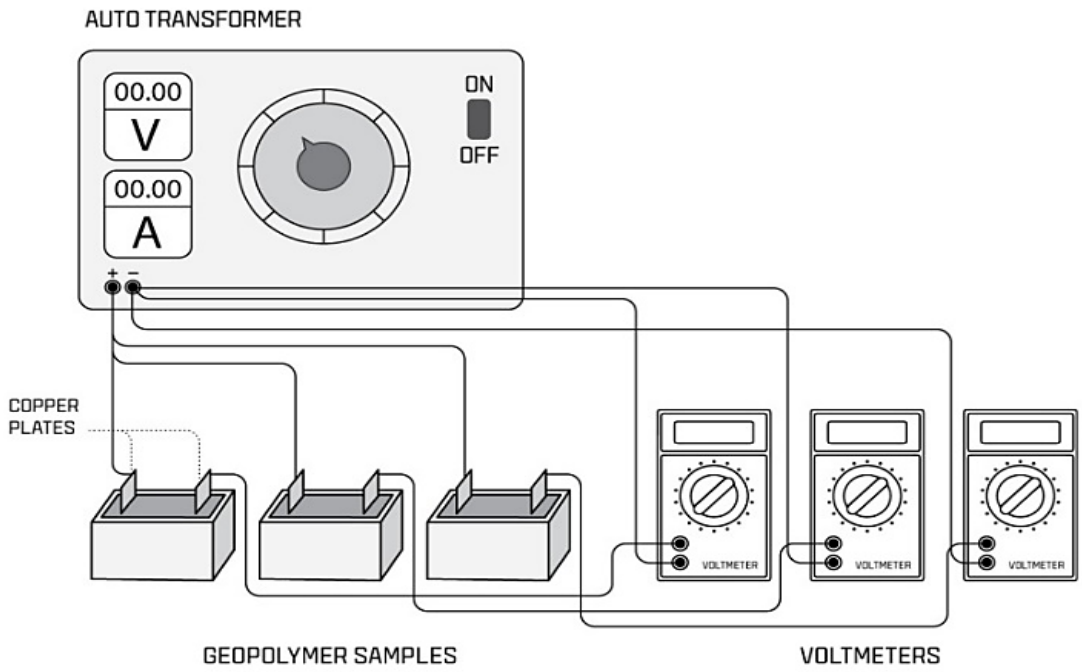
Çalışmada, MK ve GYFC geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak seçilmiş ve ağırlıkça % 0, 25, 50, 75 ve 100 gibi farklı oranlarda karıştırılmıştır. Huseien ve ark. [16], MK-GYFC (% 0-15) bazlı geopolimerleri incelemiş ve bunların erken dayanım özellikleri hakkında kapsamlı açıklamalar sunmuştur. SH, 6, 8, 10, 12 ve 14 M olmak üzere beş molaritede hazırlanmıştır. Literatürde, birçok çalışma 4 M ila 14 M arasındaki NaOH konsantrasyonlarının geopolimerler için yararlı olduğunu göstermektedir [20]. Jaya ve ark. [40] aynı molaritelere sahip geopolimerleri incelemiş ve 10 M'nin MK bazlı geopolimerler için ideal olduğunu öne sürmüştür. Alkali aktivatör çözeltisinde, SS/SH oranı 2,0 olarak

belirlenmiştir. Önceki çalışmalar, 2,5 oranının kullanılmasıyla etkileyici bir dayanım elde edildiğini göstermiştir [38]. Na_2SiO_3/NaOH oranının yaklaşık 1,5-2,5'e çıkarılmasının basınç dayanımını artırdığı, ancak daha yüksek bir oranın dayanımı azalttığı belirtilmiştir [20, 41, 42]. Bu durum, geopolimerizasyon sürecini geciktiren aşırı SS içeriği nedeniyle oluşabilir. Fiziksel özellikleri belirlemek için, ASTM C642 standardına göre 28. günde özgül ağırlığı, su emme ve gözeneklilik testleri yapılmıştır [43]. İlk olarak, kuru bileşenler 30 saniye karıştırıldıktan sonra aktivatörler eklenmiştir. 3 dakika tamamlandığında kum eklenmiştir. Mekanik karıştırıcı kullanılarak 6 dakikalık karıştırma işlemi yapılmıştır. Lifler eklendiğinde, 90 saniye daha karıştırılmıştır. ASTM C109 standardına göre [44], basınç dayanımı testleri için 50x50x50 mm kübik numuneler kullanılmıştır. ASTM C348 standardına göre [45], eğilme dayanımı testleri için 40x40x160 mm prizmatik numuneler kullanılmıştır. 100x200 mm boyutlarında çekme dayanımı için silindirik numuneler dökülmüştür ve ASTM C496 standardına göre 28 gün sonra test edilmiştir [46].

Elektrik enerjisi, numune şekline uygun bakır plakalar kullanılarak numunelere uygulandı. Elektrikle kürleme işlemi için ahşap kalıplar kullanıldı. Elektrikle kürleme, bir seri numune grubuna 24 saat boyunca 10 V voltajda, ikinci gruba 20 V voltajda uygulanmış, üçüncü gruba 23 °C ortam sıcaklığında kürleme uygulanmış ve son gruba 70 °C etüvde 24 saat boyunca termal kürleme uygulanmıştır. Elektrikle kürleme için kullanılan numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Önceki çalışmalar, kürleme sıcaklığının 60°C ile 95°C arasında değişebileceğini önermiştir [23]. Bu aşamada, ilk deneylerde 30 V voltajlar denenmiş, ancak sonuçlar tatmin edici düzeyde olmamıştır ve 10 V ve 20 V'a kıyasla düşük bulunmuştur. Yüksek voltaj uygulandığında, numuneler çok hızlı ısındı. Bu nedenle, bu olay geopolimerizasyon gerçekleşmeden karışımın kurumasını sağlamıştır. Daha sonra, 30 V elektriksel kürleme kullanılmamıştır. Elektriksel kürlemenin deneysel sistemi tasarlanmış ve uygulanmış, numuneler Şekil 1.2'de gösterildiği gibi test edilmiştir**.** Çalışmadaki örnek bir uygulama Şekil 1.3'te gösterilmiştir.

Elektrikle kürlemede elektrotermal ortamı uygun şekilde karakterize etmek için, numunelerin elektriksel davranışı ilk kürleme aşamasında sürekli olarak ölçülmüştür. Sırayla, genellikle voltaj uygulandıktan sonra elde edilen maksimum akım, her bileşim ve kürleme durumu için sistematik olarak kaydedilmiştir. Bu

ölçüm, taze geopolimer matrisindeki iletken ağın tamamen kurulduğu ve akım iletiminin stabilize olduğu anı temsil etmiştir. Bu nedenle kürleme yoğunluğunun niteliksel ölçüsü olarak seçilmiştir. Tepe akımı, gözenek çözeltisindeki iyonik iletkenlik, sıvı faz bağlantısı ve doygunluk seviyesi ile yerinde iletken liflerin (AET, ÇF, KF ve KS) etkileriyle oluşan ağın sinerjisini vurgular. Aktivatör çözeltisi öncü katı yapıya nüfuz ettiğinde, Na^+ ve OH^- iyonları yük taşıyıcı olarak işlev görmektedir ve uygulanan elektrik alanı, gözenek ağı bağlantıları aracılığıyla bunların taşınmasını arttırmaktadır. Bu arada, metalik lifler tercih edilen akım yolları sağlar ve bu da genel elektrik direncini azaltmaktadır. Bu etkileşim, yerel Joule ısınmasını tetikler, bu da termal olarak kürlenen sistemlerdekinden önce çözünme-polikondensasyon reaksiyonlarını tetikler ve hızlı priz alma ile matrisin yoğunlaşmasını katkı sağlamaktadır. Bu durum, kritik akım stabilizasyonu oluşmasını ve en yüksek güç girdisi anı olan belirli bir karışım-gerilim kombinasyonu için maksimum akımının tekrarlanmasını kolaylaştırır. Bu süreçte, gömülü termokupllar ve güç ölçerler bulunmadığından sürekli sıcaklık-zaman geçmişleri ve güç tüketimi eğrileri izlenmemiş olsa da, kürleme süreci tüm karışımlarda homojenlik sağlamak için özenle çalışılmıştır. Her numune, homojen akım yoğunluğu ve karşılaştırılabilir termal sınır koşullarını tetiklemek için sabit voltaj, sabit ortam ve normalleştirilmiş geometri ile kürlenmiştir. Bu koşullar altında, maksimum akım değeri, termal kürleme rejimlerini karakterize etmek için tepe sıcaklığın kullanıldığı gibi, elektro-kürlemenin etkili yoğunluğu için etkili bir ikame olarak kullanıldı. Bu yaklaşım, gözenekli çimentolu sistemlerde iletken ısı oluşumuna ilişkin fiziksel bilgilerle desteklenmektedir. Bu sistemlerde, maksimum akım ve maksimum anlık güç ($P = V \times I$), sistemdeki tepe ısıtma hızıyla doğrudan ilişkilidir. Gerilim, akım, kürleme süresi ve karışım parametrelerinin sistematik ölçümü, farklı bağlayıcı bileşimi, aktivatör molaritesi ve lif içeriğine sahip partilerin kontrollü karşılaştırmalarını mümkün kıldı ve böylece bu parametrelerin elektrotermal ortam ve dolayısıyla geopolimerlerin mekanik ve mikroyapısal olgunluğu üzerindeki etkilerinin anlamlı ölçümlerini yapmayı sağladı. Doğrudan sıcaklık profili oluşturma, ekstra uzamsal ve zamansal çözünürlük sağlar ve benimsenen protokol, çoklu karışım tasarımlarında elektro-kürleme davranışının karşılaştırmalı analizi için teknik olarak sağlam ve içsel olarak tutarlı bir temel sağlar.



Şekil 1.2 Elektrik kürleme deney sistemi ve test düzeneği



Şekil 1.3 Elektrik kürleme deney sistemi örneği

Karışımlar hazırlanırken, farklı bağlayıcı/aktivatör (B/A) oranları denendi. 1,00, 1,25 ve 1,40 olmak üzere üç B/A oranı seçildi. Bu aşamada akış tablosu testleri uygulandı. 1,40 B/A oranı için, kontrol numunesinin akış sonucu 16 mm iken, lif ilave edilenlerin akış sonucu 14 mm'dir. 1,00 B/A oranı için sonuç 20 mm iken,

elyaf ilave edilenlerin sonucu 18 mm'dir. Daha düşük ve daha yüksek oranlar incelenmiş, ancak tercih edilmemiştir. Çünkü oran arttıkça dayanımın azaldığı görülmüştür. Oran düşük olduğunda, karışım karıştırılamayacak kadar topaklanmıştır. Böylece, karışımların işlenebilirliği kaybolmuş ve araştırma için kalıba dökülemez hale gelmiştir. Pinto [47] ve Heah ve ark. [22], bu durumun sıvı Na_2SiO_3'nin viskoz yapısı ve yapışkan geopolimer harcının neden olduğu bir durum olduğunu açıklamıştır. Aziz ve ark. [48], B/A oranını araştırmış ve neredeyse aynı oranları bulmuştur. Düşük oran (1,0) SiO_2, Al_2O_3 ve CaO miktarını azaltmıştır, oysa bunlar geopolimerizasyonda ana içeriklerdi.

Tablo 1.3, beş farklı NaOH molaritesi ve üç farklı B/A oranı için hazırlanan geopolimer harçların karışım oranlarını göstermektedir.

Tablo 1.3 Geopolimer harçların karıştırma oranları (birimler gram cinsindendir)

NaOH molaritesi	B/A Oranı	Karışım ID	MK	GYFC	İnce agrega	Na_2SiO_3	NaOH
6M, 8M, 10M, 12M, 14 M	1,40	100MK0C	450	0	1125	210	105
		75MK25C	337,5	112,5	1125		
		50MK50C	225,0	225,0	1125		
		25MK75C	112,5	337,5	1125		
		0MK100C	0	450,0	1125		
	1,25	100MK0C	450	0	1125	240	120
		75MK25C	337,5	112,5	1125		
		50MK50C	225,0	225,0	1125		
		25MK75C	112,5	337,5	1125		
		0MK100C	0	450,0	1125		
	1,00	100MK0C	450,0	0	1125	300	150
		75MK25C	337,5	112,5	1125		
		50MK50C	225,0	225,0	1125		
		25MK75C	112,5	337,5	1125		
		0MK100C	0	450,0	1125		

İkinci aşamada, önceki çalışmalarda [34, 49] geopolimer kompozitlerin performansının % 0-1,2 hacim oranında elyaf ilavesiyle büyük ölçüde arttığı belirtildiğinden, ÇF, KF ve AET için seçilen oranda ağırlıkça % 0,25, % 0,50 ve % 0,75 oranında elyaf ilave edildi. Bunun yanı sıra, kompozitlerin elektrik iletkenliğinin ve matrisin yoğunluğunun iyileştirilmesi için KS de iletken mikro dolgu maddesi olarak % 1, 2 ve 3 ağırlık oranında bağımsız olarak eklenmiştir.

Ardından, liflerin elektrik iletkenliği ve dayanım üzerindeki etkisini anlamak için mekanik ve fiziksel testler yapılmıştır. 50x50x50 mm boyutlarında küp numuneler dökülmüş ve ASTM C642 [39] standardına göre 28 günde test edilmiştir. Kontrol karışımına kıyasla, liflerin eklenmesi üretilen geopolimer harçların yoğunluğunu önemli ölçüde değiştirmedi. KF, ÇF ve AET ilavesi, elyaf ilaveli geopolimer harçların yoğunluklarını hafifçe artırmıştır. İstisnai olarak, KS ilavesi numunelerin yoğunluklarını belirgin bir şekilde düşürmüştür. Bu bulgularla, ilave oranlarının uygun şekilde seçildiği söylenebilir. Ultrasonik darbe hızı (UPV) testleri ASTM C597 [50] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. UPV testi verilerine göre, liflerin eklenmesinin harçların dalga akışını etkilediği ve kontrol numunesine kıyasla güçlendirilmiş numunelerin UPV'sini yükselttiği için matrisin homojenliği ve kompaktlığını etkilediği anlaşılmıştır. Aşınma direncini belirlemek için 71x71x71 mm küp numuneler dökülmüş ve BS EN 1338 [51] kullanılarak test edilmiştir.

HD yönteminde, veritabanında bir kontrol varsa, alternatiflerin parametreleri kontrolün parametresine bölünür. Veritabanında bir kontrol yoksa, önce diğer seçeneklerin parametrelerinin ortalaması belirlenir. Ortalama, artan bir sabit (yani 2, 3, ...) ile çarpılır ve alternatiflerin parametreleri, kontrol parametresinin değiştirilmiş ortalamasına bölünür. Burada, ortalamayı seçmek yerine, değerin maksimumun iki katından büyük olarak seçilmesi önerilebilir. Ardından, parametrelerin ağırlıklandırılması amaçlanıyorsa, göreceli parametreler parametrelerin ağırlıkları ile çarpılır. Son bölümde, her alternatif için skaler değeri, kesir payı ve payda fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Kesir payı ve payda, sırasıyla 1,0'dan küçük ve büyük alternatiflerin göreceli parametrelerinin çarpılmasını içerir. HD Yönteminin hesaplama adımları ve ayrıntıları için lütfen Ek'e bakınız. HD Yönteminin sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Bu noktada, geopolimerlerin K değerlerini hesaplarken HD Yönteminde geopolimerlerin fiziksel özellikleri, mekanik özellikleri, elektriksel kürleme sırasında uygulanan akım değeri ve kimyasal özellikleri kullanılmıştır. Toplamda 273 parametre dikkate alınmıştır. KF, ÇF, AET ve KS içerikleri açısından gruplar halinde en iyi geopolimerler ve tüm geopolimerler arasında en iyisi bütünsel ve objektif bir şekilde belirlenmiştir. HD yönteminin hesaplama adımları Ek'te verilmiştir.

2
FİZİKSEL ÖZELLİKLER VE MEKANİK SONUÇLAR

2.1 Fiziksel Özellikler

2.1.1 Özgül Ağırlık, Gözeneklilik ve Su Emme

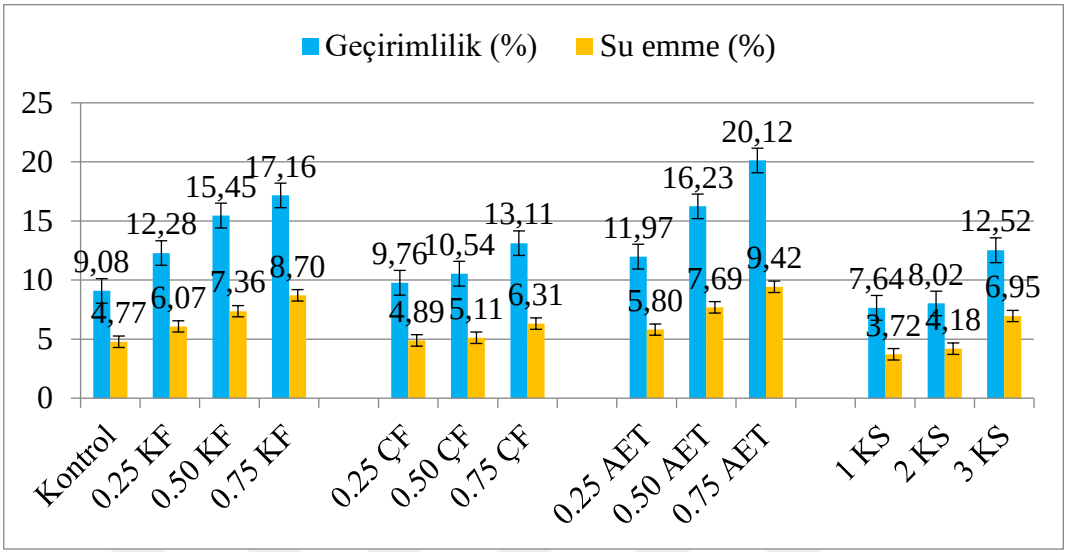
Özgül ağırlık, gözeneklilik ve su emme sonuçları Şekil 2.1 ve Tablo 2.1'de sunulmuştur. MK-GYFC bazlı geopolimer harçlara elyaf ilavesi, numunelerin gözenekliliğini ve su emmesini önemli ölçüde etkilemiştir. Su emme ve gözeneklilik değerleri arasında da bir ilişki belirlenmiştir. Bu çalışmada gözeneklilik ve su emme korelasyon katsayısı 0,9365 olarak hesaplanmış olup, bu da makul bir korelasyon derecesini göstermekte ve çalışma sonuçlarının geçerliliğini ortaya koymaktadır. KF ilavesi, üç karışım için kontrol karışımına kıyasla gözenekliliği ve su emilimini arttırmıştır. ÇF ilavesi değerleri hafifçe artırırken, % 0,75 ÇF ilavesi değerleri biraz daha arttırmıştır. Genel olarak, AET ilavesi değerleri etkili bir şekilde arttırırken, % 0,75 AET ilavesi gözenekliliği % 121'e ve su emilimini kontrole kıyasla % 97'ye çıkarmıştır. AET ilavesi için, lifin fiziksel yapısının boşluk oluşumunu artırdığı değerlendirilmektedir. % 0,25 ve % 0,50 KS ilavesi değerleri hafifçe düşürürken, % 0,75 KS ilavesi sonuçları artırmıştır. Bu durum, KS'nin çözünmez yapısı sayesinde oluşan boşluklarla açıklanabilir. Mindess ve ark. [52], iletkenlikteki artışın kılcal gözeneklerdeki su varlığından kaynaklandığını belirtmiştir. Bu bilgiye göre, gözeneklilik ve su emiliminin artması, elektriksel iletkenliği ve diğer özellikleri arttırabilir.

Açıklanan eğilimlerin içsel mekanizmalarını daha iyi anlamak için, lif tipi ve doza bağlı tepkilerin ayrıştırılması, katkı maddesi özellikleri ile matris tepkisi arasındaki hassas etkileşimleri ortaya koymaktadır. Örneğin, KF serisinin

gözenekliliğindeki artış (kontrol grubunda % 9,08'den % 0,75 KF'de % 17,16'ya) sadece gözenek boşluklarının hacimsel genişlemesini değil, muhtemelen negatif lif-matris arayüz bağlanması ve düzensiz dağılım nedeniyle jel sürekliliğinin içsel kaybını da göstermektedir. Bu tür mikro yapısal kırılmalar nem için tercih edilen yollar sağlayabilir, bu nedenle su emilimi aynı anda artarak % 8,70'e ulaşır ve % 82,43'lük bir artış gösterir. Buna karşılık, ÇF serisi sadece orta derecede değişiklikler kaydetmiştir; gözeneklilik % 9,76 ile % 13,11 arasında değişirken, buna karşılık gelen su emilimi % 6,31'e kadar çıkmıştır. Bu nispeten sınırlı tepkiler, muhtemelen karıştırıcıda iyileştirilmiş mekanik tutunma ve daha istikrarlı kesme hizalaması sayesinde, ÇF'nin bağlayıcı matrisine daha iyi entegrasyonunun bir özelliğidir. % 0,75 ÇF'de fiziksel özelliklerdeki gelişmeler, yüzey alanının artmasıyla açıklanabilir; bu, ölçülemese de, artan kanama veya iç hava boşlukları şeklinde ek harç talebine neden olabilir.

İlginç bir şekilde, AET serisi fiziksel işin en yüksek bozulmayı göstermiştir; gözeneklilik % 0,25 AET'de % 11,97'den % 0,75'te % 20,12'ye çıkarak kontrol grubuna göre % 121,59 artış göstermiştir. Su emilimi de buna paralel olarak % 5,80'den % 9,42'ye yükseldi, bu da % 97,47'lik bir artışa karşılık geliyor. Bu bulgular, atık erozyon telinin geopolimer jel ile doğal olarak uyumsuz olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, telin pürüzlü, iğneye benzer morfolojisi ve yüzey oksidasyonu, yapışmaya direnç göstermesi ve karışımda gereksiz hava hapsolmasıdır. AET'nin içsel sertliği, sıkıştırma sırasında hareketliliği sınırlar ve sonuç olarak makro gözenekliliğin birbirine bağlılığını oluşturur. Açık boşluk sistemleri aracılığıyla yüksek gözenekliliğin eşlik etmesiyle, dayanıklılık perspektifi ön plana çıkar, çünkü bu tür sistemler klorürler, sülfatlar veya CO_2 gibi istenmeyen maddelerin girişini katalitik olarak teşvik edebilir ve yüzey ön işlemi veya yoğunlaştırma şemaları ile dengelenmedikçe hizmet ömrünü kısaltabilir. KS serisi, mikro katkı maddelerinin düşük dozajlarda gözenek doldurucu veya yüksek dozajlarda aglomeratör olarak çift işlevli karakterini ortaya koyarken, % 1 ve % 2 KS'de su emilimi ve gözeneklilikteki azalma, muhtemelen KS parçacıklarının ultra ince boyutu ve hidrofobikliği sayesinde, gelişmiş parçacık paketleme ile başarılı gözenek doldurma olduğunu göstermektedir. % 3 KS'de gözeneklilik ve su emilimindeki hafif artış, dolgu maddesinin etkisinin baskın hale geldiği, aglomerasyon eğilimleriyle dengelendiği ve yerel zayıf noktalar veya boşluk kümeleri oluşturduğu dozaja duyarlı bir sınırı

göstermektedir. Bu tür dozaja duyarlı tepki, özellikle geopolimer harçlarda inert mikro ölçekli katkıların çerçevesi içinde, içeriğin optimize edilmesine önemli bir önem vermektedir.



Şekil 2.1 Tüm geopolimer numunelerinin fiziksel özellikleri

Tablo 2.1 Geopolimer harçların özgül ağırlık, gözeneklilik ve su emilimindeki göreceli değişiklikler

Karışım ID		Özgül Ağırlık (kg/m^3)	Porozitedeki Değişim (%)	Su Emme Değişimi (%)
Kontrol		1900	-	-
KF	0,25 KF	2020	35,24	27,32
	0,50 KF	2100	70,13	54,22
	0,75 KF	1970	88,99	82,43
ÇF	0,25 ÇF	2000	7,49	2,55
	0,50 ÇF	2060	16,04	7,09
	0,75 ÇF	2080	44,41	32,30
AET	0,25 AET	2060	31,85	21,68
	0,50 AET	2110	78,77	61,18
	0,75 AET	2140	121,59	97,47
KS	1 KS	2060	-15,86	-22,11
	2 KS	1920	-11,67	-12,30
	3 KS	1800	37,89	45,79

Dahası, su emilimi ve gözeneklilik yoluyla kaydedilen yapısal dönüşümler sadece taşıma özelliklerinin habercisi olmakla kalmaz, aynı zamanda termal ve elektriksel açıdan da önemlidir. İşlevsel iletkenliğin (örneğin, buz çözme, istenmeyen radyasyon/parazitten elektriksel koruma (EMI koruması)) önemli olduğu sistemlerdeki uygulamalar için, su emiliminin artmasıyla aşırı iyon hareketlerinin eşlik ettiği gözenekliliğin artması, elektriksel tepkiyi

kolaylaştırabilir. Ancak aynı durum, açık sistemlerde aşırı kuruma büzülmesi veya çiçeklenme şeklinde istenmeyen yan reaksiyonların kaynağı olabilir.

Sonuç olarak, test edilen tüm karışımlar için gözeneklilik-su emilimi ilişkisinin benzerliği, bu ölçümlerin iç matris yapısı ikameleri olarak etkinliğini doğrulamaktadır. Son derece yüksek korelasyon katsayısı (0,9365), iç boşluk yapısı değişikliklerinin en basit gravimetrik su emilimi testleriyle bile doğru bir şekilde temsil edildiğini doğrulamaktadır, bu nedenle performans odaklı kalite kontrol uygulamalarında pratik ikameler olarak kullanılabilirler. Güçlü doğrusallık, fiber malzeme veya katkı maddesi bileşiminde yapılan değişikliklerin, bu iki özelliği sistematik olarak birlikte etkileyeceğini göstermektedir. Bu nedenle, stratejik karışım tasarımı sadece mekanik takviye özelliklerini değil, genel taşıma davranışı ve uzun vadeli dayanıklılık üzerindeki doğal etkisini de hesaba katmalıdır.

2.1.2 Ultrasonik Darbe Hızı (UPV Testi)

UPV sonuçları, geopolimer harç matrisinin homojenliğini değerlendirmek için 28. günde Tablo 2.2'te sunulmuştur.

Bilindiği gibi, çimento bazlı veya geopolimerik bir malzemede ultrasonik dalgaların yayılma hızı, mikro çatlaklar, boşluklar ve tam olarak bağlanmamış bölgeler gibi mikroyapısal kusurların oluşumuna karşı oldukça duyarlıdır; daha düşük UPV değerleri genellikle matrisin daha yüksek gözenekliliğine ve daha düşük yoğunluğuna karşılık gelir. Mevcut araştırmada, bu tür bir ilişki açıkça ortaya çıkmıştır, çünkü fiber takviyeli karışımların çoğu, kontrol karışımına (3,12 km/s) kıyasla daha düşük UPV değerlerine sahipti; bu da, karıştırma sırasında hapsolmuş havayı ve arayüzey geçiş bölgesi düzensizliklerini artırmak için fiberin dahil edilme eğilimini yansıtmaktadır. Örneğin, KF takviyesi, % 0,25 KF durumunda (2,66 km/s, –% 14,60) önemli bir azalma kaydetmiştir, bu da muhtemel fiber kümelenmesi ve kötü sıkıştırma etkisi nedeniyle düşük dozajda matrisin sürekliliğinde büyük ölçekli bir bozulma olduğunu göstermektedir. Özellikle, % 0,50 KF için optimum etki ortaya çıktı; burada UPV 3,32 km/s'ye (+kontrol için +% 6,50) yükseldi ve erken prizleme sırasında daha iyi gerilme dağılımı ile daha iyi elyaf dağılımı ve muhtemel matris yoğunlaşması gösterdi; ancak % 0,75 KF için UPV tekrar 2,91 km/s'ye (-% 6,84) düştü, bu muhtemelen aşırı elyaf malzemesinin boşluk oluşumunda artışa neden olması nedeniyle oldu. Aksine, çelik elyaf (ÇF) katkı maddelerinin eklenmesi, kontrol grubuna göre UPV'yi tutarlı bir şekilde iyileştirdi; % 0,25 ÇF 3,21 km/s (+ % 2,98) %

0,50 ÇF ise 3,59 km/s (+ % 15,11) ile en yüksek toplam UPV değerini gösterirken, % 0,75 ÇF ise 3,34 km/s (+ % 6,95) ile yine yüksek bir UPV değeri gösterdi. Bu iyileşme, ÇF'nin daha yüksek sertliği ile uyumludur. Bu, fiber-matris türünde iyi bir bağlanma ve fiberin geometrisi koşullarında gerilme dalgasının iletiminin iyileşmesine yol açabilir ve aşırı boşluk oluşumu olmadan daha iyi sıkıştırma sağlayabilir. Atık erozyon teli (AET) lifleri, kontrol grubuna göre % 0,25 AET 'nin biraz düşük (3,03 km/s, –% 2,97) olduğu, ancak % 0,50 AET (3,47 km/s, +% 11,24) ve % 0,75 AET (3,54 km/s, +% 13,33) önemli iyileşmeler kaydedilmiştir. Bu, AET'nin yeterli dozajının matrisin birbirine kenetlenmesini artırdığını ve boşlukların hacmini azalttığını göstermektedir. Buna karşın, KS modifikasyonu karışık sonuçlar vermiştir: KS'nin ince parçacık boyutu teorik olarak mikro boşlukları doldurabilse de, % 1 KS'deki UPV kontrol grubuna göre marjinal olarak düşük (3,08 km/s, –% 1,38) ve % 2 KS (2,95 km/s, –% 5,56) ve % 3 KS (2,97 km/s, –% 4,77) uygulamalarında da benzer düşüşler tespit edilmiştir. Yüksek KS konsantrasyonlarında görülen bu düşüş, büyük olasılıkla mikro kusur kümeleri oluşturabilen ve ultrasonik dalgaların etkili iletim yollarını azaltabilen partikül aglomerasyonundan kaynaklanmaktadır.

Tablo 2.2 UPV sonuçları

Karışım		**UPV (km/s) (28 gün)**	**UPV'deki Değişim**
Kontrol		3,12	-
KF	0,25 KF	2,66	-14,60
	0,50 KF	3,32	6,50
	0,75 KF	2,91	-6,84
ÇF	0,25 ÇF	3,21	2,98
	0,50 ÇF	3,59	15,11
	0,75 ÇF	3,34	6,95
AET	0,25 AET	3,03	-2,97
	0,50 AET	3,47	11,24
	0,75 AET	3,54	13,33
KS	1 KS	3,08	-1,38
	2 KS	2,95	-5,56
	3 KS	2,97	-4,77

Genel olarak, sonuçlar, bazı elyaf türleri ve dozajlarının (özellikle ÇF ve KF veya AET'nin optimal seviyeleri) matris yoğunlaştırmasını ve arayüzey yapışmasını optimize ederek UPV'yi iyileştirme potansiyeline sahip olmasına rağmen, aşırı takviye veya dolgu seviyelerinin homojenlik üzerinde olumsuz etkileri olabileceğini ve elyafların geopolimerik kompozit malzemede ultrasonik dalga hareketini kontrol

etmekten birincil olarak sorumlu olduğunu gösteren önceki araştırmalarla uyumlu olduğunu göstermektedir [53].

2.1.3 Aşınma Direnci

Şekil 2.2, KF, ÇF ve AET olmak üzere üç farklı türde elyaf takviyesi ile ve ayrıca üç farklı dozajda (% 1, % 2, % 3) KS ile işlenmiş geopolimer harçların 28 günlük aşınma direncini göstermektedir. Genel olarak, işlenmiş tüm numuneler, takviyesiz kontrol karışımına (16,03) kıyasla daha iyi performans göstermiştir, bu da malzemelerin aşındırıcı hizmetlerde yüzey direncini artırma potansiyelinin çok büyük olduğunu doğrulamaktadır. Bununla birlikte, iyileşmenin derecesi, katkı maddelerinin fiziksel ve elektriksel özelliklerine, geopolimer jel içindeki uyumluluklarına ve ilgili dozajlarına önemli ölçüde bağlıydı.

Tüm numuneler arasında en yüksek performansı gösteren % 0,50 KF idi ve 35,93 ile en yüksek aşınma direnci değerine ulaşarak kontrole göre % 124 artış göstermiştir. Bunu 32,50 ile % 0,50 AET izledi (% 103 artış) ve böylece bu ikisi en yüksek performans kategorisine girdi. Bu iki karışım, mutlak değerler ve göreceli etkinlik açısından diğerlerini sistematik olarak geride bırakarak mekanik takviye, dispersiyon ve elektriksel iletkenlik kür uyumluluğunun en iyi kombinasyonunu sergilemiştir. KF'nin uzunluk-çap oranı, daha yüksek çekme dayanımı ve iletkenlik ile birleştiğinde, özellikle erken kürleme aşamasında etkili çatlak köprüleme ve mikro yapının daha yoğun büyümesini sağladı. Buna göre, morfolojisi daha az rafine olan AET, düzensiz, kaba dokusu sayesinde iyi bir mekanik sabitleme sağlamış ve mekanik kilitleme başlatma ve parçacıkların ayrılmasını önleme yeteneği ile aşınma direncini tamamlamıştır.

Tüm en yüksek performanslı numunelerin (katkı maddesi ve optimum dozajına göre) karşılaştırmalı listesi aşağıdadır:

% 0,50 KF (35,93) > % 0,50 AET (32,50) > % 0,25 AET (30,29) > % 0,25 ÇF (28,42) ≈ % 1 KS (28,06) > % 0,75 ÇF (27,00) > % 0,75 AET (27,65) > % 0,75 KF (26,83) > % 2 KS (26,05) > % 0,50 ÇF (21,90) > % 3 KS (20,19) > % 0,25 KF (17,34) > Kontrol (16,03)

Bu temelde, üç farklı performans seviyesi ayırt edilebilir:

Daha yüksek aşınma direnci (en iyi kalite): % 0,50 KF,

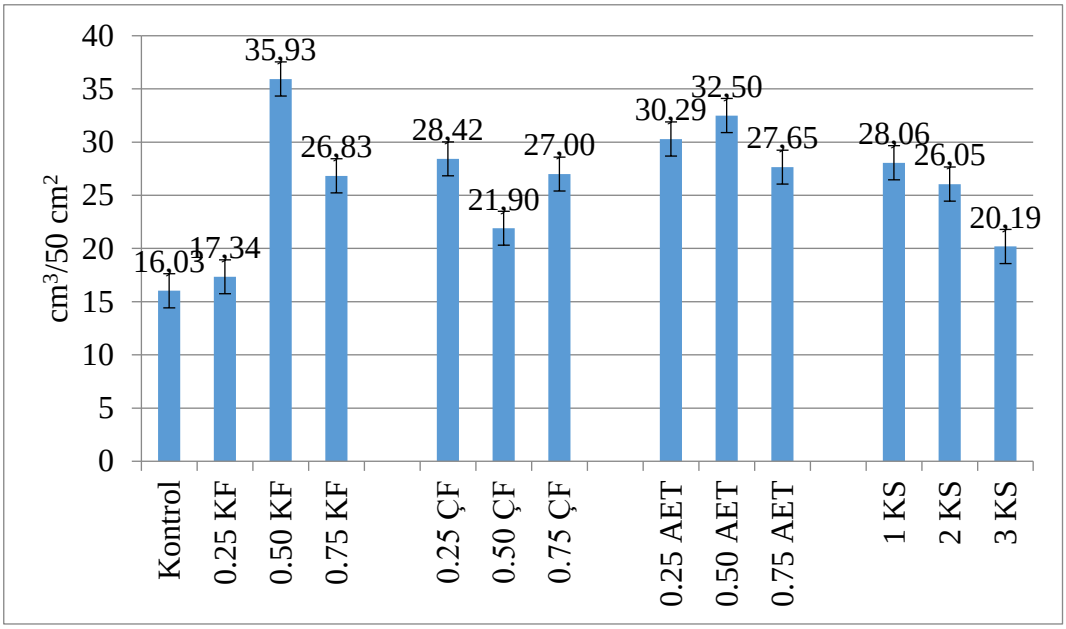
Orta seviye (orta düzeyde kazanç): % 0,25 AET, % 0,25 ÇF, % 1 KS, % 0,75 AET, % 0,75 ÇF

Düşük performans veya aşırı dozajdan etkilenen seviye: % 0,75 KF, % 2 KS, % 0,50 ÇF, % 3 KS, % 0,25 KF

KS örneği ise son derece temsil edicidir. % 1 KS, ÇF'nin performansını % 0,25'te tutarken, daha yüksek dozajlar etkinliğini % 3'te 20,19 değerine kadar düşürmüş ve kontrol grubundan sadece % 26 daha iyi sonuç vermiştir. Bu, KS'n 'da bir doygunluk eşiği olduğunu ve bu eşiğin aşılması durumunda KS'nin topaklanma oluşturarak matris sürekliliğini iyileştirmek yerine bozduğunu göstermektedir. Bu, nanopartiküllerin aşırı kullanım eğilimini takip etmektedir; bu durumda gözenek doldurma ve yoğunlaştırma gibi yararlı özellikler, arayüzün uyumsuzluğu ve zayıf bölgelerin oluşumu ile dengelenmektedir.

Fiber tipi ve dozajının yüzey elektrik direnci ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmak için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılarak istatistiksel analiz yapılmış, ardından gruplar arasındaki farkları belirlemek için post-hoc testi ($\alpha = 0,05$, $n = 3$) için Tukey Dürüst Anlamlı Fark (HSD) testi yapılmıştır. ANOVA, on iki grubun geopolimer harçlarda mekanik ve elektriksel davranış açısından birbirinden istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğunu göstermiştir ($F(11, 24) = 11,48$, $p < 0,001$). Önemli olarak, ANOVA ile belirtilen gruplar arasındaki farklılıklar, Tukey HSD çoklu karşılaştırmaları kullanılarak analiz edildi ve bu analiz, % 0,50 AET ve % 0,50 KF kombinasyonlarının basınç dayanımlarının, kontrol grubu ve düşük ve orta lif dozajlı grupların çoğuna kıyasla önemli ölçüde iyileştiğini ve dolayısıyla matris sıkıştırma ve yük taşıma konusunda optimum katkı sağladığını göstermiştir. Tersine, % 3 KS karışımı her zaman en düşük istatistik grubunda yer almış, bu da yüksek iletkenlikteki dolgu maddelerinin mekanik performansa olumsuz katkısını göstermiştir. Ayrıca, sonuçlar, orta düzeyde dozajda (% 0,50) lifli veya iletken dolgu maddelerinin yüzey direncinde istatistiksel olarak en yüksek artışları sağladığını güçlü bir şekilde göstermiş ve geopolimerlerde hem yapıyı hem de elektromekanik tepkiyi iyileştiren orta düzeydeki liflerin sinerjik katkısını doğrulamıştır. Gruplardaki anlamlılık düzeyleri, Tukey testi ve % 95 güven aralığından elde edilen kritik değerlerden de belirlenmiştir, bu da karışım performanslarının farklılaştırılması ve gözlemlenen deney eğilimlerinin doğrulanması için yoğun sayısal analizlere olanak sağlamıştır. Ribeiro ve ark. [7] ve Farhan ve ark. [20]'e göre, lif ilaveleri, gerilimin yeniden dağılımı ve çatlak köprüleme sayesinde mekanik dayanımı artırmaktadır [7, 20]. Bunun yanı sıra, Payakaniti ve ark. [6] da KF ve AET gibi

elektriksel iletken katkı maddelerinin, geopolimerizasyon sürecinde lokalize ısı evrimi ve iyon hareketliliğini teşvik ederek elektro-kürlemenin etkinliğini artırmanın yanı sıra matrisin dayanımını da artırdığını belirtmiştir. Mekanik-elektrik ikili işlevselliği, mevcut çalışmada % 0,50 KF ve % 0,50 AET'nin olağanüstü işlenebilirliğinin ardındaki mantığı sunmaktadır. İlginç bir şekilde, iletkenlik, en-boy oranı ve optimum dispersiyonun sinerjisinin optimum bağımlılığı, aşınma direncinin optimizasyonunda en önemli belirleyici faktör gibi görünmektedir.

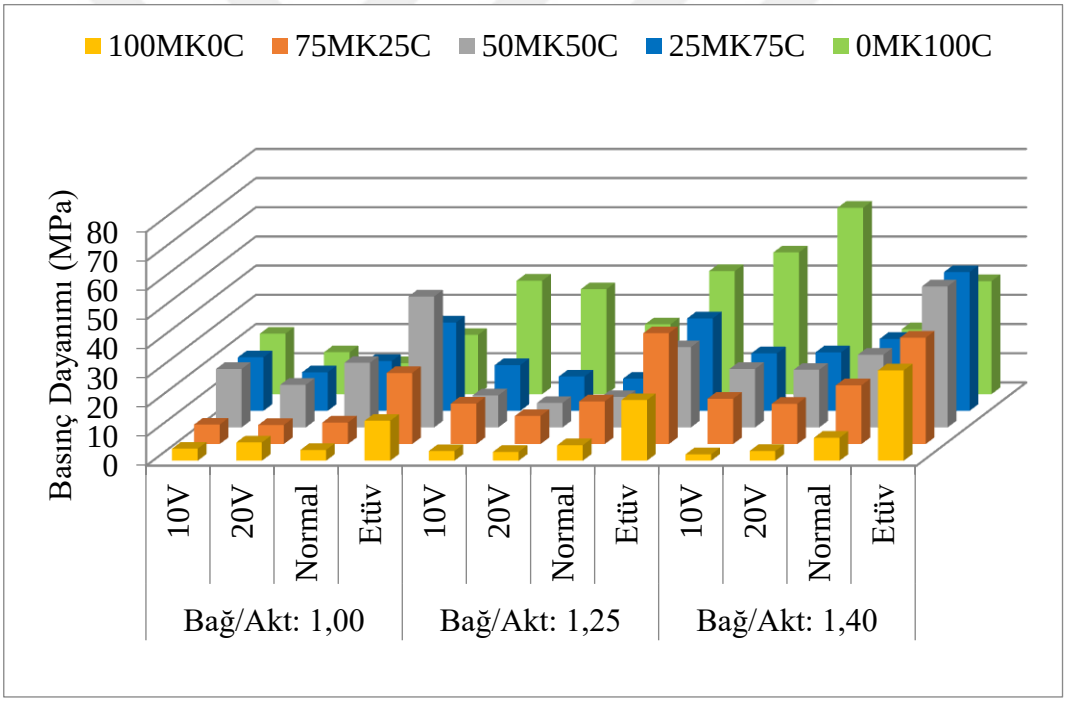


Şekil 2.2 Aşınma direnci sonuçları

2.2 Ön Testler Kapsamında Farklı Molaritelerle Numunelerin Basınç Dayanımı Sonuçları

Şekil 2.3 ile şekil 2.7, üç farklı B/A oranı (1.00, 1.25 ve 1.40) için beş farklı SH (6, 8, 10, 12 ve 14) molaritesinde beş farklı karışım oranında (% 0, 25, 50, 75 ve 100) geopolimer numunelerinin basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Elektrikle kürleme için en yüksek değerlerin 10 V'da 20,68 MPa olan 0MK100C numunesinden elde edildiği söylenebilirken, diğer numunelerin değerleri düşük ve benzerdi. Ayrıca, 0MK100C'nin 10 V elektrikle kürleme değeri, ortam ve etüvle kürlemeden daha yüksektir. Bu kanıt, SS molaritesi düşükken elektrikle kürlemenin uygun olduğunu göstermektedir. Tüm kürleme yöntemlerinin en yüksek değerlerinin 1,25 B/A oranı için 0MK100C'de elde edildiği görülmektedir. Elektrikle kürleme için en yüksek değer, 10 V'ta 38,80 MPa ile 0MK100C'den

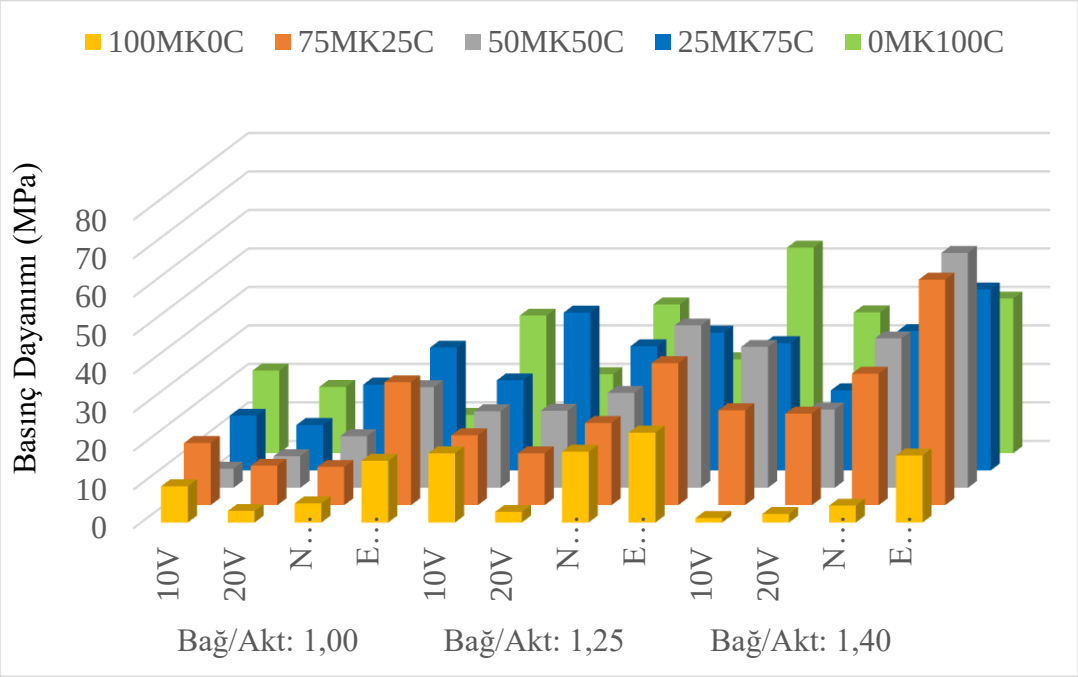
elde edilirken, diğer numunelerin değerleri düşük ve benzerdir. Bu değer, düşük voltajda elektrikle kürlemenin, daha düşük molarite ve aktivatör miktarı ile faydalı olabileceğini göstermektedir. Elektrikle kürleme için en yüksek değerin, 1,40 B/A oranı için 20 V'da 63,80 MPa ile 0MK100C'den elde edildiği görülmektedir. Aynı zamanda, elektrikle kürleme sonuçları da 0MK100C'de ortam ve etüvle kürlemeden daha yüksektir. Aynı karıştırma oranında, B/A oranındaki artış elektrikle kürleme sonuçları üzerinde çok etkili olmuştur. % 100 MK numunelerinin dayanım kazanımı, elektrikli ve ortam sertleştirme yöntemleri için zayıftır. Yun-Ming ve ark. [23] tarafından, MK'nin tek başına kullanılması, yüksek derecelerde ısıl işlem yapılana kadar zayıf bir yapı oluşturabileceği belirtilmiştir. Aksine, NaOH'nin molaritesi çok düşük olmasına rağmen, % 100 GYFC numunelerinin dayanımı dikkat çekicidir.



Şekil 2.3 Ön testlerin basınç deneyi sonuçları (6M)

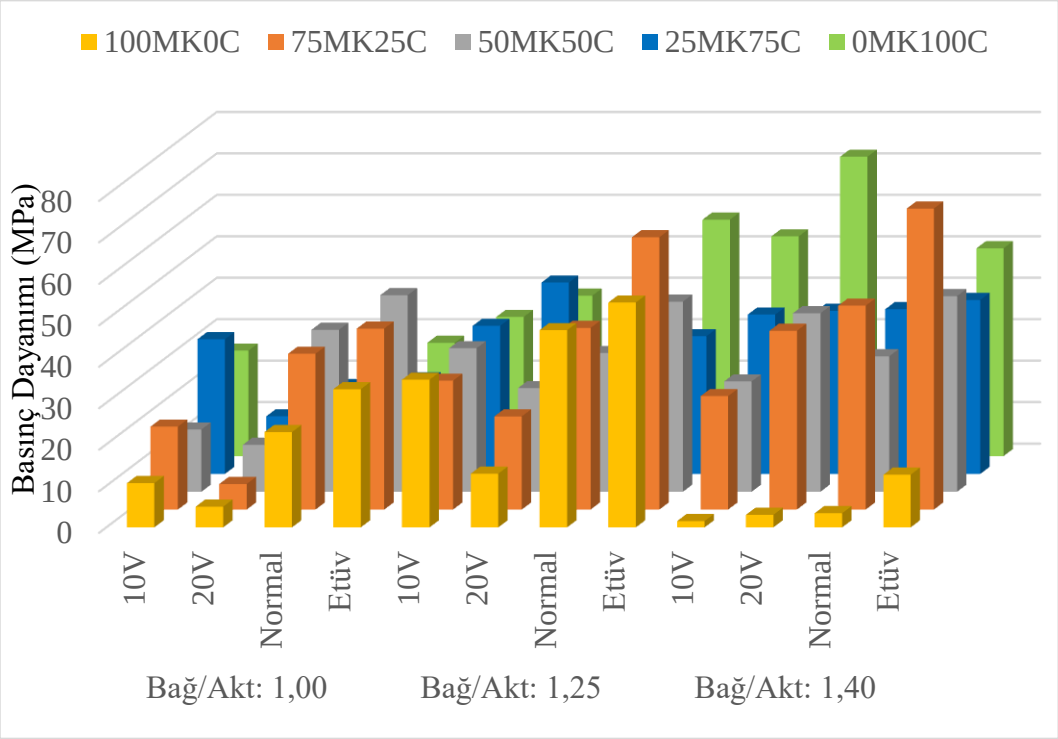
Elektrikle kürleme için en yüksek değerler 1,00 B/A oranı için 10 V'da 21,38 MPa ve 8M'de 0MK100C idi, ancak elektrikle kürleme sonuçlarının her ikisi de 0MK100C'de ortam ve etüv kürlemesinden daha yüksektir. Sonuçların GYFC miktarı ile arttığı anlaşılabilir. Etüv kürü için en yüksek değer, 1,25 B/A oranı için 50MK50C'den 42,09 MPa olarak elde edilmiştir. Elektrikle kürleme için en yüksek değer, 1,25 B/A oranı için 20 V'da 25MK75C'den 40,95 MPa olarak elde edilmiştir ve bu sonuç, ortam ve etüv kürlerinden daha yüksektir. Elektrikle

küründe 1,40 B/A oranı için için en yüksek değerin 20 V'da 0MK100C'den elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, 0MK100C'nin elektrikle kürleme değeri 10 V'da 53,34 MPa idi ve bu değer ortam ve etüv kürlemesinden daha yüksektir. Genel olarak, elektrikle kürleme sonuçları ortam ve etüv kürleme sonuçlarına yakındır. 8M'deki sonuçlar, tüm kürleme yöntemleri için 6M'deki sonuçlara büyük ölçüde benzemektedir.



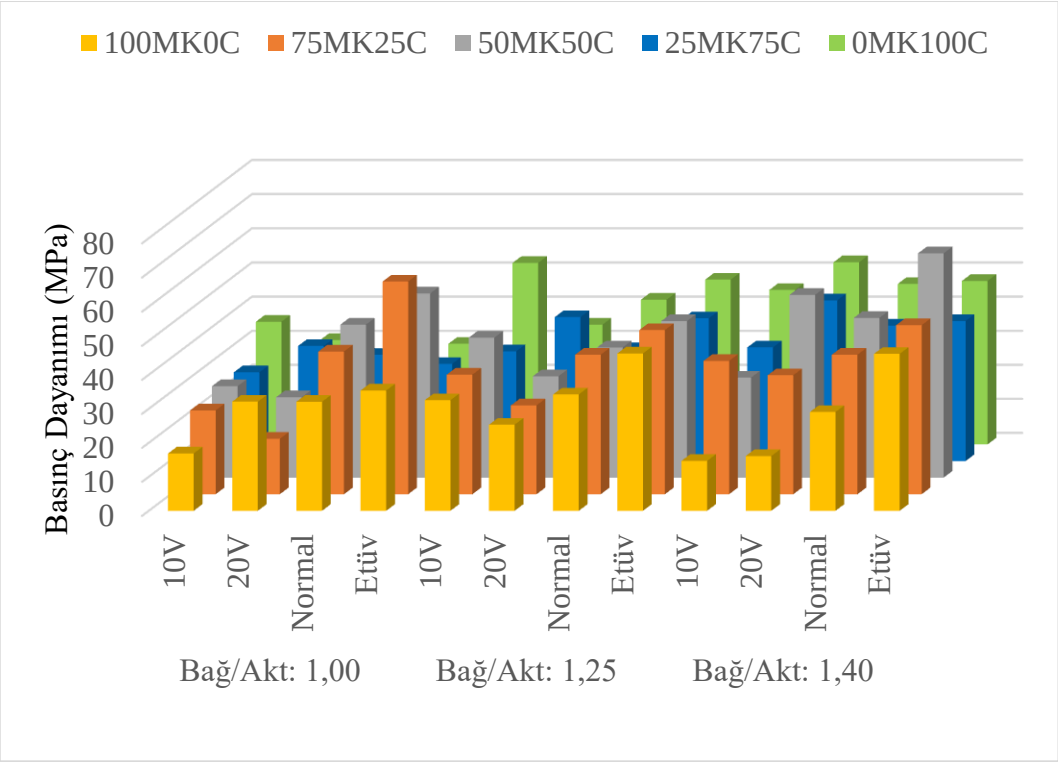
Şekil 2.4 Ön testlerin basınç deneyi sonuçları (8M)

Elektrik kürü için en yüksek değer, 1,00 B/A oranı için 10 V ve 10M'de 25MK75C'den 39,02 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, hem ortam hem de etüv kürleme yöntemlerinden daha yüksektir. Ayrıca, 0MK100C'de elektrikle kürlemenin her iki değeri de ortam kürlemesinden daha yüksektir. Elektrikle kürlemenin en yüksek değeri, 1,25 B/A oranı için 20 V'da 46,12 MPa olarak 25MK75C'den elde edildiği görülebilir. Bu sonuç, ortam ve etüv kürlerinden daha yüksekti. Aynı zamanda, 10 V'da 50MK50C ve 20 V'da 0MK100C'den elde edilen elektriksel kürleme değerleri, ortam kürlemesinden elde edilen değerlerden daha yüksektir. Elektrikle kürleme için en yüksek değerin, 1,40 B/A oranı için 20 V'da 72,18 MPa olarak 0MK100C'den elde edildiği ve bu değerin tüm elektrikle kürleme testlerinin en yüksek sonucu olduğu görülmektedir. Bu sonuç, ortam ve etüv kürlerinden çok daha yüksektir. İki voltaj oranındaki elektrikle kürleme için tüm değerlerin ortam ve etüv kürlerine benzer olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.5 Ön testlerin basınç deneyi sonuçları (10M)

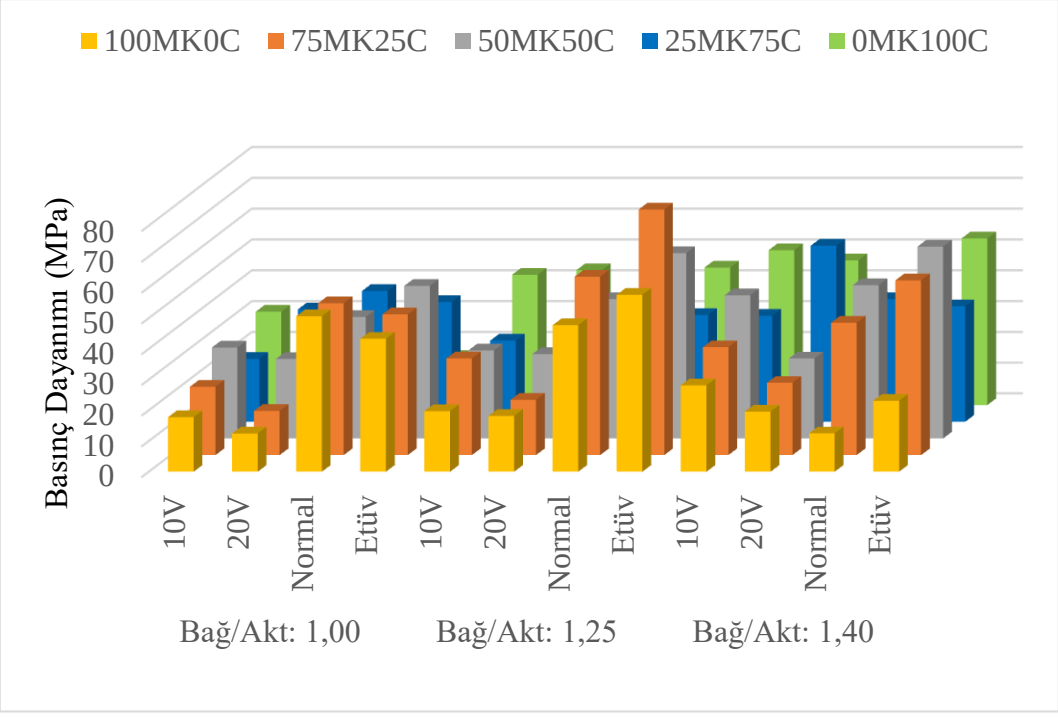
0MK100C'nin elektrikle kürleme değerlerinin, 1,00 B/A oranı için 12M'de 10 V'ta 36,06 MPa ve 20 V'ta 30,69 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, ortam ve etüv kürlerinden daha yüksektir. Bu arada, 20 V'da 33,84 MPa olan 25MK75C değeri de diğer kürleme yöntemlerinden daha yüksekti. Üç B/A oranının en yüksek değeri, 1,25 B/A oranı için 0MK100C ve 10 V'da 53,28 MPa olarak elde edildiği görülebilir. Elektrikle kürleme için bu değerlerin hafif olduğu ve diğer oranlara benzer olduğu gözlemlenmiştir ve tüm numunelerde ortam ve etüv kürlerinden daha yüksek. Tüm kürleme yöntemleri için geopolimer harçların en yüksek değerlerinin 1,40 B/A oranı için 50MK50C'de elde edildiği görülmektedir. Elektrikle kürleme için en yüksek değer 20 V'da 53,68 MPa olarak elde edilmiştir. Elektrikle kürleme değeri etüv kürü yöntemine benzer ve ortam küründen daha yüksek olduğu ortaya koyulmuştur. Bağlayıcı ile aktivatörün oranı arttıkça elektrikle kürlemenin mekanik dayanımının da arttığı kolayca anlaşılmıştır.



Şekil 2.6 Ön testlerin basınç deneyi sonuçları (12M)

Elektrik küründe 1,00 B/A oranı için en yüksek değer 14M'de 25MK75C için 20 V'da 36,56 MPa iken, ortam ve etüv kürleri sonuçları 1,00 B/A oranı için eşittir. Elektrik kürünün her iki sonucu da 0MK100C'de ortam ve etüv kürlerinden daha yüksektir. Elektrik kürünün en yüksek değerlerinin 0MK100C için 20 V'da 43,80 MPa olduğu görülürken, elektrikle kürlemenin her iki sonucu da 1,25 B/A oranı için 0MK100C'de ortam ve etüv kürlerinden çok farklı değildir. Elektrik kürünün en yüksek değerlerinin 1,40 B/A oranı için 25MK75C'de 20 V'da 57,20 MPa olduğu ve bu değerin ortam ve etüv kürlerinden çok daha yüksek olduğu görülebilir. Bu arada, elektrikle kürleme sonuçları 0MK100C'de ortam kürlemesinden çok daha yüksektir. Farhan ve ark. [20]'ın daha önce belirttiği gibi, NaOH'nin molaritesi 6M'den 12M'ye yükseldikçe, geopolimer harçların dayanımı da artmaktadır. Bu araştırma, 6M ve 8M ile yapılan harçların mekanik özelliklerinin düşük olduğunu belirlemiştir. Bu durumun nedeninin düşük alkali kaynağı olabileceği düşünülmüştür. Tersine, 10M, 12M ve 14M'lik harçlar, tüm kürleme yöntemlerinde çok daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Düşük molarite, polimerizasyonu tamamlamak için yetersiz $Na^{(+)}$iyonları sağlar ve optimal seviyeden daha yüksek molarite, yüksek viskozitesi nedeniyle istenmeyen polimerizasyona neden olur. Sabit molaritede B/A oranının artırılması, daha

yüksek dayanım ancak daha düşük işlenebilirlik sağlamıştır. Esas olarak, elektrikle kürlenen % 100 MK numunelerinin üretimi, aglomerasyon nedeniyle zor olmuştur. Elektrikle hızlı ısıtma, numunelerin kurumasını ve çatlamasını neden olmuştur. Bunun nedeni, kilin harç işlenebilirliğini azaltan tabaka benzeri bir yapıya sahip olmasıdır. Heah ve ark. [22], MK'nin bu nedenle daha fazla suya ihtiyaç duyduğunu belirtmiştir. Davidovits [54], MK'nin sıkıştırılamayacağını, ancak geopolimerizasyondan sonra yapısını koruduğunu ve reaksiyonun geopolimerin yüzeyinde gerçekleştiğini kabul etmektedir. Kil mineralleri, toplam bileşimi % 70-90 aralığında olan zengin Al_2O_3 ve SiO_2 içerir ve bu oran, konumun kökenine ve jeolojisine göre değişir [4, 22]. MK kullanımı, yüksek alkali ortam gerektirir [23, 55]. % 100 GYFC numuneleri için, yükselen bağlayıcı/aktivatör yüksek dayanım elde etti. Aziz ve ark. [48], cüruf için ideal oranın 3,0 olduğunu araştırdı. Dayanım, ekonomi ve ekoloji açısından en avantajlı denemeler 20 V gerilimde, 1,40 bağlayıcı/aktivatör oranı ve 12M molaritede 50MK50C idi. Tuyan ve ark. [56], su-bağlayıcı oranının azaltılmasının dayanımı artırdığını açıklamıştır. Dan ve ark. [4], MK-GYFC bazlı geopolimerlerin erken dayanımını incelemiş ve % 60 GYFC içeriğinin ideal karışım olduğunu önermiştir [4]. Bu şekilde, MK ve GYFC düşük voltaj ve molaritede iyi bir şekilde uygulanmıştır. Bu karışım oranı, çalışmanın sonraki aşamasında uygulanmıştır.



Şekil 2.7 Ön testlerin basınç deneyi sonuçları (14M)

2.3 Elyaf Katkılı Numunelerin Mekanik Özellikleri

2.3.1 Basınç Dayanımı

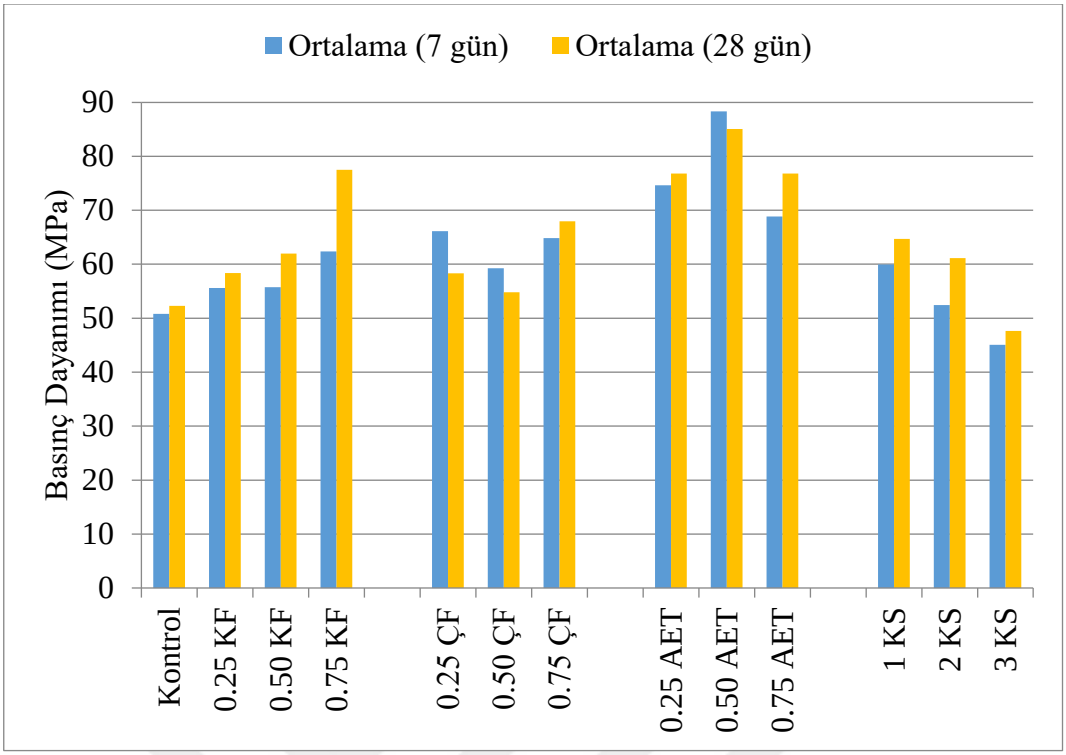
Şekil 2.8 ve Tablo 2.3, elektro-kürlenmiş geopolimer harçların basınç dayanımı ve geopolimerizasyon sürerken ölçülen en yüksek akım değeri arasındaki ilişkinin yüksek çözünürlüklü bir gösterimini sunarak, mekanik ve elektrotermal performans ölçütlerinin son derece nadir görülen bir niceliksel tesadüfünü ortaya koymaktadır. Tüm dayanımlardaki fiber takviyeli seriler, 7 günde 50,82 MPa ve 28 günde 52,29 MPa gibi saygıdeğer bir değer ölçen ve 2,50 A'lık en düşük tepe akımına karşılık gelen kontrol grubunu önemli ölçüde aştı. Azaltılmış dozajda en düşük performansa sahip fiber sistemi bile, 7. günde kontrol grubuna kıyasla en az % 10-25 dayanım artışı sağlamış ve bu da matrisin sıkıştırılmasında fiber aracılı elektrik iletiminin gömülü avantajını daha da doğrulamıştır. KF serisinde, % 0,25'ten % 0,75'e kadar liflerin kademeli olarak eklenmesi, 7. gün dayanımını 55,63 MPa'dan (+% 9,5) 66,14 MPa'ya (+% 30,2) ve karşılık gelen akımı 10,60 A'dan (+% 324) 14,20 A'ya (+% 468) arttırmıştır. En dikkat çekici olanı, % 0,75 KF karışımı, 28 günlük dayanımı 77,49 MPa'ya yükselterek karakteristik geopolimer plato etkisinin gücünü aşmıştır. Bu, kontrol grubuna kıyasla % 48,1'lik etkileyici bir iyileşmedir ve Doğan ve ark. [57]'un, ilk kürlenme döneminden sonra dağınık KF ağlarının iletkenlik ve çatlak köprüleme kabiliyetini koruduğu bulgusunu tekrarlamaktadır. ÇF için, 7 günlük dayanımı % 0,25'te 62,00 MPa (+% 22,1) iken % 0,75'te 74,62 MPa (+% 46,8) seviyesine yükseldi ve buna karşılık gelen tepe akımları sırasıyla 13,30 A (+% 432) ve 18,40 A (+% 636) oldu. Daha düşük dozaj durumunda 28 günlük dayanımda küçük düşüşler kaydedilse de (örneğin, 0,25 ÇF'de −% 2,6), net artış genel olarak önemliydi ve Dehghanpour ve ark. [58] ile tutarlıydı. Dehghanpour ve ark. [58], çelik liflerin betonun direncini bir mertebe veya daha fazla azaltma kabiliyetine sahip olduğunu ve bunun da ısıl homojenlik ve bağ gelişiminin iyileşmesine karşılık geldiğini belirtmiştir.

KS doğrusal olmayan bir tepki gösterdi: % 1 KS, 7 günlük dayanımı 59,93 MPa'ya (+% 17,9) yükseltti ve akım 15,42 A'ya (+% 516) yükseldi, ancak daha yüksek yüzdeler (% 2 ve % 3) 52,40 MPa ve 45,05 MPa'ya düşüş gösterdi, bu da kontrol grubuna kıyasla sırasıyla sadece +% 2,98 ve –% 11,4'lük değişikliklere karşılık gelmektedir. Dayanım kaybı, parçacık aglomerasyonu ve farklı ısı

dağılımına benzer modeller sergiliyor ve jel sürekliliğine zarar veren lokalize sıcaklık gradyanlarına neden olabilir. AET tartışmasız en iyi sonucu vermiştir. 0,25% AET'de, 7 günlük dayanım 76,82 MPa (+51,2%) ve 28 günlük dayanım 85,06 MPa (+% 62,6) idi ve maksimum akım 18,90 A (+% 656) idi. % 0,50 AET formu, veri setinin zirvesini oluşturdu: 7 günde 88,30 MPa ve 28 günde 85,06 MPa — kontrolün sırasıyla +% 73,82 ve +% 62,6'sı — ve hala 26,80 A (+% 972) akım taşıyordu. 76,80 MPa (28 gün) dayanımda hafif düşüşlerin kaydedildiği % 0,75 AET'de bile, dayanım +46,87% artış göstermiştir. En yüksek akım (26,80 A) ve en yüksek dayanım sonuçlarından biri (% 0,50 AET) arasındaki tesadüf, hem termal hem de mekanik sonuçları en üst düzeye çıkaran, optimal şekilde süzülmüş iletken ağ önerisini daha da desteklemektedir. Payakaniti ve ark. [6] tarafından KF ile güçlendirilmiş malzemeler durumunda belirtildiği gibi, reaksiyon kinetiğini artırma ve elektriksel kürleme altında mikro yapısal bütünlüğü sağlama şeklindeki iki kat iletken fiber işlevi, pozitif bir geri besleme döngüsü sağlar: artan akım, daha iyi geopolimerizasyona yardımcı olur, gözeneklilik ve mikro çatlakların azalması nedeniyle daha yüksek iletkenliğe yardımcı olmaktadır.

Tablo 2.3 Lif katkılı numunelerin maksimum akım değerleri

Numune	**miliamper**
Kontrol	2,50
0.25 KF	10,60
0.50 KF	12,75
0.75 KF	14,20
0.25 ÇF	13,30
0.50 ÇF	15,60
0.75 ÇF	18,40
0.25 AET	18,90
0.50 AET	22,62
0.75 AET	26,80
1 KS	15,42
2 KS	16,50
3 KS	17,60



Şekil 2.8 Lifli numunelerin basınç deneyi sonuçları

2.3.2 Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı deneyleri 7. ve 28. günlerde uygulanmıştır. Üç deney numunesinin ortalama eğilme dayanımı, araştırmada kullanılan harcın eğilme dayanımını tespit etmek için hesaplanmıştır. Eğilme dayanımı, (2.1) denklemine göre bulunmaktadır.

Eğilme dayanımı $\sigma = 3PL/2bd^2$ (2.1)

σ: Eğilme dayanımı, (N/mm^2),

b: Prizma kesitinin eni (mm),

d: Prizma kesitinin yüksekliği (mm),

P: Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

L: Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm) dir.

Şekil 2.9, elektrikle kürlenen 7 ve 28 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımının gelişimini göstermektedir. Şekil, iletken ve yarı iletken liflerin kullanılmasıyla, 7 günde sadece 9,00 MPa ve 28 günde 8,90 MPa'ya ulaşan takviyesiz kontrol karışımına kıyasla eğilme tepkisinin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Bu, çatlak köprüleme bileşenleri içermeyen geopolimer matrislerinde yaygın olan kırılgan kırılma modunun bir özelliğidir [34]. Tüm elyaf türleri arasındaki genel davranış, erken yaşta eğilme dayanımının elyaf iletkenliği ile yakın bir korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin, en iyi 7 günlük

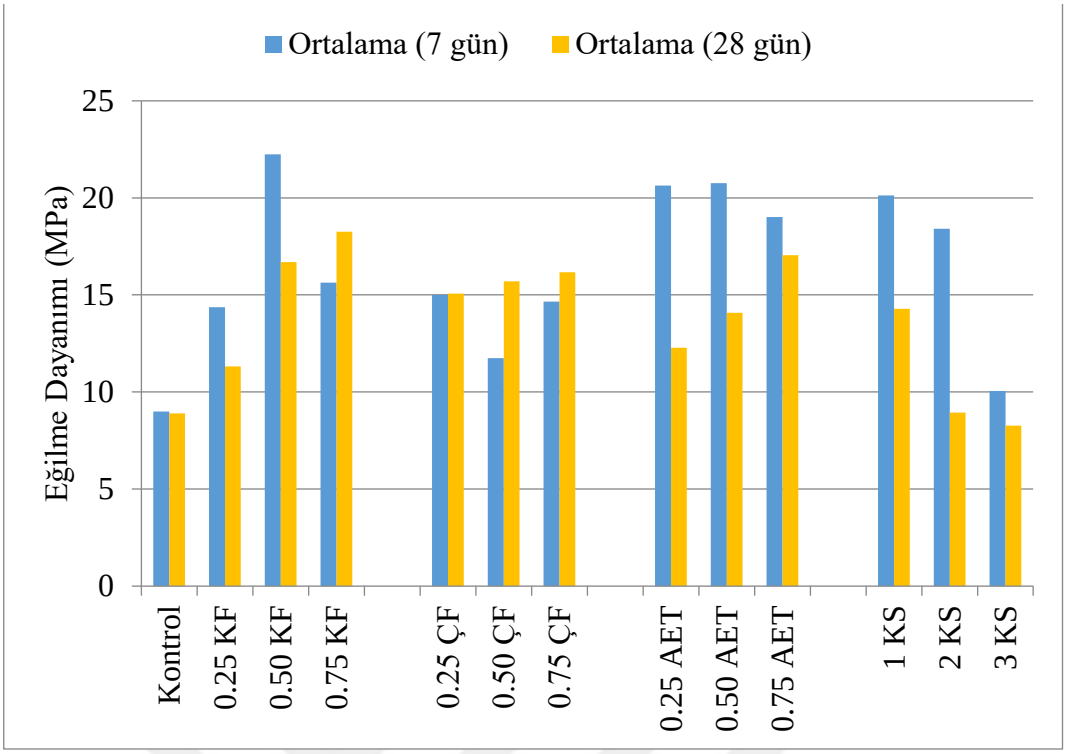
sonuçlar tutarlı bir şekilde en iletken elyaf türleri tarafından temsil edilmiştir. Bu korelasyon, % 0,50 KF (22,24 MPa, +% 147,1) ve % 0,50 AET (20,76 MPa, +% 131,8) gibi en yüksek 7 günlük sonuçlar ve aynı süre içinde sadece 15,00-16,17 MPa (+% 66,7-79,7) değerlerine ulaşan ÇF serisindeki karşılık gelen daha düşük iletkenlikli analogları karşılaştırıldığında ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, 28 gün sonra tutunma davranışı, iletkenlikle tek başına ele alınamayacak daha incelikli bir korelasyon göstermektedir. KF serisinde, erken yaş dayanımları en yüksekler arasındaydı (% 0,25 KF: 14,36 MPa, +% 59,6, % 0,75 KF: 18,25 MPa, +% 103,0), tutunma oranları sadece % 75–86 idi ve % 0,50 KF 16,69 MPa'ya (% –24,9) ve % 0,75 KF 15,64 MPa'ya (%–14,3) düşmüştür. Bu düşüş, KF'nin lokalize ısı konsantrasyonu nedeniyle erken jel gelişimini hızlandırma yeteneğini ima etmektedir, ancak KF'nin pürüzsüz yüzey topografyası ve sınırlı mekanik ankrajı nedeniyle, uzun süreli stres döngüleri altında arayüzey ayrılması ve mikro çatlak oluşumu meydana gelmektedir. Tersine, ÇF, daha düşük elektrik iletkenliğine rağmen, daha iyi uzun vadeli stabilite göstermiştir; % 0,25 ÇF, 15,00 MPa'dan 15,08 MPa'ya (+% 0,53) hafif bir artış göstermiş, % 0,50 ÇF ve % 0,75 ÇF ise sadece hafif düşüşler (sırasıyla –% 6,6 ve –% 9,3) yaşamıştır. Bu özellik, ÇF'nin kancalı uç topografyası ve mekanik kilitlemesinin önemli mekanizmalar olduğunu göstermektedir; matris, hidrasyon-geopolimerizasyon döneminin zirvesini geçtikten sonra mikro yapısal gevşeme yaşasa bile, ÇF yine de çatlakların etkili bir şekilde köprülenmesini sağlar ve enerji dağılım kapasitesi korunur.

Bu AET serileri çift davranışla karakterize edilir: % 0,25 AET, 20,63 MPa (+% 129,2) gibi mükemmel bir başlangıç dayanımı göstermiş, ancak 12,28 MPa'ya (–% 40,5) kadar belirgin bir bozulma göstermiştir. Bu, daha düşük hacim fraksiyonlarında bile, iletkenlikle erken hızlanma yeterli olsa da, düşük elyaf yoğunluğunun geç dönem çatlak köprüleme verimliliğini engellediğini göstermektedir. Tersine, % 0,50 AET mükemmel bir başlangıç dayanımı (20,76 MPa) ve 28 günde iyi bir tutunma (19,01 MPa, % –8,4) göstererek iletken ağ bütünlüğü, mekanik takviye ve dispersiyon kalitesinin en iyi kombinasyonunu elde etmiştir. Bununla birlikte, % 0,75 daha belirgin bir bozulma göstermiştir (% –17,4) ve optimumdan daha yüksek lif hacimlerinde sistem düzeyinde lokalize bir kümelenme meydana gelebilir, bu da gerilme transferinin homojenliğini sınırlayarak erken matris mikro çatlaklarını teşvik edebilir.

KS ile güçlendirilmiş harçlar en doğrusal olmayan dozaj tepkisini göstermiştir. % 1 KS, 7 günde 20,13 MPa (+123,7) sağladı ve 28 günde 14,29 MPa (-8,5) tutundu, bu da düşük KS içeriğinin matris sürekliliğini ciddi şekilde bozmadan verimli iletken yollar oluşturabileceğini göstermiştir. Ancak, daha yüksek KS dozajları keskin bir bozulmaya neden olmuştur: % 2 KS, 18,41 MPa (+% 58,8)'dan 8,94 MPa (–% 37,4)'ya, % 3 KS ise 10,05 MPa (+% 11,7)'dan 8,27 MPa (–% 17,7)'ya düşmüştür. Bu düşüş, zayıf arayüzey bölgeleri ve düzensiz dirençli ısıtma oluşturan ve heterojen mikroyapısal yoğunlaşma ve azaltılmış eğilme yük taşıma verimliliğine yol açan ince karbon parçacıklarının bilinen aglomerasyon eğilimi ile uyumludur.

Basınç dayanımı verileriyle çapraz karşılaştırma, kritik bir farklılık ortaya koymaktadır: en yüksek erken eğilme dayanımları, en yüksek basınç dayanımlarından bazılarıyla örtüşse de, genel olarak eğilme dayanımı, basınç dayanımına kıyasla 28g/7g (ör. ÇF % 0,25: 1,005; AET % 0,50: 0,916) daha yüksek tutunma oranlarına sahiptir. Bu, matris yoğunlaşması düz bir seviyeye ulaşmış veya hafifçe gerilemiş olsa bile, liflerle yapılan takviyenin mekanik köprüleme yoluyla çatlak oluştuktan sonra yük taşıma özelliğini koruduğu anlamına gelir. Veri seti böylece iki parametreli bir optimizasyon ilkesi tanımlar: iyi erken yaş eğilme kapasitesi genellikle yalnızca liflerin iletkenliği ve ağlarının sürekliliği tarafından kontrol edilir, ancak uzun vadeli tutunma mekanik ankraj, dispersiyon kalitesi ve lif-matris bağ arayüzünün bütünlüğüne bağlıdır.

Buradan, % 0,50 AET hızlı sertlik artışı ve dayanıklı eğilme dayanımı sağlayan en dengeli takviye olarak ortaya çıkmaktadır ve ÇF, daha düşük iletkenlikli bir sistemin üstün uzun vadeli kararlılığını sağlamaktadır. KF, erken yaşta en iyi hızlanmaya sahiptir, ancak bunu korumak için daha iyi arayüzey işlemlerine ihtiyaç duymaktadır ve KS, sistem performansının düşmemesi için dozajında sıkı bir şekilde kontrol edilmelidir.



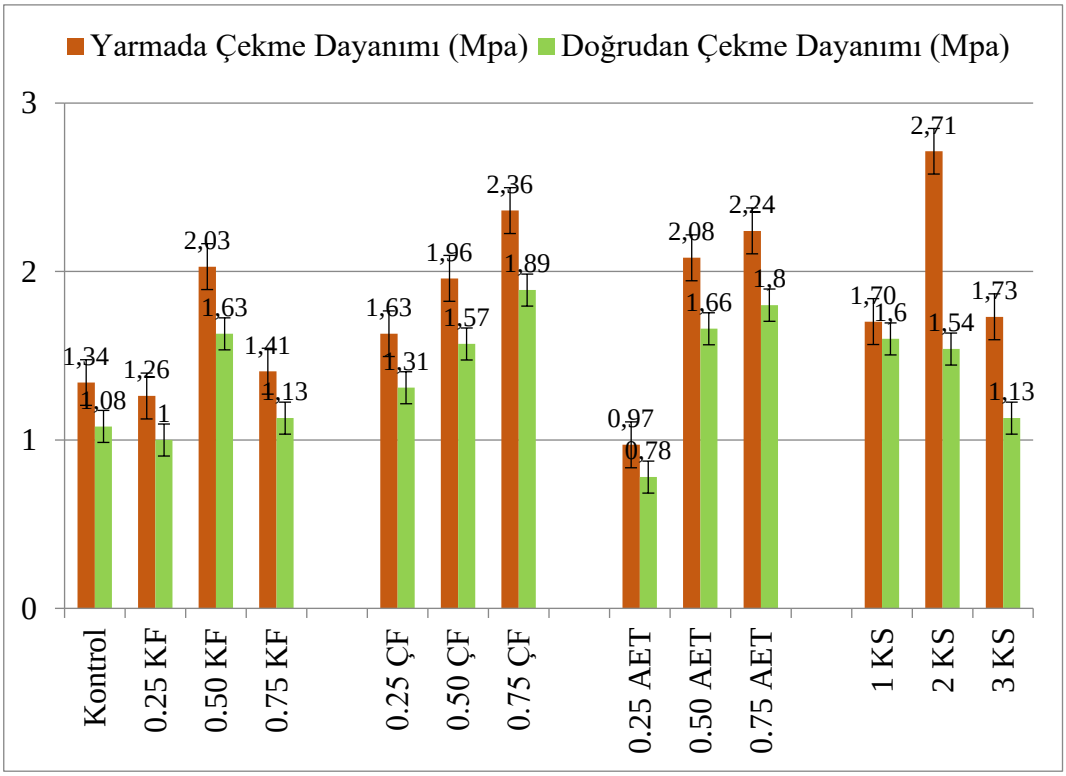
Şekil 2.9 Lifli numunelerin eğilme deneyi sonuçları

2.3.3 Yarmada ve Doğrudan Çekme Dayanımı

Şekil 2.10, geopolimer harçların 28 günlük yarmada çekme dayanımı (STS) ve doğrudan çekme dayanımı (DTS) sonuçlarını göstermekte ve çekme performansı üzerinde lif tipi ve dozajının etkisini kapsamlı bir şekilde karşılaştırmaktadır. Hemen hemen tüm elyaf ilaveli numuneler, kontrol numunelerine göre (STS = 1,34 MPa, DTS = 1,08 MPa) her iki çekme dayanımı özelliğinde de yüksek ve genel olarak paralel artışlar göstermiştir. Bu da, elyaf takviyesinin çatlak köprüleme kabiliyetini etkili bir şekilde artırdığını ve kırılmaya yol açan çatlak yayılmasını yavaşlattığını göstermektedir. Tek istisna, % 0,25 AET ilaveli numuneydi; bu numune, kontrol grubuna kıyasla sırasıyla yaklaşık % 27,6 ve % 27,8'lik düşüşlere karşılık gelen, önemli ölçüde düşük çekme özellikleri (STS = 0,97 MPa, DTS = 0,78 MPa) göstermiştir. Bu düşüş, yerel gerilme artırıcıların ortaya çıkmasına neden olan olası dispersiyon sorunlarının yanı sıra, birbirine bağlı bir takviye ağı oluşturmak için yetersiz miktarda elyaf kullanılmasına bağlanabilir. Buna rağmen, AET ilavesinin artırılması önemli iyileştirmelerle sonuçlandı: % 0,50 AET, STS'de 2,08 MPa (+% 55,2) ve DTS'de 1,66 MPa (+% 53,7) değerlerine ulaşmış ve % 0,75 AET, STS'de 2,24 MPa (+% 67,2) ve DTS'de 1,80 MPa (+% 66,7) değerlerine ulaşarak kontrol grubunu açıkça geride bırakmış;

liflerin gerilme yükü iletimine aktif olarak katılabileceği bir eşik dozaj seviyesini göstermiştir. En yüksek bireysel performans, veri setindeki en yüksek değer olan 2,71 MPa (+% 102 kontrolün üzerinde) STS değerine ulaşan % 2 KS numunesi ile elde edilirken, DTS değeri 1,60 MPa (+% 48,1) olmuştur. STS ve DTS arasındaki bağlantı, esas olarak her test düzeneğinde yer alan gerilimin dağılımı, kırılma mekaniği ve mikroyapısal etkileşim mekanizmalarındaki içsel varyasyondan kaynaklanmaktadır. STS testi altında prizmatik veya silindirik bir test parçası üzerinde geniş aralıklı bir basınç yükü dağılımı, merkezi eksen boyunca dolaylı bir çift eksenli gerilme gerilimi koşulu oluşturur ve bu da düzgün olmayan ancak yüksek oranda dağıtılmış bir üç eksenli gerilme gerilimi koşulu sağlar. Bu dağıtılmış gerilme koşulu, yerel gerilme yoğunlaşmasını azaltır ve test parçası boyunca bir dizi mikro çatlağın kademeli olarak büyümesine neden olur, bu da sıralı lif entalpilerine ve çatlakların dağıtılmış köprülenmesine yol açar. İnce iletken dolgu maddeleri, yani karbon siyahı, ayrıca matrisi yoğunlaştırır ve lif-matris temasını iyileştirerek kademeli temas için arayüzey geçiş bölgelerini (ITZ'ler) sertleştirir. Buna göre, STS i testi genellikle daha yüksek görünür sünek değerleri kaydeder, çünkü kompozit, mikro çatlak etkileşimi, sınırlama ve fiber köprüleme ile olası arızaya direnir. Bununla birlikte, DTS testi, test parçasının uzunlamasına ekseni boyunca doğrudan tek eksenli ve yoğun tek eksenli gerilme gerilimi uygular; bu, fiber birleşiminin kapsamını ve depolanan enerjinin dağılmasını kısıtlayan baskın tek bir kırılma düzlemi oluşturur. Ana çatlağın çekirdeklenmesi ve yayılması üzerine, yanal olarak sınırlandırılmış yükün olmaması, yük taşıma kapasitesinin hızlı bir şekilde kaybolmasına ve ani bir kırılmaya neden olur. Ek olarak, sonuçları daha da etkileyen bir diğer değişken, numune geometrisi ve boyutudur [32, 38], çünkü daha uzun DTS numuneleri doğal olarak daha yüksek mikro gözeneklere ve daha düşük fiber hizalamasına sahiptir ve bu nedenle çatlağın erken başlaması olasılığı daha yüksektir. STS numuneleri, daha yüksek sünek değerler sağlayan daha yaygın bir gerilme profiline sahiptir. Elektrotermal kürleme testi koşullarında, numunelerin uzunluklarının artmasıyla akım yoğunluğu ve sıcaklık tutarlılığı azaldığı için bu eşitsizlik daha da artar, böylece DTS numunelerinde daha az tutarlı jel olgunlaşması meydana gelir. Aksine, bu testte STS ve DTS arasındaki sistematik farklılık, her test koşulu için benzersiz olan kırılma geometrileri ve mikroyapısal etkileşimler nedeniyle değişen gerilme yollarının tutarlı bir sonucudur, çünkü

daha küçük STS numuneleri, STS/DTS oranlarının lif-geopolimer matrisi arasında daha yoğun bir jel büyümesi sağlayan daha homojen bir termal alan kaydetmiştir, böylece STS/DTS oranları, fiber takviyeli geopolimer harçların standart tepkisi olan 1,2-1,4 değerleri arasına düşmüştür.



Şekil 2.10 Yarmada çekme ve doğrudan çekme deneyi sonuçları

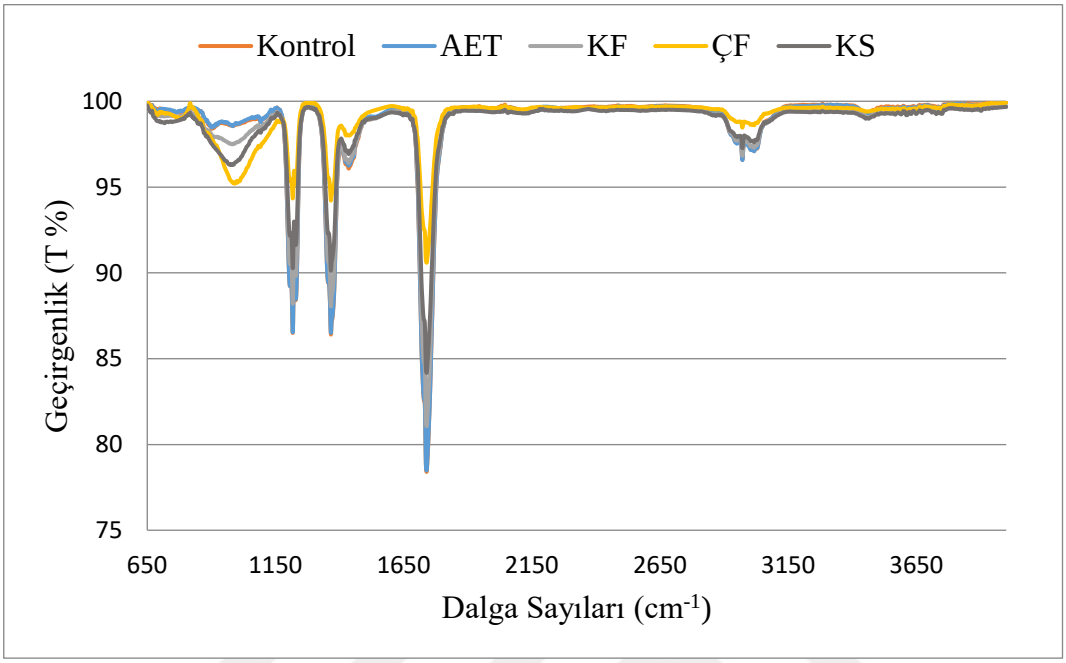
2.4 Mikroyapısal Analiz

Geopolimer harçların mikroyapısını araştırmak için 28 günlük numuneler üzerinde FTIR, XRD, SEM ve EDS/EDX analizleri birlikte gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için numuneler, basınç dayanımı testlerinden sonra çatlamış numunelerden çıkarılmıştır.

2.4.1 Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Mineraloji, geopolimer harçların sentezi için de önemlidir ve Şekil 2.11, Perkin Elmer Spectrum 100 FT-IR spektrofotometresi ile 4 cm^{-1} spektral çözünürlükte 4000 ile 650 cm^{-1} arasında taranan sentezlenmiş numunelerin FT-IR spektrumlarını göstermektedir. Analize göre, seçilen liflerin eklenmesinin hiçbir etkisi olmamış ve farklı liflerin kullanılması polimerizasyon sürecinde önemli bir fark yaratmamıştır [34]. Literatüre göre, kil bazlı geopolimerler 990 $cm^{(-1)}$ ve 1200 $cm^{(-1)}$ civarında Si-O ve Al-O bağlarının asimetrik gerilme titreşimlerini gösteren dar bantlar sergiler. 1300-

1400 $cm^{(-1)}$ aralığındaki bant, C-O bağlarının karakteristik özelliğiydi. 3500-4000 $cm^{(-1)}$ pikleri ve yaklaşık 1700 $cm^{(-1)}$, O-H bağlarının gerilmesiyle ilişkilendirildi [21]. Sonuçlar önceki çalışmaları da doğrulamıştır [52, 53].



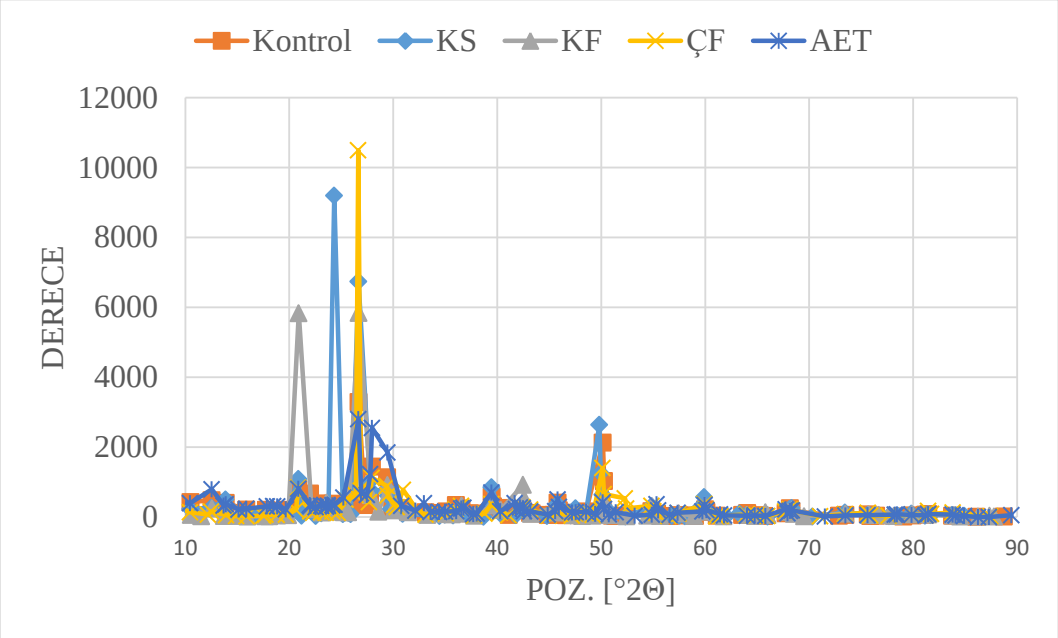
Şekil 2.11 MK-GYFC geopolimer numunelerinin FTIR spektrumları

2.4.2 X-Işını Kırınımı (XRD)

Kontrol ve güçlendirilmiş geopolimer harçların kimyasal bileşimlerinin XRD analizi gerçekleştirildi. Okumalar, Cu Kα radyasyon kaynağı (λ = 1,54059 Å) ile Malvern PANalytical Empyrean MultiCore difraktometresi kullanılarak elde edildi. Makine, Cu Kα radyasyon kaynağı için standart laboratuvar parametreleri olan 40 kV ve 40 mA sabit çalışma ayarında ayarlandı ve okumalar, 1°/dk tarama hızında 2° ile 120° arasında değişen 2θ değeri için alındı. Test numuneleri, teste gönderilmeden önce toz haline getirilmiştir.

Tüm numunelerin XRD desenleri Şekil 2.12'de gösterilmektedir. XRD verileri analiz edildiğinde, tüm geopolimer harç numunelerinde kuvars pikleri bulunmuştur. Kuvars pikleri, 2θ aralığının ~22–35°'sinde daha yüksek yoğunluğa sahipti. Literatürde belirtildiği gibi, bu kuvars pikleri büyük ölçüde bağlayıcı malzemelerin yüksek kristal silika içeriğinden kaynaklanmaktadır [16, 35, 61]. MK-GYFC bazlı geopolimer harçların XRD modellerinde ~22–35° arasında 2θ pikleri, etkili bir geopolimerizasyonu göstermektedir [35, 62]. Sonuç olarak, MK-GYFC ile güçlendirilmiş geopolimer harçların kimyasal bileşimi, liflerin

varlığından etkilenmemiştir. Diğer pikler, tüm numunelerde reaksiyona girmeyen geopolimerizasyonu göstermektedir [43].

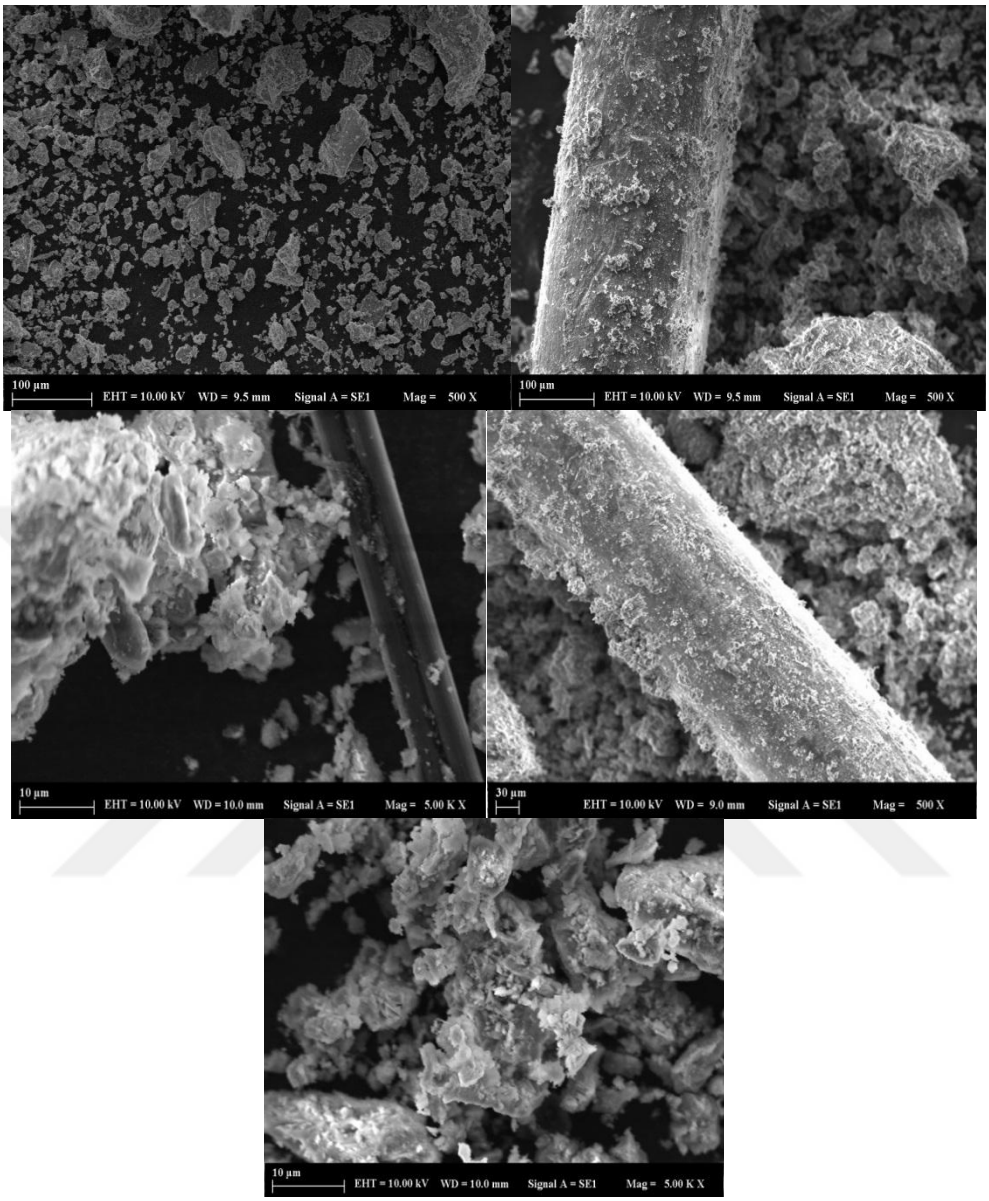


Şekil 2.12 MK-GYFC geopolimer numunelerinin X-ışını difraksiyon desenleri

2.4.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Üretilen takviyeli geopolimer harçların mikro yapısını analiz etmek ve matris ile lifler arasındaki bağlanmayı incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. Görüntüleme öncesinde, basınç dayanımı testinden sonra 28 günlük numunelerin kırık yüzeylerinden küçük miktarlar alınmış, 24 saat boyunca etüvde kurutulmuş, iletken karbon bant kullanılarak alüminyum saplamalara monte edilmiş ve şarjı önlemek ve temiz görüntülemeyi sağlamak için ince (~10 nm) altın kaplama ile püskürtülmüştür. Numunelerin yüzey mikro yapısı Zeiss EVO LS 10 modeli kullanılarak incelenmiştir. Analiz, 9-10 mm çalışma mesafesi ile 10,00 kV hızlanma voltajında gerçekleştirildi. Kontrol, ÇF, KF, KS ve AET ilaveli numunelerin çeşitli büyütme oranlarındaki mikrografları, 28 günlükken Şekil 2.13'te gösterilmektedir. Sonuç olarak, tüm numunelerin MK ve GYFC'nin verimli geopolimerizasyonunu gösteren yoğun bir mikro yapı sergilediği belirlenmiştir. SEM görüntüleri, başarılı mikro yapısal gelişim ve sağlam kürlemeyi gösteren net ve düzgün organize edilmiş bir geopolimerik matris ortaya koyarken, sonuçlar mekanik özellikler, XRD ve FTIR testleri ile uyumlu olarak reaksiyon prosedürünün tutarlı bir resmini ortaya koymuştur. Farklı büyütmelerdeki görüntüler tezin ek kısmında gösterilmektedir. Elektrik kürü

uygulanmış kontrol numunesi Şekil A.1'de, AET numunesi Şekil A.2'de, ÇF numunesi Şekil A.3'te, KF numunesi Şekil A.4'te ve KS numunesi Şekil A.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.13 Taramalı Elektron Mikroskobu mikrografları: (a) Kontrol, (b) AET, (c) KF, (d) ÇF ve (e) KS

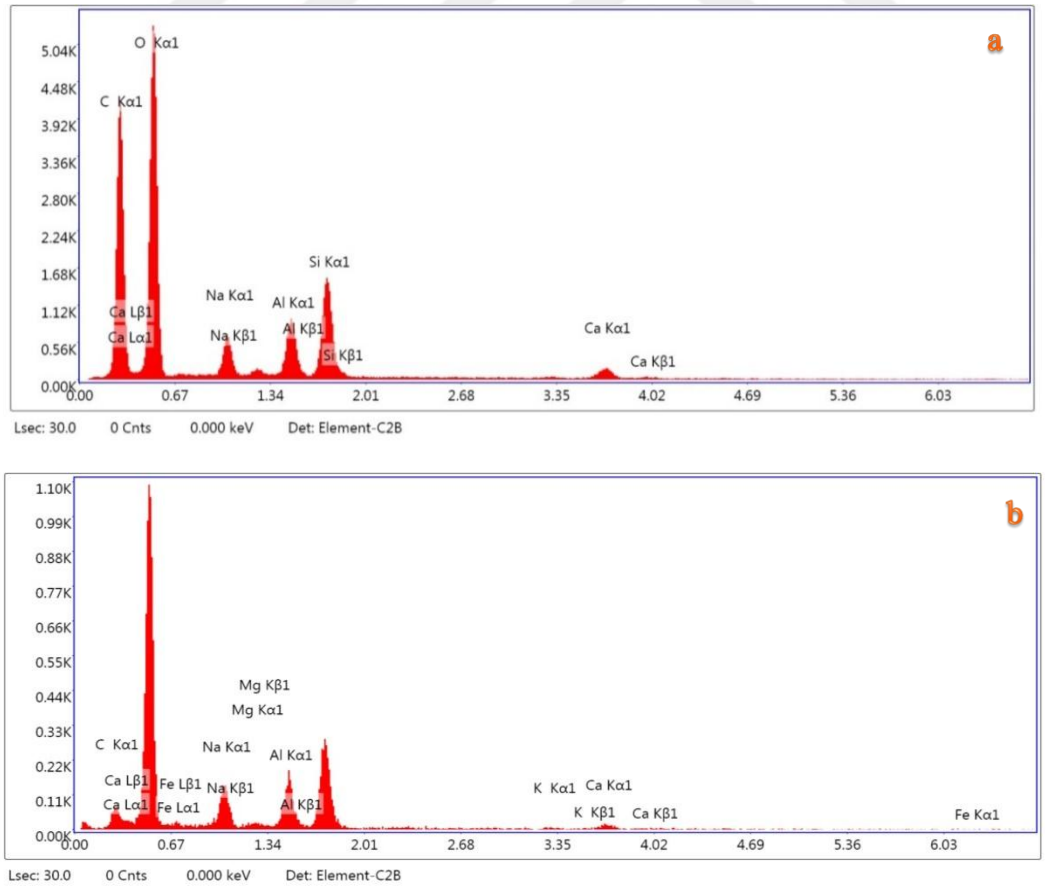
2.4.4 Enerji Dağılım X-ışını Spektroskopisi (EDS)

Kontrol, lifli (ÇF, KF, AET) ve partikül mikro dolgu (KS) takviyeleri için EDS çizgi taraması gerçekleştirilmiştir. Analiz, 10,00 kV hızlanma voltajında ve 1000 büyüklüğünde Thermo Scientific Apreo 2S LoVac modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.4 ve Şekil 2.14, kontrol ve farklı lif ve mikro dolgu türleri içeren takviyeli numunelerin EDS sonuçlarını göstermektedir. EDS spektrumu, diğer mikroyapısal testler gibi numunelerin kimyasal bileşimini ve aralarındaki farkları göstermektedir. GYFC varlığında C-A-S-H jellerle birlikte N-

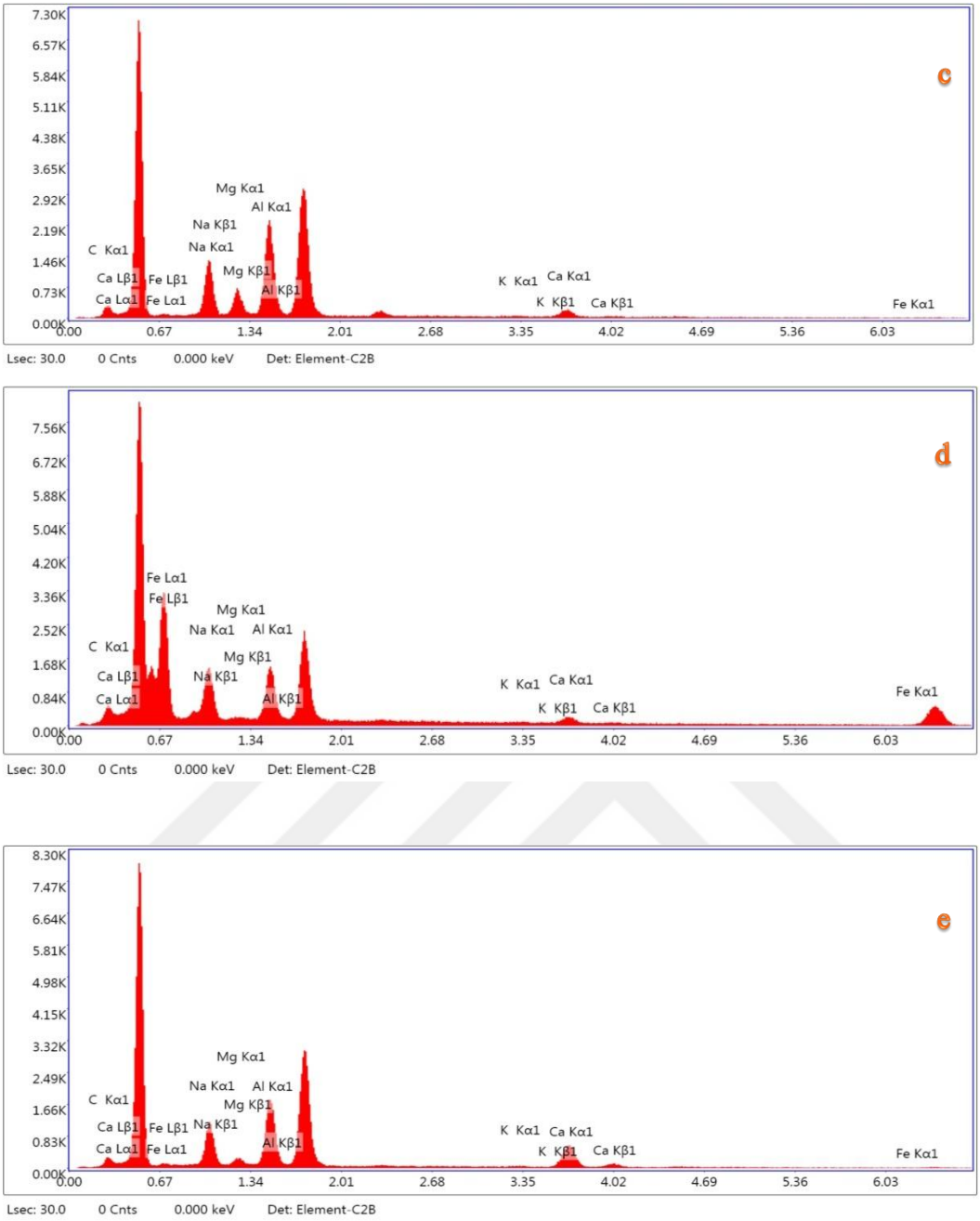
A-S-H jellerin oluştuğu belirlenmiştir. Al, C ve Na'dan sonra ana elementlerden biri olarak belirlenmiştir. Ca ilavesinin N-A-S-H'nin sıvı ortama karşı direncini düşürdüğü ve yoğun bir yapıya sahip jel tabakasına dönüşmesini engellediği belirtilmiştir. Bu nedenle, jel yapısı sıvı ortamda sürekli olarak bozulmaktadır [59]. Metal elementler genellikle elyaf ilaveli numunelerde tespit edilmiştir. SEM ve EDS analizleri, mekanik sonuçlarla tutarlıdır.

Tablo 2.4 EDS/EDX'e göre geopolimer numunelerinin atomik yüzdeleri

İçerik	Yüzde, %				
	Kontrol	**AET**	**KF**	**ÇF**	**KS**
C	42,5	0,2	0	0	0
O	40,1	0	0	0	0
Na	3,5	34,3	24,9	31,0	24,5
Al	4,3	45,7	45,5	25,4	35,6
Si	7,2	0	0	0	0
Ca	2,5	13,2	13,5	7,8	34,4
Fe	0	0	0	34,4	0
Mg	0	3,9	12,3	0,4	4,9
K	0	2,5	3,8	0,9	0



Şekil 2.14 Enerji Dağılım X-ışını Spektroskopisi: (a) Kontrol, (b) AET, (c) KF, (d) ÇF ve (e) KS



Şekil 2.14 Enerji Dağılım X-ışını Spektroskopisi: (a) Kontrol, (b) AET, (c) KF, (d) ÇF ve (e) KS (devamı)

2.5 Çok Kriterli Karar Destek Yöntemi (HD Yöntemi) ile Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi, En İyi Geopolimer Harçların Seçimi

Bütünsel değerlendirme, literatürde yer alan bir değerlendirme yaklaşımıdır ve karar destek yöntemleri, deneysel sonuçların veritabanının değerlendirilmesini

kolaylaştırır. Normalde ve yaygın olarak tercih edilen yaklaşım, tek parametreli değerlendirme ve çift parametreli değerlendirmeye bağlıdır. Tek değerlendirme yaklaşımında, sonuçlar kontrol ve benzer makalelerin sonuçlarına göre değerlendirilir. Bu yaklaşım, önceki bölümlerde/alt bölümlerde belirtildiği gibi bu makalede de izlenmiştir. Ayrıca, çift parametreli değerlendirme yaklaşımında parametreler arasındaki doğrusal veya doğrusal olmayan ilişkiyi bulmak/araştırmak için genellikle korelasyon analizi kullanılır. Bütünsel değerlendirme yaklaşımında, parametre sayısından bağımsız olarak, tüm parametreler hesaplama adımlarında kullanılır ve sonuç olarak genellikle bir sabit bulunur. Bu şekilde, sabit en iyi çözümü bulmak için kullanılır. HD Yöntemi, alternatifleri değerlendirmek için kullanılan çok kriterli karar destek yöntemlerinden biridir ve tüm parametreler için kullanılır. HD Yöntemi içinde, ölçümlerin, fiziksel ve mekanik özelliklerin tüm parametrelerine eşit ağırlıklar verilmiştir. Bu, bazı parametrelerin diğerlerine göre keyfi olarak öncelik verilmesi nedeniyle öznel önyargıları önlemek için alınmış bir karardır. Deney programı, her özellik için eşdeğer ve dengeli veri setleri sunmak üzere tasarlandığından, benzer ağırlıkların kullanılması, K*'nin nihai değerinin her karışımın gerçek genel performansını yansıtmasını sağlamıştır. Yani, her parametre genel karar fonksiyonunda eşit rol oynamış ve karışımlar, ölçülen tüm özellikler için toplu davranışlarına göre sıralanmıştır. HD Yöntemi sonuçlarına göre, KF, ÇF, AET ve KS içerikleri açısından en iyi seri olarak 0,50 KF, 0,75 ÇF, 075 AET ve 1 KS elde edilmiştir. Öte yandan, tüm geopolimerler arasında en iyisi 0,75 AET olarak belirlendi. Kontrol ve % 0,75 AET geopolimerlerin özelliklerinin karşılaştırması Tablo 2.5'te verilmiştir. Tablo 2.6, % 0,75 AET'nin 11 özelliğin 8'inde mukavemet açısından üstün olduğunu göstermektedir. % 0,75 AET için nispeten daha az gözeneklilik ve aşınma direnci görülse de, üstün mekanik ve elektriksel performansı nedeniyle, eşit ağırlıklı HD Yöntemi'ne dayalı olarak en yüksek genel bileşime sahip olarak seçilmiştir. Bununla birlikte, gözeneklilikle ilgili nispeten daha düşük performansları, gelecekteki çalışmalar için potansiyel bir iyileştirme alanı olarak belirtilmiştir.

Tablo 2.5 HD Yöntemi Sonuçları

Ana İçerik	Karışım	K*	Gruptaki en iyi seri	En iyisi
KF	0,25 KF	5,62E-11	0,50 KF	0,75 AET
	0,50 KF	6,25E-16		
	0,75 KF	1,17E-15		
ÇF	0,25 ÇF	6,30E-16	0,75 ÇF	
	0,50 ÇF	5,42E-16		
	0,75 ÇF	1,02E-16		
AET	0,25 AET	7,54E-17	075 AET	
	0,50 AET	2,51E-17		
	0,75 AET	1,74E-17		
KS	1 KS	2,34E-15	1 KS	
	2 KS	3,97E-15		
	3 KS	1,05E-14		
*Düşük değer iyidir				

Tablo 2.6 Kontrol ve en iyi geopolimer karışımının fiziksel ve mekanik özellikleri

Karışım	Özgül ağırlık (kg/m^3)	Gözeneklilik, (%)	Su emme, (%)	UPV (km/s) @ (28 gün)	Aşınma direnci cm^3/50 cm^2	Basınç dayanımı, 7 gün, MPa	Basınç dayanımı, 28 gün, MPa	Eğilme dayanımı, 7 gün, MPa	Eğilme dayanımı, 28 gün, MPa	Yar. Çekme dayanımı, 28 gün, MPa	Doğ. Çekme dayanımı, 28 gün, MPa
Kontrol	1900	9,0	4,7	3,12	16,03	50,8	52,29	9,0	8,9	1,34	1,08
0,75 AET	2140 (+)	20,12 (-)	9,42 (-)	3,54 (+)	27,65 (-)	68,86 (+)	76,8 (+)	19,01 (+)	17,04 (+)	2,24 (+)	1,8 (+)

Not: "+" referansa göre üstün özellik, "-" ise referansa göre yetersiz özellik anlamına gelir.

2.6 Farklı Kürleme Rejimleri ve Takviye Türlerinin Çevresel Etki Değerlendirmesi

Farklı iletken fiberler (KF, ÇF, AET, ve KS) içeren ve üç rejimle kürlenen (10 V ve 20 V'da elektrikle kürleme ve 70 °C'de geleneksel etüv kürü) MK–GYFC bazlı geopolimer harçların çevresel performansını değerlendirmek için yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme, enerji talebi, CO_2 emisyonları, su kullanımı, toprak kirliliği, ötrofikasyon potansiyeli, ozon tabakasını inceltme potansiyeli ve toksisiteye odaklanmıştır (Tablo 2.7). 1 m³ sertleşmiş harç fonksiyonel birimine normalize edilen değerlendirme, kürleme yöntemi, enerji tüketimi ve tüm çevre kategorilerindeki zincirleme etkiler arasında güçlü bir karşılıklı bağımlılık olduğunu ortaya koydu ve kürlemenin yaşam döngüsünün en önemli noktası olduğunu göstermiştir. Tüm serilerde, etüv kürü sistematik olarak 8000 kWh/m³ ile en yüksek mutlak enerji talebini sergilemiş, 4000 kg CO_2/m³ ile birlikte 560 000 L su tüketimi, 9600 kg toprak kirletici eşdeğeri, 1600 kg PO_4 eşdeğeri ötrofikasyon potansiyeli, 0,16 kg CFC-11 eşdeğeri ozon tabakasının incelmesi ve 120 kg DCB eşdeğeri ik toksisite üretti ve bu da temel geleneksel senaryo olarak hizmet etti. Buna karşılık, 10 V'da elektrikle kürleme, elyaf türüne bağlı olarak enerji kullanımını % 40-85 oranında tutarlı bir şekilde azaltırken, 20 V'da kürleme, daha yüksek akım yoğunlukları nedeniyle 10 V'daki rakamları yaklaşık iki katına çıkarmıştır. Örneğin, kontrol karışımı 10 V'ta 1440 kWh/m³ ve 20 V'ta 2880 kWh/m³ tüketirken, etüv kürü 8000 kWh/m³ gerektirmiştir; benzer şekilde, % 0,50 KF, 10 V'ta 7164 kWh/m³ ve 20 V'ta 14328 kWh/m³ tüketirken, % 0,50 AET, yüksek iletkenliği nedeniyle en yüksek elektrik enerjisi tüketimini gösterdi: 10 V'ta 12864 kWh/m³ ve 20 V'ta 25728 kWh/m³. Bu enerji eğilimleri doğrudan CO_2 emisyonlarına yansıdı: örneğin, kontrol emisyonları 10 V, 20 V ve etüv kürleri için sırasıyla 720, 1440 ve 4000 kg/m³ idi; % 0,75 KF, 20 V'da 8184 kg/m³'ye ulaşırken, % 0,75 AET 10848 kg/m³'ye tırmandı, bu da kürleme enerjisi ile somut karbon arasındaki doğrusal ilişkiyi vurgulamıştır. Enerji ve CO_2'nin yanı sıra, kürleme yöntemi de su tüketimini önemli ölçüde etkilemiş; bu, karıştırma ile ilişkili olmasının yanı sıra, kürleme sırasında buharlaşma ve bakım ile de ilişkiliydi. Etüv kürü için sürekli olarak 560000 L/m³ gerekliyken, düşük voltajda elektrikle kürleme, yüksek iletkenlikteki karışımların yerel Joule ısınmasına neden olması ve ölçeklendirme

sırasında su kaybının artmasını teşvik etmesi nedeniyle, liflerin dozajına bağlı olarak yaklaşık 400000 L/m³ ile 900000 L/m³ arasında büyük bir aralık göstermiştir. Yüksek voltajlı kürler bu etkiyi daha da artırdı: örneğin, % 0,50 AET için 10 V'ta 900480 L/m³ tüketirken, 20 V'ta bu miktar iki katına çıkarak 1800960 L/m³'ye ulaştı; KS serisi için de su ihtiyacı dozajla arttı % 1 KS ve 10 V'da yaklaşık 647640 L/m³'den % 3 KS ve 20 V'da neredeyse 1,48 milyon L/m³'ye çıkmıştır. Bu yüksek su miktarları doğrudan toprak kirliliği, ötrofikasyon ve ozon tabakasının incelmesi gruplarına yansıdı, çünkü bu üçü de hem hammadde üretiminin (özellikle alkali aktivatörler ve lifler) hem de enerjiyle kürlerin üretilmesinin faktörleridir. 10 V'da, toprak kirliliği düşük KF dozajlarında 7315 kg/m³ ile % 0,50 AET'de 15437 kg/m³ arasında değişirken ötrofikasyon 1219 ile 2573 kg PO_4 eq/m³ arasında, ozon tabakasının incelmesi 0,122 ile 0,257 kg CFC-11 eq/m³ arasında ve toksisite 91 ile 193 kg DCB eq/m³ arasında değişmiştir. Gerilimin 20 V'a iki katına çıkarılması, tüm serilerde bu değerlerin her birini yaklaşık olarak iki katına çıkarmıştır; Örneğin, % 0,50 AET için 20 V'da 30874 kg toprak eşdeğeri, 5146 kg PO_4 eşdeğeri, 0,515 kg CFC-11 eşdeğeri ve 386 kg DCB eşdeğeri değerlerine ulaştı. Bu, bazı kategorilerde etüv kürü etkisinin üç katından fazlasına tekabül etmektedir ve lif iletkenliğinin elektrik talebi nedeniyle çevresel etkileri artırdığını göstermektedir. Bu eğilim tutarlı bir şekilde devam etti: KF ve ÇF orta düzeyde etki gösterdi, KS dozajlama ile etkileri artırdı ve AET, mekanik avantajlarına rağmen, geri dönüşümden elde edilen metal bileşimi sayesinde yüksek akım iletimi sağlayarak akıma yol açtığı için yüksek voltajla en yüksek çevresel ayak izini sergilemiştir. Ancak, burada bile, atık kaynağı nedeniyle önemli bir döngüsel ekonomi avantajı vardır ve tüm yaşam döngüsü göz önüne alındığında, yüksek işletim etkilerini bir dereceye kadar telafi etmektedir. Tüm etki kategorileri enerji yolu ile birbirine bağlıydı. Yüksek voltajlı elyaflar akım talebini artırdı, bu da enerji tüketimini artırdı ve buna bağlı olarak CO_2 emisyonlarını, ozon tahribatını (fosil yakıt tüketimi yoluyla), ötrofikasyonu (aktivatörlerin ve yakıtın yukarı akış üretimiyle) ve su, toprak ve ötrofikasyon için kimyasal toksisiteyi (kaynak tüketimi yoluyla) arttırmıştır. Su tüketimi ayrıca sızıntı ve kaynak kullanımı yoluyla toprak ve ötrofikasyon etkilerine de maruz kalır. Spektrumun alt ucunda, 10 V'luk elektrikle kürleme ve düşük ila orta düzeyde elyaf içeriği (ör. % 0,25–0,50 KF veya 0,25 ÇF) tüm türlerde tutarlı bir şekilde minimum etki göstermiş, tüm enerji ve CO_2 değerleri için etüv kürünün %

50–70 altında kalmış ve toprak, ötrofikasyon ve ozon etkileri için de benzer miktarlarda daha az etki göstermiştir. 10 V'nin altındaki kontrol karışımları da benzer şekilde iyi performans göstermiştir; tüm faktörler arasında, çevreyi en fazla etkileyen faktör, kürleme türünün doğrudan bir fonksiyonu değil, uygulanan voltun bir fonksiyonudur. Etüv kürü, yüksek enerjisine rağmen, normalleştirilmiş profiliyle orta düzeyde su ve kimyasal etki sergilemiştir, ancak yüksek enerji özelliği onu karbon yoğun hale getirmektedir. Buna karşılık, 20 V kürleme, yüksek iletkenli AET, hatta KS karışımlarında bile, neredeyse tüm türler arasında en yüksek toplam bur den sergilemiştir. Bu, artan voltajın kendisinin çevresel faydalar için yararlı olmadığını, ancak kendisi yakından optimize edilmezse fırın yayılma etkilerini aşacak kadar ileri gittiğini göstermektedir.

Tablo 2.7 Farklı kürleme rejimleri ve takviye türleri altında MK–GYFC geopolimer harçların LCA sonuçları

Seri	Kür	Enerji (kWh/m³)	CO_2 (kg)	Su (L)	Toprak (kg)	Eutro (kg PO_4 eşdeğeri)	Ozon (kg CFC-11)	Toksisite (kg DCB)
Kontrol	10 V	1440	720	100 800	1 728	288	0,0288	21,6
Kontrol	20 V	2880	1440	201 600	3 456	576	0,0576	43,2
Kontrol	Etüv	8000	4000	560 000	9 600	1 600	0,1600	120
0,25 KF	10 V	6 096	3 048	426 720	7 315	1 219	0,122	91,4
0,25 KF	20 V	12 192	6 096	853 440	14 630	2 438	0,244	182,9
0,25 KF	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120
0,50 KF	10 V	7 164	3 582	501 480	8 597	1 433	0,143	107,5
0,50 KF	20 V	14 328	7 164	1 002 960	17 194	2 866	0,287	215,0
0,50 KF	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120
0,75 KF	10 V	8 184	4 092	573 000	9 821	1 637	0,164	122,8
0,75 KF	20 V	16 368	8 184	1 146 000	19 642	3 274	0,327	245,5
0,75 KF	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120

Tablo 2.7 Farklı kürleme rejimleri ve takviye türleri altında MK–GYFC geopolimer harçların LCA sonuçları (devamı)

Seri	Kür	Enerji (kWh/m³)	CO_2 (kg)	Su (L)	Toprak (kg)	Eutro (kg PO_4 eşdeğeri)	Ozon (kg CFC-11)	Toksisite (kg DCB)
0,25 ÇF	10 V	7 020	3 510	491 400	8 424	1 404	0,140	105,3
0,25 ÇF	20 V	14 040	7 020	982 800	16 848	2 808	0,281	210,6
0,25 ÇF	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120
0,50 ÇF	10 V	8 220	4 110	575 400	9 864	1 644	0,164	123,3
0,50 ÇF	20 V	16 440	8 220	1 150 800	19 728	3 288	0,329	246,6
0,50 ÇF	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120
0,75 ÇF	10 V	9 600	4 800	672 000	11 520	1 920	0,192	144,0
0,75 ÇF	20 V	19 200	9 600	1 344 000	23 040	3 840	0,384	288,0
0,75 ÇF	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120

Tablo 2.7 Farklı kürleme rejimleri ve takviye türleri altında MK–GYFC geopolimer harçların LCA sonuçları (devamı)

Seri	Kür	Enerji (kWh/m³)	CO_2 (kg)	Su (L)	Toprak (kg)	Ötro (kg PO_4 eşdeğeri)	Ozon (kg CFC-11)	Toksisite (kg DCB)
0,25 AET	10 V	9 072	4 536	635 040	10 886	1 814	0,181	136,1
0,25 AET	20 V	18 144	9 072	1 270 080	21 772	3 628	0,363	272,2
0,25 AET	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120
0,50 AET	10 V	12 864	6 432	900 480	15 437	2 573	0,257	193,0
0,50 AET	20 V	25 728	12 864	1 800 960	30 874	5 146	0,515	386,0
0,50 AET	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120
0,75 AET	10 V	10 848	5 424	759 360	13 018	2 170	0,217	162,7
0,75 AET	20 V	21 696	10 848	1 518 720	26 035	4 339	0,434	325,4
0,75 AET	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120
1 KS	10 V	9 252	4 626	647 640	11 102	1 850	0,185	138,8
1 KS	20 V	18 504	9 252	1 295 280	22 205	3 700	0,370	277,5
1 KS	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120,0
2 KS	10 V	9 900	4 950	693 000	11 880	1 980	0,198	148,5
2 KS	20 V	19 800	9 900	1 386 000	23 760	3 960	0,396	297,0

Tablo 2.7 Farklı kürleme rejimleri ve takviye türleri altında MK–GYFC geopolimer harçların LCA sonuçları (devamı)

2 KS	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120
3 KS	10 V	10 560	5 280	739 200	12 672	2 112	0,211	158,4
3 KS	20 V	21 120	10 560	1 478 400	25 344	4 224	0,422	316,8
3 KS	Etüv	8 000	4 000	560 000	9 600	1 600	0,160	120

3
DURABILITE DENEYLERI

Lifli mekanik deney sonuçları üzerinden yapılan HD metodu değerlendirmesi göz önüne alınarak kontrol numunesi ile birlikte 0,75 KF, 0,75 ÇF, 0,75 AET ve 1 KS numuneleri üzerinde yüksek sıcaklık, sülfat etkisi ve donma-çözülme etkisi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerden sonra numuneler için mikroyapı analizleri yapılmıştır.

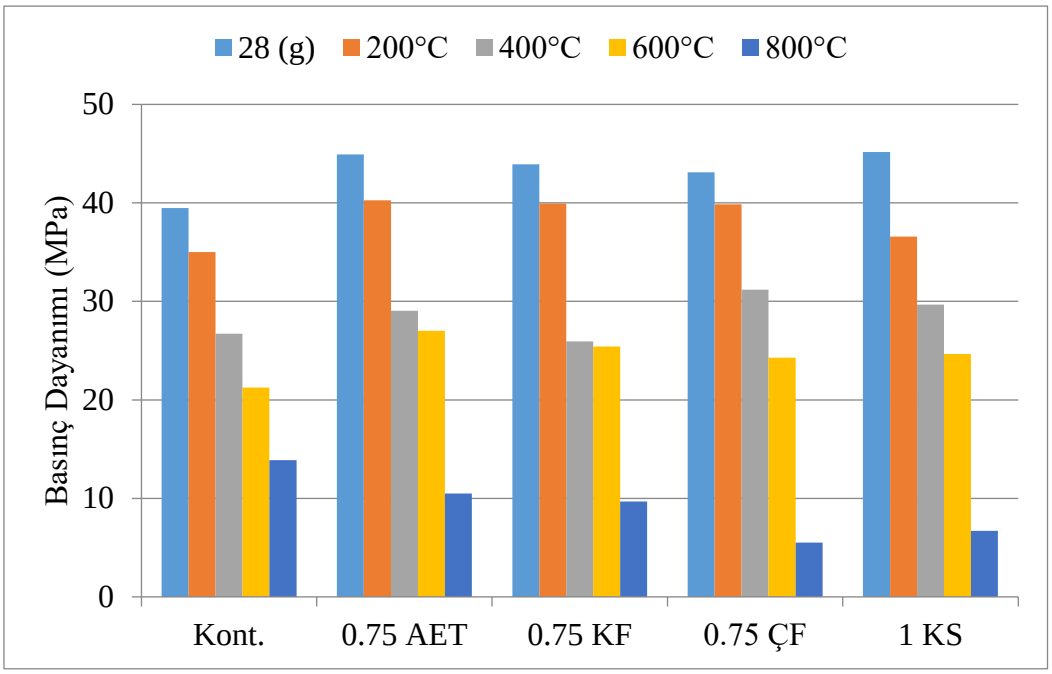
3.1 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Elektrik kürü uygulanmış kontrol ve lifli numunelerde 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C olmak üzere dört farklı sıcaklık değerinde yüksek sıcaklık deneyi yapılmıştır. Hazırlanan numunelerde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases hızı ve ağırlık kaybı testleri uygulanmıştır.

Basınç deneyi sonuçları Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Lif ilavelerinin 200 °C ve 400 °C sıcaklıkta basınç dayanımına katkı verdiği görülmüştür. Ancak 600 °C ve 800 °C sıcaklıklarda liflerin kimyasal yapısının bozulmasından dolayı kontrol numunesinin aynı düşük seviyede değerleri elde edilmiştir [63]. Lifler arasında en iyi değeri az farkla olsa da 0,75 AET 44,91 MPa elde ederek göstermiştir. Elektrik kürü uygulanmış lif katkılı geopolimer harçlarda yüksek sıcaklık deneylerinde elde edilen sonuçlar genel olarak 200 °C için 40 MPa, 400 °C ve 600 °C için 20 MPa, 800 °C için ise 10 MPa seviyesinde olup literatürde etüv kürü ile yapılan çalışmalarda bildirilen sonuçlarla mutabıktır [64]. Bu sonuçlar özelllikle metakaolin tabanlı geopolimer harçların yüksek sıcaklığa karşı üstün performans göstermesine örnektir. Bu durum, esas olarak metakaolin bağlayıcı malzemedeki

yüksek kristal silika içeriğinden kaynaklanmaktadır. [60]. 800 °C'den sonra, geopolimer numunelerinde önemli miktarda kararma şeklinde renk değişikliği görülmüştür [60, 63].

Ziada ve ark., 3 farklı lif katkısı MK ve GYFC esaslı geopolimer üretiminde kullanmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde lif katkısından daha çok bağlayıcı malzemenin etkili olduğu ifade edilmiştir [10].

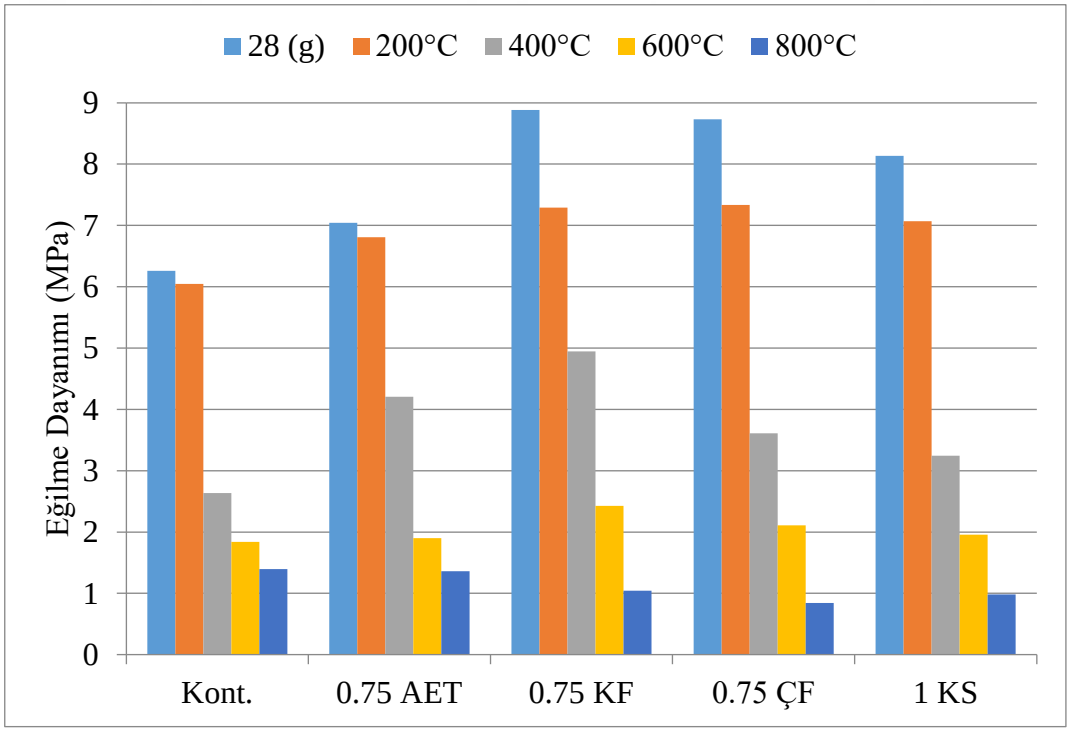


Şekil 3.1 Yüksek sıcaklık etkisinde basınç deneyi sonuçları

Eğilme deneyi sonuçları Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Lif ilavelerinin özellikle 200 °C ve 400 °C sıcaklıkta eğilme dayanımına katkı verdiği görülmüştür. Ancak 600 °C ve 800 °C sıcaklıklarda liflerin kimyasal yapısının bozulmasından dolayı kontrol numunesinin yaklaşık değerleri elde edilmiştir. Lifler arasında en iyi değeri 0,75 KF ve 0,75 ÇF göstermiştir. Bunun sebebi bu liflerin erime sıcaklığının diğerlerine göre yüksek olmasıdır.

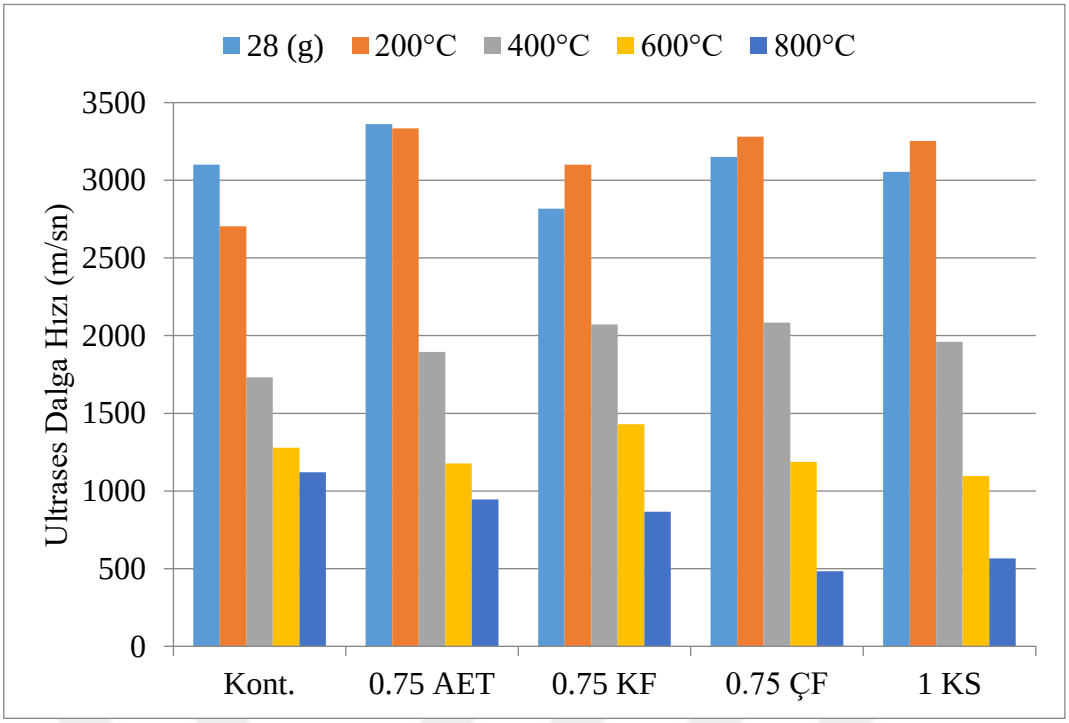
Eğilme dayanımındaki azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle basınç dayanımından daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni, eğilme dayanımının, çatlakların yayılması ve yüksek sıcaklıklarda gözenekli yapıların büyümesi gibi iç mikro yapı kusurlarının gelişmesine daha duyarlı olmasıdır [64].

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan geopolimerin dayanımı, aktivatör/bağlayıcı oranı, aktivatör türü, kürleme sıcaklığı ve kullanılan hammaddeye bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda performans kaybının ana nedeni, harcın içindeki buharlaşma nedeniyle oluşan iç basınçtır. İç basınç belirli bir sınıra ulaştıktan sonra, harcın termal etkilere karşı direnci azalır ve yüzeylerde çatlaklara neden olur. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar harcın ve agrega arasındaki arayüz geçiş alanında mikro çatlaklar oluşturarak termal uyumsuzluklara neden olur. Ayrıca, bu durumda mikro çatlaklar ve gelişen gözenekler eğilme mukavemetini ciddi şekilde etkiler. Bunun nedeni, yüksek dozda liflerin harçta ekstra boşluklar oluşturması ve performansı düşürmesidir [12].



Şekil 3.2 Yüksek sıcaklık etkisinde eğilme deneyi sonuçları

Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları Şekil 3.3'da gösterilmektedir. UPV sonuçları basınç ve eğilme dayanımı sonuçları ile aynı doğrultudadır. 200 °C'ye maruz lifli numunelerde hızda azalma görülmemiştir. 400-800 °C'de kontrol numunesi de dahil bütün sonuçlarda sonuçlar düşmüştür. Suyun buharlaşması sonucunda, gözenek yapısında artışla boşluklar oluşur ve bu etkiyle UPV'lerde azalma olmuştur.



Şekil 3.3 Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızı sonuçları

Yüksek sıcaklık etkisinda numunelerin ağırlık kaybı değerleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir. Değerler genel olarak birbirine benzer ve çok düşüktür. Bunun sebebi lif katkısınıın düşük olmasıdır. Lifler arasında en iyi değeri 0,75 KF vermiştir. Dayanım ve UPV testlerinde olduğu gibi 200 °C ve 400 °C sıcaklıkta kayıp az iken 600 °C ve 800 °C sıcaklıkta kayıp artmıştır.

Tablo 3.1 Yüksek sıcaklık etkisinde lifli numunelerde ağırlık kaybı

	Ağırlık Kaybı (%)				
	28 (g)	200°C	400°C	600°C	800°C
Kontrol	0	0,05	0,06	0,06	0,07
0,75 AET	-0,08	0,04	0,08	0,09	0,10
0,75 KF	0,03	-0,03	0,04	0,05	0,06
0,75 ÇF	0,00	0,01	0,05	0,07	0,07
1 KS	0,00	0,03	0,04	0,09	0,12

3.2 Sülfat Etkisi

Sülfat etkisi, yapısal bir elemanın kirlenmiş toprak veya yeraltı suyu, deniz suyu veya atık su arıtma altyapısı gibi sülfat açısından zengin ortamlarla temas ettiği uygulamalarla ilişkilidir. Etkinin şiddeti ve kapsamı, kullanılan çimento tipi ve betonun genel kalitesi gibi betonun kendisi ile ilgili faktörlere, aynı zamanda agresif ortamın özelliklerine, örn. sülfat iyonu konsantrasyonu ve hareketliliği, katyonun tipi (en yaygın Na+ , K+ , Mg2+ ve Ca2+) veya pH'a bağlıdır. Geopolimer harç numuneleri 28. günün ardından 180 gün boyunca % 5 Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) ve % 5 Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) çözeltilerine maruz bırakılmıştır. 180 gün sodyum sülfat ve magnezyum sülfat etkisine maruz bırakılan numuneler, +105 °C sıcaklıkta etüvde 24 saatte kurutulduktan sonra eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçları elde edilmiştir ve 6 ay sonunda dayanım kayıpları karşılaştırılmıştır.

GPC'lerin basınç dayanımındaki kaybı, PC'e kıyasla % 10–21 aralığında daha az görülmektedir. Bozunma sürecinin başlaması, $Ca(OH)_2$ veya C–S–H jelinden kaynaklanan sülfat iyonları ile çözünmüş kalsiyum iyonları arasındaki etkileşim nedeniyle oluşan alçıtaşı oluşumu ile gerçekleşir. Alçıtaşı, hidratlanmış ve reaksiyona girmemiş alüminatlarla daha fazla reaksiyona girerek etrenjit oluşturur. Sülfat saldırısı, özellikle $MgSO_4$ çözeltisine maruz kaldığında, GPC numunelerinin yüzey Vickers sertliğini de azaltır [67]. Ayrıca Alçıtaşı oluşumu, gözenekleri kısmen doldurmaya ve asidin daha fazla yayılmasını engellemeye yardımcı olabilir. Bu fenomen, farklı düşük Ca geopolimer sistemleri için de literatürde bildirilmiştir [68].

Sülfat etkisinde basınç deneyi sonuçları Şekil 3.4'de gösterilmektedir. Kontrol numunesinde 180 gün sonunda alınan sülfat etkisinde görece az düşüş olmuştur. Lifli numunelerde ise 28 günlük sonuca göre % 5-25 aralığında düşüş gözlenmiştir. Burada gözlenilen düşüşün bir sebebi yüksek ısıdan dolayı erkenden oluşan termal çatlaklardır.

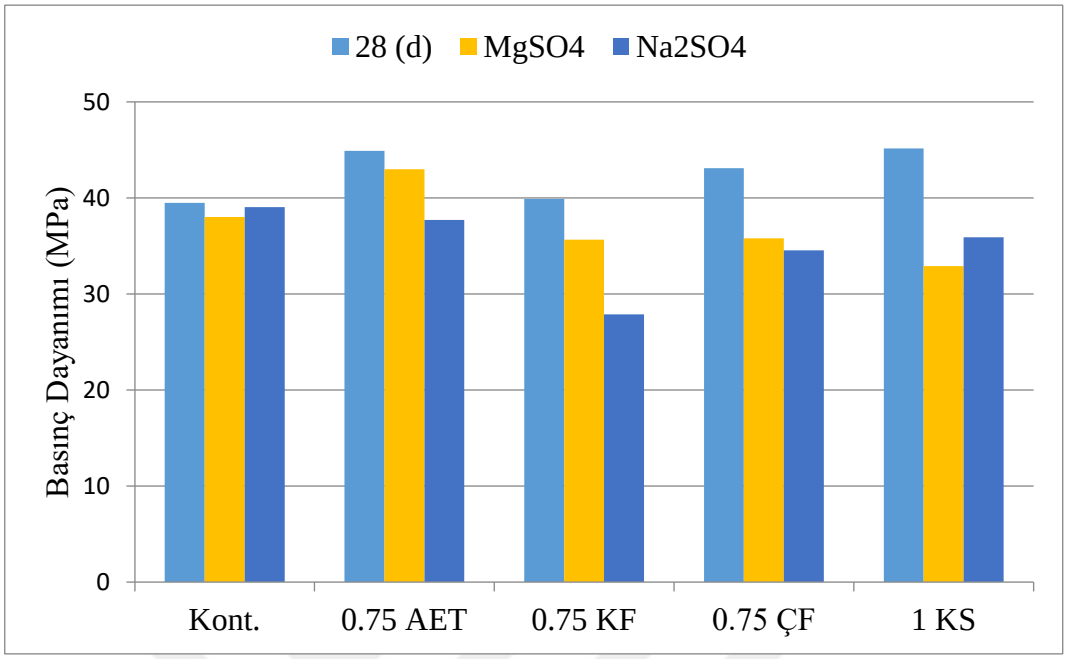
Literatüre bakıldığında bu düşüş % 3-10 aralığında olduğu belirtilmektedir [67]. KS için elde edilen basınç dayanımı değerlerinin düşük olması geçirgenliğin artması ve boşluklu yapı oluşması sonucu uzun sürede sülfat maruziyetinin diğer liflere göre daha etkili olmasından dolayı olmuştur. Genel olarak, Na_2SO_4 sonuçlarına göre $MgSO_4$ sonuçları çok az bir miktar daha düşüktür. Bu $MgSO_4$'ün agresif yapısı, özellikle alçıtaşı ve etrenjit olmak üzere yeni kristal fazların oluşumundan kaynaklanıyor olabilir [67, 69, 70]. Zhu ve ark. MK-GYFC esaslı geopolimerin durabilite özellikleri için aktivatör/bağlayıcı oranını 0,7 ve SS/SH oranını 2 seçmişlerdir. Optimum GYFC oranı olarak % 30 tespit etmişlerdir.

Luo ve ark. sülfat saldırısından sonra numunenin dayanım kaybı, mikro çatlakların oluşumu ve gözeneklilikteki değişikliklerle ilgili olduğu ifade etmişlerdir. Sülfat, korozyonun erken döneminde bazı yüzey gözeneklerinde biriktiği için numune yapısını daha kompakt hale getirir ve dayanım üzerinde hafif bir olumlu etkiye sahiptir. Ancak, uzun süreli ve yüksek konsantrasyonlu (% 20 oranda 56 gün) daldırma nedeniyle, sülfat saldırısının bozulması, geopolimerizasyonun getirdiği olumlu etkiyi aşar ve daha yüksek dayanım kaybına neden olur [64, 71].

Alcamand ve ark. MK-GYFC esaslı geopolimer harçları 180 gün $MgSO_4$ etkisine maruz bırakmışlardır. Sonuçlar, MK bazlı AAM'nin magnezyum sülfat saldırısına karşı daha yüksek direnç gösterdiğini belirtmektedir. Ayrıca, MK'nin YFC ile kısmi olarak değiştirilmesi, sülfat saldırısından sonra mekanik özelliklerin azalmasına neden olduğu ve bu durumun alkali (Na^+) çözeltiye göçü nedeniyle alkalinite kaybının yanı sıra, YFC'den gelen kalsiyum varlığında etrenjit ve alçıtaşı oluşumu ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir [72]. Bu oluşumların matriste katı hacimde artışa neden olarak şişme ve genleşme oluşturduğu belirtilmektedir [72].

Kuri ve ark. yaptığı çalışmada düşük kalsiyum içeriğine sahip ferronikel cürufu kullanmışlardır ve alümo silikat jelin, geopolimerleri 18 ay sureli Na_2SO_4 etkisine

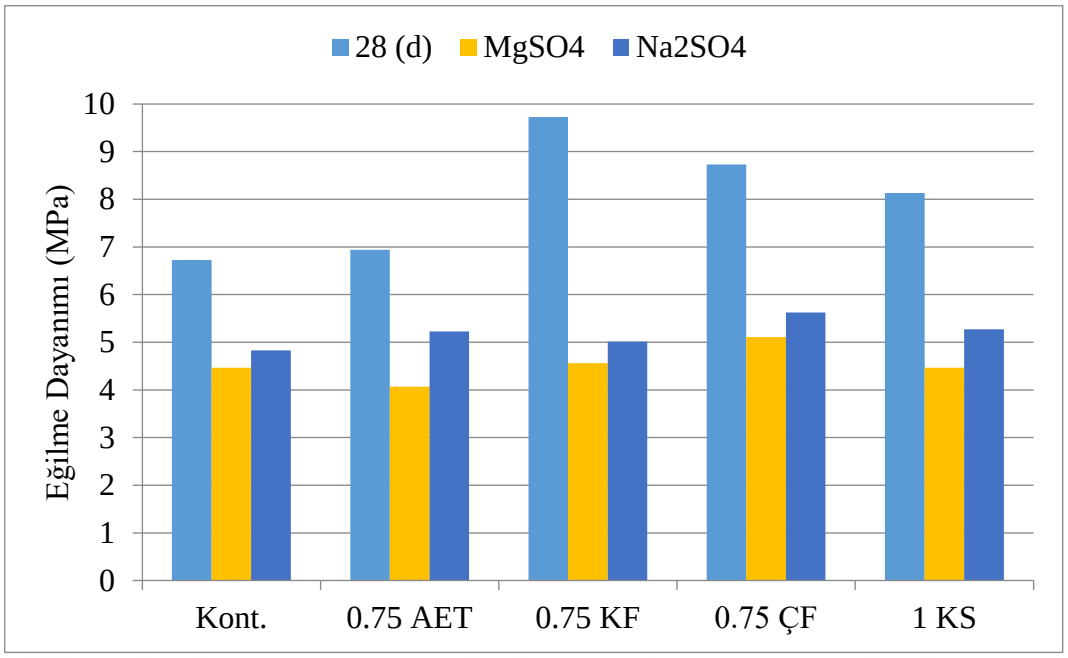
karşı stabil hale getirdiğini mekanik ve mikroyapı deneyleri ile belirlemişlerdir [73].



Şekil 3.4 Sülfat etkisinde basınç deneyi sonuçları

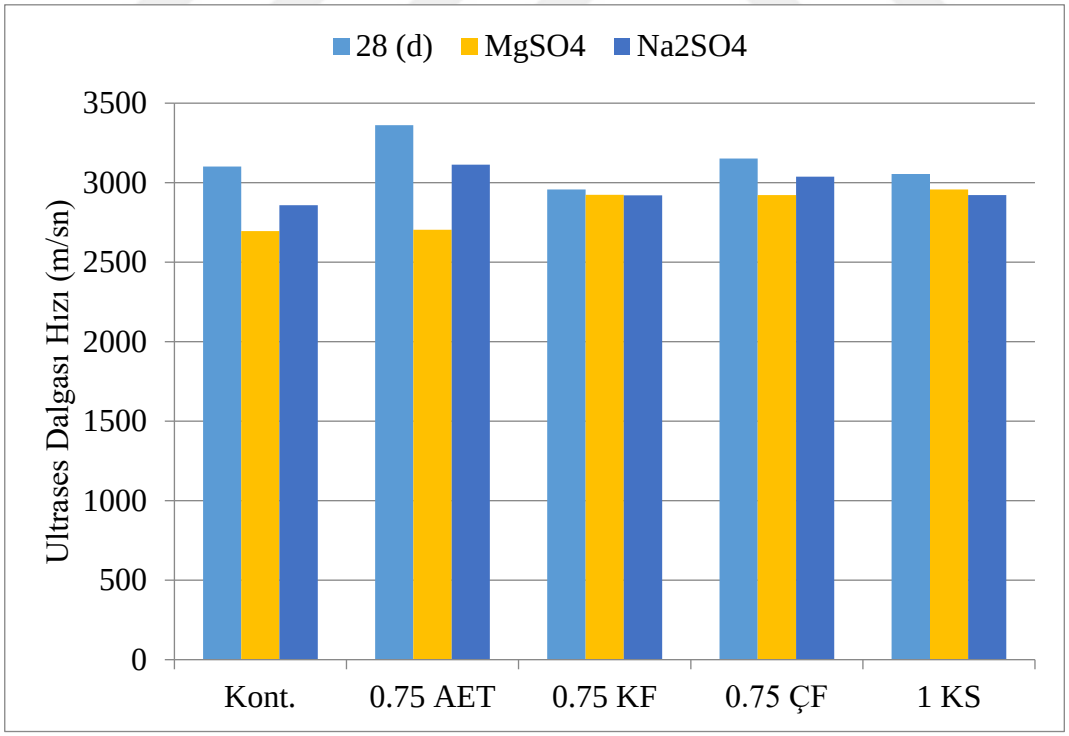
Sülfat etkisinde eğilme deneyi sonuçları Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Eğilme dayanımı değerleri basınç dayanımındaki oransal düşüşe benzer şekilde azalma göstermiştir. Elde edilen değerler ve dayanım kaybı oranları literatürdeki çalışmalarda elde edilen değerlere benzerdir. Sülfat etkisinde geopolimer harçlarda görülen dayanım kaybı alkalilerin çözeltiye geçişinden kaynaklanmaktadır. MgSO4 etkisi daha korozif yapıya sahip olduğu için Na2SO4 etkisine göre daha büyüktür [74]. Burada lif katkılı numunelerin benzer dayanım değerlerini vermesi, lif katkısının sülfat etkisinde etkin olmadığını dolayısıyla asıl etkenin harç fazı olduğunu göstermiştir. En yüksek değerler MgSO4 için 5,11 MPa ile Na2SO4 için 5,63 MPa olarak diğerlerine kıyasla 0,75 ÇF numunesinde elde edilmiştir.

Basınç ve eğilme dayanım sonuçları birlikte değerlendirildiğinde geopolimerlerin sülfata etkisine karşı yüksek direnç gösterdiği görülmüştür. Bu olgu, düşük CaO içeriği ile açıklanmaktadır [74].



Şekil 3.5 Sülfat etkisinde eğilme deneyi sonuçları

Sülfat etkisinde ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları Şekil 3,6'da gösterilmektedir. UPV test sonuçları mekanik deneylerle benzer değerler vermiştir. Sülfatların geopolimer harçlar üzerindeki etkisi lif katkısı ile değişmemiştir.



Şekil 3.6 Sülfat etkisinde ultrases geçiş hızı sonuçları

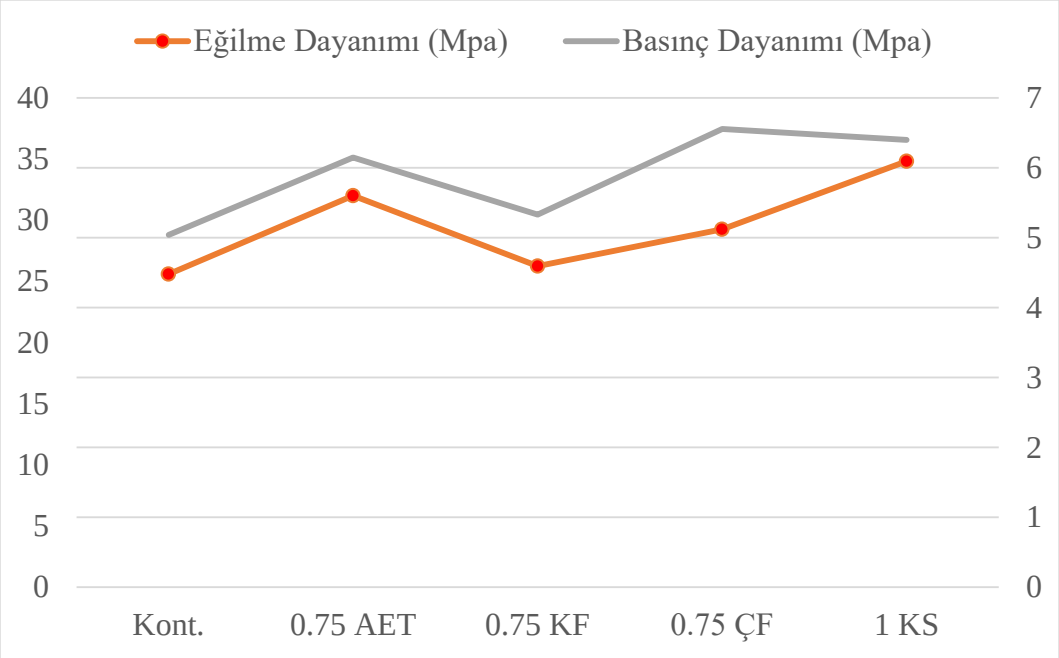
3.3 Donma-Çözülme Etkisi

Donma-çözme işlemi, iklimlendirme odasında 12 saat −20 °C'de ve 12 saat +20 °C'de tutarak bir döngü halinde gerçekleştirilmiştir. Toplamda 120 döngü tamamlanarak mekanik deneyler uygulanmıştır.

Geopolimer harçlarda sıcaklık seviyesi düşük olduğu durumlarda içlerinde bulunan kapiler boşlukların içlerinde bulunan sular donmaktadır. Sıcaklık değerleri yükseldiğinde ise kapiler boşluklarda donmuş olan bu sular çözülür. Kapiler boşluklarda yer almış olan sular donduğunda hacimsel olarak % 9 artacaktır. Suyun hacmi ile beraber boşluk hacimlerinde de artışlar gözlemlenmektedir. Bu donma–çözünme olayları sık tekrar ettikleri takdirde kapiler boşlukların hacimleri sürekli artma meydana gelir. Bu da betonlardaki boşluk miktarlarını arttırır ve betonların su geçirgenliklerinin arttırır. Bu olaylar betonların dayanımlarında ve dayanıklılıklarında azalmaya sebep olur [64].

Donma-çözülme etkisinde basınç ve eğilme dayanımı sonuçları Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Hem basınç hem de eğilme değerleri lif katkısı ile beraber artmıştır. Bu artış % 5-20 arasındadır. Basınç dayanımında en yüksek değeri 37,46 MPa olarak 0,75 ÇF göstermiştir. Eğilme dayanımında en yüksek değeri 6,09 MPa olarak 1,00 KS göstermiştir. Donma-çözülme etkisinde dayanımı belirleyen lif katkısı değil geopolimer harcın bileşimi ve elektrik kürü uygulaması olmuştur.

Puzolanik malzemeler sayesinde yoğun geopolimer kompozitlerin oluşumu ve donma-çözülme sırasında geopolimer ürünlerin üretiminin devam etmesi, dayanım artışının ana nedenleri olduğu literatürde belirtilmektedir [60]. Ayrıca, betonun donma-çözülme etkisi altında yüksek nem koşulları nedeniyle cüruf aktivasyonunun devam etmesiyle nihai mukavemetine ulaştığı belirtilmektedir [53].



Şekil 3.7 Donma-Çözülme etkisinde basınç ve eğilme deneyi sonuçları

3.4 Mikroyapısal Analiz

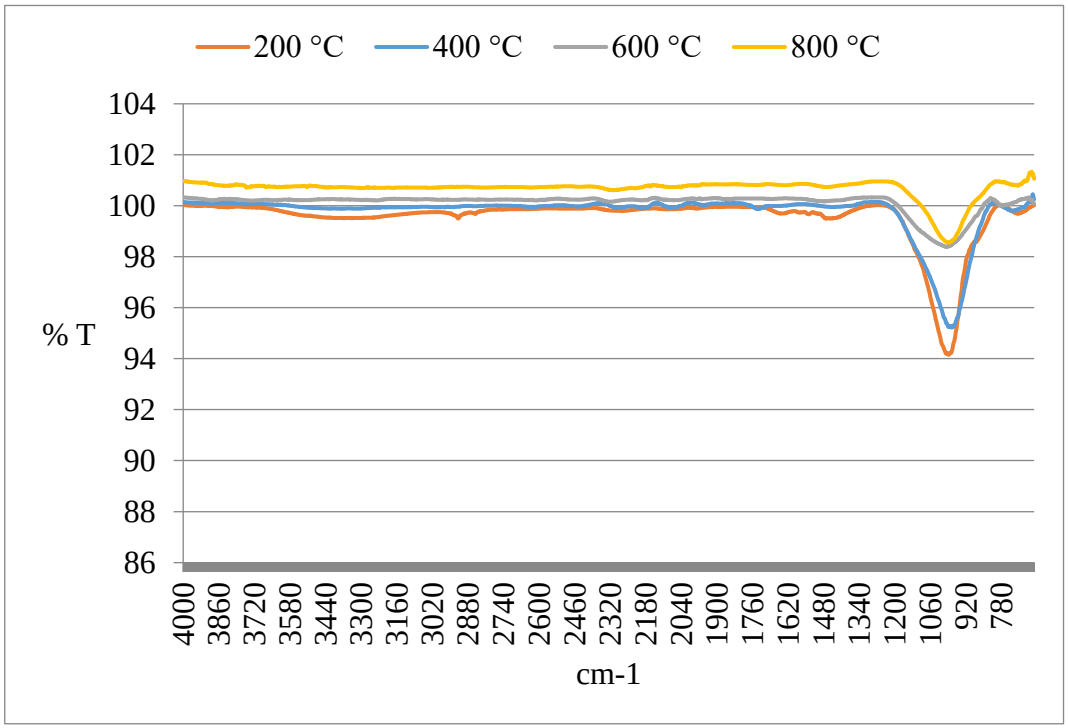
Lifli mekanik ve durabilite deney sonuçları göz önüne alınarak yüksek sıcaklık, sülfat etkisi ve donma-çözülme etkilerine maruz bırakılmış kontrol numunesi ile birlikte 0,75 AET numunesi üzerinde deneyleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış 0,75 KF numunesi de çalışmanın değerlendirmesini derinleştirmesi açısından mikroyapı testlerine tabi tutulmuştur.

3.4.1 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Mineraloji, geopolimer harçların sentezi için de önemlidir. Şekil 3.8 yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin, Şekil 3.9 sülfat etkisinde kontrol numunesinin, Şekil 3.10 yüksek sıcaklık etkisinde KF numunesinin, Şekil 3.11 yüksek sıcaklık etkisinde AET numunesinin, Şekil 3.12 sülfat etkisinde AET numunesinin, Perkin Elmer Spectrum 100 FT-IR spektrofotometresi ile 4 cm^{-1} spektral çözünürlükte 4000 ile 650 cm^{-1} arasında taranan durumlarını FT-IR spektrumlarını göstermektedir. Analize göre, seçilen liflerin eklenmesinin hiçbir etkisi olmamış ve farklı liflerin kullanılması polimerizasyon sürecinde önemli bir fark yaratmamıştır [34]. Literatüre göre, kil bazlı geopolimerler 990 $cm^{(-1)}$ ve 1200 $cm^{(-1)}$ civarında Si-O ve Al-O bağlarının asimetrik gerilme titreşimlerini gösteren dar bantlar sergiler. 1300-1400 $cm^{(-1)}$ aralığındaki bant, C-O bağlarının

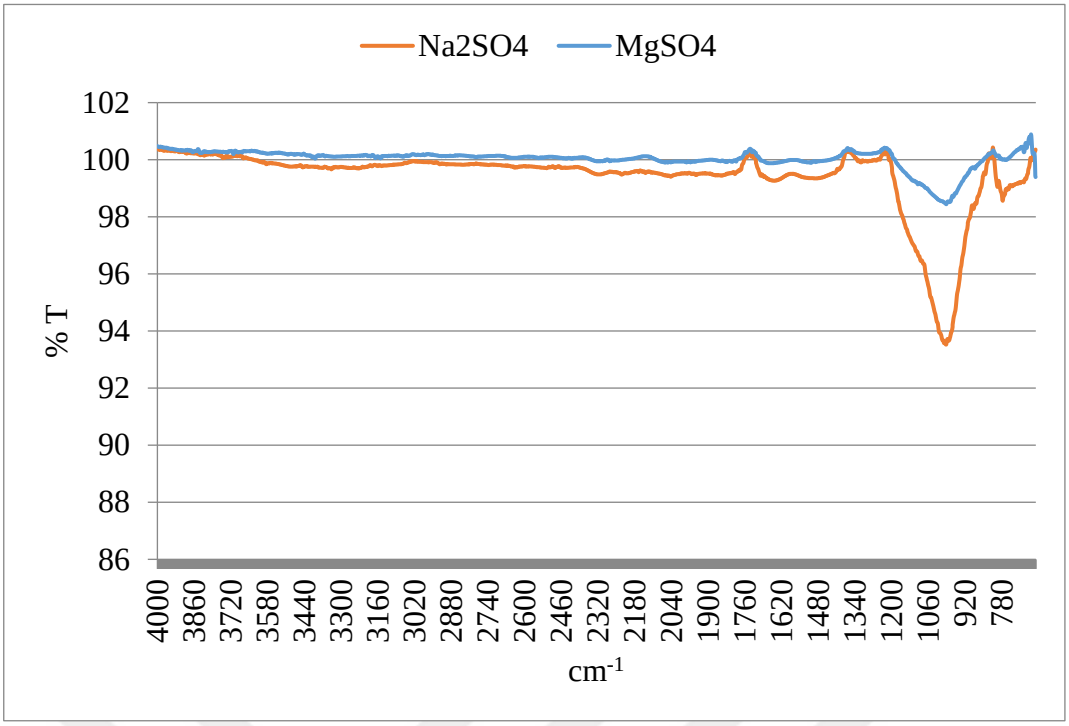
karakteristik özelliğiydi. 3500-4000 $cm^{(-1)}$ pikleri ve yaklaşık 1700 $cm^{(-1)}$, O-H bağlarının gerilmesiyle ilişkilendirilmiştir [21]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar önceki çalışmaları da doğrulamıştır [61, 62, 75].

Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış kontrol numunesinde oluştuğu gözlenen bağlar, hidrate silica jellerinin oluşmasını dolayısıyla geopolimerizasyonun elektrik kürü ile başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Literatürde de belirtildiği üzere bu miktarlar, uygulanan yüksek sıcaklık arttıkça azalmıştır. 990 $cm^{(-1)}$ ve 1200 $cm^{(-1)}$ arasında gösterilen C-S-H bağlarının azalması yüksek sıcaklıktan en çok etkilenmiştir [74].



Şekil 3.8 Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin FTIR analizi

Sülfat etkisinde kontrol numunesi, normal elektrik kürü ile kürlenen geopolimer numuneye kıyasla oluşan C-S-H ve O-T (Si/Al) gibi bağların miktarı azalmıştır. Literatürde verilen sonuçlarla aynı doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir [74].

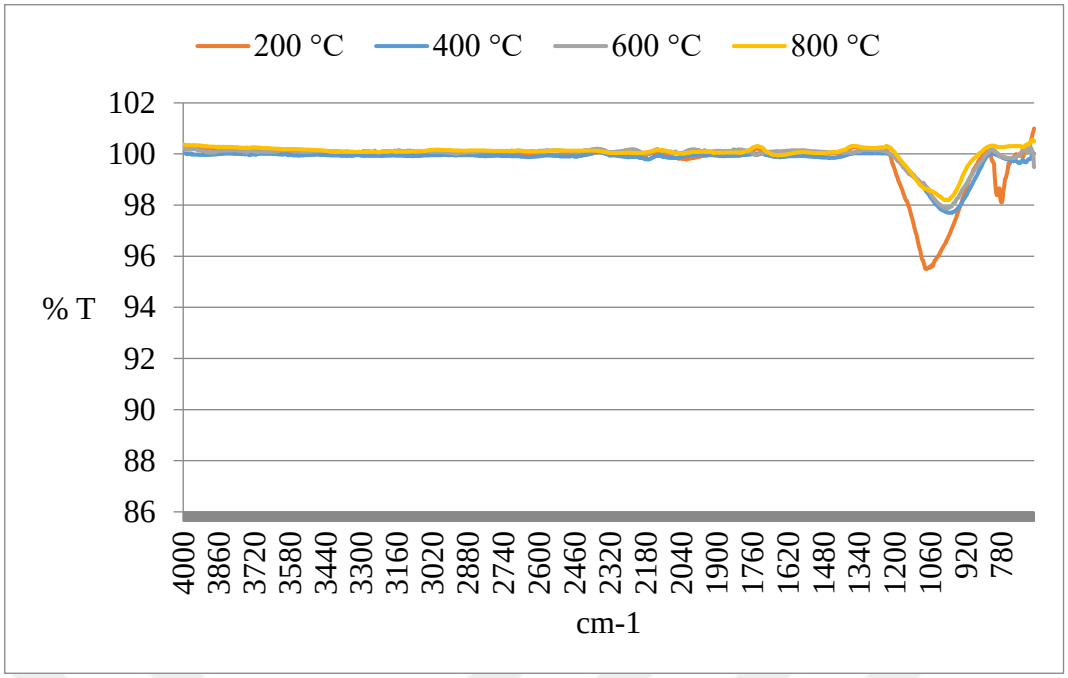


Şekil 3.9 Sülfat etkisinde kontrol numunesinin FTIR analizi

Yüksek sıcaklık etkisinde, 200 °C'ye maruz bırakılan KF numunesi yüksek sıcaklığa maruz etkisinde kontrol ve AET numunesine benzer grafiği göstermiştir. Ancak 400-800 °C'ye maruz bırakılan numunelerde, hem C-S-H bağlarını hem de O-C-O gibi diğer bağlarda bir miktar azalma görülmüştür [75]. 200 °C'den sonra gözlenen bu fark mekanik deneylerdeki sonuçları desteklemektedir.

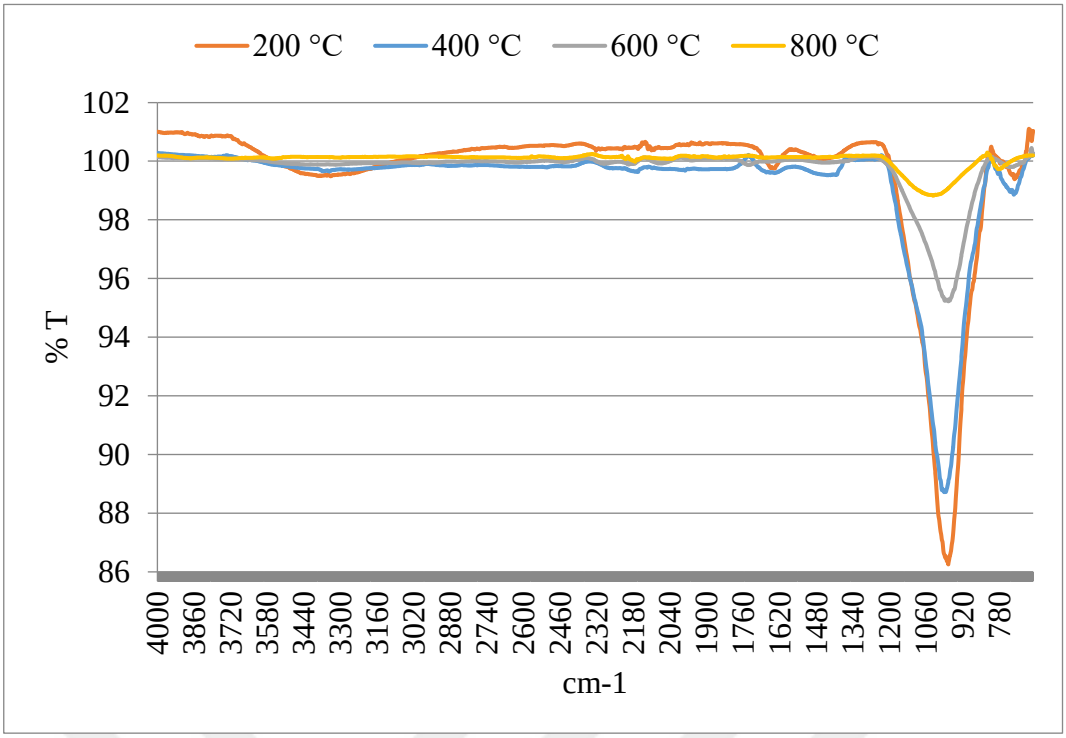
Ana asimetrik gerilme bandının hafif genişlemesi, fiziksel ve kimyasal olarak bağlanmış suyun yüksek sıcaklık etkisinde dehidrasyonunun neden olduğu yapısal değişikliklerle ilişkili olabileceği bildirilmiştir [76].

Ziada ve ark. üç farklı lif katkısını MK ve GYFC tabanlı geopolimer üretiminde kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde lif katkısından daha çok bağlayıcı malzemenin etkili olduğu ifade etmişlerdir [10].



Şekil 3.10 Yüksek sıcaklık etkisinde KF numunesinin FTIR analizi

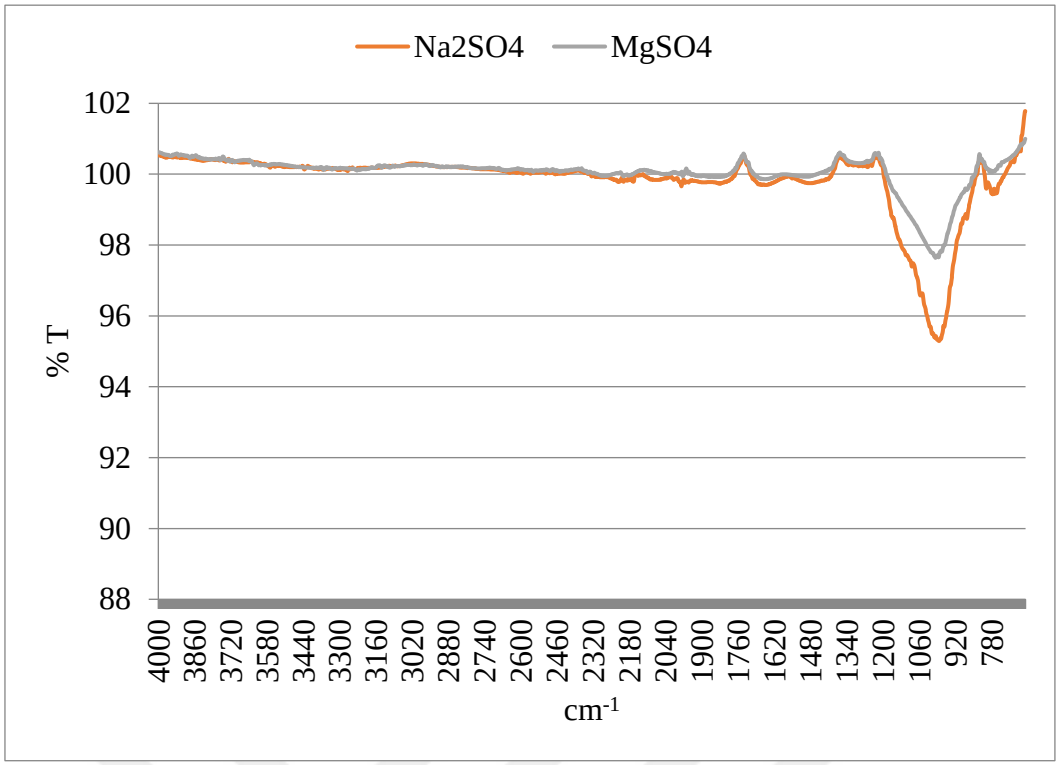
Yüksek sıcaklık etkisinde AET numunesi, 200 °C ve 400 °C'ye maruz bırakılan numunelerde kontrol ve AET numunelerine göre çok miktarda C-S-H ve Si-O gibi bağlar göstermiştir. Bu miktarlar, Şekil 2.11'de gösterilen doğrudan elektrik kürü ile kürlenmiş numunenin değerlerine yakındır. 600 °C ve 800 °C'ye maruz bırakılan numunelerde ise kontrol ve AET numunelerine benzer bir sonuç ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak mekanik deneylerde de olduğu gibi FTIR analizine göre yüksek sıcaklık etkisinde en iyi sonucu 0,75 AET katkılı numune sağlamıştır.



Şekil 3.11 Yüksek sıcaklık etkisinde AET numunesinin FTIR analizi

Asit saldırısından sonra, 1388–1452 cm^{-1}'deki bantların kaybolması meydana gelmesi M_2CO_3 ve $MHCO_3$ (M: Na veya K) formunda CO_3^{-2} 'ün karakteristik pikleri olarak tanımlanmıştır. Bu olayın sebebi, karbonatın asidik çözelti içinde çözünmesinden kaynaklanabileceği belirtilmiştir [8].

Sülfat etkisinde AET numunesi, normal elektrik kürü ile kürlenen geopolimer numuneye kıyasla oluşan C-S-H ve O-T (Si/Al) gibi bağların miktarı azalmıştır. Kontrol numunesine göre küçük miktarda bağların oluşmasında artış tespit edilmiştir. Literatürde verilen sonuçlarla aynı doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir [74].



Şekil 3.12 Sülfat etkisinde AET numunesinin FTIR analizi

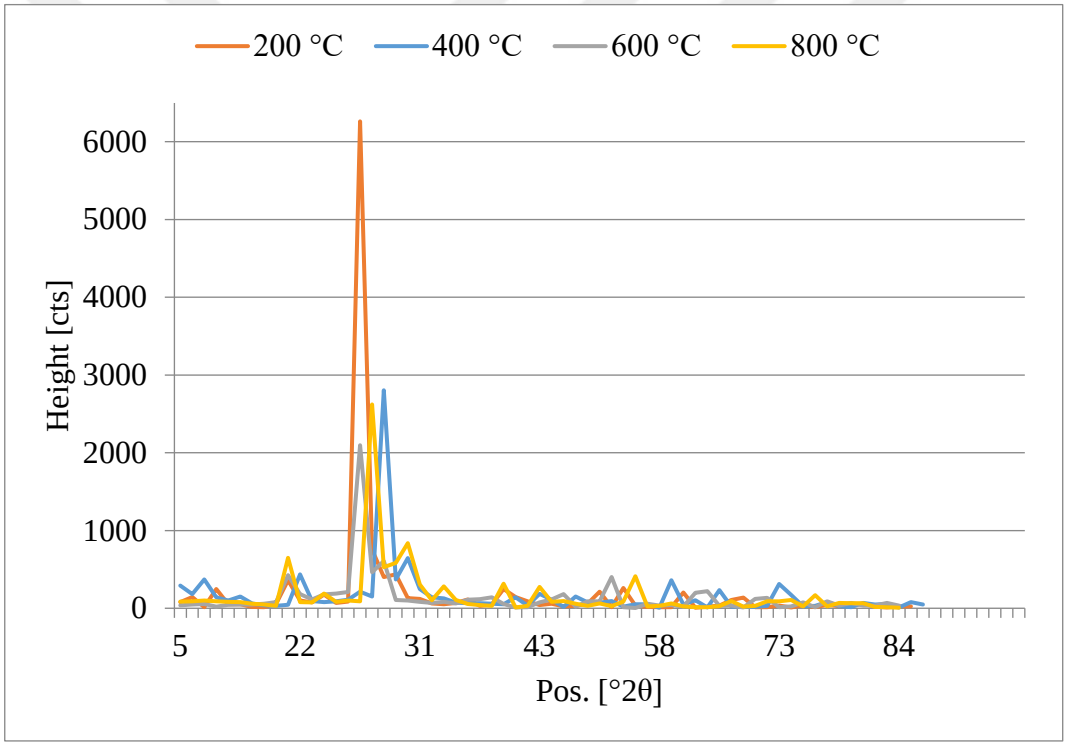
3.4.2 X Işını Kırınımı (XRD)

Kontrol ve lif katkılı geopolimer harçların durabilite deneylerindeki kimyasal bileşimlerinin XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Okumalar, Cu Kα radyasyon kaynağı (λ = 1,54059 Å) ile Malvern PANalytical Empyrean MultiCore difraktometresi kullanılarak elde edildi. Makine, Cu Kα radyasyon kaynağı için standart laboratuvar parametreleri olan 40 kV ve 40 mA sabit çalışma ayarında ayarlandı ve okumalar, 1°/dk tarama hızında 2° ile 120° arasında değişen 2θ değeri için alındı. Test numuneleri, teste gönderilmeden önce toz haline getirilmiştir.

Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin XRD desenleri Şekil 3.13'te, sülfat etkisinde kontrol numunesinin XRD desenleri Şekil 3.14'te, yüksek sıcaklık etkisinde KF numunesinin XRD desenleri Şekil 3.15'te, yüksek sıcaklık etkisinde AET numunesinin XRD desenleri Şekil 3.16'da ve sülfat etkisinde AET numunesinin XRD desenleri Şekil 3.17'de gösterilmektedir. XRD verileri analiz edildiğinde, tüm geopolimer harç numunelerinde kuvars pikleri bulunmuştur. Kuvars pikleri, 2θ aralığının ~22–35°'sinde daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Literatürde belirtildiği gibi, bu kuvars pikleri büyük ölçüde bağlayıcı malzemelerin yüksek kristal silika içeriğinden kaynaklanmaktadır [16, 35, 61]. MK-GYFC bazlı geopolimer harçların XRD modellerinde ~22–35° arasında 2θ

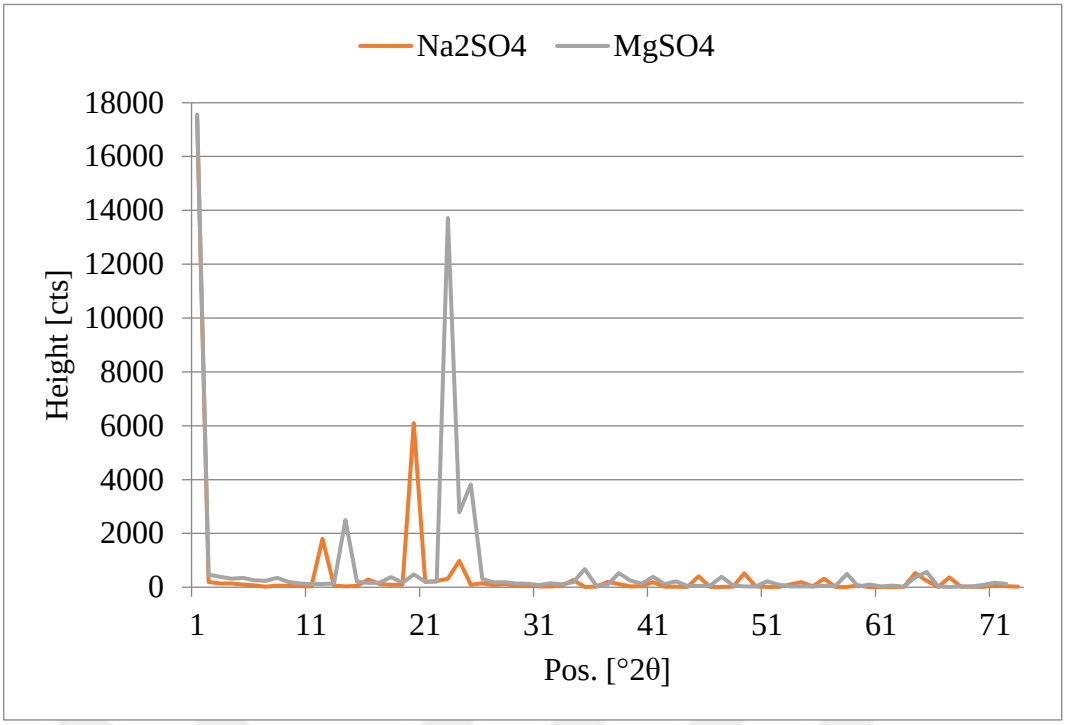
pikleri, etkili bir geopolimerizasyonu göstermektedir [35, 62]. Asit daldırma işleminden sonra, XRD desenlerinde kristal bileşenler (kuvars ve muskovit) veya amorf özellikler açısından önemli bir değişiklik görülmediği, sadece asit çözeltisinde çözünmeleri nedeniyle karbonat türlerinin kaybolduğu belirtilmiştir [8]. Na+ katyonlarının Si-O-Al yapısı ile uygun şekilde reaksiyona girdiğini ortaya koyulmuştur. Ayrıca, tüm numunelerde kristalize C S H'nin kalsit ile birlikte oluştuğu görülmektedir [61].

Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesi, mekanik deney sonuçlarına uygun şekilde 200 °C'ye maruz bırakılan numunede nispeten etkili sonuç vermiştir. 400-800 °C'ye maruz bırakılan numunelerde ise kimyasal yapının önemli miktarda bozulduğu gözlemlenmiştir.



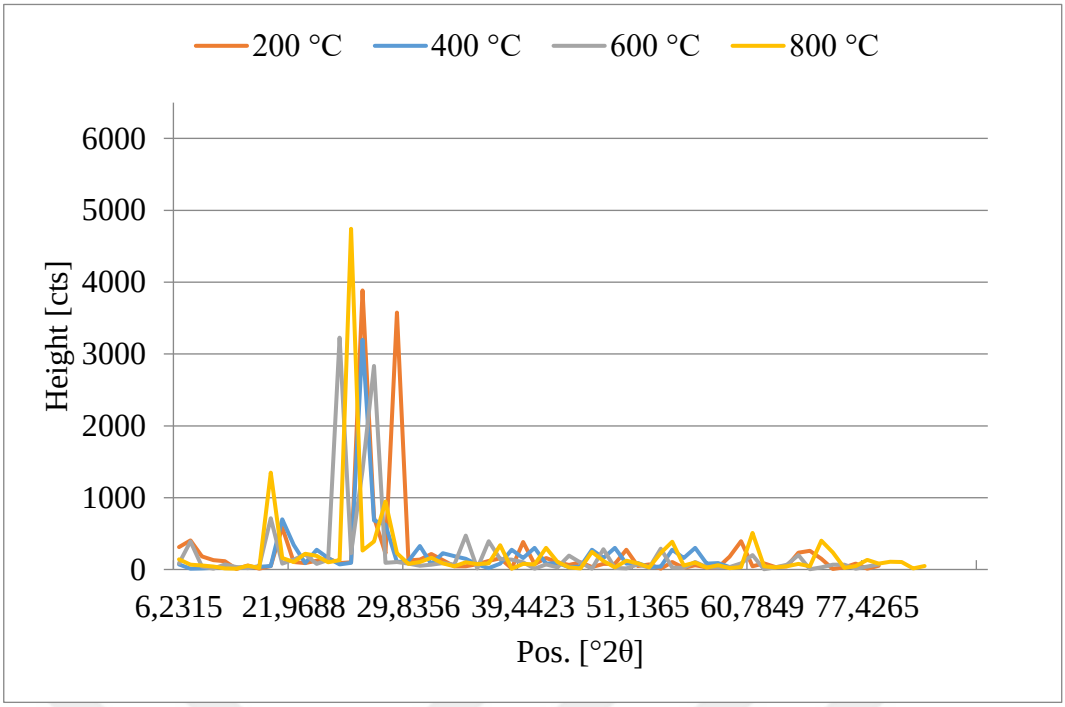
Şekil 3.13 Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin X-ışını difraksiyon desenleri

Sülfat etkisinde kontrol numunesi, Şekil 2.12'de gösterilen sonuçlara benzer grafik elde edilmiştir. Elde edilen bu grafik, literatürde belirtildiği üzere metakaolin tabanlı geopolimer harçların sülfat etkisine karşı üstün özelliğe sahip olduğunu göstermektedir [17].



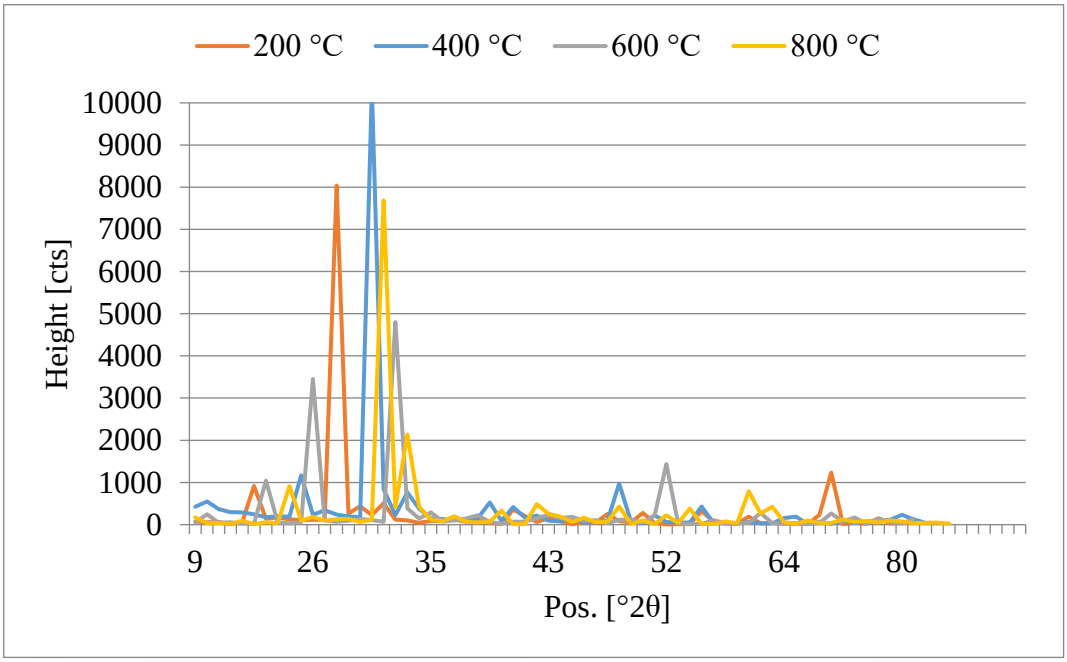
Şekil 3.14 Sülfat etkisinde kontrol numunesinin X-ışını difraksiyon desenleri

Yüksek sıcaklık etkisinde KF numunesi, yüksek sıcaklık etkisindeki kontrol numunesine benzer davranış göstermiştir. Bu olgu, her ne kadar mekanik deneylerde lif katkısının etkili olsa da yüksek sıcaklık etkisinde numunenin davranışı geopolimer matrisin kimyasal yapısına bağlıdır. Şekil 2.12'deki piklere benzer şekilde aynı aralıklarda desenler, oluşan deformasyondan dolayı miktarlarda azalma göstererek oluşmuştur. 20–30° arasında 2θ pikleri, Na+ katyonlarının Si-O-Al yapısı ile uygun şekilde reaksiyona girdiğini yani etkili bir geopolimerizasyonu göstermektedir. Ayrıca, tüm numunelerde kristalize C S H'nin kalsit ile birlikte oluştuğu görülmektedir [77].



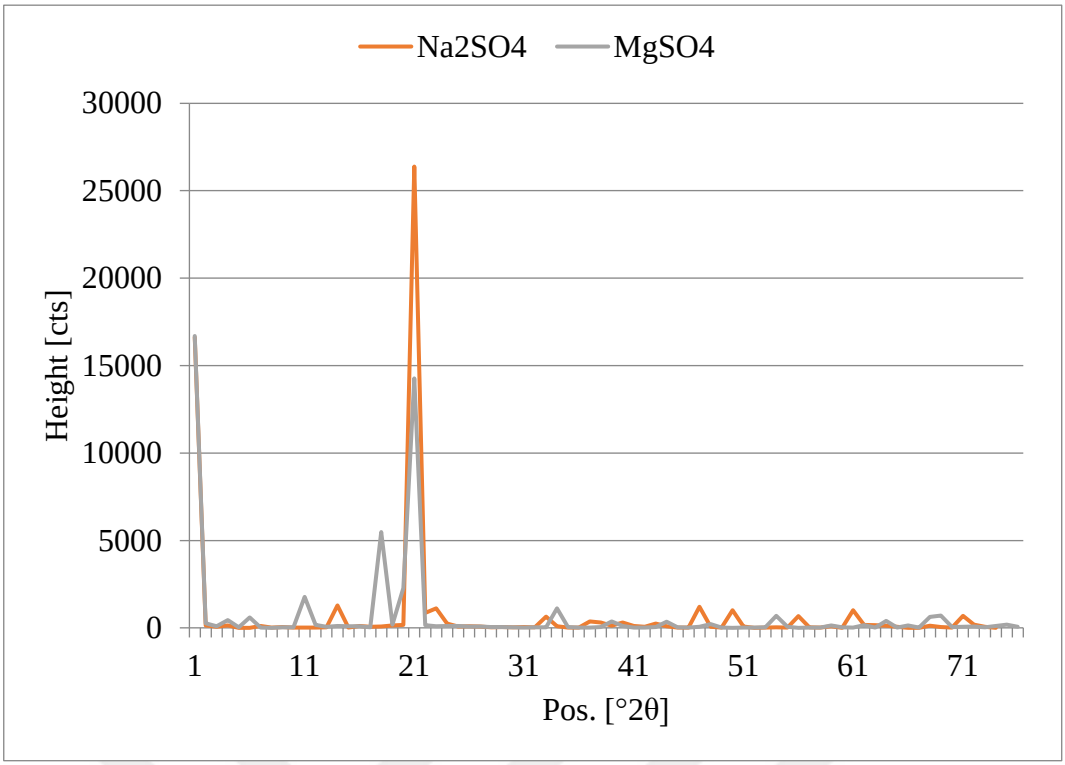
Şekil 3.15 Yüksek sıcaklık etkisinde KF numunesinin X-ışını difraksiyon desenleri

Yüksek sıcaklık etkisinde AET numunesi, yüksek sıcaklık etkisinde KF numunesinin aksine daha stabil kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç AET katkısının elektrik kürü uygulamasında geopolimerizasyonu geliştirdiğini göstermektedir. Bu sonuç mekanik deney sonuçları ile de örtüşmektedir.



Şekil 3.16 Yüksek sıcaklık etkisinde AET numunesinin X-ışını difraksiyon desenleri

Sülfat etkisinde AET numunesi, sülfat etkisinde kontrol numunesine benzer olarak oluşan deformasyonlar sonucunda Şekil 2.12'ye göre piklerde bir miktar azalma görülmüştür.



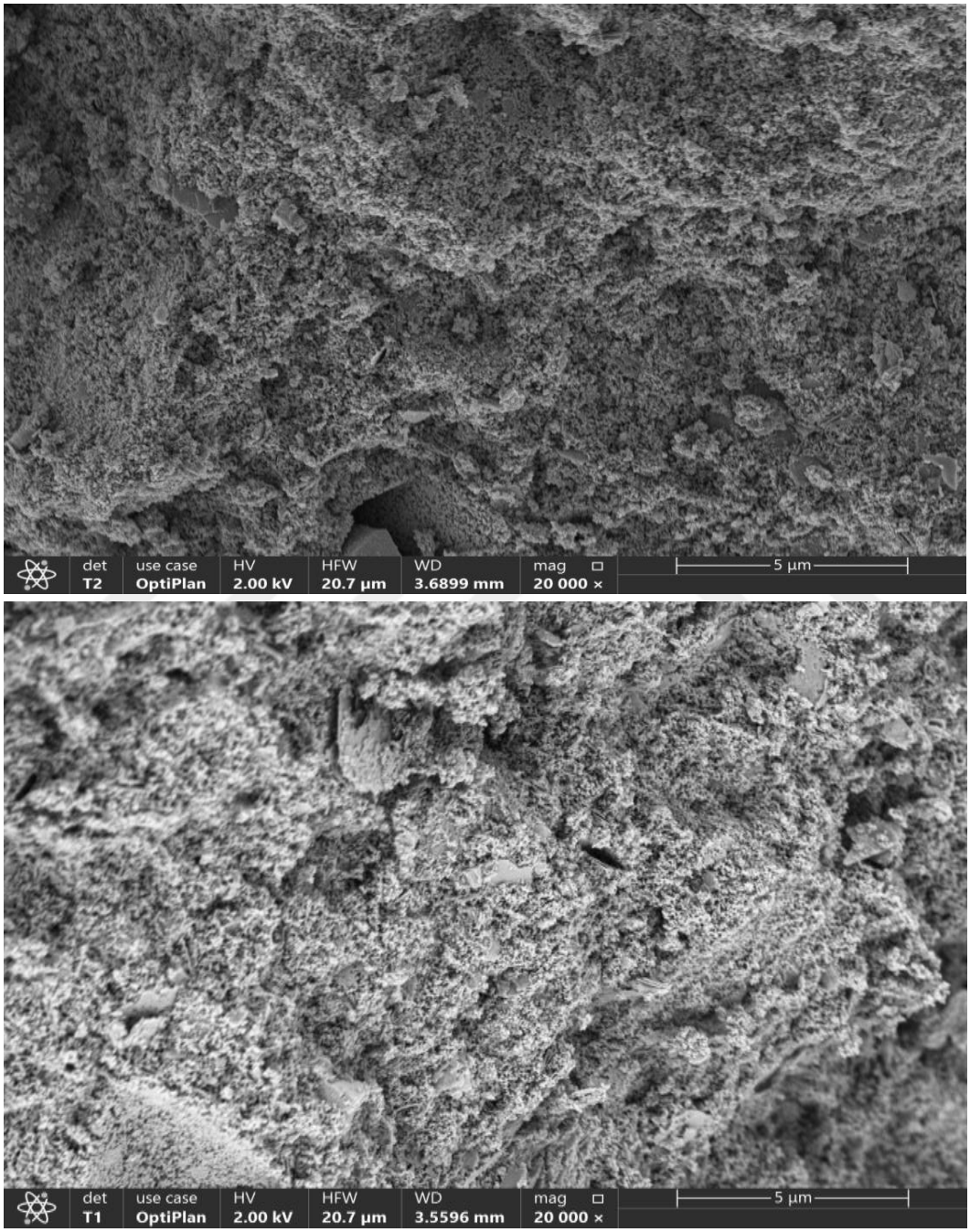
Şekil 3.17 Sülfat etkisinde AET numunesinin X-ışını difraksiyon desenleri

3.4.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

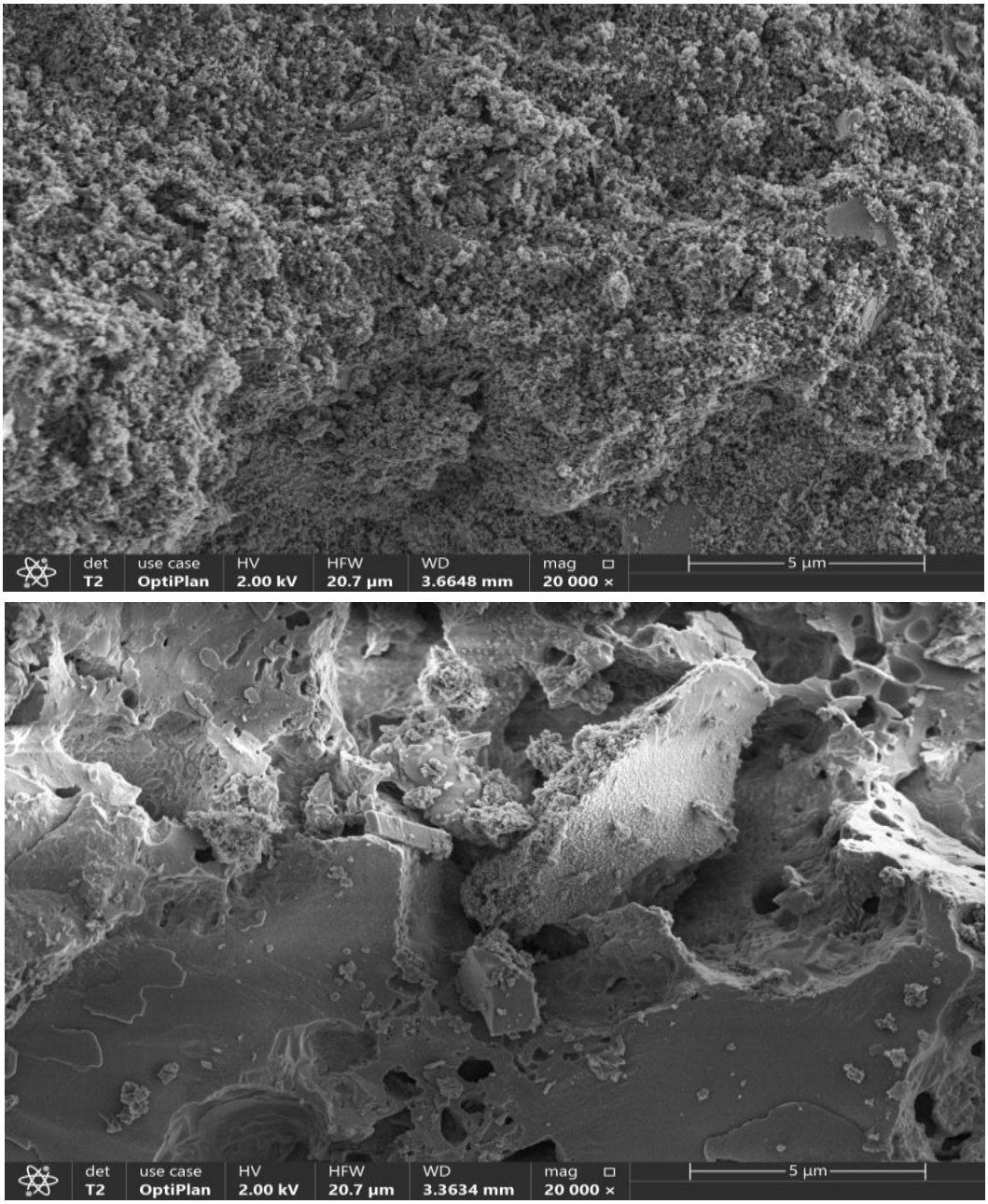
Üretilen takviyeli geopolimer harçların mikro yapısını analiz etmek ve matris ile lifler arasındaki bağlanmayı incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. Görüntüleme öncesinde, basınç dayanımı testinden sonra 28 günlük numunelerin kırık yüzeylerinden küçük miktarlar alınmış, 24 saat boyunca etüvde kurutulmuş, iletken karbon bant kullanılarak alüminyum saplamalara monte edilmiş ve şarjı önlemek ve temiz görüntülemeyi sağlamak için ince (~10 nm) altın kaplama ile püskürtülmüştür. Numunelerin yüzey mikro yapısı Zeiss EVO LS 10 modeli kullanılarak incelenmiştir. Analiz, 9-10 mm çalışma mesafesi ile 10,00 kV hızlanma voltajında gerçekleştirildi. Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesi için 28 günlükken Şekil 3.18'de, yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 AET numunesi için Şekil 3.19'da, sülfat etkisinde 0,75 KF numunesi için Şekil 3.20'de, yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 AET numunesi için Şekil 3.21'de ve sülfat etkisinde numunesi için Şekil 3.22'de çeşitli büyütme oranlarındaki mikrografları gösterilmektedir. Sonuç olarak, tüm numunelerin MK ve GYFC'nin verimli geopolimerizasyonunu gösteren yoğun bir mikro yapı sergilediği belirlenmiştir. SEM görüntüleri, başarılı mikro yapısal gelişim ve sağlam kürlemeyi gösteren net ve düzgün organize edilmiş bir geopolimerik

matris ortaya koyarken, sonuçlar mekanik özellikler, XRD ve FTIR testleri ile uyumlu olarak reaksiyon prosedürünün tutarlı bir resmini ortaya koymuştur.

Şekil 3.18'de 20000 büyütmede elektrik kürü uygulanmış kontrol numunesinin 200 °C'de normal SEM ile aynı görüntüyü sağlamaktadır. 400 °C itibarıyle boşlukların artması doğal olarak görülmektedir. 800 °C altında numune yapısı bariz bir şekilde boşluk ve çatlaklardan oluşmuştur.

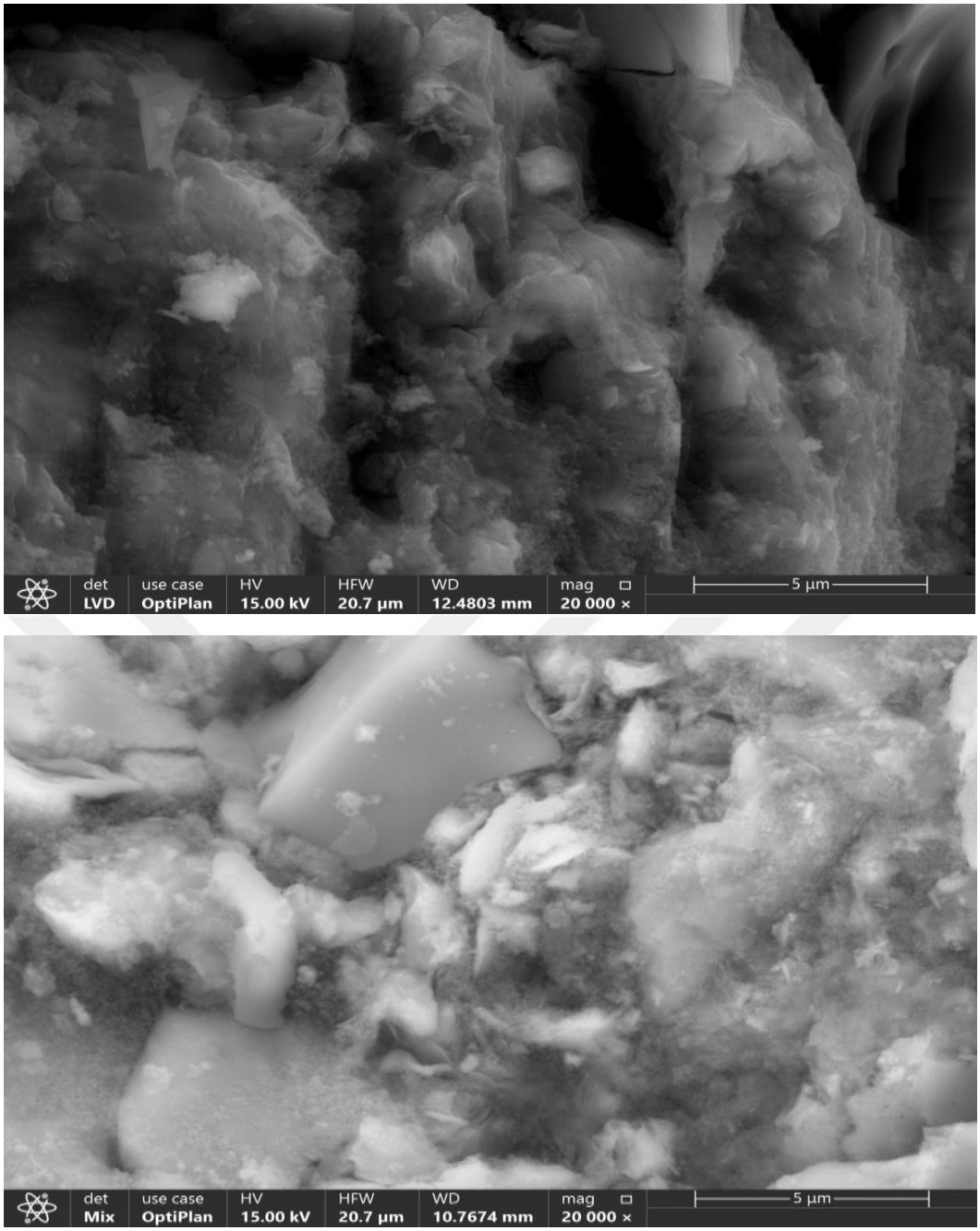


Şekil 3.18 Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin SEM görüntüleri (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C

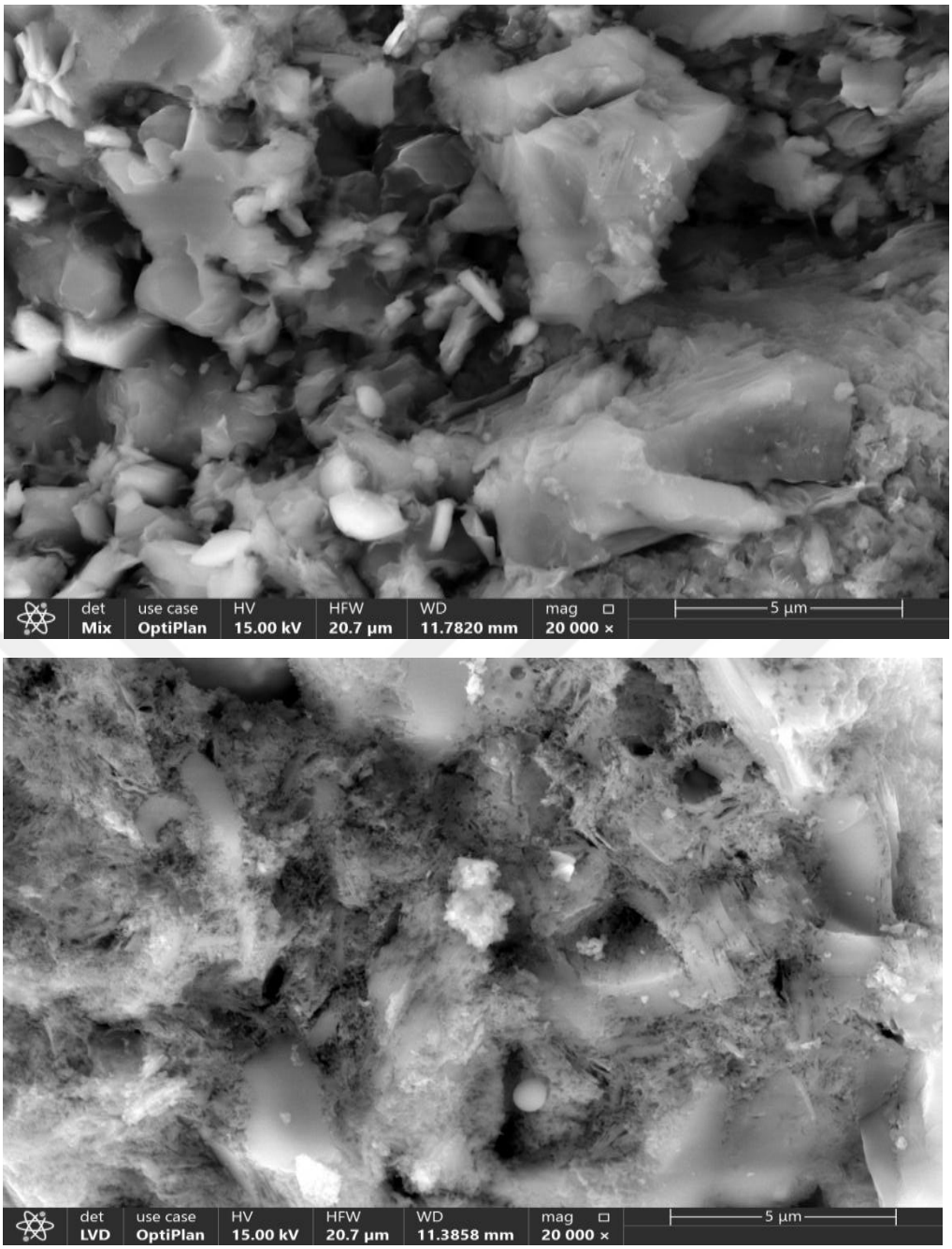


Şekil 3.18 Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin SEM görüntüleri (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C

Şekil 3.19'da 20000 büyütmede elektrik kürü uygulanmış yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 AET numunesinin görüntülerinde lifli numunenin yapısında 400°C ve üzerinde boşluk oluşumu ve bozulma başlamıştır, 800°C' de ise tamamen bozularak kontrol numunesi görüntüsü elde edilmiştir.

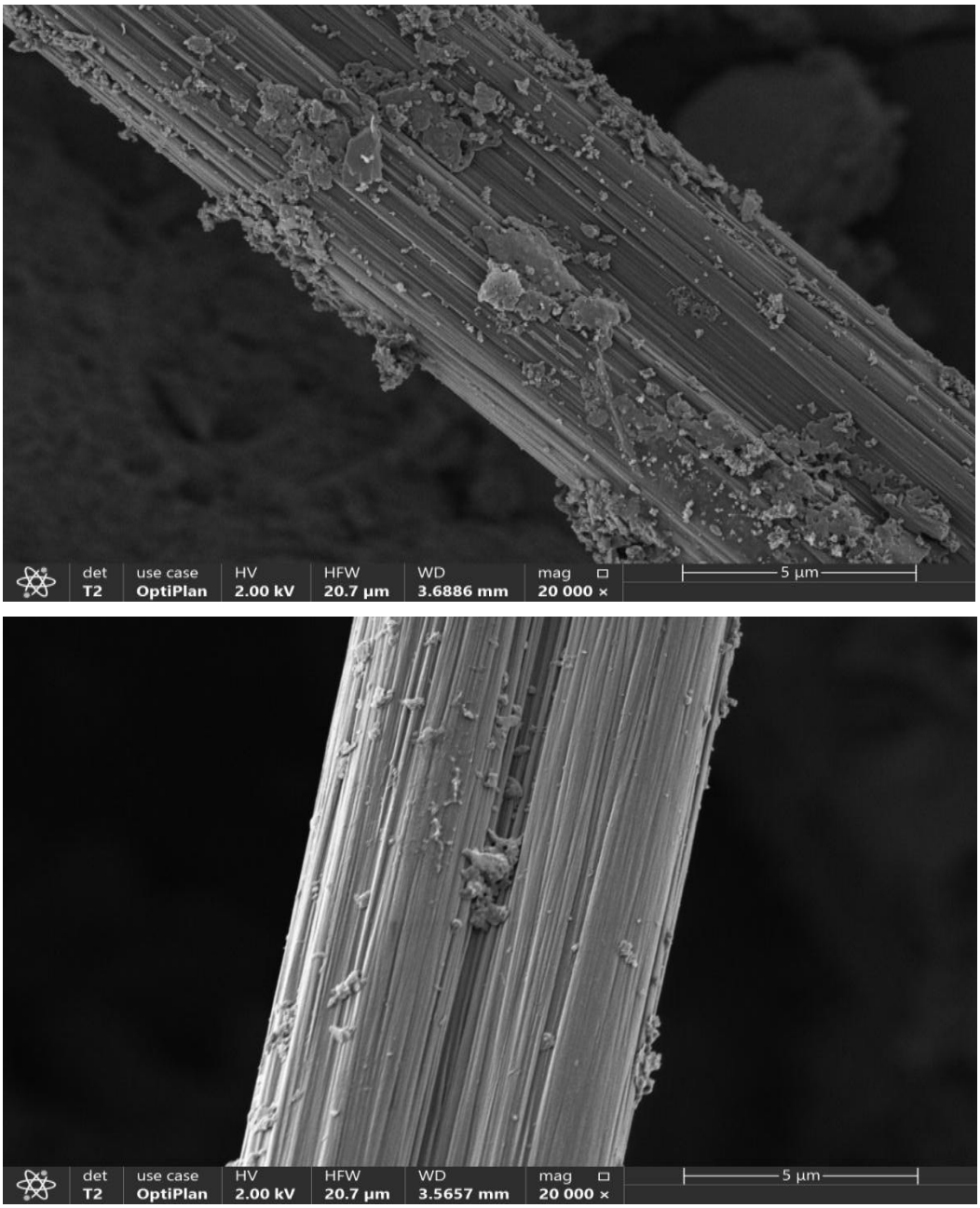


Şekil 3.19 Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 AET numunesinin SEM görüntüleri (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C

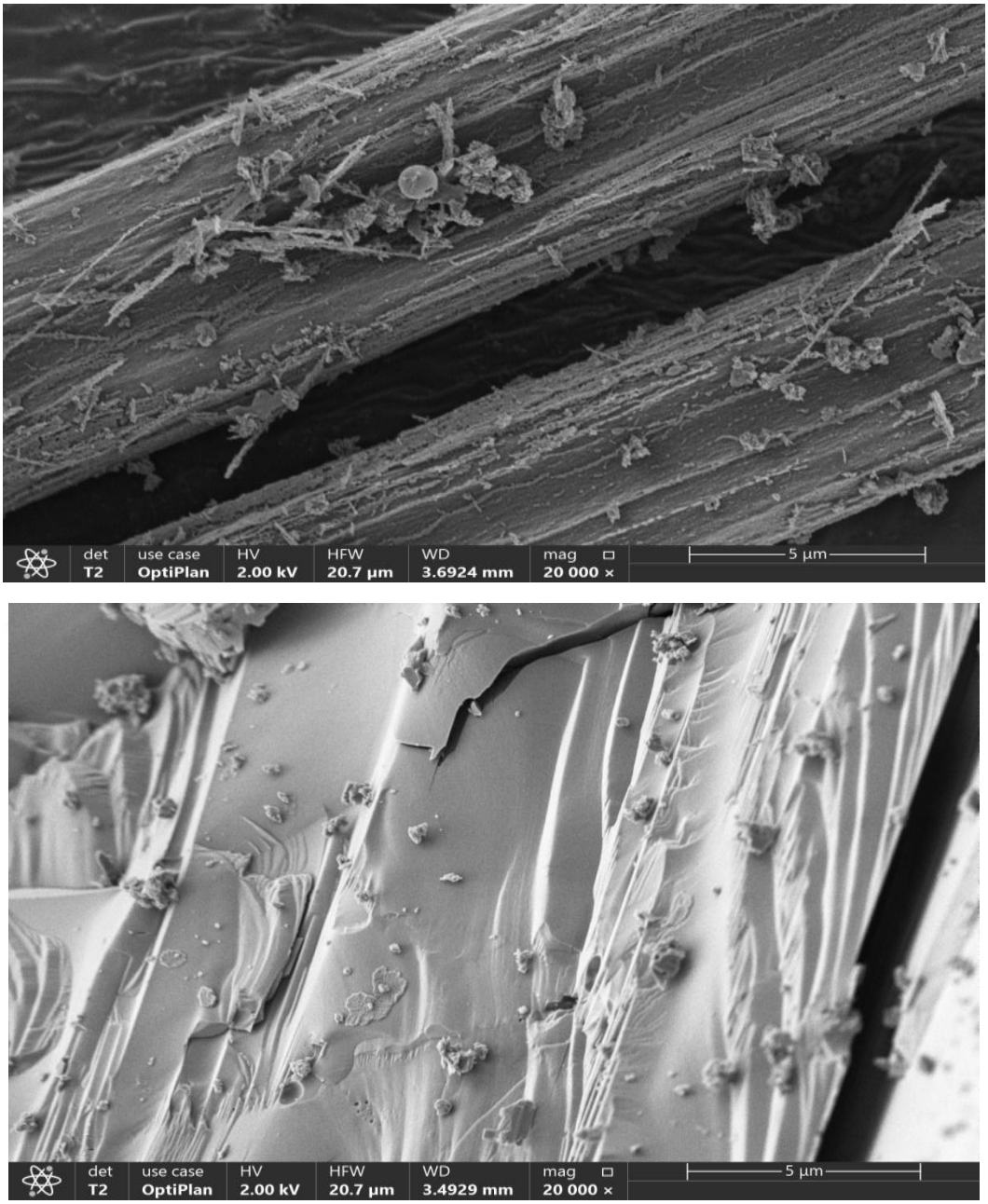


Şekil 3.19 Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 AET numunesinin SEM görüntüleri (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C

Şekil 3.20'de 20000 büyütmede elektrik kürü uygulanmış yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 KF numunesinin görüntülerinde lifli numunenin yapısında 400°C ve üzerinde çatlak oluşumu ve bozulma başlamıştır, 800°C' de ise tamamen bozularak kontrol numunesi görüntüsü elde edilmiştir.

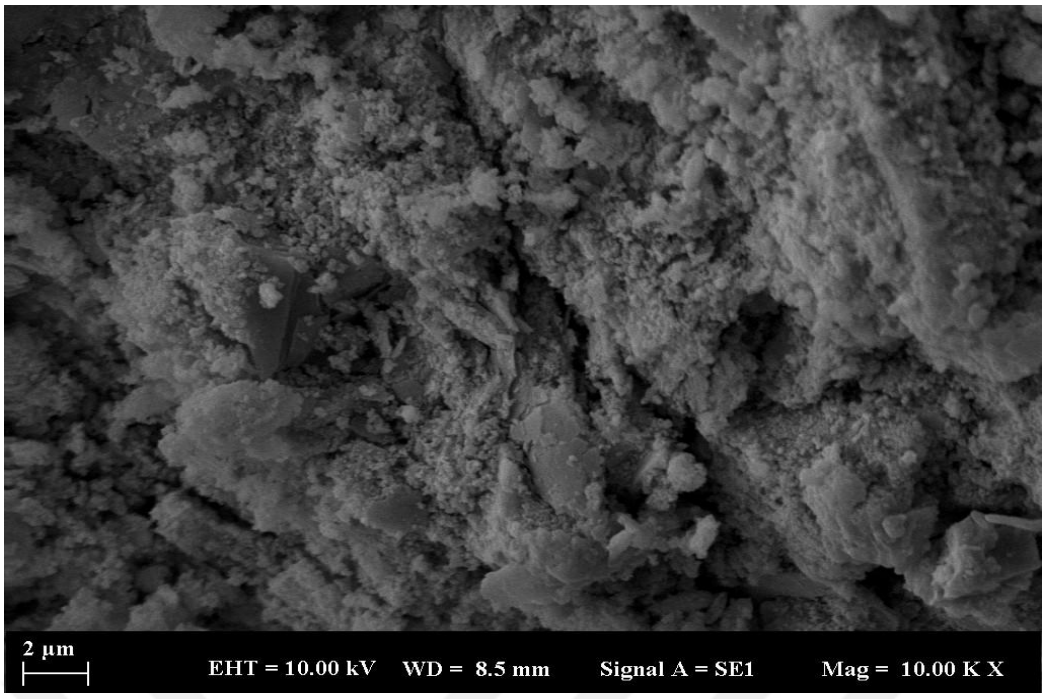


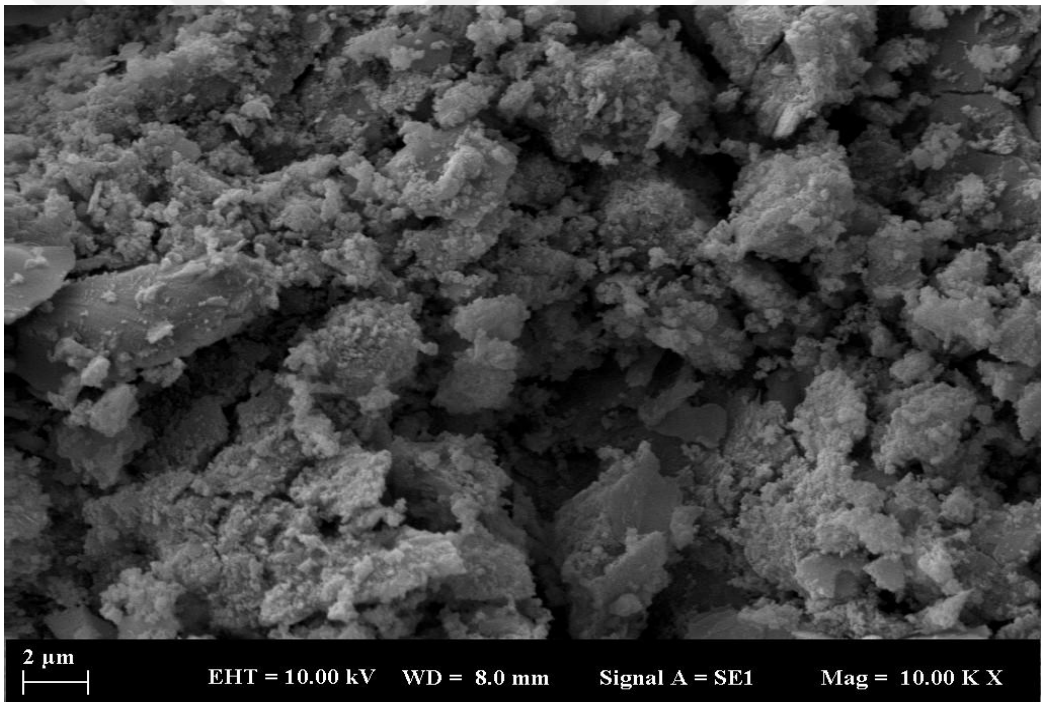
Şekil 3.20 Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 KF numunesinin SEM görüntüleri (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C



Şekil 3.20 Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 KF numunesinin SEM görüntüleri (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C ve (d) 800°C

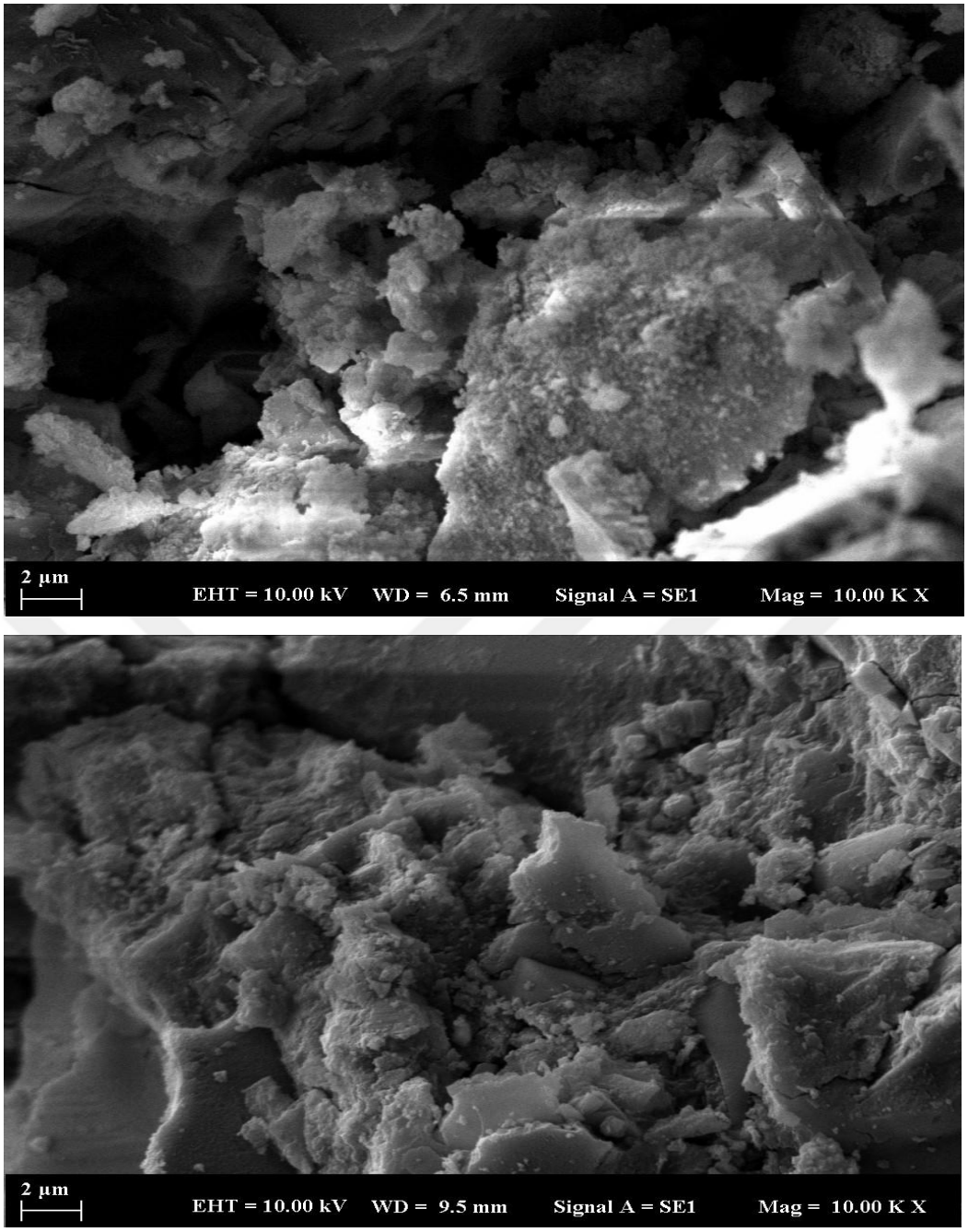
Şekil 3.21'de 10000-büyütmede elektrik kürü uygulanmış kontrol numunesi hem Na_2SO_4 hem de $MgSO_4$ etkisinde boşluk oluşumu ve bozulma görüntüsü oluşmuştur.





Şekil 3.21 Sülfat etkisinde kontrol numunesinin SEM görüntüleri (a) Na_2SO_4 ve (b) $MgSO_4$

Şekil 3.22'de 10000 büyütmede elektrik kürü uygulanmış 0,75 AET numunesi hem Na_2SO_4 hem de $MgSO_4$ etkisinde boşluk oluşumu ve bozulma görüntüsü oluşmuştur.



Şekil 3.22 Sülfat etkisinde 0,75 AET numunesinin SEM görüntüleri (a) Na_2SO_4 ve (b) $MgSO_4$

3.4.4 Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS)

Durabilite etkilerine maruz kalmış kontrol, 0,75 KF ve 0,75 AET mikro dolgu (KS) takviyeleri için EDS çizgi taraması gerçekleştirilmiştir. Analiz, 10,00 kV hızlanma voltajında ve 1000 büyüklüğünde Thermo Scientific Apreo 2S LoVac modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.2 yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin, Tablo 3.3 sülfat etkisinde kontrol numunesinin, Tablo 3.4 yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 KF numunesinin, Tablo 3.5 yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 AET numunesinin, Tablo 3.6 sülfat etkisinde 0,75 AET

numunesinin, EDS sonuçlarını göstermektedir. EDS spektrumu, diğer mikroyapısal testler gibi numunelerin kimyasal bileşimini ve aralarındaki farkları göstermektedir. GYFC varlığında C-A-S-H jellerle birlikte N-A-S-H jellerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Al, C ve Na'dan sonra ana elementlerden biri olarak belirlenmiştir. Ca ilavesinin N-A-S-H'nin sıvı ortama karşı direncini düşürdüğü ve yoğun bir yapıya sahip jel tabakasına dönüşmesini engellediği belirtilmiştir. Bu nedenle, jel yapısı sıvı ortamda sürekli olarak bozulmaktadır [59]. Sodium matris içerisindeki reaksiyona girmemiş aktivatör moleküllerinin bir sonucu olma ihtimali yüksek olarak değerlendirilmektedir. Genel olarak Si/Al oranı tatmin edici seviyededir. Bu sonuçlar literatür ile uyumludur [64]. Metal elementler genellikle elyaf ilaveli numunelerde tespit edilmiştir. SEM ve EDS analizleri, mekanik sonuçlarla genel olarak tutarlıdır. Lahoti ve ark. 600 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda yüksek Si/Al oranının mikro çatlakların iyileşmesine ve matrisin yoğunlaşmasına ve bu sayede mekanik özelliklere katkı sağladığını bildirmişlerdir [76].

Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesi Si/Al oranı tüm sıcaklıklarda yaklaşık 2 olarak hesaplanmıştır. Literature göre yüksek kabul edilen bu oran geopolimerizasyonun elektrik kürü uygulanabildiğini göstermiştir. Aynı zamanda mekanik deney sonuçları ile birlikte hazırlanan geopolimerlerin yüksek sıcaklık etkisinde yüksek performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.2 Yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesinin EDS analizi

Kontrol	**200°C**	**400°C**	**600°C**	**800°C**
N	1,4	1,3	0,9	1,3
P	0,7	0,5	0,6	0,6
S	0,1	0	0,2	0,1
C	5,3	2,3	2	2,4
O	53,2	50,1	51,4	50,2
Na	14	7,5	5,1	5,6
Mg	0,4	0,6	1	0,7
Al	7,3	11,1	7,2	10,2
Si	13,7	21	29,1	20,8
K	0,2	0,5	0,9	0,6
Ca	3,7	5,2	1,6	7,5

Sülfat etkisinde kontrol numunesi, yüksek Ca içeriğine sahip GM'lerin matrislerindeki kalsiyum ürünleri, Na2SO4 ve MgSO4 ile reaksiyona girerek yeni bir alçıtaşı fazının oluşmasına ve dolayısıyla C-A-S-H jellerinin ayrılmasına neden olmuştur. XRD ve SEM analizleri sonucunda C–A–S–H ayrışmasıyla oluşan Ca ve Na2SO4 gözlemlenmiştir [70].

Tablo 3.3 Sülfat etkisinde kontrol numunesinin EDS analizi

Kontrol	**Na_2SO_4**	**$MgSO_4$**
O	39,86	38,38
Na	4,28	9,72
Al	14,09	11,09
Si	21,42	19,57
Nb	8,39	8,1
Pd	7,77	6,68
Ca	4,19	6,17
Mg	0	0,28
Cl	0	0

Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 KF numunesi, yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesine benzer şekilde Si/Al oranı tüm sıcaklıklarda yaklaşık 2 olarak hesaplanmıştır. Literature göre yüksek kabul edilen bu oran geopolimerizasyonun etkili bir şekilde oluştuğunu göstermektedir.

Tablo 3.4 Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 KF numunesinin EDS analizi

KF	**200°C**	**400°C**	**600°C**	**800°C**
N	10,4	2,6	2,7	1,4
P	1,1	0,5	0,7	0,7
S	0	0,1	0,1	0,1
C	67,8	31,7	21	2,2
O	13	38,8	38,2	49,4
Na	1,1	4,5	2,8	7
Mg	0,1	0,3	0,2	0,6
Al	1,3	6,6	4,1	11,4
Si	4,6	12,1	7,8	20,9
K	0,2	0,3	0,1	0,9
Ca	0,4	2,3	22,4	5,4

Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 AET numunesi, yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesine benzer şekilde Si/Al oranı tüm sıcaklıklarda yaklaşık 2 olarak hesaplanmıştır. Literature göre yüksek kabul edilen bu oran geopolimerizasyonun etkili bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

Tablo 3.5 Yüksek sıcaklık etkisinde 0,75 AET numunesinin EDS analizi

AET	**200°C**	**400°C**	**600°C**	**800°C**
C	7,1	6,4	6,5	3,4
O	50,8	53	48,4	48,8
Na	4,9	5,8	4,1	5,9
Mg	1,8	0,6	0,7	0,9
Al	8,2	9,1	5,9	10,4
Si	17,5	18,2	16	22,4
K	0,5	0,4	0	1
Ca	5,1	5,1	11	5,9
Fe	4,1	1,3	6,5	1,3

Sülfat etkisinde 0,75 AET numunesi, kontrol numunesine benzer dağılım göstermektedir. Elde edilen EDS sonuçları diğer mikroyapı deneylerine uygun olarak oluşan C-S-H ve N-S-H ürünlerini göstermektedir.

Tablo 3.6 Sülfat etkisinde 0,75 AET numunesinin EDS analizi

AET	**Na_2SO_4**	**$MgSO_4$**
Ca	0,76	7,44
O	30,57	44,06
Na	1,8	4,17
Al	3,37	10,69
Si	42,76	21,47
Au	10,12	0
Pd	10,61	4,67
Mg	0	3,28
Nb	0	4,22
W	0	0
MoL	0	0

4
SONUÇ

Bu çalışma, farklı iletken lifler ve dolgu maddeleri içeren MK-GYFC bazlı geopolimer harçların fiziksel, mekanik, mikroyapısal ve çevresel performansı üzerinde elektriksel kürlemenin etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmıştır ve makaleden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1- Elektriksel kürleme verimliliği: Hızlı elektriksel kürleme, geleneksel termal kürleme yerine hızlandırılmış geopolimerizasyonu kolaylaştırarak MK-GYFC geopolimer harçlarını laboratuvar sınıfı deneysel yapıştırıcıdan sahada kullanılabilir, yüksek performanslı betona verimli bir şekilde dönüştürmüştür.

2- Termal kürleme ile karşılaştırılabilir dayanım: Etüv kürü en yüksek basınç dayanımını sağlarken (14 M NaOH ve 1,25 B/A'da 25MK–75GYFC için 79,81 MPa), 20 V'ta elektriksel olarak kürlenen GYFC ağırlıklı karışımlar 72,18 MPa'ya ulaşarak elektriksel kürlemenin geleneksel yöntemlere yakın dayanımı elde etme kabiliyetini doğrulamıştır.

3- Gerilim etkisi: Kürleme gerilimlerinin 10 V'tan 20 V'a yükseltilmesi, tüm aktivatör molariteleri ve B/A oranları için önemli bir dayanım artışı sağladı.

4- Aktivatör konsantrasyonu: Elektro-kürleme için optimal NaOH içeriği 10 M ile 14 M arasında değişmiştir ve bu aralıkta uygun Na^+ mevcudiyeti, reaksiyon kinetiğinin hızlanmasını sağlamıştır.

5- Bağlayıcı/aktivatör oranı: Daha yüksek B/A oranları (1,25–1,40), daha yüksek öncü konsantrasyonu ile basınç dayanımının artmasına neden olmuş, ancak işlenebilirliğin azalmasına yol açmıştır. Bu da, işlenebilir uygulamalar için bir uzlaşma gerekli olduğunu göstermektedir.

6- GYFC'nin rolü: Cüruf bakımından zengin sistemler, CaO'nun elektrik alanları altında daha kompakt C–A–S–H/N–A–S–H jellerini teşvik etmesi sonucunda, MK bakımından zengin karışımlara kıyasla dayanımı ve iletkenliklerini belirgin şekilde artırmıştır.

7- Gözeneklilik ve su emme eğilimleri: KF ve AET lifleri, özellikle daha yüksek dozajlarda su emilimini ve gözenekliliği artırdı. % 1–2 KS, mikro dolgu maddesi etkisiyle gözenekliliği azalttı, ancak % 3 KS aglomerasyona ve boşluk içeriğinin artmasına neden oldu.

8- UPV'ler bu gözeneklilik değişikliklerini göstererek, daha yoğun karışımlar için daha düşük hız ve düşük KS içeriği için daha yüksek hız sergilemiş ve ultrasonik darbe hızının matris sıkışıklığına duyarlı olduğunu kanıtlamıştır.

9-Aşınma davranışı: AET için gözeneklilik arttıkça aşınma direnci azalırken, ÇF daha ince ucu ve daha az bozucu ağ yapısı sayesinde orta derecede başarı elde etti.

10- Lifler aracılığıyla mekanik güçlendirme: Lifle güçlendirilmiş tüm karışımlar, kontrol grubuyla karşılaştırıldığında daha yüksek basınç, eğilme ve çekme dayanımı gösterdi. AET, özellikle % 0,50 oranında, en yüksek basınç dayanımını (7 günde 88,30 MPa) sağladı ve bu, en yüksek tepe akımına (26,8 A) karşılık gelmiştir.

11- Eğilme ve çekme dayanımında iyileşmeler: ÇF ve KS, çatlak köprüleme kabiliyetleri ve matris yoğunlaşması sayesinde eğilme ve çekme dayanımında önemli iyileşmeler sergilemiştir.

12- Dozaj optimizasyonu: Makul dozajlar (% 0,50 AET, % 0,75 ÇF, % 1 KS) iletkenlik ve mekanik sağlamlık arasında optimum dengeyi sağladı. Yüksek lif ilaveleri, gözenekliliğin artmasına ve akım iletiminin artmasıyla performansın düşmesine neden olmuştur.

13- SEM mikrografları, elektro-kürlenmiş numunelerde yoğun ve iyi yapılandırılmış matrisler gösterirken, sürekli jel fazlarının gelişimi ve boşlukların azaldığı mikro yapı, mikro yapının elektrik alanları tarafından verimli bir şekilde geliştirildiğini göstermiştir.

14- FTIR spektrumları, tipik Si–O–T bantları (≈990–1000 cm^{-1}) ve C–O bantları (1300–1400 cm^{-1}) göstererek geopolimerizasyon reaksiyonlarını kanıtladı.

15- XRD desenleri, geopolimer jellerin karakteristik özelliği olan geniş amorf tümseklerin yanı sıra, geopolimerik jel çökelmesini ve tesadüfi karbonatlaşmayı gösteren kalsitin kristal fazlarını sergilemiştir.

16- EDS, cüruf bakımından zengin sistemlerde Na, Al, Si, Ca ve Fe'nin eşit dağılımını doğruladı ve N–A–S–H ve C–A–S–H jellerinin bir arada varlığını destekledi. EDS, faz tanımlama aracı olarak işlev göremese de, eğilimi XRD ve FT-IR sonuçlarıyla iyi bir korelasyon göstermiştir.

17- Lif iletkenliğinin rolü: İletken lifler süzülme yolları olarak işlev görerek kürleme verimliliğini artırdı. Özellikle, AET kararlı akım yolları oluşturarak reaksiyon hızlarını hızlandırdı ve matris kapanmasının yoğunlaşmasını teşvik etti.

18- HD Yöntemi değerlendirmesi: Her bir parametreye eşit ağırlık atayan HD Yöntemi analizi, her bir katkı maddesinin optimum bileşimi olarak % 0,50 KF, % 0,75 ÇF, % 0,75 AET ve % 1 KS'nin seçilmesiyle sonuçlanmıştır. Bunlar arasında en iyisi % 0,75 AET idi ve 11 özelliğin 8'inde kontrolü aştı, gözeneklilik parametreleri ise tek göreceli zayıflık noktasıydı.

19- Çok kriterli karar avantajı: HD Yöntemi, çelişkili performans kriterleri arasında iyi bir denge kurarak, her bir kategoride en üstte yer almayan ancak genel olarak en iyi performansı sağlayan optimum karışımların optimizasyonunu sağlamıştır.

20- LCA, 10 V elektrikle kürlemenin çevresel açıdan en iyi performansı sağladığını kanıtladı; enerji talebini 8000 kWh/m³'den (etüv) 1440 kWh/m³'ye (kontrol) ve CO_2 emisyonlarını 4000 kg/m³'den 720 kg/m³'ye, yani % 80'e kadar düşürdü. Seriden, 10 V'da 0,25–0,50 KF ve ÇF tüm etki kategorileri için en dengeli profilleri sunarken, 10 V'da AET, artan enerji tüketimine (≈10 800–12 800 kWh/m³) rağmen atık değerlendirme açısından puan aldı. Buna karşılık, 0,50 AET gibi yüksek iletkenliğe sahip karışımların 20 V'da kürlenmesi, 25 728 kWh/m³ enerji kullanımı ve 12 864 kg CO_2/m³ ile en yüksek yükü oluşturarak, birkaç kategoride etüv kürünü geride bırakmıştır.

21- Düşük kalsiyumlu veya kalsiyum içermeyen geopolimer harçlar, N-A-S-H jelinin yüksek kimyasal stabilitesi ve genişlemeyle ilişkili kristal fazların oluşumunu engelleyen kalsiyumun bulunmaması nedeniyle magnezyum sülfat saldırısına karşı sodium silikat etkisinde çok daha dirençli davranış göstermiştir.

22- Sülfat etkisi deneylerinde GYFC oranının % 50 gibi yüksek seviyede olması mekanik sonuçları negatif etkilemiştir. CaO içeriğinin düşürülmesi durabilite açısından olumlu olacağı düşünülmektedir.

İletken katkı maddeleri ile birlikte elektrikle kürleme, saha benzeri koşullarda yüksek dayanımılı geopolimer harçların kolayca üretilmesini mümkün kılar; bu harçlar, termal olarak daha az tercih edilen ancak operasyonel olarak daha cazip bir alternatif sunar. Bu yaklaşım, sürdürülebilir inşaat hedefleriyle yakından uyumludur, özellikle enerji talebini azaltır ve endüstriyel AET'nin geopolimerlere dönüşümünü teşvik ederken, aynı zamanda döngüsel ekonomi girişimlerini

destekler. Gözeneklilikle ilgili parametreleri uyarlayarak ve bunları tüm LCA çalışmalarında eşit olarak ayarlayarak, bu tür sistemlerin çevresel profilini iyileştirmek de mümkündür. Gelecekteki çalışmalarda, birbirine bağlı kriterleri ve veri çeşitliliğini sistematik olarak ele almak için Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve bulanık kapsam metodolojileri gibi sofistike MCDM metodolojileri kullanarak geleneksel tek veya çift parametreli çerçeve kapasitesini aşmaya yönelik çabalar önerilmektedir. AHP, karmaşık kararların hiyerarşik olarak ayrıştırılmasına ve değişen özelliklerin göreceli öneminin net bir şekilde nicelendirilmesine izin verirken, bulanık kapsam metodolojileri belirsizlik, geçiş durumu ve performansın ince farklarını ele almakta ustadır. Metodolojilerin kullanılması, geopolimer karışımının tasarımı için daha uyarlanabilir, akıllı ve bağlamsal bir karar destek aracı sağlamaya yardımcı olur ve bu da saha koşullarında gerçekleştirilen takip çalışmalarının hem bilimsel derinliğini hem de saha uygulamalarına uygulanabilirliğini artırır.

KAYNAKÇA

[1] H. Dilbas, and Ö. Çakır, "Physical and Mechanical Properties of Treated Recycled Aggregate Concretes-Combination of Mechanical Treatment and Silica Fume" J. Mater. Civ. Eng., 2021, 33, 04021096. DOI: (ASCE)MT.1943-5533.0003658.

[2] A. Kabirova, M. Husem and H. Dilbas, "Metakaolin-Based and Blast Furnace Slag-Activated Geopolymer Cement with Waste Powders" Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng. 2023, 47, 891–907. DOI: s40996-022-00954-2.

[3] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta and E. Gartner, "Cement and carbon emissions" Mater. Struct. 2014, 47 1055–1065. DOI: s11527-013-0114-5.

[4] H. Dan, Z. Ma, M. Li, S. Ma and J. Tan, "Early performance and bonding mechanism of metakaolin (MK)- ground granulated blast furnace slag (GGBS) based geopolymer road repair mortar" Int. J. Pavement Eng. 2023 24, 2252156. DOI: 10298436.2023.2252156.

[5] Y.M. Liew, H. Kamarudin, A.M.M. Al Bakri, M. Luqman, I.K. Nizar, C.M. Ruzaidi and C.Y. Heah, "Processing and characterization of calcined kaolin cement powder" Constr. Build. Mater. 2012, 30, 794–802. DOI: j.conbuildmat.2011.12.079.

[6] P. Payakaniti, S. Pinitsoontorn, P. Thongbai, V. Amornkitbamrung and P. Chindaprasirt, "Electrical conductivity and compressive strength of carbon fiber reinforced fly ash geopolymeric composites" Constr. Build. Mater. 2017, 135, 164–176. DOI: j.conbuildmat.2016.12.198.

[7] R.A.S. Ribeiro, M.G.S. Ribeiro and W.M. Kriven, "A review of particle- and fiber-reinforced metakaolin-based geopolymer composites" J. Ceram. Sci. Technol. 2017, 8, 307–322. DOI: 10.4416/JCST2017-00048.

[8] K. Bouguermouh, N. Bouzidi, L. Mahtout, L. Pérez-Villarejo ve M. L. Martínez-Cartas, "Effect of acid attack on microstructure and composition of metakaolin-based geopolymers: The role of alkaline activator" Journal of Non-Crystalline Solids 2017. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.03.011

[9] V. Sata, A. Sathonsaowaphak, P. Chindaprasirt, "Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack" Cem. & Conc. Comp. 2012. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010

[10] M. Ziada, S. Erdem, R.A. Gonzalez-Lezcano, Y. Tammam ve İ. Unkar, "Influence of various fibers on the physico-mechanical properties of a sustainable geopolymer mortar-based on metakaolin and slag" Engineering Science and Technology an International Journal 2023. DOI: 10.1016/j.jestch.2023.101501

[11] V.S. Sujitha , S. Raja, Maher Ali Rusho, Simon Yishak, “Advances and developments in high strength geopolymer concrete for sustainable construction – A review” Case Studies in Construction Materials, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04669

[12] F. Sahin, M. Uysal, O. Canpolat, “Systematic evaluation of the aggregate types and properties on metakaolin based geopolymer composites” Cons. and Buil. Mat. 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122414

[13] J.J. Brooks, “Dimensional stability and cracking processes in concrete” Durability of Concrete and Cement Composites 2007 Woodhead Publishing Limited

[14] D.D.B. Nergis, M.M.A.B. Abdullah, P. Vizureanu and M.F.M. Tahir, “Geopolymers and their uses: Review” IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2018, 374, 012019. DOI: 1757-899X/374/1/012019.

[15] J. Cai, J. Pan, X. Li, J. Tan and J. Li, “Electrical resistivity of fly ash and metakaolin based geopolymers” Constr. Build. Mater. 2020, 234, 117868. DOI: j.conbuildmat.2019.117868.

[16] G.F. Huseien, J. Mirza, M. Ismail, S.K. Ghoshal and M.A.M. Ariffin, “Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar” Ain Shams Eng. J. 2018, 9, 1557–1566. DOI: j.asej.2016.11.011.

[17] S.W.M. Supit, M. Olivia, “Compressive strength and sulfate resistance of metakaolin-based geopolymer mortar with different ratio of alkaline activator” Mat. Today: Proc. 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.06.514

[18] A.M. Owaid, B.H. Al-Abbas, N.F. Jabbar, H.M. Owaid, “Comprehensive mechanical, durability, and microstructural assessment of lightweight GGBS–metakaolin geopolymer concrete incorporating LECA” Con. and Buil. Mat., 2026. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144961

[19] X. Wang, W. Wang, Q. Liu, S. Wang, H. Luo, S. Ji, J. Zhu, “Effects of metakaolin on sulfate and sulfuric acid resistance of grouting restoration materials” Cons. and Bui. Mat. 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128714

[20] K.Z. Farhan, M.A.M. Johari and R. Demirboga, “Assessment of important parameters involved in synthesizing geopolymer composites: A review” Constr. Build. Mater. 2020, 264, 120276. DOI: j.conbuildmat.2020.120276.

[21] J. Cai, X. Li, J. Tan and B. Vandevyvere, “Fly ash-based geopolymer with self-heating capacity for accelerated curing” J. Clean. Prod. 2020, 261, 121119. DOI: j.jclepro.2020.121119.

[22] C.Y. Heah, H. Kamarudin, A.M.M. Al Bakri, M. Binhussain, M. Luqman, I.K. Nizar, C.M. Ruzaidi and Y.M. Liew, “Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers” Phys. Procedia 2011, 22, 305–311. DOI: j.phpro.2011.11.048.

[23] L. Yun-Ming, H. Cheng-Yong, M.M. Al Bakri and K. Hussin, “Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review” Prog. Mater. Sci. 2016, 83, 595–629. DOI: j.pmatsci.2016.08.002.

[24] I. Heritage, Direct electric curing of mortar and concrete. Ph.D. Thesis, Napier University, Edinburgh, UK, 2001.

[25] Y. Zhang, S. Chen, S. Ruan, W. Wang, Q. Wang, D. Chen, Y. Liu and D. Yan, “Electrothermal effect of alternating current on hardening process of metakaolin-based geopolymer” Cem. Concr. Compos. 2023, 142, 105205. DOI: j.cemconcomp.2023.105205. Materials 2025, 18, 4811 33 of 34

[26] B.F. Aygun, M. Uysal, T. Bilir, T. Cosgun and H. Dilbas, “Alternating current curing of conductive fly ash-slag geopolymer mortars: Performance, characterization and optimization” Arch. Civ. Mech. Eng. 2024, 25, 46. DOI: s43452-024- 01103-4.

[27] B.F. Aygun, M. Uysal, T. Bilir, T. Cosgun and H. Dilbas, “An investigation on physical, mechanical and microstructural properties of electricity-based cured GBFS-FA geopolymer” Constr. Build. Mater. 2024, 458, 139526. DOI: j.conbuildmat.2024.139526.

[28] S. Hanjitsuwan, P. Chindaprasirt and K. Pimraksa, “Electrical conductivity and dielectric property of fly ash geopolymer pastes” Int. J. Miner. Metall. Mater. 2011, 18, 94–99. DOI: s12613-011-0406-0.

[29] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata and P. Chindaprasirt, “Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste” Cem. Concr. Compos. 2014, 45, 9–14. DOI: j.cemconcomp.2013.09.012.

[30] T. Kovarik, P. France, J. Sestak, D. Rieger, P. Belsky, J. Kadlec and P. Roubicek, “A novel approach to polyaluminosialates curing process using electric boosting and temperature profile investigation by DSC” J. Therm. Anal. Calorim. 2015, 121, 517–524. DOI: s10973-015-4643-8.

[31] H. Dehghanpour, K. Yilmaz and M. Ipek, “Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes” Constr. Build. Mater. 2019, 221, 109–121. DOI: j.conbuildmat.2019.06.025.

[32] S. Vaidya and E.N. Allouche, “Strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymer concrete” Mater. Struct. 2011, 44, 1467–1475. DOI: s11527-011-9711-3.

[33] B. Baradan, H. Yazici and S. Aydin, Beton, 2nd ed.; Dokuz Eylul University Engineering Faculty Publications: Izmir, Turkey, 2015.

[34] K. Nazir, O. Canpolat, M. Uysal, A. Nis and O.F. Kuranli, “Engineering properties of different fiber-reinforced metakaolin-red mud based geopolymer mortars” Constr. Build. Mater. 2023, 385, 131496. DOI: j.conbuildmat.2023.131496.

[35] S. Wen and D.D.L. Chung, “Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement-matrix composites” Carbon 2007, 45, 505–513. DOI: j.carbon.2006.10.024.

[36] A.O. Monteiro, P.B. Cachim and P.M.F.J. Costa, “Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles” Cem. Concr. Compos. 2017, 81, 59–65. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.009.

[37] M. Ipek, “Analysis of usability of waste erosion wires as fiber in reactive powder concrete” J. Polytech. 2017, 20, 451–457. 10.2339/2017.20.2.

[38] H. Dehghanpour and K. Yilmaz, “A more sustainable approach for producing less expensive electrically conductive concrete mixture: Experimental and FE study” Cold Reg. Sci. Technol. 2021, 184, 103231. DOI: j.coldregions.2021.103231.

[39] F.P. Torgal, J.C. Gomes and S. Jalali, “Alkali-activated binders: A review part 2. About materials and binders manufacture” Constr. Build. Mater. 2008, 22, 1315–1322. DOI: j.conbuildmat.2007.03.019.

[40] N.A. Jaya, L. Yun-Ming, M.M.A. Al Bakri, H. Cheng-Yong and K. Hussin, “Effect of sodium hydroxide molarity on physical, mechanical and thermal conductivity of metakaolin geopolymers” IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2018, 343, 012015. DOI: 1757-899X/343/1/012015.

[41] C.Y. Heah, H. Kamarudin, A.M.M. Al Bakri, M. Binhussain, M. Luqman, I.K. Nizar, C.M. Ruzaidi and Y.M. Liew, “Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers” Constr. Build. Mater. 2012, 35, 912–922. DOI: j.conbuildmat.2012.04.102.

[42] Z. Yahya, M.M.A. Al Bakri, K. Hussin, K.N. Nizar, R.A. Razak and A.V. Sandu, “Effect of solids-to-liquids, Na2SiO3-to-NaOH and curing temperature on the palm oil boiler ash (Si + Ca) geopolymerisation system” Materials 2015, 8, 2227–2242. DOI: ma8052227.

[43] ASTM C642 (2006); Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2006.

[44] ASTM C109/C109M-16a (2016); Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2016.

[45] ASTM C348-14 (2014); Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2014. Materials 2025, 18, 4811 34 of 34

[46] ASTM C496-96 (1996); Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 1996.

[47] A.T. Pinto, Alkali-Activated Metakaolin Based Binders. Ph.D. Thesis, University of Minho, Braga, Portugal, 2008.

[48] I.H. Aziz, M.M.A. Al Bakri, M.A.A. Mohd Salleh, E.A. Azimi, J. Chaiprapa and A.V. Sandu, “Strength development of solely ground granulated blast furnace slag geopolymers” Constr. Build. Mater. 2020, 250, 118720. DOI: j.conbuildmat.2020.118720.

[49] K. Nazir, O. Canpolat and M. Uysal, “Durability properties of steel, polyamide and polyethylene fiber reinforced geopolymer mortar made with recycled concrete aggregate and glass powder as fillers” J. Build. Eng. 2023, 76, 107313. DOI: j.jobe.2023.107313.

[50] ASTM C597-16 (2016); Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2016.

[51] BS EN 1338 (2003); B. Standard, Concrete Paving Block-Requirements and Test Methods. British Standards Institution: London, UK, 2003.

[52] S. Mindess, J.F. Young and D. Darwin, Concrete, 2nd ed.; Prentice Hall Pearson Education: Upper Saddle River, NJ, USA, 2003.

[53] A.A. Arslan, M. Uysal, A. Yilmaz, M.M. Al-Mashhadani, O. Canpolat, F. Sahin and Y. Aygormez, "Influence of wetting-drying curing system on the performance of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer composites" Constr. Build. Mater. 2019, 225, 909–926. DOI: j.conbuildmat.2019.07.235.

[54] J. Davidovits, Geopolymer Chemistry and Applications, 4th ed.; Institut Geopolymere: Saint-Quentin, France, 2015.

[55] Y. Zhang, W. Sun, Q. Chen and L. Chen, "Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer" J. Hazard. Mater. 2007, 143, 206–213. DOI: j.jhazmat.2006.09.033.

[56] M. Tuyan, O. Andıc-Cakır and K. Ramyar, "Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer" Compos. Part B Eng. 2018, 135, 242–252. DOI: j.compositesb.2017.10.013.

[57] F. Doğan, H. Dehghanpour, S. Subasi and M. Marasli, "Characterization of carbon fiber reinforced conductive mortars filled with recycled ferrochrome slag aggregates" J. Sustain. Constr. Mater. Technol. 2022, 7, 145–157. DOI: jscmt.1157026.

[58] H. Dehghanpour, F. Doğan, S. Subasi and M. Maraslı, "Effects of single-walled carbon nanotubes and steel fiber on effects of single-walled carbon nanotubes and steel fiber on recycled ferrochrome filled electrical conductive mortars" J. Sustain. Constr. Mater. Technol. 2022, 7, 250–265. DOI: jscmt.1163963.

[59] B.Y. Polat and M. Uysal, "Bacterial crack healing in metakaolin based geopolymer mortar" J. Build. Eng. 2021, 39, 102291. DOI: j.jobe.2021.102291.

[60] F. Sahin, M. Uysal, O. Canpolat, T. Cosgun and H. Dehghanpour, "The effect of polyvinyl fibers on metakaolin-based geopolymer mortars with different aggregate filling" Constr. Build. Mater. 2021, 300, 124257. DOI: j.conbuildmat.2021.124257.

[61] M. Uysal, O.F. Kuranli, Y. Aygormez, O. Canpolat and T. Cosgun, "The Effect of various fibers on the red mud additive sustainable geopolymer composites" Constr. Build. Mater. 2022, 363, 129864. DOI: j.conbuildmat.2022.129864.

[62] L. Kuang, G. Li, J. Xiang, W. Ma and X. Cui, "Effect of seawater on the properties and microstructure of metakaolin/slag-based geopolymers" Constr. Build. Mater. 2023, 397, 132418. DOI: j.conbuildmat.2023.132418

[63] Y. Tammam, M. Uysal, O. Canpolat, "Effects of alternative ecological fillers on the mechanical, durability, and microstructure of fly ash-based geopolymer mortar" Euro. J. of Envir. and Civ. Eng. 2021. DOI: 10.1080/19648189.2021.1925157

[64] Y. Aygörmez, O. Canpolat, M.M. Al-mashhadani, M. Uysal, “Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites” Cons. and Buil. Mat. 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117502

[65] G.D. Poggetto, F. Altimari, C. Leonelli, L. Barbieri, “Investigation on the effect of inorganic acid attack on composite prepared with MK-based geopolymer and waste cork dust” Cer. Int. 2024. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.01.190

[66] B. Bayrak, S.A. Mostafa, A. Oz, B.A. Tayeh, G. Kaplan, A.C. Aydın, “The effect of clinker aggregate on acid resistance in prepacked geopolymers containing metakaolin and quartz powder in the presence of ground blast furnace slag” J. of Buil. Eng. 2023. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106290

[] N.K. Lee ve H.K. Lee, “Influence of the slag content on the chloride and sulfuric acid resistances of alkali-activated fly ash/slag paste” Cement Concr. Compos. 2016. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.06.004

[67] R.P. Singh, B. Mohanty, K.R. Vanapalli, K. Jadda, “Durability assessment of fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates against acid and sulfate attack” J. of Buil. Eng. 2024. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.108354

[68] L.D. Caselles, C. Patapy, B. Balsamo, V. Montouillout, V. Benavent, V. Trincal, H. Lahalle, M. Cyr, “Behavior of calcined clay based geopolymers under sulfuric acid attack: Meta-illite and metakaolin” Con. and Buil. Materials, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129889

[69] H. Zhu, G. Liang, H. Li, Q. Wu, C. Zhang, Z. Yin, S. Hua, “Insights to the sulfate resistance and microstructures of alkali-activated metakaolin/slag pastes” App. Cly. Sci. 2021. DOI: 10.1016/j.clay.2020.105968

[70] A. Yılmaz, S. Ergün, M. Uysal, Y. Aygörmez, B.F. Aygun, “Exploration of Fiber-Reinforced Geopolymer Mortars Containing Recycled Aggregates and Marble Powder” RESEARCH ARTICLE-CIVIL ENGINEERING, DOI: 10.1007/s13369-023-08357-9

[71] R. Luo, H. Liu, P. Duan, J. Ye, W. Chen, Z. Zhang, A. Wang, ”Sulfate resistance and microstructure of metakaolin geopolymer reinforced by cellulose nanofiber and wollastonite” J. of Bui. Eng. 2023. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105580

[72] H.A. Alcamand, P.H.R. Borges, F.A. Silva, A.C.C. Trindade, “The effect of matrix composition and calcium content on the sulfate durability of metakaolin and metakaolin/slag alkali-activated mortars” Cer. Int., 2018. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.12.102

[73] J.C. Kuri, M.D. Nuruzzaman, P.K. Sarker, “Sodium sulphate resistance of geopolymer mortar produced using ground ferronickel slag with fly ash” Cer. Int. 2023. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.09.258

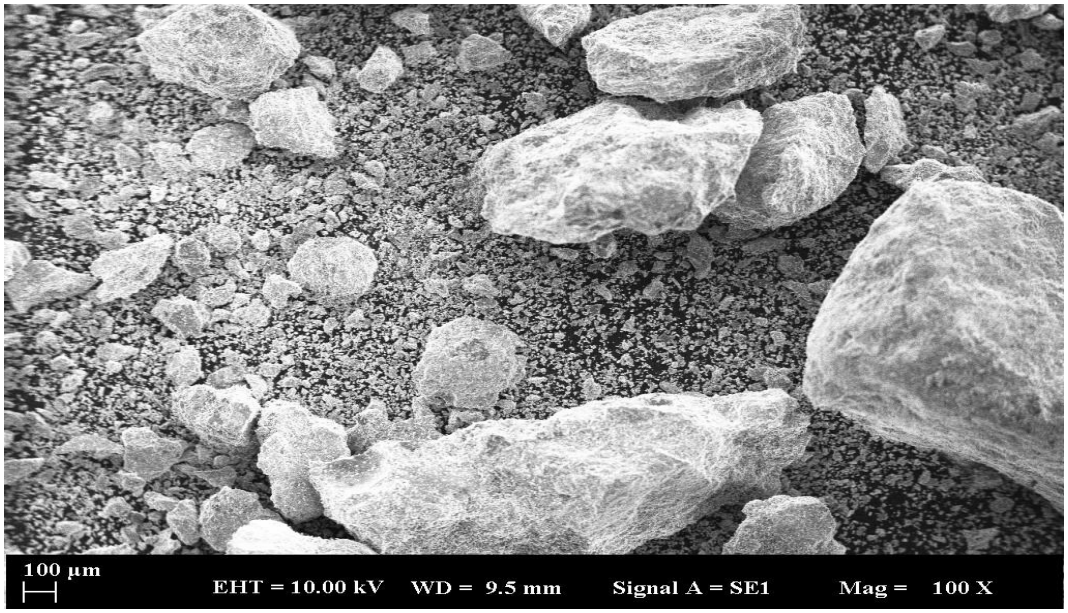
[74] T.B. Baştürk, A. Yılmaz, Y. Aygörmez, “Sulfate attack, freeze-thaw and high-temperature performances by evaluation of colemanite waste as binding material and aggregate in green geopolymer production” Sust. Chem. And Phar. 2024. DOI: 10.1016/j.scp.2024.101872

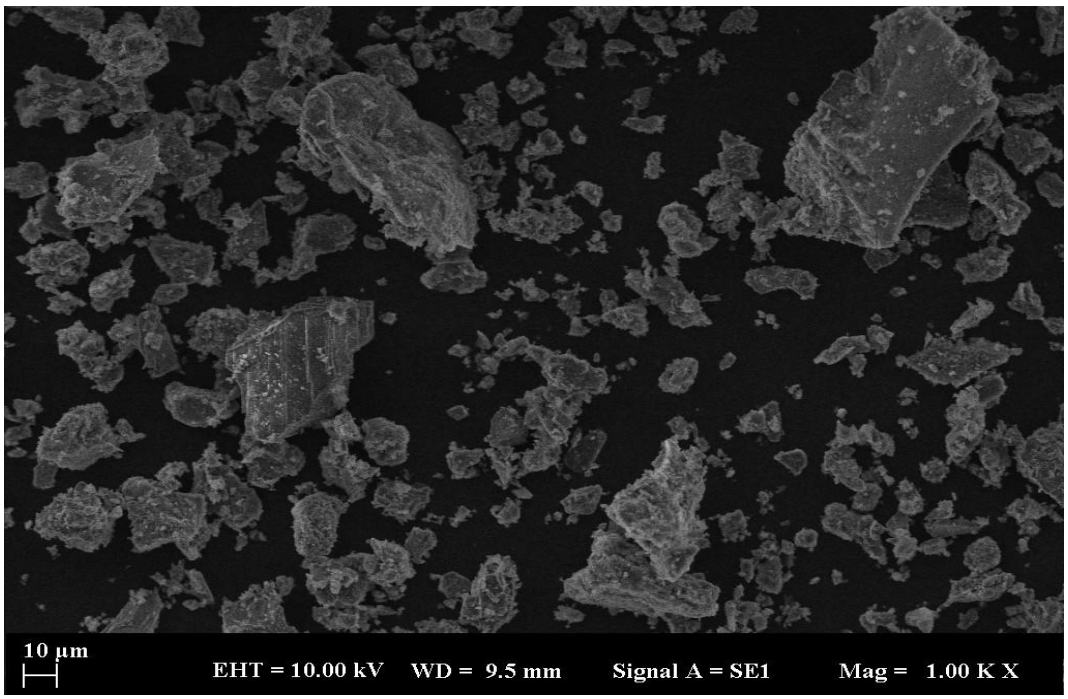
[75] H. Yang, H. Wang, “Coal Gasification Slag as a Green Additive in Supplementary Cementitious Materials: Mechanical Properties and Microstructure” Mat. 2025. DOI: 10.3390/ma18010086

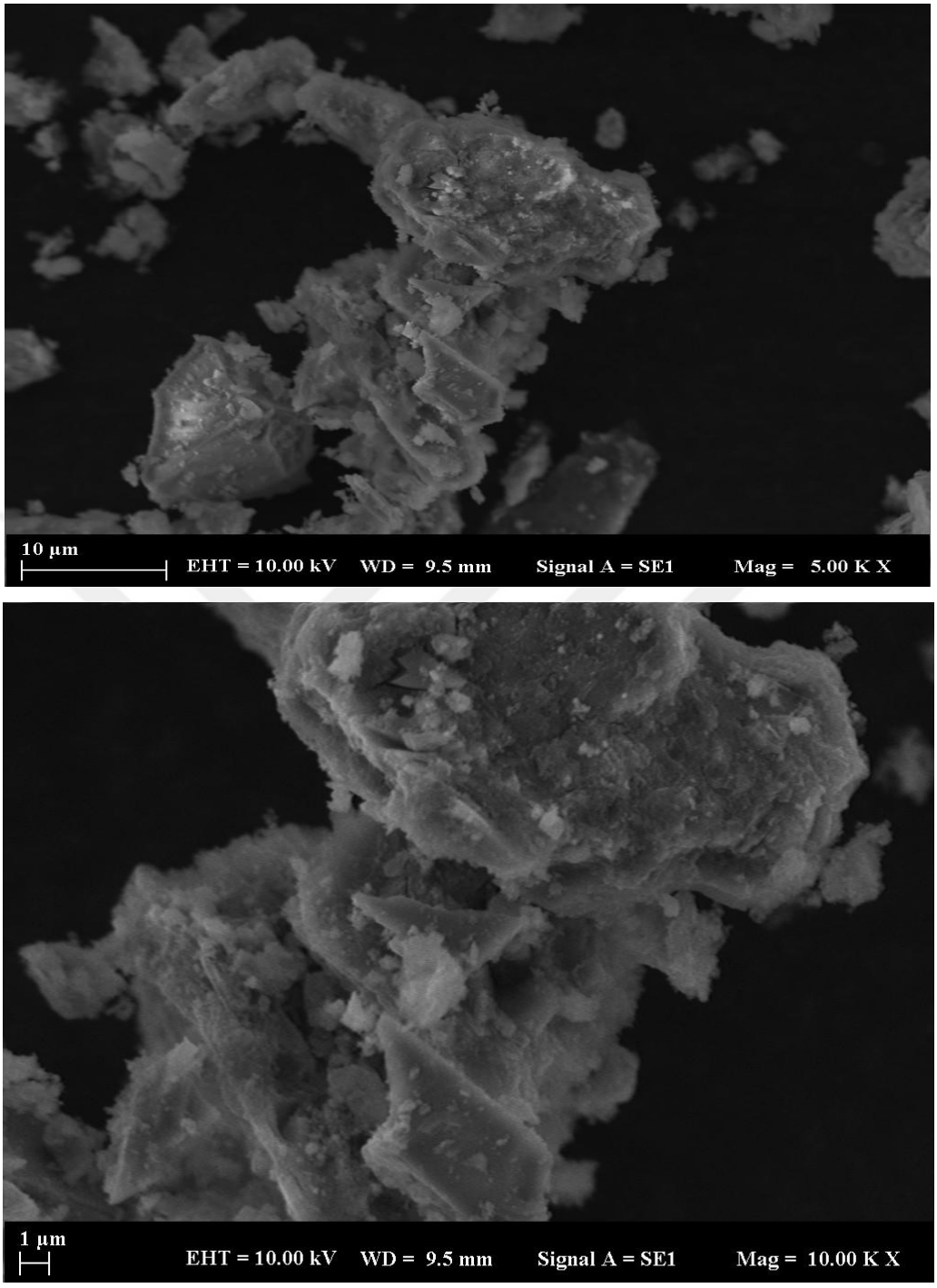
[76] M. Lahoti, K.K. Wong, E. Yang, K.H. Tan, “Effects of Si/Al molar ratio on strength endurance and volume stability of metakaolin geopolymers subject to elevated temperature” Cer. İnt. 2018. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.12.226

[77] M. Uysal, O.F. Kuranlı, Y. Aygörmez, O. Canpolat T. Coşgun, “The effect of various fibers on the red mud additive sustainable geopolymer composites” Cons. And Buil. Mat. 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129864

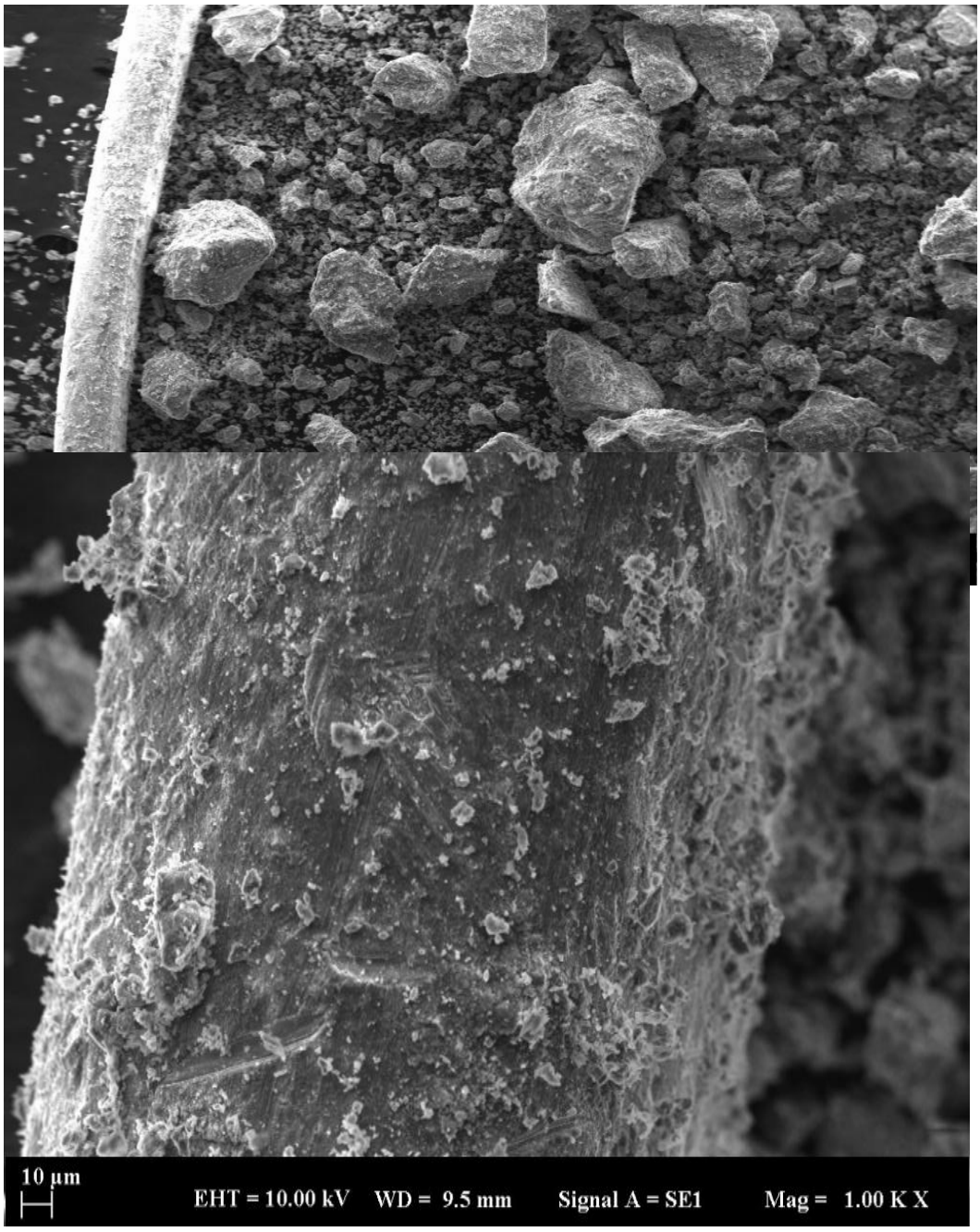
A
NUMUNELERİN FARKLI BÜYÜTMELERDE SEM GÖRÜNTÜLERİ

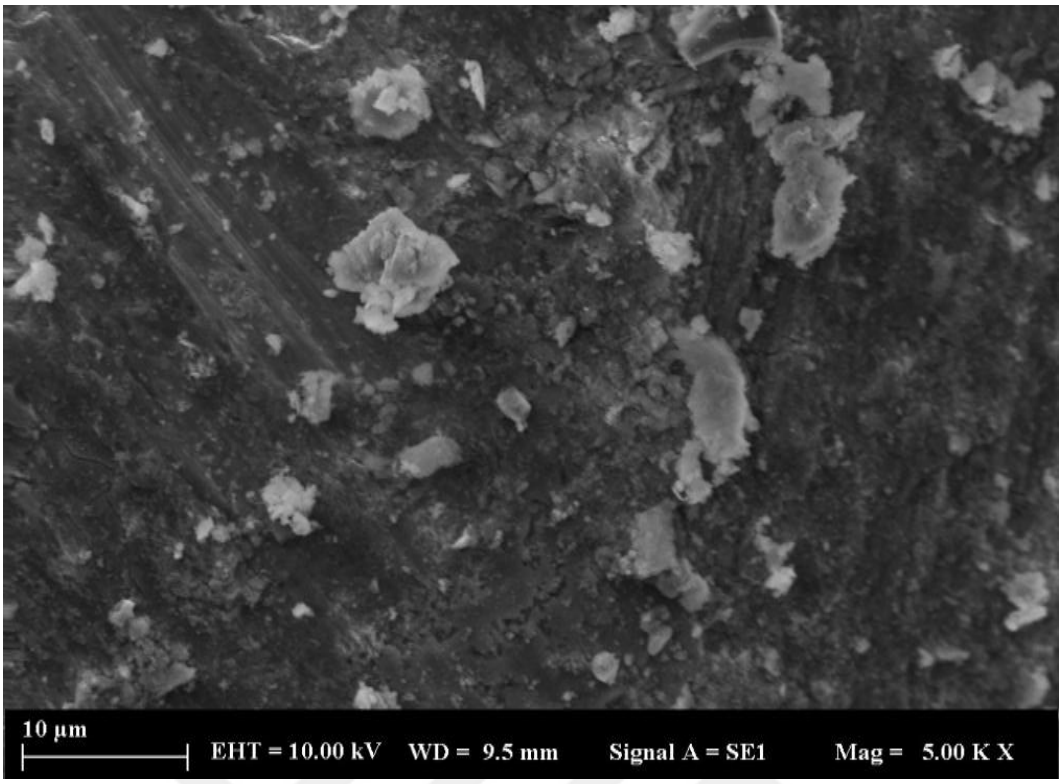


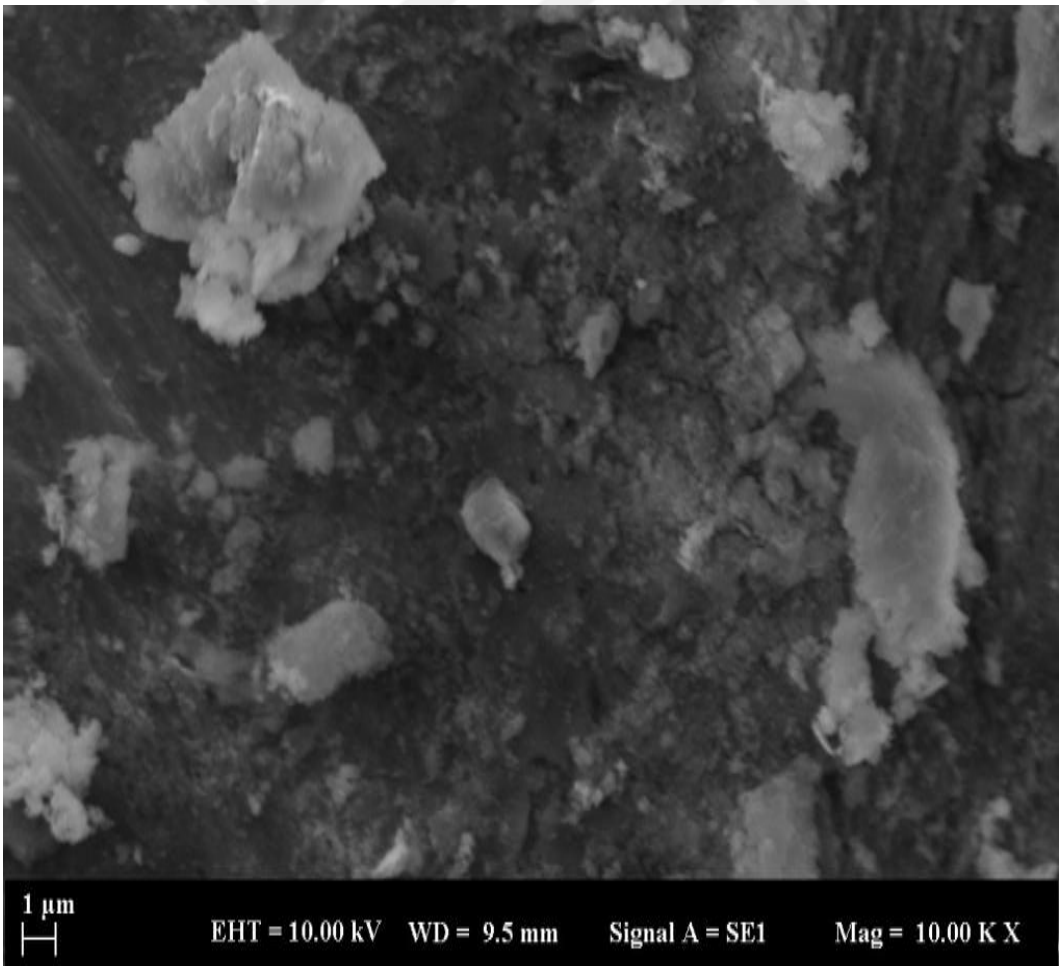




Şekil A.1 Elektrik kürü uygulanmış kontrol numunesinin SEM görüntüleri

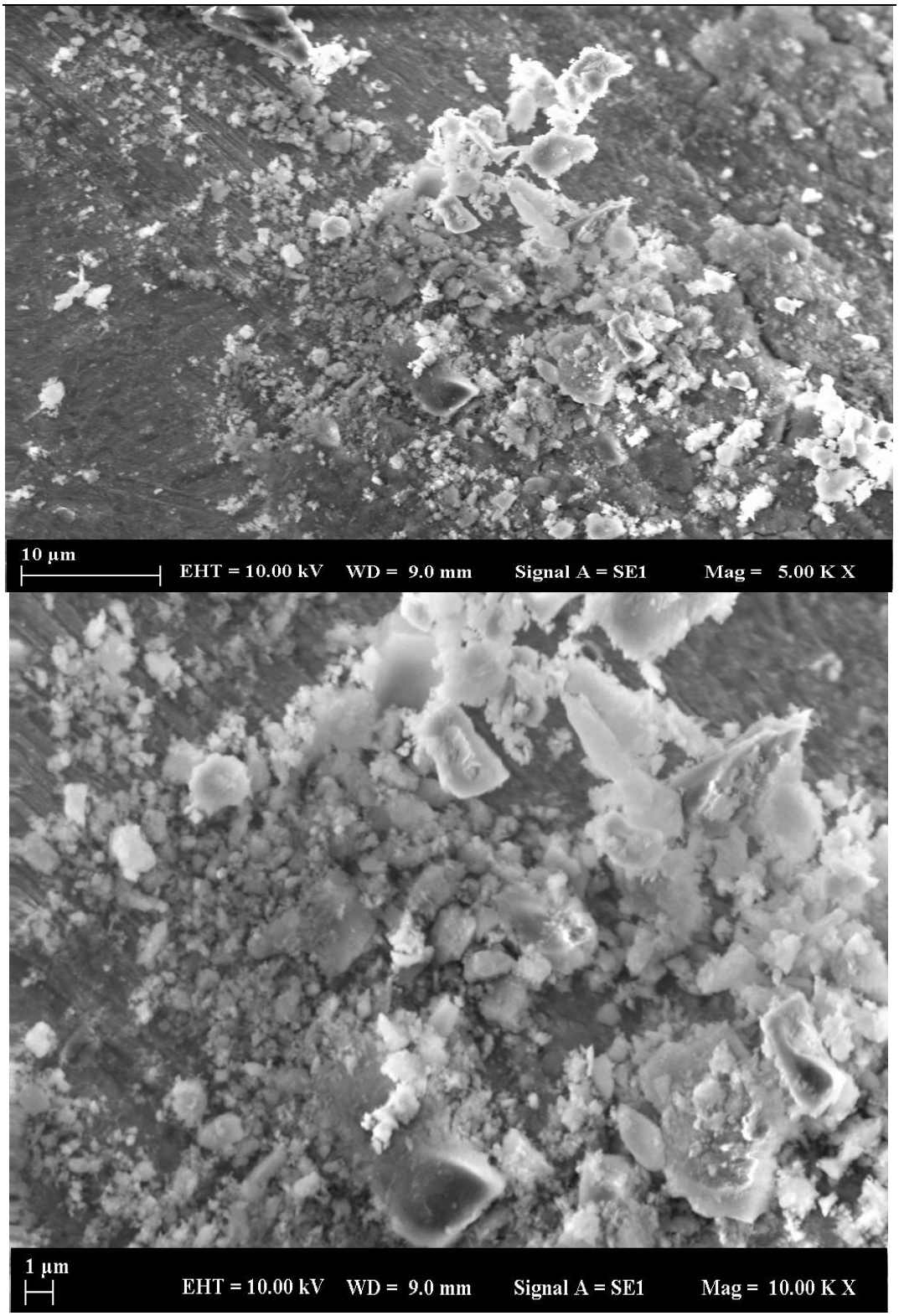

10 µm
EHT = 10.00 kV
WD = 9.5 mm
Signal A = SE1
Mag = 1.00 K X



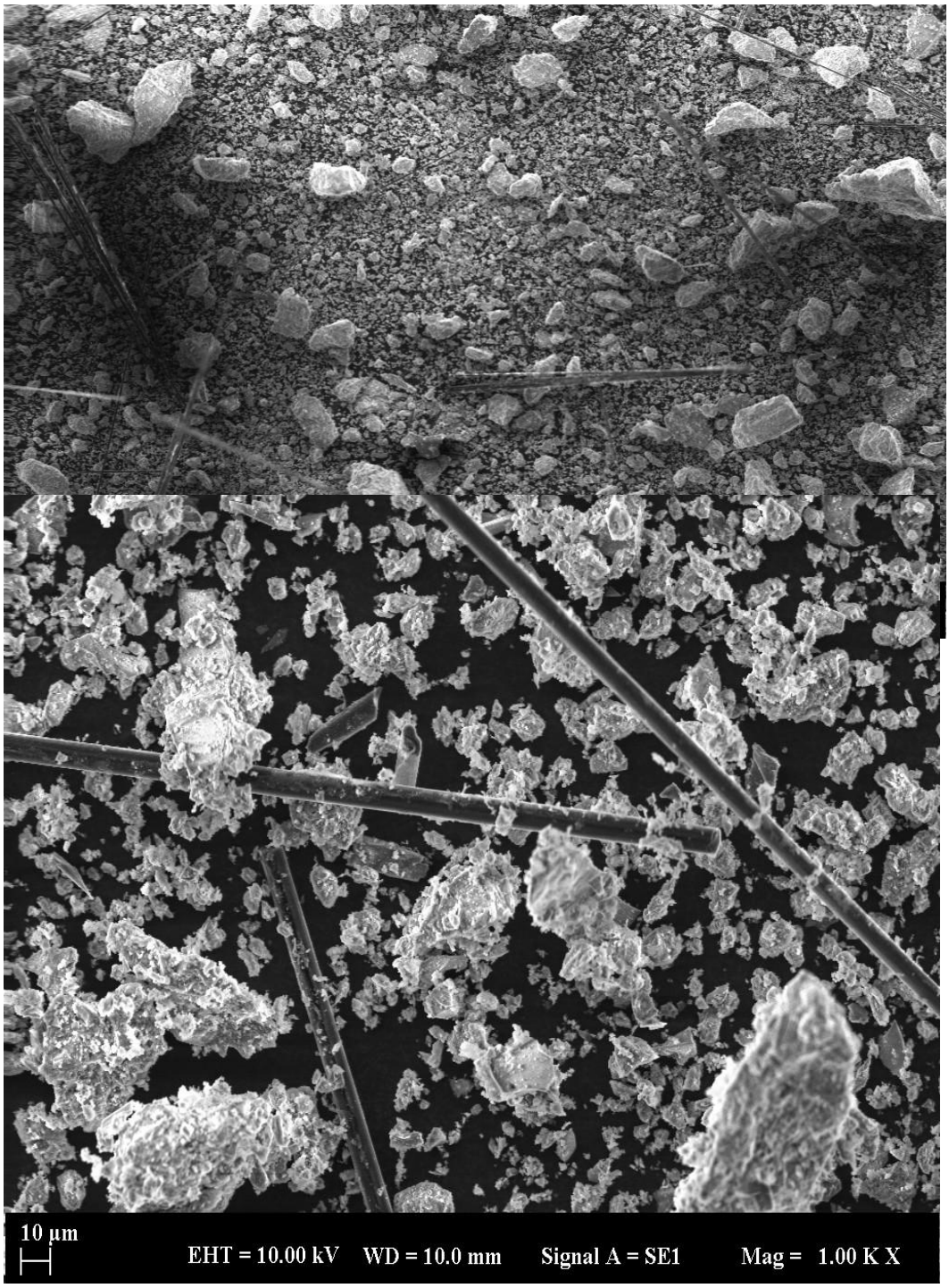


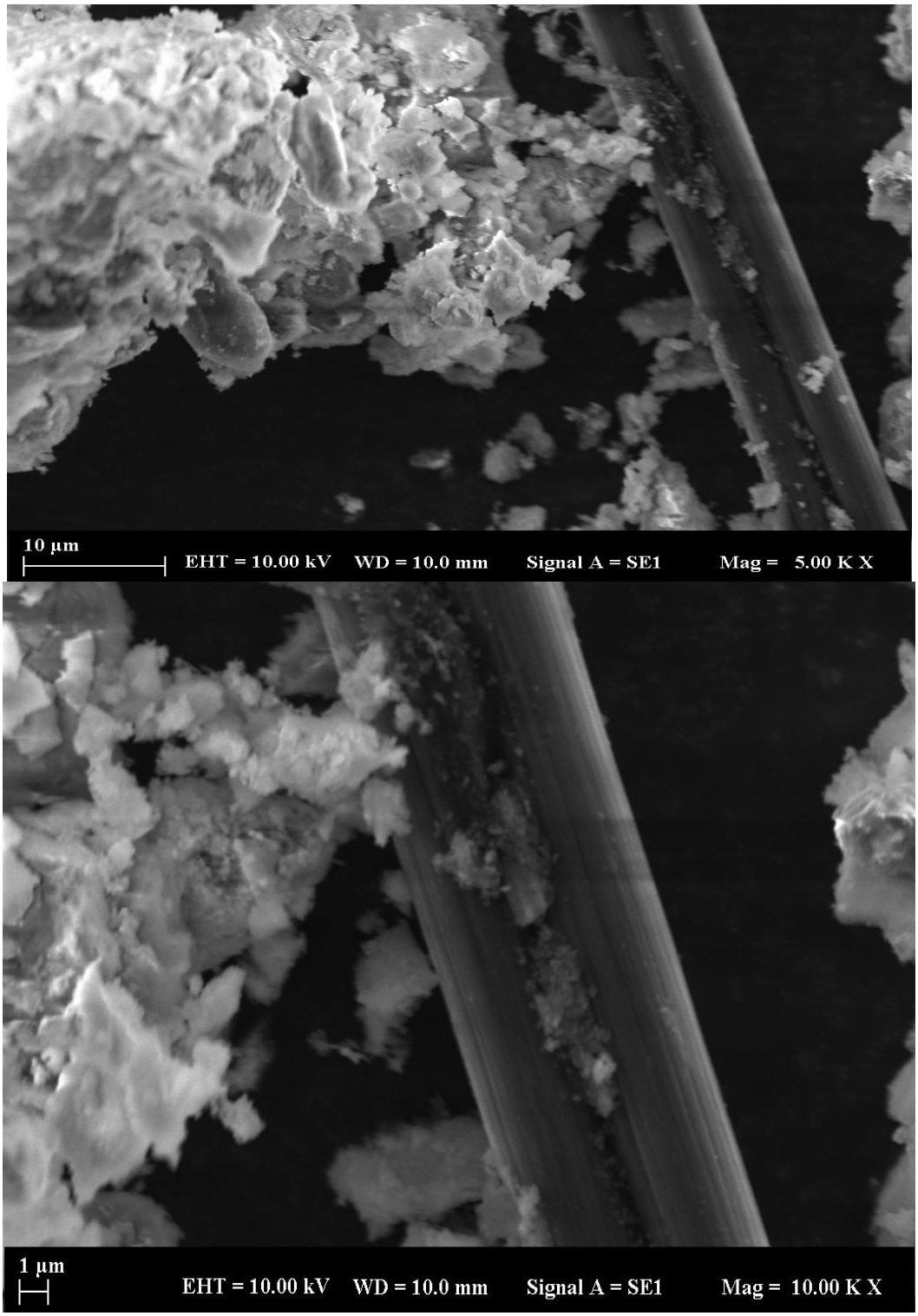
Şekil A.2 AET ilaveli elektrik kürü uygulanmış numunenin SEM görüntüleri


30 µm
EHT = 10.00 kV
WD = 9.0 mm
Signal A = SE1
Mag = 1.00 K X

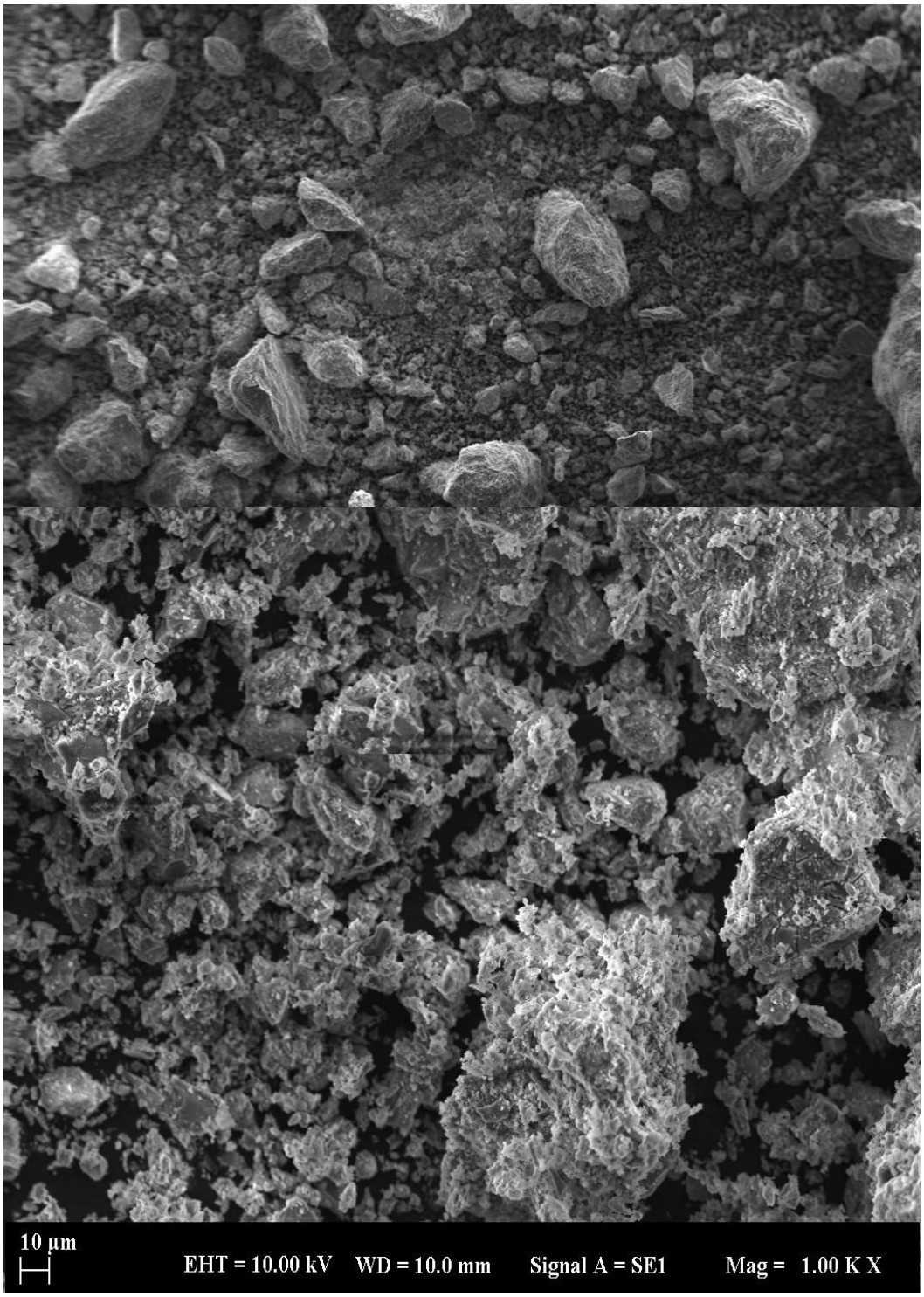


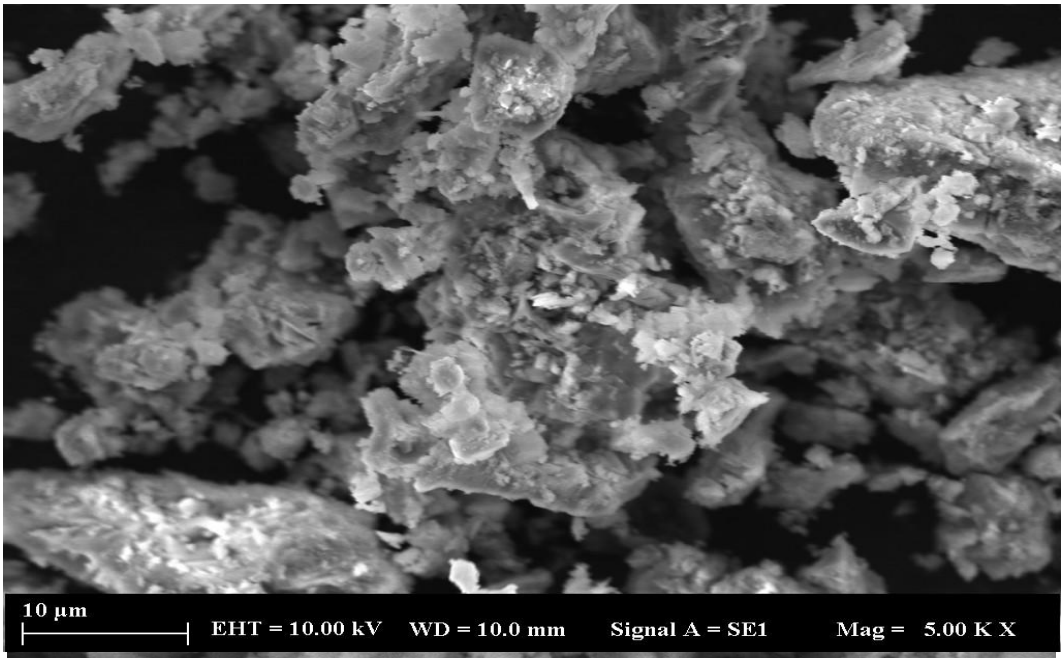
Şekil A.3 ÇF ilaveli elektrik kürü uygulanmış numunenin SEM görüntüleri

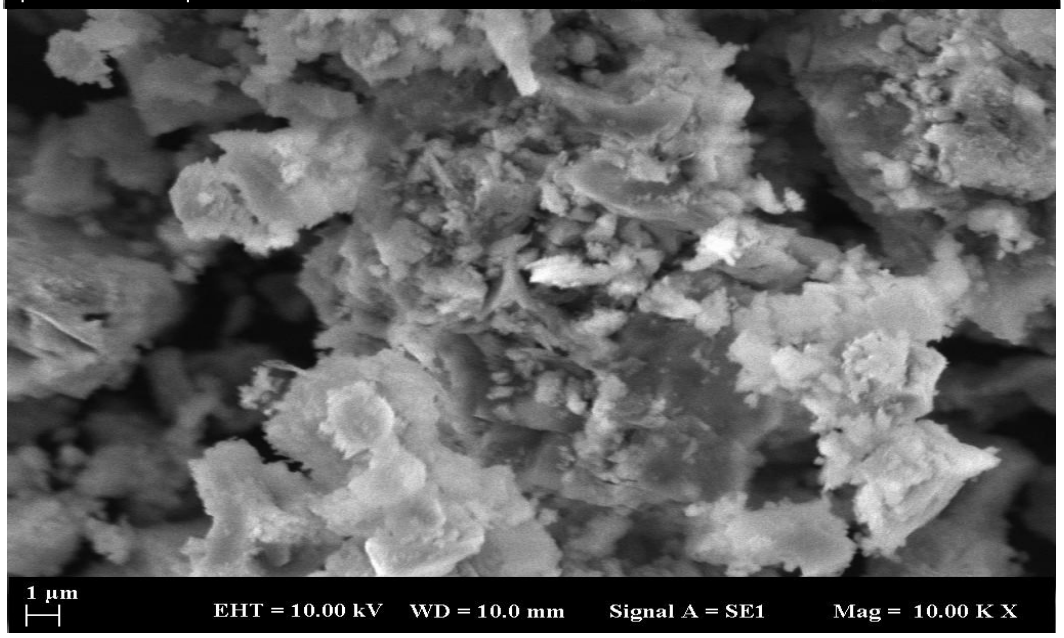

10 µm
EHT = 10.00 kV
WD = 10.0 mm
Signal A = SE1
Mag = 1.00 K X



Şekil A.4 KF ilaveli elektrik kürü uygulanmış numunenin SEM görüntüleri


10 µm
EHT = 10.00 kV
WD = 10.0 mm
Signal A = SE1
Mag = 1.00 K X





Şekil A.5 KS ilaveli elektrik kürü uygulanmış numunenin SEM görüntüleri

B
HD YÖNTEMI HESAP METODU

Bütünsel değerlendirme, literatürde yer alan bir değerlendirme yaklaşımıdır ve karar destek yöntemleri, deneysel sonuçların bulunduğu bir veritabanının değerlendirilmesini kolaylaştırır. Bütünsel değerlendirme yaklaşımında, parametre sayısından bağımsız olarak, tüm parametreler hesaplama adımlarında kullanılır ve sonuç olarak genellikle bir sabit bulunur. Bu şekilde, sabit en iyi çözümü bulmak için kullanılır. HD Yöntemi, alternatifleri değerlendirmek için kullanılan çok kriterli karar destek yöntemlerinden biridir ve tüm parametreler için kullanılır. Diğer seçeneklerin parametreleri alternatifler matrisinde (Denklem B1) sunulmuştur.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{k1} & \cdots & m_{kl} \end{bmatrix} \quad \text{(B1)}$$

burada all, k'inci alternatifin l'inci kriteridir ve M, alternatiflerin puan matrisidir.

Bu yöntemde, veritabanında bir kontrol varsa, alternatiflerin parametreleri kontrolün parametresine bölünür. Veritabanında bir kontrol yoksa, önce alternatiflerin parametrelerinin ortalaması belirlenir ve ortalama artan bir sabit (yani 2, 3) ile çarpılır. Alternatiflerin parametreleri, kontrol parametresinin değiştirilmiş/büyütülmüş/çarpanlanmış ortalamasına bölünür. Burada, ortalamayı seçmek yerine, değerin maksimumun iki katından büyük olarak seçilmesi önerilebilir (Denklem B2).

$$M_d = \begin{bmatrix} m_{11}/m_{11} & \cdots & m_{1l}/m_{1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{k1}/m_{11} & \cdots & m_{kl}/m_{1l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{k1} & \cdots & d_{kl} \end{bmatrix} \quad \text{(B2)}$$

burada Md, alternatiflerin göreceli kriter matrisidir ve dkl, k'inci alternatifin l'inci göreceli kriteridir.

Daha sonra, parametrelerin ağırlıklandırılması isteniyorsa, göreceli parametreler parametrelerin ağırlıkları ile çarpılır (Denklem B3).

$$M^* = \begin{matrix} w \\ \vdots \\ w_n \end{matrix} \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{k1} & \cdots & m_{kl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m^*_{11} & \cdots & m^*_{1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m^*_{k1} & \cdots & m^*_{kl} \end{bmatrix} \quad \text{(B3)}$$

burada M* alternatiflerin puan matrisidir ve mkl k'ncı alternatifin l'inci ağırlıklı kriteridir.

Son bölümde, her alternatifin skaler değeri (K) kesir payı ve payda fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Kesir payı ve payda, alternatiflerin 1,0'dan küçük ve büyük göreceli parametrelerinin sırasıyla çarpılmasını içerir. K değerleri daha sonra düşükten yükseğe doğru sıralanır ve en düşük olanı en iyi alternatif olarak sunulur.

Alternatiflerin kabul edilebilirlik seviyeleri (AL'ler), en düşük (Klow) ve en yüksek (Khigh) değerler kullanılarak hesaplanabilir. En düşük ve en yüksek K değerleri arasındaki fark (ΔK) hesaplanır ve bu değer, dört bölgeyi temsil eden 4'e bölünür: Mükemmel bölge, çok iyi bölge, iyi bölge ve kabul edilebilir bölge.

$(0\times\Delta K + Klow) \leq K < (0{,}25\times\Delta K + Klow)$ ise alternatif, istenen/kontrol alternatifine kıyasla "mükemmel"dir.

$(0{,}25\times\Delta K + Klow) \leq K < (0{,}50\times\Delta K + Klow)$ ise, alternatif istenen/kontrol alternatifine kıyasla "çok iyi"dir.

$(0{,}50\times\Delta K + Klow) \leq K < (0{,}75\times\Delta K + Klow)$, alternatif, istenen/kontrol alternatifine kıyasla "iyi"dir,

$(0{,}75\times\Delta K + Klow) \leq K \leq (1{,}00\times\Delta K + Klow)$, alternatif, istenen/kontrol alternatifine kıyasla "kabul edilebilir"dir.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Y. Gokcegoz, M. Uysal, O. Arıkan, M. Salhi, "Mechanical effect of electrical curing for metakaolin and slag based geopolymer mortars with different molarities", 4th International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt Türkiye, 2022.

2. Y. Gokcegoz, M. Uysal, B. Aygün, "Effect of Nano-SiO2 on Electrical Cured Metakaolin-Granulated Blast Furnace Slag Based Geopolymers with Fiber Addition", 15th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Budapest Hungary, 2024.

Makaleler

1. Y. Gokcegoz, M. Uysal, O. Canpolat, O. Arıkan H. Dilbas, B. Aygün, "Electrical Curing of Metakaolin- and GBFS-Based Geopolymers: A Sustainable Technology Aligned with the European Green Deal" Materials, vol: 18(20), 2025, DOI: ma18204811.