



**EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİNDEN FAYDALANILARAK
GEOPOLİMER ESASLI LİFLİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmet Kaan GEYİK

Danışman

Doç. Dr. Gökhan KÜRKÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2023

Bu tez çalışması 21.FEN. BİL.18 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİNDEN
FAYDALANILARAK GEOPOLİMER ESASLI LİFLİ KOMPOZİT
MALZEME ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

İsmet Kaan GEYİK

Danışman

Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2023

TEZ ONAY SAYFASI

İsmet Kaan GEYİK tarafından hazırlanan “Eklemeli İmalat Teknolojilerinden Faydalanılarak Geopolimer Esaslı Lifli Kompozit Malzeme Üretiminin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 05 / 10 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Adı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ

Başkan : Doç. Dr. Abdullah DEMİR
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Müh. Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Müh. Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Müh. Fakültesi

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

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

05 / 10 / 2023

İmza

İsmet Kaan GEYİK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİNDEN FAYDALANILARAK GEOPOLİMER ESASLI LİFLİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

İsmet Kaan GEYİK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ

Depremler yapısal ve yapısal olmayan elemanlara ciddi hasarlar vermektedir. Yapısal elemanların bütünlüğü şiddetli depremlerde önem arz ederken, orta ve küçük şiddetli depremlerde yapısal olmayan elemanların hasar görmemesi de can ve mal kaybının önüne geçilmesi için gereklidir. Yapısal olmayan elemanlardaki hasarların önüne geçebilmek için lifli kompozit malzemelerden faydalanılabilir. Bu çalışmada, uçucu kül esaslı geopolimer harç üreterek, üretilen harç içerisinde eklemeli imalat teknolojilerinden faydalanılarak elde edilen ızgara modelleri kullanmak suretiyle geopolimer esaslı lifli kompozit malzeme üretimini gerçekleştirilmesi, fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Geopolimer harç içerisinde, 5 farklı filament malzemesi, 5 farklı ızgara modeli ve 2 farklı ızgara kalınlığı kullanılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde; Su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık, görünür yoğunluk, kopma enerjisinin tayini, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Numunelerde değişen parametrelere bağlı olarak incelemeler yapılmış en yüksek kopma enerjisini veren örneklerin kalın mesh modelli TPU filament ile oluşturulan numune olduğu tespit edilmiştir. Yapısal olmayan elemanlarda TPU filament ile oluşturulan kompozit malzemelerin kullanılabilir olduğu kanaatine varılmıştır.

2023, xiii + 62 sayfa

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Geopolimer harç, Lifli kompozit, Uçucu kül.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF GEOPOLYMER BASED FIBER COMPOSITE MATERIAL PRODUCTION USING ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

İsmet Kaan GEYİK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Gökhan KÜRKLÜ

Earthquakes cause serious damage to structural and non-structural elements. While the integrity of structural elements is important in severe earthquakes, it is also necessary to prevent damage to non-structural elements in medium and small earthquakes to prevent loss of life and property. Fibrous composite materials can be used to prevent damage to non-structural elements. In this study, it is aimed to produce fly ash-based geopolymer mortar, to produce geopolymer-based fibrous composite material by using grid models obtained by using additive manufacturing technologies in the produced mortar, and to examine its physical and mechanical properties. 5 different filament materials, 5 different grid models and 2 different grid thicknesses were used in the geopolymer mortar. On the samples produced; Water absorption, apparent porosity, unit volume weight, apparent density, determination of rupture energy, bending strength and compressive strength experiments were carried out. The samples were examined depending on the changing parameters and it was determined that the samples that gave the highest breaking energy were the samples created with thick mesh model TPU filament. It has been concluded that composite materials created with TPU filament can be used in non-structural elements.

2023, xiii + 62 pages

Keywords: Additive manufacturing, Geopolymer mortar, Fiber composite, Fly ash.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Gökhan KÜRKÜ'ye, 21.FEN. BİL.18 numaralı proje ile desteklerinden dolayı AKÜ-BAPK'ya ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

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

İsmet Kaan GEYİK
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Eklemeli İmalat.....	3
2.1.1 3B Yazıcılar ve Kullanılan Malzemeler.....	4
2.1.1.1 PLA ve Touch PLA Filament.....	5
2.1.1.2 ABS Filament	6
2.1.1.3 PETG Filament.....	6
2.1.1.4 TPU Filament	6
2.1.2 İnşaat Sektöründe Eklemeli İmalat ve 3B Yazıcılar	7
2.2 Geopolimerler	8
2.2.1 Uçucu Kül (UK) ve Özellikleri	10
3. MATERYAL VE METOT	13
3.1 Kullanılan Malzemeler	13
3.1.1 Kum.....	13
3.1.2 Uçucu Kül	13
3.1.3 Filamentler	15
3.1.3 Lif.....	15
3.1.4 Çözeltiler.....	16
3.2 Numune Üretimi	17
3.2.1 Filament Üretimi	17
3.2.2 Geopolimer Harç Üretimi	19
3.3 Deneyler.....	24
3.3.1. Su Emme ve Görünen Porozite	24
3.3.2. Birim Hacim Ağırlık ve Görünür Yoğunluk.....	25

3.3.3 Eğilme Dayanımı Deneyi.....	26
3.3.4 Basınç Dayanımı Deneyi.....	26
3.3.5 Kopma Enerjisinin Tayini / Darbe Dayanımı Deneyi.....	27
4. BULGULAR	29
4.1. Geopolimer Harçların Fiziksel Özellikleri	29
4.2 Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri	33
4.3 Geopolimer Kompozit Malzemenin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri.....	36
4.3.1 Eğilme Dayanımı Özellikleri	36
4.3.2 Darbe Dayanımı Özellikleri	44
4.3.3 Kırılma Yüzeyi Görüntüleri	49
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	56
6. KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	62

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

g	Gram
Cal	Kalori
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
mm	Milimetre
M	Molar
m ³	Metreküp
MPa	Megapaskal
N	Newton
°C	Santigrat Derece
cm ²	Santimetre Kare
%	Yüzde

Kısaltmalar

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
EBM	Elektron Işınlı Ergitme
FDM	Ergiyik Biriktirme Yöntemi
PETG	Polietilen Tereftalat
PLA	Biopolimer Polilaktik Asit
SS	Sodyum Silikat
SLM	Seçici Lazer Ergitme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
SLA	Tarayarak Işıklı Kürleme
STL	İmalat Arabirimi Dosya Uzantısı
SH	Sodyum Hidroksit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SK	Silis Kumu
TPU	Termoplastik Poliüretan
TS	Türk Standartları
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Geopolimerizasyon prosesi.	10
Şekil 2.2 UK taneciklerinin morfolojik yapısı (Özcan 2020).	12
Şekil 3.1 F sınıfı UK'nın XRD analizi.	14
Şekil 3.2 C sınıfı UK'nın XRD analizi.	14
Şekil 4.1 Harç numunelerinin görünen porozite oranları.	30
Şekil 4.2 Harç numunelerinin su emme oranları.	31
Şekil 4.3 Harç numunelerinin birim hacim ağırlık değerleri.	32
Şekil 4.4 Harç numunelerinin görünür yoğunluk değerleri.	33
Şekil 4.5 Harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri.	34
Şekil 4.6 Harç numunelerinin eğilme dayanımı değerleri.	35
Şekil 4.7 PLA ızgaralı kompozitlerin eğilme dayanımları.	37
Şekil 4.8 TOUGH PLA ızgaralı kompozitlerin eğilme dayanımları.	37
Şekil 4.9 PETG ızgaralı kompozitlerin eğilme dayanımları.	38
Şekil 4.10 ABS ızgaralı kompozitlerin eğilme dayanımları.	39
Şekil 4.11 TPU ızgaralı kompozitlerin eğilme dayanımları.	39
Şekil 4.12 Izgara malzemelerinin kalınlığa bağlı eğilme dayanımları.	40
Şekil 4.13 Izgara malzemelerinin kalınlığa bağlı eğilme dayanımlarının değişimi.	41
Şekil 4.14 Izgara malzemelerinin eğilme dayanımları.	42
Şekil 4.15 Izgara malzemelerinin eğilme dayanımlarının değişimi.	42
Şekil 4.16 Izgara geometrilerinin eğilme dayanımları.	43
Şekil 4.17 Izgara geometrilerinin eğilme dayanımlarının değişimi.	43
Şekil 4.18 PLA ızgaralı kompozitlerin kopma enerjisi.	44
Şekil 4.19 TOUGH PLA ızgaralı kompozitlerin kopma enerjisi.	45
Şekil 4.20 PETG ızgaralı kompozitlerin kopma enerjisi.	45
Şekil 4.21 ABS ızgaralı kompozitlerin kopma enerjisi.	46
Şekil 4.22 TPU ızgaralı kompozitlerin kopma enerjisi.	47
Şekil 4.23 Izgara malzemelerinin kalınlığa bağlı kopma enerjileri.	47
Şekil 4.24 Izgara malzemelerinin kopma enerjileri.	48
Şekil 4.25 Izgara geometrilerinin kalınlığa bağlı kopma enerjileri.	48
Şekil 4.26 Izgara geometrilerinin kopma enerjileri.	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Eklemeli imalat yöntemleri (Özsoy ve Duman 2017).....	4
Çizelge 3.1 Uçucu küllere ait kimyasal kompozisyon.	15
Çizelge 3.2 Filamentlere ait fiziksel ve mekanik özellikler (İnt. Kyn.1).	15
Çizelge 3.3 Filametlerin tabla ve nozzle sıcaklıkları.	19
Çizelge 3.4 C sınıfı UK ile üretilen geopolimer harçların karışım oranları.	19
Çizelge 3.5 F sınıfı UK ile üretilen geopolimer harçların karışım oranları.	20
Çizelge 3.6 Belirlenen geopolimer harç karışım oranı.	21
Çizelge 3.7 Çalışmalarda üretilecek seriler.	23



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 İSTON Türkiye’de 3B beton yazıcı teknolojisi ile bina inşası (İnt.Kyn.7)....	8
Resim 3.1 Polipropilen lif.	16
Resim 3.2 Çözelti karışımı, Sodyum hidroksit ve Sodyum silikat.	16
Resim 3.3 Filament basımında kullanılan Creality CR-6 Max 3B yazıcı.....	17
Resim 3.4 Filament sıcaklığı ve ipliklenme deneyinden bir görüntüsü.....	18
Resim 3.5 Çalışmada kullanılacak olan ızgara modeller.	18
Resim 3.6 Harcın hazırlanmasında kullanılan hobart mikseri.	21
Resim 3.7 Vibrasyon masasında numune kalıp sıkıştırma işlemi.....	22
Resim 3.8 Hazırlanan harcın kalıbına yerleştirilmesi ve vibrasyon işlemi.....	22
Resim 3.9 Numunelerin suda bekletilmesi ve ağırlık ölçümleri.....	24
Resim 3.10 Numune üzerinde uygulanan üç noktalı eğilme deneyi.....	26
Resim 3.11 Harç belirleme numuneleri üzerinde uygulanan basınç dayanım deneyi. ..	27
Resim 3.12 Darbe ile kopma enerjisi tayini / darbe dayanımı deneyi.	28
Resim 4.1 PETG – 2 mm – kare şekilli ızgara görseli.....	50
Resim 4.2 PETG – 5 mm – kare şekilli ızgara görseli.....	50
Resim 4.3 PETG – 2 mm – üçgen şekilli ızgara görseli.	51
Resim 4.4 PETG – 5 mm – üçgen şekilli ızgara görseli.	51
Resim 4.5 PETG – 2 mm – altıgen şekilli ızgara görseli.....	52
Resim 4.6 PETG – 5 mm – altıgen şekilli ızgara görseli.....	52
Resim 4.7 PETG – 2 mm – sarmal şekilli ızgara görseli.	53
Resim 4.8 PETG – 5 mm – sarmal şekilli ızgara görseli.....	53
Resim 4.9 PETG – 2 mm – kafes şekilli ızgara görseli.	54
Resim 4.10 PETG – 5 mm – kafes şekilli ızgara görseli.	54
Resim 4.11 TPU ızgara görselleri.	55

1. GİRİŞ

Dünyada karbondioksit (CO₂), insan kaynaklı iklim değişikliğine neden olan ve başta gelen tehlikeli gazlardan biridir. Dünyadaki CO₂ salınımının %5'lik bir kısmı çimento üretimi sonucu meydana gelmektedir (Gürsel ve Meral 2012). Gün geçtikçe önem kazanan çevre kanunları ve gelişen çevre bilinci sayesinde farklı sektörlerde olduğu gibi çimento sektöründe de CO₂ yayınımlarının azaltılması konusunda ciddi bir hareketlilik başlamıştır. 2022 itibariyle yıllık 73,7 milyon tonu aşan çimento üretimiyle Türk çimento sektörü de üst sıralarda yerini almaktadır (İnt.Kyn.2). Günümüzde dünyadaki eğilimlere bakıldığında inşaat sektöründe de, ekolojik faydalar, depreme dayanıklılık, düşük maliyet ve enerji tasarrufu gibi birçok amaç doğrultusunda mühendislik araştırmalarına başvurulmaktadır. Çimento üretimi esnasında açığa çıkan CO₂ salınımı ve ihtiyaç duyulan enerji maliyetinin yüksek olması en önemli dezavantajlardır.

Çimento üretimindeki olumsuzluklara karşı birçok araştırma yapılmakta ve çimentoya alternatif malzemeler geliştirmeye çalışılmaktadır. Bu malzemelerden biri de günden güne popülerliğini arttıran geopolimer esaslı malzemelerdir. Geopolimerler CO₂ yayınımlarının azaltılmasının yanında uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) vb. endüstriyel atıkların geri dönüşümünü sağlayarak, ekonomiye kazandırılmasına katkıda bulunmaktadır (Alnkaa 2019). Bağlayıcı olarak alkalilerin kullanılması ile çimentoya karşı olan talep azalacak ve buna bağlı olarak çimento üretimi sonucu açığa çıkan CO₂ emisyonu da düşecektir. Ayrıca yapı malzemesi üretiminde alkalilerin bağlayıcı madde olarak kullanılması sonucu önemli miktarda enerjiden tasarruf sağlayacaktır (Özcan 2020). Ülkemizde UK ve YFC gibi endüstriyel atıklar olarak ortaya çıkmakta ve çevre kirliliği açısından sınırlı miktarda kullanımı olsa da bu atıkların özellikler inşaat sektöründe kullanımının ülke ekonomisine katkı sağlamak ve büyük ölçüde çevre kirliliğinin önüne geçmek açısından kullanımı artırılmak önemlidir. Günümüzde sürdürülebilir mimarlık ve mühendislik bakış açısı ile geopolimer malzeme üretiminin teknik ve ekonomik potansiyeli yeniden gözden geçirilmeli, çevreye duyarlı bir bakış açısı ile ülke ekonomisine kazandırılmalı ve yapılaşma endüstrisinin faydasına sunulmalıdır (Özcan ve Güngör 2019). Geopolimer harç üretimi ve kullanımı ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır (Zhong ve Zhang 2022). Yapılan araştırmalarda

geopolimer harç ve beton üretiminde lif katkısına değinilmiş fakat bir ızgara formunda şekli ve konumu rastgele olmayan tercihli lifli kompozit olarak nitelendirilebilecek olan FDM (Eriyik biriktirme yöntemi) tipi 3B yazıcı ile belirli bir ızgara yapısına sahip olan liflerin geopolimer harç üretiminde kullanılmasına değinilmemiştir.

Dünyanın ve Ülkemizin büyük bir gerçeği olan çevresel problemler, küresel ısınma ve deprem tehlikesi, çeşitli mühendislik arayışları içerisine girmemizi sağlamıştır. Ülkemizde en önemli doğal afet kaynağı olan depremlerde inşa edilen yapıların hasar görmemesi veya bu hasarların sınırlı bir seviyede kalıp insan hayatına etki etmemesi esastır. İnşaat mühendisliğinde depreme dayanıklı yapı tasarımında yapısal elemanlara odaklanılmaktadır; fakat günümüz modern deprem standartları sadece yapısal değil yapısal olmayan bölme duvar vs. gibi yapı elemanlarının da hasar görmelerine karşı çeşitli yaklaşımlar sergilemektedir.

Bu çalışmada endüstriyel bir atık malzeme olan UK kullanarak geopolimer harç üretimi gerçekleştirilmiş, hazırlanan harcın içerisine eklemeli imalat yöntemleri arasında olan 3B yazıcılar ile farklı özelliklerde filamentler kullanılarak farklı ızgara modelleri yerleştirilmiştir. Bu sayede UK esaslı, geopolimer harç üretimi, tercihli lifli kompozit yapıya sahip olarak üretilmiştir. Çalışmada, beş farklı filament, beş farklı ızgara modeli ve iki farklı ızgara kalınlığı kullanılmıştır. Geopolimer harç parametrelerinin belirlenmesinde, iki farklı sınıfa sahip UK, farklı NaOH Molarite değerleri, farklı kum/bağlayıcı oranları, farklı likit/bağlayıcı oranları ve polipropilen lif katkılı olma durumlarına göre üretimler yapılmıştır. Bu harçlar üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik deneylerin ardından tek bir geopolimer harç karışım oranı belirlenmiştir. Bu harç karışımı ve ızgara modelleri kullanılarak geopolimer kompozitler üretilmiştir. Bu çalışma sayesinde yapısal olmayan elemanların üzerinde kaplama vs. olarak kullanılabilecek geopolimer esaslı lifli kompozit üretimi ve FDM tipi 3B yazıcı marifeti ile liflerin üretimi üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat, yaklaşık 30 yıl önce ortaya çıkmış olan, dijital modelleri kullanarak üç boyutlu yapıların üretilmesini sağlayan bir imalat türüdür. Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte, havacılık, sanayi, sağlık, biyomedikal, gıda ve inşaat sektörü olmak üzere çoğu sektörde önemli bir endüstriyel üretim sektörü haline gelmiştir. Geleneksel üretim yöntemleri temel alındığında, üretim sürecini ve işçilik maliyetlerini azaltmasına karşın inşaat sektöründe de önemli bir rol oynamaktadır (Xia ve Sanjayan 2016). Günümüzde eklemeli imalat yapılırken birden çok yöntem kullanılmaktadır. Yöntemlerden biride 3B yazıcılar ile üretimdir. 3B yazıcıların kullanımı teknolojinin ilerlemesi ile birlikte yaygınlaşmakta ve inşaat sektörü de dâhil olmak üzere çoğu sektörde aktif olarak kullanılan bir yöntemdir.

Günümüzde birden fazla eklemeli imalat süreci kullanılmaktadır. Malzemelerin birikerek katman oluşturmaları, parça oluşumu ve sistemin çalışması bakımından yöntemler arası farklılıklar gözlemlenmektedir. Eriyik biriktirme (FDM), 3B yazıcı (3D printer), seçici lazer eritme (SLM) ve seçici lazer sinterleme (SLS) gibi sistemler katman üretimini gerçekleştirmek için malzemeyi yumuşatarak veya eriterek hazır hale getirirken, stereolitografi (SLA) yöntemi ise sıvı malzemelerin birleşiminde kullanılmaktadır. Her sistemin kendine göre avantajları ve üretim açısından dezavantajları bulunmaktadır (Özsolak 2019). Çizelge 2.1’de eklemeli imalat yöntemleri, çalışma şekilleri ve kullandıkları malzemeler görülmektedir.

3B katı modeller çoğu zaman direkt olarak imalat makinesine gönderilmemektedir. Hazırlanan model ilk olarak imalat arabirimi olan STL dosyasına dönüştürülmektedir. Dosya dönüşümü gerçekleşen model üzerinde; inşa yönü, tabla yerleşimi, hata onarımı, kontrol aşaması ve destek yapılarının oluşturulması gibi ön işlem süreçlerine tabi tutulmaktadır. Ön işleminden geçirilen 3B modeller dilimlenerek imalata hazır bir şekilde imalat makinesine transfer edilir ve katman katman imalat gerçekleştirilir (Özsoy ve Duman 2017).

Çizelge 2.1 Eklemeli imalat yöntemleri (Özsoy ve Duman 2017).

Adı	Yöntemi	Çalışma Şekli	Kullanılan Malzemeler
3D P	Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi (3D Printing)	Bağlayıcı ile toz bağlama ve kurutma	Yüksek Performanslı Kompozit
3D BJ	Üç Boyutlu Bağlayıcı Püskürtme (3D Binder Jet)	Bağlayıcı ile metal toz bağlama ve sinterleme	Metal ve alaşımları
CC	Kontur İşçiliği (Contour Craft)	Macun kıvamında konsantre harcı katmanlı yığma	Seramik, Kil, Beton ve Toprak
FDM	Ergiyik Biriktirme Yöntemi (Fused Deposition Modeling)	Ektrüzyonla eritilmiş malzemenin katmanlı yığma tekniği	ABS, PLA, Poliamid, Polikarbonat, Polietilen, Polipropilen ve Hassas Döküm Mumu
EBM	Elektron Işınli Ergitme (Electron Beam Melting)	Elektron ışınli ergitme	Kobalt Krom ve Titanyum Alaşımları
SLM	Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting)	Çok jetli püskürtme ve UV ışını ile katılaştırma	Çelik ve Alüminyum gibi bazı Metaller
SLS	Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering)	Tozun lazer ile sinterlenmesi	Poliamid, Polistren, Karbon Fiber ve Alüminyum Katkılı Poliamid, Polikarbonat, Paslanmaz Çelik
SLA	Tarayarak Işıklı Kürleme Tekniği	Fotopolimer malzemenin UV ışını ile katılaştırma	Reçine Bazlı Malzemeler, Akrilik, Epoksi, Polipropilen
SGC	PolyJet Teknolojisi, Katı Tabaka Kurutma Teknolojisi (Solid Ground Curin)	Foto maskeleme ve UV ışını ile katılaştırma	Fotopolimer, Akrilik, Mum
SDM	Şekil Biriktirme İmalatı (Shape Deposition Manufacturing)	Malzemenin yığılması ve CNC işleme merkezi ile işlenmesi	Metal, Plastik, Seramik tozları
MJM	Çok Jetli Modelleme (Multi-Jet Modelling)	Çok jetli püskürtme ve UV ışını ile katılaştırma	Parafin, Mum, Termopolimerler
LOM	Tabakalı Yapıştırılmalı Parça İmalatı (Laminated Object Manufacturing)	Tabakaların lazerle kesilip yapıştırılması	Kâğıt, Plastik Köpük, Metal ve Seramik Tozu Emdirilmiş Malzemeler

Bu çalışmada ise eklemeli imalat tekniklerinden FDM yöntemi ile çalışan 3 Boyutlu yazıcı kullanılmış ve ızgara model üretimleri gerçekleştirilmiştir.

2.1.1 3B Yazıcılar ve Kullanılan Malzemeler

3B yazıcılar orijinal olarak ABD’de Massachusetts Teknoloji Enstitüsünde geliştirilmiştir. 3B yazdırmanın diğer bir tanımı ise “masaüstü imalat” olarak kayıtlara geçmiştir (Özsoy ve Duman 2017). En çok kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan 3B yazıcıların hayatımıza girmesi ile dijital ortamdaki modeller somut nesneler halinde kullanıma sunulabilmektedir. 3B yazıcılar çalışma prensibi olarak üretilmesi planlanmış olan fiziksel nesnelerin üretimini bilgisayar destekli tasarım dosyalarının

kullanımı sayesinde ince katmanlar halinde gerçekleştirmektedir. Endüstride geçmişten günümüze kadar imalatı seri üretim, geleneksel eksiltmeli imalat ve bilgi teknolojilerinin gelişimi ile birlikte, endüstri 2.0, 3.0 ve 4.0 gibi dönüm noktaları meydana gelmiştir (Tümer 2020).

3B baskılamada malzeme olarak genellikle plastik-elastomer malzemelerin kullanımı ile istenilen ürünler elde edilmektedir (Çelik ve Özkan 2017). 3B baskılamada kullanılan Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) teknolojisinde, 3B yazıcıya yüklenebilen tel formunda makaraya sarılı haldeki filamentler kullanılmaktadır (Kaygusuz ve Özerinç 2018). FDM teknolojisinde her katman bir önceki katmana yarı eriyik bir şekilde yapıştırılmaktadır. Kullanılan filamentlerin baskı hızları kontrol edilebilmekte ve baskı alınan malzeme miktarının kontrolü sayesinde hassas parça üretimi gerçekleştirilebilmektedir. FDM teknolojisinde; Biopolimer Polilaktik Asit (PLA), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Polietilen Tereftalat (PETG), Termo Plastik Poliüretan (TPU) gibi birçok polimer malzeme filament olarak kullanılabilir.

FDM tekniğinde üretimin kolay olması, zehirsiz maddelerin kullanılması, tek adımlı ve kısa işlem süresi, yüksek doğruluk ve güvenli olması bu yöntemin kullanımı açısından avantaj sağlamaktadır. Yüzey kalitesinin düşüklüğü, değişken parça yoğunluğu ve tek ekstrüzyon yöntemi ile yoğunluğu yüksek parçaların imalat süresinin uzun olması ise dezavantajları arasında yer almaktadır (Güleç 2019). Bu çalışmada 3B yazıcıda filament olarak PLA, Touch PLA, ABS, PETG ve TPU kullanılmıştır.

2.1.1.1 PLA ve Touch PLA Filament

PLA organik kökenden gelen filament türü olarak nitelendirilmektedir. Mısır nişastası ve şeker kamışından üretilmiş olan termoplastik ve organik bir biyopolimerdir. PLA filamentlerde ABS'ye göre daha düşük sıcaklıklarda baskı alınmaktadır. Biyolojik olarak parçalanabilen bir yapısı vardır ve bu özelliği ile birçok filament türünden çok daha çevrecidir. ABS'ye göre basımı oldukça kolaydır. Touch PLA filamenti ise PLA filament ile benzer özellikler gösterse de yapı olarak PLA filamente göre daha sert ve gevrek bir malzemedir (İnt. Kyn.1, İnt. Kyn.3, İnt. Kyn.4).

2.1.1.2 ABS Filament

ABS, stiren ve akrilonitrilin polimerleştirilmesi sonucu elde edilen bir terpolimerdir. Yaygın olan diğer polimerler ile karşılaştırıldığında darbe direnci, tokluk, sağlamlık ve ısı direnci gibi daha uygun mekanik özelliklere sahiptir. Bu yüzden değişken hava koşullarına karşı kullanımı tavsiye edilmektedir. PLA filamente göre daha sünek bir yapıya sahip olan ABS filamentin basınç dayanımı da PLA filamente göre daha yüksektir. Teknik özellikleri itibari ile ABS daha genel amaçlı kullanım alanına sahiptir. Telefon kılıflarında, oyuncaklarda, otomobillerde, elektrik ekipmanlarında ve birçok alanda ABS kullanılmaktadır (İnt.Kyn.1, İnt.Kyn.5, İnt.Kyn.7).

2.1.1.3 PETG Filament

Polietilen tereftalat, polyester ailesinin en çok kullanılan termoplastik polimer reçinesidir. Genellikle gıda kapları ve giysiler için üretilen elyaflar da kullanılmaktadır. Basımı PLA kadar kolaydır ve hammadde olarak tamamen geri dönüştürülebilir. PLA'dan kolay kullanımı ve ABS'den daha dayanıklı olması sebebi ile PLA ve ABS arasında değerlendirilmektedir. Ayrıca hafif ve sünek bir yapıya sahiptir. PETG havadaki nemi emdiğinden serin ve kuru bir ortamda saklanması gerekir. Basım sıcaklığı ise 220°C–250°C değerleri arasındadır. Yatak sıcaklığının ise 60°C–70°C arasında olması önerilen bir filament türüdür (İnt.Kyn.1, İnt.Kyn.3, İnt.Kyn.4).

2.1.1.4 TPU Filament

TPU, özel bir TPE çeşidi ve 3D yazıcı filamentidir. TPU filament, TPE türü malzemelere göre biraz daha katı bir yapıya sahip olmakla birlikte soğuk hava şartlarında sünekliğini daha iyi koruma özelliği taşımaktadır. Örnek olarak bir diğer TPE çeşidi olan TPC ise TPU kadar yaygın kullanılan bir filament türü değildir. Temel ayrıcalığı ise, kimyasal etkisine, Ultraviyole ışınına ve yüksek ısıya maruz kalması durumunda deforme olmadan göstermiş olduğu yüksek dirençtir. Basım sıcaklığı 210°C–235°C değerleri arasındadır. Yatak sıcaklığı ise 60°C–70°C arasında önerilir. Giyilebilir malzemeler (ayakkabı, bileklik vb.), oyuncaklar ve telefon kılıfları gibi kullanım alanlarına sahiptirler. TPU

filamentin başlıca özellikleri ise; Yüksek aşınma direnci, düşük sıcaklık performansı, yüksek kesme mukavemeti, yüksek süneklik ve şeffaflık olarak karşımıza çıkmaktadır (İnt.Kyn.2, İnt.Kyn.4, İnt.Kyn.6).

2.1.2 İnşaat Sektöründe Eklemeli İmalat ve 3B Yazıcılar

İnsanoğlu yaratılışından itibaren en temel gereksinimlerinden biri olan barınma ihtiyacını yerine getirebilmek için her zaman bir çözüm yolu aramıştır. Günümüz teknolojisinde temel ihtiyaçlarımız için çok çeşitli yöntemler ve teknolojik gelişmeler kullanılmaktadır. Eklemeli imalat teknolojileri yakın geçmişte önemini arttırarak ana akım haline gelmiştir. Bu teknolojiler üzerinde yapılmakta olan mevcut araştırmaların kullanıcı analizi büyük ölçekte teorik olmakla birlikte genellikle mekanizmalara odaklanmaktadır. Bu teknolojiler gün geçtikçe temel iş modellerine dönüşmekte ve kullanıcıların (hem iş hem de tüketici) düşüncesini benimsemesine yardımcı olmaktadır fakat henüz kullanımı istenildiği ölçüde yaygınlaşamamıştır (Wu vd. 2018).

Katmanlı üretim yöntemi kullanılarak, dijital ortamda hazırlanmış olan 3B bir model dışarıdan herhangi bir işleme tabi tutulmadan son ürün haline gelebilmekte ve üretimi tamamlanabilmektedir. Çevre dostu ve geri dönüşüm malzemelerinin kullanımı ile malzeme israfının önüne geçmekte ve aynı zamanda zamandan tasarruf etmemize olanak sağlamaktadır. Geleneksel yöntemlerin aksine, katmanlı üretim sayesinde tüm parçalar tek seferde üretilmekte ve bir bütün haline gelebilmektedir (Güleç 2019). İnşaat sektöründe 3B baskı yöntemi, yerinde inşaat ve prefabrikasyon için kullanılmaya başlanan ve gelişim göstermekte olan bir yöntemdir. Üretim aşamalarında çevre dostu ve geri dönüşüm malzemeleri kullanımında UK ve YFC gibi açığa çıkan endüstriyel atıklardan üretilen geopolimerler inşaat sektörü için uygun bir malzeme olarak belirlenmiştir (Raza vd. 2022).

İnşaatlarda püskürtme beton, otomatik tuğla döşeme gibi birçok otomasyon teknikleri bulunmaktadır. İnşa edilecek yapılarda 3B baskılı beton bileşenleri üretilmektedir. İlerleyen zamanlarda gelişim sürecine bağlı olarak hem elyaf takviyesi hem de beton aynı anda katmanlı olabilmektedir. Tek katman içerisinde beton ve elyafın birlikte

kullanımı sayesinde çok daha kısa sürede daha fazla özelliğe sahip üretim şekillerinin ortaya çıkmasını sağlayacaktır (Tümer 2020, Gani 1997). Resim 2.1’de İSTON Türkiye’de ilk defa 3B beton yazıcı teknolojisi ile ofis kullanımlı bina inşası yapımı gözlemlenmektedir (İnt.Kyn.7).



Resim 2.1 İSTON Türkiye’de 3B beton yazıcı teknolojisi ile bina inşası (İnt.Kyn.7)

Son çeyrek asırda 3B yazıcılar, inşaat sektöründe otomasyon üretiminin kilit noktası olarak geliştirilmiş ve mimari tasarımlarda özgür düşüncenin kapısını açarak, sınırları kaldırmaya yardımcı olmuştur. Üretim ve imalat süresince; düşük maliyet, verimli zaman, uygulama aşamalarında azalma ve üretim hızlılığı açısından çok iyi bir teknoloji olmasına karşın, henüz dünyada ve ülkemizde yeterince yaygınlaşamamıştır (Teixeira J. vd. ,2023).

2.2 Geopolimerler

İnşaat sektörü, çevresel bozulmalarda, çevre ve hava kirliliğinde ve doğal kaynakların tüketilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Yapı sektöründe, geçmişten günümüze kadar olan süreçte, yüksek enerji tüketen ve açığa çıkan CO₂ salınımı ile hava kirliliğine yol açan birçok malzeme kullanılmaktadır. Yapı sektörünün dünyada CO₂ salınımının

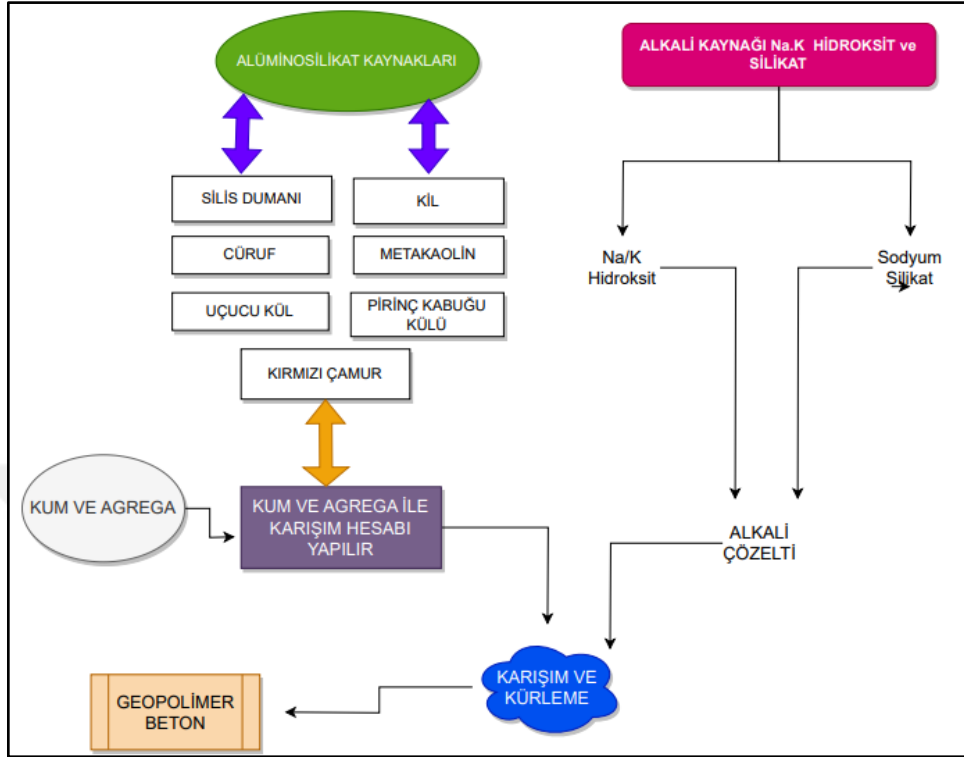
%40'ından, küresel enerji tüketiminin ise yaklaşık %33'ünden sorumlu olduğu tahmin edilmektedir. İnşaat sektöründe çevre ve hava kirliliğine yol açan en etken inşaat malzeme ise Portland Çimentosu bazlı ürünlerdir. İklimde ve çevresel etkilerde olumlu bir değişiklik yapmak ve kaynaklarımızı korumak amacı ile düşük CO₂ salınımına sahip malzemeler tercih edilmelidir (Moujoud vd. 2023). Tercih edilen bu malzemelerden biri de geopolimer harç ve geopolimer betondur. Geopolimer harçlar, standart Portland Çimentosu tabanlı harçlar yerine kullanılabilecek yüksek potansiyelli yeni nesil inorganik bağlayıcılardır.

Geopolimer malzemelerin pürüzsüz ve parlak bir yüzeye sahip olmaları ile polimer bir malzeme olmaları ifadenin doğruluğunu ispatlamaktadır. Geopolimer prosesi, yüksek sıcaklıklara çıkılarak eritme, eritme ya da bir füzyon sinterleme değil polimerleşme sürecidir. Geopolimerler Mg-Al-Na-K-P-Ca-Si gibi mineral yapıya sahip olan monomerlerin birbirleri ile polikondenzasyonu sonucu açığa çıkan kompleks zincir bağlı polimerler kurması ile meydana gelmektedir (Örklemez 2019).

Geopolimerler, C-S-H bütünlüğünden meydana gelen geleneksel Portland Çimentosundan farklı olarak, Al ve Si muhteva eden malzemelerin alkali ortamda aktive olmasıyla meydana gelen malzemelerdir. UK'nın temin edilmesi kolay olması ve düşük maliyetli olmasından dolayı alüminosilikat kaynağı olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Kuranlı 2020).

Alkali ortamda Si-O-Al ve Si-O-Si kovalent bağ oluşumları ile polimerizasyon ilerler. Günümüzde fazlasıyla açığa çıkan endüstri atıklarının da kullanılması neticesinde geopolimer bağlayıcılar geleneksel Portland Çimentosuyla karşılaştırıldığı takdirde CO₂ miktarını %80 azaltabilecektir. Geopolimerlerin sentezi için periyodik cetvelde yer alan 1. grup elementleri ile oluşturulan bazik nitelikli çözeltiler gerekmektedir. Bu iki çözeltinin birbirinden farkı, alkali hidroksit çözeltisinde silikat muhtevası çok az bir oranda bulunmaktadır. Bu nedenle genel olarak iki çeşit alkali bir arada kullanılır. Böylelikle meydana gelen geopolimer esaslı ürünler kullanılan aktifleştirici türüne göre meydana gelen oluşum ve nitelik bakımından farklılıklar oluşabilmektedir (Gençel ve Tokay 2019). Geopolimerizasyon prosesi Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Bu çalışmada

alüminasilikat kaynağı olarak UK kullanılmıştır.



Şekil 2.1 Geopolimerizasyon prosesi.

2.2.1 Uçucu Kül (UK) ve Özellikleri

Dünyamızda enerjiye talep her geçen gün artmaktadır. Termik santrallerde elektrik enerjisinin eldesi için kömürün yanması sonucu endüstriyel atık olarak açığa çıkan UK enerji talebi ile doğru orantılı bir şekilde enerji santrallerinde milyonlarca ton açığa çıkan bir malzemedir (Canpolat ve Yılmaz 2002, Aruntaş 2006). Ülkemizde 2022 yılında elektrik üretiminin %34,6'sı kömürden elde edilmiştir (İnt. Kyn.8). Uçucu kül, atık bir madde olması nedeniyle çevre kirliliğine neden olmaktadır.

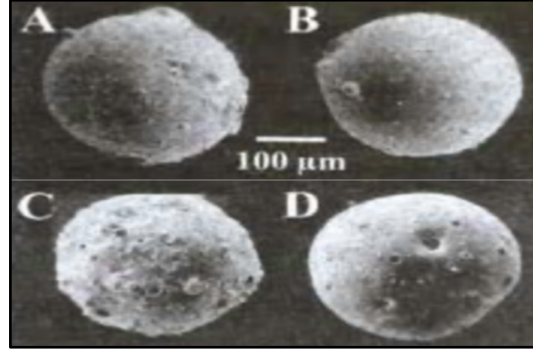
Uçucu külün farklı alanlarda ve sektörlerde kullanılması hem külü depolayanlar için hem de çevre kirliliği açısından ekonomik faydalar sağlamaktadır. Ayrıca, kullanıcı açısından da üreteceği yeni ürünlerde veya uygulamalarda çeşitli teknik faydalar sağlayan bir üründür. Birçok alanda kullanılabilir ve değerlendirilebilir olmasına rağmen, her yıl Dünya'da ortaya çıkan 600 milyon ton UK'nın sadece %15'i kadar küçük bir kısmı

değerlendirilmektedir (Örklemez 2019). Açığa çıkan UK'nın büyük bir kısmı beton endüstrisinde kullanılmakta ve bu endüstride önemli bir yere sahip olmaktadır. Geopolimerle ilgili yapılan güncel çalışmalar sayesinde UK çevreci ve değerli bir malzemeye dönüşmüş durumdadır (Arioz vd. 2012).

Uçucu küller yol drenaj kanallarında, briket yapımında, agrega olarak otoyol ve köprü yolu yapımında da kullanılmaktadır. Bunun yanında yaygın olarak, tuğla, gazbeton, yalıtım malzemeleri, cam, kerpiç ve çeşitli yapı malzemelerinin üretiminde kullanılmaktadır (Tuygun 2002). Örnek olarak; tasarımı 100 senelik yapı ömrüne göre yapılmış olan Fransa ve İngiltere arasındaki hızlı tren hattının tünel inşasında uçucu kül kullanılmıştır (Karakulak 2019).

Beton karışımı içerisinde ince yapıdaki agreganın yerine belli oranda uçucu kül kullanılarak yapılan çalışmalarda olumlu sonuçlar elde edilmiş ve ince agreganın yerine uçucu külün kullanılabileceği doğrulanmıştır. Uçucu külden hafif yapıda agrega elde edilmesi konusunda literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklıkta sinterlenerek yapay iri hafif agrega halinde üretimi gerçekleştirilen uçucu kül, hafif beton üretiminde kullanılmış olup uçucu külün beton içerisindeki özellikleri araştırılmıştır. Uçucu küllerin puzolanik özellikleri bulunması sayesinde çimento olarak da avantajlı bir şekilde kullanılmaktadır. Daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olmasından dolayı uçucu küller, bağlayıcı hacminin artışı ve çimentodan ekonomi elde edilmesini sağlamaktadır (Kaya 2016).

Uçucu küller renk bakımından çimentoya göre daha koyu renkte olmasına karşın renkleri, koyu kahve ile açık krem arasında değişmektedir. İyi yanmamış uçucu külün rengi, iyi yanmış uçucu külün rengine göre daha koyudur. Bu renk farkının nedeni karbon taneciklerin yanıp yanmama durumudur (Tokyay ve Erdoğan 1998). Uçucu küller yumuşak ve çok ince taneli malzemelerdir. Süngerimsi yapısı ve küresel tanecikleri mikroskop görülebilmektedir. Taneciklerin morfolojik yapısı Şekil 2.2' de verilmiştir (Özcan ve Güngör 2019, Özcan 2020). Şekil de A; yüzeyinde birikintiler ve sıvı damlaları olan küresel taneciği, B; camsı küresel taneciği, C; yüzeyi düzensiz boşluklar içeren taneciği, D; boşluklu küresel taneciği göstermektedir.



Şekil 2.2 UK taneciklerinin morfolojik yapısı (Özcan 2020).

Topçu ve Sofuoğlu (2020) Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve palmiye yağı yakıtı külü gibi bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerin farklı sıcaklıklarda, kalsiyum içeriklerinde ve farklı aktivatör çözeltiler ile davranışlarını irdelleyen çalışmasında; CaO oranının artması, işlenebilirliği ve priz süresini azalttığını tespit etmiştir. Ayrıca sadece aktivatör olarak sodyum hidroksit çözeltisinin kullanımı ile işlenebilirliğin azaldığı, priz süresinin arttığını gözlemlemiştir. Bir başka yapılan çalışmaya göre: Uçucu küller ile üretilen numunelerde ısıtma işlemine rağmen basınç dayanım değerlerinde azalma meydana geldiği, molarite artışıyla beraber Al-O ve Si-O bağlarında gevşeme meydana geldiği görülmüştür (Tokay 2019).

Çelik vd. (2003) UK ile yaptığı çalışmada hem Seyitömer hem de Çayırhan UK'lerinin bütün ikame oranlarında çimento hamurunun priz sürelerini arttırdığını gözlemlemiştir. Betonların su ihtiyacı, içerisinde bulunan uçucu küllerin tane boyutlarının kalınlığına ve inceliğine göre farklılık göstermektedir. Uçucu küllerin kalınlığının artması su ihtiyacını azaltmaktadır. Genellikle küresel şekle sahip olan uçucu küller betonda daha az su gereksinimine neden olur. Bu konuyla ilgili olarak Schießl ve Härdtl'in yapmış olduğu deneysel çalışmalarda, uçucu küllerin tane boyutunun çok ince olmasının betonun işlenebilirliğinin artmasına olumlu katkı sağladığını göstermişlerdir (Karakulak 2019).

UK içinde bulunan CaO oranına göre (sınır değer %10), düşük kireç-kalsiyumlu veya yüksek kireçli-kalsiyumlu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Mercan, 2007). Uçucu küller, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ toplamı %50'nin üzerinde ise C sınıfı, %70 üzerinde ise F sınıfı uçucu kül olarak gruplanmaktadır (ASTM 2019). Bu tez çalışmasında geopolimer harç karışımı belirlenmesi esnasından hem C hem de F sınıfı UK kullanılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Kullanılan Malzemeler

Bu araştırmada eklemeli imalat teknolojisinden faydalanılarak elde edilen ızgara malzemelerin içerisine yerleştirileceği UK esaslı geopolimer harç üretimi gerçekleştirilmiştir. Harç üretiminde UK, kum, polipropilen lif, NaOH çözeltisi ve sodyum silikat (cam suyu) kullanılmıştır. Harç içerisinde kullanılmak üzere hazırlanan ızgara modellerin üretiminde ise hammadde olarak polimer malzeme olan filamentler ve baskı aşamasının gerçekleştirildiği 3B yazıcı kullanılmıştır. Harç içerisinde kullanılan ızgara modeller 2 farklı kalınlık ve 5 farklı modele sahip olacak şekilde, 5 çeşit farklı özellikteki filamentten üretilmiştir.

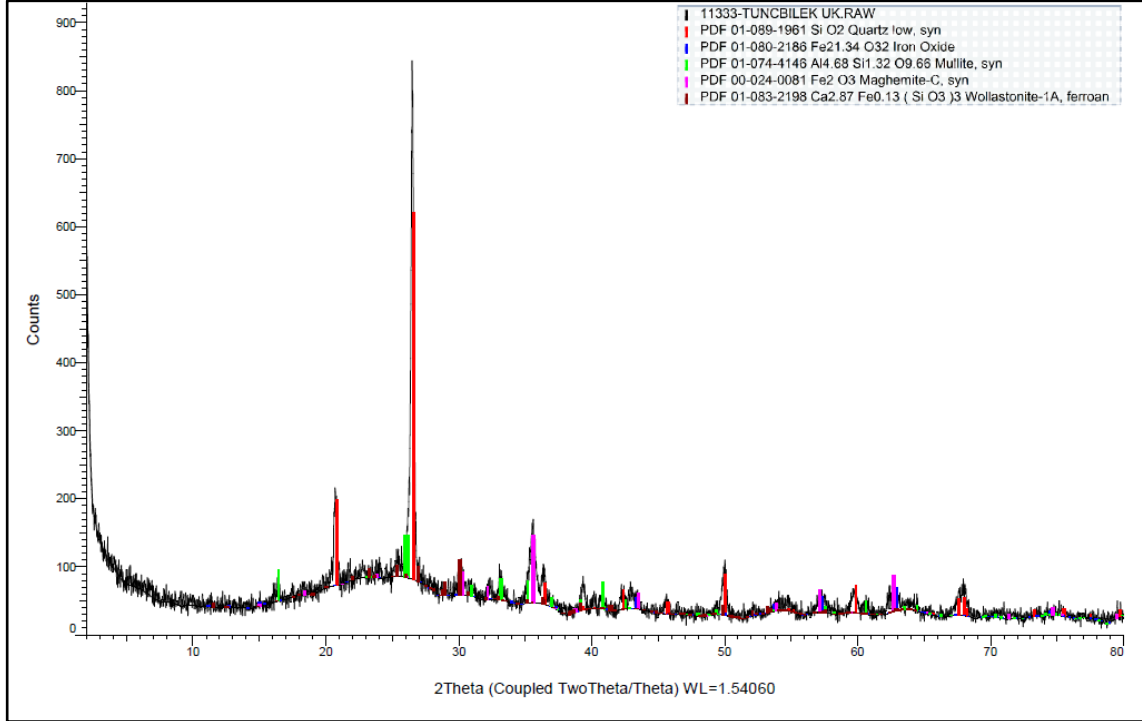
3.1.1 Kum

Çalışmada Afyonkarahisar bölgesinden temin edilen silis kumu 4 mm'lik elekten geçirilecek, elek altı malzeme kullanılmıştır. Deneylerde kullanılmadan önce kum 24 saat etüvde kurumaya bırakılmış ve daha sonrasında harç içerisinde kullanılmıştır.

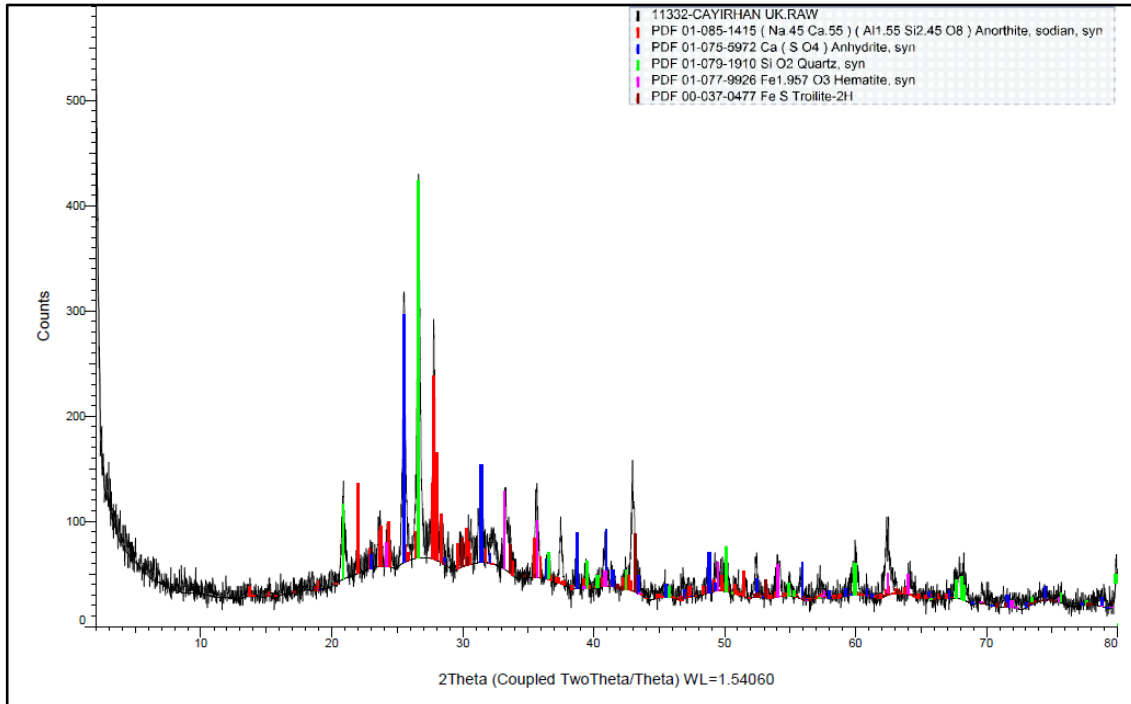
3.1.2 Uçucu Kül

Bu tez çalışmasında iki farklı sınıfta UK kül geopolimer harcın alüminasilikat kaynağı olarak kullanılmıştır. Bölgedeki beton fabrikaları aracılığı ile temin edilen uçucu küller Çayırhan ve Tunçbilek termik santrallerine aittir. ASTM C 618 standardına göre; Çayırhan uçucu külü $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %59,2 olması nedeniyle ve CaO oranının %18,4'lük değer ile %10'dan büyük olması sebebi ile yüksek kalsiyum içerikli C sınıfı UK olarak sınıflandırılmaktadır. Tunçbilek termik santralinden temin edilen UK ise bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı %86,5 çıkması sebebi ile ve CaO yüzdesinin %4 olmasından dolayı düşük kalsiyum içerikli F sınıfı UK olarak tanımlanmaktadır. Düşük kireç içerikli F sınıfı özellikleri sağlayan Tunçbilek UK (Kavasoğlu 2019) ve C sınıfı özellikleri taşıyan Çayırhan UK'nın kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1'de verilmiştir. Bu uçucu küllere ait XRD grafikleri Şekil 3.1

ve 3.2'deki gibidir. Bu iki sınıf UK ile yapılan deneme üretimlerinin ardından geopolimer harç üretiminde F sınıfı UK ile devam edilmesine karar verilmiştir.



Şekil 3.3 F sınıfı UK'nın XRD analizi.



Şekil 3.4 C sınıfı UK'nın XRD analizi.

Çizelge 3.2 Uçucu küllere ait kimyasal kompozisyon.

KOMPOZİSYON	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO	Ig	Toplam
C Sınıfı UK	39,2	11,5	8,5	5,3	1,4	3,8	6,2	18,4	3,5	97,8
F Sınıfı UK	55,6	21,3	9,6	4,5	0,2	1,1	0,6	4,0	1,0	97,8

3.1.3 Filamentler

Yapılan bu çalışmada harç içerisinde ızgara modeller kullanılmış ve kompozit malzeme elde edilmiştir. Harç içerisinde kullanılan bu modeller 5 farklı filamentten elde edilmiştir. Bu filament malzemeler sırası ile PLA, TOUGH PLA, ABS, PETG, TPU olarak adlandırılan polimer malzemelerdir. Tez çalışmasında harç içerisinde kullanılan ızgara modelin filament ham maddeleri hakkında ilgili firmanın sunmuş olduğu fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Filamentlere ait fiziksel ve mekanik özellikler (İnt. Kyn.1).

	PLA	Tough PLA	ABS	PETG	TPU	Test Metodu	Birim
Özkütle	1,23	1,22	1,03	1,28	1,2	ISO 1183	g/cm ³
Eriyik Akış İndeksi	17,3	17,3	5,2	20	-	ISO 1183	g/10dk
Çekme Mukavemeti	56	50	44	53	45	ISO 527	MPa
Elastik Modül	2850	2400	2100	3000	-	ISO 527	MPa
Kopma Uzaması	7	50	40	30	600	ISO 527	%
Çentikli Darbe Testi	14,2	36	38	14,2	-	ISO 179	kJ/m ²
Isıda Eğilme Sıcaklığı	55	58	95	80	-	ASTM D648	°C
Camsı Geçiş Sıcaklığı	55-60	55-65	95-105	80-85	-	ASTM D3418	°C
Yüzey direnci	>10 ¹²	>10 ¹²	>10 ¹²	>10 ¹²	>10 ¹²	ASTM D257	Ohm/sq
Kurutma Sıcaklığı	-	-	-	-	85	ISO 37	°C
Yırtılma Dayanımı	-	-	-	-	175	ISO37	kN/m
Aşınma Dayanımı	-	-	-	-	45	ISO4649	mm ²
Sertlik	-	-	-	-	95	ISO 868	Shore A

3.1.3 Lif

Geopolimer harç içerisine yerleştirilecek olan ızgaraların kılcal çatlaklara sebebiyet verebileceği düşüncesi ile polipropilen lif kullanımına karar verilmiş ve deneme üretimlerinde diğer mekanik özelliklere olumsuz etki yapmayacak oranda lif oranı

belirlenmiştir. Çalışmada TS EN 14889-2 özelliklerine ve standartlarına uygun, dayanıklılığı, darbe dayanımını ve aşınma direncini arttıran aynı zamanda rötne çatlaklarını azaltan özelliklere sahip olan Resim 3.1’de gösterilmiş olan SikaFiber PPM-12 polipropilen lif kullanılmıştır (TSE 2006).



Resim 3.2 Polipropilen lif.

3.1.4 Çözeltiler

Yapılan deneme çalışmada uçucu külü aktifleştirmek için 10 Mol ve 6 Mol olmak üzere Sodyum Hidroksit (NaOH) çözeltisi, NaOH çözeltisine oranla 1/2 ve 2/1 oranlarında Sodyum Silikat (SS) cam suyu ($\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$) kullanılmıştır. Nihai harç üretiminde 6 Mol NaOH ve 1/2 NaOH/SS kullanılmıştır. Çözeltilere ait görseller Resim 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.3 Çözelti karışımı, Sodyum hidroksit ve Sodyum silikat.

3.2 Numune Üretimi

Harç üretimi ve filament üretimi ile numune hazırlanması bu başlık altında anlatılmıştır.

3.2.1 Filament Üretimi

Harç içerisinde kullanılmak üzere hazırlanan mesh modellerinin basımı için Creality CR-6 Max 3B yazıcı modeli kullanılmıştır. Üç boyutlu yazıcıda kullanılacak olan beş farklı filament literatür araştırması yapılarak belirlenmiştir. Üç boyutlu yazıcı temin edildikten sonra kurulumu gerçekleştirilmiştir. Yazıcıya ait görüntü Resim 3.3’de verilmiştir.

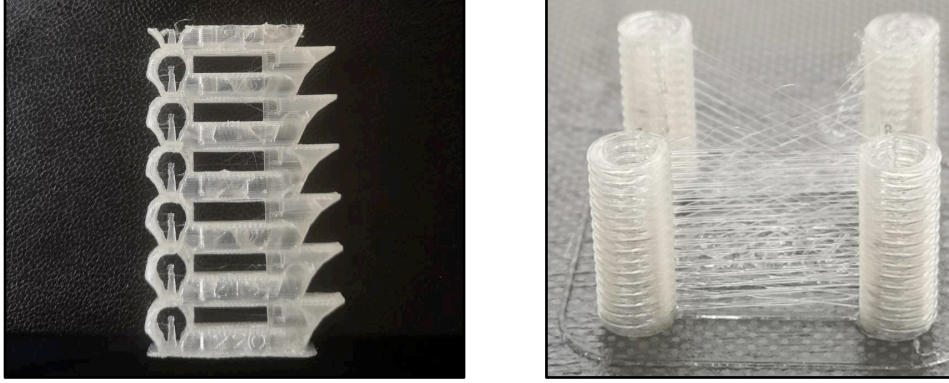


Resim 3.4 Filament basımında kullanılan Creality CR-6 Max 3B yazıcı.

Filamentler için uygun nozzel ve tabla sıcaklıklarının belirlenebilmesi için birçok kalibrasyon ayarı ve deneme baskıları yapılarak filamentler ve 3B yazıcı ayarları hakkında bilgi birikimi oluşturulmuştur. Sıcaklık kalibrasyonu ve ipliklenme ayarı yapılmış ve Resim 3.4’de verilmiştir.

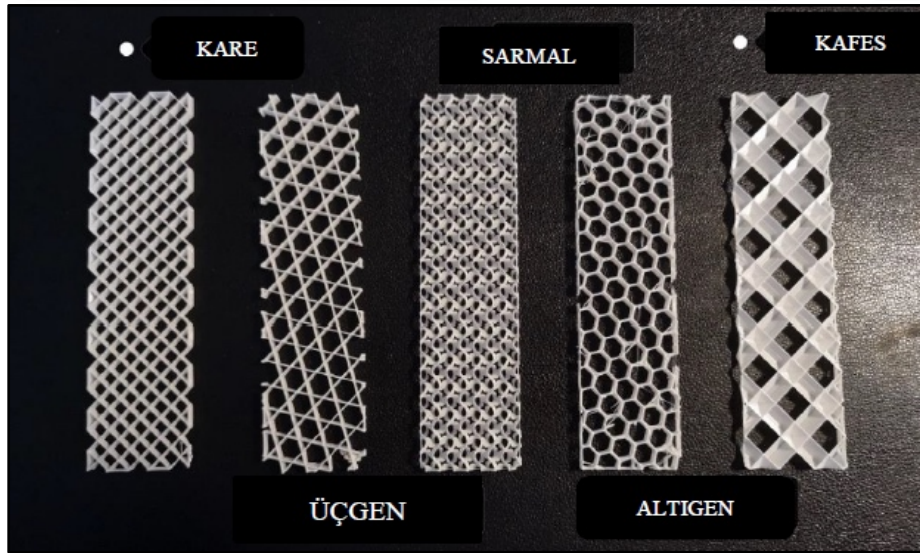
Hazırlanacak ızgara modellerde kullanılacak olan filamentlerin sıcaklığa karşı vereceği tepki ve yazıcının ucundan çıkarken oluşturacağı ipliklenme vb. hataların önüne geçmek

amacı ile bu deneyler yapılmış ve veriler kaydedilip yorumlanmıştır. Filamentin çıkış sıcaklığına bağlı olarak ipliklenme oranlarında değişimler gözlemlenmiştir.



Resim 3.5 Filament sıcaklığı ve ipliklenme deneyinden bir görüntüsü.

Geopolimer kompozit elemanların içerisindeki ızgara yapısını oluşturmak için beş farklı tasarım (Kare, üçgen, sarmal, altıgen, kafes) belirlenmiştir. Bu modeller ve adlandırmaları Resim 3.5’de verilmiştir. Böylece farklı geometri ve farklı filament çeşitlerinin etkileri bu çalışmada dikkate alınmış olacaktır.



Resim 3. 6 Çalışmada kullanılacak olan ızgara modeller.

3B yazıcı ile üretilecek modellerin tasarımı ile ilgili çalışmalar tamamlandıktan sonra seçilen filament malzemeleri ile ızgara modellerin üretimine başlanmıştır. Üç boyutlu yazıcıda üretilen numunelerin döküm yönüne göre dikey (Vertical) X,Y

oryantasyonun'da baskılanan test numunesi parametreleri; 0,2 mm katman kalınlığı, %100 doluluk, baskı hızı ise TPU da 30 mm/sn diğer filamentlerde ise 50 mm/sn dir. Ayrıca TPU da Z ekseninde geri çekme kapatılmıştır. Tez çalışmasında kullanılacak olan filamentler seçilirken 3B yazıcının nozzel ve tabla sıcaklık sınırlarına uygun olacak şekilde seçim yapılmıştır. Kullanılan filamentler için yapılan denemeler sonucunda seçilen sıcaklıklar Çizelge 3.3'deki gibidir.

Çizelge 3.4 Filamentlerin tabla ve nozzle sıcaklıkları.

Sıcaklık (°C)	PLA	Tough PLA	ABS	PETG	TPU
Tabla Sıcaklığı	60	65	100	70	70
İşleme Sıcaklığı	210	220	225	240	220

3.2.2 Geopolimer Harç Üretimi

Geopolimer harç içerisine yerleştirilecek olan ızgaralar ile elde edilecek kompozit malzemenin araştırılmasında değişken olarak ızgara malzemesinin cinsine, kalınlığına ve ızgara dokusuna odaklanılmıştır. Bu noktada kompozit malzeme üretiminde kullanılacak geopolimer harç için bir çeşit harç kullanılması ön görülmüştür. Bu harcın karışım içeriği ve karışım oranları için birçok deneme gerçekleştirilecek en ideal karışıma karar verilmiştir.

Çizelge 3.5 C sınıfı UK ile üretilen geopolimer harçların karışım oranları.

NaOH (mol)	NaOH (ml)	SS (ml)	Kum (g)	Kül (g)	NaOH/SS	Kum/Kül	likit/kül	lif (g)
10M	240	480	750	1500	0,5	0,5	0,48	0
10M	180	360	1100	1100	0,5	1	0,49	0
10M	120	240	1200	600	0,5	2	0,60	0
10M	240	480	750	1500	0,5	0,5	0,48	2
10M	180	360	1100	1100	0,5	1	0,49	2
10M	120	240	1200	600	0,5	2	0,60	2

Deneme üretimlerinde iki farklı sınıfta UK (C ve F sınıfı), iki farklı NaOH molaritesi (6 ve 10 M), üç farklı likit/kül oranı (0,48, 0,49 ve 0,6), üç farklı kum/kül oranı (0,5, 1 ve 2)

ve iki farklı lif durumu (lifli ve lifsiz) dikkate alınmıştır. C sınıfı UK için karışım oranları Çizelge 3.4’de verildiği gibidir.

Üretilen harçlarda kıvam, porozite ve malzeme dayanımlarında daha iyi veriler elde etmek amacı ile karışım oranları, molariteye ve UK sınıfı değiştirilip tekrar numune üretimleri gerçekleştirilmiş. F sınıfı UK ile üretilen serilerin karışım oranları Çizelge 3.5 de görülmektedir.

Çizelge 3.6 F sınıfı UK ile üretilen geopolimer harçların karışım oranları.

NaOH (mol)	NaOH (ml)	SS (ml)	Kum (g)	Kül (g)	NaOH/SS	Kum/Kül	likit/kül	lif (g)
6M	240	480	600	1200	0,5	0,5	0,60	0
6M	180	360	900	900	0,5	1	0,60	0
6M	120	240	1200	600	0,5	2	0,60	0
6M	240	480	600	1200	0,5	0,5	0,60	2
6M	180	360	900	900	0,5	1	0,60	2
6M	120	240	1200	600	0,5	2	0,60	2

Malzeme miktarları 0,01 g duyarlıklı elektronik tartı ile ölçülmüştür. Ölçümler tamamlandıktan sonra karıştırıcıya ilk olarak uçucu kül konulmuştur. Aynı bir kapta 1 gün önceden hazırlanan NaOH çözeltisi ve sıvı halde bulunan SS, belirlenen karışım oranlarında karıştırılarak bekletilmeden UK’nın üstüne eklenmiştir. Hazırlanan karışım mikserde 60 sn. karıştırıldıktan sonra 24 saat etüvde bekletilerek neminden arınmış olan silis kumu eklenmiş ve 60 saniye daha karıştırılarak karışım tamamlanmıştır (Resim 3.6). Karışımda lif olan numunelerde çözeltiyle aynı aşamada lif eklemesi yapılmıştır.

Deneysel çalışmaların ardından elde edilen sonuçların verildiği bulgular bölümünde kararlaştırılan harcın karışım oranı Çizelge 3.6’deki gibidir. Deneme üretimleri yapılırken; harç serilerinin etiketlenmesi kum/kül oranı, normal veya lifli olma durumu ve likit/kül oranı sırası kullanılarak yapılmıştır. (Örneğin 0,5-L-0,60 etiketi; kum/kül oranı:0,5, L: lifli, likit/kül oranı:0,60 anlamına gelmektedir).

Çizelge 3.7 Belirlenen geopolimer harç karışım oranı.

Kür Süresi (saat)	Kür Sıcaklığı (°C)	NaOH (mol)	NaOH (ml)	SS (ml)	Kum (g)	Kül (g)	Lif (g)	Kum /Kül	Likit /Kül	NaOH /SS
24	80	6M	120	240	1200	600	2	2	0,60	0,5



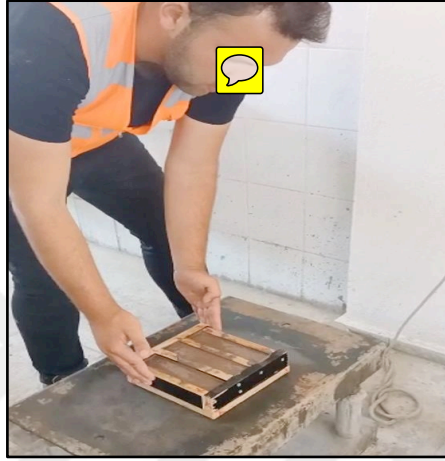
Resim 3.7 Harcın hazırlanmasında kullanılan hobart mikseri.

Hazırlanan karışım 4x4x16 cm boyutlarında olan prizmatik numune kalıplarına konulmuş ve sıkıştırma için Resim 3.7’deki vibrasyon masasına alınmıştır. Burada sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra numune bekletilmeden etüve alınmış, 24 saat 80 °C de kür işlemi yapılmıştır.

Harçlar üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik deneyler sonucu belirlenen harç karışım oranları ve UK ile numuneler üretilmiştir. Üretim aşamasında 5 çeşit farklı özellikteki filament malzemesi (PLA, Tough PLA, ABS, PETG, TPU), 5 çeşit farklı ızgara modeli (Kare, üçgen, sarmal, altıgen, kafes) ve 2 farklı kalınlık (2mm ve 5mm) için seriler seçilmiştir. Bir de içinde ızgara olmayan sadece harçtan oluşan referans ile toplam 51 seri 3’er adet olarak, geopolimer esaslı lifli kompozit numuneleri 2x5x16 cm ebatlarında üretilmiştir.

İlk olarak belirlenen karışım oranına göre harç hazırlandı ve 2x5x16 cm ebatlarındaki daha önceden yağlanıp hazırlanan kalıpların içine yerleştirildi. Yerleşen harcın üzerine oluşturulan mesh modelleri tek tek ortalayacak şekilde oturtuldu. Modellerin üzerlerine tekrardan harç eklenerek vibrasyon tablasının üstüne alındı ve yerleştirme işlemi

gerçekleştirildi. Numune kalıbına sırası ile 1/2 oranında harç yerleştirilip üzerine ızgara model konulmuştur. Geri kalan 1/2 lik kısmına da harç yerleştirilip sıkıştırma ve titreşim işlemi gerçekleştirilmiş, son olarak üst katman sıyırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Resim 3.8). Kalıplar 80 °C’de 24 saat olmak üzere etüve alındı. 24 saat sonunda numuneler etüvden çıkartılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Sonra kalıp sökümü gerçekleştirildi ve takip eden 7 gün sonunda deneylere başlandı.



Resim 3.8 Vibrasyon masasında numune kalıp sıkıştırma işlemi.



Resim 3.9 Hazırlanan harcın kalıbına yerleştirilmesi ve vibrasyon işlemi.

Deneysel çalışmalarda kullanılacak numunelerin üretilmesinde kullanılacak olan ızgaraların filament çeşitleri, ızgara kalınlıkları ve ızgara çeşitleri Çizelge 3.6’da verilmiştir. Çizelgede parantez içinde yazılan rakamlar serilerin kodlanmasında kullanılmıştır (Örneğin 3-1-4; PETG-2 mm-Sarmal).

Çizelge 3.8 Çalışmalarda üretilecek seriler.

	Filament Çeşidi	Izgara Kalınlığı	Izgara Şekli
1	(1) PLA	(1) 2 mm	(1) Kare
2			(2) Üçgen
3			(3) Altıgen
4			(4) Sarmal
5			(5) Kafes
6		(2) 5 mm	(1) Kare
7			(2) Üçgen
8			(3) Altıgen
9			(4) Sarmal
10			(5) Kafes
11	(2) TOUGH PLA	(1) 2 mm	(1) Kare
12			(2) Üçgen
13			(3) Altıgen
14			(4) Sarmal
15			(5) Kafes
16		(2) 5 mm	(1) Kare
17			(2) Üçgen
18			(3) Altıgen
19			(4) Sarmal
20			(5) Kafes
21	(3) PETG	(1) 2 mm	(1) Kare
22			(2) Üçgen
23			(3) Altıgen
24			(4) Sarmal
25			(5) Kafes
26		(2) 5 mm	(1) Kare
27			(2) Üçgen
28			(3) Altıgen
29			(4) Sarmal
30			(5) Kafes
31	(4) ABS	(1) 2 mm	(1) Kare
32			(2) Üçgen
33			(3) Altıgen
34			(4) Sarmal
35			(5) Kafes
36		(2) 5 mm	(1) Kare
37			(2) Üçgen
38			(3) Altıgen
39			(4) Sarmal
40			(5) Kafes
41	(5) TPU	(1) 2 mm	(1) Kare
42			(2) Üçgen
43			(3) Altıgen
44			(4) Sarmal
45			(5) Kafes
46		(2) 5 mm	(1) Kare
47			(2) Üçgen
48			(3) Altıgen
49			(4) Sarmal
50			(5) Kafes
51	Referans	-	-

3.3 Deneyler

Geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, Arşimet prensibinden faydalanarak su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık, görünen yoğunluk değerleri belirlenmiş; eğilme ve basınç deneyleri ile de mekanik özellikler ölçülmüştür. Üç boyutlu yazı ile üretilen ızgaraların geopolimer harç içerisine yerleştirilmesi ile üretilen numuneler üzerinde eğilme dayanımı deneyi ve Kopma enerjisi tayini deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelerin kırılma yüzeylerinde makro fotoğraflama yapılmıştır. Aşağıda yapılan bu deneysel çalışmaların detayı sunulmuştur.

3.3.1. Su Emme ve Görünen Porozite

Numuneler tamamen kurutmak amacı ile ilk olarak 24 saat uygun sıcaklıktaki etüvde bekletilmiştir. Bekletilen numunelerin ağırlık ölçümleri yapılarak kuru ağırlık değerleri elde edilmiştir. Kuru ağırlıkları belirlendikten sonra, numuneler oda sıcaklığında su dolu olan bir kaba konularak 24 saat bekletilmiştir. Bu işlem ardından numunelerin sudaki ağırlığı ölçülmüştür (Resim 3.9). Sudaki ağırlığı ölçülen numunelerin üzerindeki su bir emici havlu yardımıyla kurutulduktan sonra su emmiş yüzey kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Tüm bu ölçümler ardından kaydedilen veriler ile kütlece su emme oranları %'de olarak hesaplanmıştır (denklem 3.1).



Resim 3.10 Numunelerin suda bekletilmesi ve ağırlık ölçümleri.

Malzemedeki gözeneklilik oranı porozite olarak adlandırılır. Bunun belirlenebilmesi için yüzey kuru suya doymuş ağırlığın kuru ağırlıktan farkının yüzey kuru suya doymuş ağırlığın su içinde ağırlık farkına oranı ile hesaplanır (denklem 3.2).

3.3.2. Birim Hacim Ağırlık ve Görünür Yoğunluk

UK ile hazırlanan numuneler etüvde 24 saat kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına gelinceye kadar $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'deki laboratuvar ortamında bekletildikten sonra Numune hacmi düzgün malzemenin hacminin hesaplanması yöntemiyle bulunmuştur ($4\times 4\times 16\text{ cm}^3$). Kaydedilen numune ağırlığı, numune hacmine bölünerek birim ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra numuneler suya doymun hale getirilmek amacıyla 24 saat $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'deki suda bekletilmiştir. 24 saat sonunda su tankından alınan numuneler su içinde asılı ağırlıkları belirlenmek üzere Arşimet terazisinde tartılmış ve ölçülen değerler su içindeki ağırlık olarak kaydedilmiştir. Su içinde ağırlıkları belirlenen numuneler sudan çıkarılıp yüzeyleri kurularak doymun kuru yüzey haline getirilmiş ve tartılan ağırlıkları kuru yüzey doymun ağırlık olarak kaydedilmiştir. Denklem 3.3 ve 3.4 ile hesaplanmıştır.

$$W_s = \frac{(W_I - W_K)}{W_K} \times 100 \quad (3.1)$$

$$GP = \frac{(W_I - W_K)}{W_I - W_A} \times 100 \quad (3.2)$$

$$BHA = \frac{W_K}{V} \quad (3.3)$$

$$GY = \frac{W_K}{(W_K - W_A)} \quad (3.4)$$

W_s : Su emme oranı (%)

GP : Görünen porozite (%)

BHA : Birim hacim ağırlık (kg/m^3)

GY : Görünür yoğunluk (kg/m^3)

W_I : Islak ağırlık (kg)

W_K : Kuru ağırlık (kg)

W_A : Su içinde asılı ağırlık (kg)

V : Numune hacmi (m^3)

3.3.3 Eğilme Dayanımı Deneyi

Numuneler üzerinde eğilme dayanımlarının belirlenebilmesinde sabit moment altında eğilme dayanımı tayinine göre deney uygulanmıştır. Üretilen 40 × 40 × 160 mm boyutundaki ilk harç belirlemek üzere kullanılan harç prizması numuneleri ve daha sonrasında belirlenen harç numunesi ile üretilen içleri filament ızgaralı olan 20 x 50 x 160 mm boyutundaki numuneler, kalıptan çıkmış alt yüzeyi üstte kalacak şekilde mesnetler üzerine koyulmuştur. Yükleme hızı saniyede 0,05 MPa/s olacak şekilde ayarlanmıştır. Eğilmede çekme mukavemeti de aşağıdaki bağıntı ile tam sayıya yuvarlanarak hesaplanmıştır. Yapılan deneyle ilgili görsel Resim 3.10'de verilmiştir.

$$f_e = \frac{3 \times F \times L}{2 \times d_1 \times d_2^2} \quad (3.5)$$

f_e : Eğilme dayanımı (MPa)

F: En büyük yük (N)

L: Mesnet silindirleri arasındaki açıklık (mm)

d_1 : Numune genişliği (mm)

d_2 : Numune yüksekliği (mm)



Resim 3.110 Numune üzerinde uygulanan üç noktalı eğilme deneyi.

3.3.4 Basınç Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımının belirlenmesinde kullanılan numuneler üzerinde 40 x 40 x 40 mm boyutlardaki küp numuneleri üzerinde yapılan basınç dayanımı deneyi 0,07 MPa/s hızla

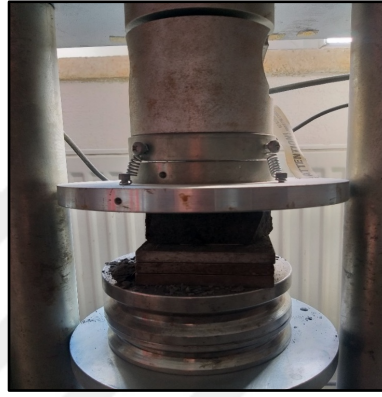
gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyi sadece harç belirleme numuneleri üzerinde uygulanmıştır (Resim 3.11). Basınç dayanımı denklem (3.6) daki gibidir.

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3.7)$$

f_c : Basınç dayanımı (MPa)

P: Numuneyi kıran maksimum yük (N)

A: Kuvvetin uygulandığı numunenin kesit alanıdır (mm²).



Resim 3.121 Harç belirleme numuneleri üzerinde uygulanan basınç dayanım deneyi.

3.3.5 Kopma Enerjisinin Tayini / Darbe Dayanımı Deneyi

Hazırlanan numunelerin darbe ile kopma enerjisini tayin etmek amacı ile laboratuvar ortamında numuneler üzerinde (TS EN 14158) standardına uygun olarak; Doğal Taş Deney Metotları-Kopma Enerjisi Tayini Deneyi kullanılarak darbe dayanımı deneyi uygulanmıştır. Her bir numune sabit kütleye ulaşınca dek kurutulmuştur. Kurutma işlemi ardından Resim 3.12'deki gibi numunede kırılıp ayrılma gözlenene kadar beşer cm aralıklarla yükseklik artışı sağlanarak küresel çelik bilyenin düşürülmesi sonucu deney verileri gözlemlenmiştir. Deney yapılırken numunenin alt yüzeyinin düzgün olmasına özen gösterilmiştir. Başlangıç yüksekliğinden (h_i) gerçekleştirilen ilk darbe ile numuneler kırılırsa, bu durum kaydedilmelidir. Kopma enerjisi (W), numunelerinin her biri için aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$W = m \times g \times h \quad (3.8)$$

W: 1 J yaklaşımla kopma enerjisi (Joule)

m: Bilyenin kütlesi (kg)

g: Yerçekimi ivmesi ($9,806 \text{ m/s}^2$)

h: Virgülden sonra iki ondalıklı olarak kopma yüksekliği (m)



Resim 3.132 Darbe ile kopma enerjisi tayini / darbe dayanımı deneyi.

4. BULGULAR

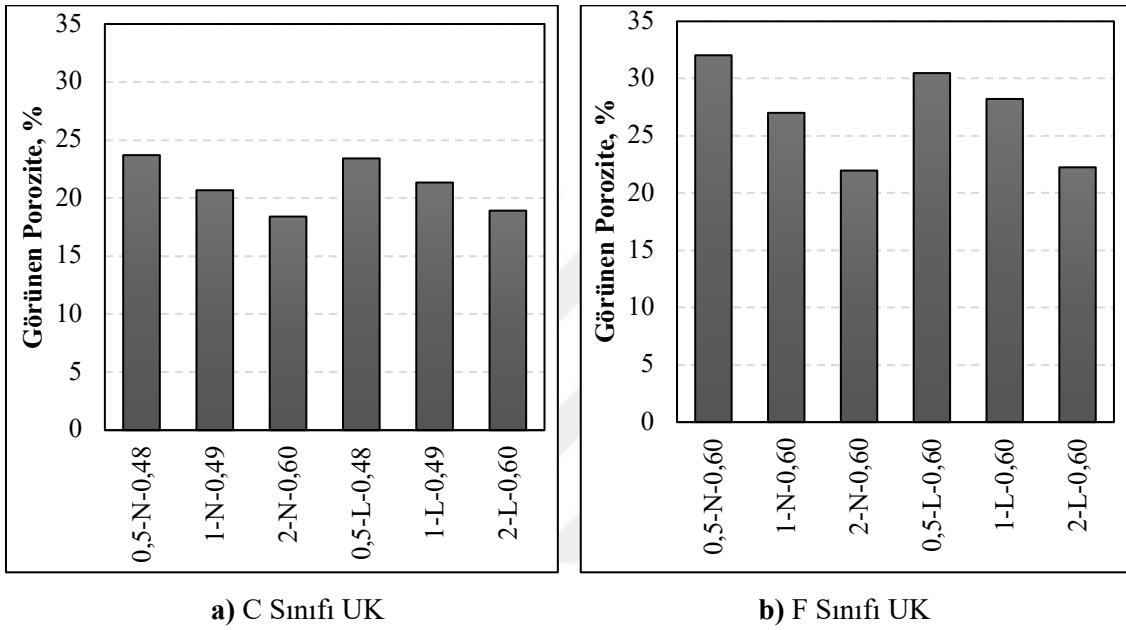
Bu çalışmanın en temelde amacı geopolimer harç ile üretilmiş malzemenin eğilme ve darbe dayanımını iyileştirmektir. Deneysel çalışmada elde edilen bulgulardan; kompozit olarak nitelendirebileceğimiz nihai ürünün matrisini oluşturan geopolimer harcın fiziksel ve mekanik özellikleri ilk iki başlıkta sunulmuştur. Üç boyutlu yazıcı ile imal edilmiş ızgaraların kompozit malzemenin takviye elemanı olarak kullanıldığı durumda elde edilen eğilme ve darbe dayanımları ise bulgular bölümünün üçüncü başlığı altında sunulmuştur.

Uçucu kül esaslı geopolimer harç içerisine yerleştirilecek olan farklı ızgara tipleri ile kompozit bir malzeme üretimine odaklanılan bu çalışmada; sabit olarak bir harç karışımı, değişken olarak da ızgara tipleri seçilmiştir. Harç karışımının belirlenmesinde iki farklı sınıfta UK (C ve F sınıfı), iki farklı NaOH molaritesi (6 ve 10 M), üç farklı likit/kül oranı (0,48, 0,49 ve 0,6), üç farklı kum/kül oranı (0,5, 1 ve 2) ve iki farklı lif durumu (lifli ve lifsiz) kullanılmıştır. Bulgularda bu harçlar ile yapılan birçok deneme ile elde edilen sonuçları vermek yerine tercih edilen harç karışımına götüren süreci özetleyecek seriler paylaşılmıştır. Böylelikle üç boyutlu yazıcı ile imal edilmiş ızgara konusuna odaklanılan süreçte dikkat dağıtılmamıştır.

4.1. Geopolimer Harçların Fiziksel Özellikleri

Uçucu kül esaslı geopolimer harçların görünen porozite oranı C sınıfı UK ile üretilen serilerde %24 ile %18 arasında değişmektedir. Bu değişimde kum/kül oranı arttıkça (0,5'den 2'ye) yani UK miktarı azaldıkça görünen porozite oranı da azalma göstermiştir. Ayrıca aynı serilerde likit/kum oranı 0,48'den 0,60'a artışı da bu porozite azalmasında etkili olabilir. Değişim %6 mertebesinde dir. F sınıfı UK ile yapılan üretimlerde likit/kum oranı 0,60'da sabit tutularak kum/kül oranı C sınıfı UK'lı serilerle aynı (0,5'den 2'ye) tutulmuştur. Görünen porozite oranları %32 ile %22 arasında bir değişim göstermiştir. Burada da UK miktarı azaldıkça görünen porozite oranı da azalmıştır. Fakat değişim oranı %10'a çıkmıştır. Her iki UK için ortak olan seri kum/kül:2, likit/kül:0,60 olan seridir. (Burada da C sınıfı UK'lı seriler 10 M, F sınıfı UK'lı seriler 6 M NaOH ile üretilmiştir.)

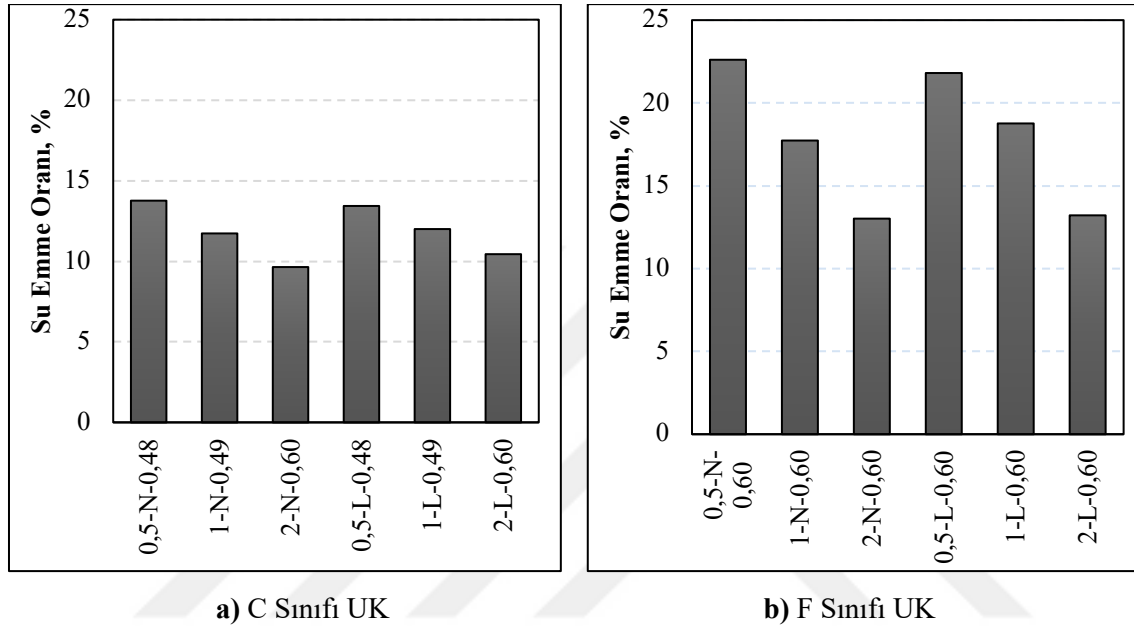
Bu seriye göre görünür porozitedeki değişim %4 mertebesinde ve F sınıfı UK'da yüksektir. Hem C hem de F sınıfı UK'da polipropilen lif ilavesi bazı serilerde ± 1 değişim meydana getirmiştir. En düşük görünen porozite oranı, hem C hem de F sınıfı UK'da kum/kül:2, lif olmayan ve likit/kül:0,60 (2-N-0,60) olan serilere aittir. Geopolimer harç numunelerinin görünen porozite oranları Şekil 4.1'de verilmiştir. a)'da C sınıfı UK, b)'de F sınıfı UK'nın değerleri görülmektedir.



Şekil 4.5 Harç numunelerinin görünen porozite oranları.

Geopolimer harç numunelerinin su emme oranları Şekil 4.2'de verilmiştir. a)'da C sınıfı UK, b)'de F sınıfı UK'nın değerleri görülmektedir. Uçucu kül esaslı geopolimer harçların su emme oranları C sınıfı UK ile üretilen serilerde %14 ile %10 arasında değişmektedir. Bu değişimde kum/kül oranı arttıkça (0,5'den 2'ye) yani UK miktarı azaldıkça su emme oranı da azalma göstermiştir. Ayrıca aynı serilerde likit/kum oranı 0,48'den 0,60'a artışı da su emme azalmasında etkili olabilir. Değişim %4 mertebesinde ve F sınıfı UK ile yapılan üretimlerde likit/kum oranı 0,60'da sabit tutularak kum/kül oranı C sınıfı UK'lı serilerle aynı (0,5'den 2'ye) tutulmuştur. Su emme oranları %23 ile %13 arasında bir değişim göstermiştir. Burada da UK miktarı azaldıkça su emme oranı da azalmıştır. Fakat değişim oranı %10'a çıkmıştır. Her iki UK için ortak olan seri kum/kül:2, likit/kül:0,60 olan seridir. (Burada da C sınıfı UK'lı seriler 10 M, F sınıfı UK'lı seriler 6 M NaOH ile üretilmiştir.) Bu seriye göre su emme oranındaki değişim %3 mertebesinde ve F sınıfı

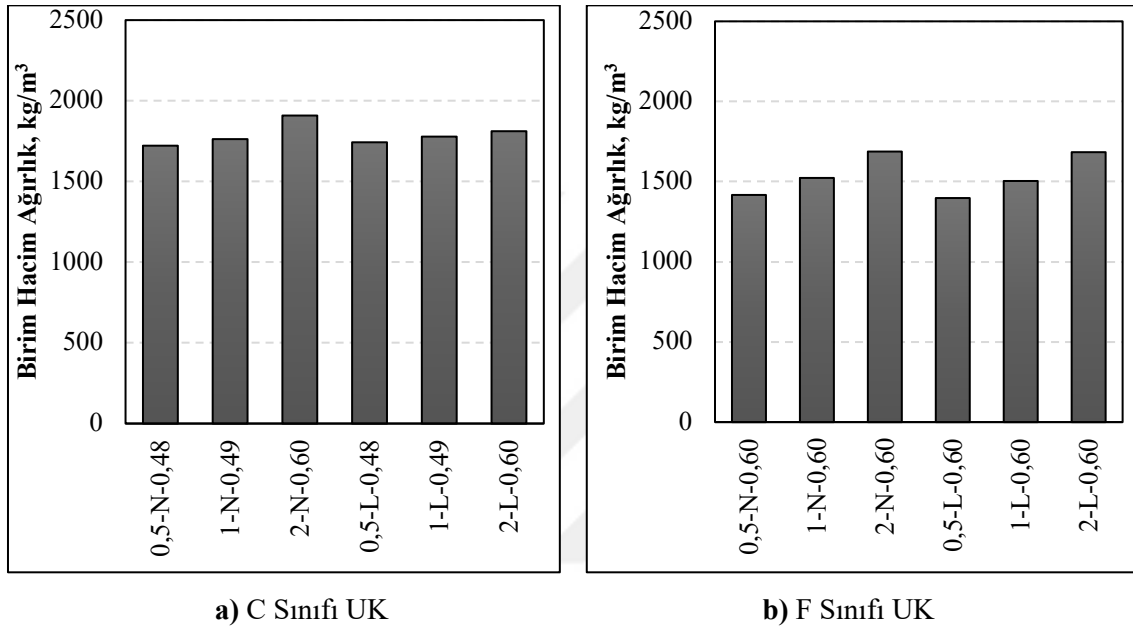
UK'da yüksektir. Hem C hem de F sınıfı UK'da polipropilen lif ilavesi bazı serilerde ± 1 değişim meydana getirmiştir. En düşük su emme oranı, hem C hem de F sınıfı UK'da kum/kül:2, lifli olan veya olmayan ve likit/kül:0,60 (2-N-0,60 ve 2-L-0,60) olan serilere aittir. Seriler arasındaki su emme oranındaki değişim görünen porozite oranındaki değişime benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.6 Harç numunelerinin su emme oranları.

Geopolimer harç numunelerinin birim hacim ağırlıkları Şekil 4.3'de verilmiştir. a)'da C sınıfı UK, b)'de F sınıfı UK'nın değerleri görülmektedir. Uçucu kül esaslı geopolimer harçların birim hacim ağırlığı C sınıfı UK ile üretilen serilerde 1722 kg/m^3 ile 1909 kg/m^3 arasında değişmektedir. Bu değişimde kum/kül oranı arttıkça (0,5'den 2'ye) yani UK miktarı azaldıkça artma göstermiştir. Ayrıca aynı serilerde likit/kum oranı 0,48'den 0,60'a artışı da birim hacim ağırlıklarının artmasında etkili olabilir. Değişim %11 mertebesinde. F sınıfı UK ile yapılan üretimlerde likit/kum oranı 0,60'da sabit tutularak kum/kül oranı C sınıfı UK'lı serilerle aynı (0,5'den 2'ye) tutulmuştur. Birim hacim ağırlıkları F sınıfı serilerde 1417 kg/m^3 ile 1688 kg/m^3 arasında bir değişim göstermiştir. Burada da UK miktarı azaldıkça birim hacim ağırlığı artmıştır. Fakat değişim oranı %19'a çıkmıştır. Serilerin kendi içindeki bu artış C sınıfı UK ile F sınıfı UK arasında incelendiğinde F sınıfı UK'lı serilerde C sınıfı UK'lı serilere göre %13 ile %22 arasında bir azalış göstermektedir. Her iki UK için ortak olan seri kum/kül:2,

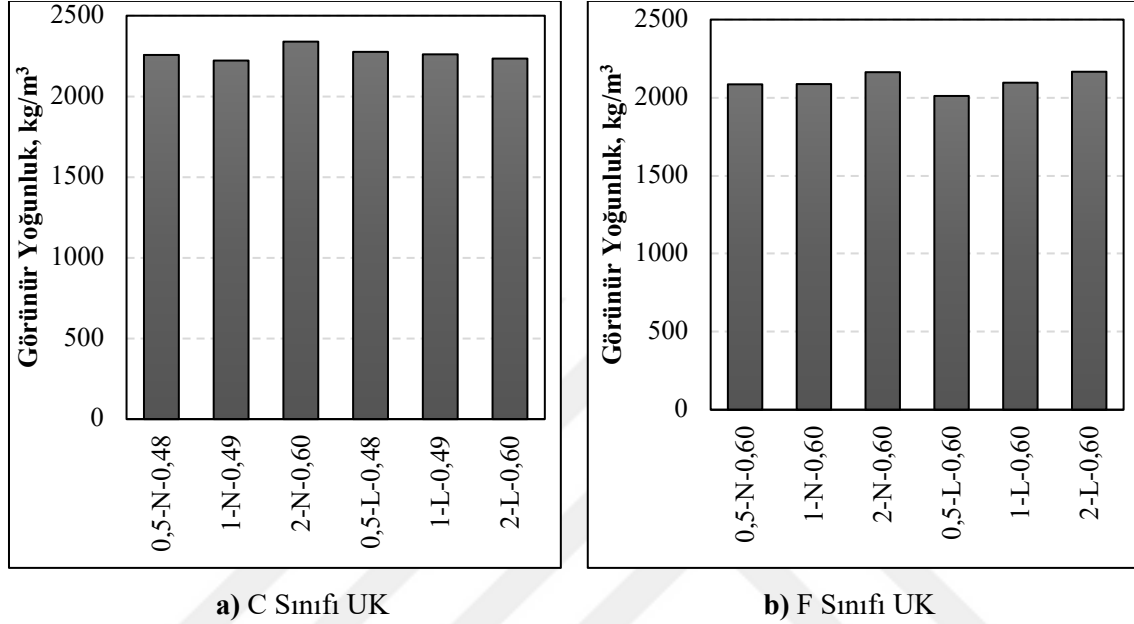
likit/kül:0,60 olan seridir. (Burada da C sınıfı UK'lı seriler 10 M, F sınıfı UK'lı seriler 6 M NaOH ile üretilmiştir.) Bu seriye göre birim hacim ağırlığındaki değişim %13 mertebesindedir ve C sınıfı UK'da yüksektir. Hem C hem de F sınıfı UK'da polipropilen lif ilavesi genel olarak serilerde birim hacim ağırlığında %1 civarında bir azalma meydana getirmiştir. En yüksek birim hacim ağırlığı, hem C hem de F sınıfı UK'da kum/kül:2, lifsiz, likit/kül:0,60 (2-N-0,60) olan serilere aittir.



Şekil 4.7 Harç numunelerinin birim hacim ağırlık değerleri.

Geopolimer harç numunelerinin görünür yoğunluk değerleri Şekil 4.4'de verilmiştir. a)'da C sınıfı UK, b)'de F sınıfı UK'nın değerleri görülmektedir. Uçucu kül esaslı geopolimer harçların görünür yoğunluğu C sınıfı UK ile üretilen serilerde 2222 kg/m³ ile 2339 kg/m³ arasında değişmektedir. Bu değişimde seriler arasında bariz bir farklılık görülmemektedir. Değişim %5 mertebesindedir. F sınıfı UK ile yapılan üretimlerde likit/kum oranı 0,60'da sabit tutularak kum/kül oranı C sınıfı UK'lı serilerle aynı (0,5'den 2'ye) tutulmuştur. Görünür yoğunluk F sınıfı serilerde 2011 kg/m³ ile 2166 kg/m³ arasında bir değişim göstermiştir. Burada da UK miktarı azaldıkça görünür yoğunluk artmıştır. Değişim oranı %8 dir. Her iki UK için ortak olan seri kum/kül:2, likit/kül:0,60 olan seridir. (Burada da C sınıfı UK'lı seriler 10 M, F sınıfı UK'lı seriler 6 M NaOH ile üretilmiştir.) Bu seriye göre görünür yoğunluk değişim %8 mertebesindedir ve C sınıfı UK'da yüksektir. Hem C hem de F sınıfı UK'da polipropilen lif ilavesi genel olarak

serilerde görünür yoğunluk değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Değişim %0,1 - %4 civarında meydana gelmiştir. En yüksek birim hacim ağırlığı, C sınıfı UK'da kum/kül:2, lifsiz, likit/kül:0,60 (2-N-0,60) seride F sınıfı UK'da ise aynı serinin lif katkılı olanında (2-L-0,60) görülmüştür.



Şekil 4.8 Harç numunelerinin görünür yoğunluk değerleri.

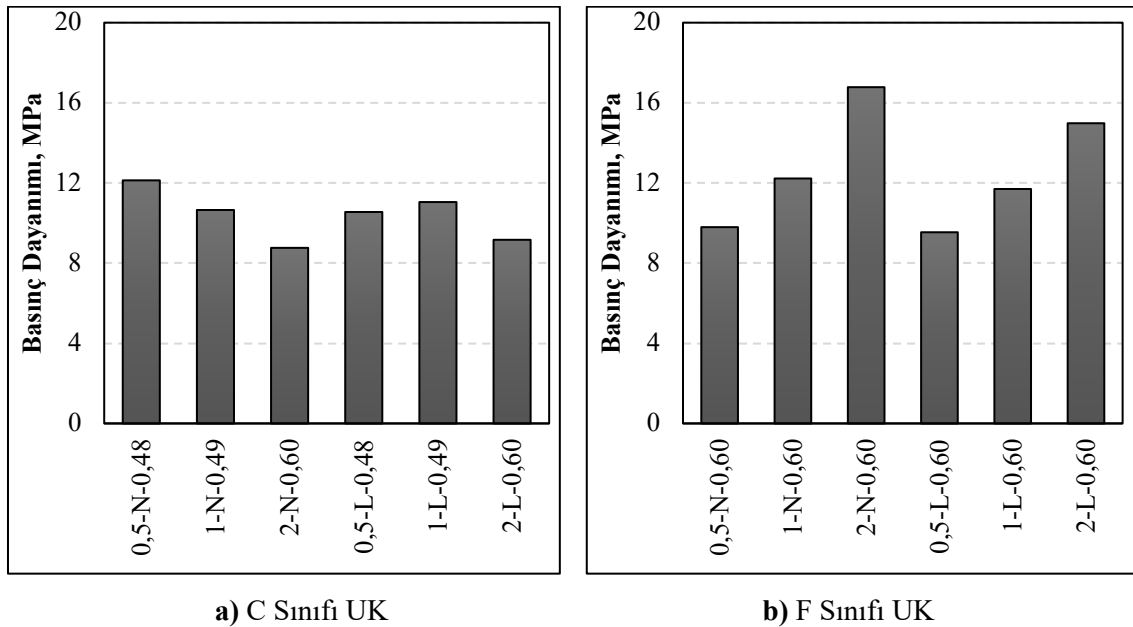
4.2 Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri

Geopolimer harçların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bu değerler malzemelerin sınıflandırılmasında önemli parametrelerdir. Bu çalışmada amaç elde edilecek uçucu kül esaslı geopolimer harcın eğilme dayanımını iyileştirmek olduğundan dolayı en yüksek eğilme mukavemetini sergileyen seri belirlenmeye çalışılmıştır. Fiziksel özellikleri verilen serilerin mekanik özellikleri de önce basınç dayanımı ardından kullanılacak harcın seçiminde nihai parametre olacağından dolayı eğilme dayanımı bulguları şeklinde verilmiştir.

Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.5'de verilmiştir. a)'da C sınıfı UK, b)'de F sınıfı UK'nın değerleri görülmektedir. Uçucu kül esaslı geopolimer harçların basınç dayanımları C sınıfı UK ile üretilen serilerde 12,1 MPa ile 8,8 MPa arasında değişim göstermiştir. Bu değişimde kum/kül oranı arttıkça (0,5'den 2'ye) yani

UK miktarı azaldıkça basınç dayanımında da azalma göstermiştir. Ayrıca aynı serilerde likit/kum oranı 0,48'den 0,60'a artışı da basınç dayanımının azalmasında etkili olabilir. Değişim %37 mertebesindedir. Harç karışımlarına lif ilavesi en yüksek basınç dayanımına sahip 0,5-N-0,48 serisinde başlangıca göre %12'lik bir azalmaya sebebiyet vermiştir. Lif ilavesi ile diğer serilerde ise %3-5 civarında bir basınç dayanımı artışı gözlenmiştir.

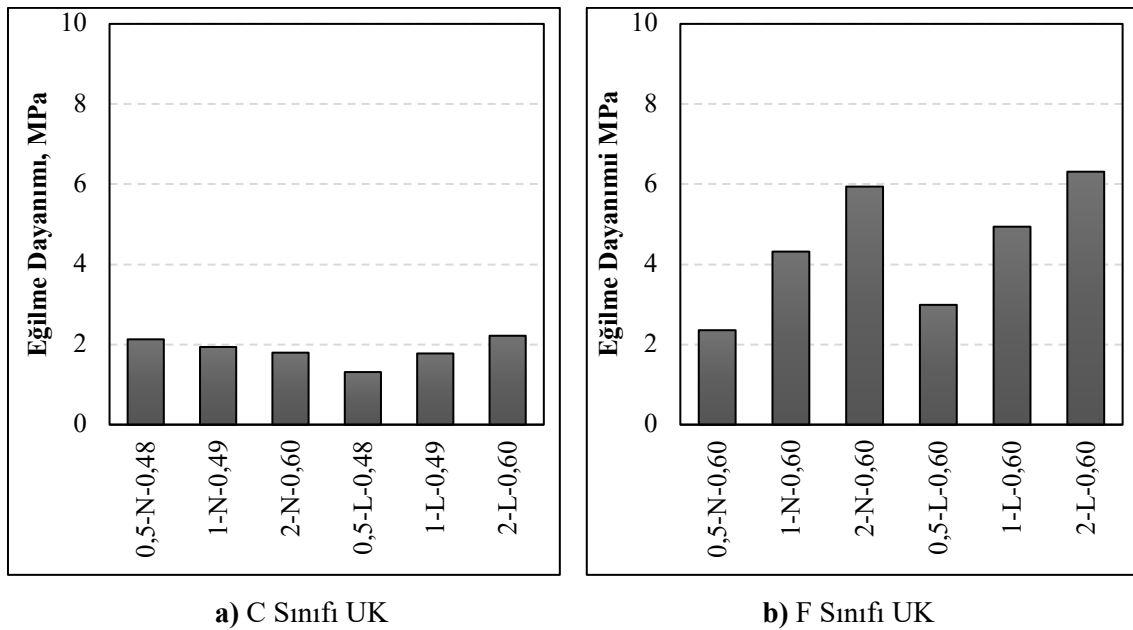
F sınıfı UK ile yapılan üretimlerde likit/kum oranı 0,60'da sabit tutularak kum/kül oranı C sınıfı UK'lı serilerle aynı (0,5'den 2'ye) tutulmuştur. Basınç dayanımları 9,5 MPa ile 16,8 MPa arasında değişim göstermiştir. C sınıfı UK'lı serilerden farklı olarak burada kum/kül oranı arttıkça (0,5'den 2'ye) yani UK miktarı azaldıkça basınç dayanımında bir artış görülmüştür. Bu artış başlangıca göre %71 mertebesindedir. F sınıfı UK ile üretilmiş harç serilerinin tamamında lif ilavesi basınç dayanımı değerlerinin azalmasına sebebiyet vermiştir. Bu azalma lifsiz duruma göre sırasıyla %3, %4 ve %11 mertebelerindedir. En yüksek basınç dayanımı, C sınıfı UK'da kum/kül:0,5, lifsiz, likit/kül:0,48 (0,5-N-0,48) seride, F sınıfı UK'da ise kum/kül:2, lifsiz, likit/kül:0,60 olan seride (2-N-0,60) görülmüştür.



Şekil 4.9 Harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri.

Geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.6'de verilmiştir. a)'da

C sınıfı UK, b)'de F sınıfı UK'nın değerleri görülmektedir. Uçucu kül esaslı geopolimer harçların eğilme dayanımları C sınıfı UK ile üretilen serilerde 2,2 MPa ile 1,3 MPa arasında değişim göstermiştir. Bu değişimde kum/kül oranı arttıkça (0,5'den 2'ye) yani UK miktarı azaldıkça, eğilme dayanımında, lifsiz serilerde azalma; lifli serilerde artma göstermiştir. Ayrıca aynı serilerde likit/kum oranı 0,48'den 0,60'a artışı da eğilme dayanımının değişiminde etkili olabilir. Değişim %38 mertebesindedir. Harç karışımlarına lif ilavesi eğilme dayanımı 1,8 MPa olan 2-N-0,60 serisini başlangıca göre %22 arttırarak C sınıfı UK serileri için en yüksek eğilme dayanımı olan 2,2 MPa değeri 2-L-0,60 serisinde meydana gelmiştir. F sınıfı UK ile yapılan üretimlerde likit/kum oranı 0,60'da sabit tutularak kum/kül oranı C sınıfı UK'lı serilerle aynı (0,5'den 2'ye) tutulmuştur. Eğilme dayanımları 2,4 MPa ile 6,3 MPa arasında değişim göstermiştir. C sınıfı UK'lı serilerden farklı olarak burada kum/kül oranı arttıkça (0,5'den 2'ye) yani UK miktarı azaldıkça eğilme dayanımında bir artış görülmüştür. Bu artış başlangıca göre %146 mertebesindedir. F sınıfı UK ile üretilmiş harç serilerinin tamamında lif ilavesi eğilme dayanımı değerlerinin artmasına sebebiyet vermiştir. Bu artma lifsiz duruma göre sırasıyla %25, %14 ve %7 mertebelerindedir. En yüksek eğilme dayanımı, tüm seriler dikkate alındığında, F sınıfı UK'da kum/kül:2, lifli, likit/kül:0,60 olan seride (2-L-0,60) 6,3 MPa olarak görülmüştür.



Şekil 4.10 Harç numunelerinin eğilme dayanımı değerleri.

Elde edilen en yüksek eğilme dayanıma sahip karışım (F sınıfı UK, 6M NaOH, kum/kül:2, lifli, likit/kül:0,60) olan serinin (2-L-0,60) kullanılması suretiyle polimer ızgara ile yapılacak kompozit malzemenin eğilme ve akabinde darbe direnci değerlendirilecektir.

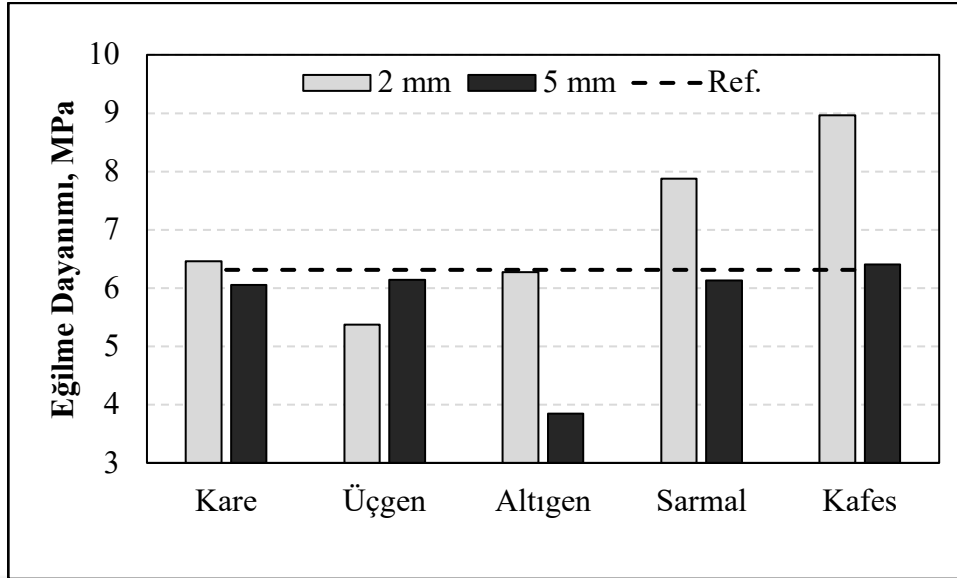
4.3 Geopolimer Kompozit Malzemenin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

UK esaslı geopolimer harç özelliklerinin belirlenmesinin ardından kompozit malzeme üretiminde kullanılacak karışıma karar verilmiş ve bu harç içerisine yerleştirilecek olan ızgaraların; üretilen kompozit malzeme üzerindeki etkileri 2x5x16 cm boyutlarındaki prizmatik örnekler üzerinde gerçekleştirilen eğilme ve darbe dayanımı deneyleri ile tayin edilmiştir. Fiziksel olarak ise darbe dayanımı deneyinin ardından oluşan kırılma yüzeylerinin fotoğraf çekimleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 Eğilme Dayanımı Özellikleri

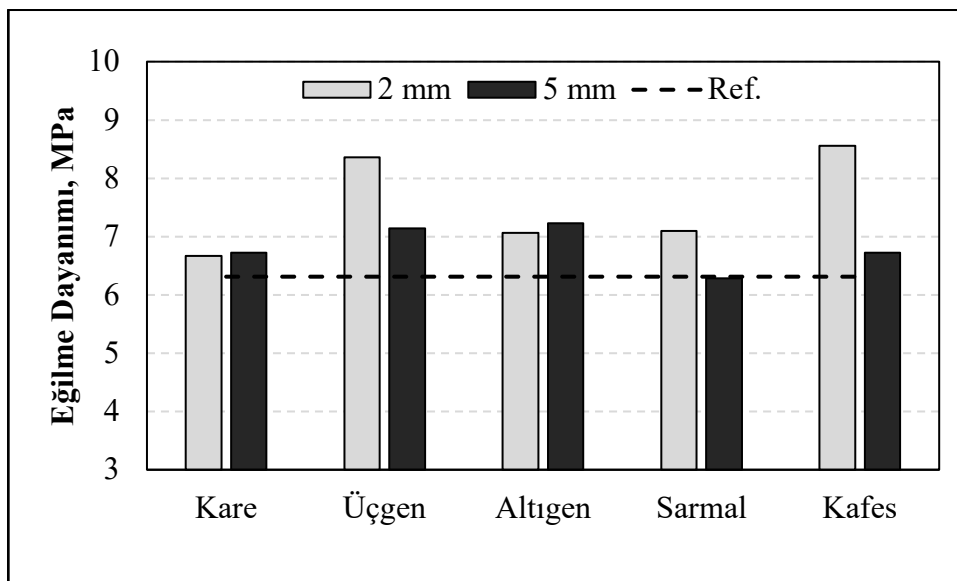
UK esaslı geopolimer harç içerisine yerleştirilen üç boyutlu ızgaraların; ızgara malzemesi, ızgara geometrisi ve ızgara kalınlığı açısından harcın eğilme dayanımındaki etkisi bu başlık altında incelenmiştir. Referans olarak geopolimer harcın içerisinde ızgara olmayan hali dikkate alınmıştır. Öncelikle ızgara imalatında kullanılan malzemelere göre bir değerlendirme yapılmış ardından sonuçlar malzeme için, geometri için ve kalınlık için ayrıca değerlendirilmiştir.

Şekil 4.7’de PLA filamentli ile üretilmiş ızgaraların eğilme dayanımına etkisini gösteren grafik paylaşılmıştır. Izgara kalınlıkları 5 mm olduğunda yaklaşık 0,2 MPa değerinde göz ardı edilebilecek bir düşüş gözlenmiş ve eğilme dayanımına herhangi bir katkı sağlanamamıştır. Görece daha ince bir kalınlık olan 2 mm’lik ızgara kullanımı farklı geometrik şekillerde farklı oranlarda eğilme dayanımının gelişmesine katkıda bulunmuştur. Kafes şeklinde üretilen PLA ızgaralar, 2 mm kalınlıkta eğilme dayanımını 9 MPa kadar artırmış ve yaklaşık % 43’lük bir katkı sağlamıştır.



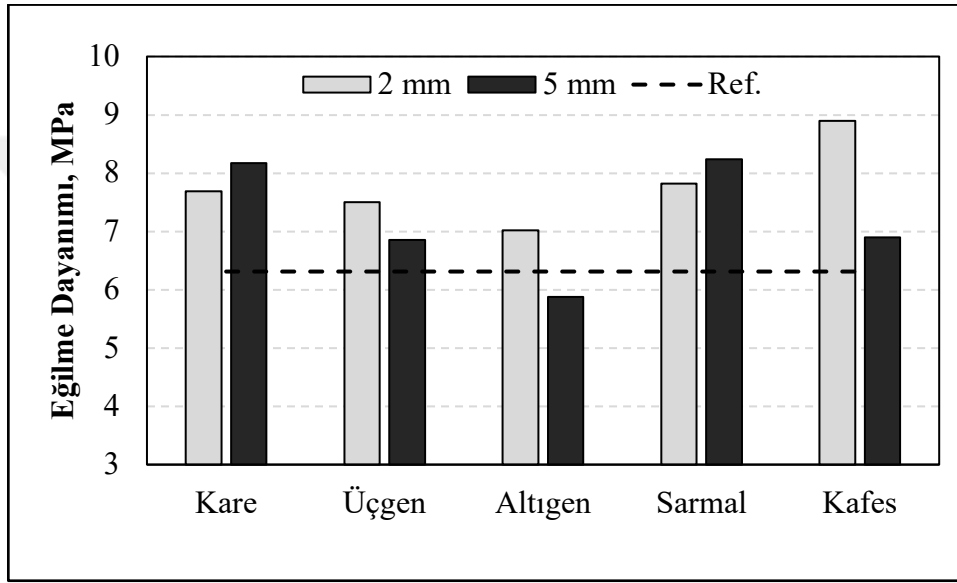
Şekil 4.11 PLA ızgaralı kompozitlerin eğilme dayanımları.

Şekil 4.8’de PLA’nın görece mekanik özelliklerinin iyileştirilmiş bir versiyonu olan TOUGH PLA filamenti ile üretilmiş ızgaraların eğilme dayanımına etkisini gösteren grafik paylaşılmıştır. PLA’dan farklı olarak ızgaranın kalın olması eğilme dayanımına olumsuz bir etki yapmamış bazı serilerde 1 MPa kadar eğilme dayanımını arttırmıştır. Bunun yanında göre ince olan 2 mm’lik ızgaralar eğilme dayanımına daha fazla katkı sağlamıştır. En yüksek dayanım artışı bu malzemede de kafes olarak adlandırılan geometride görülmüş yaklaşık %36’lık bir artışla 8,6 MPa’lık bir değere ulaşmıştır.



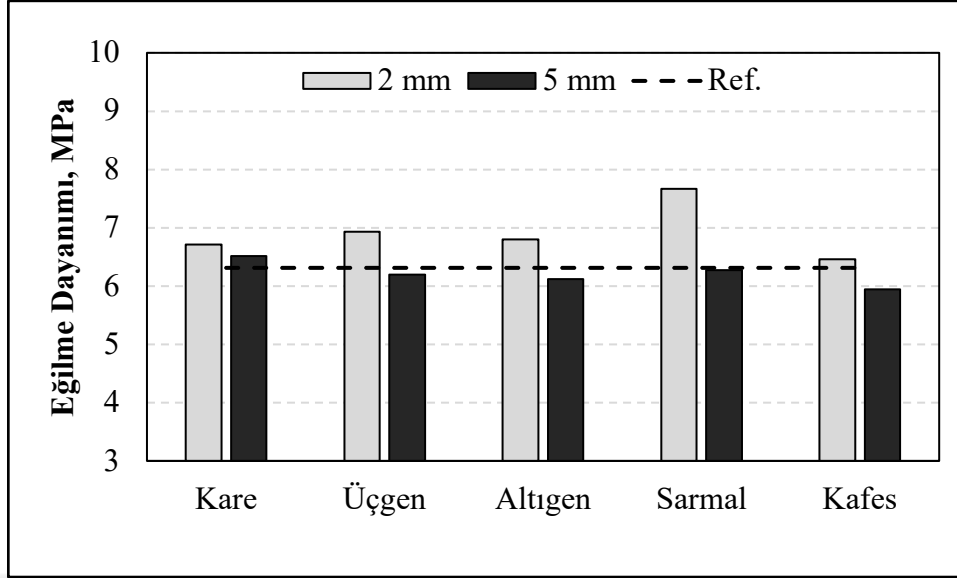
Şekil 4.12 TOUGH PLA ızgaralı kompozitlerin eğilme dayanımları.

Şekil 4.9’da PETG ile üretilmiş üç boyutlu ızgaraların eğilme dayanımına etkisini gösteren grafik paylaşılmıştır. Bu filament ile üretilen ızgaralar genel olarak hem 2 mm hem de 5 mm kalınlıklarda eğilme dayanımının gelişime katkı sağlamıştır. Hatta kare ve sarmal olarak adlandırılan şekillerde 5 mm’lik ızgaralar 2 mm’lik ızgaralara göre daha yüksek eğilme dayanımı sergilemişlerdir. Bu malzemede de kafes olarak adlandırılan ızgaralarda 2 mm’lik olanlar en yüksek eğilme dayanımını referansa göre %41’lik bir artışla 8,9 MPa değeri ile almıştır.



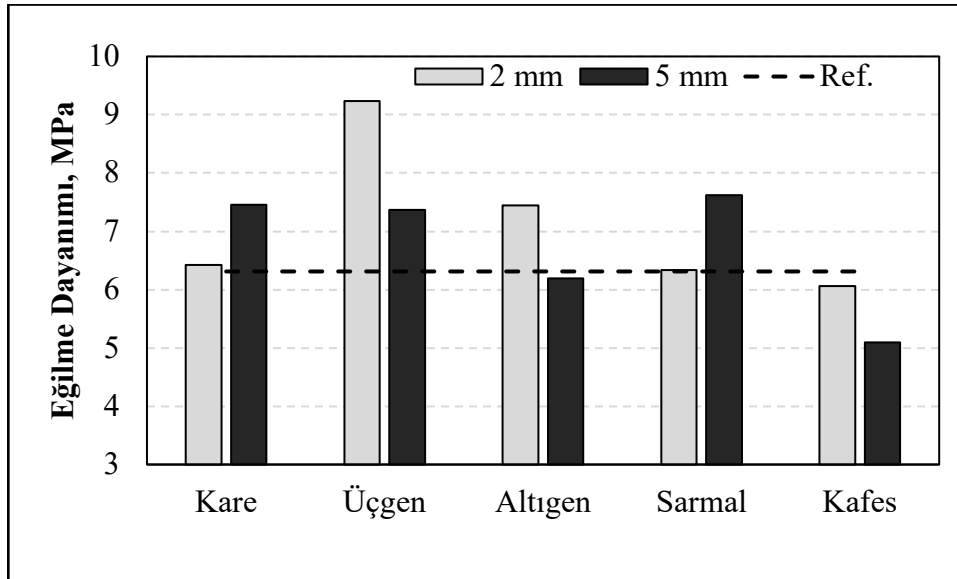
Şekil 4.13 PETG ızgaralı kompozitlerin eğilme dayanımları.

Şekil 4.10’da ABS ile üretilmiş üç boyutlu ızgaraların eğilme dayanımına etkisini gösteren grafik paylaşılmıştır. Bu filament ile üretilen ızgaralar genel olarak hem 2 mm hem de 5 mm kalınlıklarda eğilme dayanımına etkisi sınırlı kalmıştır. 5 mm kalınlığındaki ızgaralar referans değerden 0,1-0,4 MPa civarında farklılık göstermiş ve genelde referans değerinin altında kalmıştır. 2 mm’lik ızgaraların tamamı referans değerinin üzerinde eğilme dayanımı göstermiştir. Bu malzemede sarmal olarak adlandırılan 2 mm kalınlıktaki ızgara referansa göre %22’lik bir artışla 7,7 MPa ile en yüksek eğilme dayanımına sahiptir.



Şekil 4.140 ABS ızgaralı kompozitlerin eğilme dayanımları.

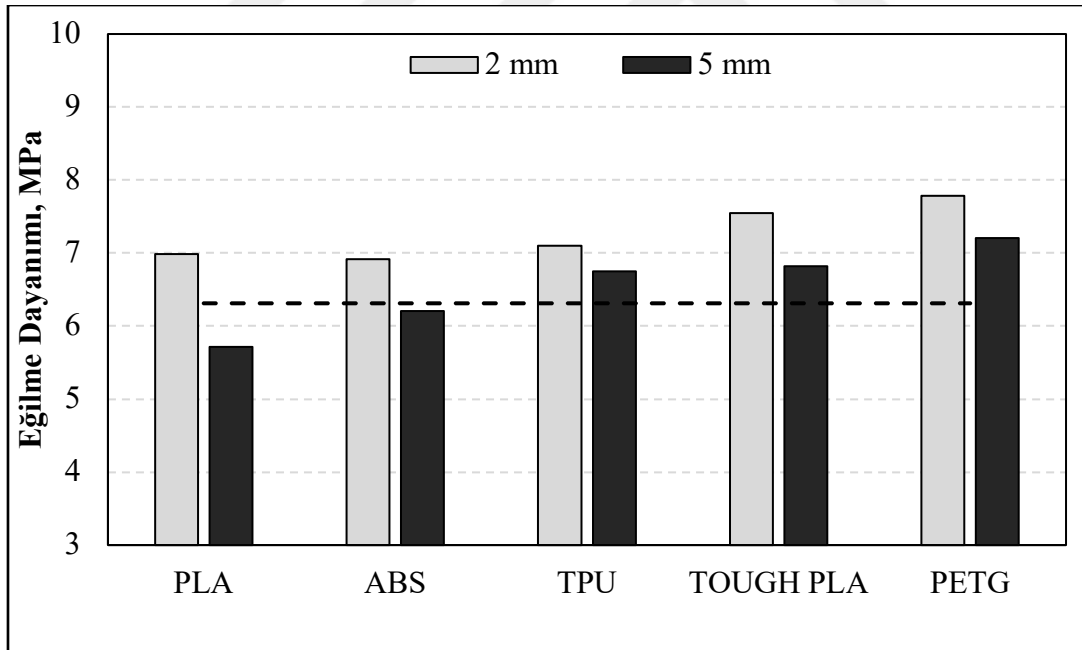
Şekil 4.11’de TPU ile üretilmiş üç boyutlu ızgaraların eğilme dayanımına etkisini gösteren grafik paylaşılmıştır. Mekanik özellikleri açısından diğer filamentlerden ayrılan bu malzemede ızgara kalınlığı ve geometrisinin eğilme dayanımında oluşturmuş olduğu etki değişkenlik göstermektedir. 2 mm lik kalınlık genel olarak referans seviyesinin üzerinde eğilme dayanımları sergilerken kafes şeklinde 5 mm kalınlık ile birlikte referans seviyesinin altında bir eğilme dayanımı sergilemiştir.



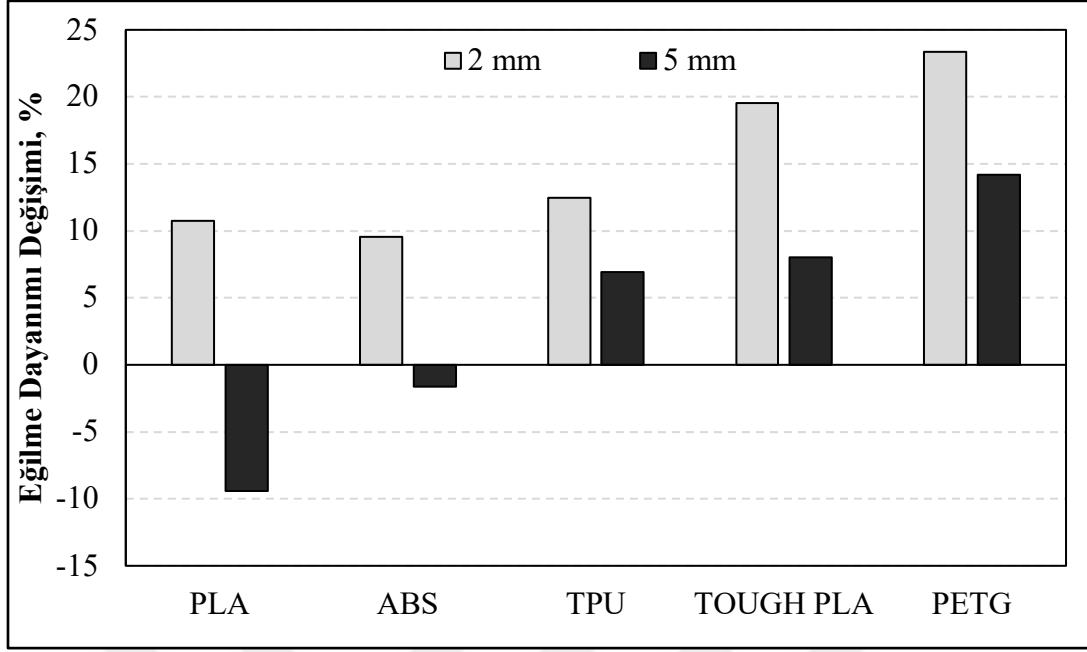
Şekil 4.115 TPU ızgaralı kompozitlerin eğilme dayanımları.

5 mm kalınlığında ızgaralardan referans seviyesinin üzerine çıkan kare, üçgen ve sarmal serileri yaklaşık %19 civarında ortalama 7,5 MPa seviyesinde bir eğilme dayanımı sergilemişlerdir. En yüksek eğilme dayanımını hem TPU hem de diğer tüm malzemeler içinde 2 mm kalınlığındaki üçgen geometriye sahip olan seri, referans seriye göre %46'lık bir artış ile 9,2 MPa değerinde göstermiştir.

Kompozit malzemenin lif kısmını oluşturan ızgara elemanında kullanılan malzemelerin, ızgaranın geometrisinden bağımsız olarak değerlendirildiği eğilme dayanımları Şekil 4.12'de ve eğilme dayanımına katkılarının %'delik değişimleri Şekil 4.13'de verilmiştir. 2 mm kalınlıkta kullanıldığında tüm malzemelerin eğilme dayanımına katkıları %10 ile %23 arasında olmaktadır. Bu malzemelerin arasında en düşük olanı ABS, en yüksek olanı PETG dir. 5 mm'lik kalınlıkta ise tüm malzemelerde 2 mm'ye göre daha düşük bir etki vardır. PLA ve ABS bu kalınlıkta eğilme dayanımı geliştirmekten ziyade düşürmektedir. Diğer malzemelerde ise %7 ila %14 arasında eğilme dayanımında bir artış söz konusudur.

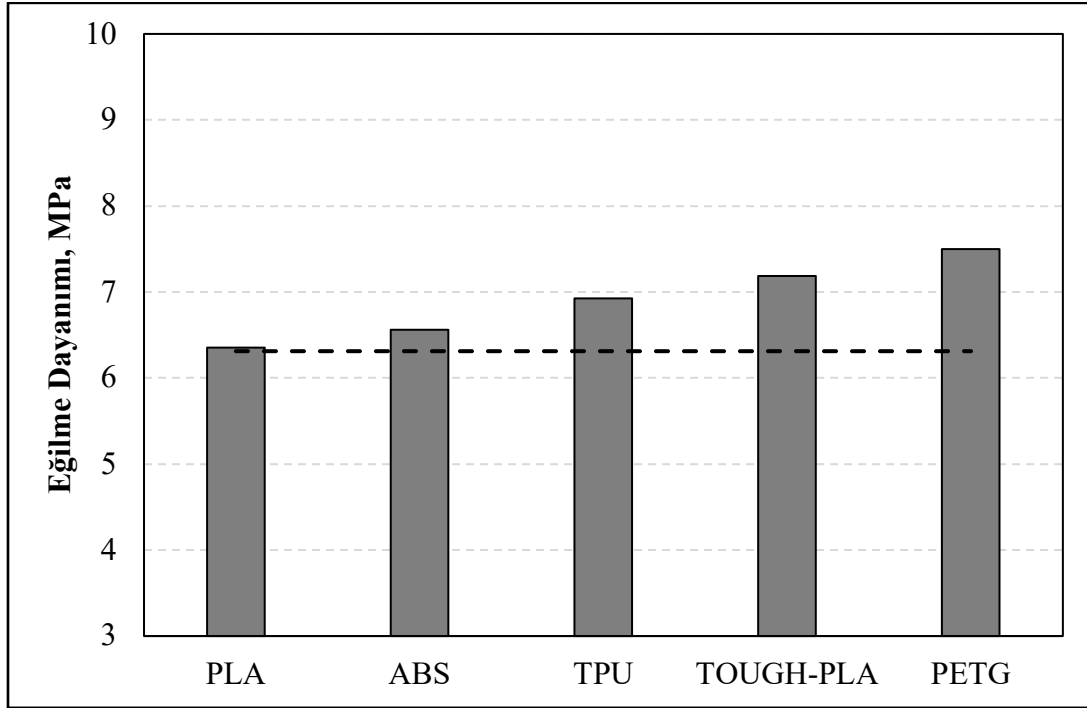


Şekil 4.162 Izgara malzemelerinin kalınlığa bağlı eğilme dayanımları.

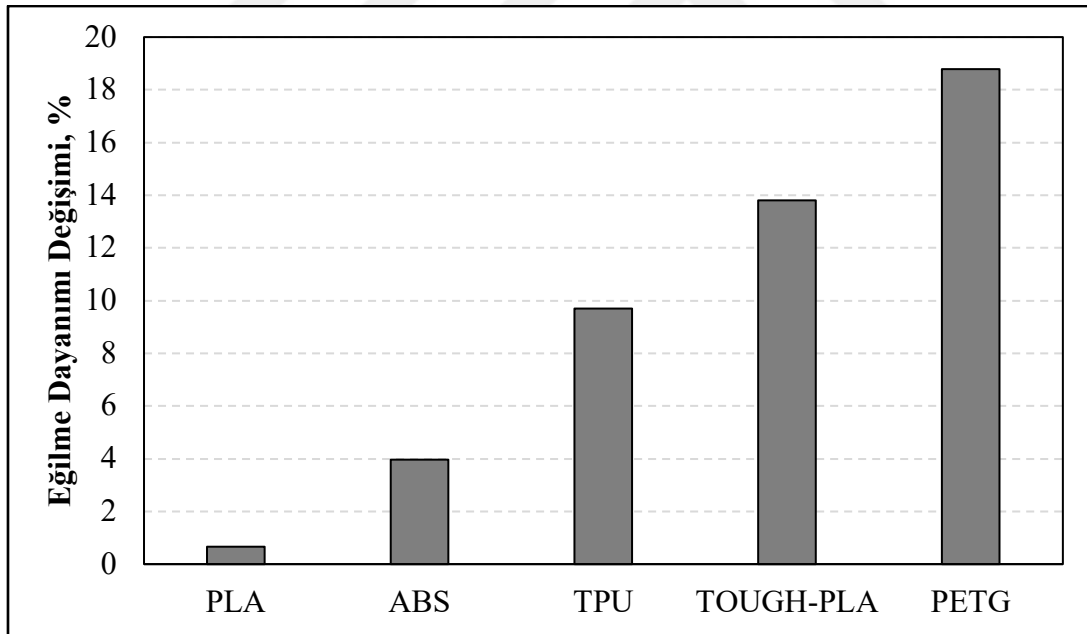


Şekil 4.173 Izgara malzemelerinin kalınlığa bağlı eğilme dayanımlarının değişimi.

Kompozit malzemelerin geometri ve kalınlıktan bağımsız olarak eğilme dayanımına etkilerinin değerlendirildiği grafikler Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir. Buna göre malzeme tercihinde PLA kalınlık ve geometri etkilerinden dolayı eğilme dayanımına etkisi çok sınırlı kalmaktadır. Bunun yanında ızgara geometrisi ve kalınlığından sınırlı bir şekilde etkilenen PETG en yüksek eğilme dayanımı katkısını sağlayan malzeme olarak görülmektedir.



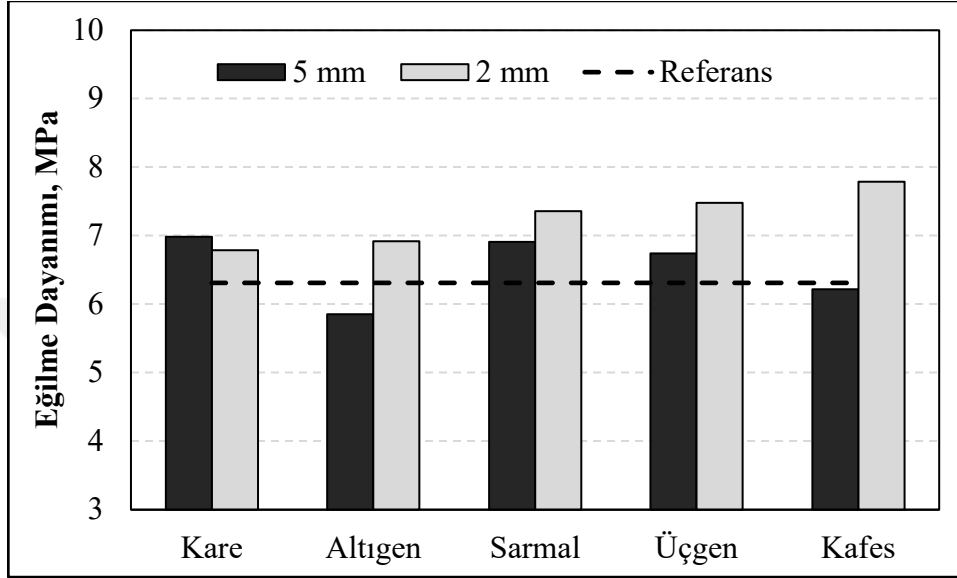
Şekil 4.184 Izgara malzemelerinin eğilme dayanımları.



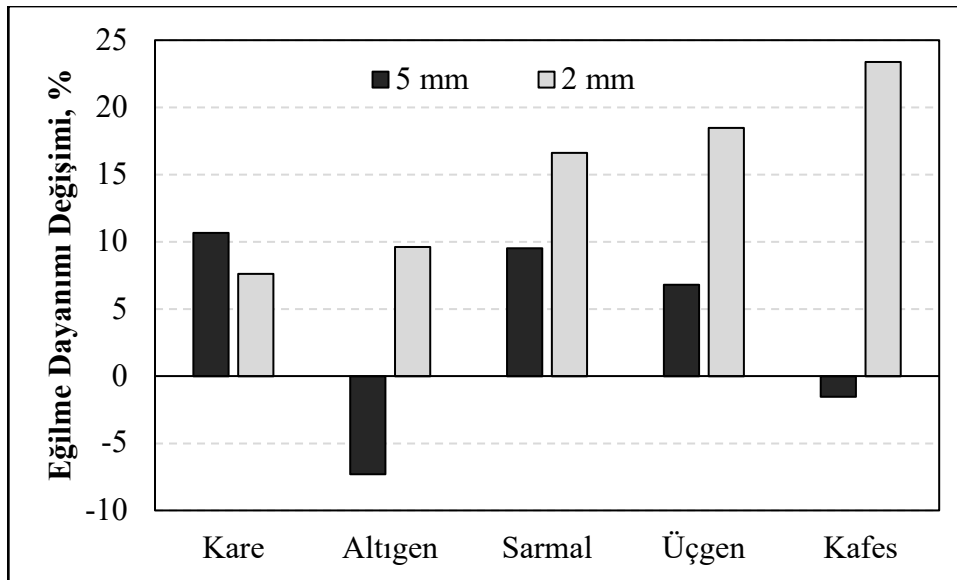
Şekil 4.195 Izgara malzemelerinin eğilme dayanımlarının değişimi.

Kompozit malzemenin eğilme dayanımına malzemeden bağımsız olarak ızgara geometrisinin etkinin değerlendirildiği grafikler Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 verilmiştir. Buna göre kare hariç tüm geometrilerde 5 mm kalınlığa sahip ızgaralar 2 mm kalınlığa göre daha düşük eğilme dayanımı sergilemişlerdir. Altıgen ve kafes şekilleri referans

seviyesinin altında kalırken diğer şekiller referans seviyesinin üzerinde eğilme dayanımlarına sahiptir. 2 mm kalınlık tüm kafes geometrilerinde referans seviyesinin üzerinde eğilme dayanımları sergileyerek eğilme dayanımının artırılmasında katkı sağlamıştır.



Şekil 4.206 Izgara geometrilerinin eğilme dayanımları.



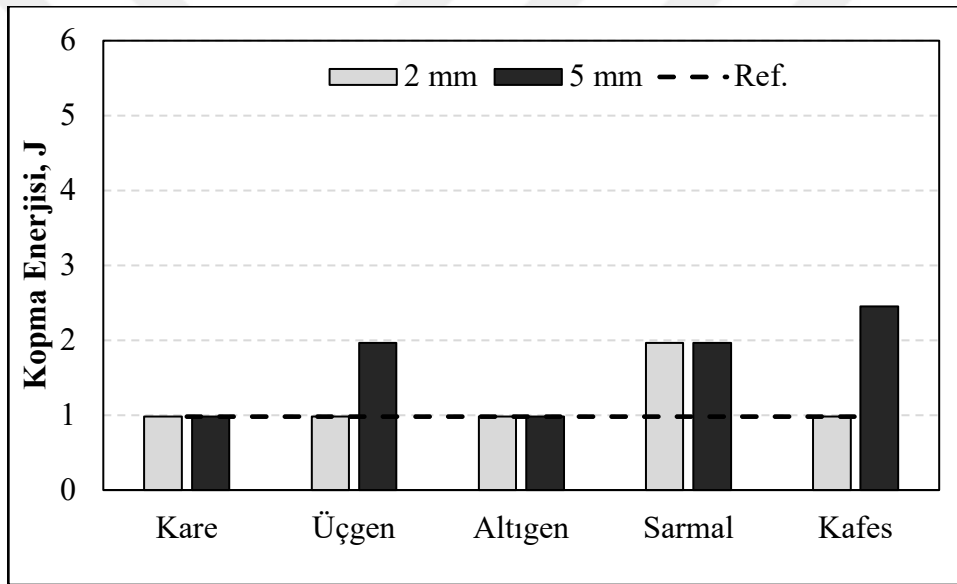
Şekil 4.217 Izgara geometrilerinin eğilme dayanımlarının değişimi.

Izgara geometrileri 2 mm ve 5 mm benzer değişim sıralaması göstermemişlerdir. Kafes ve altıgen seçimi 5 mm kalınlıkta malzeme değişiminden bağımsız olarak olumsuz bir

katkı serilerken, 2 mm kalınlıkta kafes geometrisi %23 eğilme dayanımı artışıyla en ideal seçimi ifade etmektedir.

4.3.2 Darbe Dayanımı Özellikleri

Doğal taşların üzerlerine gelen bir darbe sonucu parçalı kırılmasına kadar dayanabildiği enerjinin hesaplanmasına dayanan yöntemden faydalanmak suretiyle üretilen uçucu kül esaslı geopolimer kompozit malzemenin 2x5x16 cm boyutlarındaki numunelerin geniş yüzeyi bu deney için kullanılmıştır. Kompozit malzeme içerisine konulan ızgaranın üretildiği malzemeler tek tek ele alınmıştır.

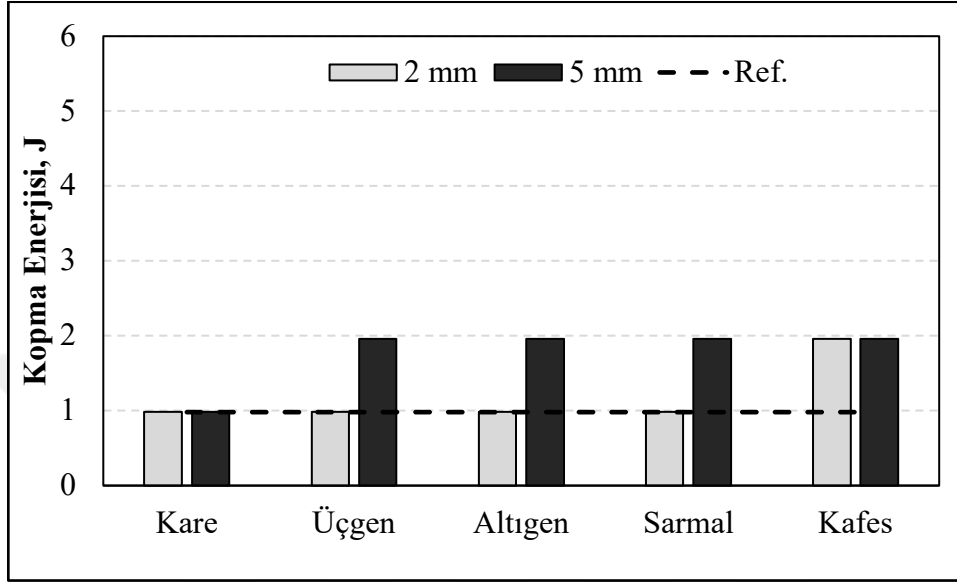


Şekil 4.228 PLA ızgaralı kompozitlerin kopma enerjisi.

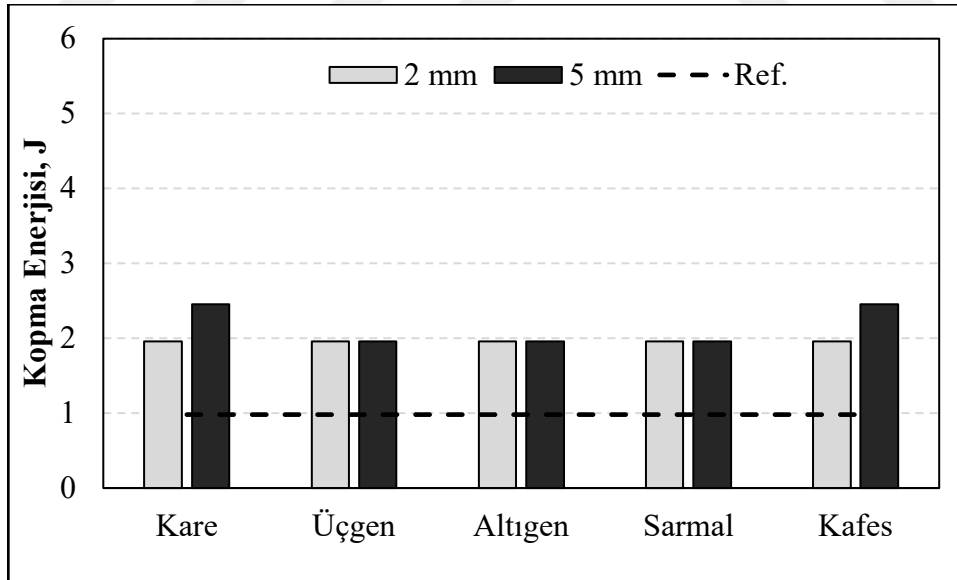
Şekil 4.18’de PLA ile üretilen 2 ve 5 mm kalınlıklarındaki beş farklı geometriye sahip ızgaraların referans olarak adlandırılan, içerisinde ızgara olmayan harç numunesi ile kıyaslanmıştır. Buna göre PLA ile üretilen ızgaraların kopma enerjisine katkıları sınırlı seviyede kalmış en yüksek direnci 5 mm kalınlığında kafes şeklindeki ızgara 2,5 J civarında göstermiştir.

Şekil 4.19’de TOUGH PLA ile üretilen 2 ve 5 mm kalınlıklarındaki beş farklı geometriye sahip ızgaraların referans olarak adlandırılan, içerisinde ızgara olmayan harç numunesi ile kıyaslanmıştır. 2 mm kalınlığında üretilen ızgaralar kafes geometrisi hariç diğer

şekiller için referans numuneye göre bir katkı sağlamamıştır. 5 mm kalınlıktaki ızgaralar ise kare şekil hariç tüm serilerde 2 J'e yakın kopma enerji ile darba dayanımına direnç göstermiştir. En iyi performansı bu malzemede de kafes şeklindeki ızgara sergilemiştir.



Şekil 4.239 TOUGH PLA ızgaralı kompozitlerin kopma enerjisi.

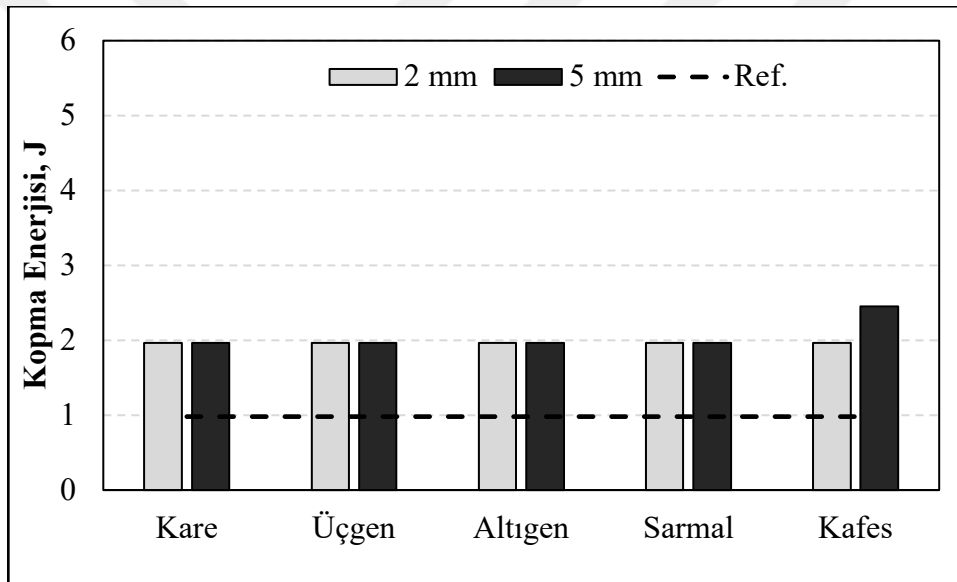


Şekil 4.240 PETG ızgaralı kompozitlerin kopma enerjisi.

Şekil 4.20'de PETG ile üretilen 2 ve 5 mm kalınlıklarındaki beş farklı geometriye sahip ızgaraların referans olarak adlandırılan, içerisinde ızgara olmayan harç numunesi ile kıyaslanmıştır. PLA tarzı malzemelerden farklı olarak PETG tüm geometri ve kalınlıklar

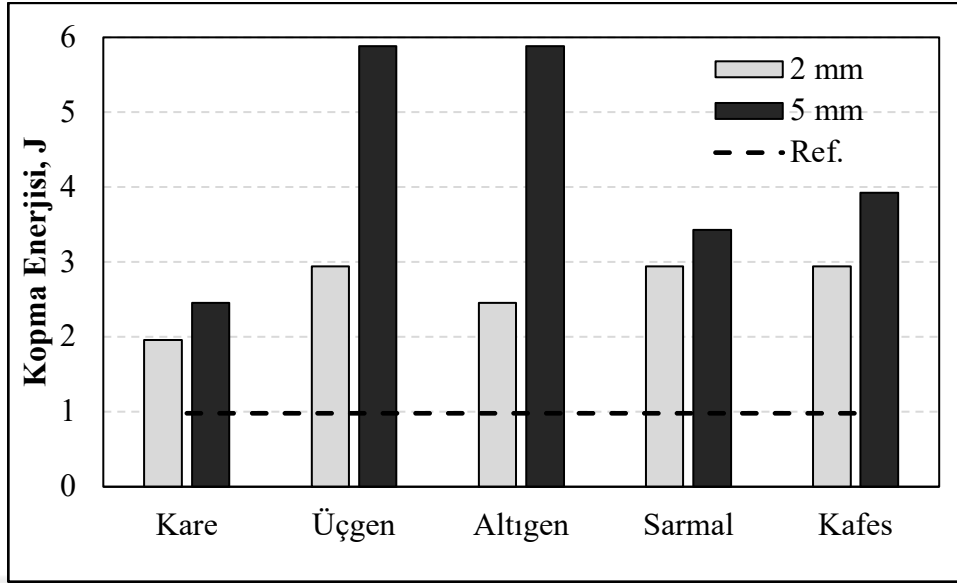
için referans numuneye göre kopma direncinde kompozit malzemeye katkı sağlamıştır. Kare ve kafes şekillerinde 5 mm için yaklaşık 2,5 J civarında kopma enerjisi sergilerken geriye kalan seriler ise 2 J civarında bir direnç göstermiştir.

şekil 4.21’de ABS ile üretilen 2 ve 5 mm kalınlıklarındaki beş farklı geometriye sahip ızgaraların referans olarak adlandırılan, içerisinde ızgara olmayan harç numunesi ile kıyaslanmıştır. ABS ile yapılan malzemeler PETG ile yapılan serilere benzer bir sonuç göstermiştir. Hem 2 hem de 5 mm kalınlığındaki ızgaralar 2 J civarında kopma enerjisi sergilemişlerdir. En yüksek direnci 5 mm kalınlığında kafes şeklindeki ızgara 2,5 J civarında göstermiştir.



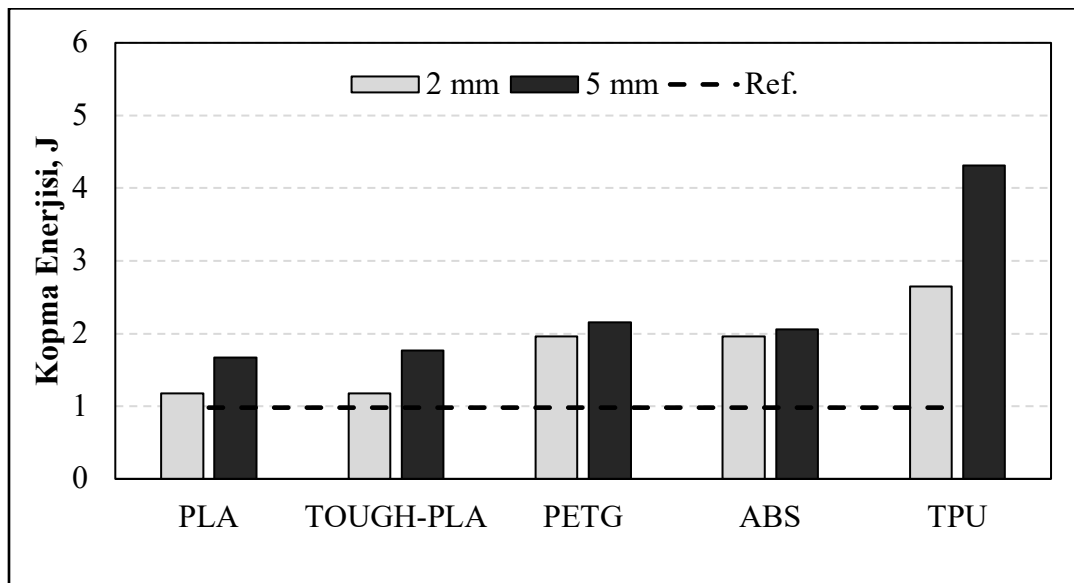
şekil 4.251 ABS ızgaralı kompozitlerin kopma enerjisi.

şekil 4.22’de TPU ile üretilen 2 ve 5 mm kalınlıklarındaki beş farklı geometriye sahip ızgaraların referans olarak adlandırılan, içerisinde ızgara olmayan harç numunesi ile kıyaslanmıştır. Diğer dört malzeme daha gevrek bir yapıya sahipken, oldukça esnek bir yapıya sahip olan TPU bu özelliğini darbe direnci esnasında göstermiştir. Diğer tüm malzemelere göre tüm ızgara geometrilerinde en iyi kopma enerjisini performansını TPU sergilemiştir. Kafes kalınlığının 2 mm’den 5 mm’ye çıkması ile kopma enerjisi de yükselmiştir. Üçgen, sarmal ve kafes şeklindeki ızgaralarda 2 mm kalınlığındaki darbe dayanımı 3 J seviyesine kadar çıkmışken; üçgen ve altıgen şeklindeki ızgaralar 5 mm kalınlıkta 6 J’e yakın kopma enerjisi sergilemişlerdir.

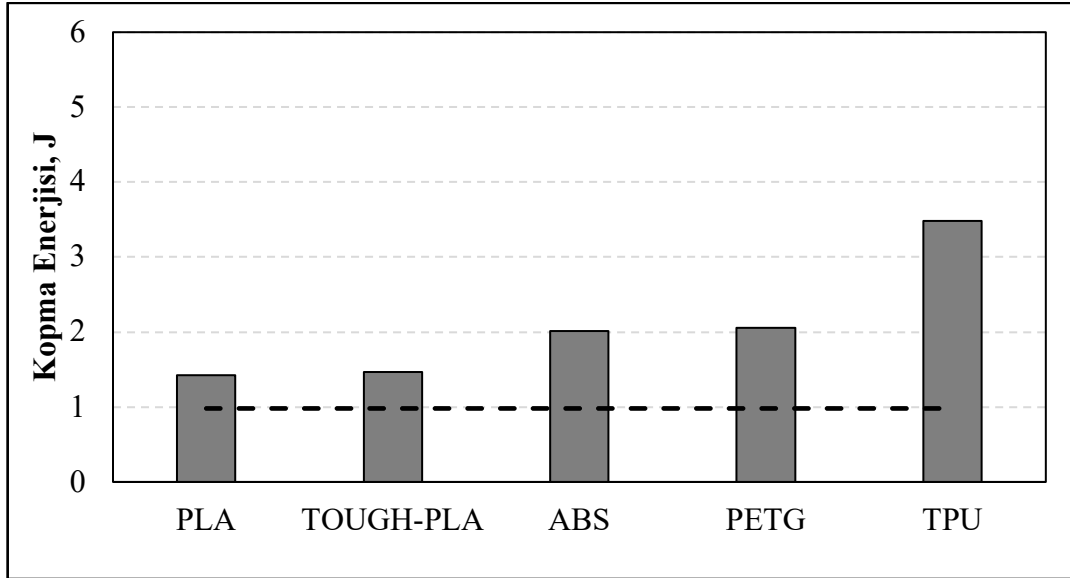


Şekil 4.262 TPU ızgaralı kompozitlerin kopma enerjisi.

Izgara geometrisinden bağımsız olarak ızgara malzemelerinin darbe enerjisine katkısının kafesin kalınlığı üzerinden Şekil 4.23’de verilen grafik üzerinden değerlendirilebilir. Buna göre tüm malzemelerin hem 2 mm hem de 5 mm için kopma enerjisine katkısı vardır. Tüm malzemeler dikkate alındığında en uygun kalınlığın kopma enerjisini artırmak için 5 mm olduğu söylenebilir. Kopma enerjisine en düşük katkıyı PLA, en yüksek katkıyı ise TPU yapmıştır. Kalınlıktan ve ızgara geometrisinden bağımsız olarak da aynı sıralama geçerlidir (Şekil 4.24).

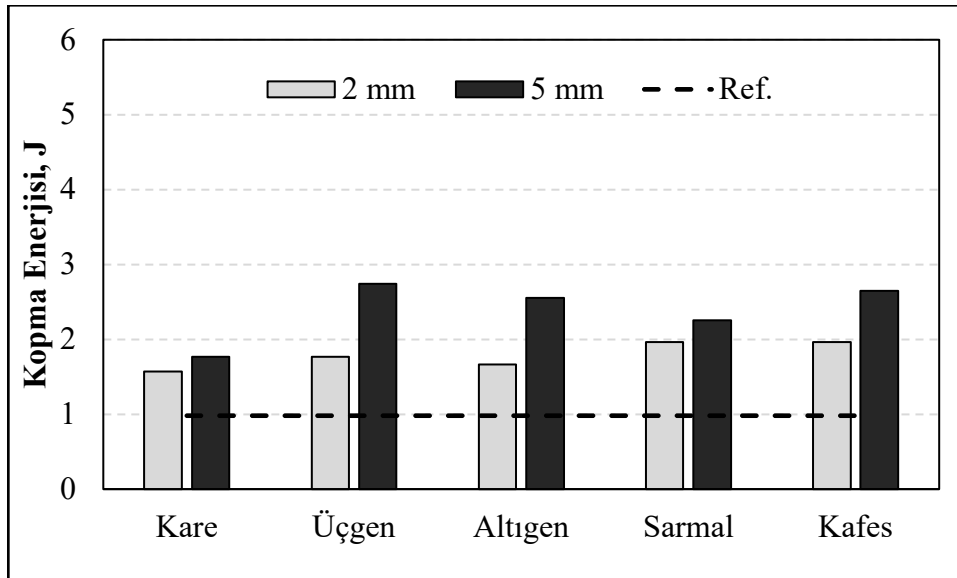


Şekil 4.273 Izgara malzemelerinin kalınlığa bağlı kopma enerjileri.



Şekil 4.284 Izgara malzemelerinin kopma enerjileri.

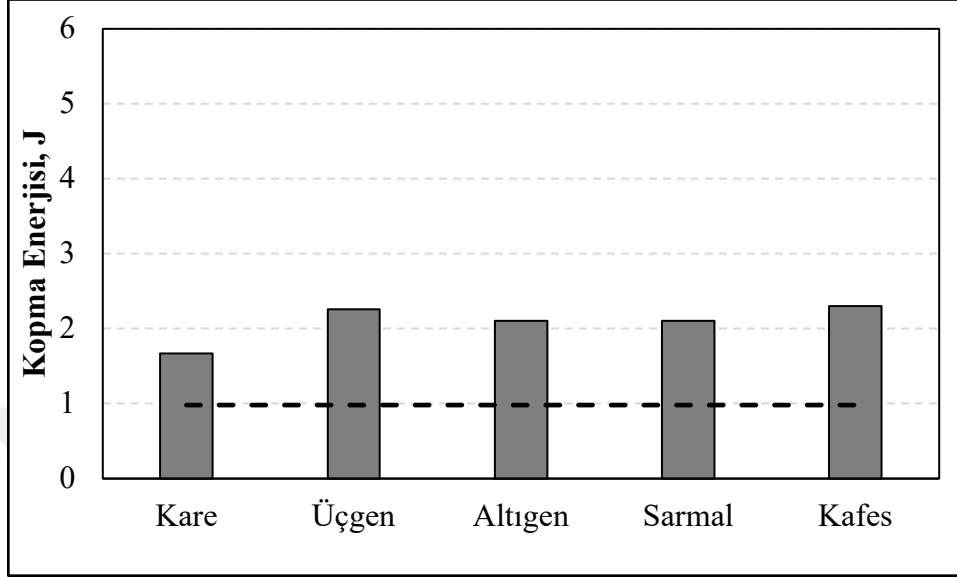
Izgara şekillerinin kopma enerjisi karşısındaki performanslarını sergileyen Şekil 4.25’deki grafik incelendiğinde TPU malzeme dışında en iyi performansı sergileyen kafes şekli olmuştur. TPU malzeme ile birlikte özellikle 5 mm kalınlıkta üçgen ve altıgen şekilli ızgaralar ön plana çıkmıştır. 2 mm kalınlığındaki ızgarada 1,5 J ile 2 J arasında bir kopma enerjisi görülmektedir. 5 mm ise 1,8 - 2,8 J civarında bir kopma enerjisi seviyesi vardır.



Şekil 4.295 Izgara geometrilerinin kalınlığa bağlı kopma enerjileri.

Kalınlık ve malzemeden bağımsız olarak kopma enerjisine en düşük katkıyı kare

yapmıştır. Altıgen ve sarmal 2,1 J seviyesinde kopma enerjisi göstermiştir. En yüksek katkı ise üçgen ve kafes şekillerine aittir (Şekil 4.26).

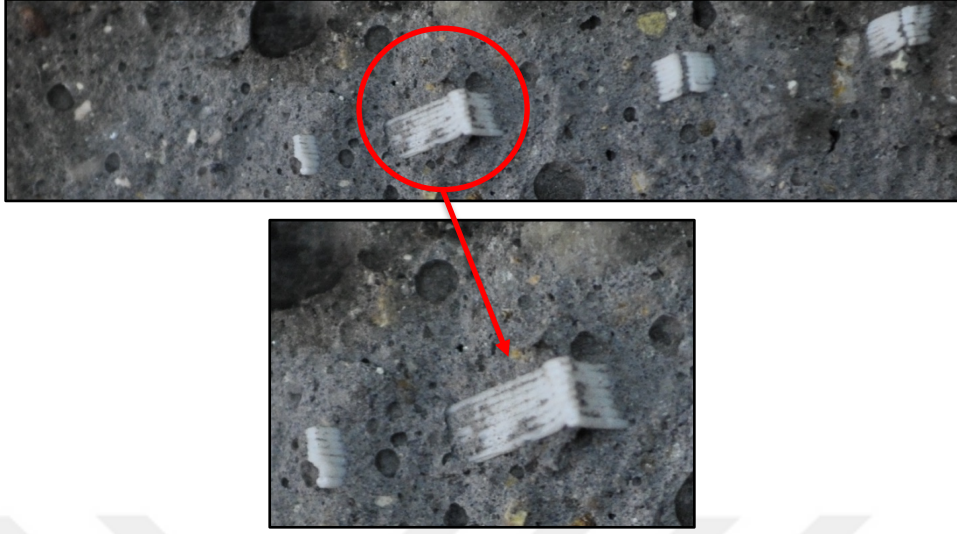


Şekil 4.306 Izgara geometrilerinin kopma enerjileri.

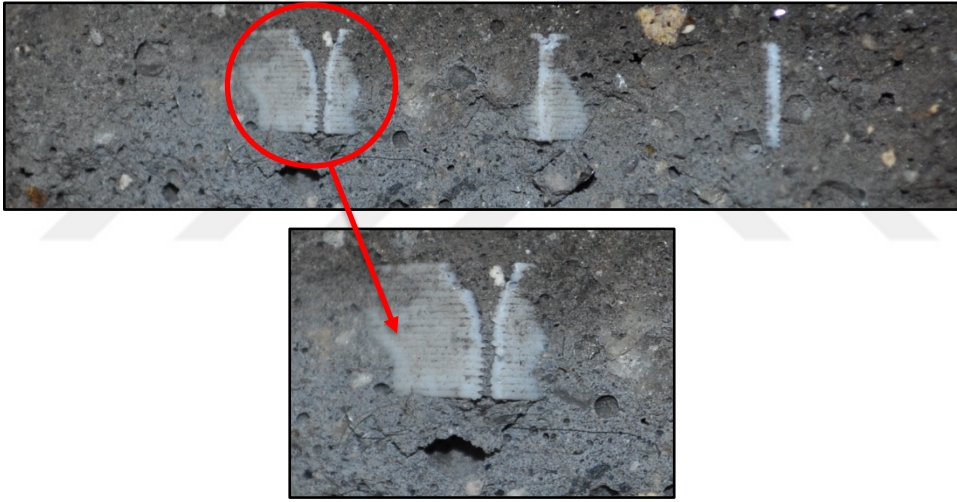
4.3.3 Kırılma Yüzeyi Görüntüleri

Kopma enerjisinin tayini deneyinin ardından kompozit malzemenin kırılan yüzeylerinde ızgaraların malzeme ve şekil itibarı ile durumları bu başlık altında çekilen fotoğraflar üzerinden değerlendirilmiştir. Gevrek ve sünek davranış sergileyen malzemeler açısından sergilenen fotoğraflarda gevrek malzemeler genel olarak temsil etmesi için PETG, sünek malzeme için ise TPU'ya ait fotoğraflar kullanılmıştır.

Resim 4.1'de PETG filament ile üretilen 2 mm kalınlığındaki kare olarak adlandırılan şekle ait fotoğraf verilmiştir. Harç içerisine yerleştirilen ızgaranın kenetlenmesinde ve ızgara etrafında bir boşluk oluşumu gözlenmemektedir. Izgarayı oluşturan katmanların yatayda birbirlerinden ayrıldığı gözlenmemektedir. Numune üzerine etkiyen darbe sonucu ızgaranın kare gözenek oluşurken katmanların üst üste bindiği köşe noktalarından kırıldığı görülmektedir. Resim 4.2'de PETG filamentin kare şeklindeki 5 mm kalınlığındaki ızgarası görülmektedir. Kalınlığın armasıyla birlikte kare köşelerindeki ayrılma yırtılma şekline dönüşmekte kalınlıkla beraber köşelerde oluşan direnç içeri doğru filament katmanlarının dik yönde yırtılmasına sebebiyet vermektedir.



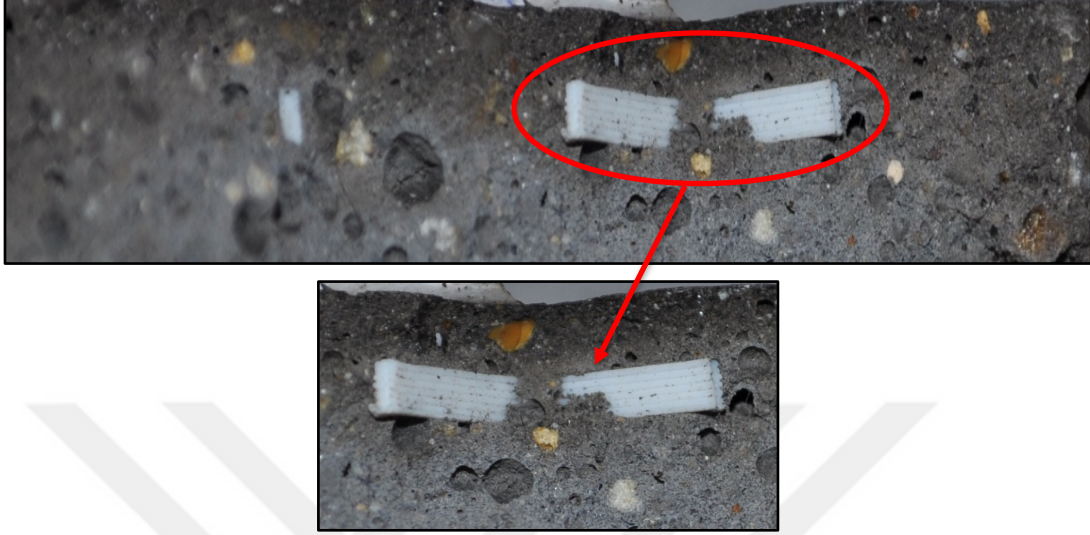
Resim 14.1 PETG – 2 mm – kare şekilli ızgara görseli.



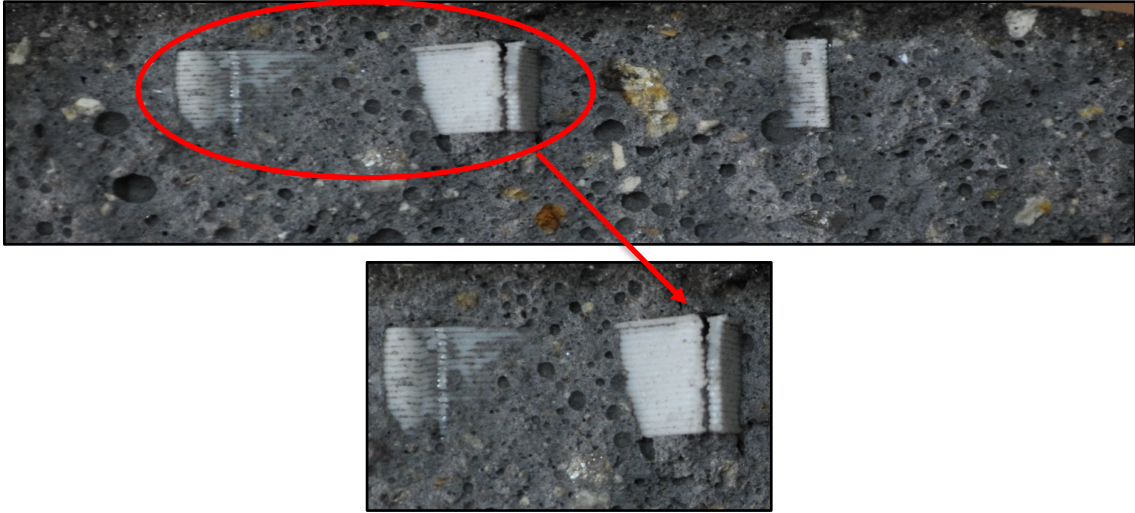
Resim 15.2 PETG – 5 mm – kare şekilli ızgara görseli.

Resim 4.3’de PETG filamenti ile üretilmiş, üçgen olarak adlandırılan ızgaranın 2 mm kalınlıkta olanı; Resim 4.4’de ise 5 mm kalınlıkta olanı görülmektedir. Bu geometri ile üretilmiş ızgaraların her iki kalınlığında da harç içerisinde kabarcıklar görülmektedir. Bunun yanında kırılan yüzeylerde filamentler harç katmanından daha temiz çıkmış gözükmemektedir. Filamentteki kırılma yine katmanların üst üste birleştiği köşe noktalarında gerçekleşmiştir. Resim 3.5’den detayları takip edilebileceği gibi beşgenin etrafındaki küçük üçgenin yani birbirine yakın köşelerin olduğu bölgede kırılmalar meydana gelmiştir. Benzer durum 5 mm içinde geçerlidir. Fakat kalınlık arttıkça filament

katmanlarına dik yönde köşelere yakın yerde yırtılma şeklinde bir ayrılımda görülmektedir.

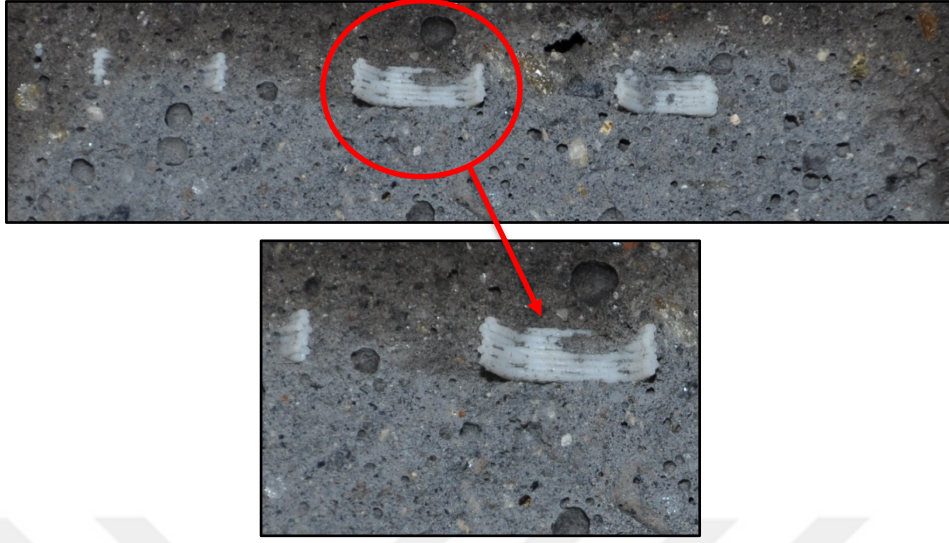


Resim 16.3 PETG – 2 mm – üçgen şekilli ızgara görseli.

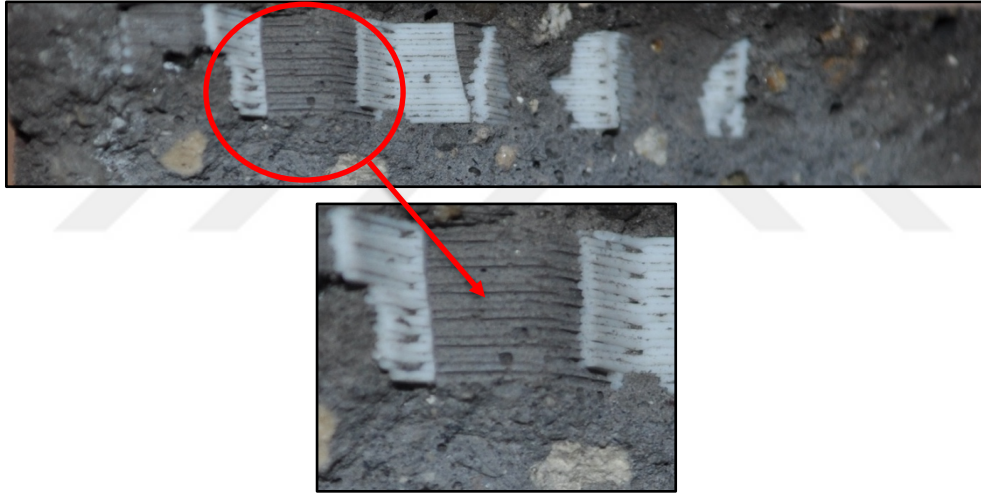


Resim 17.4 PETG – 5 mm – üçgen şekilli ızgara görseli.

Resim 4.5 ve 4.6 da altıgen olarak adlandırılan peteğe benzer ızgara şekli için 2 ve 5 mm’lik örnekler görülmektedir. Durum burada da benzerdir. 2 mm’lik ızgarada filamentlerin köşe noktada birbirinden ayrıldığı, 5 mm ise bu ayrılmanın köşelerden kenarlara doğru kaydığı görülmektedir. Resim 4.6 detayında filament katmanlarının harc üzerindeki izi de, harcın ızgaralar içinden geçebildiğini ve katmanlara yerleştiğini göstermektedir.



Resim 18.5 PETG – 2 mm – altıgen şekilli ızgara görseli.

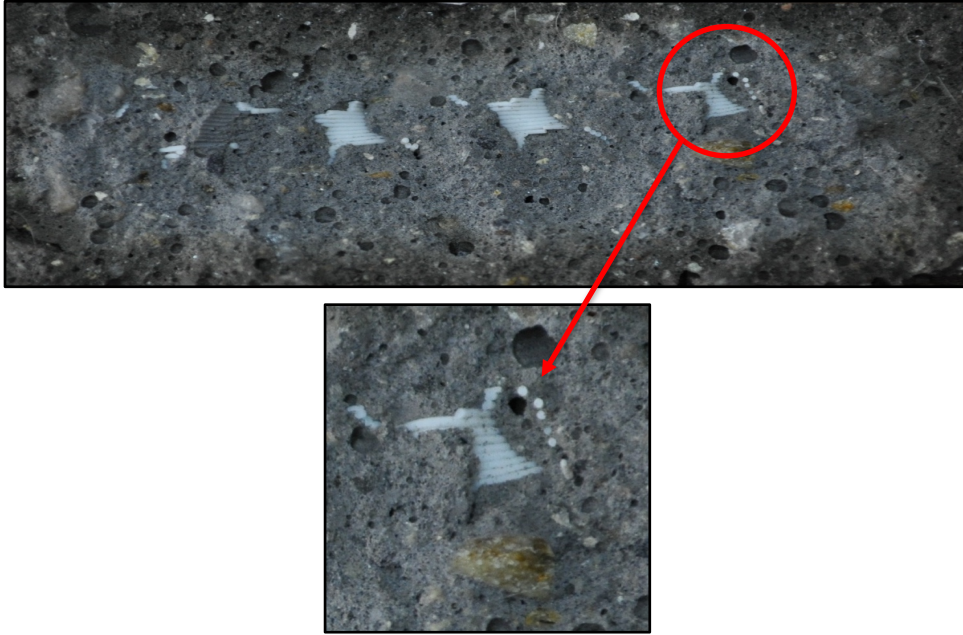


Resim 19.6 PETG – 5 mm – altıgen şekilli ızgara görseli.

Resim 4.7 ve 4.8 de sarmal olarak adlandırılan ve geometri olarak köşeli bir yapı oluşturmayan ızgaraların kopma enerjisi tayini deneyinde ardından oluşan kırık yüzeyleri görülmektedir. 2 mm ızgara kalınlığı görseli incelendiğinde daha önceki örneklerde olduğu gibi keskin bir hat boyunca bir ayrılmadan ziyade filament katmanlarının ayrı ayrı koptuğu görülmektedir. 5 mm lik ızgarada köşe değil bir pah olarak oluşan bölümlerin sağlam olarak kaldığı filament katmanlarının koparak ayrıldığı görülmektedir. Bu geometri ile üretilen ızgaraların harç içerisine yerleştirilirken boşlukların oluşabileceği hem 2 mm hem de 5 mm lik örneklerde görülmektedir.



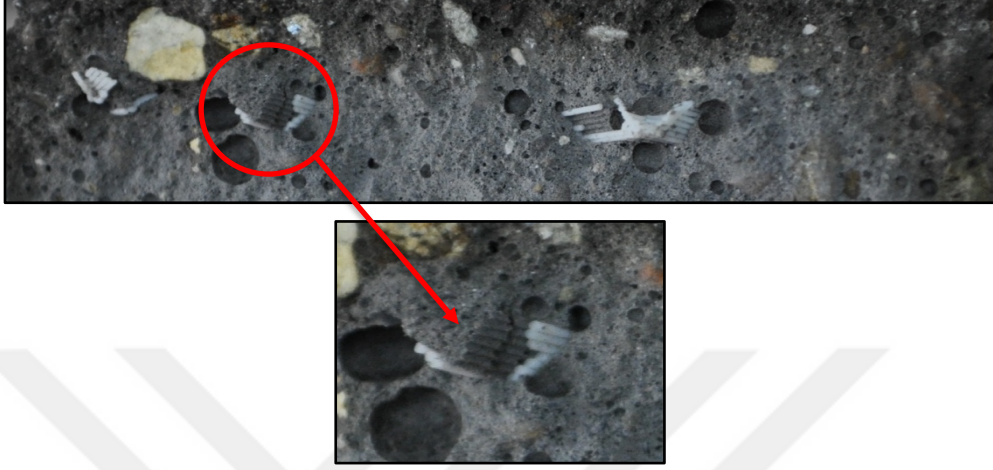
Resim 20.7 PETG – 2 mm – sarmal şekilli ızgara görseli.



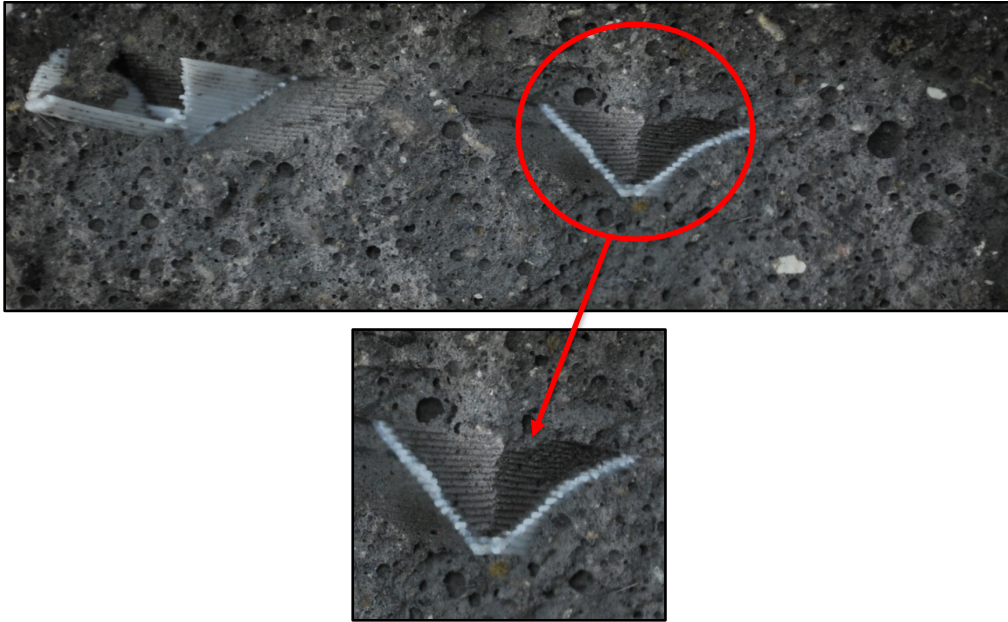
Resim 21.8 PETG – 5 mm – sarmal şekilli ızgara görseli.

Resim 4.9 ve Resim 4.10 da kafes olarak adlandırılan üç boyutlu olarak ızgaranın köşelerde kademeli olarak genişlediği modelin 2 mm ve 5 mm örnekleri görülmektedir. Bu model ile bir nevi köşelerdeki birleşimlere takviye yapılmıştır. Bunun sonucunda 2

mm'lik görece ince olan ızgarada tam köşelerin birleşim noktasında değil de bu bölgelere yakın filament katmanlarının olduğu bölgede kopmalar meydana gelmiştir. 5 mm ise kafeslerin birleşim hattı boyunca düz bir çizgi şeklinde kopma meydana gelmiştir.



Resim 22.9 PETG – 2 mm – kafes şekilli ızgara görseli.



Resim 23.10 PETG – 5 mm – kafes şekilli ızgara görseli.

Resim 4.11'de mekanik olarak diğer filament malzemelerinden daha fazla sünek olan TPU malzeme ile üretilmiş ızgaralara ait farklı şekil ve kalınlıklarda örnekler görülmektedir. Bu malzemenin kullanıldığı hiçbir ızgara modelinde harçlar parçalı bir şekilde ayrılmamıştır. Kopma direnci tayini deneyinde harçlar tamamen kırılmış ama

kırılan parçalar ızgara tarafından tutulmuş ve bu parçaların elle ayrılması da mümkün olmamıştır. Fotoğraflar incelendiğinde ızgaralarda kırılma şekilde bir ayrılmanın olmadığı ve filament katmanları doğrultusunda uzamaların olduğu görülmektedir. Bu katmanlar daha da zorlandığında Resim 4.11 c)'de görüldüğü gibi filament katmanlarının daha ince ipliklenmelere dönüşerek direncini sürdürdüğü görülmektedir.



a) 2 mm kare



b) 5 mm üçgen



c) 2 mm altıgen



d) 5 mm altıgen



e) 5mm Sarmal



f) 2 mm ızgara

Resim 24.11 TPU ızgara görselleri.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Hafif ve orta şiddetli depremlerde yapısal olmayan elemanlardan duvar ve cephe kaplamalarında hasar oluşmaması veya hasar oluşsa dahi üzerindeki ve etrafındaki kıymetli eşyalara ve insanlara zarar vermemesi için geopolimer esaslı bir kompozit malzeme yapılması bu tez çalışmasının temel amacıdır. Bu kapsamda harç olarak uçucu kül esaslı geopolimer bir karışım ve içerisine eriyik yığma modelleme (FDM) üç boyutlu yazıcısı ile imal edilmiş ızgaralar yerleştirmek suretiyle bir nevi tercihli lifli kompozit bir malzeme üretilmiştir.

C ve F sınıfı uçucu küller ile yapılan çalışmalarda eğilme dayanımı en yüksek olan seri seçilmiş ve bu harç matris eleman olarak kullanılmıştır. F sınıfı uçucu külden üretilen harcın eğilme dayanımı 6,3 MPa, basınç dayanımı 15 MPa dır. Harcın görünür porozitesi %22, su emmesi %13, birim hacim ağırlığı 1684 kg/m^3 ve görünür yoğunluğu 2166 kg/m^3 dür.

Kompozit malzemenin lif kısmını ifade eden ızgaranın üretilmesinde beş farklı filament malzemesi, beş farklı ızgara geometrisi ve iki farklı kalınlık kullanılmıştır. Eğilme dayanımı en yüksek olan seri 9,2 MPa ile 2 mm kalınlığındaki üçgen geometriye sahip TPU malzemedan yapılmış seridir. Geometriden bağımsız olarak eğilme dayanımı açısından PETG ile üretilen ızgaralar en iyi performansı sergilemiştir. Bunun sebebi gevrek malzemeler arasında (yani TPU dışındaki malzemeler arasında) elastisite modülü en yüksek malzemenin bu olması düşünülebilir. 2 mm kalınlıkta ortalama 7,79 MPa 5 mm kalınlıkta ortalama 7,21 MPa eğilme dayanımı göstermiştir. Eğilme dayanımına en düşük katkıyı ise PLA vermiştir. Buna sebep PLA'nın geopolimer üretiminde kullanılan alkali aktivatörlerden biri olan NaOH'e karşı duyarlı olmasından olabilir. Eğilme dayanımına etki eden en önemli faktör ızgaranın kalınlığıdır. 2 cm kalınlığındaki harç içerisine yerleştirilen 2 mm kalınlıkta ızgaralar tüm malzemelerde 5 mm ye göre daha yüksek katkı sağlamıştır. Hatta bazı serilerde kalın ızgaralar eğilme dayanımını negatif olarak etkilemiştir. ızgaranın kalınlaşması, eğilme deneyi sırasında katkı sağlamaktan ziyade eleman kesitinde ilk çatlağın erken oluşmasına sebep verip matrisin erken kırılmasına yol açıyor olabilir. Malzemedan malzemeye farklılık gösterse de genel olarak ızgara geometrinde en iyi sonucu veren kafes olmuştur.

Ani bir etki sonucu bu kompozit malzemenin göstereceği davranış kopma enerjisinin tayini yoluyla belirlenmiştir. Kopma enerjisi en yüksek olan seri 5,88 J ile 5 mm kalınlığındaki üçgen ve altıgen geometriye sahip TPU malzemedan yapılmış serilerdir. Izgaranın geometrisinden bağımsız olarak en düşük katkı sağlayan malzeme değişmemiş ve PLA en son sırada yer almıştır. Bunun yanında en yüksek katkı sağlayan malzeme diğer malzemelere kıyasla oldukça yüksek oranda TPU malzemedir. Kopma enerjisinin etkileyen en önemli faktör ızgaranın kalınlığı olmuştur. Tüm serilerde ya 2 mm seviyesinde ya da daha yüksek olarak eğilme dayanımındaki durumun tam tersi bir durum söz konusu olmuş ve 5 mm'lik ızgaralar daha iyi bir performans sergilemiştir. Geometri olarak en iyi performansı kafes, en düşük performansı kare sergilemiştir.

Kopma enerjisinin ardından kırık yüzeylerin incelemesi filament ve harç arasında kenetlenme konusunda bir sorunun olmadığı, FDM yöntemi ile üç boyutlu yazıcının tabakalar halinde yapmış olduğu üretimde deney sırasında katmanların birbirinden ayrılmadı görülmektedir. Izgaraların geometrisindeki önemli noktanın farklı doğrultuda gelen filamentlerin üst üste bindiği; yani geometrideki köşe noktalarının olduğu yerlerdir. Bu köşe noktalar ve civarı ızgaraların en kritik bölgeleri olduğu düşünülebilir.

Yapılan bu tez çalışması ile duvar ve cephe kaplamalarında uçucu kül esaslı geopolimer harçlar ile üç boyutlu yazıcılar yardımıyla kompozit malzeme yapılabilirliği sonucuna varılmıştır. Yapılacak malzemenin eğilme dayanımı arttırılacaksa geometri olarak kafes, kalınlık olarak 2 mm ve malzeme olarak PETG önerilebilir. Şayet yapılacak malzemenin kopma direnci arttırılacak ise geometri olarak kafes, kalınlık olarak 5 mm ve malzeme olarak TPU önerilebilir. Tüm sonuçlar dikkate alınıp bu çalışmada kullanılan geopolimer harç için tek bir ızgara önerilmesi gerekirse; üçgen geometriye sahip TPU malzeme önerilebilir.

Günümüz inşaat sektöründe eklemeli imalat yöntemlerinin kullanımının giderek arttığı bu dönemde bu çalışmanın literatüre farklı bir bakış açısı olarak katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Alnkaa A, 2019, Farklı Kür Koşullarının Geopolimer Harçların Özelliklerine Etkisi, Kastamonu Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kastamonu.
- Arioz E, Arioz O, Koçar O M, 2012, Leaching of F-type fly ash based geopolymers, CHISA 25-29 August 2012, Procedia Engineering 42, 1114-1120.
- Aruntaş H Y, 2006, Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, G.Ü Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 21, No 1, 193–203.
- ASTM C 618, 2019, Specification for Fly Ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, ASTM International West Conshohocken, PA.
- Canpolat F, Yılmaz K, 2002, Doğal Zeolit ve Uçucu Kül Katkılı ve Katkısız Harçların Sülfat Dayanıklılığı, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, Vol.XVI, No:2, 11-24
- Çelik K, Özkan A, 2017, Eklemeli İmalat Yöntemleri İle Üretim ve Onarım Uygulamaları, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Sayı:5, 107-121.
- Çelik M H, Aruntaş Y, Baran Y, 2003, Seyitömer ve Çayırhan Uçucu Küllerinin Portland Çimentosu-Uçucu Kül (Pç-Uk) Hamurunun Priz Başlama ve Sonu Sürelerine Etkisi, Politeknik Dergisi, Cilt:6 Sayı: 1, 397-409, Ankara.
- Gani M S J, 1997, Cement and Concrete, Chapman & Hall, London.
- Gençel O ve Tokay H, 2019, Uçucu Küllü Geopolimer Harcın Özellikleri, SETSCI Conference Proceedings, 4 (1): 184-189, 2019.
- Güleç C, 2019, 3 Boyutlu Yazıcılarda Parçacık Fiber Takviyeli Filament ile Yazdırılan Parçaların Yapıştırma Dayanımlarının Belirlenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 54, Karabük.
- Gürsel A, Meral Ç. 2012, Türkiye'de Çimento Üretiminin Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Analizi, 2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, 13 – 16 Eylül 2012 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla-İZMİR.
- Karakulak E, 2019, Uçucu Kül ve Kablo Atıklarının Çimento Harcı Üretiminde Kullanılması, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 86, Balıkesir.

- Kavasoğlu, E, 2019, Mikro Fiber ve Uçucu Kül Katkılı Çimento Harçlarının Dayanıklılık İndeksinin Belirlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64, Afyonkarahisar.
- Kaya M, 2016, Farklı Uçucu Küller Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 207, Sakarya.
- Kaygusuz B., Özerinç S, 2018, 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen PLA Bazlı Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Makine Tasarım ve İmalat Dergisi, Cilt 16, Sayı 1.
- Kuranlı Ö F, 2020, Farklı Bağlayıcı ve Lif İçeren Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Mercan N, 2007, Uçucu Kül Katkısıyla Üretilen Harçların Dayanım ve Dayanıklılığının Araştırılması, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 69, İstanbul.
- Moujoud Z, Ousaleh H A, Ayuç İ, Bouari A E, Tanane Ö, 2023, Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers: A Review of Recent Advances İn Processing and Properties, Construction and Building Materials, 388, Id: 131666.
- Örklemez, E, 2019, Uçucu Kül Tabanlı Geopolimer Harçlarda Diatomit İkamesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 137, Kayseri.
- Özcan U, Güngör S, 2019, Sürdürülebilir Bir Yöntem/Betonda Puzolan Kullanımı, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 15, 176-182.
- Özcan Z, 2020, Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Tabanlı Harçların Özellikleri, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.
- Özsolak O, 2019, Eklemeli İmalat Yöntemleri ve Kullanılan Malzemeler, International Journal of Innovative Engineering Applications, 3, 9-14.
- Özsoy K, Duman B, 2017, Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği, International Journal Of 3D Printing Technologies and Digital Industry 1:1, 36-48.

- Raza M H, Zhong R Y, Han M, 2022, Recent Advances and Productivity Analysis Of 3D Printed Geopolymers, Additive Manufacturing, 52, Id: 102685.
- Teixeira A J, Rangel B, Alves J L vd., 2023, A Road Map to Find in 3D Printing a New Design Plasticity for Construction the State of Art, Frontiers of Architectural Research, 12, 337-360.
- Tokay M, Erdoğan K, 1998, Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB Arge/Y 98.3.
- Topçu İ B, Sofuoğlu T, 2020, Pres Filtre Atığı ve Uçucu Kül ile Elde Edilen Geopolimer Harçların Farklı Koşullar Altında Birim Ağırlığı ve Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi, ECJSE 2020 (2) 806-823.
- TS EN 14158, Aralık 2004-12, Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Kopma Enerjisinin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14889-2, 2006, Lifler - Betonda kullanım için - Bölüm 2: Polimer lifler - Tarifler, özellikler ve uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tuygun C S, 2002, Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Tümer M.B. , 2020, Üç Boyutlu Yazıcılar ve Günümüz Mimarisinde Kullanımı, Işık Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Xia M, Sanjayan J G, 2016, Method of Formulating Geopolymer For 3D Printing for Construction Applications, Elsevier Materials and Design, 110, 382-390.
- Zhong H, Zhang M, 2022, 3D Printing Geopolymers: A review, Cement and Composites 128, 104455.
- Wu, P, Zhao, X, Baller J H, Wang X, 2018, Developing a conceptual framework to improve the implementation of 3D printing technology in the construction industry, Architectural Science Review, 61:3, 133-142.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://static.ticimax.cloud/42373/uploads/dosyalar/porima-tds-tr.pdf> 04.10.2023.
- 2- https://www.turkcimento.org.tr/uploads/pdf/Yeni-2022_Aylik-rev8.xls, 02.03.2023.
- 3- <https://www.boyutkat.com/3d-yazici-filament/pla-filament-nedir/>, 02.03.2021.
- 4- <https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/39-3d-yazici-filament-ozellikleri>, 06.05.2023.

- 5- <https://blog.3dortgen.com/rehber-abs-filament-nedir-ne-degildir/> 06.05.2023
- 6- <https://omerfarukyildiz.com/tpu-filament-nedir/>, 24.09.2023.
- 7- <https://iston.istanbul/3d-beton-yazici-teknolojisi>, 24.09.2023.
- 8- <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> 16.09.2023.

