



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN NİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



KATMANLI İMALAT YÖNTEMİYLE  
ÜRETİLEN KUM DÖKÜM KALIPLARININ  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE BASKI  
PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN  
İNCELENMESİ

İbrahim ASLAN

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2023  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

İbrahim ASLAN tarafından hazırlanan “Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilen Kum Döküm Kalıplarının Mekanik Özelliklerine Baskı Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 09/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Ahmet CAN

.....

#### Üye

Prof. Dr. Süleyman NEŞELİ

.....

#### Üye

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ....../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU  
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP tarafından 211419001 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İbrahim ASLAN

Tarih: 09/06/2023

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### KATMANLI İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN KUM DÖKÜM KALIPLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE BASKI PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

İbrahim ASLAN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet CAN

2023, 173 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Ahmet CAN

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

Prof. Dr. Süleyman NEŞELİ

Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ

Günümüzde, döküm sanayisinde kullanılan geleneksel döküm yönteminde, öncelikle model üretimi, modelden kalıp üretimi, sonrasında ise kum kalıptaki boşluğa eriyik malzemenin dökülüp katılmasıyla döküm parçalar üretilmektedir. Ancak, bu yöntem ile karmaşık veya içi boş parçaların üretimi zordur. Diğer taraftan model maliyetlerinin yüksek olması ilk yatırım maliyetlerini de artırmaktadır. Bu sebeple, model gereksizdir direkt kalıp ve maça üretimi ile karmaşık geometri, içi boş parçaların dahi dökümünün yapılarak üretilmesi mümkün kılınabilecek 3 boyutlu yazıcının kullanımı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada kartuş ile püskürtme metoduna alternatif olarak geliştirilen yeni bir nozul sistemine sahip bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcının özgün tasarımı yapılarak imal edilmiştir. 3B yazıcı; ana şase, kum serici ve püskürtme olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır. Kum kalıp üretiminde kullanılan sarf malzemeler ise silis kumu, furan reçinesi ve katalizördür. İmal edilen 3 boyutlu yazıcıda daha ucuz, hassas ve kaliteli döküm parçalarının üretiminin sağlanması için farklı baskı parametrelerinde (baskı kafası ilerleme hızı, katalizör oranı, kum tane boyutu) kum kalıplar basılmıştır. Son olarak ise bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcıda basılan kalıpların gözeneklilik, basma, eğme, boyutsal doğruluk, gaz geçirgenliği, yanma testi ve SEM analizi yapılarak farklı baskı parametrelerinin bu özelliklere etkileri incelenmiştir. Ayrıca, gerçek ölçülerde kum kalıp modellenerek Ansys programında hidrostatik basınç analizi yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda, farklı baskı parametrelerinde üretilen numunelerin basma dayanımı 0,0472 MPa-0,6471 MPa aralığında, gaz geçirgenliği 150 GP-180 GP aralığında, gözeneklilik oranı %38,69-%56,65 aralığında, eğme dayanımı 0,0301 MPa-0,3844 MPa aralığında, yanma kaybı oranı ise %3,06-%7,39 aralığında bulunmuştur. Çalışma sonucunda üretilen parçaların, kum kalıp olarak kullanılması için yeterli mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Bu yazıcı, mevcut ticari yazıcılara nazaran oldukça düşük ilk yatırım ve sarf malzeme maliyetine sahiptir. Bu çalışmayla, döküm sektöründe özellikle özel tasarım veya prototip ürünlerin dökülebilmesi için gerekli kum kalıp üretiminde faydalı olacağı düşünülen bu yazıcının başarılı bir şekilde üretimi ile birlikte yerleşme için de adımlar atılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Bağlayıcı Püskürtmeli 3B Yazıcı, Baskı Parametreleri, Döküm Kalıbı, Eklmeli İmalat, Furan Reçine, Mekanik Özellikler, Silis Kumu, Taramalı Elektron Mikroskobu

## **ABSTRACT**

### **Ph.D THESIS**

# **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PRINTING PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF SAND CASTING MOLDS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD**

**İbrahim ASLAN**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY  
IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet CAN**

**2023, 173 Pages**

#### **Jury**

**Assoc. Prof. Dr. Ahmet CAN  
Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN  
Prof. Dr. Murat DİLMEÇ  
Prof. Dr. Süleyman NEŞELİ  
Asst. Prof. Mevlüt TÜRKÖZ**

Today, in the traditional casting method used in the casting industry, firstly model production, mold production from the model, then casting parts are produced by pouring the molten material into the cavity in the sand mold and solidifying. However, it is difficult to manufacture complex or hollow parts with this method. On the other hand, high model costs increase the initial investment costs. For this reason, the use of a 3D printer, which makes it possible to produce molds and cores directly without the need for a model, and by casting even hollow parts with complex geometries, gains importance. In this study, a binder jetting 3D printer design with a new nozzle system developed as an alternative to the spraying with cartridge method has been produced. 3D printer; It consists of 3 parts, the main chassis, the sand spreader and the spraying. Consumables used in sand mold production are silica sand, furan resin and catalyst. Sand molds were printed with different printing parameters (printhead feed rate, catalyst ratio, sand grain size) in order to produce cheaper, precise and high quality casting parts on the 3D printer. Finally, porosity, compression, bending, dimensional accuracy, gas permeability, loss on ignition test and SEM analysis of the molds printed on the 3D printer were performed and the effects of different printing parameters on these properties were examined. In addition, real size sand molds were modeled and hydrostatic pressure analysis was performed in Ansys program, and the results were examined. According to the test results, the compressive strength of the the samples was found in the range of 0,0472 MPa-0,6471 MPa, the gas permeability was found in the range of 150 GP-180 GP, the porosity ratio was found in the range of %38,69-%56,65, the flexural strength was in the range of 0,0301 MPa-0,3844 MPa, the loss on ignition rate was in the range of %3,06-%7,39 for the samples produced. As a result of the study, it was seen that the produced parts had sufficient mechanical properties to be used as sand molds. This printer has very low initial investment and consumable costs compared to existing commercial printers. With this study, steps were taken for domestic production with the successful production of this printer, which is thought to be useful in the production of sand molds required for casting special design or prototype products in the casting industry.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Binder Jetting 3D Printer, Casting Mold, Furan Resin, Mechanical Properties, Printing Parameters, Scanning Electron Microscope, Silica Sand.

## ÖNSÖZ

Günümüzde geleneksel kum döküm kalıplarında ilk yatırım maliyeti olarak model üretimi karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, modeller ters açılarda ve içi boş parçalarda çoğu zaman karmaşık hale gelmektedir. Bu sebeple geleneksel kum kalıp üretim yöntemlerine alternatif katmanlı üretim yöntemiyle kum kalıplarının üretilmesi amacıyla bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcı sisteminin geliştirilmesinin önemi gün geçtikçe artmaktadır.

Genel itibarıyla üç kısımdan oluşan bu çalışmada; birinci kısımda, bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcı tasarımı yapılarak imal edilmiştir. İkinci kısımda ise, farklı baskı parametrelerinde kum kalıplar üretilmiştir. Üçüncü kısımda ise, üretilen kum kalıpların mekanik, döküm testleri yapılmış ve mikro yapısı incelenmiştir. Böylece, baskı parametrelerinin mekanik, döküm ve mikro yapı özelliklere etkisi incelenmiştir.

Doktora tez çalışmasının konu tespitinden son aşamasına kadar desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim değerli danışmanım Doç. Dr. Ahmet CAN'a ve her zaman yanımda bana destek olan aileme çok teşekkür ederim.

İbrahim ASLAN  
KONYA-2023

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	ix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>3</b>
2.1. Katmanlı İmalat Yöntemleri .....	3
2.1.1. Katmanlı İmalat Yöntemlerinin Tanımı ve Tarihi .....	3
2.1.2. Katmanlı İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması .....	4
2.2. Döküm ve Yöntemleri .....	11
2.2.1. Dökümün Tanımı .....	11
2.2.2. Dökümün Avantajları ve Dezavantajları .....	11
2.2.3. Döküm Yöntemlerinin Sınıflandırılması .....	12
2.3. Tez Konusu Kapsamında Yapılan Çalışma Örnekleri .....	19
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>26</b>
3.1. Deneysel Çalışmalar .....	26
3.1.1. Üç Boyutlu Yazıcının Üretimi .....	28
3.1.2. Kum Kalıp Üretimi .....	47
3.1.3. Baskı Parametreleri.....	57
3.1.4. Mekanik Testler .....	61
3.1.4.1. Gözeneklilik Testi.....	61
3.1.4.2. Basma Testi.....	62
3.1.4.3. Eğme Testi .....	64
3.1.5. Döküm Testleri .....	66
3.1.5.1. Boyutsal Doğruluk Ölçümleri.....	66
3.1.5.2. Gaz Geçirgenliği .....	67
3.1.5.3. Yanma Kaybı .....	68
3.1.6. Mikro Yapı İncelemeleri.....	69
3.1.7. Hidrostatik Basınç Analizi.....	71
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>72</b>
4.1. Mekanik Test Sonuçları .....	72
4.1.1. Gözeneklilik Test Sonuçları.....	72
4.1.2. Basma Test Sonuçları .....	77
4.1.3. Eğme Test Sonuçları .....	84
4.2. Döküm Test Sonuçları .....	90
4.2.1. Boyutsal Doğruluk Test Sonuçları.....	90
4.2.2. Gaz Geçirgenliği Test Sonuçları.....	96

4.2.3. Yanma Kaybı Test Sonuçları .....	99
4.3. Karşılaştırmalı Test Sonuçları .....	102
4.4. Mikro Yapı İnceleme Sonuçları .....	105
4.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İnceleme Sonuçları .....	105
4.5. Hidrostatik Basınç Analizi Sonuçları .....	113
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>119</b>
5.1. Sonuçlar .....	119
5.2. Öneriler .....	126
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>127</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>133</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

mm	Milimetre
MPa	Megapascal
GP	Gaz Geçirgenliği
$\sigma$	Gerilme (MPa)
$\epsilon$	Birim Şekil Değişirme (mm/mm)
%	Yüzde
s	Saniye
kg	Kilogram
gr	Gram
N	Kuvvet (Newton)
cm	Santimetre
$\emptyset$	Çap
dk	Dakika
‰	Binde
$\mu\text{m}$	Mikrometre
bar	Basınç (bar)
lt	Litre
°C	Santigrat Derece
dev	Devir
$\rho_{\text{teorik}}$	Teorik Yoğunluk ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
$\rho_{\text{yığımsal}}$	Deneysel Yoğunluk ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
kV	Kilovolt
K	Kelvin

### Kısaltmalar

CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
3B-3D	Üç Boyut
3DP-3BP	Üç Boyutlu Yazıcı
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
STL	Standart Üçgen Dili
SLA	Stereolitografi
FDM	Ergiterek Yığıma ile Modelleme
SLS	Seçmeli Lazer Sinterleme
SLM	Seçmeli Lazer Ergitme
EBM	Elektron Işınli Ergitme
DMLS	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
LOM	Tabakalı Yapıştırırmalı Parça İmalatı
DMEA	Dimetiletılamin
TEA	Trietilamin
3DSP	3B Kum Baskı
DLSS	Doğrudan Lazer Kum Sinterleme
CAM	Bilgisayar Destekli İmalat

SEM	Taramalı elektron mikroskobu
EDX	Enerji Dağılım X Işını Spektrometresi
DC	Doğru Akım
PET	Polietilen Tereftalat
PCM	Kalıpsız Döküm İmalatı
BİTAM	Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi
AFS	Amerikan Dökümcüler Birliği
GFN	Tane İnceliği Sayısı
APTS	Para-Toluensülfonik Asit

## 1. GİRİŞ

Döküm, en eski üretim yöntemlerinden birisidir. İnsanlar tarih boyunca döküm yöntemiyle birçok metali eritip kalıplara dökerek şekil vermişlerdir (Jiménez-Martín vd., 2021). Günümüzde de döküm yöntemi çok kullanılan üretim yöntemlerindedir. Döküm yönteminin; üretim yelpazesinin geniş olması, birçok alaşımın dökümünün yapılabilmesi, seri üretim açısından avantajı olması gibi birçok neden yaygın üretim yöntemi olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Ancak az sayıda parçaların üretimi için genellikle ekonomik değildir. Ayrıca, yatırım maliyeti yüksektir (Aran, 2007).

Teknolojinin ilerlemesi ile modern imalat yöntemlerinin gelişimi de hızlanmıştır. Katmanlı imalat da gelişmekte olan modern imalat yöntemlerinden birisidir. Katmanlı imalat yönteminin; karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi, özel üretim yapılabilmesi gibi birçok neden modern üretim yöntemi olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Ancak, birçok imalat yöntemine göre üretim hızları düşüktür ve üretimde kullanılan malzeme çeşitleri sınırlıdır.

Bu sebeple döküm ve katmanlı imalat yöntemlerinin avantajlarını göz önünde bulundurarak özellikle karmaşık geometriye sahip, ters açılı parçaların ve özel prototip parçaların dökümle üretimi için katmanlı imalat yöntemiyle modelsiz kum kalıp üretimi önem arz etmektedir.

Geleneksel kum döküm kalıplarında ilk yatırım maliyeti, model üretimidir. Modeller, ters açılarda ve içi boş parçalarda çoğu zaman karmaşık hale gelmektedir. Bazı karmaşık parçalarda kum kalıp yerini kayıp köpük ve kayıp mum yöntemine bırakılmaktadır. Ancak, bu iki yöntem ise, bütün parçalara uygulanamamaktadır.

Bu tez çalışmasıyla, geleneksel üretim yöntemleri ile üretimi zor olan karmaşık veya içi boş parçaların, katmanlı üretim yöntemiyle kum kalıplarının yapılarak dökülmesi amacıyla bir bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcı sistemi geliştirilmiştir. Bağlayıcı püskürtme ile katmanlı imalat yapan 3 boyutlu yazıcıların nozul sistemleri incelendiğinde, bu yazıcıların püskürtme nozul sistemlerinin (kartuş) ve bağlayıcı sarf malzemelerin sektördeki üretim hacminin büyük ve teknolojik gelişmelerde zirvede olan şirketlerin üretiminde olduğu görülmüştür. Ayrıca bu kartuş nozul sistemlerinin pahalı olması yanında kartuşun uçlarında bulunan deliklerin sıkça tıkanabildiği, bu sebeple her bir katman üretiminde kendini temizlemesini gerektirmesi de bir diğer dezavantajdır. Bu amaçla, daha ekonomik bir tasarımla yerli ve yeni bir püskürtme nozul sistemi üretilmesi ve bu nozul sisteminde döküm sektöründe kullanılan kum ve bağlayıcı türlerini

kullanarak bağlayıcı püskürtme ile katmanlı imalat yapabilen 3 boyutlu yazıcı üretimi sağlanmıştır.

Literatür incelendiği zaman, bu çalışmada özel tasarımı, imalatı yapılan ve inkjet püskürtme metoduna alternatif olarak geliştirilen yeni bir nozul sistemine sahip bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcıda, sarf malzeme olarak geleneksel kum kalıp üretiminde kullanılan silis kumu, furan reçinesi ve katalizörü ile farklı baskı parametrelerinde kum kalıp üretiminin yapılması ve mekanik özelliklerinin incelenmesinin özgün değerde olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, öncelikle 3 eksenli mini CNC'nin çalışma sistemi mantığında fakat sisteme gerekli ek kısımlar ve revizyonlar yapılmasıyla bağlayıcı püskürtme ile katmanlı imalat yapabilen 3 boyutlu yazıcının ana gövde tasarımı ve imalatı sağlanmıştır. Sonrasında bu ana gövdeye ilave olarak kum serici ve püskürtme nozul sistemi tasarlanarak imal edilmiştir. İmal edilen 3 boyutlu yazıcıda farklı baskı parametreleri kullanılarak üretilen kum kalıpların mekanik testleri, döküm testleri ve mikro yapı özellikleri incelenmiş ve döküm kalıbı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca, 3B yazıcıda basılarak üretilen malzeme özelliklerinde malzeme seçilerek ve gerçek boyutlarda parça modellenerek Ansys programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hidrostatik basınç analizi yapılmıştır. Bu çalışmayla, döküm sektöründe özellikle özel tasarım veya prototip ürünler için gerekli kum kalıp üretiminde faydalı olacağı düşünülen bu yazıcının üretimi ile birlikte yerleşme için de adım atılmak istenmiştir. Böylece kartuş kullanmadan direkt püskürtme tekniği ile yeni bir yazıcı tasarlanarak üretimi gerçekleştirilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Katmanlı İmalat Yöntemleri

#### 2.1.1. Katmanlı İmalat Yöntemlerinin Tanımı ve Tarihi

Katmanlı imalat, geleneksel üretim yöntemlerinin aksine, üç boyutlu (3B) model verileri kullanılarak genellikle malzemelerin bir biri ardına tabaka tabaka şeklinde eklenmesiyle nesnelerin üretimini gerçekleştiren bir imalat yöntemidir. Bu yöntem, eklemeli imalat veya tabakalı üretim metodu da denmektedir (ASTM, 2012).

Günümüzde ise, yaygın olarak üç boyutlu yazıcı (3DP) olarak adlandırılan bu teknoloji sayesinde farklı malzemeler ile bilgisayar destekli üretim yapabilmek mümkündür. Plastik, polimer, metal, seramik gibi farklı malzemeler kullanılarak dijital yöntemlerle üç boyutlu nesne üretimini mümkün kılan modern üretim teknolojisi olan “üç boyutlu yazıcıların ilk ortaya çıkışı 1970’lere dayanmaktadır. 1986 yılında Charles Hull tarafından patenti alınmış ve günümüze kadar gelişerek gelmiş olan bu üretim metodu, el ile yapılamayacak kadar karmaşık formların üretilmesine imkan verirken, otomotiv, mimari, inşaat, tıp, biyoteknoloji, endüstriyel tasarım, moda tasarımı ve gıda gibi alanları içine alan geniş bir yelpazede kullanılmaktadır (Martinez vd., 2016).

Son zamanlarda katmanlı imalat üzerine yürütülen çalışmaların yoğunlaşmasının temel sebebi, katmanlı imalat teknolojilerinin sunduğu avantajlardır. Bu avantajlar içerisinde, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha fazla tasarım serbestliği, optimize tasarımlar sayesinde hafif ürünler ortaya konulması, daha az talaş kaldırma ve bu sayede daha az malzeme harcama gereksinimi, döküm veya deformasyon prosesleri için gerekli olan kalıplara ihtiyaç duymaması, kullanıcıya özel ürünler tasarlanıp imal edilebilmesi, tasarımdan imalata geçiş sürelerini kısaltarak piyasaya daha hızlı ürünler sunulması, doğrudan parça imal edilebilmesi gibi birçok avantaj sayılabilir (Poyraz vd., 2018).

Katmanlı imalat, gelişmekte olan teknolojilerden oluşan bir gruptur. Bu yöntemle bir seferde aşağıdan yukarıya malzeme ekleyerek kesitsel tabaka oluşturulabilir. Katmanlı imalat teknolojilerinin geliştirilmiş adımları Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Katmanlı imalat süreci, nesnenin 3B modeli ile başlar ve genellikle bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı ile tasarlanır. Sonrasında 3B modeli, katmanlı imalat standart arabirimi olan STL biçimli dosyaya dönüştürülür. Daha sonra, özel dilimleme yazılımlarla, bu modeli kesitli katmanlara böler ve katmanlı imalat makinesine gönderilen bir bilgisayar

dosyası oluşturur. Daha sonra katmanlı imalat makinesi, her katmanı malzemenin seçici yerleştirilmesi (veya şekillendirilmesi) yoluyla oluşturarak nesneyi oluşturur. Sayfanın üzerinden geri dönebilen bir inkjet yazıcı düşünün ki bu makine orijinal çalışmaları 3D nesnelere olana kadar üst üste katmanlar halinde malzeme ekleyerek üretilmesi, katmanlı imalata bir örnektir (Campbell vd., 2011).



Şekil 2.1. Genelleştirilmiş katmanlı imalat prosesi (Kara, 2013)

En yaygın eklemeli imalat teknikleri; Stereolitografi (SLA), Ergiterek Yığılma ile Modelleme (FDM), Üç Boyutlu Yazıcı (3DP), Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS) ve Seçmeli Lazer Ergitme (SLM), Elektron Işınli Ergitme (EBM), Çok Jetli Modelleme (Polyjet-Multijet) gibi yöntemlerdir. Bu teknikler ile sıvı reçineden, polimerlerden, polimer tozlarından ve metal tozlarından 3B fiziksel parçalar imal edilebilmektedir (Özsoy vd., 2017).

## 2.1.2. Katmanlı İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması

### 2.1.2.1. Stereolitografi (SLA)

Bu metotta bir lazer kaynağından elde edilen ışık enerjisi ile sıvı haldeki fotopolimer yüzey taranır. Taranan kısımlar sertleştikten sonra platform bir katman kalınlığı kadar aşağı iner ve yeni bir fotopolimer katman, lazer ışığıyla taranır. Bu yapılan işlemler tasarlanan tüm katmanlar bitene kadar tekrar edilir. İnşa işlemi bitince model, fotopolimer havuzdan çıkarılır. Şekil 2.2’de Stereolitografi yöntemi gösterilmiştir (Baş vd., 2015).

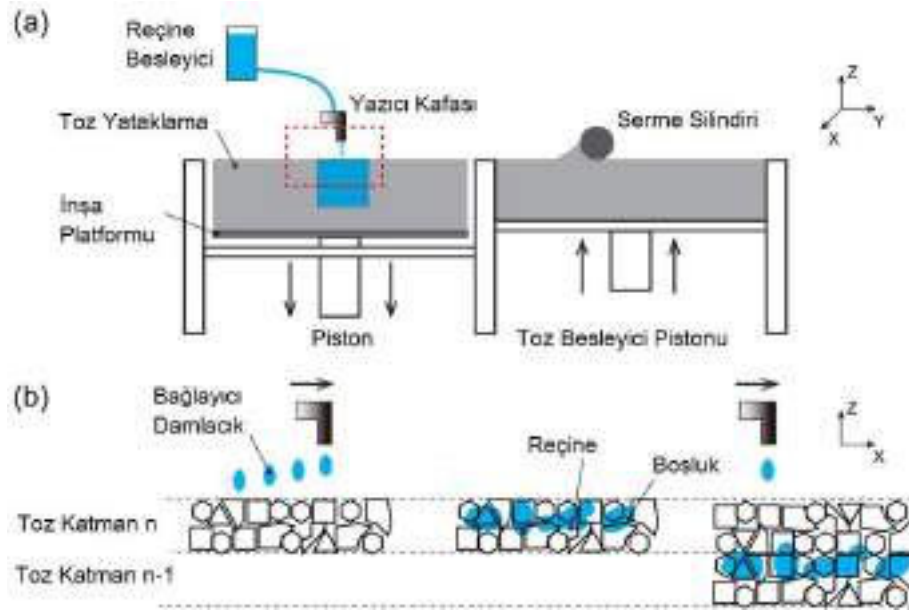


### 2.1.2.3. Üç Boyutlu Yazıcı (3DP- Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat)

Yapıştırıcı ile katmanlı imalat yöntemi, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirilmiştir. 3B yazıcı, toz halindeki herhangi bir malzemeden inşa işlemini gerçekleştirebilmektedir. Herhangi bir nesneyi üretebilmek için 3B modele ihtiyaç vardır. Bu model ise, bilgisayar destekli tasarım programları kullanılarak çizilir. Üretilen döküm parçanın boyut ölçülerin doğru olabilmesi için bu model boyutları çizilirken, kalıba dökülecek metalin çekme payı da dikkate alınmalıdır. Tasarlanan 3B model, özel yazılımlar kullanılarak dilimlenir ve yazıcıya gönderilir. 3B nesnelerin yazdırma işlemi, mürekkep püskürtmeli yazıcılara oldukça benzer ekipmanlar ile katman katman şeklinde gerçekleştirilir. İnşa işleminde çok ağızlı bir nozuldan yapıştırıcı püskürtülerek tozlar birbirine bağlanmakta, bir silindir ile yeni bir katman toz yayılmaktadır. İnşa işlemi bittikten sonra, parçayı çevreleyen ve aynı zamanda destek malzemesi görevi görmüş olan tozlar, vakum temizleyici veya fırçayla temizlenmektedir. Kullanılan malzeme ve uygulamaya göre infiltrasyon ve sinterleme gibi değişik ek işlemler de yapılabilir (Özsoy vd., 2017).

3B yazıcı ile üretilen kum kalıpların makineden çıkarılıp ara bölgelerindeki tozlar temizlendikten sonra dişi-erkek parçaları karşılıklı kapatılarak döküme hazır hale gelir. Bu parçalar bir aparat aracılığıyla sıkıştırılır ve içine yüksek sıcaklıklarda ergitilmiş metaller dökülebilir. Döküm işleminden sonra kalıp soğutulur ardından etrafındaki kum kırılarak dağıtılır ve metal parçaya ulaşılır (ASTM, 2012).

Diğer bir adıyla bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcı yöntemi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bu alanların sayısı günden güne artmaktadır. 3B yazıcı yöntemi; enerji depolama (Azhari vd., 2017), biyomedikal (Naitoh vd., 2006), tıp (Salmi, 2016), gıda (Holland vd., 2018), inşaat (Xia vd., 2020), döküm (Deng vd., 2018), otomotiv (Zhao vd., 2023), eczacılık (Sen vd., 2021), moda (Vanderploeg vd., 2017), tekstil (Chakraborty and Biswas, 2020) gibi alanlarda kullanılmaktadır (Mostafaei vd, 2021). 3B yazıcının üretim şeması Şekil 2.4'de verilmiştir.



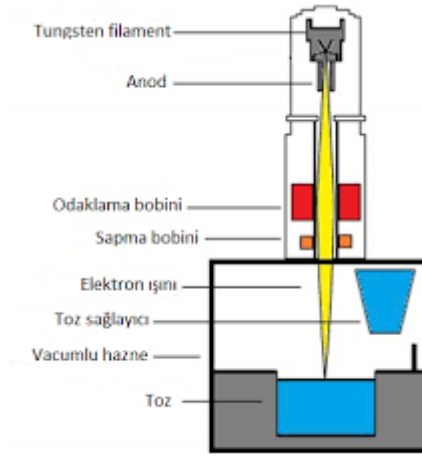
**Şekil 2.4.** 3B yazıcının üretim şeması: (a) 3B yazıcı mürekkep püskürtme baskı sistemi, (b) Kırmızı dikdörtgen alanın genişletilmesi: Bitişik tabakalar arasındaki toz / bağlayıcı etkileşimi (Xia vd., 2016)

#### 2.1.2.4. Seçmeli Lazer Sinterleme ve Ergitme (SLS/SLM)

Isıtılarak inşa tekniğinde, toz halindeki malzemenin istenilen noktalarına lazer veya elektron ışını gibi enerji kaynakları gönderilir. Bu bölgelerin ısıtılıp eritilerek veya sinterlenerek birbirleri ile kaynaşması sağlanır. Enerji tekniği olarak lazer kullanılır. İnşa sürecinde, üretilecek parçanın hangi alaşımdan veya metalden yapılacağı belirlenir. Hangi malzemeden üretileceği belirlendikten sonra, malzeme toz halde makinenin kartuşlarına yüklenmektedir. Isıtıldığında kaynaşabilen bir inşa malzemesi toz halde ince ve düzgün bir şekilde bir hazneye yayılır. Daha sonra tasarımdan alınan veriler doğrultusunda toz haznesinin içerisi lazer yardımı ile taranır. Böylece yakılan bölgedeki tozlar sıcaklık etkisiyle temas halinde olduğu diğer toz taneleriyle birbirlerine tutunmaktadır. Lazerin boş geçtiği bölgeler ise, toz halinde kalmakta ve parçaya destek olmaktadır (Özgüven, 2015). Şekil 2.5’de SLS yöntemi gösterilmiştir.



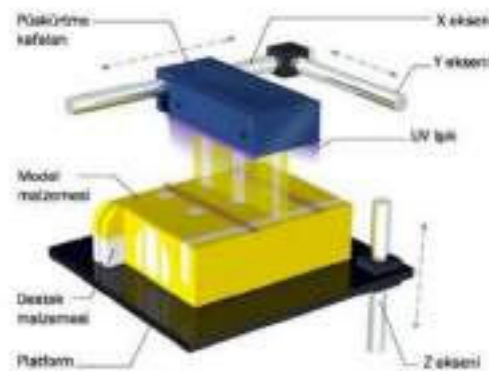
partikül boyutu ve katman kalınlığı daha büyüktür (Yalçın vd., 2017). Şekil 2.6’da EBM yönteminin temsili gösterilmiştir.



Şekil 2.6 EBM yönteminin temsili gösterimi (Baş vd., 2015)

#### 2.1.2.6. Çok Jetli Modelleme (PolyJet-MultiJet)

Bu yöntemde, sıcaklıkla eritilmiş inşa malzemesini kontrollü olarak, hareketli yazıcı kafalardaki çok sayıdaki nozul tarafından püskürtülerek boş bir tablanın üzerine bir katman oluşturulur ve sonrasında ultraviyole ışıkla kürlenerek katman katlaşır. İstenilen şekil elde edilinceye kadar bu işlemler tekrar eder ve şekil oluşturulur. Enjeksiyon kafalarından yarısı, parçayı oluşturan malzemeyi püskürtürken diğer yarısı da destek görevi görececek malzemeyi püskürtür. İmalat tamamlandığında parça tabladan sökülür ve destek malzemesi parçadan mekanik yöntemlerle ayrıştırılır (Özsoy vd., 2017). PolyJet yönteminin temsili gösterimi Şekil 2.7’de verilmiştir.

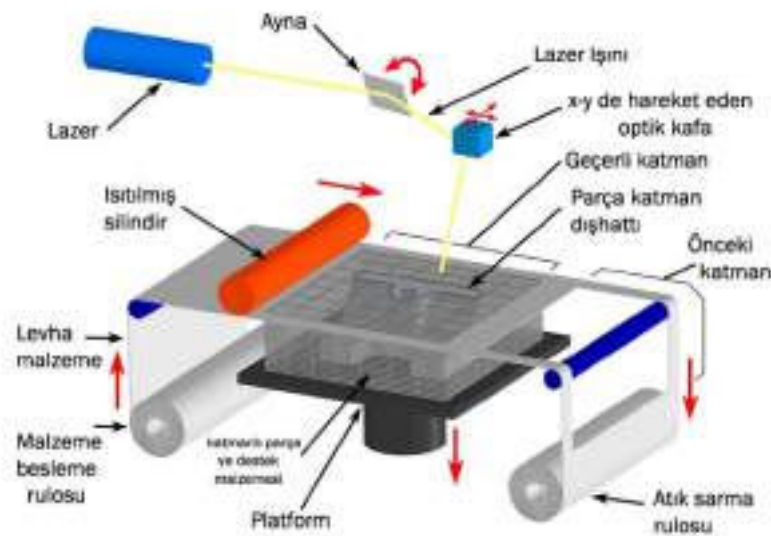


Şekil 2.7. PolyJet yönteminin temsili gösterimi (Çelik vd., 2013)

### 2.1.2.7. Tabakalı Yapıştırırmalı Parça İmalatı (LOM)

Sistemin ana bileşenleri, platform üzerindeki ince levhayı ileri süren bir besleme mekanizması, ince levhayı alt katmana basınç ve ısıyla bağlamak için ısıtılmış bir silindir ve her katmanda parçanın dış hatlarını kesen bir lazerdir. Parça, lazerle kesilmiş yapışkan kaplanmış ince levhanın bir önceki katmanın üstüne yapıştırılması ile üretilir. Bir lazer, her katmanda, parçanın dış hatlarını keser. Her kesim işlemi tamamlandıktan sonra platform ince levha kalınlığı kadar genellikle 0,05-0,5 mm kadar aşağıya iner ve başka bir ince levha, besleme mekanizması yardımıyla daha önceki katman üstüne ilerletilir. Platform daha sonra hafifçe yükselir ve ısıtılmış silindir yeni katmanı yapıştırmak için basınç uygular. Lazer parça dış hattını keser. Bu işlem parça tamamlanana kadar devam eder. Katman kesildikten sonra kalan ekstra malzemeler, parçayı üretim boyunca desteklemesi için yerinde kalır (Çelik vd., 2013). LOM yönteminin temsili gösterimi Şekil 2.8’de verilmiştir.

LOM’da malzeme olarak kaplanmış kağıt, plastik köpük kullanılabileceği gibi seramik veya metal tozu emdirilmiş malzemeler de kullanılabilir. Malzemenin kolay ve ucuz temin edilebilirliği yöntemi avantajlı kılmaktadır. Tasarım ve parametrelerin doğru seçilmesiyle, her boyutta yüksek hassasiyete sahip prototip dışında yapısal ve işlevsel modeller de elde edilebilir. Büyük hacimli parçalar yüksek hızla işlenebilmektedir. Çevre dostu bir teknolojidir (Çelik vd., 2013).



Şekil 2.8. LOM yönteminin temsili gösterimi (Çelik vd., 2013)

## 2.2. Döküm ve Yöntemleri

### 2.2.1. Dökümün Tanımı

Döküm işlemi, içinde üretilmek istenen parçanın biçimine sahip bir boşluk bulunan kalıplara sıvı metalin doldurulması ile yapılır (Aran, 2007). Döküm; model, maça, kalıp yapmak, sıvı metali dökerek katılaştırmak ve üretilen döküm parçasını temizlemek üzere genel olarak dört aşamalı bir işlemdir.

Model, dökülebilecek şeklin tahtadan, metalden veya başka uygun bir malzemedan (plastik) hazırlanmış kopyasıdır. Kalıptan çıkarıldığında geriye parçanın dış yüzeyinin izini taşıyan bir boşluk bırakır. Maçalar ise genellikle kum esaslı karışımlardan yapılan ve döküm parçasının iç boşluğunu sağlamak amacıyla kalıp boşluğuna yerleştirilen parçalardır. Kalıp iç yüzeyi ile maça yüzeyi arasında kalan hacim sıvı metalin dolacağı veya döküm şeklinin oluşacağı hacimdir (Çavuşoğlu, 1981).

Kalıplama işlemi, kalıbı sıvı metalin içine doldurabileceği hale getirmek için gerekli işlemleri kapsar. Dökülen parçanın üzerindeki yapışmış kum, fazla kısımların (yolluk, çıkıcı) giderilmesi ve temizleme işlemleri gerçekleştirilir (Çavuşoğlu, 1981).

### 2.2.2. Dökümün Avantajları ve Dezavantajları

#### Dökümün Avantajları:

- Yöntemin sınırları çok geniş olup, hem çok küçük, hem de tonlarca ağırlıktaki büyük parçaların üretimine uygun değişik teknikler bulunmaktadır.
- Çok karmaşık biçimli ve içi boş parçaların üretimi mümkündür.
- Hemen hemen tüm metal alaşımlarının dökümü mümkündür. Bazı malzemeler (dökme demir) ise sadece döküm yoluyla elde edilebilir.
- Seri üretime uygun döküm yöntemleri geliştirilmiştir (Bilgetekin, 2010).

#### Dökümün Dezavantajları:

- Çok ince kesitlerin elde edilmesi güçtür.
- Az sayıda parça üretimi için genellikle ekonomik değildir.
- Aynı malzemenin plastik şekil verme yöntemleri (dövme) ile elde edilmiş olanı, dayanım bakımından genellikle daha üstündür.

- Genellikle hassas boyut toleranslarının ve iyi yüzey kalitelerinin sağlanması güçtür.
- Çevre dostu bir imalat yöntemi değildir (Bilgetekin, 2010).

### 2.2.3. Döküm Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Döküm endüstrisinde kullanılan, şekilli parça döküm yöntemleri değişik şekillerde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar kalıp malzemesi veya yöntemin özelliği göz önüne alınarak yapılmıştır (Çavuşoğlu, 1981).

Döküme biçim veren kalıbın tekrar kullanılıp kullanılmayacağına göre en açık ve geçerli sınıflandırma aşağıda verilmiştir (Çavuşoğlu, 1981):

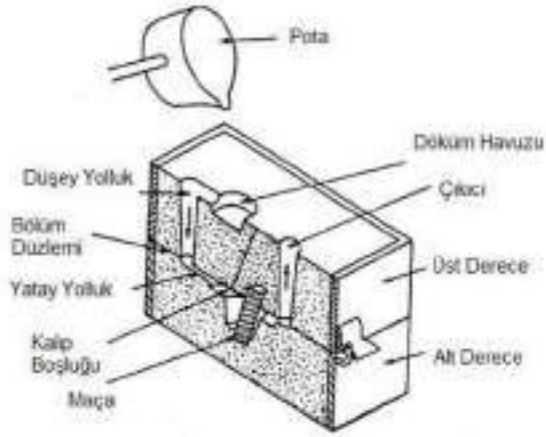
**A) Harcanan kalıp kullanan döküm yöntemleri:** Bu yöntemlerde katılma sonrasında parça çıkarılırken kalıp bozulur. Yani her yeni parça için yeni bir kalıp gereklidir (Aran, 2007). Harcanan kalıp kullanan döküm yöntemleri; a) Kum kalıba b) Kabuk kalıba c) Seramik kalıba d) Alçı kalıba e) Hassas döküm yöntemi olarak sınıflandırılır (Çavuşoğlu, 1981).

**B) Kalıcı kalıp kullanan döküm yöntemleri:** Döküm teknolojisinde erimiş metal, kalıcı (genellikle metal) kalıplara dökülerek de biçimlendirilebilir. Bu yöntem çok sayıda üretilecek, karmaşık biçimli ve boyut toleranslar, dar parçalar için tercih edilir (Aran, 2007). Kalıcı kalıp kullanan döküm yöntemleri; a) Metal kalıba döküm b) Basınçlı döküm c) Merkezkaç döküm d) Sürekli döküm olarak sınıflandırılır (Çavuşoğlu, 1981).

#### 2.2.3.1. Harcanan Kalıp Yöntemleri

##### 2.2.3.1.1. Kum Kalıba Döküm

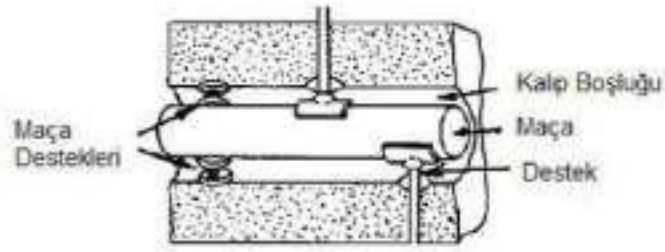
Demir esaslı ve demir dışı metallerin dökümünde, ucuz ve refrakter özelliğe sahip kum esaslı kalıp malzemeleri yaygın olarak kullanılır. Kum kalıba döküm, bir harcanan kalıp yöntemidir. Kalıplama kum esaslı malzemenin bir model etrafına sıkıştırılması ve daha sonra modelin çıkartılması ile yapılır. Genellikle iki parça olan kalıpta, yolluk sistemi ve besleme amaçlı çıkıcılar gibi diğer kalıplama elemanları da bulunur. İç boşlukların elde edilmesi için gerektiğinde maçalardan yararlanır. Şekil 2.9'da kum kalıp kesiti verilmiştir (Aran, 2007).



Şekil 2.9. Döküme hazır kum kalıbın kesiti (Aran, 2007)

### 2.2.3.1.1.1. Maçalar

Döküm parçaların iç boşluklarını veya modelin kumdan sıyrılması sırasında bozulabilecek kalıp kısımlarını oluşturmak için kullanılan kalıp elemanları, maça olarak adlandırılır. Ancak, maçalar sadece iç boşluk için değil kalıbın tamamı da maçadan yapılabilmektedir. Maça malzemeleri genellikle kum esaslı karışımlardır ama metal, seramik gibi malzemelerden yapılmış maçalarda kullanılabilir (Aran, 2007). Şekil 2.10'da Maça ve destekleri verilmiştir.



Şekil 2.10. Maça ve destekleri (Aran, 2007)

Bir maçadan istenen özellikler şunlardır: Maçalar yüksek sıcaklığa ve metal erozyonuna karşı yeterli dayanıma sahip olmalıdır. Döküm sonrasında kolay dağılmalıdır. Gaz geçirgenliği yeterli olmalıdır. Yüzeyleri düzgün olmalıdır. Maça malzemesi karışımının esasını silis, zirkon, olivin gibi kumlar oluşturur. Kullanılan bağlayıcılar organik ve inorganik olarak ayrılır (Aran, 2007).

### 2.2.3.1.1.2. Maça İmalat Yöntemleri

**A) Furan Yöntemi:** Pişirmeksizin kendi kendine sertleşen maça yöntemidir. Bu yöntemde bağlayıcı asit katalizör ile temas ettirildiğinde, bir kondenzasyon mekanizması oluşarak havada polimerizasyon olur. Sertleşme sırasında polimer reçine filmi, kuru taneleri sararak birbirine bağlar. Bu reaksiyon ekzotermiktir. Karışım; kum, bağlayıcı ve sertleştirici olarak 3 ana bileşenden oluşur (Şahin, 2021).

**B) Soğuk Kutu Yöntemi:** Kum iki ayrı bağlayıcı ile karıştırıldıktan sonra gaz katalizör yardımıyla pişirmeksizin sertleşen bir yöntemdir. Boyut hassasiyeti mükemmel, sertleşme hızı yüksektir (Şahin, 2021).

**C) CO<sub>2</sub> Yöntemi:** Gaz sertleştiricili silikat yöntemidir. 19. yüzyılın ilk yarısında geliştirilen bu yöntemin endüstriyel uygulaması 1950'lerde başlamıştır. Yöntem, sodyum silikat (cam suyu) ile bağlanan kum karışımından CO<sub>2</sub> gazı geçirilerek, gaz-silikat reaksiyonu sonucu silisik asit hidrojenli oluşturup, pişirmeye gerek kalmaksızın sertleştirme esasına dayanır (Şahin, 2021).

**D) Pep – set Yöntemi:** Soğuk kutu yönteminin aynısı olmakla beraber aradaki tek fark sertleştirici gaz yerine sıvının kullanılmasıdır. Soğuk kutu yönteminde sertleştirici DMEA ve TEA iken bu yöntemde kullanılan sıvı katalizör fenolik üreterandır (Şahin, 2021).

**E) Fascold Yöntemi:** Seri maça üretiminde kullanılan en yeni yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde maça kumu karışımı, ani bir reaksiyon sonucu bağ oluşturup, sertleşme yeterince tamamlanıncaya kadar maça sandığı içinde tutulur. Maçanın sandıktan çıkarılması için yeterli dayanımı kazanma süresi 1 dakikadır (Şahin, 2021).

### 2.2.3.1.2. Kabuk Kalıba Döküm

Kabuk kalıba döküm yöntemi “shell molding” veya “croning” yöntemleri olarak da bilinmektedir. Bu yöntemde kalıp, ısıtılmış bir model etrafında yapılandırılan kum ve sıcaklık etkisi ile sertleşme özelliğine sahip reçine bağlayıcı karışımdan meydana gelmektedir. Karışım ısıtıldığında, reçine ile bağlanan kum tanecikleri çok sert bir kabuk oluşturur. Kabuk kalıplama yöntemi birkaç gram ile 180 kg ağırlığa kadar demir ve demir dışı alaşımların dökümünde kullanılabilir (Yemen, 2019).

### **2.2.3.1.3. Seramik Kalıba Döküm**

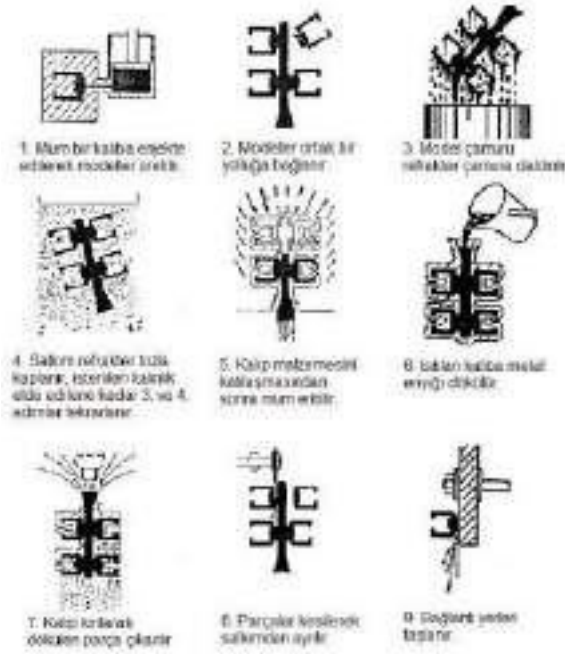
Seramik kalıba döküm yöntemi, investment (hassas) döküm yönteminden türetilerek İngiltere’de geliştirilmiş hassas bir yöntemdir. Bu yöntem, diğer hassas yöntemler ile üretilmeyecek kadar büyük boyutlu parçalarda ya da parça sayısının çok az olduğu durumlarda tercih edilir (Yemen, 2019).

### **2.2.3.1.4. Alçı Kalıba Döküm**

Alçı kalıba döküm yöntemi, demir dışı metallerin şekillendirilmesinde kullanılan özel bir döküm yöntemidir. Ana kalıplama malzemesi olarak alçı kullanılır. Bu yöntemin kullanılma nedeni, boyutsal hassasiyet oldukça yüksek bir seviyede olması ve döküm yüzeyinin düzgünlüğü açısından, kum kalıplara veya astarlanmış metalik kalıplara göre son derece ince yüzey detayları şekillendirilebilmesidir (Yemen, 2019).

### **2.2.3.1.5. Hassas Döküm**

Hassas döküm yönteminde, harcanan modelin etrafı oda sıcaklığında sertleşebilen bir refrakter çamur ile sarılarak hazırlanan kalıplar kullanılır. Kullanılan modellerde materyal seçimi genellikle balmumu ve plastikten yana yapılır ve kullanılan model daha sonradan ergitilerek veya yakılarak döküm işleminin gerçekleştirileceği kalıp boşluğu oluşturulur. Kum kalıba döküm yönteminde kullanılan modeller genel olarak ağaç veya metalden oluşturulur ve tekrar kullanılabilirler (Yemen, 2019). Hassas döküm üretim aşamaları Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Hassas döküm üretim aşamaları (Aran, 2007)

## 2.2.3.2. Kalıcı Kalıp Yöntemleri

### 2.2.3.2.1. Metal (Kokil) Kalıba Döküm

Bu yöntemde katılaşma sırasındaki soğuma, kum kalıplardan daha hızlı olduğu için içyapı daha ince tanelidir. Boyut hassasiyeti  $\pm 0,25$  mm olup, parça yüzeyleri temizleme işlemi gerektirmeyecek kadar yüksek kalitelidir. Metal kalıplarda kullanılan maçalar metal, kum veya alçıdan yapılabilir. Kokil kalıplar genellikle açılıp kapanan iki veya daha çok parçadan oluşur. Kalıp kapandıktan sonra oluşan boşluğa erimiş metal dökülür ve katılaşma beklendikten sonra kalıp açılarak parça çıkarılır. Bu işlemler elle yapılabileceği gibi, bir tertibat yardımıyla veya mekanizasyona geçilmesi halinde makinalar tarafından da yapılabilir. Genellikle demir dışı metallerin dökümü için kullanılan kokil döküm yöntemiyle üretilen parçalara örnek olarak soğutucu kompresör gövdeleri, hidrolik fren silindirleri, biyel kolları, alüminyum daktilo parçaları ve mutfak eşyaları gösterilebilir (Aran, 2007).

### 2.2.3.2.2. Basıncılı Döküm

Bu yöntemde eriyik, metal malzemedan yapılmış bir kalıcı kalıba çok yüksek basınçlar altında doldurulur. Katılaşma tamamlanana kadar basınç uygulamaya devam

edilir, daha sonra kalıp açılarak parça itici çubuklar yardımıyla çıkarılır. İşlemlerin tümü makinalar tarafından yapıldığından üretim hızı yüksektir (100...800 parça/saat). Bu yöntemle dökülen malzemeler erime sıcaklığı düşük çinko, alüminyum, bakır, kurşun ve kalay alaşımları gibi malzemelerdir. Basıncılı döküm makinaları, sıcak ve soğuk hazneli olmak üzere ikiye ayrılır (Aran, 2007).

Basıncılı döküm yöntemiyle üretilen parçaların çoğunda, metalin bölüm yüzeyine sızarak oluşturduğu bir döküm çapağı bulunur. Ayrıca hava çıkış ve itici çubuk kanallarına dolmuş metallerin de uzaklaştırılması gerekir. Bu çapak ve yolluklar mekanik preslerde kesilerek, taşlanarak veya başka uygun yöntemlerle uzaklaştırılır (Aran, 2007).

### 2.2.3.2.3. Merkezkaç (Savurma) Döküm

Savurma döküm yönteminde erimiş metal, bir eksen etrafında döndürülen kalıp içine dökülerek biçimlendirilir. Merkezkaç kuvvetlerinin oluşturduğu basınç, metalin kalıp cidarlarına homojen olarak dağılmasını ve parçanın kalıbın iç biçimini almasını sağlar (Aran, 2007). Savurma döküm türleri Şekil 2.12’de verilmiştir.

Bu gruptaki yöntemler:

- Gerçek savurma döküm
- Yarı savurma döküm
- Savurmalı döküm olarak üçe ayrılır (Aran, 2007).



Şekil 2.12. Savurma döküm türleri (Aran, 2007)

#### 2.2.3.2.3.1. Gerçek Savurma Döküm

Gerçek savurma dökümde iç boşlukların maça kullanmadan elde edilmesi amaçlanır. Parçanın iç kısmında dönme eksenini etrafındaki silindirik bir boşluk oluşur.

Yöntemin en yaygın olarak kullanıldığı alan boru üretimidir. Parçanın cidar kalınlığı, kalıp içine dökülen eriyiğin miktarı ile ayarlanabilir. Dökülecek parça sayısı az ise kalıplar kum esaslı malzemededen yapılır. Seri üretimde ise su ile soğutulan metal kalıplar kullanılır (Aran, 2007).

#### **2.2.3.2.3.2. Yarı Savurma Döküm**

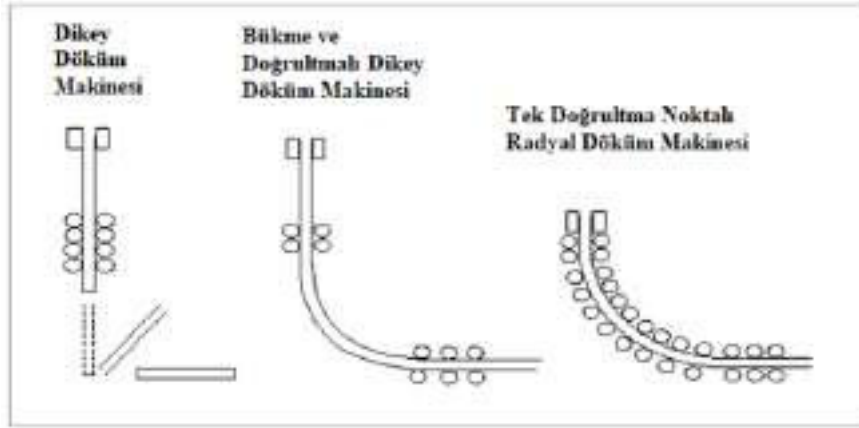
Yarı savurma dökümde dönel simetriye sahip, ancak iç boşluk içermeyen tekerlek ve dişli taslaklar gibi parçaların daha kaliteli dökümü için kullanılır. Parçada iç boşluk oluşturma gereği olmadığından burada sadece merkezkaç kuvvetin oluşturduğu radyal basınçtan yararlanır. Sıvı metal içinde düşük yoğunluklu bileşenler merkeze doğru ötelenerek uzaklaştırıldığından, gözeneksiz ve temiz bir içyapı elde edilir. Genellikle düşey olan dönme eksenini aynı zamanda parçaların dönel simetri eksenini olduğundan, kalıplar birkaç parçanın üst üste dökülebileceği şekilde düzenlenebilir (Aran, 2007).

#### **2.2.3.2.3.3. Savurmalı Döküm**

Savurmalı dökümün özelliği ise, parçalara ait kalıp boşluklarının kalıp dönme ekseninin dışına yerleştirilmeleridir. Metal, aynı zamanda dönme eksenini olan bir düşey yolluktan beslenir ve yatay yolluklardan geçerek kalıp boşluklarına ulaşır. Bir kalıpta genellikle çok sayıda küçük kalıp boşluğu bulunur (Aran, 2007).

#### **2.2.3.2.4. Sürekli Döküm**

Sürekli döküm, ergitilmiş sıvı çeliğin blum, kütük, slab veya beam blank olarak çeşitli ebat ve boyutlarda kontrollü olarak katılaştırılarak yarı mamul haline getirilmesi prosesine denir. Sürekli döküm tarihinin öncesi (1950’li yıllarda) sıvı çeliğin döküm prosesi ingot dökümdü. Ancak akabinde gelişen üretim teknolojileri ve ürünün kalitesi, verimliliği ve üretim tonajlarının artmasından dolayı sürekli döküm proseslerine geçilmiştir (Özdemir, 2020). Sürekli döküm yöntemi Şekil 2.13’de verilmiştir.



Şekil 2.13. Sürekli döküm yöntemi (Özdemir, 2020)

Sürekli döküm prosesinin başlaması için çeşitli ekipman ve parametrelerin hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Sürekli Döküm prosesi ekipmanlarını özetlemek gerekirse şu şekilde sıralanmaktadır. I. Pota, II. Tandış, III. Birincil Soğutma Bölgesi/Cu Kalıp su soğutması, IV. İkincil Soğutma Bölgesi/Sprey Su ile Soğutma, V. Çekme-Doğrultma Ünitesi, VI. Kesme Ünitesi (Özdemir, 2020).

### 2.3. Tez Konusu Kapsamında Yapılan Çalışma Örnekleri

Bonnefoy ve Marquet (2014) yaptıkları çalışmada, 3B yazıcıda kum kalıp üretimi gerçekleştirmiş ve üretilen numunelere eğme testi yaparak mekanik özellikleri belirlemişlerdir. Ayrıca, bir seri baskılı test parçası kullanarak Voxeljet VX200 kum 3B yazıcının kapasitesi değerlendirilmiştir. 3B yazıcıda üretilen parçaların boyutsal doğrulukları ölçülmüştür. Maçaların eğilme mukavemetini incelemek için yazıcıda numuneler basılmıştır. Her örnek üzerinde 3 noktadan eğme testi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kum, GS19 granülometrisine sahip silikadır. Çalışma sonucunda, eğilme mukavemeti, X baskı doğrultusunda ( $\sigma_x = 2,06$  MPa), Y baskı yönünden ( $\sigma_y = 1,42$  MPa) daha fazla olduğu bulunmuştur. Böylece, tabakalaşma yönünün, 3B yazıcıda basılan maça ve kalıbın mekanik özellikleri üzerinde etki ettiği belirlenmiştir. Çalışmada bulunan test sonuçları, Voxeljet üreticisinin verilerine uygun olup 1,2 ila 4,5 MPa arasında bir eğilme mukavemeti sağladığı bulunmuştur.

Snelling ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, kimyasal olarak bağlanmış kum kalıpları için ticari olarak temin edilebilen dört farklı bağlayıcı sistemindeki malzeme özelliklerinin potansiyel farklılıklarını araştırmışlardır. Spesifik olarak, 3B baskı ve kimyasal olarak bağlı kalıplama materyallerinin oluşturduğu kumun çekme

mukavemetini ve bağlayıcı yanma özelliklerini karşılaştırmışlardır. Bağlayıcı içeriğini arttırmanın kalıbı güçlendirebildiğini, ancak parça kalitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Basılmış kalıpların bağlayıcı özelliklerinin anlaşılması, erimiş metal dökülürken bağlayıcıdan çıkan büyük miktardaki gazın potansiyel kusurlarından dolayı önemli olduğu bulunmuştur. Çalışma sonucunda, genel olarak geleneksel kumla kıyaslandığında, 3B baskılı bağlayıcı sistemin üstün mekanik performansa sahip olduğu ve daha yüksek sıcaklıklarda şeklini korurken gaz üretimi için düşük bağlayıcı içeriği ihtiva ettiği görülmüştür.

Snelling ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada, hücresel yapıda numune üretmek için ExOne S-Print marka 3 boyutlu yazıcıda kum kalıp yazdırmışlardır. Kum olarak silis kumu, reçine olarak furan reçinesi kullanılmıştır. Silis kumunun, çelik gibi demirli metalleri dökme kapasitesine sahip olduğu, bu sayede daha fazla hava akımı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca baskı, sıcaklık ve nemlilik de dâhil olmak üzere, atmosfer koşullarında sıcaklık ve nemlilik kontrolü sağladığı belirtilmiştir. Baskıdan sonra, fazla toz, karmaşık kalıbın iç geçitlerinden vakumlanmıştır. Sonrasında metal dökümü gerçekleştirilmiştir. Üretilen hücre kafes yapısının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için deneysel olarak basma testi yapılmıştır. Ayrıca, özel yazılım programıyla teorik olarak da test yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kısmi olarak parça geometrisine bağlı olarak ortaya çıkan parça kalitesi, bu yöntemin, metal döküm yoluyla tasarlanmış bir yapıya sahip hafif hücresel yapılar üretebildiğini göstermiştir.

Gullapalli (2016) yaptığı tez çalışmasında, kum döküm işleminin çeşitli aşamalarında bir 3B kum baskı sistemi ve bir FDM sistemi olmak üzere iki durum çalışması yaparak maliyet ve zaman açısından incelemiştir. Bunun için 3 farklı yaklaşımda bulunulmuş ve birinci yaklaşımda FDM yazıcı ile model ve maça sandığı üretilmiş, ikinci yaklaşımda 3B kum yazıcı ve geleneksel kalıp üretimi işlemlerini birlikte kullanarak maça üretilmiş, üçüncü koşulda ise 3B kum yazıcı ile maça ve kalıp üretilmiştir. Çalışma sonucunda, kalıp ve maçaların 3B kum baskısı ile üretilmesinin hem maliyet açısından hem de zaman açısından ekonomik olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, parça geometrileri oldukça karmaşık ve üretim hacimleri orta ile yüksek arasında değişmesi durumunda 3B baskının avantajlı olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, 3B kum baskısının, geleneksel kalıp ve maça yapım işlemleriyle karşılaştırıldığında eşit bir yüzey pürüzlülüğü sağladığı da belirlenmiştir.

Günther ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, farklı tane boyutuna sahip silika temelli kuvars kumları ve çeşitli reçineler kullanarak 3B yazıcıda deneysel çalışmalar

yapılmış ve mekanik test sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, furan bağlayıcılı kuvars kumundan elde edilmiş 3DP kalıpların, fenolik ve inorganik bağlayıcılı kuvars kumundan elde edilmiş kalıplardan daha yaygın ve uzun vadeli kanıtlanmış bir sistem olduğu belirlenmiştir. Furan bağlayıcılı test numunelerinin, 1,35 gr/cm<sup>2</sup>'lik bir yoğunlukta, ortalama 270 N/cm<sup>2</sup>'lik bir eğme mukavemetine sahip olduğu belirlenmiştir. 140 µm'lik tane boyutuna sahip kuvars kumundan oluşan kalıpların gaz geçirgenliği 68 l/s olarak bulunmuştur. İnce parçacıklar gaz kanallarının daralmasına neden olduğundan, tane boyutu gaz geçirgenliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Kum tane boyutu küçüldükçe gaz geçirgenliğinin azaldığı bulunmuştur. Mukavemetin, parçacık boyutuna, ilgili çözünürlüğe ve geometriye bağlı olarak işlemin ulaşılabilir yüzey kalitesine bağlı olduğu belirtilmiştir. 3DP işleminde, geleneksel yöntemle karşılaştırılabilir yüzey kalitesi elde etmek için standart dökümhanede kullanılan kumlara kıyasla çok daha ince kumlar kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Skorulski (2016) yaptığı çalışmada, prototip bir kabuk dökme kalıbı üretmek için üç boyutlu baskıda (3DP) hızlı prototipleme teknolojisini kullanmıştır. Öncelikle çeşitli alaşımlar için döküm kalıpları bilgisayar destekli programlarda tasarlanmıştır. Sonrasında, zb63 bağlayıcı ve zp151 kompozit malzeme ile kalıplar basılmıştır. Bakır alaşımları, alüminyum ve çinko için 3DP teknolojisinin kullanılabilirliği analiz edilmiştir. Vakum-basınçlı dökümde, döküm testleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan döküm prosesleri, dökümün kalitesini önemli ölçüde artırmıştır. Yerçekimi döküm ile elde edilen dökümlere kıyasla kalitede önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bir zb63 bağlayıcı ile zp151 tozunu kullanarak doğrudan döküm kalıpları yapmak için 3DP tekniğinin kullanılabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir. Bu malzemelerin kullanımı, döküm sıcaklığının yüksek olmadığı, örneğin çinko alaşımları gibi metallerin dökümü durumunda dikkat çekici olduğu belirlenmiştir. 3DP yazıcı kullanılan üretim teknolojisinde bölünmüş kalıpların kullanılması, dökümün doğruluğu için tavsiye edilmiştir.

Hackney ve Wooldridge (2017) yaptıkları çalışmada, katmanlı üretim yöntemlerinden lazer sinterleme ve kum bağlama tekniklerini kullanarak metal dökümü için kum kalıpları üretmişlerdir. Çalışmada, 3B kum baskı (3DSP) prosesi, doğrudan lazer kum sinterleme (DLSS) ve geleneksel furan bazlı döküm tekniklerini kullanmışlardır. Üretilen parçaların, boyutsal doğrulukları, yoğunlukları, çekme ve basma dayanımları, darbe dayanımları ve yüksek sıcaklık dayanımları gibi özellikleri değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda, 3DSP yöntemiyle üretilen parçaların çekme,

basma ve darbe dayanımı gibi önemli döküm malzemesi özelliklerinin, geleneksel yöntemlerle karşılaştırılabilir seviyede olduğu bulunmuştur. 3DSP işleminin, DLSS işlemiyle üretilen benzer parçalara kıyasla 30 kat daha yüksek üretim hızlarıyla birlikte, daha büyük parçaların da üretebildiğini göstermiştir. Çalışma sonucunda, 3DSP prosesinin 0,5 mm'lik bir doğrulukta kum kalıpları üretme veya % 0,3'ten daha az hata yapma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

Upadhyay ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, hızlı kum dökümü için 3B baskı yöntemini incelemiştir. Baskı kalıbının özellikleri, kullanılan malzemeler ve kalıbın yapımında kullanılan işleme parametreleri arasındaki ilişkiyi anlamak için sınırlı sayıda çalışma yapıldığı belirtilmiştir. Bağlayıcı püskürtme ile üretilen kum kalıp, geleneksel kum kalıbı yapım süreciyle karşılaştırıldığında, bağlayıcı püskürtme bileşenin mühendislik gereksinimini kaybetmeden % 33'e kadar ağırlık azaltımı için optimize edilmiş parça tasarımlarını üretebildiği belirtilmiştir. Çeşitli alaşımlar için 3B baskılı kum kalıpları üretmek için birçok tür kum, bağlayıcı ve aktivatör sistemi var olduğu belirtilmiştir. Alternatif bağlayıcılara hayati bir ihtiyaç var olduğuna değinilmiştir. 3B yazıcılar tarafından üretilen kum kalıpların özellikleri, baskı ve/veya kütleme döngüsü sırasında çok sayıda faktör tarafından kontrol edilebilir olduğu belirtilmiştir. Bu özellikler, kumun özellikleri, bağlayıcı ve aktivatörün konsantrasyonu ve türü, baskı hızı (toz yeniden kaplama hızı), iş kutusu koordinatı ve basılan numunenin yapı yönünden ve katman kalınlığından etkilendiği belirtilmiştir. Tabaka kalınlığını azaltmanın ve bağlayıcı doygunluğunu artırmanın çekme mukavemetini iyileştirdiği ancak yüzey kalitesini düşürdüğü bulunmuştur. Yapılan çalışma, baskılı kalıpların kalite açısından geleneksel olarak üretilen kalıplara göre üstün olduğunu ve en aza indirgenmiş gaz üretimine ve dolayısıyla gelişmiş dökümlere yol açan daha düşük ve hassas şekilde kontrol edilebilir bağlayıcı içeriğine sahip olduğunu göstermiştir.

Can ve Aslan (2018) yaptıkları çalışmada, döküm kalıp üretimi gerçekleştirilmiş ve ana malzeme olarak geleneksel döküm uygulamalarında kullanılan silis kumu kullanılmıştır. Reçine olarak ise; düşük yüzey pürüzlülüğü, yüksek birleştirme dayanıklılığı sağlayan furan reçinesi ve buna uygun katalizör kullanılmıştır. Çalışma için özel olarak üretilen küp ve çubuk şeklindeki kalıplara, istenilen katman kalınlığında silis kumu serilmiş ve kumun üzerine sertleştirici, reçine elle püskürtülmüştür. Bu işlemler, istenilen ölçüler sağlanıncaya kadar devam etmiştir. Sonrasında üretimi yapılan küp ve çubuk numunelerin basma ve eğme testleri yapılarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Daha sonra ise, kum tane boyutunun mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Coniglio ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, üç boyutlu baskı prosesi parametrelerinin, kalıp mukavemeti ve geçirgenliği üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. 3B yazıcı ile üretilen silindirik ve çubuk şekilli test numunelerinin sırasıyla geçirgenlik testleri ve eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, bağlayıcı miktarının sadece kalıp mukavemetini etkilediği, yeniden doldurma hızının artırılmasının ise zayıf kum sıkıştırması nedeniyle hem daha büyük geçirgenliğe hem de daha az mukavemete yol açtığı belirlenmiştir. Kum kalıbı özellikleri, 70 ila 160 GP gaz geçirgenliği ve 1,1 ila 2,8 MPa eğme dayanımı geniş bir aralıkta faktöriyel analiz parametreleri içinde değişiklik göstermiştir. Yoğunluk 1226 ile 1383 kg.m<sup>-3</sup> arasında değişmekte, bu da %48 ile 54 arasında bir gözeneklilik varyasyonunu temsil ettiği bulunmuştur.

Hawaldar ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, katmanlı imalat ve geleneksel imalat yöntemi kullanılarak üretilen kum döküm kalıplarını karşılaştırmışlardır. İki imalat yöntemi ağırlık tasarrufu, yüzey kalitesi, tasarım payı ve çapak giderme işi açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kalıp üretiminde katmanlı imalatın kullanılmasının önemli avantajları olduğunu göstermiştir. 3B baskılı kalıplar, kullanılan kumdan, tasarım paylarından ve taşlama işlerinden önemli ölçüde tasarruf sağladığı belirtilmiştir. 3B baskılı kalıpların mekanik özellikleri, 3B baskı sırasındaki iyi bağlama mukavemeti nedeniyle geleneksel olanlardan daha yüksek bulunmuştur. 3B baskılı kalıbın yüzey kalitesi, gelişmiş boyutsal doğruluk ile birlikte geleneksel kalıptan daha iyi olduğu bulunmuştur. Geleneksel kalıp temelli yöntem, nispeten daha büyük miktarda kalıp yapıldığında daha uygun olabilmektedir. Ek olarak, 3B yazıcı ve işletiminin mevcut maliyetleri geleneksel yaklaşıma göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Hodder ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, geleneksel döküm kumunun, kum kalıplarını doğrudan imal etmek için bir 3B yazıcı içinde kullanılabileceği gösterilmiş olmasına rağmen kumun o kadar kolay akamayabileceğini ve optimum sonuçların altında dökümlere yol açabileceğini belirtmişlerdir. Kum serici aracılığıyla 3B baskıda kum tabakalarının serbest düşme çökmesine karşı bir model etrafında sıkıştırmanın olmaması aynı zamanda optimum boyutlardan daha azına sebep olduğu atfedilmiştir. Yine de, yüzey pürüzlülüğünün veya kesin boyutların gerekli olmadığı dekoratif parçalar için döküm kumu kullanılarak hızlı dökümün benimsenmesi hemen elde edilebilmektedir. Baskı kafası püskürtmeli sıvı bağlayıcı nedeniyle, her iki boyutlu katmandaki görüntülerin kenarları, baskı sırasında bulunan gevşek kum nedeniyle bozulabildiği belirtilmiştir. Bağlayıcı kanamasının azaltılması ve/veya yerinde bir

sıkıştırma adımı getirilmesi alanlarında, her ikisi de hâlihazırda araştırılmakta olan ilave çalışmalara odaklanması gerektiğini belirtmişlerdir.

Mitra (2019) yapmış olduğu tez çalışmasında, hızlı bir dökümde katmanlı imalat (bağlayıcı püskürtme ile 3B baskı) ile üretilen kum kalıpların fonksiyonel özelliklerinin deneysel ve sayısal karakterizasyonu incelenmiştir. Çalışmada, farklı baskı proses parametrelerine sahip 3DP kum kalıplarının mekanik davranışı öncelikli olarak araştırılmış, ardından kütle taşıma özellikleri incelenmiştir. Bunu yapmak için 3DP kalıpları üzerinde bir dizi üç noktadan eğme dayanım testi, yoğunluk ölçümleri, gözeneklilik ölçümleri ve geçirgenlik testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, zamanın, sıcaklığın ve bağlayıcı hacim fraksiyonunun mekanik ve kütle taşıma özellikleri üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Gözenek boşluğunun gelişmiş modellenmesi, X-ışını bilgisayarlı tomografi ile sağlanan yeniden yapılandırılmış görüntüler kullanılarak, farklı adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir. Sadece iyi mekanik ve kütle taşıma özellikleriyle değil, aynı zamanda metal döküm sırasında kalıp erozyonunu en aza indirmek, 3D baskılı parçaları basmak için kalıplama parametrelerini seçmek amacıyla, metal döküm sırasında kalıp erozyonu açısından 3D baskılı kalıpları incelemek için deneyler tasarlanmıştır. Bu çalışma sonucunda inşa yönü, kaplama sistemi hızı ve bağlayıcı oranı gibi baskı işlemi parametrelerindeki değişikliklerin, 3DP kum kalıbının mukavemeti ve geçirgenliği için önemli olduğunu göstermiştir.

Dini ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada, bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcı işlem parametrelerinin gözden geçirilmesini sağlamışlar ve toz, bağlayıcı, baskı, sinterleme koşulunu araştırmışlardır. Katman kalınlığı azaldıkça, basılan parçaların daha ince olacağı ve daha yüksek nihai çözünürlük elde edilebileceği belirtilmiştir. Ancak daha düşük kalınlıktaki katmanın daha fazla dilime ihtiyacının var olduğu ve veri dosya hacmini artıran ve inşa zamanını, veri işleme süresini artırdığı belirtilmiştir. Çok düşük doymunluk, güçsüz toz partikül bağlanmasına ve yazdırma prosesinin başarısızlığına sebep olduğu belirtilmiştir. Çok yüksek doymunluk, istenmeyen geometri sonucuna ve yazdırılan parçalarda aşırı toz bağlantısına neden olduğu belirtilmiştir. Bağlayıcı püskürtme metodunda iyi yüzeye sahip numune üretimi bir avantaj iken, en büyük dezavantajı ise kontrol edilmesi ve tahmin edilmesi zor olan yazdırılmış parçaların sinterleme büzülmesi olduğu belirtilmiştir.

Gao ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada, 3 boyutlu baskı sırasında en iyi kum kalıbı özellikleri için en uygun proses parametrelerini tavsiye etmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada, etki faktörleri olarak aktivatör içeriği, X çözünürlüğü, katman kalınlığı ve

yeniden kaplama hızı parametreleri alınarak, bu parametrelerin mekanik ve sınır özellikler üzerindeki etkilerini tartışmak için bir L16(44) ortogonal test tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlar, X çözünürlüğünün ve tabaka kalınlığının kum kalıp özelliklerini etkileyen ana parametreler olduğunu göstermiştir. Çözünürlük X ve katman kalınlığı minimum olduğunda, mukavemet maksimuma ulaşmıştır. En iyi mukavemet ve daha az gaz çıkışı için en uygun proses parametreleri, %0,19 aktivatör, 0,1 mm X çözünürlük, 0,28 mm katman kalınlığı ve 210 mm/s yeniden kaplama hızı olduğu bulunmuştur. 3B yazdırılmış kum modeli özellikleri üzerinde önemli parametrelerin seçimi ve bu parametrelerin etkisini analiz etmek için matematiksel bir model oluşturulmuştur. En iyi özellikler için optimal proses parametreleri elde edilmiştir.

Cheng ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada, gri tonlamalı baskı ve 3B kum kalıp baskısı sırasında bağlayıcı geçiş modelinin karakterizasyonunu incelemişlerdir. Çalışmanın amacı, gri tonlamalı baskının bağlayıcı püskürtmede kullanım için uyarlanıp uyarlanamayacağını belirlemektir. İlk olarak, sıvı bağlayıcı olarak furan reçinesi ve kum yatağı için silika partikülleri kullanarak, farklı damlacık hacimlerine sahip altı set numune üretilmiş ve ortaya çıkan geçiş modelleri ölçülmüş ve biriken sıvı doygunluğuna dayalı olarak bunlar nicelendirilmiştir. Geçiş modelleri daha sonra yazdırılan numunelerin boyut hatası, dayanımı ve şekillendirilebilirliği ile ilişkilendirilmiştir. Çalışma sonucunda, daha büyük bir sıvı doygunluğunun, boyut hatasında önemli bir azalmanın ödünleşimi ile daha iyi mukavemet ve şekillendirilebilirlik ürettiğini göstermiştir.

Literatüre bakıldığında, bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcılarda genel olarak ana malzeme olarak silis kumu, bağlayıcı olarak da furan reçinesinin ve katalizörünün kullanıldığı görülmüştür. Genel olarak bu yazıcılarda kullanılan baskı parametreleri ise kum tane boyutu, baskı ilerleme hızı, bağlayıcı oranı, katalizör oranı, katman kalınlığı ve kum serici hızıdır. Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcı olarak da Exone ve Voxeljet marka tezgâhların kullanımının daha yaygın olduğu görülmüştür.

Bu 3B yazıcı tezgâhlarının pahalı olması; reçine, katalizör ve kumun, tezgâh üreticileri tarafından sağlanan pahalı sarf malzemeler olmasından dolayı bu çalışmayla, bu alandaki olumsuzlukları gidermek için daha ekonomik bir tezgâh ve piyasada hazır bulunabilecek kum ve reçinelerle alternatif bir üretim metodolojisi ve deneysel çalışmaların yapılması planlanmıştır. Bu sebeple bu eksikliği gidermek için tezgâh tasarımı yapılarak imal edilmiş ve sonrasında çeşitli baskı parametrelerde üretilen numunelerle konvansiyonel deneyler yapılmıştır.

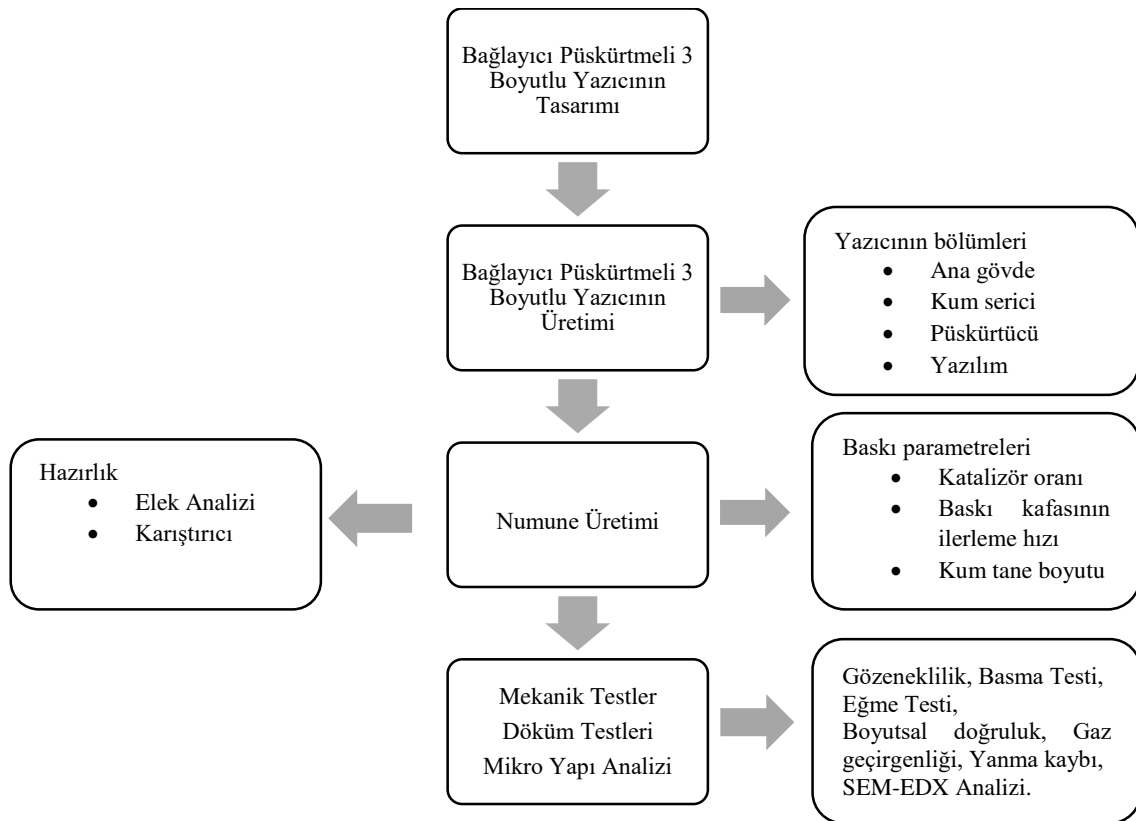
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışma kapsamında bağlayıcı püskürtmeli üç boyutlu yazıcının üretim aşamaları, baskı parametreleri, kum kalıp üretimi ve üretim sonunda elde edilen numunelere uygulanan mekanik testler, döküm testleri, mikro yapı incelemeleri hakkında ve hidrostatik basınç analizi hakkında bilgiler verilmiştir.

#### 3.1. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada, katmanlı imalat ile üretilen kum kalıpların baskı parametrelerini incelemek için öncelikle bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcı tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen 3B yazıcı temel olarak; ana gövde, kum serici, püskürtme kısımlarından ve bunlara ek olarak yazılım kısmından oluşmaktadır. Ticari bir 3 boyutlu CAD ve CAM programı (SolidWorks/SolidCam Student Edition) ile G kodları oluşturulmuş, CIMCO Edit (Free Trial) programı ile daha önce oluşturulan G kodları üretilen 3 boyutlu yazıcıda çalışacak şekilde düzenlenmiş ve bazı G kodları yazıcıya göre özelleştirilmiştir. Böylece Mach3 kontrol kartı ile yazılım kısmı tamamlanmıştır. Sonrasında farklı baskı parametrelerinde (katalizör oranı, kum tane boyutu, baskı kafası ilerleme hızı) silis kumu, furan reçinesi ve katalizöründen oluşan numuneler üretilmiştir.

Üretimi yapılan numunelerin mekanik özellikleri (gözeneklilik, basma, eğme testleri) döküm özellikleri (boyutsal doğruluk, gaz geçirgenliği, yanma kaybı) ve mikro yapıları SEM cihazı ile incelenmiştir. Çalışmanın iş akışı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmanın İş Akışı

Çizelge 3.1 'de her bir iş kutusunda yazdırılan numunelerin boyutları ve adetleri gösterilmiştir. Her bir baskı parametresi için 2'şer adet numune üretilmiştir.

Çizelge 3.1. Her bir iş kutusunda yazdırılan numunelerin boyutları ve adetleri

Numuneler	Boyutlar(mm)	Adetler
Dikdörtgen Prizma (Eğme Testi, Boyutsal Doğruluk)	25x125x15	20
Silindir (Gözeneklilik, Basma Testi, Boyutsal Doğruluk, Yanma Kaybı, SEM)	Ø25x15	60
Silindir(Gaz Geçirgenliği)	Ø50x20	20

Her bir baskı parametresi için üretilen numunelere verilen numune adları ve parametre özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. İlk harf kum tane boyutunu (Kalın-K, İnce-İ), ikinci rakam katalizör oranını (%05, %06, %07), sonraki harf ve rakam ise baskı kafasının ilerleme hızını (F300-F400-F500 mm/dk) ifade etmektedir.

**Çizelge 3.2.** Numune adları ve parametre özellikleri

Numune Adı	Parametre Özellikleri
<b>K5F300</b>	Kalın kum(250-500 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 300 mm/dk ve katalizör oranı %0,5
<b>K6F300</b>	Kalın kum(250-500 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 300 mm/dk ve katalizör oranı %0,6
<b>K7F300</b>	Kalın kum(250-500 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 300 mm/dk ve katalizör oranı %0,7
<b>İ5F300</b>	İnce kum(125-250 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 300 mm/dk ve katalizör oranı %0,5
<b>İ6F300</b>	İnce kum(125-250 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 300 mm/dk ve katalizör oranı %0,6
<b>İ7F300</b>	İnce kum(125-250 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 300 mm/dk ve katalizör oranı %0,7
<b>K6F300</b>	Kalın kum(250-500 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 300 mm/dk ve katalizör oranı %0,6
<b>K6F400</b>	Kalın kum(250-500 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 400 mm/dk ve katalizör oranı %0,6
<b>K6F500</b>	Kalın kum(250-500 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 500 mm/dk ve katalizör oranı %0,6
<b>İ6F300</b>	İnce kum(125-250 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 300 mm/dk ve katalizör oranı %0,6
<b>İ6F400</b>	İnce kum(125-250 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 400 mm/dk ve katalizör oranı %0,6
<b>İ6F500</b>	İnce kum(125-250 $\mu\text{m}$ ), Baskı kafası ilerleme hızı 500 mm/dk ve katalizör oranı %0,6

Çizelge 3.3 'de kum kalıp üretiminde kullanılan üç farklı baskı parametresi ve değerleri verilmiştir.

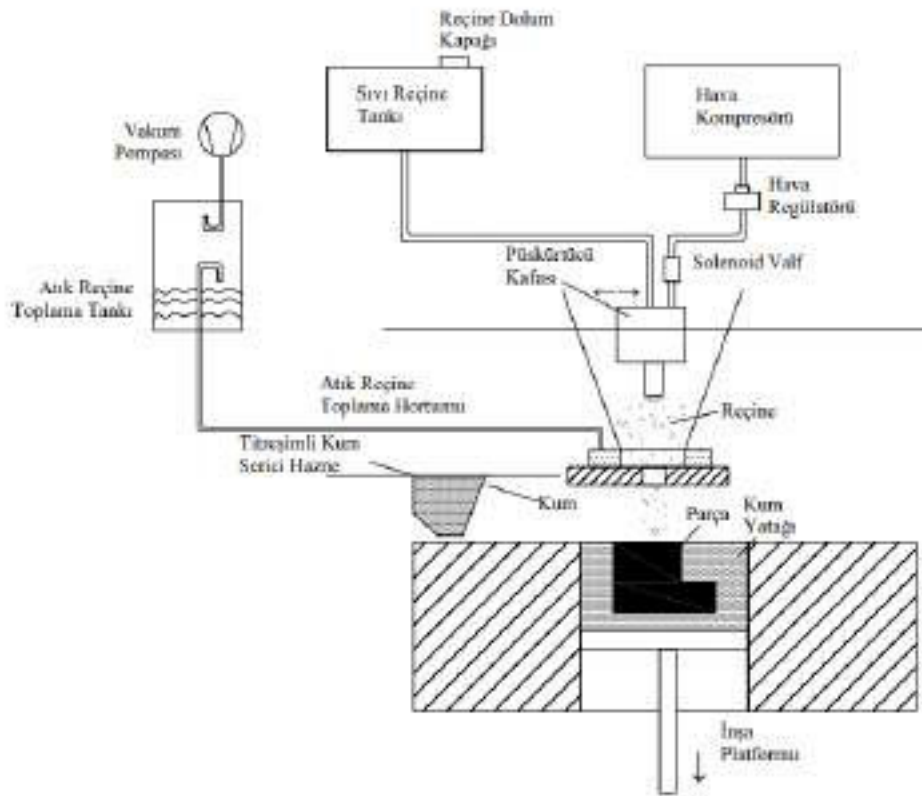
**Çizelge 3.3.** Baskı Parametreleri

Parametreler	Özellikler
Kum tane boyutu	İnce Kum (125-250 $\mu\text{m}$ )
	Kalın Kum (250-500 $\mu\text{m}$ )
Katalizör Oranı (Kumun ağırlıkça)	%0,5-0,6-0,7
Baskı Kafası İlerleme Hızı	F300-F400-F500 mm/dk

### 3.1.1. Üç Boyutlu Yazıcının Üretimi

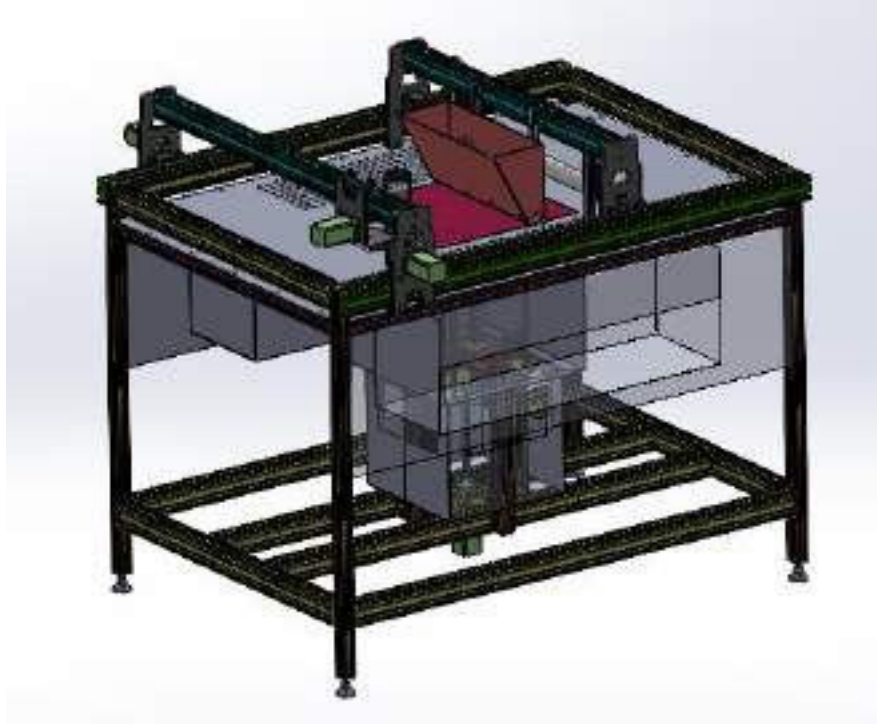
Kum döküm kalıplarının üretimi için öncelikle bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcı tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretilen 3 boyutlu yazıcı; ana gövde, kum serici ve bağlayıcı püskürtme kısımları olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır.

Ayrıca bu kısımlara ek olarak yazılım kısmından oluşmaktadır. 3 boyutlu yazıcının tasarımı ve imalatı sırasında her bir kısım için Ar-Ge çalışmaları yapılarak kum kalıp baskı üretimi için gerekli optimum şartlar belirlenmeye çalışılmıştır. Bu bölümde 3 boyutlu yazıcıyı oluşturan kısımlar hakkında bilgiler verilmiştir. Şekil 3.2’de çalışma yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



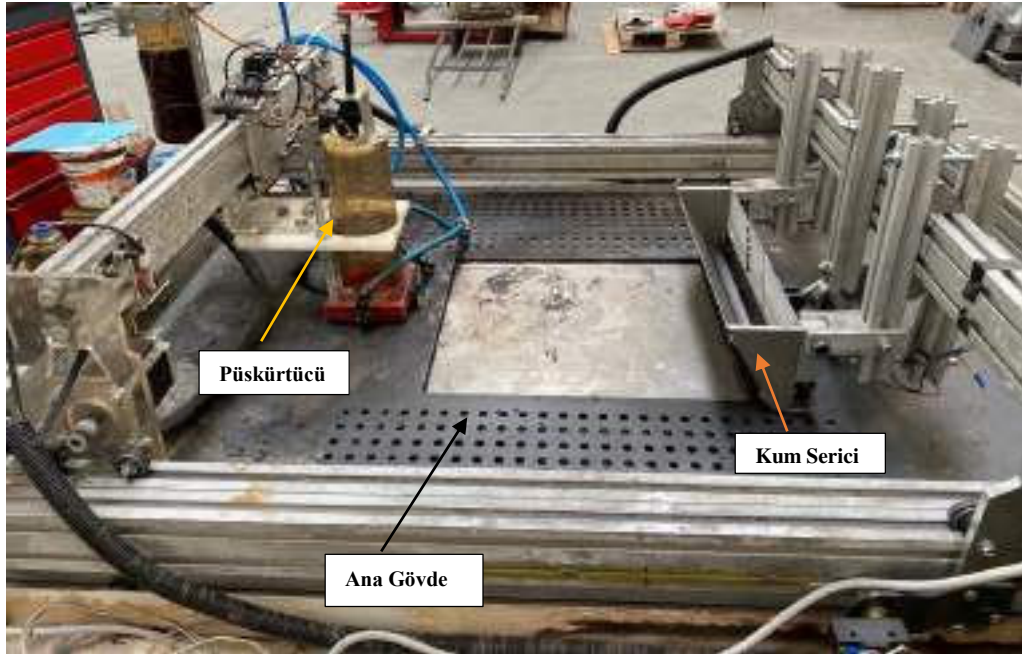
Şekil 3.2. Çalışma Yönteminin Şematik Gösterimi

Çalışma yönteminin şematik gösteriminde; titreşimli kum serici haznesi, kum serme sistemi, havalı reçine püskürtme sistemi, inşa platformu, atık reçine toplama sistemi vb. verilmiştir. Şekil 3.3’de tasarlanan bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcının Solidworks (Student Edition) programında tasarlanmış üç boyutlu şekli verilmiştir.



Şekil 3.3. Bağlayıcı Püskürtmeli 3B Yazıcı Tasarımı

Şekil 3.4’de üretilen bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcının püskürtücü, kum serici ve ana gövde kısımları gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Bağlayıcı Püskürtmeli 3B Yazıcı

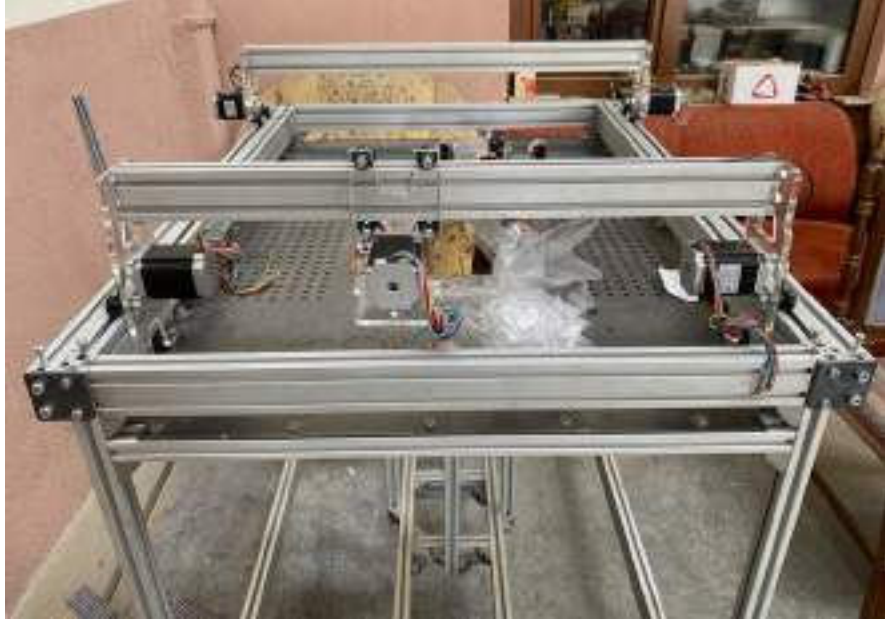
### 3.1.1.1. Ana Gövdenin Üretimi

Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcının öncelikle ana gövde kısmının tasarımı yapılarak üretilmiştir. Ana gövde kısmı, 30x60 mm ve 60x60 mm alüminyum sigma profillerden oluşturulmuştur. Ayrıca ana gövde kısmında, üretim tablası ve Z ekseninde inşa alanı hazne kısmı bulunmaktadır. İnşa alanı ölçüleri 320x345x300 mm'dir. Z eksenini aşağı ve yukarı yönde maksimum 300 mm olarak hareket etmektedir. Ana gövde kısmında, püskürtme sisteminin ve kum hazne sisteminin hareketi için tekerlek kayış sistemi, Z eksenindeki inşa tablasının hareketi için ise vidalı mil hareket sistemi kullanılmıştır. Şekil 3.5'de ana gövde üretimi 1 gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Ana Gövde Üretimi 1

Ana gövde kısmında, numune üretimi esnasında fazla olan kumun tekrar kullanılmak üzere toplanabilmesi için artık kum toplama delikleri ve haznesi bulunmaktadır. Yazıcıda kullanılan saçların kalınlığı minimum 3 mm'dir. Ana gövdenin Z eksenindeki tablada bulunan vidalı mil gibi hareket sistemlerine kum vb. taneciklerin kaçmaması için gerekli yerler muhafaza edilmiştir. Ana gövdede kum serici ve püskürtme kısımlarının bağlantılarının yapıldığı köprü profiller bulunmaktadır. Bu köprü profiller, Y ekseninde püskürtücü kısmıyla, A ekseninde kum serici kısmıyla birlikte hareket edecek şekilde montaj edilmiştir. Şekil 3.6'da ana gövde üretimi 2 gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Ana Gövde Üretimi 2

Z ekseninde hareket eden inşa platformu da ana gövdeyi oluşturan kısımlardan birisidir. Bu kısım da vidalı mil bağlantısı, liner kızak ve araba ile aşağı ve yukarı yönde hareket edebilmektedir. İnşa platformu ile ana gövde arasında toz sızdırmazlık sağlamak için o-ring kullanılmıştır. İnşa platformunda numune üretimi için Z eksenine aşağı yönlü katman katman şeklinde hareket edecek şekilde üretilmiştir. Şekil 3.7’de ana gövde Z eksenine üretimi gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Ana Gövde Z Eksenine Üretimi

### 3.1.1.2. Kum Sericinin Üretimi

Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcının tasarlanan ve imal edilen diğer bir kısmı ise, kum sericidir. Kum serici kısmı, hem numune üretimi için titreşim hareketiyle kum dökme işlemini gerçekleştirmekte hem de haznedeki dökülen kumun istenilen katman kalınlığına göre düzgün bir şekilde serilmesi işlemini yerine getirmektedir. Kullanılan kumun tane çapı vb. özelliklere göre uygun olduğu takdirde kum katman kalınlığı min. 0,26 mm olacak şekilde de kum serilebilmektedir. Kum serici kısmının A ekseninde ileri geri hareketi için çift taraflı Nema 17 step motorlar kullanılmıştır. Kum serici kısmı, ana gövdeye tekerlek kayış hareket sistemi bağlantısı şeklinde monte edilmiştir. Kum sericiden farklı tane boyutlarına sahip kumlar serilebilmektedir.

İlk tasarımı yapılan ve üretilen kum haznesinde, alt kısmına döner silindir takılmış ve bir DC motora bağlanan zincir dişli sistemi ile silindire dönme hareketi sağlanmış ve kum haznesinin arka kısmına ise kum düzeltici takılmıştır. Ancak bu sistemde döner silindir kısmına kumlar sıkışarak dönme hareketi sırasında problem çıkartarak düzgün bir yüzey elde edilememiş ve kum sermede süreklilik sağlanamamıştır. Şekil 3.8’de kum serici tasarımı 1 gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Kum Serici Tasarımı 1

Böylece kum haznesi tekrar tasarlanmıştır. Yeni kum serme sisteminde silindir kısmı ve motor bağlantısı kaldırılmıştır. Kum haznesinin alt kısmında da kumu dökmek

ve düzgün bir şekilde sermek için dikdörtgen şeklinde açıklık verilmiştir. Böylece Y eksenini hareketinde açıklık olan kısımdan Z eksenindeki tabla mesafesince düzgün ve sürekli şekilde kum serilebilmiştir. Ayrıca, Y ekseninde kumu serme hareketinin tersi yönde hareketinde kumun düzgün bir şekilde serilebilmesi için kum haznesinin alt kısmı eğimli olacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak, katalizör karıştırılmış kumun nemli olması sebebiyle, kum serme sisteminde yüzeye katman katman şeklinde serilmesinde düzgün bir kum tabakaları elde edilememiştir. Kumların serilmesinde topaklanma ve desende bozulmalar meydana gelmiştir. Şekil 3.9’da kum serici tasarımı 2 gösterilmiştir. Bu tasarımda da istenildiği gibi kum haznesi verimli çalışmamıştır. Bu sebeple nemli kumun serilmesi için yeni bir kum serme sistemi tasarımına ihtiyaç duyulmuştur.



Şekil 3.9. Kum Serici Tasarımı 2

En son tasarlanan kum serme sisteminde ise; DC motorun (max. 50 hertz, max. 3000 rpm) tahrikiyle titreşim hareketi sağlayan bir mekanizma tasarlanarak üretilmiş, daha sonra ise bu mekanizma A eksenini taşıyan köprüye ve kum haznesine monte edilmiştir. Böylece motor çalıştıkça kum haznesi titremekte ve kumlar haznedeki serilebilmektedir. Ayrıca kum haznesinde kullanılacak kumun boyutuna göre titreşim mekanizmasına mesafe ayarı konulmuştur. DC motora bağlanan sürücü sayesinde farklı frekans değerleri ve kum sericinin hızı ile serilecek kumun düşme miktarı ayarlanabilmektedir. Kumun katalizörle karıştırılması sebebiyle oluşan nemin, kum sericiden kumun homojen bir şekilde serilmesini direkt olarak etkileyen bir faktör olduğu görülmüştür. 3B yazıcının kum serme sisteminin nemli kumu homojen bir şekilde

serebilmesi için en uygun yöntemin titreşim mekanizması olduğu denemeler sonucunda görülmüştür. Şekil 3.10’da 3B yazıcının kum sericisi gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Kum Serici

Kum serici kısmına titreşim frekans değerini ayarlayabilmek için motor sürücü koyulmuştur. Ayrıca Y ekseninde hareket eden kum serici köprüsünün yatay kısmına mekanik bir sensör koyularak kum serme işleminin başlangıç ve bitiş noktasının hassas ayarı sağlanmıştır. Böylece kumun düzgün bir şekilde serilebilmesi sağlanmıştır. Aksi durumda ilk başlangıçta ve bitişte M ve G kodlar arası tepki gecikmesi sebebiyle ufak bir kum yığılması meydana gelebilmektedir.

Kum sericinin farklı ilerleme hızlarına göre her bir katmanda kaç mm kalınlıkta kum serebildiği ön deneme ile test edilmiştir. Test için 12,5 mm yüksekliğindeki bir kap kullanılmıştır. Böylece kum sericinin farklı ilerleme hızlarına göre katman sayıları bulunmuş ve Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kum Sericinin İlerleme Hızlarına göre Katman Sayıları

İlerleme Hızı	Katman Sayısı
4000 mm/dk	24
5000 mm/dk	30
6000 mm/dk	36
7000 mm/dk	44
8000 mm/dk	48

Buna göre 8000 mm/dk kum serici ilerlemesi için katman kalınlığı 12,5 mm/48 =0,26 mm olarak bulunmuştur. Şekil 3.11’de kum sericinin ilerlemesi ve katman sayısının belirlenmesi için yapılan işlem gösterilmiştir.

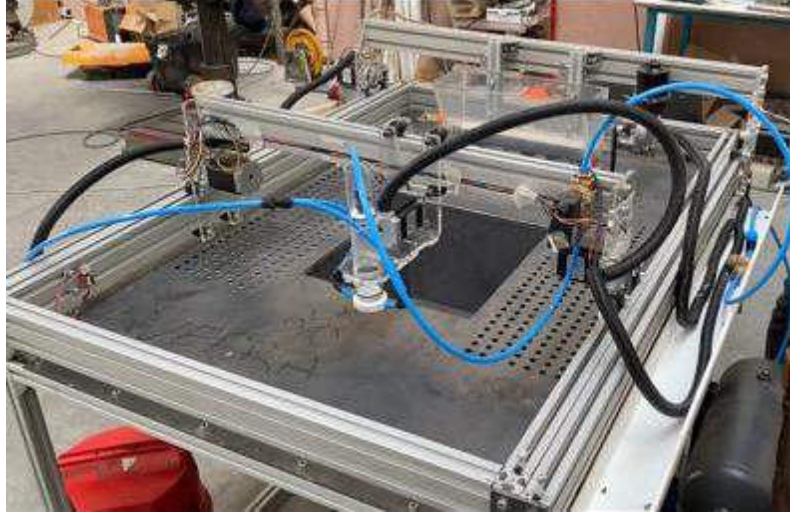


Şekil 3.11. Kum Serici İlerlemesi ve Katman Sayısının Belirlenmesi

### 3.1.1.3. Püskürtme Sisteminin Üretimi

Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcının tasarlanan ve imal edilen diğer bir kısmı ise püskürtme sistemidir.

3B yazıcının püskürtme kısmının ilk tasarımında tek baskı kafası şeklinde üretim gerçekleştirilmiştir. Ancak nemli kumun, kum haznesinden serilmesi sırasında süreklilik sağlanamadığı için kum hazne tasarımı değiştirilmemiş ve öncelikle çift baskı kafa sistemine geçilmiştir. Birinci baskı kafasından katalizör, ikinci baskı kafasından reçine püskürtülecek şekilde çift baskı kafa sistemi üretilmiştir. Numune üretiminde gerçekleştirilecek parçanın tasarımının G kodu çıkartılarak her bir katman için birinci baskı kafasından katalizör ve ikinci baskı kafasından reçinenin sırasıyla aynı noktalardan geçerek sertleştirme işlemi sağlanmak istenmiştir. Ancak, iki ayrı baskı kafa sisteminde katalizör ve reçine püskürtülmesi sonucunda serilen kuma etkili nüfuziyet sağlanamadığı ve yapıdaki sertleşmenin yeterli olmadığı görülmüştür. Bu sebeple püskürtme sisteminde tekrar tek baskı kafa sistemine geçilmiştir. Sonrasında nemli kumun düzgünce serilmesi için tekrar kum haznesi tasarlanmıştır. Şekil 3.12’de püskürtücü tasarımı 1 gösterilmiştir.



**Şekil 3.12.** Püskürtücü Tasarımı 1

Püskürtme sisteminin diğer bir tasarımının denemesinde hava tankına su eklenerek kompresörle yaklaşık olarak 6-7 bar'da sıkıştırılmış ve tek baskı kafa sisteminde püskürtme işlemi kısmen de olsa sağlanmıştır. Ancak reçinenin ve katalizörün viskozitesi suya göre daha yüksek olduğu için reçine ve katalizörün püskürtme işlemi istenildiği gibi olmamıştır. Ayrıca tankın duruş yönünün ve içindeki akışkan miktarının püskürtmeyi etkilediği görülmüştür. Bunun sebebinin, sıvı-hava karışım oranından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Şekil 3.13'de püskürtücü nozul uçları gösterilmiştir. Şekil 3.14'de püskürtücü tasarımı 2 gösterilmiştir.



**Şekil 3.13.** Püskürtücü Nozul Uçları



Şekil 3.14. Püskürtücü Tasarımı 2

Başka bir püskürtücü denemesinde, CO<sub>2</sub> ile sertleşen camsuyu reçinesi denenmiş ancak camsuyu (sodyum silikat) reçinesinin viskozitesi yüksek olduğu için püskürtme işleminde problem oluşmuştur. Ayrıca, reçine püskürtülmüş kum tabakasına CO<sub>2</sub> gazı verilmiş ancak uzun süre gaza maruz bırakılmasına rağmen sertleşme istenildiği gibi olmamıştır. Şekil 3.15’de püskürtücü kafası tasarımı 1 gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Püskürtücü Kafası Tasarımı 1

Bir diğer püskürtücü denemesinde, çift baskı kafa sisteminde reçineye göre viskozitesi daha düşük olan katalizör ile reçine ayrı ayrı 9 bar basınçta hava tanklarında sıkıştırılarak 0,8-0,6-0,5 ve 0,2 mm’lik nozul uçlarıyla püskürtülmesi denenmiştir. Katalizörün reçineye göre viskozitesi daha düşük olduğu için katalizörün püskürtülmesinin daha iyi olduğu görülmüştür. Ancak her iki malzemenin de debisi

yüksek çıkmıştır. Ayrıca farklı viskozitelere sahip iki farklı furan reçinesinden düşük viskoziteye sahip olan furan reçinesinin, aynı basınçta daha iyi püskürtme sağladığı görülmüştür. Ancak püskürtme işlemi bu yöntemde de tam olarak istenildiği gibi gerçekleştirilememiştir. 3B yazıcıda bağlayıcı olarak kullanılan furan reçinesinin viskozitesinin, püskürtme işleminde yeterli akışkanlık sağlanması açısından önemli olduğu görülmüştür. Şekil 3.16'da püskürtücü kafası tasarımı 2 gösterilmiştir.



**Şekil 3.16.** Püskürtücü Kafası Tasarımı 2

Başka bir püskürtücü denemesinde, furan reçinesinin basıncını artırmak için su pompası kullanılmıştır. Su pompası ile bir kaptan reçine emilerek püskürtülmesi denenmiştir. Reçine yüksek debi ve düşük basınçta hareket ettirilmiştir. Ancak bu denemede de reçinenin püskürtülmesi istenildiği gibi sağlanamamıştır. Şekil 3.17'de püskürtücü tasarımı 3 gösterilmiştir.



**Şekil 3.17.** Püskürtücü Tasarımı 3

Bir başka püskürtücü denemesinde ise hazır hidrolik sistemdeki hortuma püskürtme nozulleri bağlanarak hazneden furan reçinesi püskürtülmeye çalışılmıştır. Deneme sonucunda hidrolik sistemde 20 bar basınca kadar çıkılmasına rağmen püskürtme istenildiği gibi sağlanamamıştır.

Bir diğer püskürtücü denemesinde ise, 6 lt'lik 2 adet hava kompresör tankının içine reçine ve katalizör ayrı ayrı doldurulup bu tanklara kompresörden hava verilerek püskürtülmesi sağlanmıştır. Reçine, katalizör besleme hortum kısımlarına ise açma kapatma için selenoid valfler bağlanmıştır. Daha sonrasında püskürtücü nozuller ve püskürtme hazneleri takılmıştır. Ayrıca fazla olan reçine ve katalizör buharı da vakumlama kısmından vakum pompasıyla ayrı ayrı çekilmeye çalışılmıştır. Ancak bu yöntemde de istenilen şekilde püskürtme sağlanamamıştır.

Püskürtme sisteminin bir diğer denemesinde ise boya tabancasını kullanarak düşük basınçlarda püskürtme işlemi denenmiştir. Kompresörden 2 farklı çıkış hattında hava verilerek boya tabancalarına hava verilmesi sağlanmıştır. Hava hortumunun boya tabancalarıyla bağlantı kısımlarından önce, havayı açmak kapatmak için selenoid valfler bağlanmıştır. Daha sonrasında püskürtme haznesi ve o kısma da boya tabancaları takılmıştır. Ayrıca fazla olan reçine ve katalizör buharı da vakumlama kısmından vakum pompasıyla ayrı ayrı çekilmiştir. Vakumlama kısmının alt tarafına da slot şeklinde saç metal montaj edilerek filtreleme sistemi sağlanması, eksenler arasındaki kaymaların engellenmesi ve bu saç metalin istenmeyen damlaları da engellemesi amaçlanmıştır.

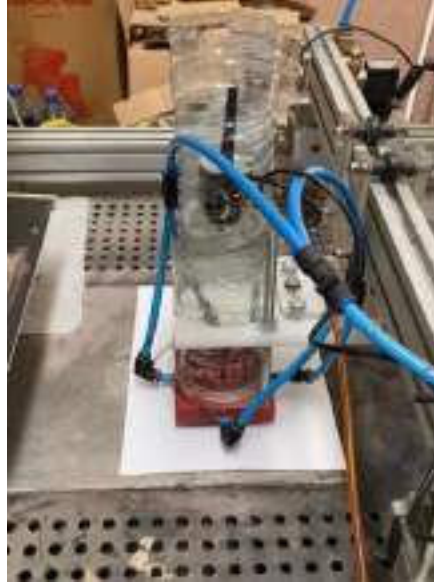
Bu deneme sonucunda püskürtme işleminin etkili bir şekilde sağlandığı görülmüştür. Ancak, bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcıda parça üretimi denemeleri sırasında, kum yüzeyine reçine ve katalizör farklı baskı kafalarından püskürtüldüğü için etkili nüfuziyet sağlanamadığı, üretilen parçada çok fazla mukavemet ve kimyasal tepkime görülmemiştir. Bunun sebeplerinin kum katman kalınlığı, reçine ve katalizörün kuma homojen bir şekilde püskürtülememesi, ilerleme hızının doğru seçilip seçilmemesi, reçine ve katalizörün püskürtme sırasındaki debileri ve birbirlerine olan oranlarının etkili olduğu düşünülmektedir. Sonraki denemelerde bu parametrelere dikkat edilerek denemeler yapılmış ancak etkili çözüm ve süreklilik sağlanamamıştır. Bu sebeple, kum serme kısmı tekrar tasarlanmış ve tek püskürtücü kafa sistemine kalıcı olarak geçilmiştir.

Son olarak tasarlanan püskürtme sistemi de kendi içerisinde kompresör, hava regülatörü, püskürtme nozulü (boya tabancası), püskürtme haznesi, vakumlama ve haznesi, filtre kısımlarından oluşmaktadır. Şekil 3.18'de air brush (boya tabancası) gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Air Brush (Boya Tabancası)

3B yazıcının kafa kısmına takılan ve mika malzemeden üretilen filtre haznesi, reçinenin ve katalizörün kimyasal yapısı sebebiyle çatlayıp kırılmıştır. Bu sebeple bu kısımda, reçine ve katalizörle kimyasal tepkimeye girmeyen farklı bir malzeme (PET) kullanılmıştır. Şekil 3.19’da püskürtücü tasarımı 4 gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Püskürtücü Tasarımı 4

Kompresör, hazneye konulan reçinenin püskürtülmesi için istenilen basınç değerinde hava püskürtülmesini sağlayan kısımdır. Kompresör çıkış hortumunda düzenli akışın sağlanması için hava regülatörü ve hava akışını açıp kapatmak için selenoid valf konulmuştur. Selenoid valften çıkan hava hortumu boya tabancasının hava giriş kısmına bağlıdır. Boya tabancasının diğer kısmına ise, reçinenin beslenmesi için depo bağlantıları sağlanmıştır. Boya tabancası ise püskürtme haznesine montaj edilmiştir. Böylece kompresörden gelen hava, boya tabancasına kontrollü şekilde aktarılmış olmaktadır.

Kompresörün hacmi 25 lt ve 8 bar maksimum basınca sahiptir. Hava ve reçine iletim hortumlarının dış çapı 8 mm, iç çapı 5,5 mm'dir.

Nozul ise boya tabancasının uç kısmına takılı şekildedir. Püskürtme ucu çapı 300 µm'dir. Bu nozul çapında, reçineye 1,5 bar basınç uygulandığı zaman istenilen toz bulutu oluşmaktadır. Basınç istenilenden fazla olduğu zaman reçine toz bulutu fazla oluşmakta, kumun yüzeyini bozabilmekte ve çevreye aşırı şekilde yayılmaktadır. Bu sebeple püskürtücünün hava basınç değeri önem kazanmaktadır.

Nozulü çevreleyen kısım ise püskürtme haznesidir. Bu kısım nozulden çıkan reçinenin toz bulutu şeklinde belli bir yerden geçmesini sağlamaktadır. Alt tarafına montajlı vakumlama haznesi ise fazla reçinenin emilmesini sağlamaktadır. Fazla olan artık reçine ise vakum haznesinden vakumlama ile alınmaktadır. Vakumlama sistemi, elektrikli süpürge ve bir kapalı kap içerisinde vakum oluşturularak fazla reçineyi tekrar kullanılmak üzere depolamaktadır. Vakumlama sistemi yüksek emiş gücünde çalışmaktadır.

Filtre, vakum haznesinin alt kısmına manuel olarak portatif şekilde bağlanabilmektedir. Farklı çaplarda olacak şekilde filtreler bulunmaktadır. Bu filtreler reçinenin uygulanacağı alana göre çapı belirlenerek değiştirilebilmektedir. Varsayılan olarak kullanılan filtrenin çapı 5 mm'dir. Filtre kısmının ana tablaya uzaklığı 4 mm olarak ayarlanmıştır.

Püskürtme kısmını tutan köprü profil, Y ekseninde birbirlerine paralel şekilde kayış tekerlek bağlantılarıyla ileri geri şeklinde hareket etmektedir. Ayrıca, köprü profil üzerinde bulunan nozul kısmı da X ekseninde kayış tekerlek bağlantısıyla sağa ve sola olacak şekilde Nema 23 step motorlarla hareketi sağlanmaktadır.

Ayrıca boya tabancasının depo haznesinin çok küçük olması sebebiyle bu kısım daha fazla reçine alacak şekilde daha büyük hacimli hale getirilmiştir. Bu sebeple portatif bir askı aracı, akvaryum hortumu ve plastik hazneyi birleştirerek daha büyük depo haznesi yapılmıştır. Ön denemelerde depo haznesi ile püskürtme nozulünün arasındaki dik mesafenin, basınç farkı oluşturduğu için önemli olduğu görülmüştür. Depo ve nozul arasındaki mesafe çok olduğu durumda basınç farkından dolayı nozul damlatma yapmakta ve mesafe çok az olduğu durumda ise istenildiği gibi debi sağlanamamaktadır. Böylece reçine depo haznesi genişletilerek parça üretimi sırasında verimlilik ve üretim hızı arttırılmıştır. Şekil 3.20'de üretilen 3B yazıcı gösterilmiştir.



Şekil 3.20. 3B Yazıcı

### 3.1.1.4. Yazılım

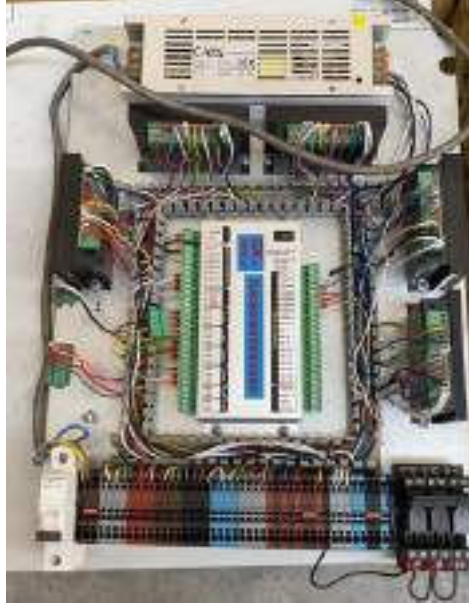
Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcının mekanik kısmını tasarlanıp imal edildikten sonra yazılım kısmının oluşturulması sağlanmıştır. Yazılım; otomasyon ve G kod çıkarma kısımlarından oluşmaktadır.

Otomasyon kısmında, 4 eksen hareket için 6 step motor ve sürücüleri, artık reçine vakumlama sistemi 1 adet, hava açmak ve kapatmak için 1 adet selenoid valf, kum serici için DC motor, 4 eksen MKX-IV kontrol kartı, Mach 3 yazılımı, pano ve soğutma fanı kullanılmıştır. A ekseninde ve Y ekseninde 2'şer adet step motor paralel şekilde bağlanmıştır. Diğer kısımların röle bağlantıları ile otomasyon gerçekleştirilmiştir. Otomasyon kısmında step motorların sürücüleri, switchler, endüstriyel güç kaynağı 12 Volt-16 Amper, pano ve çeşitli elektronik parçalar bulunmaktadır. Bunların birbirleriyle bağlantıları uygun kablolarla sağlanmıştır. Mach3 yazılımı ile motorların ve diğer bağlantıların hassas ayarları (hız, devir, ivmelenme vb.) sağlanmıştır. Ayrıca, Mach3 yazılımı ile selenoid valfler ve vakumlama sistemi için çeşitli M kodları özelleştirilmiştir. Çizelge 3.5'de özelleştirilmiş Mach3 M kodları verilmiştir.

Çizelge 3.5. Özelleştirilmiş Mach3 M Kodları

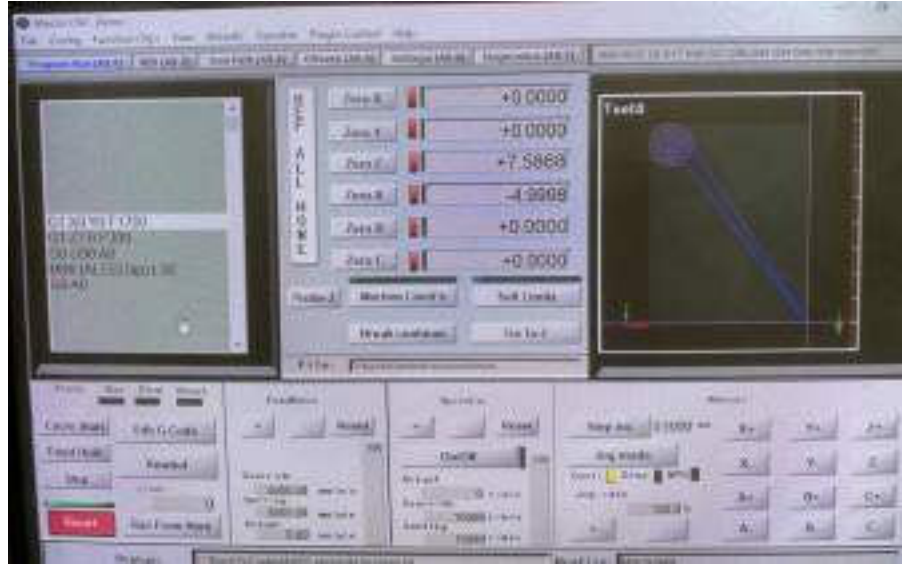
M Kodları	Anlamı
M203	Vakumlama sisteminin (artık reçine) açılması
M213	Vakumlama sisteminin (artık reçine) kapanması
M205	Kum sericinin çalışması
M215	Kum sericinin kapanması
M206	Selenoid valfin (püskürtücü) açılması
M216	Selenoid valfin (püskürtücü) kapanması

3B yazıcıdaki step motorların başlangıç konum ayarları için home switchler ve herhangi bir çarpmaya karşı soft limitleri belirlenmiştir. Şekil 3.21’de kontrol kartı gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Kontrol Kartı

Yazıcıda istenilen şekilde numune üretmek için öncelikle SolidWorks (Student Edition) programında 3 boyutlu katı cisim, tasarlanarak oluşturulmuştur. Daha sonra 3 boyutlu cisimler SolidCam (Student Version) programı ile takım hareketlerine göre G kodlar çıkarılmıştır. Daha sonra çıkarılan G kodlar üzerinde gerekli düzenlemelerin yapılması için CIMCO Edit (Free Trial) programı kullanılarak bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcıya G kod çıktıları gönderilmiştir. Böylece 3 boyutu yazıcıda istenilen şekilde numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.22’de ise Mach3 çalışma ekranı gösterilmiştir.



**Şekil 3.22.** Mach3 Çalışma Ekranı

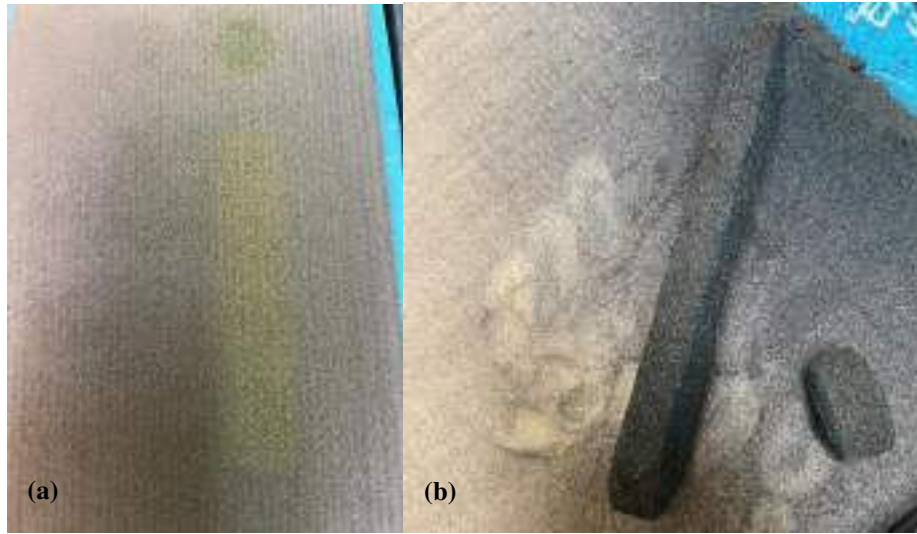
G kodları çıkarılan veriler üzerinde G kodlarda ilgili özelleştirme (ekleme, çıkarma vb.) işlemleri yapılmış, sonrasında ise vakum sisteminin, kum sericinin ve solenoid valfinin (püskürtücü) açılıp kapanması için özelleştirilmiş M kodlarının eklenmesini sağlamıştır. Silindir bir numune için G kod programlama örneği Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. G Kod Programlama Örneği

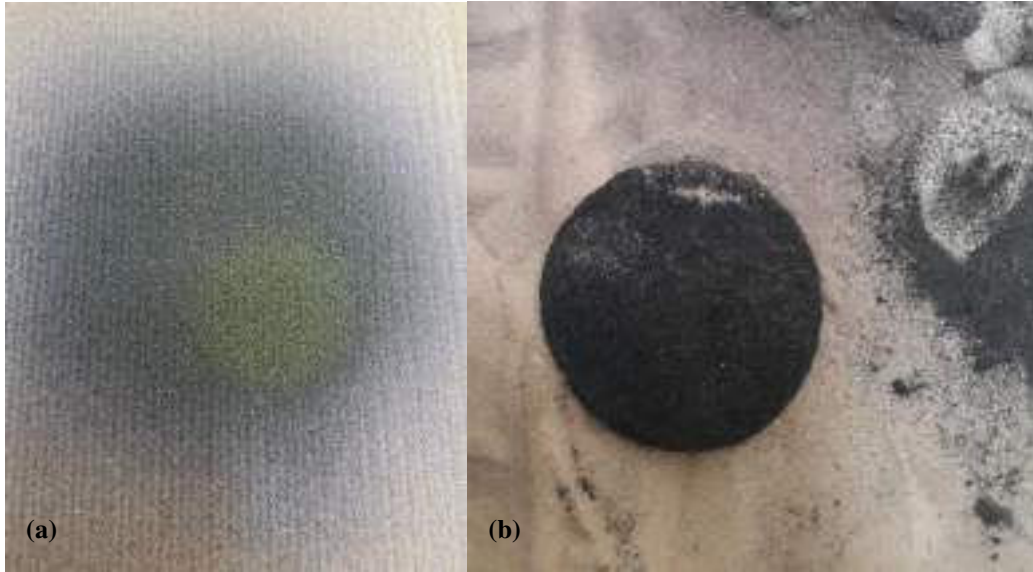
O1001; Ana Program		Program numarası 1001
N2	G1 X0 Y0 F1700	X ve Y eksenleri 0 noktasında
N4	G1 Z1 F300	Z eksen 1 mm indirildi
N6	G0 G90 A0	A eksen 0 noktasında
N8	M215	Kum sericinin kapanması
N10	G1 A350 F8000	A eksen 350 noktasında
N12	M205	Kum sericinin çalışması
N14	G1 A-5 F8000	A eksen -5 noktasında
N16	M215	Kum sericinin kapanması
N18	G1 A350 F8000	A eksen 350 noktasında
N20	M205	Kum sericinin çalışması
N22	G1 A-5 F8000	A eksen -5 noktasında
N24	M215	Kum sericinin kapanması
N26	G1 A350 F8000	A eksen 350 noktasında
N28	M205	Kum sericinin çalışması
N30	G1 A-5 F8000 M203	A eksen -5 noktasında ve Vakumlama sisteminin(artık reçine) açılması
N32	M98 (ALT15.tap) L50	Alt programı 50 kere tekrar çalıştır
N34	G0 A0 M213	A eksen 0 noktasında ve Vakumlama sisteminin(artık reçine) kapanması
N36	M30	Program bitir
Alt Program(ALT15.tap)		
N2	M215	Kum sericinin kapanması
N4	G1 A350 F8000	A eksen 350 noktasında
N6	M205	Kum sericinin çalışması
N8	G1 A-5 F8000;	A eksen -5 noktasında
N10	G91 Z0.3 F100	Z eksen olduğu konumda artımsal olarak 0,3 indirildi
N12	G90	Mutlak sistem
N14	M215	Kum sericinin kapanması
N16	G1 X-240 Y190 M206 F1700	X-240 ve Y190 noktasında ve Selenoid valfin(püskürtücü) açılması
N18	G2 X-260 Y190 R10 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda dairesel hareket yapması
N20	G2 X-240 Y190 R10 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda dairesel hareket yapması
N22	G1 X-245 Y190 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda lineer hareket yapması
N24	G2 X-255 Y190 R5 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda dairesel hareket yapması
N26	G2 X-245 Y190 R5 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda dairesel hareket yapması
N28	G1 X-250 Y190 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda lineer hareket yapması
N30	G1 X-240 Y190 F1700	X-240 ve Y190 noktasında ve Selenoid valfin(püskürtücü) açılması
N32	G2 X-260 Y190 R10 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda dairesel hareket yapması
N34	G2 X-240 Y190 R10 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda dairesel hareket yapması
N36	G1 X-245 Y190 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda lineer hareket yapması
N38	G2 X-255 Y190 R5 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda dairesel hareket yapması
N40	G2 X-245 Y190 R5 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda dairesel hareket yapması
N42	G1 X-250 Y190 F300	X ve Y eksenleri ilgili konumlarda lineer hareket yapması
N44	M216	Selenoid valfin(püskürtücü) kapatılması
N46	G1 X0 Y0 F1700	X ve Y eksenleri 0 noktasında
N48	M99	Alt program sonu

### 3.1.2. Kum Kalıp Üretimi

Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcı üretildikten sonra yazıcıda mekanik ve döküm testlerinin yapılabilmesi için farklı parametrelerde 25x125x15 mm ölçülerinde dikdörtgen prizma, 25x15 mm ve 50x20 mm ölçülerinde silindir şeklinde, her bir parametre için ikişer adet numune üretilmiştir. Numuneler üretilirken ana sarf malzeme olarak, silis kumu, furan reçinesi ve katalizörü kullanılmıştır. Kum, reçine ve katalizör oranı ayarlanırken, reçine üreticilerinin maça yapımı için verdiği oran dikkate alınmakla birlikte üretilen yazıcıda yeni ve farklı bir püskürtme sistemi olduğu için bu oranlar deneme yanılma metoduna göre yapılmıştır. Üretimde katalizör ve reçinenin kimyasal reaksiyona etkili ve dengeli bir şekilde girebilmesi için ortam sıcaklığının önemli olduğu görülmüştür. Bu sebeple ortam sıcaklığı min. oda sıcaklığında (24 °C) ayarlanmıştır. Çok daha düşük ortam sıcaklığında üretilen numunenin sertleşmediği özellikle iç kısımlarının yaş kaldığı gözlenmiştir. Şekil 3.23'de kum kalıp üretimi 1 ve Şekil 3.24'de kum kalıp üretimi 2 gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Kum Kalıp Üretimi 1 a) Öncesi b) Sonrası



**Şekil 3.24.** Kum Kalıp Üretimi 2 a) Öncesi b) Sonrası

Şekil 3.23 ve Şekil 3.24’de görüldüğü üzere yazıcıda basılan numune ilk önce yeşil renkte olmakta (yaş numune) ve zamanla uygun ortam sıcaklığı şartlarında kimyasal reaksiyonlar sebebiyle kürlenmekte ve rengi koyulaşıp siyaha dönüşmektedir. Bu dönüşüm aslında reçine ve katalizörün kimyasal reaksiyon oluşturarak tepkimeyi tamamladığını göstermektedir.

Üretimde öncelikle silis kumunun tane boyutlarını sınıflandırmak için elek işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında her bir kum tane boyut aralığı için ayrı ayrı olmak üzere 3 farklı katalizör oranında (kumun ağırlığınca %0,5-%0,6 ve %0,7) karıştırıcıda 900 dev/dk hızda ve 3 dk süresince mekanik olarak karıştırılmıştır. Kumla karıştırılmış katalizör uzun süre bekleyince kimyasal etkisi azaldığı için karışımlar her seferinde 750 gr kum olacak şekilde hazırlanmıştır. Sonrasında farklı baskı parametrelerinde bu karışımlar kum haznesine doldurularak katman katman şeklinde serilmiş ve püskürtücü kısımda bulunan furan reçinesi selektif olarak üzerine püskürtülmüştür. Bu aşamalar numune istenilen boyuta gelinceye kadar devam ederek parça üretilmiştir. Sonrasında numunelerin mukavemetinin artması için oda sıcaklığında (24 °C) kürlenmesi sağlanmıştır. Üretimde kullanılan baskı parametreleri şunlardır; katalizör oranı (ağırlıkça kumun %0,5-%0,6 -%0,7), kum tane boyutu (125-250  $\mu\text{m}$  ve 250-500  $\mu\text{m}$ ) ve baskı kafası ilerleme hızı (F300-F400-F500 mm/dk). Şekil 3.25’de hassas terazi, Şekil 3.26’da titreşimli eleme cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Hassas terazi



Şekil 3.26. Titreşimli eleme cihazı

İstenilen boyut aralığındaki kum tanelerini çalışmada kullanabilmek için kumlar, titreşimli eleme cihazında elenmiştir. Kuma eklenen katalizör miktarı ise hassas terazide tartılarak ayarlanmıştır. Şekil 3.27’de mekanik karıştırıcı gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Mekanik Karıştırıcı

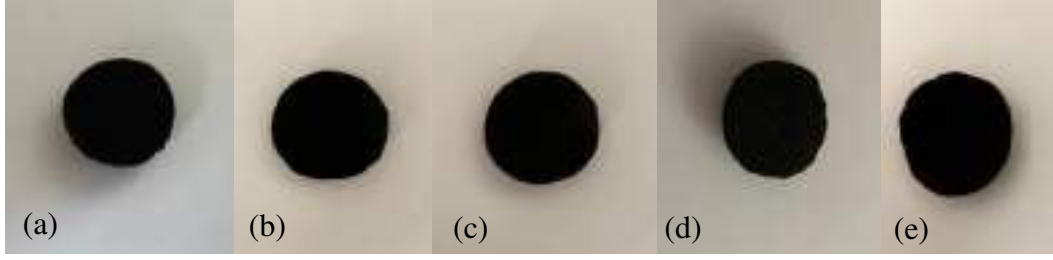
Silis kumu ve katalizör karışımında, içerikteki katalizör oranına göre karışımın nemliliği değişmektedir. Yeterli ve düzgün karıştırmanın olmaması ve çok fazla nemlilik durumunda ufak topaklanmalar görülebilmekte bu da kum serme işleminde problem ortaya çıkarabilmektedir. Kum sericiden kumun homojen bir şekilde serilmesi için katalizör ile kumun topaklanma olmadan düzgün bir şekilde mekanik olarak karıştırılması gerekmektedir. Şekil 3.28’de aşırı nemli kumun topaklanma sebebiyle düzensiz serilmesi gösterilmiştir.



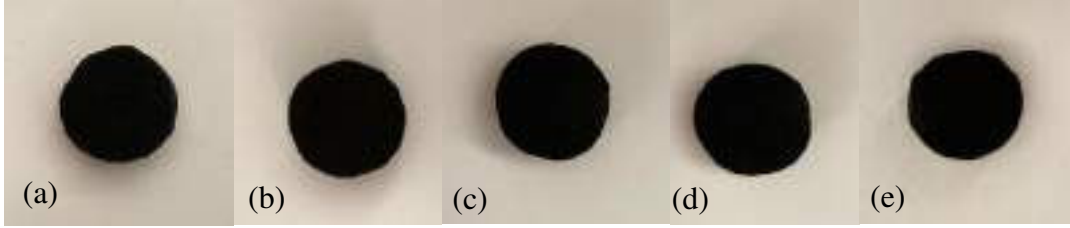
**Şekil 3.28.** Aşırı nemli kumun düzensiz serilmesi

Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcının tasarımı ve üretimi gerçekleştirilirken sarf malzeme olarak kullanılacak olan reçine ve katalizör türünün seçimi önemlidir. Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcıda kalıp üretiminde havada sertleşen reçinelerden furan reçinesi ve katalizörü kullanılmıştır. Ayrıca, reçine ve katalizörün birbirlerine doğrudan karıştırılmaması gerekmektedir. Çünkü birbirleri ile doğrudan karıştırılması durumunda şiddetli ekzotermik reaksiyon oluşur. Bu duruma dikkat edilmesi gerekmektedir.

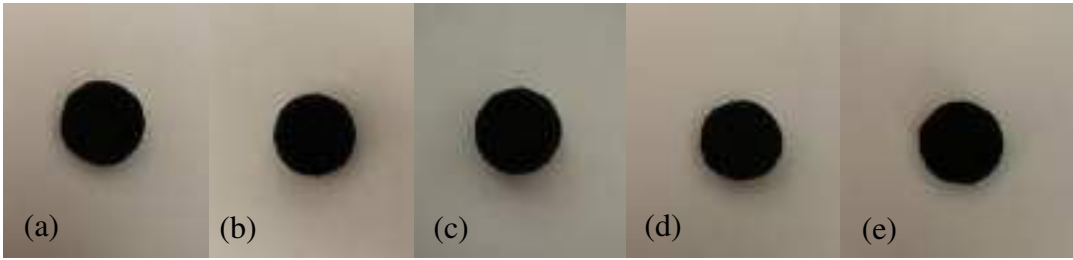
Bu sebeple numune üretimi, katalizör karıştırılmış kumun haznedan serilmesi ve serilen kum üzerine reçinenin selektif olarak püskürtülerek katman katman şeklinde eklemeli olarak imalatı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen kum kalıpların resimleri Şekil 3.29-3.30-3.31-3.32-3.33 ve Şekil 3.34’de verilmiştir.



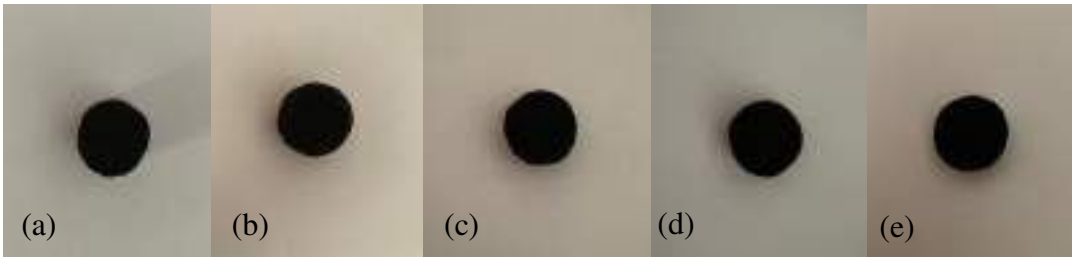
Şekil 3.29. a) K5F300, b) K6F300, c) K7F300, d) K6F400, e) K6F500 (50x20 mm Silindir)



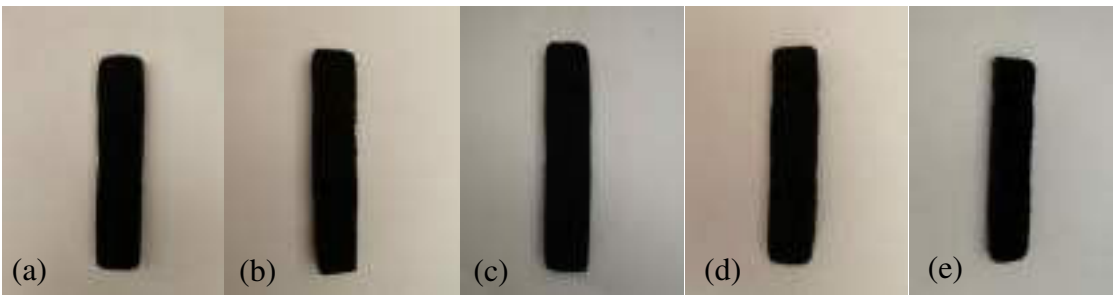
Şekil 3.30. a) İ5F300, b) İ6F300, c) İ7F300, d) İ6F400, e) İ6F500 (50x20 mm Silindir)



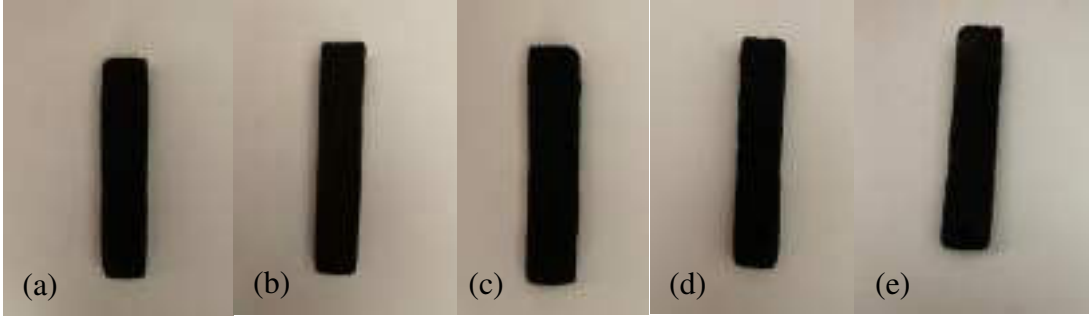
Şekil 3.31. a) K5F300, b) K6F300, c) K7F300, d) K6F400, e) K6F500 (25x15 mm Silindir)



Şekil 3.32. a) İ5F300, b) İ6F300, c) İ7F300, d) İ6F400, e) İ6F500 (25x15 mm Silindir)

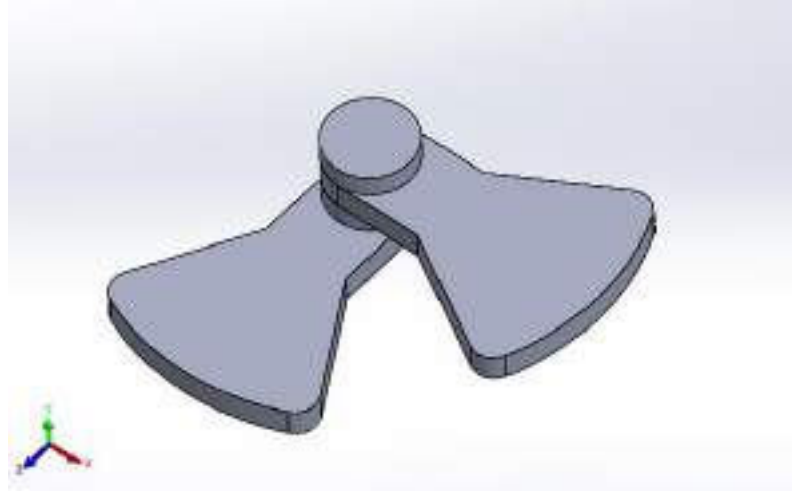


Şekil 3.33. a) K5F300, b) K6F300, c) K7F300, d) K6F400, e) K6F500 (25x125x15 mm Dikdörtgen Prizma)



**Şekil 3.34.** a) İ5F300, b) İ6F300, c) İ7F300, d) İ6F400, e) İ6F500 (25x125x15 mm Dikdörtgen Prizma)

3 boyutlu çizim programında (SolidWorks-Student Edition) tasarımı yapılan kompresör krank modeli, 3B yazıcıda basılarak üretilen yaş ve kurlenmiş kompresör krank modeli sırasıyla Şekil 3.35, Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’de verilmiştir.



**Şekil 3.35.** Tasarlanan Kompresör Krank Modeli



**Şekil 3.36.** Yaş Kompresör Krank Modeli



Şekil 3.37. Kürlenmiş Kompresör Krank Modeli

Üç boyutlu kum kalıp baskının üretim yaklaşımlarının Çizelge 3.7’de belirtildiği üzere farklı türleri bulunmaktadır. Üretilen bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcının üretim yaklaşımı 3DP şeklindedir.

Çizelge 3.7. Üç Boyutlu Kum Kalıp Baskının Üretim Yaklaşımları (Zhao vd., 2018)

Yöntem	SLS	3DP	PCM
<b>Adım</b>			
<b>1</b>	Önceden kaplanmış kum tozlarının yayıcı tarafından serilmesi	Homojen bir şekilde kum tozları ve kürleyici etken karıştırılır	Kum tozları homojen bir şekilde serilmesi
<b>2</b>	Katman kalınlığına göre selektif olarak tozların lazer sinterlenmesi	Katman kalınlığına göre selektif olarak yapıştırıcı püskürtülmesi	Katman kalınlığına göre selektif olarak katalizör ve yapıştırıcı püskürtülmesi
<b>3</b>	Son ürün elde edilinceye kadar 1. ve 2. Adımın tekrar edilmesi	Son ürün elde edilinceye kadar 1. ve 2. Adımın tekrar edilmesi	Son ürün elde edilinceye kadar 1. ve 2. Adımın tekrar edilmesi
<b>Kompozisyon</b>	Önceden kaplanmış kum(kum ve kürleyici etken+ lazer sinter)	Kum ve kürleyici+ yapıştırıcı karışımı	Kum + yapıştırıcı+ kürleyici etken
<b>Özgün Üreticiler</b>	EOSINT-Germany	Exone-America, Voxeljet-Germany	FHZL-China

### 3.1.2.1. Kum

Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcıda numune üretiminde kullanılan ve numunenin ana yapısını oluşturan sarf malzemelerden biri silis kumudur. Numune

üretimi yapılırken 125-250  $\mu\text{m}$  ve 250-500  $\mu\text{m}$  olmak üzere iki farklı kum tane boyut aralığında silis kumu kullanılmıştır.

Silis kumunun (kuvars kumu,  $\text{SiO}_2$ ) ana elementi olan Silisyum (Si), yeryüzünde en çok bulunan elementlerden biridir. Silisyum oksit kum formunda, kuvars şeklinde bulunmaktadır. Silis kumları tane boyutuna ve içerisindeki bileşiklere, safsızlıklarına göre cam, deterjan, plastik, inşaat, çimento, döküm sanayilerinde vb. alanlarda kullanılmaktadır. Renksiz veya açık beyaz renklidir ve demir oksit içeriyorsa, renkleri pembeden kızıla veya kahverengine kadar değişir (Terzi vd., 2016). Şekil 3.38'de silis kumu gösterilmiştir.



**Şekil 3.38.** Silis kumu

Döküm proseslerinde en çok bilinen ve kullanılan kum,  $\text{SiO}_2$  bileşimindedir. Silis kumunun döküm kumu olarak tercih edilmesinin en önemli nedenleri kolay bulunuşu, ucuz olması ve yüksek refrakterlik özelliği göstermesidir. Ancak yüksek genleşme de gösterir. Dolayısıyla boyut toleranslarında bu durumun hesaba katılma gerekliliği vardır (Solmaz, 2008).

Kalıp kumlarının ana maddesi olan silis bir  $\text{SiO}_2$ 'dir ve çok sert bir malzeme olup 1700 °C'ye kadar sıcaklığa dayanır. Silis tanelerinin büyüklükleri ve dağılışları; kumun dayanımını, gaz geçirgenliğini, ısıya karşı dayanımını ve yüzey kalitesini etkiler. Silis kumu, oval, yuvarlak, düzgün yüzeyli veya pürüzlü olabilir.

Kumun taneleri, ne kadar ince olursa, döküm yüzey kalitesi o kadar iyi olur. Ancak kumun gaz geçirgenliği de azalır (Aran, 2007). Aynı büyüklükteki kum tanelerinden oluşan kalıplarda boşluklar oluşacağı için gaz geçirgenliği yüksektir. Ancak,

farklı boyutlardaki kum tanelerinden oluşan kum kalıplarda boşluklar daha az oluşacağı için gaz geçirgenliği de düşüktür. Bu sebeple kumların tane iriliği önemlidir.

Kumun tane şekli, taneler arası temas yüzey alanını etkilediğinden önemlidir. Yuvarlak şekilli yapıya sahip kumların taneler arası temas yüzeyi de küçük olduğu için akıcılık özelliklerinin iyi olması makineli kalıplamada avantajdır. Köşeli yapıya sahip kumlar ise temas yüzeyleri daha fazla olduğundan daha yüksek dayanımlara ulaşabilir ve daha yoğun istiflenebilirler (Kadioğlu, 2014). Çizelge 3.8’de silis kumunun özellikleri ve Çizelge 3.9’da silis kumunun yüzde bileşimleri verilmiştir.

**Çizelge 3.8.** Silis Kumunun Özellikleri

Özellikler	Kimyasal formülü	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Sertlik (Mohs)	Renk	Ergime Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık Reaksiyonu (pH)
Silis Kumu	SiO <sub>2</sub>	2650	7	Beyaz/ Kahve	1710	Asidik

**Çizelge 3.9.** Silis Kumunun Yüzde Bileşimleri

Bileşim(%)	SiO <sub>2</sub> (Min.%)	MgO (Max.%)	K <sub>2</sub> O (Max.%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Max.%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Max.%)	CaO (Max.%)	TiO <sub>2</sub> (Max.%)
Silis Kumu	99,3	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0.1

ExOne ve Voxeljet firmalarının her ikisi de 3B yazıcılarında kalıp yapımı için döküm endüstrisinde yaygın olarak kullanılan silis ve seramik kumlarını kullanmaktadır. Ancak bu kumlar yazıcılar için özel olup 3B yazıcılarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan kum ise geleneksel döküm endüstrisinde kullanılan genel silis kumudur.

### 3.3.2.2. Reçine ve Katalizör

Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcıda numune üretmek için kullanılan diğer sarf malzemeler ise reçine ve katalizördür. Reçine olarak kürlenmesi daha hızlı ve etkili olduğu için havada serleşen reçine türü seçilmiştir. Havada sertleşen reçinelerden ise furan reçinesi kullanılmıştır. Çalışmada, furan reçinesi ve katalizörü kullanılarak numuneler üretilmiştir. Çizelge 3.10’da reçine ve katalizörün türleri, Çizelge 3.11’de ise reçine ve katalizörün özellikleri verilmiştir. 3B yazıcıda numune üretimi yapılırken katalizör oranı ise kumun ağırlığına göre %0,5-0,6-0,7 olarak seçilmiştir.

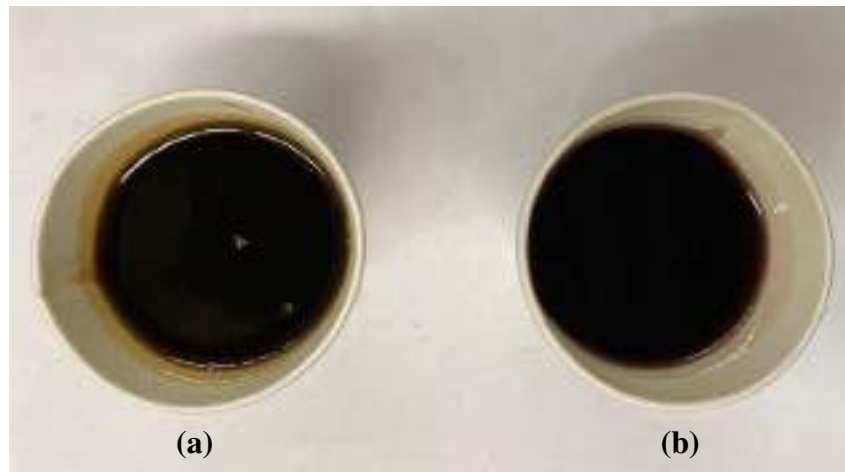
Furan asit CS 30/80 katalizörünün toplam asit oranı %78-82'dir. Katalizörün içindeki asit oranı arttıkça daha soğuk ortam sıcaklığında tepkimeye girebilmektedir. Şekil 3.39'da reçine ve katalizör gösterilmiştir.

**Çizelge 3.10.** Reçine ve Katalizör Türleri

Reçine	Reçine Türü	Katalizör(Serter)
Furan Reçine	Furanol CS 470	Furan Asit CS 30/80

**Çizelge 3.11.** Reçine ve Katalizör Özellikleri

Reçine ve Katalizör Türü/Özellikleri	Yoğunluk (20°C, gr/cm <sup>3</sup> )	Viskozite (FC1, 25°C, s)
Furanol CS470 (Furan Reçine)	1,14-1,16	6-9
CS 30/80 (Furan Asit)	1,22-1,27	

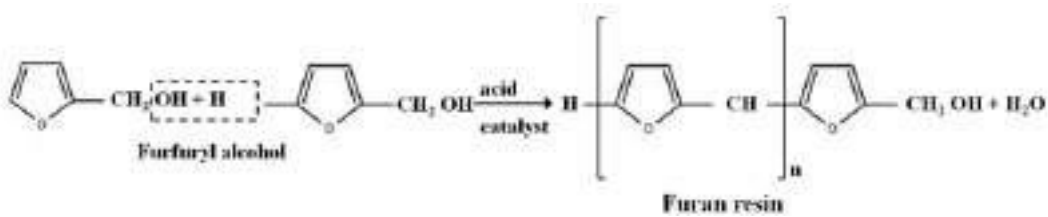


**Şekil 3.39.** a) Reçine ve b) Katalizör

Furfuril reçineleri ve ayrıca furfuril alkol ile modifiye edilmiş ve dökümhanelerde kullanılanlar %45 ile %95 arasında furfuril alkol içerir. Furfuril alkol ilavesi, reçine kürünü hızlandırır, priz kabiliyetini artırır, böylece kumlara eklenen bağlayıcı miktarının azaltılmasını mümkün kılar. Furan reçineleri, ısıtılmaları veya bir kimyasal madde eklenmesi sonucunda sertleştirilebilirler. Gevşek kendi kendine sertleşen kumlar söz konusu olduğunda, kütleme maddesi olarak ortofosforik, sülfonik veya sülfürik karışımları ve p-toluensülfonik asitler kullanılır. Furan reçinelerine dayalı kumlar, demir

alaşımli dökümde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu kumların avantajları, boyutlarında son derece hassas olan, ortam sıcaklıklarında sertleşen ve matrise göre küçük bir bağlayıcı ilavesi olan karmaşık şekillerde kalıplar ve maçalar yapma kabiliyetini içerir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmanın bir sonucu olarak kalıp ve maça kumlarını hazırlamak için kullanılan bağlayıcılarda bir dizi yapısal değişiklik meydana gelir. Bunlar, karakter değişikliği, kaybolması veya yeni kimyasal bağların oluşumundan oluşabilir. (Bobrowski ve Grabowska, 2012)

Şekil 3.40'da furan asit-katalizör pişirme gerektirmeyen kürlenme mekanizması verilmiştir.



Şekil 3.40. Furan asit-katalizör pişirme gerektirmeyen kürlenme mekanizması (Hawaldar vd., 2018)

Bu fırınsız kürlenme sistemi için temel hammadde furfuril alkol ve asidik sertleştiricidir (sülfonik asit). Bir furan reçinesine bir asit katalizör eklenmesinin neden olduğu ekzotermik polikondensasyon, bağlayıcının sertleşmesine neden olur. Şekil 3.40'da görüldüğü gibi sülfonik asit (asit katalizör) varlığında kürlenme işlemi sırasında furan polimer zinciri oluşmakta ve az miktarda su açığa çıkmaktadır (Hawaldar vd., 2018).

### 3.1.3. Baskı Parametreleri

Üretilen bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcıda numune üretimi için çeşitli baskı parametreleri belirlenmiştir. Bunun sebebi farklı baskı parametre seçimlerinde üretilen numunelerin mekanik ve döküm özelliklerinin bulunması ve karşılaştırılmasıdır. Çalışmada baskı parametresi olarak kum tane boyutu, katalizör oranı ve baskı kafası ilerleme hızı seçilmiştir. Numuneler bu üç baskı parametresine göre üretilmiştir. Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcının, katman kalınlığı, ortam sıcaklığı, püskürtme kısmının üretim tablası ile mesafesi, kum serici hızı, reçine türü, katalizör türü, püskürtme nozul çapı, püskürtme kısmının filtre çapı ise deneme yanılma yöntemine göre belirlenerek sabit değerlerde alınmıştır.

Reçine türü olarak ise furan reçinesi kullanılmıştır. Reçine oranında ise döküm reçine üreticisi tarafından verilen oranlar dikkate alınmıştır. Ancak, yazıcının çalışma sisteminin klasik maça üretim yönteminden farklı olması, kullanılan kumun özellikleri ve sıcaklık gibi durumlar sebebiyle deneme yanılma yöntemine göre belirlenmiştir.

Reçine üreticilerinin verdiği değerler ise şu şekildedir: Reçinenin kum ağırlığına göre oranı %1,2-1,5'i kadardır. Katalizör oranı ise reçine ağırlığına göre %25-45 kadardır. Ancak baskı parametrelerinden biri olan katalizör oranı kumun ağırlığına göre %0,50-0,60-0,70 olarak 3 farklı şekilde seçilmiştir. Reçine oranı ise, baskı kafası ilerleme hızına göre değişiklik göstermiştir. Baskı kafası ilerleme hızı ise F300-F400-F500 mm/dk olarak seçilmiştir. Reçine haznesinden püskürtücüye giden reçine, yerçekimi kuvveti kullanılarak aktığı için nozul ve hazne arasındaki yükseklik farkı göz önünde bulundurularak püskürtme işleminin devamlılığı sağlanmıştır.

Ön denemeler sonucunda, püskürtücü baskı kafasının her bir katman için takip edilen takım yolunda ikişer defa gitmesi ile kumda reçine oranının sağlandığı görülmüştür. Üretim yapılırken numunenin tabanının tablaya yapışmaması ve tabladan kolay ayrılabilmesi için ilk 3 katmana kum serilmiştir. Numuneler üretildikten sonra 3 boyutlu yazıcıda kürlenmesi için en az 1 gün bekledikten sonra yazıcıdan alınmış 24 °C ortam sıcaklıkta bekletilmiştir. Çizelge 3.12'de üretimde sabit alınan baskı parametreleri ve değerleri, Çizelge 3.13'de üretimde değişken baskı parametreleri ve değerleri verilmiştir.

**Çizelge 3.12.** Üretimde Sabit Alınan Baskı Parametreleri ve Değerleri

Sabit Baskı Parametreler	Sabit Baskı Parametre Değerleri
Reçine püskürtme kafasının üretim tablası ile arasındaki mesafe	4 mm
Kum serici hızı	8000 mm/dk
Kum Katman Kalınlığı	200-300 µm aralığı
Reçine türü	Furanol CS 470 (Furan Reçine)
Katalizör türü	CS 30/80 Serter (Furan Asit)
Reçine püskürtme kafasının nozul çapı	300 µm
Reçine püskürtme kafasının filtre çapı	5 mm
Ortam Sıcaklığı	24 °C
Hava Basıncı	1,5 bar

Çizelge 3.13. Üretimde Değişken Baskı Parametreleri ve Değerleri

Değişken Baskı Parametreler	Değişken Baskı Parametre Değerleri
Katalizör oranı (kumun ağırlıkça)	%0,50 %0,60 %0,70
Kum tane boyutu	125-250 $\mu\text{m}$ 250-500 $\mu\text{m}$
Baskı kafası ilerleme hızı	F300 mm/dk F400 mm/dk F500 mm/dk

### 3.1.3.1. Kum Tane Boyutu

Bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcıda üretilen numuneler için seçilen baskı parametrelerinden biri kum tane boyutudur. Numuneler üretilirken AFS 80-90 silis kumu temin edilmiş ve elek işlemi yapılarak 125-250  $\mu\text{m}$  ve 250  $\mu\text{m}$ -500  $\mu\text{m}$  olarak iki farklı şekilde silika kum boyut aralığı seçilmiştir. Daha sonra üretilen numunelerin mekanik, döküm testleri yapılarak seçilen kum tane boyutunun mekanik ve döküm özelliklerine etkisi belirlenmiştir ve sonuçlar bölümünde açıklanmıştır. Kum tane boyutunun, katman kalınlığını etkileyen önemli bir özellik olduğu dikkate alınmıştır. Farklı boyutlardaki kum tanelerinin inşa tablasına serilmesi kum haznesinden yapılmaktadır. Kum haznesinde farklı boyutlardaki kum tanelerinin düzgün bir şekilde aşağıya dökülebilmesi için ayar kısmı bulunmaktadır ve bu kısım kum tane boyutunun büyüklüğüne göre daraltılıp genişletilebilmektedir. Kum tane boyutu seçiminde çok daha farklı boyutlarda silika kum seçilebilir ama döküm sektöründe kum kalıp üretiminde sıklıkla kullanılan kum tane boyutları seçilmiştir.

Döküm sanayisinde sıklıkla kullanılan AFS 80-90 silis kumu temin edilmiş ve elek analizi gerçekleştirilmiştir. Elek analizi sonucunda silis kumu; 0-63  $\mu\text{m}$ , 63-90  $\mu\text{m}$ , 90-125  $\mu\text{m}$ , 125-180  $\mu\text{m}$ , 180-250  $\mu\text{m}$ , 250-355  $\mu\text{m}$ , 355-500  $\mu\text{m}$  ve 500-1000  $\mu\text{m}$  olacak şekilde ayrılmıştır. Çalışmada 125-250  $\mu\text{m}$  ve 250-500  $\mu\text{m}$  aralığında silis kumları kullanılmış ve silis kumunun elek boyutu ve oranları Çizelge 3.14'de verilmiştir.

Çizelge 3.14. Silis Kumu Tane Boyut Aralığı

Kum Tane Boyut Aralığı ( $\mu\text{m}$ )	Elek boyutu ( $\mu\text{m}$ )	İçerik oranı (%)
125-250	180-250	%40
	125-180	%60
250-500	355-500	%15
	250-355	%85

### 3.1.3.2. Katalizör Oranı

Bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcıda üretilen numuneler için seçilen baskı parametrelerinden biri de katalizör oranıdır. Numuneler üretilirken silika kuma, ağırlıkça %0,50- %0,60 ve %0,70 olarak üç farklı katalizör oranı belirlenmiştir. Daha sonra üretilen numunelere mekanik ve döküm testleri yapılarak seçilen katalizör oranlarının mekanik, döküm özelliklerine etkisi belirlenmiş ve sonuçlar bölümünde açıklanmıştır. Katalizör oranları belirlenirken reçine ve katalizör üreticilerin önerdiği oranlar, çalışma sıcaklığı, üretim yöntemi gibi parametreler dikkate alınarak belirlenmiştir. Belirlenen katalizör oranlarında silika kum ile katalizör mekanik karıştırıcıda 900 dev/dk ve 3 dk boyunca mekanik olarak karıştırılmış sonrasında ise kum serici haznesine konulmuştur.

Katalizör karıştırılmış kumların uzun süre depoda bekletilmesi kimyasal özelliklerinde kayba neden olabileceği için uzun süre bekletilmesi önerilmemektedir. Bu sebeple kum ve katalizör karışımı her seferinde yazıcıda kullanılacak miktarda hazırlanmıştır. Bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcının kum haznesine her defasında 750 gramlık karışım hazırlanarak uzun süre haznede bekletilmeyerek kimyasal özelliklerinin kaybolmaması sağlanmıştır. Numunelerde kullanılan katalizör oranının reçine ile birlikte çapraz bağların oluşumunda ne kadar etkili olduğu bu parametre ile araştırılmış ve sonuçlar bölümünde açıklanmıştır.

### 3.1.3.3. Baskı Kafası İlerleme Hızı

Bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcıda üretilen numuneler için seçilen baskı parametrelerinden biri de baskı kafasının ilerleme hızıdır. Numuneler üretilirken baskı kafası ilerleme hızı 300 mm/dk, 400 mm/dk ve 500 mm/dk olarak üç farklı şekilde seçilmiştir. Daha sonra üretilen numunelerin mekanik, döküm testleri yapılarak seçilen baskı kafası ilerleme hızının mekanik ve döküm özelliklerine etkisi belirlenmiştir ve sonuçlar bölümünde açıklanmıştır.

Baskı kafasının ilerleme hızının değişimi, üretim sırasında numunelerin katmanlarına püskürtülen reçinenin miktarını da etkilemektedir. Reçine miktarının değişiminin, basılan numunelerin içyapısında oluşan ve mekanik özellikleri etkileyen çapraz bağlar ve gözeneklilik oranları hakkında da bilgi vereceği düşünölmektedir.

### 3.1.4. Mekanik Testler

Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcıda farklı parametrelerde üretilen numunelerin kum kalıp olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla mekanik özelliklerinin, mekanik dayanımlarının belirlenmesi için gözeneklilik testi, basma testi ve eğme testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan mekanik testler hakkında bilgiler aşağıdaki kısımlarda açıklanmıştır.

#### 3.1.4.1. Gözeneklilik Testi

Üretilen numunelerin gözeneklilik oranlarının belirlenmesi için Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM'da bulunan Micromeritics AccuPyc II 1340 gaz piknometresi kullanılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerine gözeneklilik oranı önemli ölçüde etki etmektedir. Bu sebeple numunelerin hacim, yoğunluk ve gözeneklilik oranları tespit edilmiştir. Öncelikle helyum piknometresi ile numunelerin teorik yoğunlukları ve boyutsal ölçüm ile birim hacim başına düşen kütle olarak numunelerin deneysel yoğunlukları bulunmuştur. Sonrasında, teorik ve deneysel yoğunlukları kullanarak gözeneklilik oranları bulunmuştur. Her bir numune için ikişer adet test yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Şekil 3.41'de gaz piknometresi verilmiştir.



Şekil 3.41. Gaz Piknometresi

Helyum piknometresi yöntemi ile gerçek yoğunluk bulunabilmektedir. Cihaz, belirli bir hacmindeki çeşitli malzemelerin helyum gazı kullanarak hacim ve yoğunluk değerini belirlemede kullanılır. Helyum piknometresi Arşimet'in akışkan taşması prensibini ve Boyle Kanunu'nu kullanarak hacim ve gerçek yoğunluğu bulmayı amaçlar. He gazının malzemede etki edeceği gözenek sayısının fazla olmasından dolayı helyum piknometresi ile yoğunluk tespiti diğer yöntemlerden daha güvenilir ve hassastır (Erol, 2016).

Numunelerin gözeneklilik oranının hesaplanması için Denklem 3.1 kullanılmıştır.

$$\%Toplam\ Gözeneklilik = \frac{(\rho_{teorik} - \rho_{yığımsal})}{\rho_{teorik}} \times 100 \quad 3.1$$

Burada;

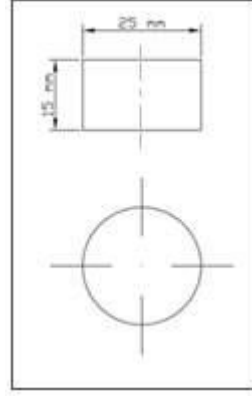
$\rho_{teorik}$ : Teorik yoğunluk ( $gr/cm^3$ ),

$\rho_{yığımsal}$ : Deneysel yoğunluğu ( $gr/cm^3$ ) ifade etmektedir.

### 3.1.4.2. Basma Testi

Basma testi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan CNC dik işlem makinesine gerekli ekipmanlar (loadcell, plakalar vb.) eklenerek yapılmıştır. CNC'den ve loadcell'den aldığımız verilerle hassas sonuçlar alınmış ve Labview Programında kayıt altına alınarak kaydedilmiştir. Böylece farklı parametrelerde üretilen numunelerin basma mukavemetleri belirlenmiştir. Şekil 3.42'de basma numunesinin teknik resmi verilmiştir.

Üretimi yapılan 25 mm çapında 15 mm uzunluğundaki silindir şeklindeki kum döküm kalıp numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ilerleme hızı 2,5 mm/dk seçilerek basma testi yapılmıştır. Testin daha sağlıklı sonuç vermesi amacıyla yükün uygulandığı alt ve üst plaka yüzeylerinin düşey eksene dik ve birbirlerine paralel olmasına dikkat edilmiştir.



**Şekil 3.42.** Basma Numunesi Teknik Resmi

Farklı parametrelerde üretilen numunelerin her birinden ikişer tanesine basma testi yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Sonrasında bu numunelerin basma dayanımları, diğer veriler hesaplanmış ve grafik haline getirilmiştir. Şekil 3.43’de basma testi esnasında numune gösterilmiştir.



**Şekil 3.43.** Basma Testi Esnasında Numune

Basma testi yapılırken cihaz anlık olarak kuvvet-yer değiştirme verilerini kaydetmiştir. Basma test cihazından elde edilen veriler, Denklem 3.2 ile Denklem 3.6 arasındaki formüller kullanılarak basma gerilmesi-birim şekil değiştirme verileri ve grafikleri elde edilmiştir.

$$\sigma_{\text{müh}} = \frac{F}{A_0} \quad 3.2$$

Silindir ise alan;

$$A_0 = \frac{(\pi d_0^2)}{4} \quad 3.3$$

$$\varepsilon_{\text{müh}} = \frac{(h' - h_0)}{h_0} \quad 3.4$$

$$\sigma_{\text{ger}} = \sigma_{\text{müh}} \left( \frac{h'}{h_0} \right) \quad 3.5$$

$$\varepsilon_{\text{ger}} = \ln \left( \frac{h_0}{h'} \right) \quad 3.6$$

Burada;

$\sigma_{\text{müh}}$ : Mühendislik gerilmesi (N/mm<sup>2</sup>),

$\sigma_{\text{ger}}$ : Gerçek gerilme (N/mm<sup>2</sup>),

F: Kuvvet (Newton),

h': Anlık yükseklik (mm),

h<sub>0</sub>: Başlangıçtaki yükseklik (mm),

Silindir ise; d<sub>0</sub>: Başlangıç numune çapı (mm),

A<sub>0</sub>: Numune kesit alanı (mm<sup>2</sup>),

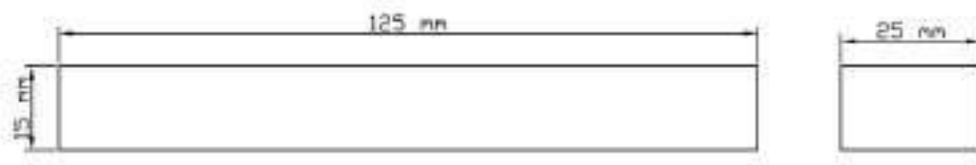
$\varepsilon_{\text{müh}}$ : Mühendislik birim şekil değiştirme değeri (mm/mm),

$\varepsilon_{\text{ger}}$ : Gerçek birim şekil değiştirme (mm/mm) değerini simgelemektedir.

### 3.1.4.3. Eğme Testi

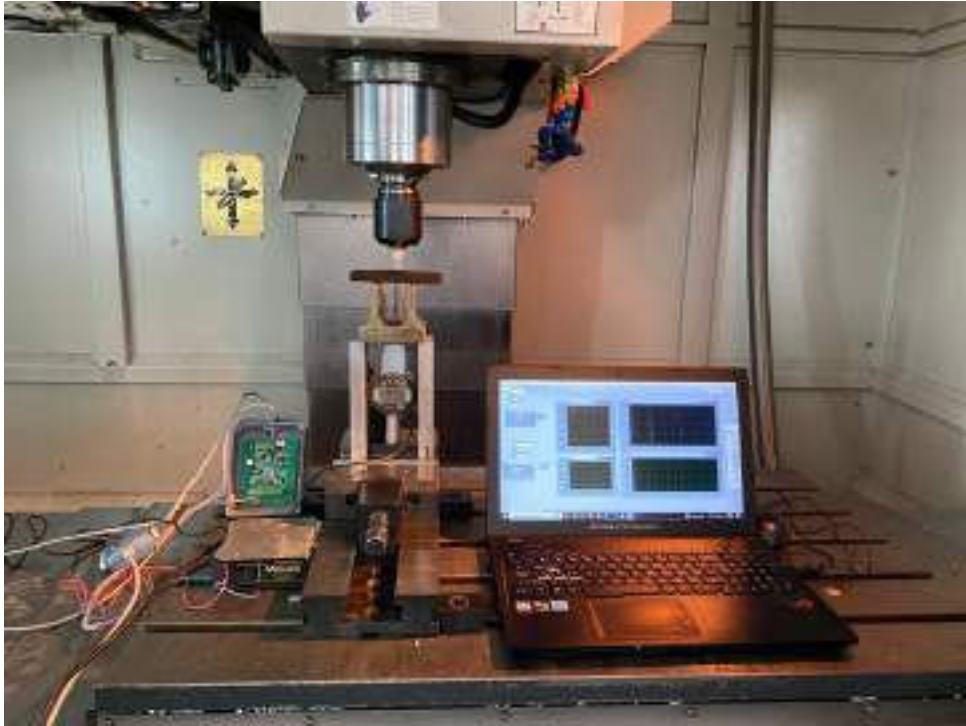
3 noktadan eğme testi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan CNC dik işlem makinesine gerekli ekipmanlar (loadcell, ekstansometre, plakalar vb.) eklenerek yapılmıştır. CNC'den, loadcell ve ekstansometreden aldığımız verilerle hassas sonuçlar alınmış ve Labview Programında kayıt altına alınarak kaydedilmiştir. Böylece farklı parametrelerde üretilen numunelerin eğme mukavemetleri belirlenmiştir.

Üretimi yapılan 25 mm x 125 mm x 15 mm (genişlik x uzunluk x kalınlık) dikdörtgen prizma şeklindeki kum döküm kalıp numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ilerleme hızı 2,5 mm/dk seçilerek üç noktadan eğme testi yapılmıştır. Destekler arası uzaklık 50 mm'dir. Eğme test numunesi teknik resmi Şekil 3.44'de gösterilmiştir.



Şekil 3.44. Eğme Numunesi Teknik Resmi

Farklı parametrelerde üretilen numunelerin her birinden ikişer tanesine eğme testi yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Sonrasında bu numunelerin eğme dayanımları, diğer veriler hesaplanmış ve grafik haline getirilmiştir. Şekil 3.45’de eğme testi esnasında numune gösterilmiştir.



Şekil 3.45. Eğme Testi Esnasında Numune

Eğme testi yapılırken cihaz anlık olarak kuvvet-yer değiştirme verilerini kaydetmiştir. Eğme test cihazından elde edilen veriler, Denklem 3.7 ve Denklem 3.8 formülleri kullanılarak eğme gerilmesi-birim şekil değiştirme verileri ve grafikleri elde edilmiştir.

$$\sigma_{\text{eğme}} = \frac{(3 \times P \times L)}{(2 \times b \times d^2)} \quad 3.7$$

$$\varepsilon_{\text{eğme}} = \frac{(6 \times D \times d)}{L^2} \quad 3.8$$

Burada;

$\sigma_{eğme}$ : Eğilme gerilmesi ( $N/mm^2$ ),

$\epsilon_{eğme}$ : Eğilme şekil değiştirmesi ( $mm/mm$ ),

P: Kırılma yükü (N),

L: İki destek arasındaki mesafe (mm),

b: Numune genişliği (mm),

d: Numune kalınlığı (mm),

D: Numune max. sehimini (mm) ifade etmektedir.

### 3.1.5. Döküm Testleri

Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcıda, farklı parametrelerde üretilen numunelerin kum kalıp olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla döküm özelliklerinin belirlenmesi için boyutsal doğruluk, gaz geçirgenliği ve yanma kaybı testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan döküm testleri hakkında bilgiler aşağıdaki kısımlarda açıklanmıştır.

#### 3.1.5.1. Boyutsal Doğruluk Ölçümleri

Bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcıda üretilen silindir ve dikdörtgen prizma numunelerin boyutsal doğruluğu, Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Laboratuvarında bulunan kumpas ve mikrometre ile ölçülmüştür.

Manuel ölçüm yöntemlerinde genellikle kumpaslar, mikrometreler ve mikroskoplar kullanılır. Çalışmamızda üretilen numunelerin manuel ölçümleri referans noktaları belirlenerek Vernier kumpas ve mikrometre ile yapılmıştır. Böylece, numunelerin tasarım model boyut ölçüleri ile üretilen numunelerin boyut ölçüleri karşılaştırılmıştır. Bağlayıcılar arasında çapraz bağlanmanın tamamlanabilmesi ve doğru sonuç alabilmek için numunelerin boyutsal doğruluk ölçümü baskıdan en az 1 gün sonra ölçülmüştür.

Farklı parametrelerde üretilen her bir numuneden ikişer tanesinin boyutları ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır. Sonrasında bu parametrelerin elde edilen boyut toleransına (mm) etkisini gösteren grafikler elde edilmiştir.

### 3.1.5.2. Gaz Geçirgenliği

Bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcıda gaz geçirgenliği ölçümü için her bir parametre için ikişer adet 50x20 mm boyutunda silindir numuneler basılmıştır. Basılan numunelere Frenka firmasının laboratuvarında bulunan Simpson marka gaz geçirgenlik test cihazı ile test yapılmıştır. AFS (Amerikan Dökümcüler Birliği) tarafından önerilen standart yöntemle gaz geçirgenliği ölçümü, silindir deney numunesi 50 mm çapında, 50 mm yüksekliğinde ve gaz geçirgenliği ölçüm cihazının sonuçları bu ölçülere göre vermesi sebebiyle Denklem 3.9 kullanılarak 50x50 mm silindir numune için hesaplanmış ve gaz geçirgenliği sonuçları bulunmuştur. Gaz geçirgenliğinin formülü Denklem 3.9'da verilmiştir.

Farklı parametrelerde üretilen her bir numuneden ikişer tanesinin gaz geçirgenliği ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır. Sonrasında bu parametrelerin elde edilen gaz geçirgenliğine etkisini gösteren grafik elde edilmiştir. Şekil 3.46'da gaz geçirgenlik test cihazı verilmiştir.



Şekil 3.46. Gaz Geçirgenlik Test Cihazı

Standart olarak hazırlanmış numunenin içerisinden standart bir basınç değerinde geçen havanın akış hızına gaz geçirgenliği denir. GP, Amerikan Dökümcüler Birliği (AFS) tarafından önerildiği üzere dökümhane endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle geçirgenlik ölçümlerinin sonuçları GP cinsinden sunulmuştur (Mitra vd., 2018).

$$GP = \frac{V \times H}{A \times P \times t} \quad 3.9$$

Burada;

GP: Gaz geçirgenlik sayısı,

V: Test numunesinden geçen havanın hacmi (cm<sup>3</sup>),

H: Test numunesinin yüksekliği (cm),

A: Test numunesinin kesit alanı (cm<sup>2</sup>),

P: Havanın basıncı (gr/cm<sup>2</sup>)

t: Havanın test numunesi içerisinde geçme süresi (dk)'dir.

Standart gaz geçirgenlik deneyinde V=2000 cm<sup>3</sup>, H=5 cm, A=19,63 cm<sup>2</sup>'dir.

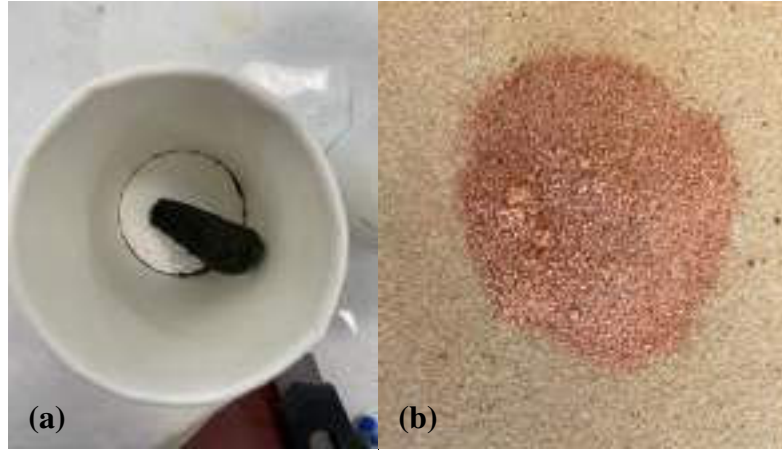
### 3.1.5.3. Yanma Kaybı

Numunelerin yanma kaybının belirlenmesi için Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM Laboratuvarında bulunan Nabertherm GmbH marka fırın kullanılmıştır. Yanma kaybı testi 3 Boyutlu yazıcıda basılan parçanın içerisindeki bağlayıcı miktarını tahmin etmek için yapılmıştır. Bu yöntemde basılan parçanın yanma öncesi ve yanma sonrası ağırlık farkı tartılarak yanma kaybı belirlenmektedir. Öncelikle basılı numunelerin nem ve kalıntıların çıkması için fırında 110 °C'de 1 saat kurutulmuş ve hassas terazide tartılmış sonrasında ise reçinenin uzaklaşması için 982 °C'de 3 saat ısıtılarak tekrar numune ağırlığı hassas terazide ölçülmüştür. 982 °C yanma sıcaklığı AFS 5100-12-S (Thomas ve Moreno, 2019) standardına göre belirlenmiştir. Şekil 3.47'de fırın gösterilmiştir. Denklem 3.10'da yanma kaybının formülü verilmiştir. Her bir numune için ikişer adet yanma kaybı testi yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Şekil 3.48'de yanma öncesi ve sonrası numuneler gösterilmiştir.



Şekil 3.47. Fırın

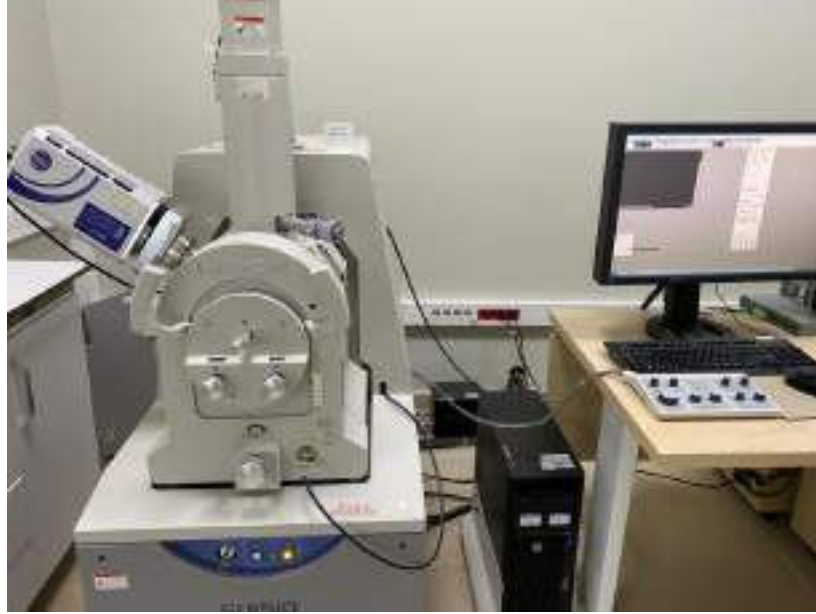
$$Yanma Kaybı(\%) = \frac{Başlangıç\ ağırlığı(gr) - Nihai\ ağırlığı(gr)}{Başlangıç\ ağırlığı(gr)} \times 100 \quad 3.10$$



Şekil 3.48. a) Yanma öncesi numune ve b) Yanma sonrası numune

### 3.1.6. Mikro Yapı İncelemeleri

Bağlayıcı püskürtmeli 3 boyutlu yazıcıda üretilen numunelerin mikro yapılarının incelenmesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM'da bulunan Hitachi-SU 1510 marka SEM cihazıyla 15 kV'de yapılmıştır. İlaveten SEM cihazında EDX analiziyle numunelerin element analizi de yapılmıştır. Şekil 3.49'da SEM cihazı gösterilmiştir. Numunelerin mikro yapı incelemeleri için SEM analizi öncesi numuneler altın ile kaplanmıştır. Şekil 3.50'de altın kaplama cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.49. SEM Cihazı



Şekil 3.50. Altın Kaplama Cihazı

Numunelerin mikro yapısına OLYMPUS - GX71 optik mikroskopta da bakılmıştır. Ancak numunelerin yüksek yüzey pürüzlülüğü ve gözeneklilik oranlarına sahip olduğu için optik mikroskopta istenilen kalitede görüntü alınamadığı için çalışmada yer verilmemiştir.

### 3.1.7. Hidrostatik Basınç Analizi

Bu çalışmada, 3 boyutlu yazıcıda basılarak üretilen numunelerin malzeme özelliklerinde modellere Ansys Analiz (2022-Student Version) programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hidrostatik basınç analizi yapılmıştır. Çalışmada, iç çapı 100 mm, iç yüksekliği 100 mm ve her bir cidar kalınlığı 5-10-15-20 mm olan analiz numuneleri tasarlanarak katı modellemesi yapılmıştır. Sonrasında ise Ansys programında, yazıcıda üretilen kum kalıp ile aynı malzeme özelliğine sahip numune içerisinde erimiş çelik metalinin oluşturacağı basınç değerinde hidrostatik basınç oluşturulmuş ve analizi yapılmıştır.

Çalışmada son olarak, Ansys analiz programında gerçek ölçülerde tasarlanan kompresör silindir gömleğinin içerisinde yükseklik, yoğunluk ve yer çekimine bağlı olarak erimiş çelik metalinin oluşturacağı basınç değerinde hidrostatik basınç oluşturulmuş ve analizi yapılmıştır. Analizde eleman tipi 3D, düğüm sayısı 46132, eleman sayısı 27660'dır. Sonuçlar kısmında ise veriler değerlendirilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

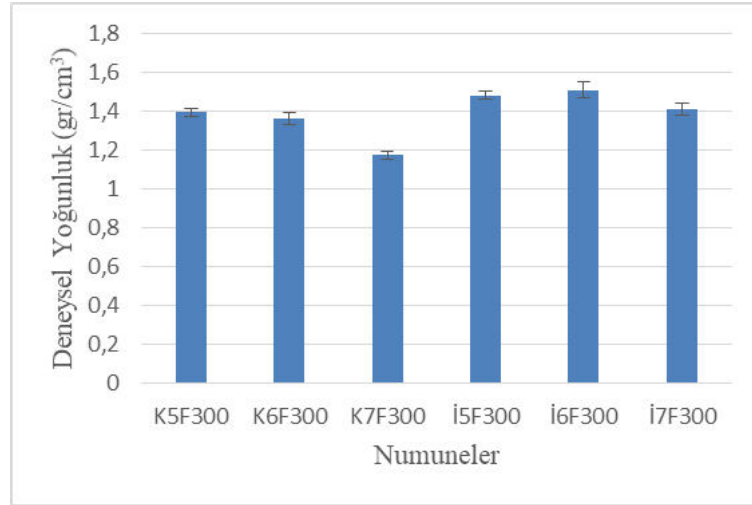
### 4.1. Mekanik Test Sonuçları

Üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gözeneklilik, basma ve üç noktadan eğme testleri yapılmış ve sonuçları verilmiştir.

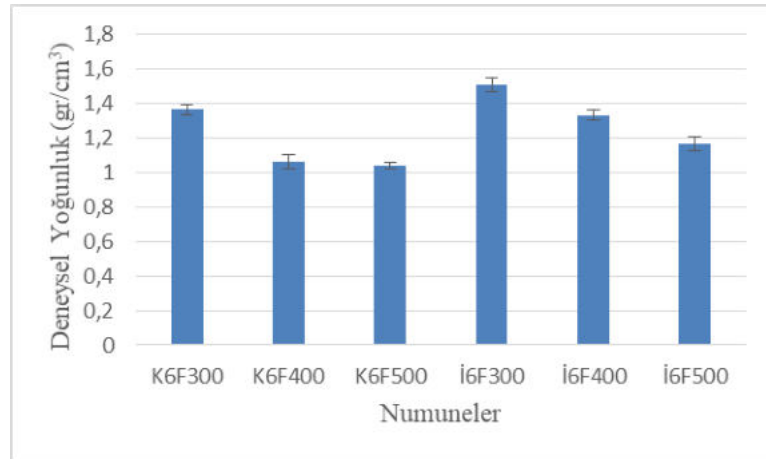
#### 4.1.1. Gözeneklilik Test Sonuçları

Bu çalışmada, fiziksel bir özellik olan ve mekanik özelliklere direkt etki eden gözeneklilik oranlarının bulunabilmesi için farklı parametrelerde üretilen numunelerin teorik yoğunlukları Helyum piknometresi ile hesaplanmış, boyutsal ölçüm ile birim hacim başına düşen kütle olarak numunelerin deneysel yoğunlukları bulunmuştur.

Üretilen numunelerin deneysel yoğunlukları ise Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



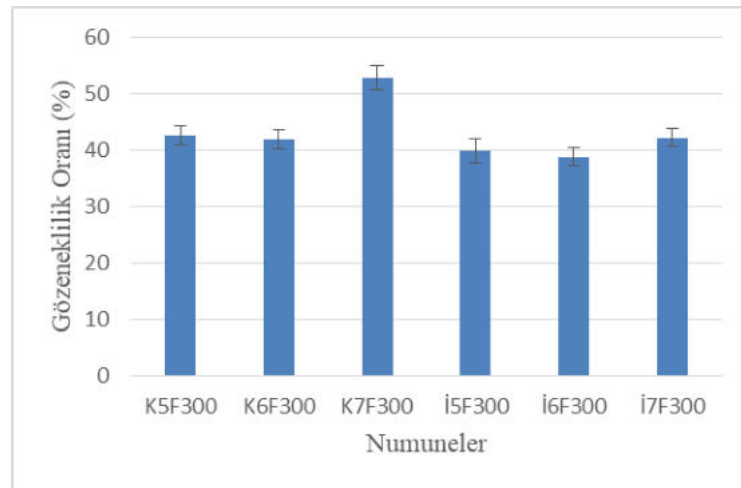
Şekil 4.1. Deneyisel Yoğunluk (K5F300-K6F300-K7F300-İ5F300-İ6F300-İ7F300)



Şekil 4.2. Deneysel Yoğunluk (K6F300-K6F400-K6F500-İ6F300-İ6F400-İ6F500)

Deneysel yoğunluklar karşılaştırıldığı zaman ince kum taneli numunelerin içerisinde daha az boşluk olduğu için kalın kum taneli numunelere göre deneysel yoğunlukları fazla çıkmıştır. Ayrıca ince ve kalın kum taneli numuneler için de yapı içerisindeki reçine miktarı azaldıkça yapının kompaktlığı azaldığı için deneysel yoğunluk değerleri de azalmaktadır. Numuneler arasında deneysel yoğunluğu en fazla olan numunenin İ6F300 ve en az yoğunluğa sahip numunenin K6F500 olduğu belirlenmiştir.

Numunelerin toplam gözeneklilik yüzdeleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de verilmiştir.

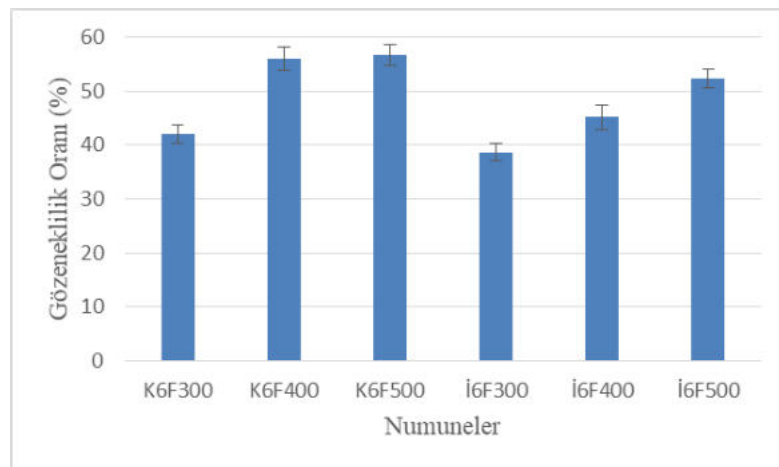


Şekil 4.3. Toplam Gözeneklilik Yüzdesi (K5F300-K6F300-K7F300-İ5F300-İ6F300-İ7F300)

Şekil 4.3’e göre, K5F300 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %42,49, K6F300 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %41,95 ve K7F300 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %52,76 olarak bulunmuştur. Kalın kum (250-500  $\mu$ m) için F=300 mm/dk baskı kafası ilerleme hızında katalizör oranı arttıkça, toplam gözeneklilik

oranı belli bir katalizör oranına (%0,6) kadar %1,27 azalmakta daha sonra artmaktadır. Bunun sebebinin uygun reçine-katalizör doyma oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı reçine oranı için %0,5 ve %0,6 katalizör oranlarında üretilen numunelerin gözeneklilik sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.

İ5F300 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %39,86, İ6F300 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %38,69 ve İ7F300 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %42,16 olarak bulunmuştur. İnce kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için F=300 mm/dk baskı kafası ilerleme hızında katalizör oranı arttıkça, toplam gözeneklilik oranı belli bir katalizör oranına (%0,6) kadar %2,93 azalmakta daha sonra artmaktadır. Bunun sebebinin uygun reçine-katalizör doyma oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı reçine oranı için %0,5 ve %0,6 katalizör oranlarında üretilen numunelerin gözeneklilik sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 4.4. Toplam Gözeneklilik Yüzdesi (K6F300-K6F400-K6F500-İ6F300-İ6F400-İ6F500)

Şekil 4.4'e göre, K6F300 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %41,95, K6F400 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %55,93 ve K6F500 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %56,65 olarak bulunmuştur. İ6F300 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %38,69, İ6F400 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %45,17 ve İ6F500 numunesinin toplam gözeneklilik yüzdesi %52,35 olarak bulunmuştur. Kalın kum (250-500  $\mu\text{m}$ ) ve ince kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için %0,6 katalizör oranında baskı kafası ilerleme hızı arttıkça, toplam gözeneklilik oranı artmaktadır. Bunun nedeni, baskı kafası ilerleme hızındaki artışın reçine miktarını azaltmasıdır. Böylece yapıdaki boşluklara daha az reçine girmesi sebebiyle yapının daha fazla gözeneklilik oranına sahip olduğu düşünülmektedir.

Numunelerin arasında toplam gözeneklilik yüzdesi en fazla olan numunenin %56,65 ile K6F500 numunesi ve en az olan numunenin ise %38,69 ile İ6F300 numunesinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, genel olarak bakıldığı zaman aynı parametreler altında, ince kumdan üretilen numunelerin gözeneklilik oranının, kalın kumdan üretilen numunelere göre daha az olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ise ince kumdan üretilen numunelerdeki kum parçacıklarının birbirine daha fazla temas etmesi ve taneler arası boşlukların daha az olmasından kaynaklanmaktadır.

Gözeneklilik oranı, numune içerisindeki reçine oranının sabit olması ve katalizör oranının artması durumunda, belirli bir katalizör oranına (%0,6) kadar çok düşük oranlarda (kalın kum için %1,27-ince kum için %2,93) azalmakta ve sonrasında artmaktadır. Bunun sebebinin, katalizör oranı reçine ile uygun tepkimeye girecek orandan daha az olduğu zaman, yapı içerisinde oluşacak taneler arası bağlar daha zayıf ve az sayıda olabilmektedir. Eğer uygun reçine-katalizör oranı sağlanabilirse oluşacak kimyasal tepkime hızı daha optimum ve yapı içerisinde oluşacak taneler arası bağlar daha iyi seviyede olacağı için daha dayanımlı, gözeneklilik bakımından daha az boşluğa sahip numuneler üretilmektedir. Ayrıca, katalizör oranı reçine ile tepkimeye girecek uygun orandan daha fazla olduğu zaman, yapı içerisindeki taneler arası bağlar daha hızlı oluşabilmekte, yapı daha kırılabilir olabilmekte ve numune yapısını oluşturan kum parçacıkları arasında büyük gözenekler oluşabilmektedir. Bu durumda reçine oranının da gözeneklilik oranında etkili olduğu görülmektedir. Farklı reçine ve katalizör oranlarında üretilen numunenin kum türü ve morfolojisine de bağlı olarak daha farklı gözeneklilik değişim sonuçları verebileceği düşünülmektedir. Guo ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada ise, furan reçinesi ve katalizörü ile farklı parametrelerde silis ve kromit kumdan kalıplar üretmişlerdir. Çalışma sonucunda, belirli bir reçine oranı için kütleme maddesinin içeriğindeki artışın, kum kalıp gözenekliliğinin artmasına neden olduğunu belirtmişler.

Numune içerisindeki belirli bir katalizör oranında baskı kafası ilerleme hızı arttıkça, toplam gözeneklilik oranı artmaktadır. Bunun nedeni, baskı kafası ilerleme hızındaki artışın reçine miktarını azaltmasıdır. Böylece yapıdaki boşluklara daha az reçine girmesi sebebiyle yapının daha fazla gözeneklilik oranına sahip olduğu düşünülmektedir.

Sivarupan ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan reçinesinden üretilmiş 3B baskılı kum kalıpların yoğunluğunu hesaplamışlardır. Kalıpların üretiminde kum partikül boyutu (140 µm), aktivatör içeriği (kum ağırlığının %0,18'i), kumun aktivatörle karışma süresi (60 s), magnezyum inhibitörü (kumun ağırlıkça %0,4'ü), ısıtma

sıcaklığı (32 °C) sabit tutulmuştur. Kum serici hızı (0,130-0,286 m.s<sup>-1</sup> aralığında), kum katman kalınlığı (280 µm), baskı çözünürlüğü (120-140 µm) değerlerinde numuneler üretilmiş ve 24 saat bekletildikten sonra test edilmişlerdir. 3B baskılı numunesinde elde edilen maksimum yoğunluk 1423 kg.m<sup>-3</sup> civarındadır. Bu sebeple basılan numunelerin yoğunluğu göz önüne alındığında, bir kum kalıp numunesi 3B yazdırıldığında, kum tanelerinin (ağırlık merkezleri) basit bir kübik paketleme düzeninin meydana geldiği görülmüştür. Bu nedenle, %46'lık bir maksimum boşluk bölgesi, kum kalıbının daha iyi geçirgenliğine katkıda bulunabileceği belirtilmiştir.

Coniglio ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen kum kalıp numunelerin yoğunluk ve gözeneklilik değerlerini hesaplamışlardır. Kalıpların üretiminde ortalama kum partikül boyutu (140 µm), aktivatör içeriği (kum ağırlığının %0,18'i), magnezyum inhibitörü (kumun ağırlıkça %0,4'ü), ısıtma sıcaklığı (305 K) sabit tutulmuştur. Kum serici hızı (0,130-0,286 m.s<sup>-1</sup> aralığında), kum katman kalınlığı (280 µm), baskı çözünürlüğü (120-140 µm) değerlerinde numuneler üretilmiştir. Test sonuçlarına göre yoğunluk, 1226 ile 1383 kg/m<sup>-3</sup> arasında değişmektedir ve bu değer %48 ila 54 arasında bir gözeneklilik varyasyonunu temsil etmektedir.

Mitra ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen kum kalıp numunelerin gözeneklilik değerlerini hesaplamışlardır. Ortalama kum tane boyutu (140 µm), kum serici hızı (0,182 m/s), kum katman kalınlığı (280 µm), aktivatör içeriği (kum ağırlığının %0,18'i), ısıtma sıcaklığı (32 °C), yaşlandırma sıcaklıkları (25 °C, 100 °C ve 200 °C) parametre olarak belirlenmiştir. Gözeneklilik değerleri, test edilen tüm numuneler için % 49'a yakın bulunmuştur.

Hackney ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen 3B baskılı numunelerin bağ ve tane yapısı, tabaka boyunca ölçülebilir bir değişiklik göstermemiş ve gözeneklilik % 63 ile % 69 arasında bulunmuştur.

Primkulov ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen 3B baskılı numunelerin gözeneklilik değerini hesaplamışlardır. Her 1000 gr silis kumu ile 1,4 gr asit katalizörü birleştirilmiş ve baskı öncesi 135 rpm'de 2 dakika iyi bir şekilde karıştırılmıştır. Kum serici hızı (200 mm/s), kum katman kalınlığı (250 µm), silis kumun tane boyutu dağılımı (110-175-220 µm), baskı hızı (200 mm/s), kütleme sıcaklıkları (25, 60, 80, 115, 150 ve 200 °C) değerlerinde numuneler üretilmiştir. Tüm numunelerin %43,8±0,71'lik gözeneklilik değerlerine sahip olduğu bulunmuştur.

Mitra ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen 3B baskılı numunelerin gözeneklilik değerlerini hesaplamışlardır. Mevcut

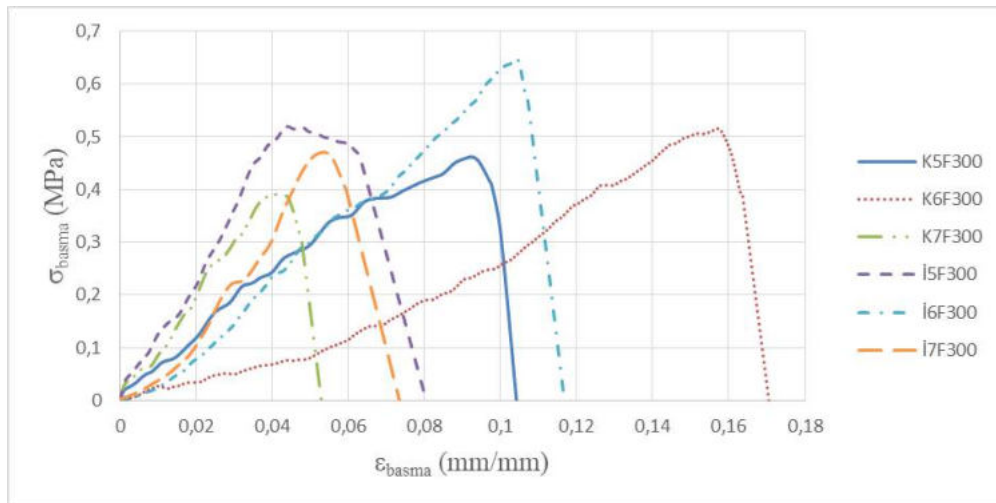
deneylerde kullanılan silis kumu parçacıklarının ortalama parçacık çapı 140  $\mu\text{m}$  ve 190  $\mu\text{m}$ , aktivatör içeriği (kumun ağırlıkça %0,18'i), bağlayıcı içeriği %0,9-2,0'dir. 3B baskılı kum kalıbının deneysel olarak ölçülen yoğunluğu  $\sim 1,3 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Partikül yoğunluğu,  $\sim 2,6 \text{ gr/cm}^3$  ile silis kumunun yoğunluğudur. Deneylerden ölçülen gözeneklilik değerleri, %0,25'lik bir standart sapma ile tüm basılı numuneler için %49-51'e yakın bulunmuştur.

Bu çalışmada elde edilen numunelerin gözeneklilik oranlarının, literatürdeki örnek çalışmalardaki numunelerin gözeneklilik oranlarıyla yakın değerlerde olduğu görülmüştür.

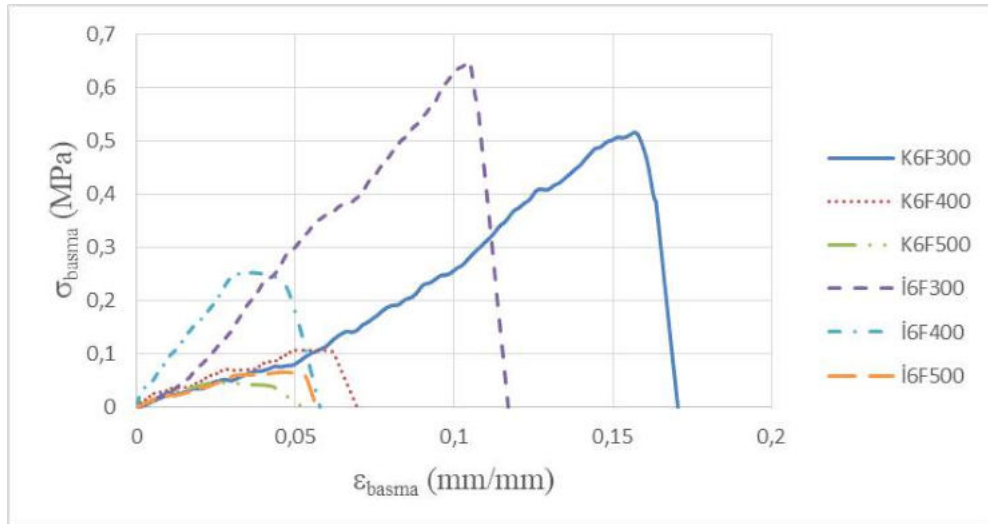
#### 4.1.2. Basma Test Sonuçları

Üretilen döküm kum kalıp numunelerine basma testi yapılarak, yük altındaki basma dayanımları belirlenmiştir. Basma testi, her bir numune grubu için ikişer adet yapılmış ve ortalamaları alınmıştır.

Basma test sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



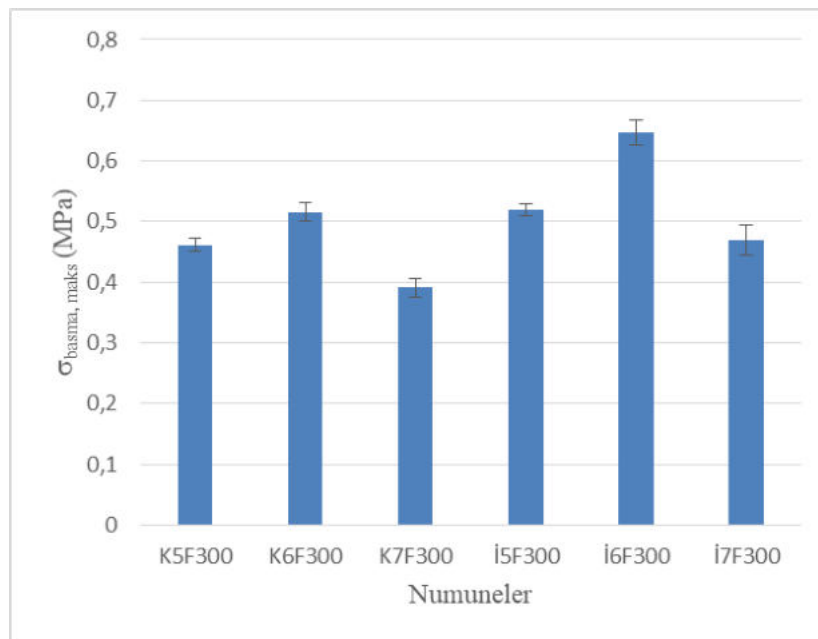
Şekil 4.5. Basma Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği (K5F300-K6F300-K7F300-İ5F300-İ6F300-İ7F300)



Şekil 4.6. Basma Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği (K6F300-K6F400-K6F500-İ6F300-İ6F400-İ6F500)

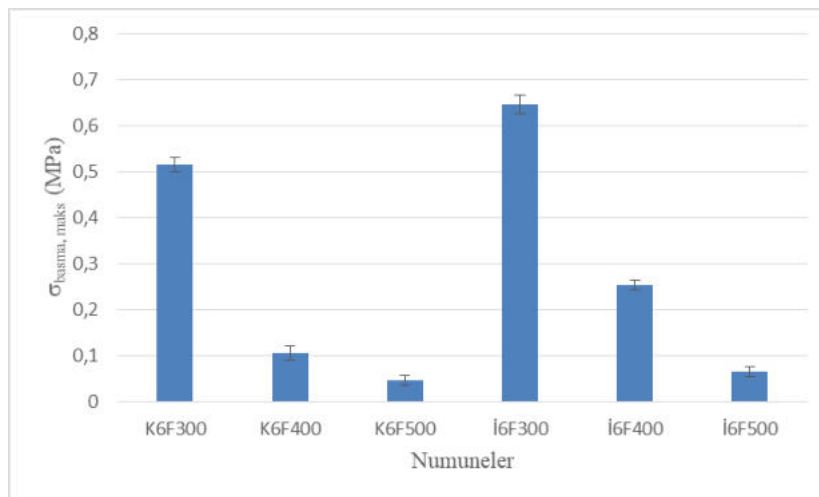
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'ya göre basma dayanımı en yüksek numune  $\sigma_{\text{basma}}=0,6471$  MPa değeri ile İ6F300, basma dayanımı en düşük numune ise  $\sigma_{\text{basma}}=0,0472$  MPa değeri ile K6F500 numunesidir. Basma şekil değişirmesi en yüksek numune ise  $\epsilon_{\text{basma}}=0,170$  mm/mm değeri ile K6F300 numunesi, basma şekil değişirmesi en düşük numune ise  $\epsilon_{\text{basma}}=0,052$  mm/mm değeri ile K6F500 numunesi olarak bulunmuştur. Bu durumda, numuneler arasında en sünek malzemenin K6F300 numunesi olduğunu göstermektedir.

Üretilen numunelerin Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de basma test sonucu elde edilen maksimum gerilme değerleri verilmiştir.



Şekil 4.7. Maksimum Basma Gerilmesi (K5F300-K6F300-K7F300- İ5F300-İ6F300-İ7F300)

Şekil 4.7'ye göre, kalın kum (250-500  $\mu\text{m}$ ) için  $F=300$  mm/dk için baskı kafası ilerleme hızında belirli bir miktara kadar katalizör oranı arttıkça basma dayanımının arttığı, daha sonra düştüğü görülmektedir. Kalın kum için en yüksek basma dayanımının %0,6 katalizör oranı ile K6F300 numunesinde olduğu görülmektedir. İnce kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için  $F=300$  mm/dk için baskı kafası ilerleme hızında belirli bir miktara kadar katalizör oranı arttıkça basma dayanımının arttığı, daha sonra düştüğü görülmektedir. İnce kum için en yüksek basma dayanımının %0,6 katalizör oranı ile İ6F300 numunesinde olduğu görülmektedir. Bunun uygun reçine ve katalizör doyma oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapıdaki reçine miktarı sabit olduğu için reçine ile reaksiyona girecek olan katalizör oranı önemlidir. Katalizör oranı olması gerekenden daha fazla veya daha az ise basma dayanımı, maksimum basma dayanımından daha düşük olmaktadır. Kalın kum ile ince kum, aynı davranışı göstermektedir.

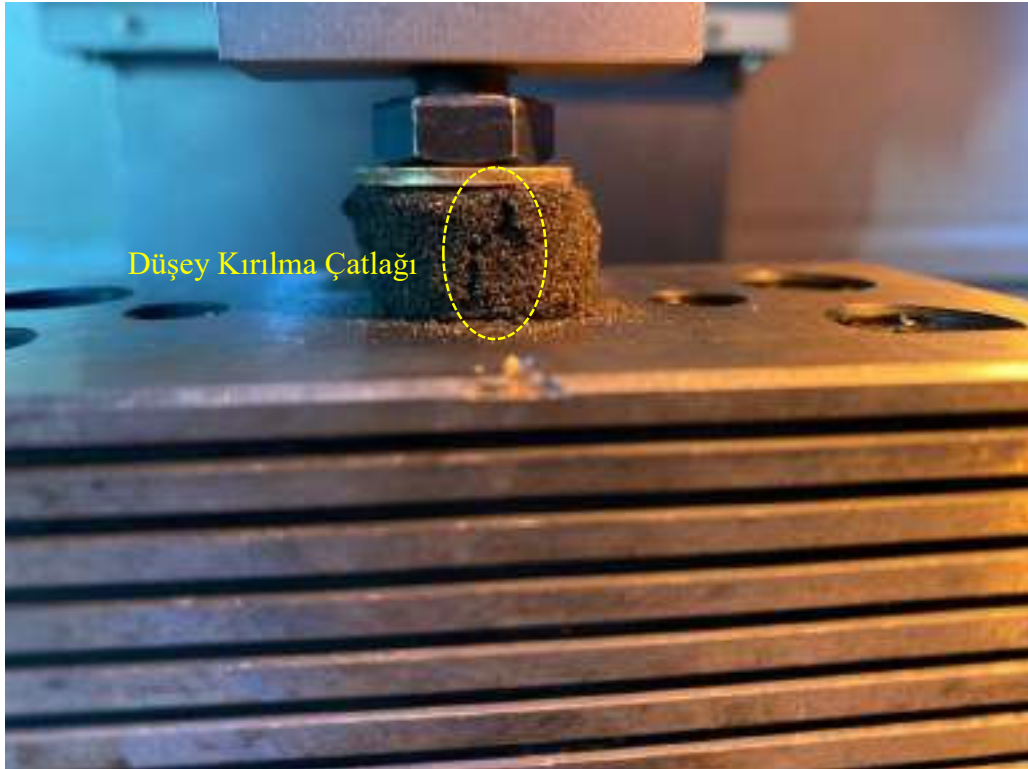


Şekil 4.8. Maksimum Basma Gerilmesi (K6F300-K6F400-K6F500-İ6F300-İ6F400-İ6F500)

Şekil 4.8'e göre, kalın kum (250-500  $\mu\text{m}$ ) için sabit (%0,6) katalizör oranında, baskı kafası ilerleme hızı arttıkça basma dayanımının düştüğü görülmektedir. Kalın kum için en yüksek basma dayanımının  $F300$  mm/dk ilerleme hızına sahip K6F300 numunesinde olduğu görülmektedir. İnce kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için sabit (%0,6) katalizör oranında, baskı kafası ilerleme hızı arttıkça basma dayanımının düştüğü görülmektedir. İnce kum için en yüksek basma dayanımının  $F300$  mm/dk ilerleme hızına sahip İ6F300 numunesinde olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin baskı kafası ilerleme hızının artması veya azalmasının reçine miktarını etkilemesi olduğu düşünülmektedir. Tanecikler arasında reçine oranı arttıkça taneler arası reçine köprüleri artmakta ve yapıdaki

gözenekler azalabilmektedir. Bu durum basma dayanımını artırmaktadır. Kalın kum ile ince kum, aynı davranışı göstermektedir.

Basma testi sırasında, farklı parametrelerde üretilen numunelerin tabaka ayrılması, düşey kırılma gibi farklı kırılma davranışları gösterdiği gözlenmiştir. Basma testi esnasında K6F400 ve K6F500 numunelerinin ve kırılma yüzeylerinin fotoğrafları Şekil 4.9-4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir. Basma testi esnasında diğer numunelerin ve kırılma yüzeylerinin fotoğrafları Şekil E1.1 ile Şekil E1.9 arasında (Bkz. EK-1) verilmiştir.



Şekil 4.9. K6F400 Basma Numunesi



Şekil 4.10. K6F500 Basma Numunesi



Şekil 4.11. K6F500 Numunesi Test Sırasında Ayrılan Tabaka

K6F500 ve İ6F500 numunelerinin basma testi sırasında üst kısımdaki katmanları kırılmış fakat orta kısımdaki katmanlardan alt kısımdaki katmanlara kadar katmanlar kırılmadan düz tabaka olarak ayrılmıştır. Bunun sebebinin bu numunelerin diğer numunelere göre içerisindeki reçine oranının az olmasından ve bu sebeple katmanlar arası geçişte reçine-katalizörün kumlarda oluşturduğu taneler arası bağlarının zayıf olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yetersiz reçine oranı, yeterli reçine köprüleri

oluşturamadığı için basma dayanımını düşürmekte, katmanlar arası geçişte reçine-katalizörün kumlarda yeterli taneler arası bağı oluşturamamaktadır.

K5F300 - K6F300 - K7F300 - K6F400 ve İ5F300 - İ6F300 - İ7F300 - İ6F400 numunelerinde ise; basma testi sırasında düşey kırılma çatlakları oluşmuş ve numuneler artık basınca dayanamayarak basma kırılması meydana gelmiştir. Bu numunelerin bazılarında ise uygulanan yük nedeniyle yatay yönde de kırılma çatlakları meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca basma testi sırasında bazı numunelerin üst kısımlarında basma ezilmesi de meydana geldiği görülmüştür.

Çalışma sonucunda, reçine içeriği sabit olduğunda, belirli bir miktara kadar katalizör oranı arttıkça kum kalıbın basma dayanımının arttığı, daha sonra düştüğü görülmektedir. Katalizör içeriği sabit olduğunda ise, reçine bağlayıcı içeriğindeki artışla birlikte kum kalıbın basma mukavemeti de artmıştır. Reçine bağlayıcı içeriği ne kadar yüksek olursa, kum kalıbının dayanımının o kadar yüksek olduğu görülmüştür.

Khandelwal ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada kimyasal olarak fırınsız kimyasal bağlı kalıplar ve maçaların kum tane boyutunun, bağlayıcı yüzdesinin ve kürlenme süresinin mekanik özellikler (basma mukavemeti, kesme mukavemeti ve maça sertliği) ve ayrıca boyutsal değişimleri (büzülme) üzerindeki etkisi laboratuvar deneyleri ile incelenmiştir. Çalışma sonucunda farklı deney parametreleri için kalıp özelliklerinden basma mukavemeti  $4,08 \text{ kg/cm}^2$ - $16,16 \text{ kg/cm}^2$  ( $0,400 \text{ MPa}$ -  $1,584 \text{ MPa}$ ) aralığında çıkmıştır. Optimum kalıp özellikleri, %2,4 bağlayıcı, 40 GFN kumda ve 4 saatlik kürlenme süresinden sonra elde edildi ve  $14,80 \text{ kg/cm}^2$  ( $1,451 \text{ MPa}$ ) optimum basma dayanımı elde edilmiştir.

Motoyama ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada ise dökümlerdeki termal gerilimi tahmin etmek için furan kum kalıbı dâhil olmak üzere termal gerilim analizinin doğrulanmasını incelemişlerdir. Ayrıca çalışmada, silis kumu ve %1,2 furan reçinesi kullanılarak üretilen numunenin basma testi sonuç grafiği verilmiş ve maksimum basma gerilmesinin  $0,8$ - $1,0 \text{ MPa}$  aralığında olduğu görülmüştür.

Hackney ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen 3B baskılı numuneye etki eden yüke karşı dayanımı belirlemek için basma testi yapılmıştır. Test sırasında kırılma  $1,835 \text{ mm}$ 'de gerçekleşmiş, taşıyabileceği yük  $10,43$  ile  $12,33 \text{ kN}$  ve min.  $5,86 \text{ MPa}$  basma gerilmesi sağlanmıştır. Bu özelliklerin, geleneksel olarak üretilmiş kum kalıp numunesi özellikleriyle karşılaştırılabildiği görülmüştür.

Aşağıdaki çalışmalarda çeşitli parametrelerde geleneksel kum kalıpların yaş basma dayanımları hakkında literatür çalışmaları verilmiştir.

Sobczak ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada ise uçucu külün dökümhane kum kalıbı ve maça üretiminde agrega olarak kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada ana malzemeler olarak kum, bentonit, su ve ek olarak çeşitli oranlarda uçucu kül kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, uçucu kül kullanılmadan üretilen yaş kum kalıbın basma dayanımı 0,103 MPa bulunmuştur.

Said ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada ise kum dökümün kalitesinin iyileştirilmesi için kalıp bileşiminin optimizasyonunu araştırmışlardır. Döküm ürünlerindeki kusurları azaltmak için yaş kumdaki silis kumu, bentonit, su ve kömür tozu bileşimini optimize etmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca çalışmada, parametrelerin basma dayanımına etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda numunelerin yaş basma dayanımı 30-100 kN/m<sup>2</sup> (0,03-0,1 MPa) aralığında belirlenmiştir.

Sinha ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada ise dökümhane kullanımına yönelik kalıp kararlılığına, kalıp malzemesinin etkisini araştırmışlardır. Kalıp malzemeleri mevcut araştırma için silis kumu, kırmızı çamur, yüksek fırın cürufu, ferrokrom cürufu ve olivin kumu şeklindedir. Bu kalıp malzemelerinin kalıp özellikleri, dökümhane kullanımı için silis kum kalıbı ile karşılaştırıldığında, kalıp olarak kararlılık açısından incelenmiştir. Çalışma sonucunda yüksek fırın cürufunun kalıp özelliklerinin silis kum kalıbına göre daha iyi olduğunu göstermekte ve silis kumu basma mukavemeti 17,5 psi (0,12065 MPa) bulunmuştur.

Seidu ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada ise çeşitli oranlarda talaş, kömür tozu ve demir dolgu katkılarının kalıp kumunun seçilmiş bazı özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen test sonuçlarından, tüm deneysel katkı maddelerinin silis kumunun seçilen kalıplama özelliklerini iyileştirdiği bulunmuştur. Talaşın geliştirilmiş nem emme mukavemeti nedeniyle, talaş içeren kalıp kumu numunelerinin maksimum 108,99 kPa (0,10899 MPa) ham basma mukavemeti ile iyi bir sıkıştırma sergilediği bulunmuştur. Katkısız yaş kalıp numunesinin basma dayanımının ise 90-100 kPa (0,09-0,1 MPa) aralığında olduğu görülmüştür.

Rao ve Birru (2017) yaptıkları çalışmada ise yaş kum kalıplamada melas ve uçucu kül ilavesi ile mekanik özelliklerin etkisini araştırmışlardır. Modifiye yaş kumu, melas ve uçucu kül gibi farklı oranlarda katkı maddeleri ile yaş kum karıştırılarak yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar, modifiye yaş kum numunelerinin herhangi bir katkı maddesi içermeyen yaş kum numunelerine kıyasla nispeten basma dayanımı gibi gelişmiş özellikler ortaya koyduğunu kanıtlamıştır. Çalışma sonucunda modifiye yaş kum

numunelerinin basma dayanımı 185 kPa (0,185 MPa), yaş kum numunelerin ise basma dayanımı 171 kPa (0,171 MPa) olarak bulunmuştur.

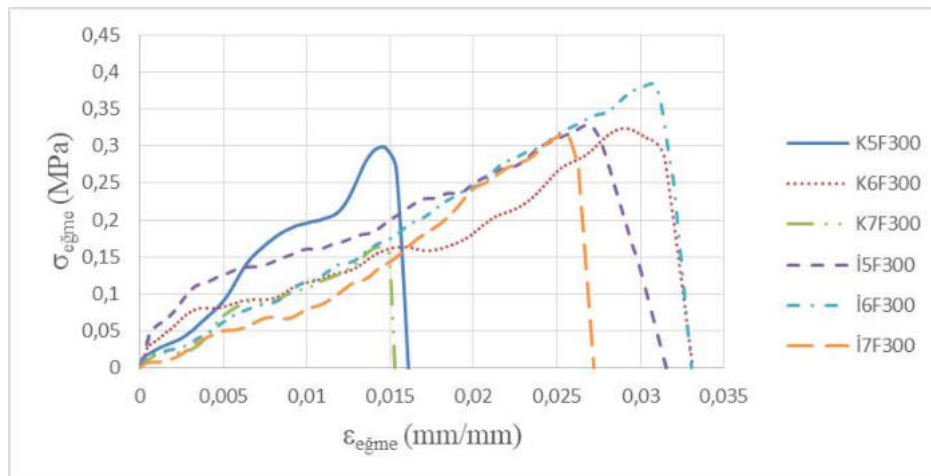
Chate ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada ise katkı maddesi olarak talaş içeren furan reçinesi bazlı kalıplama kumu sisteminin kapsamlı modellenmesi, analizi ve optimizasyonunu incelemişlerdir. Farklı parametreler (reçine, sertleştirici, talaş oranı, priz süresi) için furan bazlı kalıplama kumunun basma dayanımı 87 kPa-320 kPa (0,087-0,32 MPa) aralığında bulunmuştur.

3B yazıcı ile üretilen kum kalıpların basma dayanımları için literatürdeki örnek çalışmalara bakıldığı zaman bu çalışmada elde edilen numunelerin basma dayanımının biraz daha düşük çıktığı görülmüştür. Ancak literatürdeki yaş kum numunelerin basma dayanımları incelendiği zaman ise bu çalışmada elde edilen numunelerin basma dayanımı verilerinin kum kalıp dayanımı için yeterli seviyede olduğu görülmektedir. Bu sebeple gerçek boyutlarda bir numune modellenerek Ansys programında sonlu elemanlar yöntemiyle hidrostatik basınç analizi yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Bu sonuçlar hidrostatik basınç analizi bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

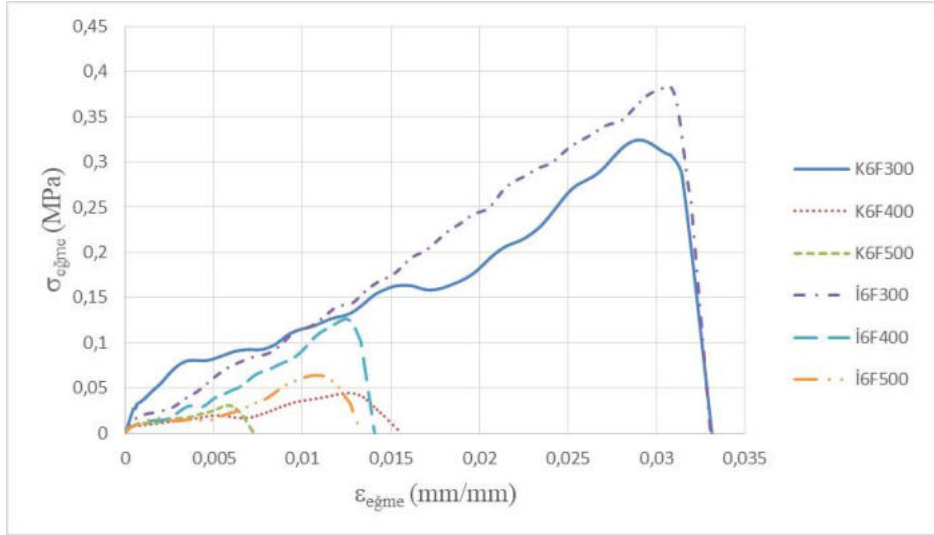
#### 4.1.3. Eğme Test Sonuçları

Üretilen döküm kum kalıp numunelerine üç noktadan eğme testi yapılarak, yük altındaki eğme dayanımları belirlenmiştir. Eğme testi, her bir numune grubu için ikişer adet yapılmış ve ortalamaları alınmıştır.

Eğme test sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de verilmiştir.



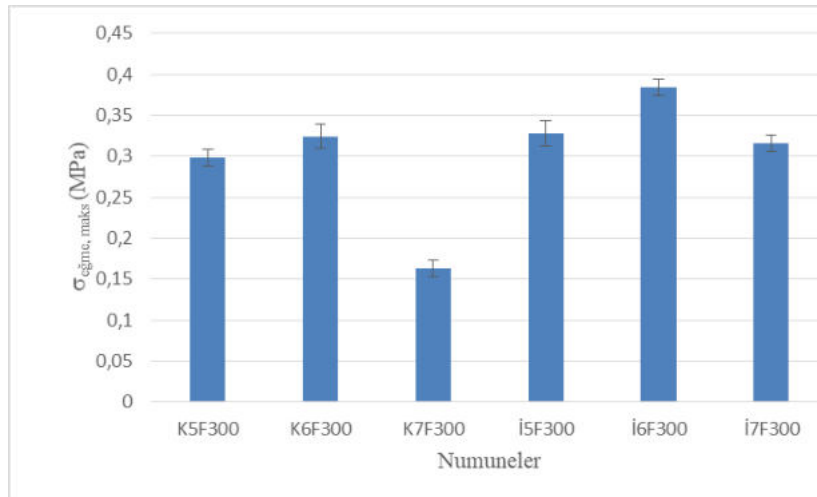
Şekil 4.12. Eğme Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği (K5F300-K6F300-K7F300-İ5F300-İ6F300-İ7F300)



**Şekil 4.13.** Eğme Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği (K6F300-K6F400-K6F500-İ6F300-İ6F400-İ6F500)

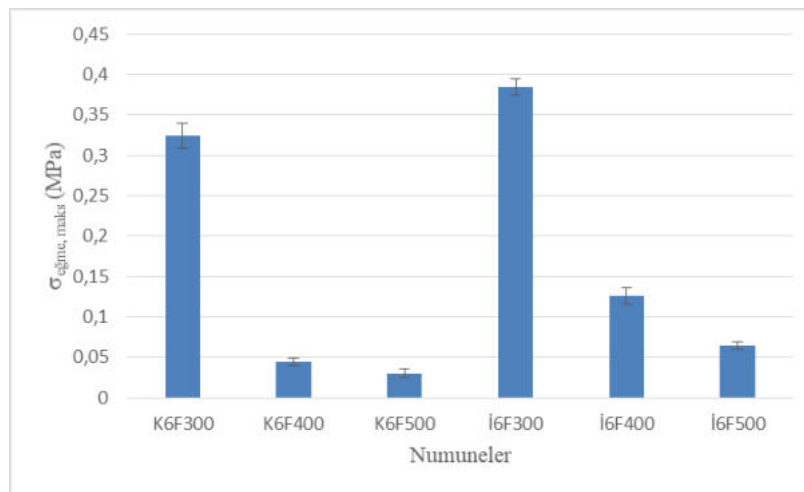
Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'e göre eğme dayanımı en yüksek numune  $\sigma_{\text{eğme}}=0,3844$  MPa değeri ile İ6F300, eğme dayanımı en düşük numune ise  $\sigma_{\text{eğme}}=0,0301$  MPa değeri ile K6F500 numunesidir. Eğme şekil değiştirmesi en yüksek numune ise  $\varepsilon_{\text{eğme}}=0,0331$  mm/mm değeri ile K6F300 numunesi, eğme şekil değiştirmesi en düşük numune ise  $\varepsilon_{\text{eğme}}=0,007$  mm/mm değeri ile K6F500 numunesi olarak bulunmuştur. Bu durum, numuneler arasında en sünek malzemenin K6F300 numunesi olduğunu göstermektedir.

Üretilen numunelerin Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de eğme testi sonucu elde edilen maksimum gerilme değerleri verilmiştir.



**Şekil 4.14.** Maksimum Eğme Gerilmesi (K5F300-K6F300-K7F300-İ5F300-İ6F300-İ7F300)

Şekil 4.14'e göre, kalın kum (250-500  $\mu\text{m}$ ) için  $F=300$  mm/dk için baskı kafası ilerleme hızında belirli bir miktara kadar katalizör oranı arttıkça eğme dayanımının arttığı, daha sonra düştüğü görülmektedir. Kalın kum için en yüksek eğme dayanımının %0,6 katalizör oranı ile K6F300 numunesinde olduğu görülmektedir. İnce kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için  $F=300$  mm/dk için baskı kafası ilerleme hızında belirli bir miktara kadar katalizör oranı arttıkça eğme dayanımının arttığı, daha sonra düştüğü görülmektedir. İnce kum için en yüksek eğme dayanımının %0,6 katalizör oranı ile İ6F300 numunesinde olduğu görülmektedir. Bunun uygun reçine ve katalizör doyma oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapıdaki reçine miktarı sabit olduğu için reçine ile reaksiyona girecek olan katalizör oranı önemlidir. Katalizör oranı olması gereken miktardan daha fazla veya daha az ise eğme dayanımı, maksimum eğme dayanımından daha düşük olmaktadır. Kalın kum ile ince kum, aynı davranışı göstermektedir.

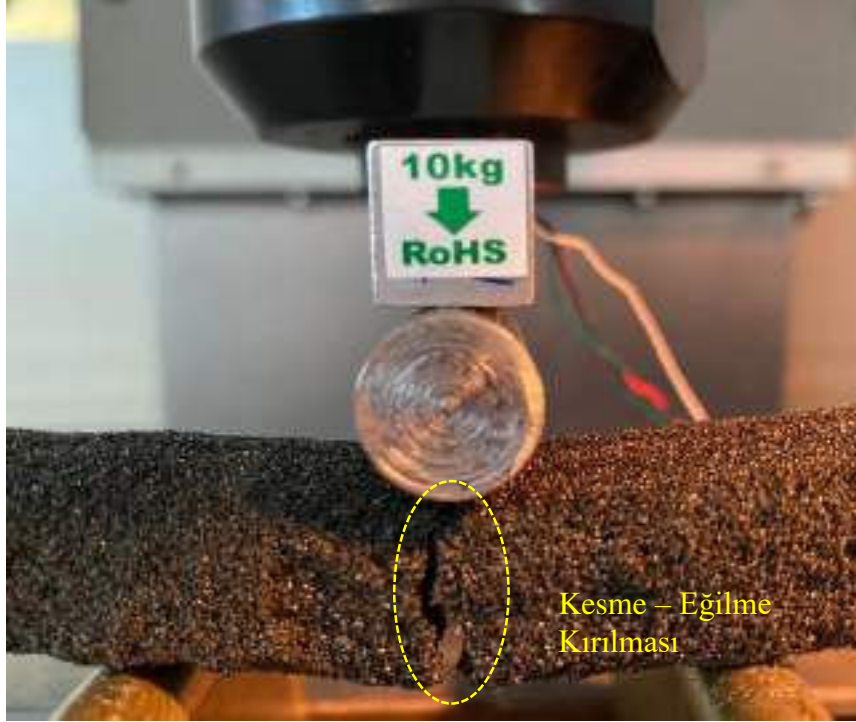


Şekil 4.15. Maksimum Eğme Gerilmesi (K6F300-K6F400-K6F500-İ6F300-İ6F400-İ6F500)

Şekil 4.15'e göre, kalın kum (250-500  $\mu\text{m}$ ) için sabit (%0,6) katalizör oranında, baskı kafası ilerleme hızı arttıkça eğme dayanımının düştüğü görülmektedir. Kalın kum için en yüksek eğme dayanımının  $F300$  mm/dk ilerleme hızına sahip K6F300 numunesinde olduğu görülmektedir. İnce kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için sabit (%0,6) katalizör oranında, baskı kafası ilerleme hızı arttıkça eğme dayanımının düştüğü görülmektedir. İnce kum için en yüksek eğme dayanımının  $F300$  mm/dk ilerleme hızına sahip İ6F300 numunesinde olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin, baskı kafası ilerleme hızının artması veya azalmasının reçine miktarını etkilemesi olduğu düşünülmektedir. Tanecikler arasında reçine oranı arttıkça taneler arası reçine köprüleri artmakta ve yapıdaki

gözenekler azalabilmektedir. Bu durum eğme dayanımı artırmaktadır. Kalın kum ile ince kum, aynı davranışı göstermektedir.

Üç noktadan eğme testi esnasında K5F300 numunesinin ve kırılma yüzeyinin fotoğrafı Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmiştir. Üç noktadan eğme testi esnasında diğer numunelerin ve kırılma yüzeylerinin fotoğrafları Şekil E2.1 ile Şekil E2.18 arasında (Bkz. EK-2) verilmiştir.



Şekil 4.16. K5F300 Eğme Numunesi



Şekil 4.17. K5F300 Eğme Numunesi Kırık Yüzeyi

Eğme testi sonrasında numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiği zaman, bütün numunelerde kesme-eğilme çatlak oluşumu şeklinde kırılma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ancak numunelerin kırılan yüzeylerindeki kesme-eğilme çatlaklarının bazılarında kesme çatlağı uzunluğu ve açısı daha fazla iken bazılarında eğilme çatlağı uzunluğunun ve açısının daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca kırılma yüzeylerindeki girinti çıkıntı sayısında da farklılık olduğu görülmüştür. Bunların sebebinin, numuneyi oluşturan kum taneciklerinin birbiriyle temas etme yüzeylerinden, reçine köprüsü bağlantılarından, numune içerisinde bulunan gözeneklilik oranlarından ve gözeneklerin konumlarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Çalışma sonucunda reçine içeriği sabit olduğunda, belirli bir miktara kadar katalizör oranı arttıkça kum kalıbın eğme dayanımının arttığı, daha sonra düştüğü görülmüştür. Katalizör içeriği sabit olduğunda ise, reçine bağlayıcı içeriğindeki artışla birlikte kum kalıbın eğme mukavemeti de artmıştır. Reçine bağlayıcı içeriği ne kadar yüksek olursa, kum kalıbının dayanımının da o kadar yüksek olduğu görülmüştür.

Guo ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, reçine içeriği sabit olduğunda, kum kalıbın çekme ve eğilme mukavemetlerinin başlangıçta arttığını ve daha sonra kürlenme maddesi içeriğindeki artışla azaldığını bulmuşlardır. Sertleştirici madde içeriği sabit olduğunda, reçine yapıştırıcı içeriğindeki artışla birlikte kum kalıbın çekme ve eğilme mukavemetleri de artmıştır. Analize göre, kum kalıbın mukavemetini etkileyen ana faktörlerin reçine yapıştırıcı içeriği, sertleştirici madde içeriği ve kum kalıp yoğunluğu olduğunu belirtmişlerdir. Reçine yapıştırıcı içeriği ne kadar yüksek olursa, kum kalıbının dayanımı o kadar yüksek olduğunu bulmuşlardır. Sertleştirme ajanı reçine yapıştırıcının çapraz bağlanma derecesini artırdığı, böylece kum kalıbının mukavemetini artırdığını belirtmişlerdir. Üç boyutlu baskı ile kum kalıbı üretmek için kürlenme maddesini ve kum parçacıklarını karıştırmak gerektiğinden, kürlenme maddesi içeriği kum parçacıklarının akışkanlığını doğrudan etkilediği belirtilmiştir. Sertleştirici madde içeriği ne kadar yüksek olursa, kum parçacıklarının akışkanlığı ve kum tabakasının kompaktlığı o kadar düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Coniglio ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen kum kalıp numunelerin eğme dayanımlarını hesaplamışlardır. Kalıpların üretiminde ortalama kum partikül boyutu (140  $\mu\text{m}$ ), aktivatör içeriği (kum ağırlığının %0,18'i), magnezyum inhibitörü (kumun ağırlıkça %0,4'ü), ısıtma sıcaklığı (305 K) sabit tutulmuştur. Kum serici hızı (0,130-0,286  $\text{m.s}^{-1}$  aralığında), kum katman kalınlığı (280  $\mu\text{m}$ ), baskı çözünürlüğü (120-140  $\mu\text{m}$ ) değerlerinde numuneler üretilmiştir. Test

sonuçlarına göre, kum kalıbın mekanik özelliği olarak eğme dayanımı 1,1 ila 2,8 MPa gibi geniş bir aralık içinde değişiklik göstermiştir. Kalıp eğilme mukavemeti, biriktirme düzleminde baskı yönüne (X veya Y) önemli ölçüde bağlı değildir. Kum sericiyi yavaşlatmak daha fazla eğilme mukavemetine neden olan kum yoğunluğunu artırmıştır.

Mitra ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen kum kalıp numunelerin eğme dayanımlarını hesaplamışlardır. Ortalama kum tane boyutu (140  $\mu\text{m}$ ), kum serici hızı (0,182 m/s), kum katman kalınlığı (280  $\mu\text{m}$ ), aktivatör içeriği (kum ağırlığının %0,18'i), ısıtma sıcaklığı (32 °C), yaşlandırma sıcaklıkları (25 °C, 100 °C ve 200 °C) parametre olarak belirlenmiştir. Numunelerin üretimden sonra ilk ölçülen üç noktadan eğme dayanım değeri  $1,75 \pm 0,5$  MPa olarak elde edilmiştir. Farklı yaşlandırma sıcaklık ve sürelerine bağlı olarak farklı eğme dayanım değerleri bulunmuştur.

Bonnefoy ve Marquet (2014) yaptıkları çalışmada ise GS19 tane boyutuna sahip silis kumu ve furan reçinesi ile Voxeljet 3B yazıcısında numuneler üretmişler ve üç noktadan eğme testi yapmışlardır. Çalışma sonucunda eğilme dayanımı, X baskı doğrultusunda ( $\sigma_x = 2,06$  MPa), Y baskı yönünden ( $\sigma_y = 1,42$  MPa) daha fazla olduğu bulunmuştur. Böylece, tabakalaşma yönünün, 3B yazıcıda basılan maça ve kalıbın mekanik özellikleri üzerine etki ettiği belirlenmiştir. Young modülü, yazdırma yönü ne olursa olsun ( $E_x=780$  MPa;  $E_y=760$  MPa) neredeyse aynı bulunmuştur. Daha iyi bir eğme mukavemeti elde etmek için mümkün olduğunca maçaların X eksen yönünde yazdırılması önerilmiştir. Üretilen 3B kum kalıp numunelerin eğme test sonuçları, Voxeljet 3B yazıcı üreticisinin verilerine uygun olup 1,2 ila 4,5 MPa arasında bir eğme dayanımı sağlandığı bulunmuştur.

Martinez ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada ise 3B kum baskı işleme koşullarına dayanan 3B kum baskı kalıplarının termo-fiziksel özellikleri ve bunların elde edilen alüminyum dökümlerin malzeme ve mekanik özelliklerine etkileri üzerine kapsamlı bir çalışma sunmuşlardır. Yuvarlak şekilli GFN 65 silis kumu ve %1-3 aralığında furan reçinesi kullanılarak üretilen numunelerin üç noktadan eğme testi sonucu eğilme dayanımı grafiğe göre 0,3 MPa-0,9 MPa aralığında, maksimum eğilme dayanımı ise 0,89 MPa olarak bulunmuştur.

Gawronová ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada ise ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü açısından kum maçaların eklemeli imalatının değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışmada BG21 kumu, BG27 kumu ve 3B yazıcı kumu olmak üzere üç farklı silis kumu, %1,0 ve %1,25 oranında furan reçinesi kullanılmıştır. Üretilen numunelere üç noktadan

eğme testi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda 3B yazıcıda üretilen numunenin eğme dayanımı 0,92 MPa, geleneksel olarak üretilen BG21 kumlu furanlı fırınlanmamış numune de 3,45 MPa ve geleneksel olarak üretilen BG27 kumlu furanlı fırınlanmamış numune de 2,67 MPa bulunmuştur.

3B yazıcı ile üretilen kum kalıpların eğme dayanımları için literatürdeki örnek çalışmalara bakıldığı zaman bu çalışmada elde edilen numunelerin eğme dayanımının biraz daha düşük çıktığı görülmüştür. Ancak numunelerin dayanım verilerinin kum kalıp dayanımı için yeterli seviyede olup olmadığı, gerçek boyutlarda bir numune modellenerek Ansys programında sonlu elemanlar yöntemiyle hidrostatik basınç analizi yapılarak incelenmiştir. Bu sonuçlar hidrostatik basınç analizi bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

## **4.2. Döküm Test Sonuçları**

Üretilen numunelerin döküm özelliklerinin belirlenmesi için yüzey pürüzlülük, boyutsal doğruluk ve gaz geçirgenliği testleri yapılmış ve sonuçları verilmiştir.

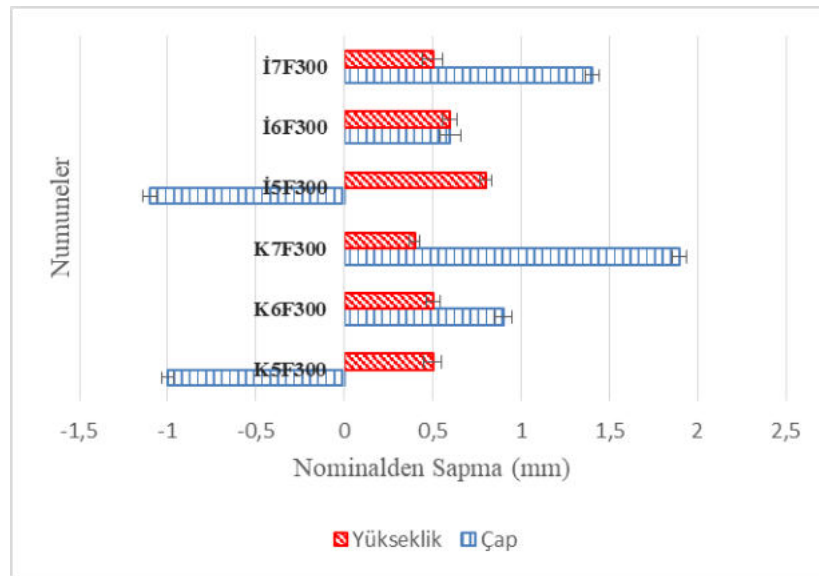
### **4.2.1. Boyutsal Doğruluk Test Sonuçları**

Bu çalışmada, döküm kalıplarının istenilen boyutsal ölçülerde üretilip üretilmediğini, tasarım sonunda ve üretim sonunda ortaya çıkan ölçülerde farklılıklar varsa bu değerlerin bulunabilmesi için farklı parametrelerde üretilen numunelerin boyutsal doğrulukları kumpas ve mikrometre ile ölçümler yapılarak hesaplanmıştır.

Bağlayıcılar arasında çapraz bağlanmanın tamamlanabilmesi ve doğru sonuç alabilmek için numunelerin boyutsal doğruluk ölçümü baskıdan en az 1 gün sonra ölçülmüştür. Şekil 4.18’de silindir numune, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de silindir numuneler için boyutsal doğruluk değerleri (mm) verilmiştir.



Şekil 4.18. Silindir Numune

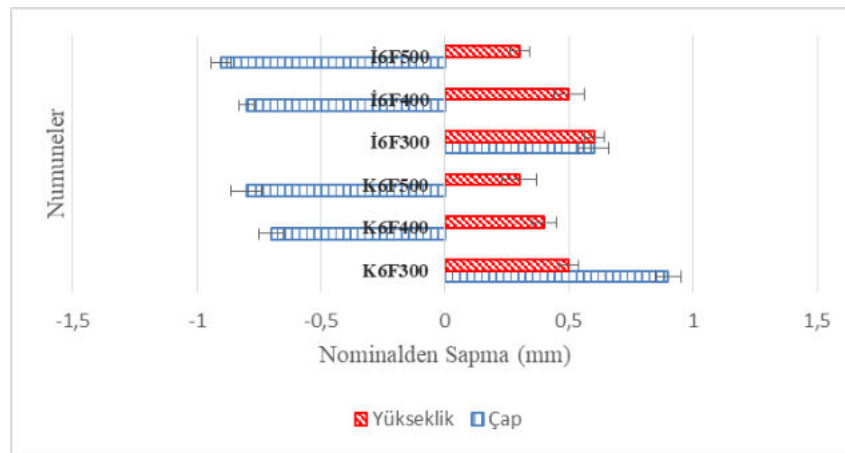


Şekil 4.19. Boyutsal Doğruluk (Silindir Numune, K5F300-K6F300-K7F300-İ5F300-İ6F300-İ7F300)

Şekil 4.19'a göre K5F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için -1,0 mm ve yükseklik için +0,5 mm, K6F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için +0,9 mm ve yükseklik için +0,5 mm, K7F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için +1,9 mm ve yükseklik için +0,4 mm olarak bulunmuştur. Kalın kum (250-500  $\mu\text{m}$ ) için F=300 mm/dk baskı kafası ilerleme hızında katalizör oranı arttıkça boyutsal doğruluk nominal sapması yükseklik için genel olarak pozitif yönde azalmakta, çap için ise pozitif yönde artmaktadır.

İ5F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için -1,1 mm ve yükseklik için +0,8 mm, İ6F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için +0,6 mm ve yükseklik için +0,6 mm, İ7F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için +1,4 mm ve yükseklik için +0,5 mm olarak bulunmuştur. İnce kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için F=300 mm/dk baskı kafası ilerleme hızında katalizör oranı arttıkça boyutsal

doğruluk nominal sapması yükseklik için pozitif yönde azalmakta ve çap için ise pozitif yönde artmaktadır.



Şekil 4.20. Boyutsal Doğruluk (Silindir Numune, K6F300-K6F400-K6F500-İ6F300-İ6F400-İ6F500)

Şekil 4.20'ye göre K6F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için +0,9 mm ve yükseklik için +0,5 mm, K6F400 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için -0,7 mm ve yükseklik için +0,4 mm, K6F500 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için -0,8 mm ve yükseklik için +0,3 mm olarak bulunmuştur. Kalın kum (250-500  $\mu$ m) için %0,6 katalizör oranında baskı kafası ilerleme hızı arttıkça boyutsal doğruluk nominal sapması çap için negatif yönde artmakta, yükseklik için ise pozitif yönde azalmaktadır.

İ6F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için +0,6 mm ve yükseklik için +0,6 mm, İ6F400 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için -0,8 mm ve yükseklik için +0,5 mm, İ6F500 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması çap için -0,9 mm ve yükseklik için +0,3 mm olarak bulunmuştur. İnce kum (125-250  $\mu$ m) için %0,6 katalizör oranında baskı kafası ilerleme hızı arttıkça boyutsal doğruluk nominal sapması çap için negatif yönde artmakta, yükseklik için ise pozitif yönde azalmaktadır.

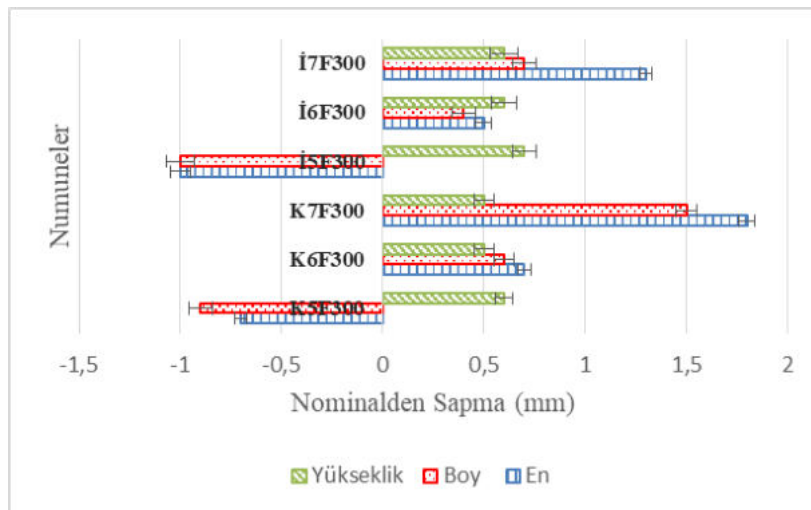
Silindir numuneler arasında boyutsal doğruluk nominal sapma değeri çap ölçüsü için en yüksek olan numunenin +1,9 mm ile K7F300 ve en düşük olan numunenin +0,6 mm ile İ6F300 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, boyutsal doğruluk nominal sapma değeri yükseklik ölçüsü için pozitif çıkmıştır ve en yüksek olan numunenin +0,8 mm ile İ5F300, en düşük olan numunelerin +0,3 mm ile İ6F500 ve K6F500 olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin kum içerisine karıştırılan katalizör oranının nem miktarını değiştirmesi ve nem oranının artmasıyla kum sermede kum akıcılığını azaltıp yükseklik için nominal sapma

değerini azaltmaktadır. Ayrıca, katalizör kaplı kumlara püskürtülen reçinenin oranının azalmasıyla yapı içerisinde reçine köprü bağlantıların ve reçine doygunluğunun azalması sebebiyle yükseklik için nominal sapma değeri azalmaktadır. Ayrıca çap değeri için en iyi boyutsal doğruluğa kum tane boyutu ince olan numunenin sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ince kum tanelerine temas eden bağlayıcı reçinenin daha belirgin çerçevede aktive etmesidir. Kum tane boyutu kalın olan numunelerin yükseklik değeri için boyutsal doğruluğunun daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ince kum tanelerinin kum akışkanlığının kalın kum tanelerine göre daha yüksek olmasından ve kum serme tekrar sayısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 4.21’de dikdörtgen prizma numune, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de dikdörtgen prizma numuneler için boyutsal doğruluk değerleri (mm) verilmiştir.



Şekil 4.21. Dikdörtgen Prizma Numune

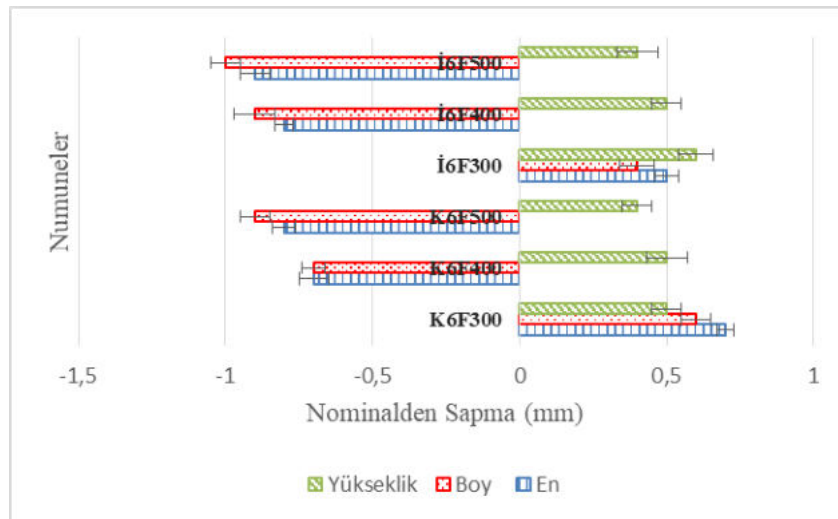


Şekil 4.22. Boyutsal Doğruluk (Dikdörtgen Prizma Numune, K5F300-K6F300-K7F300-İ5F300-İ6F300-İ7F300)

Şekil 4.22’ye göre K5F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için -0,7 mm, boy için -0,9 mm ve yükseklik için +0,6 mm, K6F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için +0,7 mm, boy için +0,6 mm ve yükseklik için

+0,5 mm, K7F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için +1,8 mm, boy için +1,5 mm ve yükseklik için +0,5 mm olarak bulunmuştur. Kalın kum (250-500  $\mu$ m) için F=300 mm/dk baskı kafası ilerleme hızında katalizör oranı arttıkça boyutsal doğruluk nominal sapması en, boy değerleri için pozitif yönde artmakta ve yükseklik değeri için genel olarak pozitif yönde azalmaktadır.

İ5F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için -1,0 mm, boy için -1,0 mm ve yükseklik için +0,7 mm, İ6F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için +0,5 mm, boy için +0,4 mm ve yükseklik için +0,6 mm, İ7F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için +1,3 mm, boy için +0,7 mm ve yükseklik için +0,6 mm olarak bulunmuştur. İnce kum (125-250  $\mu$ m) için F=300 mm/dk baskı kafası ilerleme hızında katalizör oranı arttıkça boyutsal doğruluk nominal sapması en, boy değerleri için pozitif yönde artmakta ve yükseklik değeri için genel olarak pozitif yönde azalmaktadır.



Şekil 4.23. Boyutsal Doğruluk (Dikdörtgen Prizma Numune, K6F300-K6F400-K6F500-İ6F300-İ6F400-İ6F500)

Şekil 4.23'e göre K6F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için +0,7 mm, boy için +0,6 mm ve yükseklik için +0,5 mm, K6F400 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için -0,7 mm, boy için -0,7 mm ve yükseklik için +0,5 mm, K6F500 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için -0,8 mm, boy için -0,9 mm ve yükseklik için +0,4 mm olarak bulunmuştur. Kalın kum (250-500  $\mu$ m) için %0,6 katalizör oranında baskı kafası ilerleme hızı arttıkça boyutsal doğruluk nominal sapması en, boy değerleri için negatif yönde artmakta, yükseklik değeri için genel olarak pozitif yönde azalmaktadır.

İ6F300 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için +0,5 mm, boy için +0,4 mm ve yükseklik için +0,6 mm, İ6F400 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için -0,8 mm, boy için -0,9 mm ve yükseklik için +0,5 mm, İ6F500 numunesinin boyutsal doğruluk nominal sapması en için -0,9 mm, boy için -1,0 mm ve yükseklik için +0,4 mm olarak bulunmuştur. İnce kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için %0,6 katalizör oranında baskı kafası ilerleme hızı arttıkça boyutsal doğruluk nominal sapması en, boy değerleri için negatif yönde artmakta, yükseklik değeri için pozitif yönde azalmaktadır.

Dikdörtgen prizma numuneler arasında boyutsal doğruluk nominal sapma değeri en ölçüsü için en yüksek olan numunenin +1,8 mm ile K7F300 ve en düşük olan numunenin +0,5 mm ile İ6F300 olduğu, boyutsal doğruluk nominal sapma değeri boy ölçüsü için en yüksek olan numunenin +1,5 mm ile K7F300, en düşük olan numunenin +0,4 mm ile İ6F300 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, boyutsal doğruluk nominal sapma değeri yükseklik ölçüsü hep pozitif çıkmıştır ve en yüksek olan numunenin +0,7 mm ile İ5F300, en düşük olan numunelerin +0,4 mm ile İ6F500, K6F500 olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin kum içerisine karıştırılan katalizör oranının nem miktarını değiştirmesi ve nem oranının artmasıyla kum sermede kum akıcılığını azaltıp yükseklik için nominal sapma değerini azaltmaktadır. Ayrıca, katalizör kaplı kumlara püskürtülen reçinenin oranının azalmasıyla yapı içerisinde köprü bağlantıların ve reçine doygunluğunun azalması sebebiyle yükseklik için nominal sapma değeri azalmaktadır. Ayrıca boy ve en değeri için en iyi boyutsal doğruluğa kum tane boyutu ince olan numunenin sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ince kum tanelerine temas eden bağlayıcı reçinenin daha belirgin çerçevede aktive etmesidir. Kum tane boyutu kalın olan numunelerin yükseklik değeri için boyutsal doğruluğunun daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ince kum tanelerinin kum akışkanlığının kalın kum tanelerine göre daha yüksek olmasından ve kum serme tekrar sayısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Numunelerin yükseklik değerleri için boyutsal doğruluk değerlerinin daha uygun değerlerde olabilmesi için kum serme prosesinde G ve M kodlar ile farklı tekrar sayıları ayarlanarak bunun sağlanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, boyutsal doğruluk değerlerinin farklı çıkmasının bir sebebi de termal büzülmeden kaynaklanabileceği de düşünülmektedir. Termal büzülmeden kaynaklanan bir durumda, bunu çözmek için tasarım sonunda parçanın boyut ölçeğini termal büzülme oranı kadar değiştirmekle çözüm sağlanabilir.

Martinez ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada ise tane inceliği numarası GFN 65 olan yuvarlak köşeli silis kumu ve bağlayıcı içeriği %1 ile %3 arasında altı farklı bağlayıcı

biriktirme ayarı seçilerek kum kalıp üretilmiş ve boyutsal doğruluğu hesaplanmıştır. Bağlayıcı içeriği %1 ile %3 arasında değişmiştir. Nominal boyuttan maksimum sapmanın en yüksek bağlayıcı konsantrasyon seviyesinde ( $>3$  mm) olduğu, dökme kabının iç duvarları arasındaki mesafe dışında, üç numunenin hepsinde nominal boyuttan sapmanın, baskı yönü boyunca daha küçük olduğu bulunmuştur. En düşük bağlayıcı seviyesinde, baskı yönü boyunca sapma yaklaşık 0,5 mm belirlenmiştir. Ara seviyelerde sapma 0,5 ile 1 mm arasında bulunmuştur. Benzer şekilde, baskı yönü boyunca bağlayıcı konsantrasyonundaki bir artışla boyutsal sapmada bir artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tüm numunelerde sapma, baskı yönü boyunca yapılan ölçümlere kıyasla daha düşüktür; bu, yeniden kaplama tırmığının baskı yatağı üzerinde uyguladığı gösterilen sıkıştırma etkisine atfedilebilmiştir.

Hackney ve Wooldridge (2017) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen 3B baskılı numunelerin boyutsal doğrulukları kıyaslandığında, yatak boyunca en iyi doğruluğa sahip Y yönünde, ardından Z ve ardından X yönünde inşa edilen parçalarla tutarlı olduğu bulunmuştur. Boyutsal doğruluğu 0,5 mm dâhilinde veya istenen boyutların yüzde 0,3'ünden daha az; parçalar tutarlı bir şekilde tüm düzlemlerde istenenden biraz daha büyük yapıları bulunmuştur. Silindir numunelerde, Z yüksekliği için daha iyi boyutsal doğruluk sonuçları vermiştir.

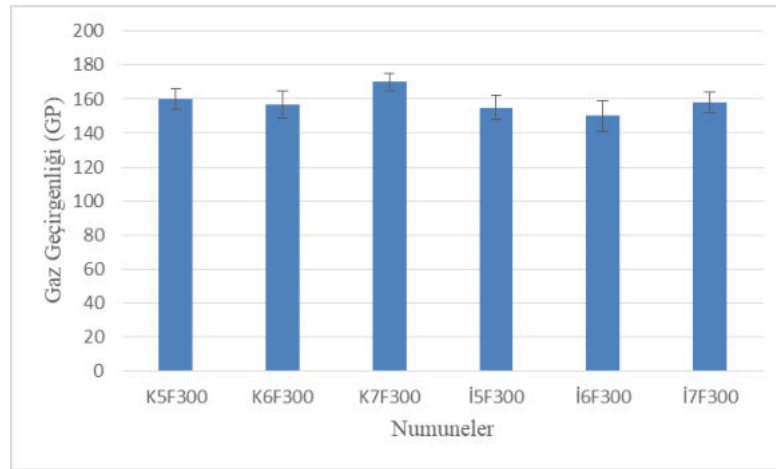
Bonnefoy ve Marquet (2014) yaptıkları çalışmada ise GS19 tane boyutuna sahip silis kumu ve furan reçinesi ile Voxeljet 3B yazıcısında numuneler üretilmişler ve boyutsal kabiliyeti tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda 3B yazıcıda üretilen numunenin boyutsal kabiliyeti X yönünde 0,64 mm, Y yönünde 0,73 mm, Z yönünde 0,90 mm olarak bulunmuştur. Geleneksel kum kalıplama işlemi,  $\pm 0,3$  mm ile  $\pm 3$  mm arasında bir toleransın sağlanmasına izin verdiği belirtilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen numunelerin boyutsal doğruluklarıyla, literatürdeki örnek çalışmalardaki numunelerin boyutsal doğruluklarının yakın değerinde olduğu görülmüştür.

#### 4.2.2. Gaz Geçirgenliği Test Sonuçları

Döküm esnasında içerisine dökülen metalin sıcaklığından dolayı kalıp içerisinde oluşan gazın kalıptan çıkarılması, döküm kalitesinin belirlenmesi için önemli bir özelliktir. Bu sebeple çalışmada, farklı parametrelerde üretilen numunelerin Simpson

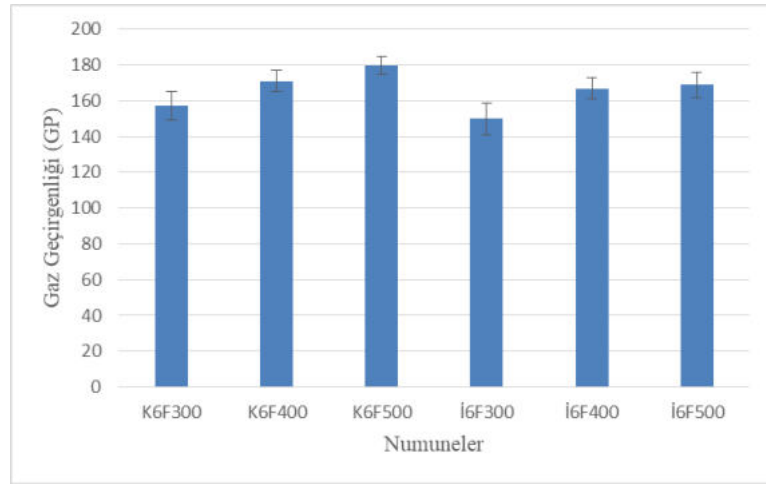
marka gaz geçirgenliği test cihazı ile gaz geçirgenlikleri ölçölerek hesaplanmış ve bulunan değerler Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.24. Gaz Geçirgenliği (K5F300-K6F300-K7F300-İ5F300-İ6F300-İ7F300)

Şekil 4.24’e göre, K5F300 numunesinin gaz geçirgenliği 160 GP, K6F300 numunesinin gaz geçirgenliği 157 GP ve K7F300 numunesinin gaz geçirgenliği 170 GP olarak bulunmuştur. Kalın kum (250-500 µm) için F=300 mm/dk baskı kafası ilerleme hızında katalizör oranı belirli bir miktara (%0,6) kadar arttıkça gaz geçirgenliğinin %1,87 azaldığı ve daha sonra arttığı görölmektedir. Bunun nedeninin uygun reçine-katalizör doyma oranından kaynaklandığı düşünölmektedir. Yapıdaki reçine miktarı sabit olduğu için reçine ile reaksiyona girecek olan katalizör oranı önemlidir. Katalizör oranı olması gerekenden daha fazla veya daha az ise gaz geçirgenliği minimumdan daha yüksektir. Aynı reçine oranı için %0,5 ve %0,6 katalizör oranlarında üretilen numunelerin gaz geçirgenlik sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.

İ5F300 numunesinin gaz geçirgenliği 155 GP, İ6F300 numunesinin gaz geçirgenliği 150 GP ve İ7F300 numunesinin gaz geçirgenliği 158 GP olarak bulunmuştur. İnce kum (125-250 µm) için F=300 mm/dk baskı kafası ilerleme hızında katalizör oranı belirli bir miktara (%0,6) kadar arttıkça gaz geçirgenliğinin %3,22 azaldığı ve daha sonra arttığı görölmektedir. Bunun nedeninin uygun reçine-katalizör doyma oranından kaynaklandığı düşünölmektedir. Yapıdaki reçine miktarı sabit olduğu için reçine ile reaksiyona girecek olan katalizör oranı önemlidir. Katalizör oranı olması gerekenden daha fazla veya daha az ise gaz geçirgenliği minimumdan daha yüksektir. Aynı reçine oranı için %0,5 ve %0,6 katalizör oranlarında üretilen numunelerin gaz geçirgenlik sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 4.25. Gaz Geçirgenliği (K6F300-K6F400-K6F500-İ6F300-İ6F400-İ6F500)

Şekil 4.25'e göre K6F300 numunesinin gaz geçirgenliği 157 GP, K6F400 numunesinin gaz geçirgenliği 171 GP ve K6F500 numunesinin gaz geçirgenliği 180 GP olarak bulunmuştur. İ6F300 numunesinin gaz geçirgenliği 150 GP, İ6F400 numunesinin gaz geçirgenliği 167 GP ve İ6F500 numunesinin gaz geçirgenliği 169 GP olarak bulunmuştur. Kalın kum (250-500  $\mu\text{m}$ ) ve ince kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için %0,6 katalizör oranında baskı kafası ilerleme hızı arttıkça gaz geçirgenliğinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeninin baskı kafası ilerleme hızındaki artışın veya azalmanın reçine miktarını etkilemesi olduğu düşünülmektedir. Yapıdaki reçine miktarı azaldıkça kum tanecikleri arasındaki kimyasal bağ azalır ve gaz geçirgenliği de artar.

Numunelerin arasında gaz geçirgenliği en yüksek olan numunenin 180 GP ile K6F500 numunesi ve en az olan numunenin ise 150 GP ile İ6F300 numunesinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, genel olarak bakıldığı zaman aynı parametreler altında, ince kumdan üretilen numunelerin gaz geçirgenliği, kalın kumdan üretilen numunelere göre daha az olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise ince kumdan üretilen numunelerin taneler arası boşluklarının daha az olmasından kaynaklanmaktadır.

Coniglio ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen kum kalıp numunelerin eğme dayanımlarını hesaplamışlardır. Kalıpların üretiminde ortalama kum partikül boyutu (140  $\mu\text{m}$ ), aktivatör içeriği (kum ağırlığının %0,18'i), magnezyum inhibitörü (kumun ağırlıkça %0,4'ü), ısıtma sıcaklığı (305 K) sabit tutulmuştur. Kum serici hızı (0,130-0,286  $\text{m.s}^{-1}$  aralığında), kum katman kalınlığı (280  $\mu\text{m}$ ), baskı çözünürlüğü (120-140  $\mu\text{m}$ ) değerlerinde numuneler üretilmiş. Test sonuçlarına göre, kum kalıbın döküm için önemli bir özelliği olan gaz geçirgenliği 70 ila 160 GP gibi geniş bir aralık içinde değişiklik göstermiştir.

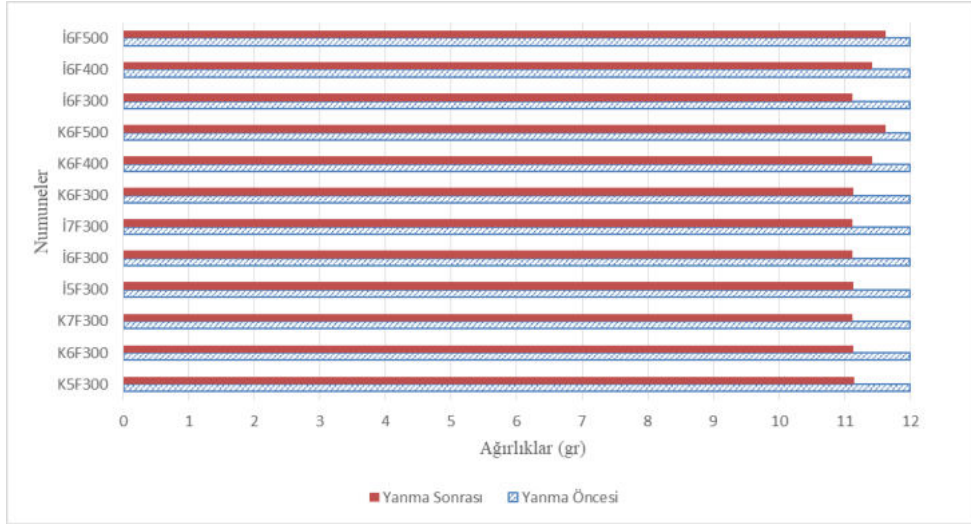
Dana ve Mansori (2020) yaptıkları çalışmada ise silis kumu (%93-99 kütle oranı) ve furfuril alkol bazlı furan reçinesi (%1-3) ile ExOne 3B kum yazıcıda numuneler üretmişler ve gaz geçirgenliği testi yapmışlardır. Çalışmada, partikül boyutu 140 µm ile 250 µm arasında değişen ve ortalama boyutu 140 µm olan, yaygın kullanımı nedeniyle silis kumu kullanılmıştır. Para-toluensülfonik asit (APTS), bağlayıcı sertleşmesini ve kum taneleri arasındaki kohezyonu hızlandırmak ve sonuç olarak basılı parçaların mekanik özelliklerini artırmak için bağlayıcı çapraz bağlama reaksiyonunda katalizör olarak kullanılmıştır. Kum katman kalınlığı 280 µm, kum serici hızı 0,182 m/s, baskı çözünürlüğü ise 120–140 µm seçilmiştir. Basılan numunenin gaz geçirgenlik değeri 82 GP ile 111 GP arasında değişmiştir. Test edilen numuneler için ortalama GP değeri  $98,05 \pm 9,39$  bulunmuştur.

Martinez ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada ise tane inceliği numarası GFN 65 olan yuvarlak veya yuvarlak köşeli silis kumu ve bağlayıcı içeriği %1 ile %3 arasında altı farklı bağlayıcı biriktirme ayarı seçilerek kum kalıp üretilmiş ve gaz geçirgenliği hesaplanmıştır. Farklı reçine oranlarında geçirgenlik değerleri yaklaşık olarak 130-190 AFS arasında bulunmuştur. Geçirgenlik ölçümlerinin, döküm sırasında bağlayıcı konsantrasyonundaki artışla birlikte gaz gidermede artan zorluğun meydana geleceği hipotezini doğruladığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada elde edilen numunelerin gaz geçirgenlikleriyle literatürdeki örnek çalışmalardaki numunelerin gaz geçirgenliklerinin genel olarak yakın değerde olduğu görülmüştür.

#### 4.2.3. Yanma Kaybı Test Sonuçları

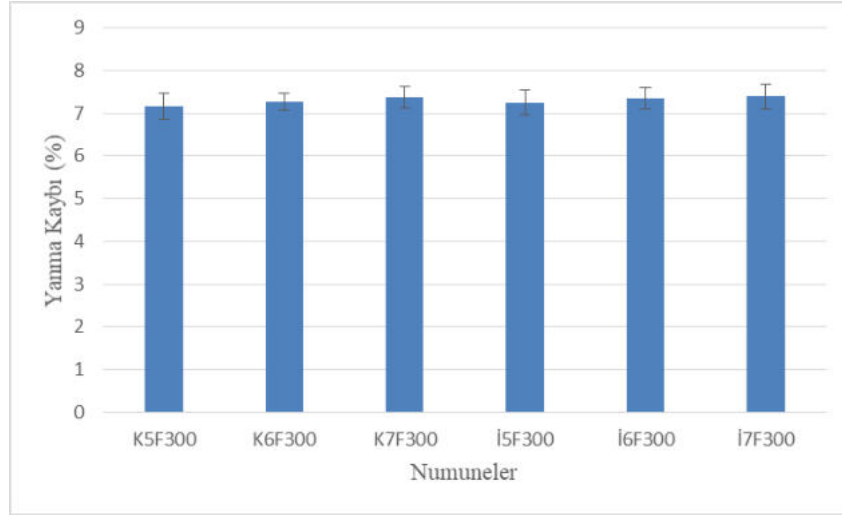
Kalıp üretiminde kullanılan reçine miktarı kalıbın mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla basılı kalıplarda kullanılan bağlayıcı oranını tahmin edebilmek önemlidir. Bu sebeple çalışmada farklı parametrelerde üretilen numuneler Nabertherm GmbH marka fırında öncelikle 110 °C’de 1 saat kurutulmuş ve ağırlığı tartılmış daha sonra ise 982 °C’de 3 saat ısıtılarak yanma kaybı testi gerçekleştirilmiş, numune ağırlığı tekrar ölçülerek yanma kaybı hesaplanmıştır. Yanma öncesi ve sonrası ağırlık ölçüm değerleri Şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.26. Yanma Öncesi ve Sonrası Ağırlık Ölçümleri

Şekil 4.26'ya göre yanma sonrası numune ağırlık ölçümünde en ağır numuneler 11,632 gr ile K6F500 ve 11,631 gr ile İ6F500, en hafif numuneler ise 11,113 gr ile İ7F300 ve 11,115 gr ile K7F300 olarak bulunmuştur. Bunun sebebi numune içerisindeki reçine ve katalizör miktarından kaynaklanmaktadır.

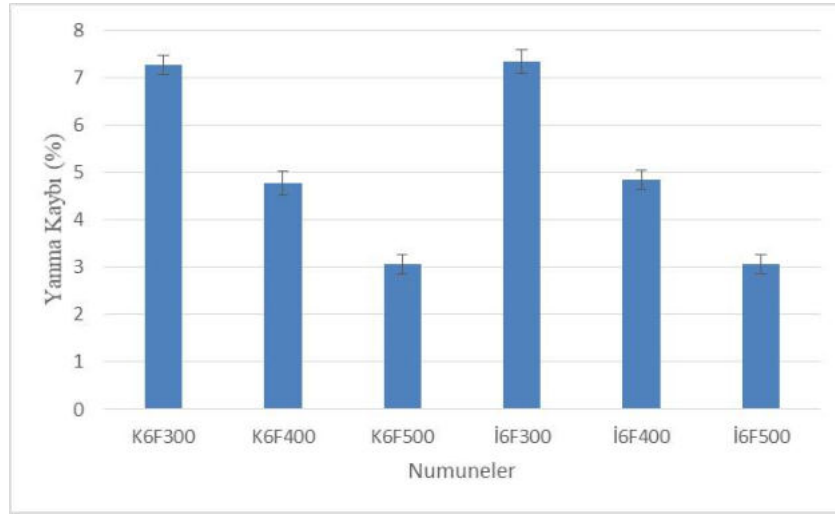
Yanma kaybı yüzde değerleri Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.27. Yanma Kaybı (K5F300-K6F300-K7F300-İ5F300-İ6F300-İ7F300)

Şekil 4.27'ye göre, K5F300 numunesinin yanma kaybı %7,16, K6F300 numunesinin yanma kaybı %7,27 ve K7F300 numunesinin yanma kaybı %7,37 olarak bulunmuştur. İ5F300 numunesinin yanma kaybı %7,25, İ6F300 numunesinin yanma kaybı %7,34 ve İ7F300 numunesinin yanma kaybı %7,39 olarak bulunmuştur. Kalın kum (250-500  $\mu\text{m}$ ) ve ince kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için F=300 mm/dk baskı kafası ilerleme hızında

katalizör oranı arttıkça yanma kaybının arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, numune içerisindeki katalizör oranının artmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.28. Yanma Kaybı (K6F300-K6F400-K6F500-İ6F300-İ6F400-İ6F500)

Şekil 4.28'e göre, K6F300 numunesinin yanma kaybı %7,27, K6F400 numunesinin yanma kaybı %4,77 ve K6F500 numunesinin yanma kaybı %3,06 olarak bulunmuştur. İ6F300 numunesinin yanma kaybı %7,34, İ6F400 numunesinin yanma kaybı %4,84 ve İ6F500 numunesinin yanma kaybı %3,07 olarak bulunmuştur. Kalın kum (250-500  $\mu\text{m}$ ) ve ince kum (125-250  $\mu\text{m}$ ) için %0,6 katalizör oranında baskı kafası ilerleme hızı arttıkça yanma kaybının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, numune içerisindeki reçine oranının azalmasından kaynaklanmaktadır.

Numunelerin arasında yanma kaybı en yüksek olan numuneler %7,39 ile İ7F300 numunesi, %7,37 ile K7F300 numunesi ve en düşük olan numuneler ise %3,06 ile K6F500, %3,07 ile İ6F500 numunesinin olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi numune içerisindeki reçine ve katalizör oranından kaynaklanmaktadır.

Günther ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada ise GS 14 RP Strobel kuvars kumu ve ilgili sertleştirici ile birlikte Ask tipi Askuran'dan bir furan bağlayıcı kullanılarak üretilen 3B kum kalıpların yanma kaybını hesaplanmıştır. Kuvarsın ortalama tane boyutu 140  $\mu\text{m}$ 'dir. Numuneler 1,35  $\text{gr}/\text{cm}^2$ 'lik bir yoğunlukta bulunmuştur. Test sonucunda furan bağlayıcılı kuvars kum numunelerin yanma kaybı %1,8 (min.%1,6-max.%1,9) olarak ölçülmüştür.

Coniglio ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada ise silis kumu ve furan bağlayıcıdan üretilen kum kalıp numunelerin farklı çözünürlükte yanma kaybı değerleri

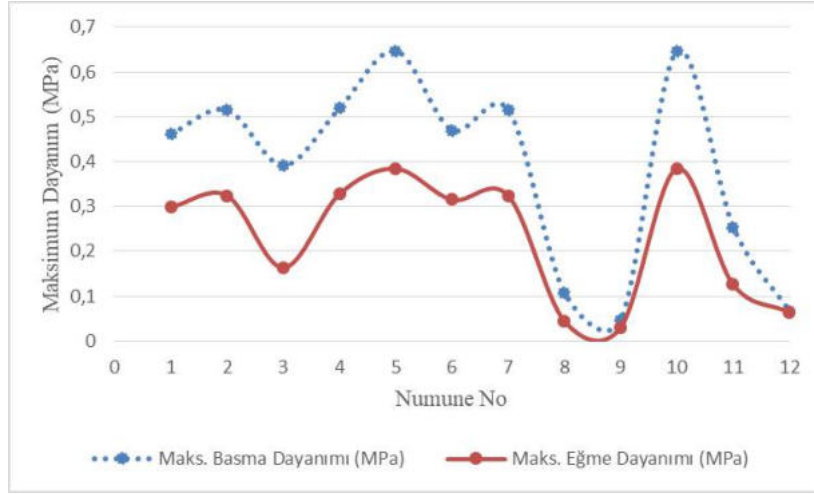
hesaplamışlardır. Kalıpların üretiminde ortalama kum partikül boyutu (140  $\mu\text{m}$ ), aktivatör içeriği (kum ağırlığının %0,18'i), magnezyum inhibitörü (kumun ağırlıkça %0,4'ü), ısıtma sıcaklığı (305 K) sabit tutulmuştur. Kum serici hızı (0,130-0,286  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  aralığında), kum katman kalınlığı (280  $\mu\text{m}$ ), yazıcı çözünürlüğü (120-140  $\mu\text{m}$ ) değerlerinde numuneler üretilmiş. Test sonuçlarına göre 1273 K'da gerçekleştirilen yanma kaybı ölçümleri, ağırlıkça %1,9 (140  $\mu\text{m}$  olan yazıcı çözünürlüğünde) ile ağırlıkça %2,3 (120  $\mu\text{m}$  olan yazıcı çözünürlüğünde) arasında bir furan içeriği varyasyonu ortaya çıkardığı bulunmuştur.

Martinez ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada ise tane inceliği numarası GFN 65 olan yuvarlak, yuvarlak köşeli silis kumu ve bağlayıcı içeriği %1 ile %3 arasında altı farklı bağlayıcı biriktirme ayarı seçilerek kum kalıp üretilmiş ve yanma kaybı hesaplanmıştır. Bağlayıcı içeriği %1 ile %3 arasında değişmiştir. Yanma kaybı testi sonucunda gerçek bağlayıcı içeriği %1,49 ile %2,74 arasında değişmiştir. Tüm bağlayıcı koşullarında su içeriği < %0,2 kalmıştır.

Bu çalışmada farklı üretim parametrelerinde elde edilen numunelerin yanma kaybı değerlerinin, literatürdeki örnek çalışmalardaki numunelerin yanma kaybı değerlerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin literatürdeki çalışmalarda kullanılan furan reçine ve katalizör türünün özel olup 3B yazıcılar için üretilmişken, bu çalışmada kullanılan reçinenin ve katalizörün ise geleneksel kum kalıplarda kullanılan furan reçinesi ve katalizörü olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla özel olarak 3B yazıcılar için üretilen furan reçinesinin ve katalizörünün kum kalıp üretimi için kullanım miktarı, geleneksel kum kalıp üretimi için kullanılan furan reçinesi ve katalizörüne göre daha az miktardadır.

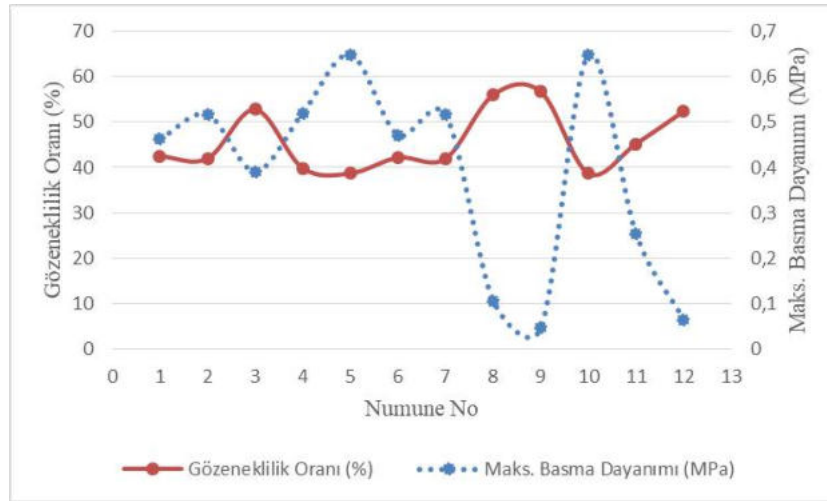
### 4.3. Karşılaştırmalı Test Sonuçları

Üretilen numunelerin mekanik ve döküm testleri sonucunda elde edilen eğme, basma dayanımı, gaz geçirgenliği ve gözeneklilik oranı verilerden oluşturulan birleşik grafikler Şekil 4.29-4.30-4.31 ve Şekil 4.32'de verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalı test sonucu grafiklerinde numune isimleri 1'den 12'ye kadar sırasıyla: K5F300 - K6F300 - K7F300 - İ5F300 - İ6F300 - İ7F300 - K6F300 - K6F400 - K6F500 - İ6F300 - İ6F400 - İ6F500 olarak verilmiştir.



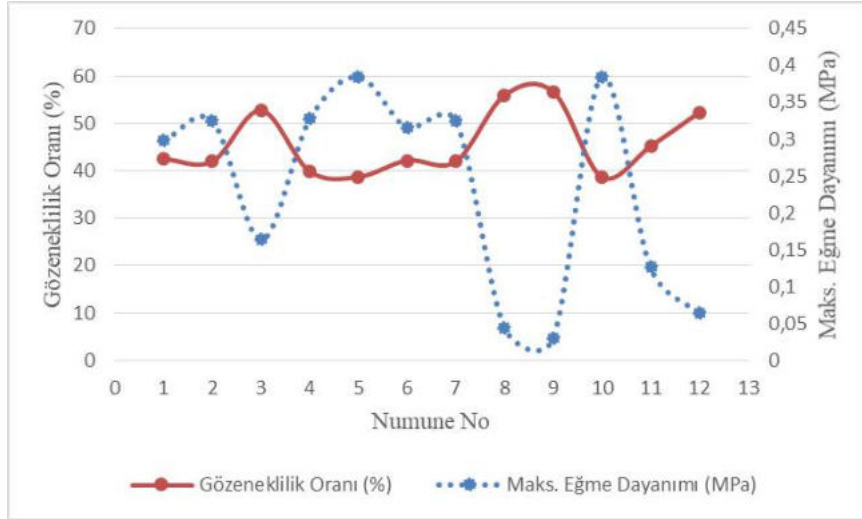
Şekil 4.29. Basma Dayanımı-Eğme Dayanımı Karşılaştırılması

Şekil 4.29’da görüldüğü üzere üretilen numunelerin basma ve eğme dayanımları arasında doğrusal orantı olduğu belirlenmiştir. Basma dayanımı yüksek olan numunenin eğme dayanımının da yüksek olduğu görülmüştür.



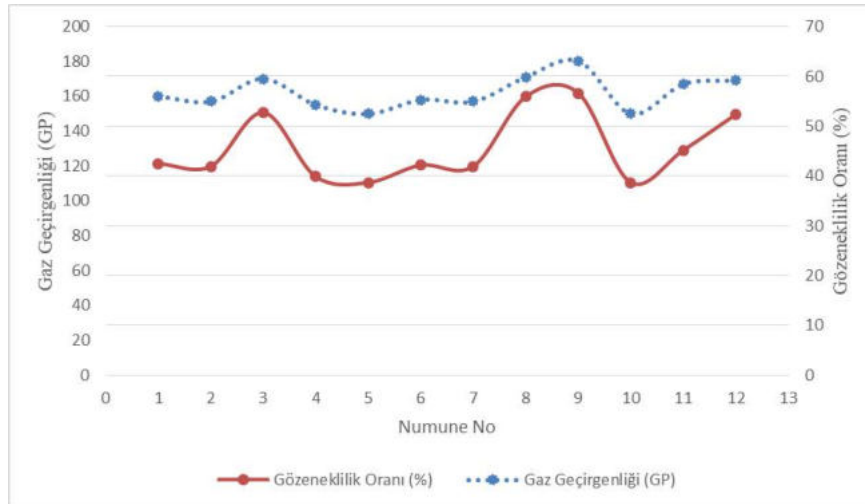
Şekil 4.30. Gözeneklilik Oranı-Basma Dayanımı Karşılaştırılması

Şekil 4.30’da görüldüğü üzere üretilen numunelerin basma dayanımları ve gözeneklilik oranları arasında ters orantı olduğu belirlenmiştir. Basma dayanımı yüksek olan numunenin gözeneklilik oranının düşük olduğu görülmüştür. Gözeneklilik azaldıkça kum taneciklerin birbirine teması artmakta, kum tanecikler arasında oluşan reçine köprü sayısı artmakta ve bu da basma dayanımını artırmaktadır.



Şekil 4.31. Gözeneklilik Oranı-Eğme Dayanımı Karşılaştırılması

Şekil 4.31’de görüldüğü üzere üretilen numunelerin eğme dayanımları ve gözeneklilik oranları arasında ters orantı olduğu belirlenmiştir. Eğme dayanımı yüksek olan numunenin gözeneklilik oranının düşük olduğu görülmüştür. Gözeneklilik azaldıkça kum taneciklerin birbirine teması artmakta, kum tanecikler arasında oluşan reçine köprü sayısı artmakta ve bu da eğme dayanımını artırmaktadır.



Şekil 4.32. Gaz Geçirgenliği-Gözeneklilik Oranı Karşılaştırılması

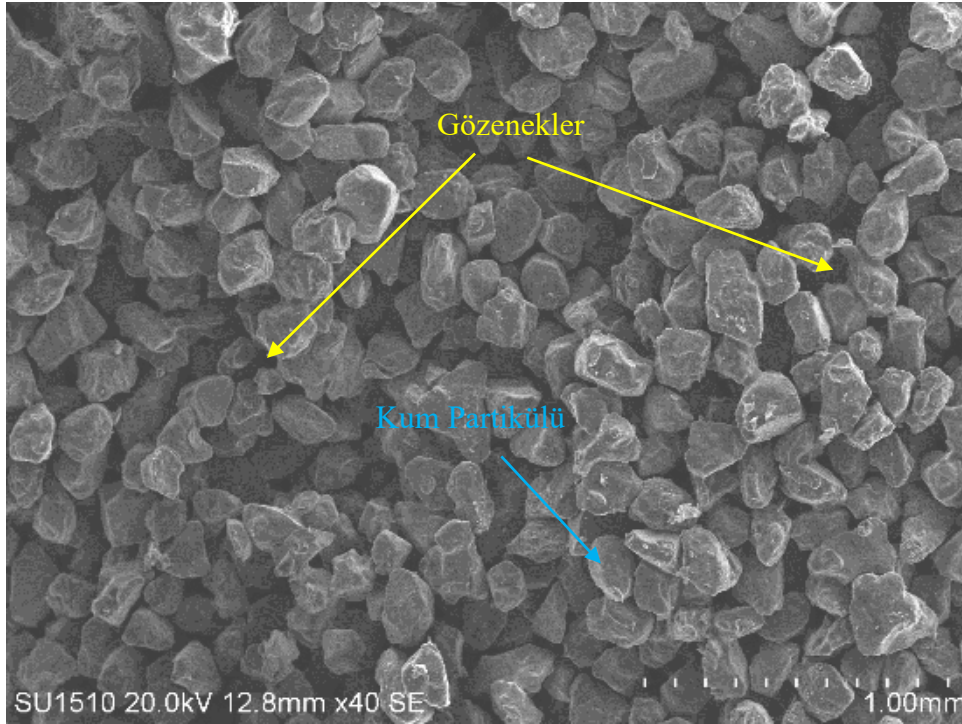
Şekil 4.32’de görüldüğü üzere üretilen numunelerin gözeneklilik oranı ile gaz geçirgenliği arasında doğrusal orantı olduğu belirlenmiştir. Gözeneklilik oranı yüksek olan numunenin gaz geçirgenliğinin de yüksek olduğu görülmüştür. Numunelerde reçine miktarı azaldıkça tanecikler arasında boşluk miktarı artmakta ve böylece gözeneklerden gaz geçişi doğal olarak daha fazla olmaktadır.

#### 4.4. Mikro Yapı İnceleme Sonuçları

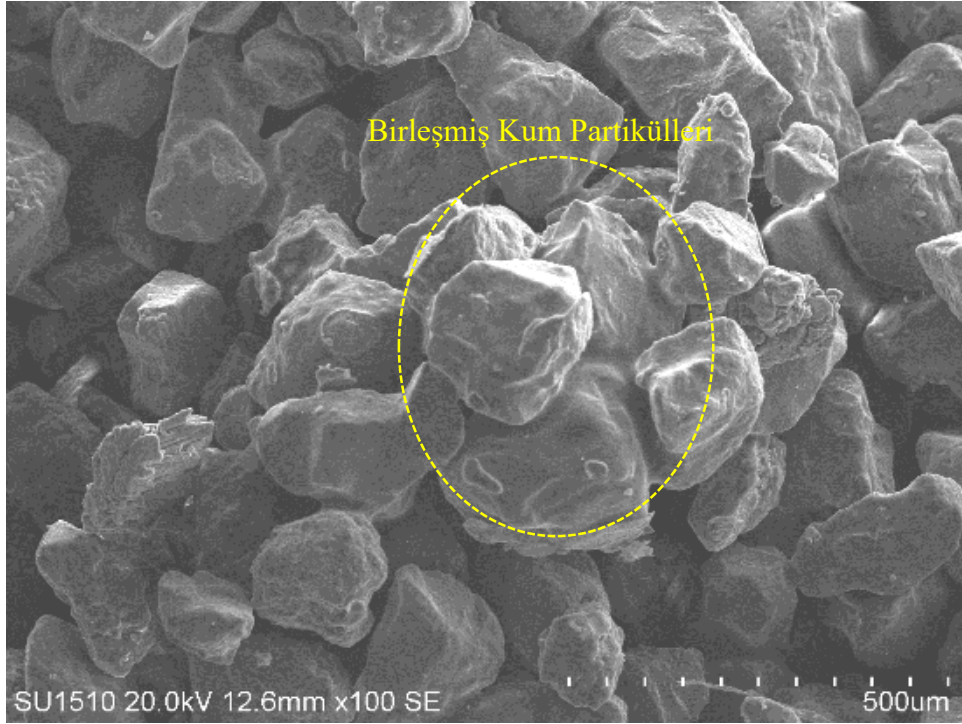
Mikroskopik incelemeler için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), EDX Spektrumu analizi yapılmıştır. Ayrıca kamera kullanılarak numunelerin görüntüleri incelenmiştir. Numunelerin mikroskopik incelemelerinin hassas bir şekilde yapılabilmesi için numuneler altın ile kaplanmıştır.

##### 4.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İnceleme Sonuçları

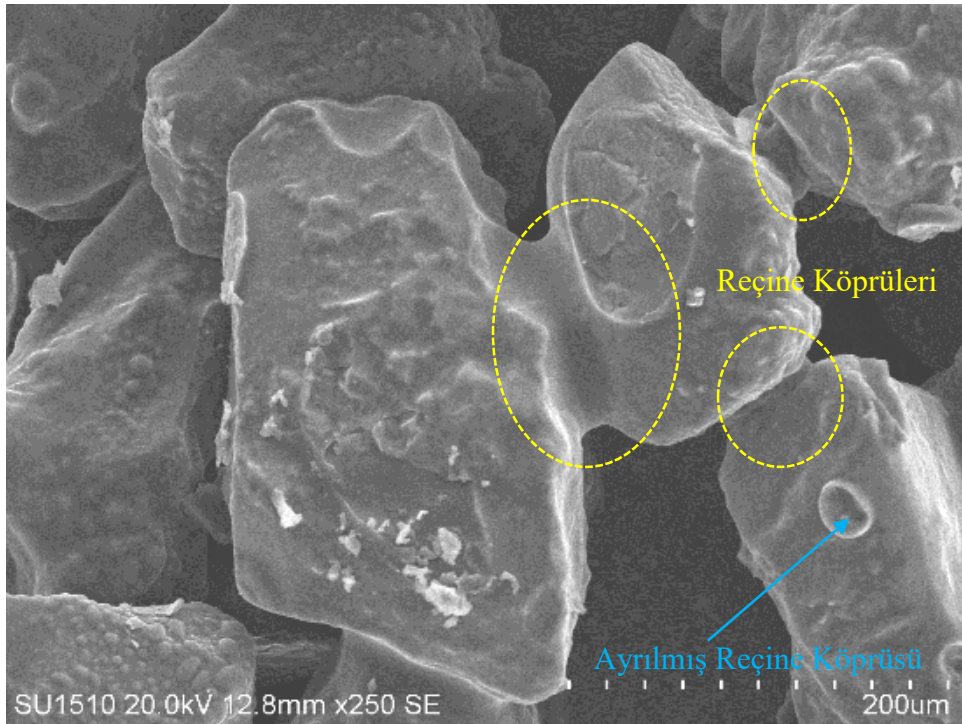
Üretimi yapılan numunelerin içyapısı ve hasar analizi hakkında bilgi edinmek için mikro yapı incelemeleri, Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM’da bulunan Hitachi-SU 1510 marka kV çalışma voltajına sahip SEM cihazıyla yapılmıştır. İ5F300 numunesinin SEM görüntüleri Şekil 4.33-4.34-4.35-4.36 ve Şekil 4.37’de verilmiştir. Diğer numunelerin SEM görüntüleri Şekil E3.1 ile Şekil E3.39 arasında (Bkz. EK-3) verilmiştir.



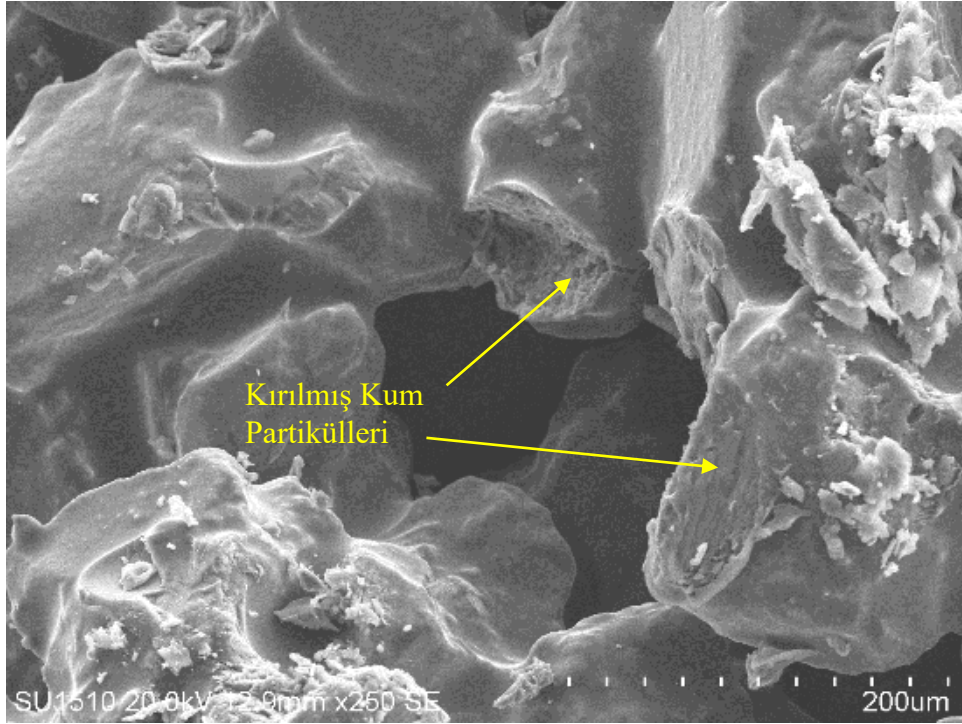
Şekil 4.33. İ5F300 x 40



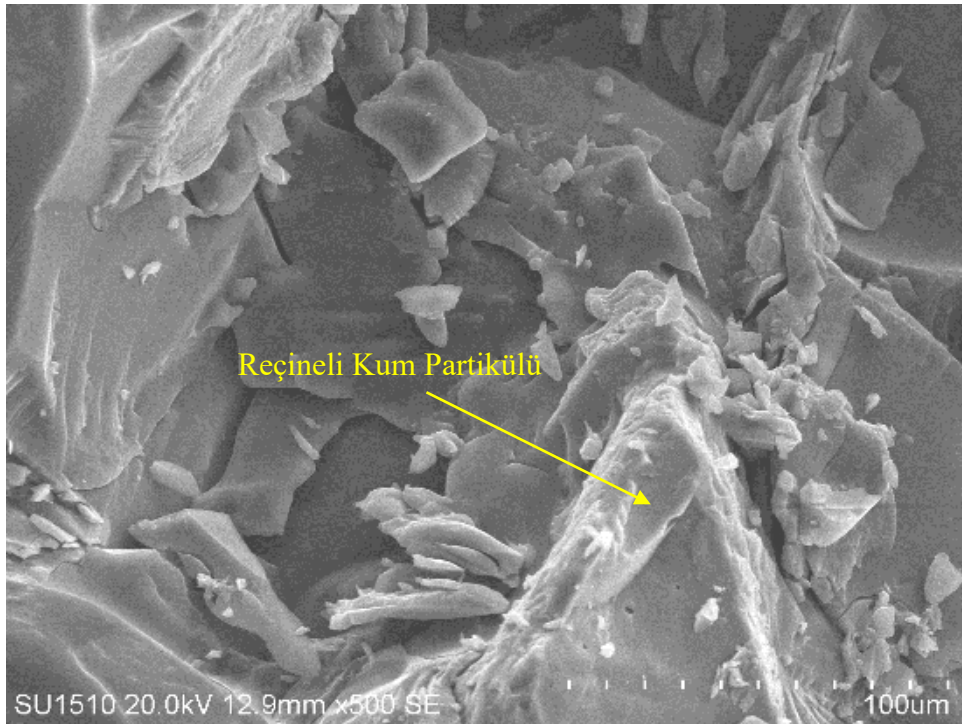
Şekil 4.34. İ5F300 x 100



Şekil 4.35. İ5F300 x 250-I



Şekil 4.36. İ5F300 x 250-II



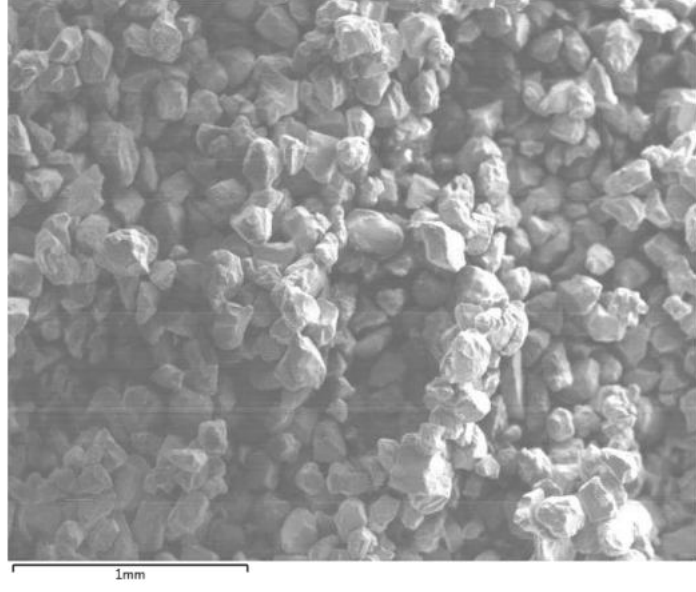
Şekil 4.37. İ5F300 x 500

SEM görüntüleri incelenen İ5F300 - İ6F300 - İ6F400 - İ7F300 - K5F300 - K6F300 - K6F400 - K7F300 numuneleri arasında, K6F400 ve K7F300 numunelerinin gözenekliliğinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu sebeple bu numuneleri oluşturan kum

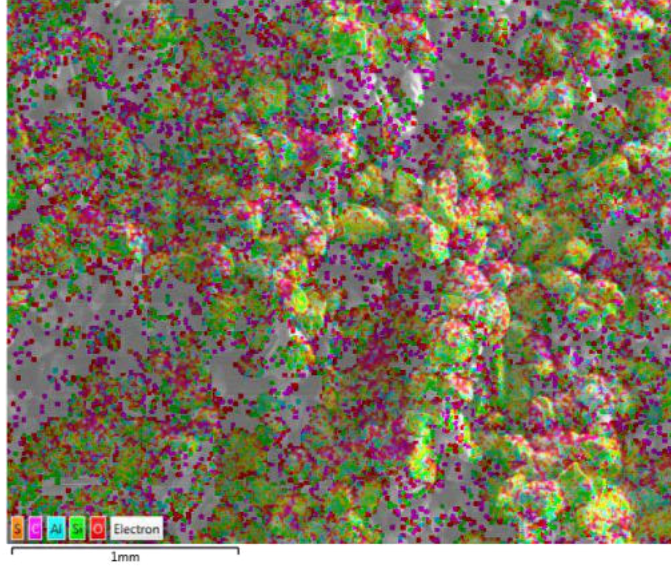
tanecikler arasında boşlukların daha fazla, temas yüzeylerinin daha az olduğu ve yapı içerisinde daha az reçine olması sebebiyle tanecikler daha az reçine köprüleri oluştuğu görülmüştür. Ayrıca bütün numunelerde kum parçacıkları arasında çapraz bağlı furan reçine köprüleri görülmektedir. Bu köprülerin bağlanma şekilleri ve sayıları numunenin mekanik özelliklerini etkilediği görülmektedir. Basma ve eğme dayanımı yüksek olan numunelerde tanecikler arası temas yüzeylerinin ve reçine köprülerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca mekanik test sonucu, numunelerin yüzeyleri incelendiği zaman bazı kum taneleri arasında kırılma ve reçine köprülerinde çatlak, kopma olduğu gözlenmektedir. Bazı bölgelerde kum parçacıkları arasında reçine köprüleri ile birleşmenin daha iyi olduğu görülmektedir. Bazı bölgelerde ise kum partiküllerinin dış yüzeyi reçine ile kaplanmasına rağmen diğer kum partikülleri ile reçine köprüleri oluşturamadığı görülmüştür. Bunun sebebinin kum partikül şekillerinden, gözeneklilik oranından veya yetersiz reçine-katalizör oranından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

İnce kumdan üretilen numunelerin, kalın kumdan üretilen numunelere göre tanecikler arasında temas yüzeyleri daha fazla olduğu için gözenekliliğinin daha az olduğu görülmektedir. SEM görüntülerinden kum parçacık boyutlarına bakıldığında, ince kumdan üretilen numuneler ile kalın kumdan üretilen numuneler arasında gözle görülecek şekilde tane boyutlarında farklılık olduğu görülmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde kum partiküllerinin şekillerinin genel olarak yarı köşeli olduğu görülmektedir. Kum partiküllerinin şekli, partiküllerin birbirlerinin temas yüzeylerini etkilediği için gözeneklilik, reçine köprüsü, gaz geçirgenliği, dayanım gibi faktörleri etkilemektedir. Bu sebeple kum partiküllerinin yapısının, mekanik özellikleri etkileyen önemli bir etken olduğu düşünülmektedir.

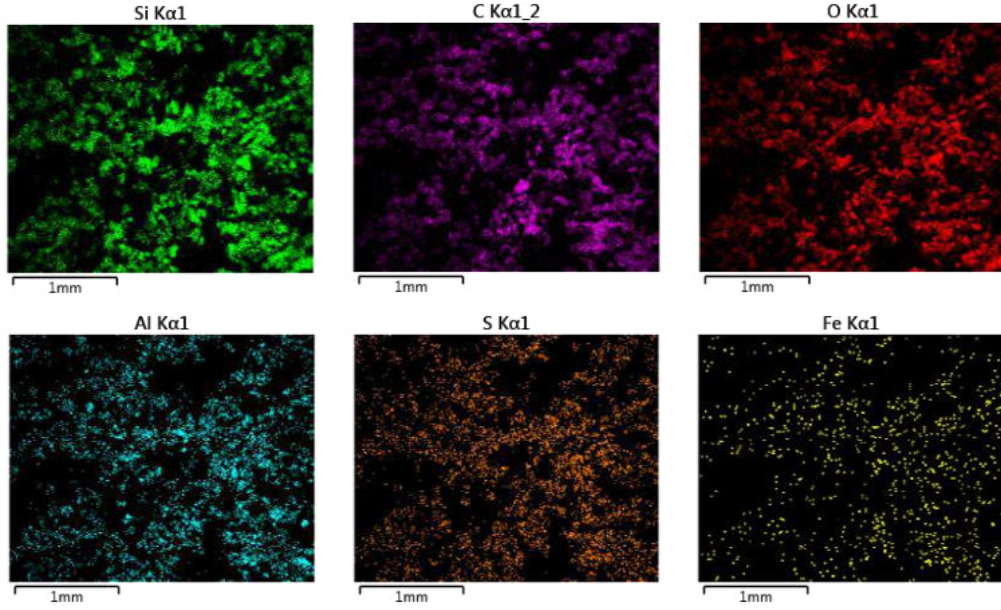
Ayrıca, numunelerin EDX spektrumları yapılarak incelenmiştir. İ6F300 numunesinin EDX görüntüleri, grafikleri Şekil 4.38-4.39-4.40-4.41’de ve EDX spektrum değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Diğer numunelerin EDX görüntüleri, grafikleri Şekil E4.1 ile Şekil E4.14 arasında ve EDX spektrum değerleri Çizelge E4.1 ile Çizelge E4.5 arasında (Bkz. EK-4) verilmiştir.



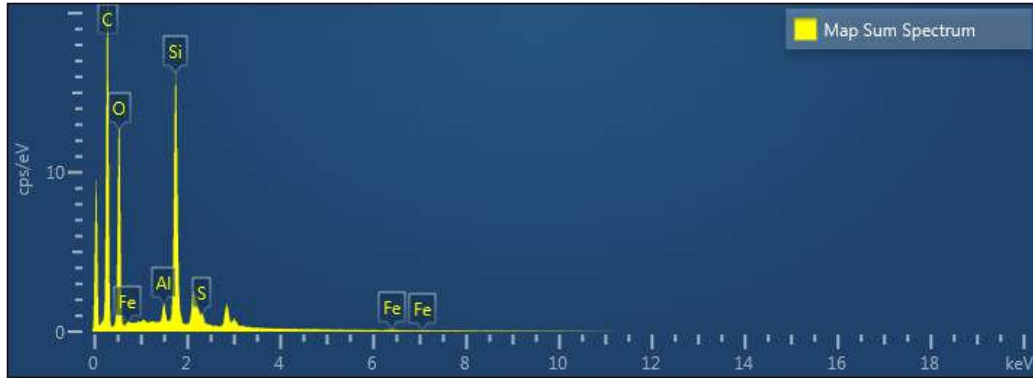
Şekil 4.38. İ6F300 SEM



Şekil 4.39. İ6F300 EDS



Şekil 4.40. İ6F300 Haritalama



Şekil 4.41. İ6F300 EDX Grafiği

Çizelge 4.1. İ6F300 EDX Spektrum

Harita Toplamı Spektrumu				
Element	Çizgi Tipi	% Ağırlık	% Ağırlık Sigma	% Atomik
O	K Serisi	39,76	0,26	34,46
Si	K Serisi	5,16	0,04	2,55
C	K Serisi	54,23	0,26	62,60
Fe	K Serisi	0,05	0,02	0,01
S	K Serisi	0,36	0,02	0,16
Al	K Serisi	0,43	0,02	0,22
Toplam		100,00		100,00

EDX analiz sonuçları incelendiği zaman, numunelerin kimyasal yapısında genel olarak Oksijen, Karbon, Silisyum, Demir, Alüminyum ve Kükürt elementleri olduğu görülmüş ve bu elementlerin oranları farklılık arz etmektedir. Döküm kumu, Si

elementinden oluştuğu için numuneler içerisindeki Si oranları değişkenlik (%3,52-0,37 atomik) arz edebilmektedir. Numunelerde Fe, Al ve S elementlerinin her birinden çok az miktarda max. %0,22 atomik oranında bulunmaktadır.

Çizelge 4.2’de İ5F300 - İ6F300 - İ7F300 - K5F300 - K6F300 - K7F300 numunelerindeki O ve C elementlerinin atomik yüzdeleri verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Numunelerdeki %O ve %C Elementlerinin Atomik Oranları

Numuneler	%O Atomik Oranı	%C Atomik Oranı
İ5F300	%26,36	%69,83
İ6F300	%34,46	%62,60
İ7F300	%35,53	%62,29
K5F300	%27,94	%68,84
K6F300	%30,79	%66,49
K7F300	%30,95	%65,11

Çizelge 4.2’ye göre, numune içerisinde katalizör oranı arttıkça yapı içerisindeki atomik yüzde oksijen oranı artmakta, atomik yüzde karbon oranı azalmaktadır. Bunun sebebinin asidik katalizör içerisinde O elementinin olmasından ve C elementinin olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha hassas sonuç verdiği için EDX analizde elementlerin % atomik oranları karşılaştırılmıştır.

Ayrıca kamera ile numune görüntüleri çekilerek numuneler makroskobik olarak da incelenmiştir. Kum katman kalınlığı ne kadar fazla olursa tabakalar arası reçine akışı o kadar az olacağı için yapıdaki tabakalar arası kısımlar daha dayanıksız olacaktır. Böyle durumda tabaka geçişlerinin daha belirgin olduğu görülmüştür. Şekil 4.42’de katman kalınlığı 1 mm olan ve Şekil 4.43’de katman kalınlığı 2 mm olan ince kum numuneler gösterilmiş ve verilen görüntülerde tabakalar arası geçişlerin belli olduğu görülmektedir.

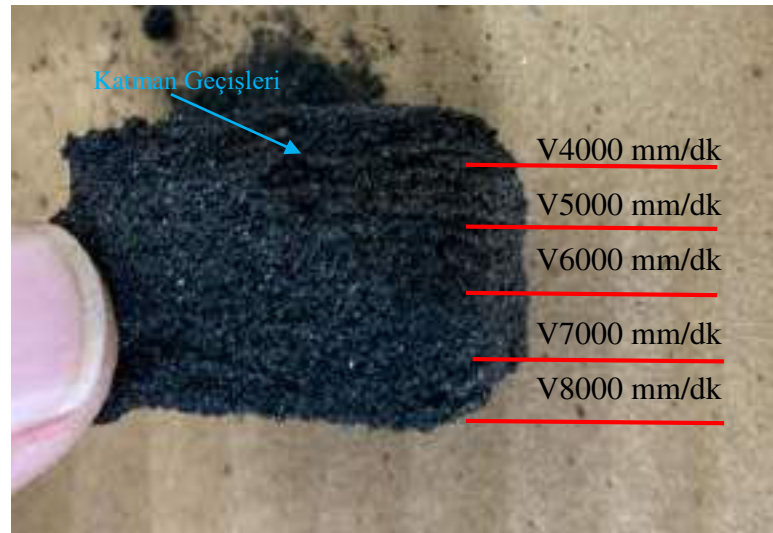


**Şekil 4.42.** Katman Kalınlığı 1 mm olan Numuneler

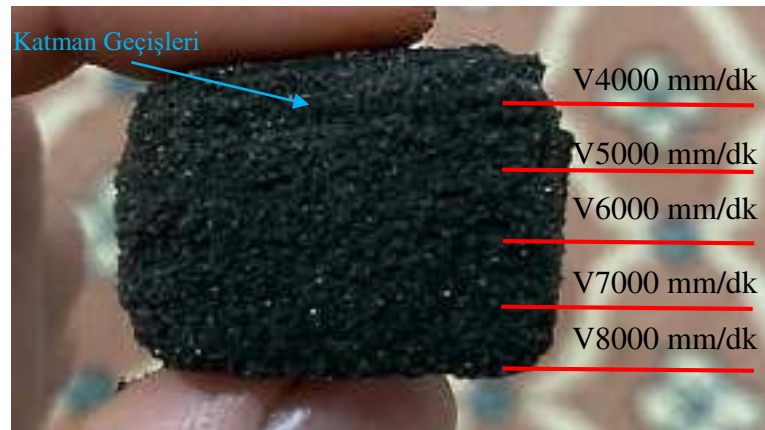


Şekil 4.43. Katman Kalınlığı 2 mm olan Numune

Katman kalınlığını belirleyen temel etkenlerden bir tanesi de kum serici hızıdır. Şekil 4.44 ve Şekil 4.45’de K6F300 ve İ6F300 numuneleri aşağıdan yukarıya doğru sırasıyla  $V=8000-7000-6000-5000-4000$  mm/dk kum serici hızlarında katman katman şeklinde üretilmişlerdir. Sonrasında bu numunelerdeki katman geçişleri fotoğraflarla incelenmiştir.



Şekil 4.44. K6F300 (V8000-V4000 mm/dk)



Şekil 4.45. İ6F300 (V8000-V4000 mm/dk)

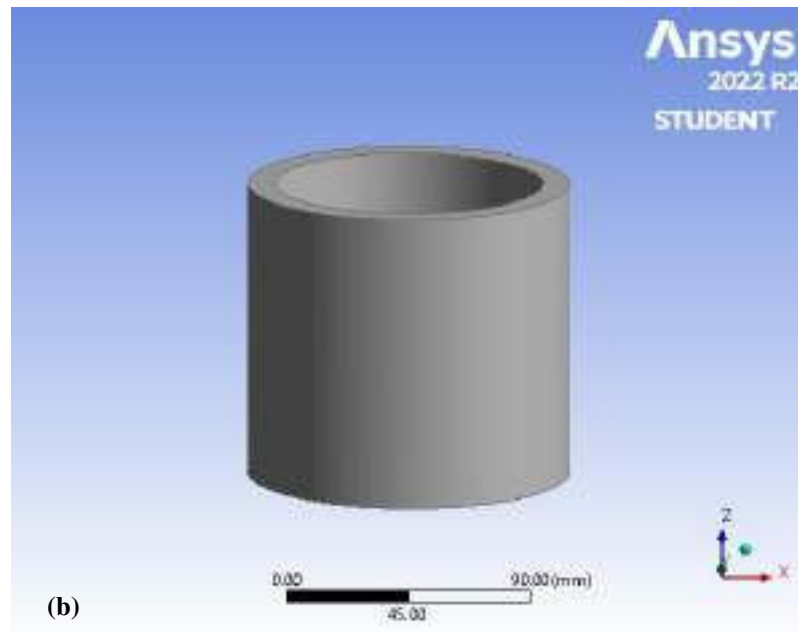
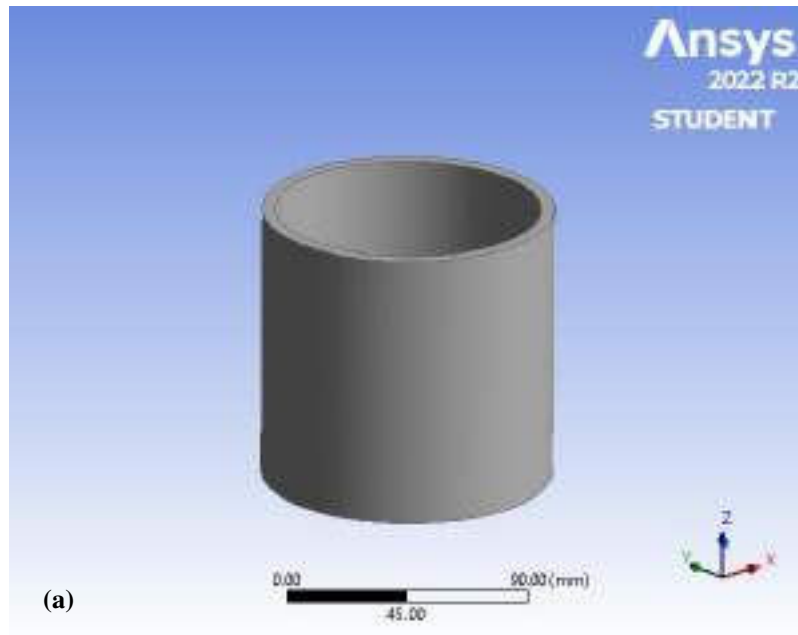
Şekil 4.44 ve Şekil 4.45’de görüldüğü üzere kum serici hızının azalması ile katman kalınlığının arttığı ve her iki kum parametresinde de katman geçişleri, kürlenmeyen kumlar sebebiyle renk ton farklarından ve girintili-çıkıntılı kısımlardan belirli olmaktadır. Özellikle V4000- V5000 ve V6000 mm/dk kum serici hızlarında her iki kum tane boyutu parametresinde de kürlenmeyen kumlar sebebiyle kısmi dökülmeler ve katman geçişleri görülebilmektedir. Bu sebeple çalışmada üretilen numuneler için kum serici hızı V8000 mm/dk seçilmiştir.

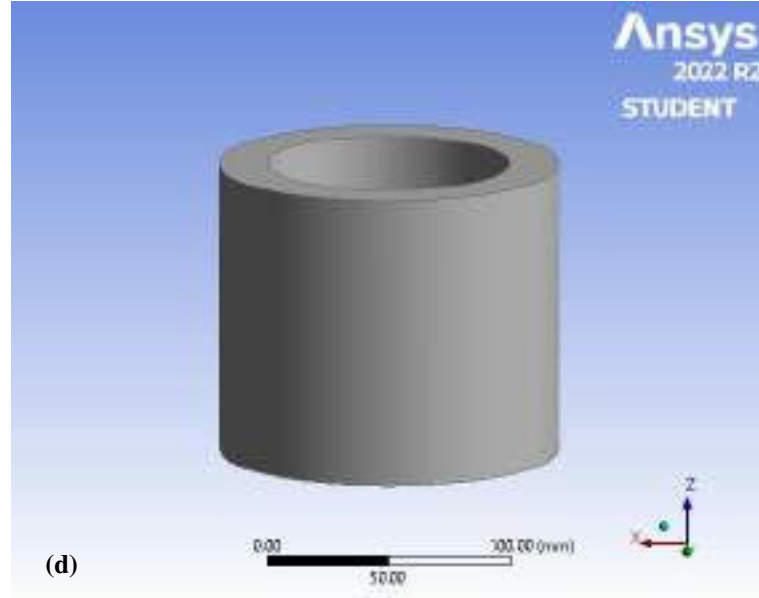
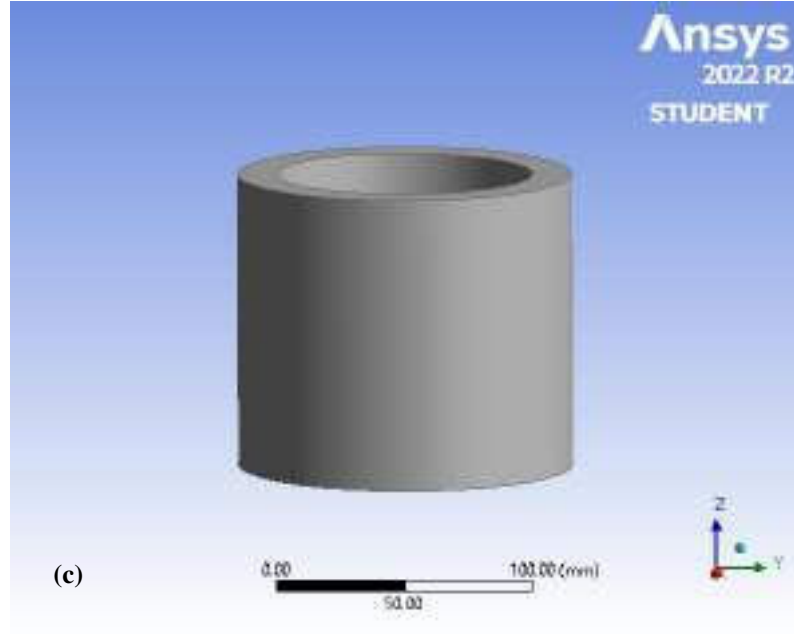
#### 4.5. Hidrostatik Basınç Analizi Sonuçları

Bu çalışmada, 3 boyutlu yazıcıda basılarak üretilen malzeme özelliklerinde malzeme seçilerek gerçek boyutlarda parça modellenerek Ansys programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hidrostatik basınç analizi yapılmıştır. Çalışmada, iç çapı 100 mm, iç yüksekliği 100 mm ve her bir cidar kalınlığı 5-10-15-20 mm olan analiz numunesi tasarlanarak katı modellemesi yapılmıştır. Sonrasında ise programda, numune içerisinde erimiş çelik metalinin oluşturacağı basınç değerinde hidrostatik basınç oluşturulmuştur. Aynı zamanda Ansys analiz programında gerçek ölçülerde tasarlanan kompresör silindir gömleğinin hidrostatik basınç analizi yapılmıştır.

Analiz sonucunda numunede oluşan maksimum ve minimum Von Mises gerilmeleri bulunmuştur. Bu analizin yapılmasının amacı, kum döküm kalıbının içerisinde erimiş çelik metali döküldüğü zaman tasarıma da bağlı olmak üzere kum kalıbın ne kadarlık bir gerilmeye maruz kalacağını belirlemek ve kalıbın bozulmadan bu hidrostatik basınca dayanıp dayanamayacağını araştırmaktır. Sonlu elemanlar analizinde elde edilen basınç değerlerinin birimi MPa’dır.

İç çapları ve iç yükseklikleri aynı olmak üzere (iç hacimleri eşit) farklı cidar kalınlıklarında (5-10-15-20 mm) 4 silindir numune modellenerek Ansys programında analiz edilmiştir. Şekil 4.46’da tasarlanmış silindir numuneler gösterilmiştir.





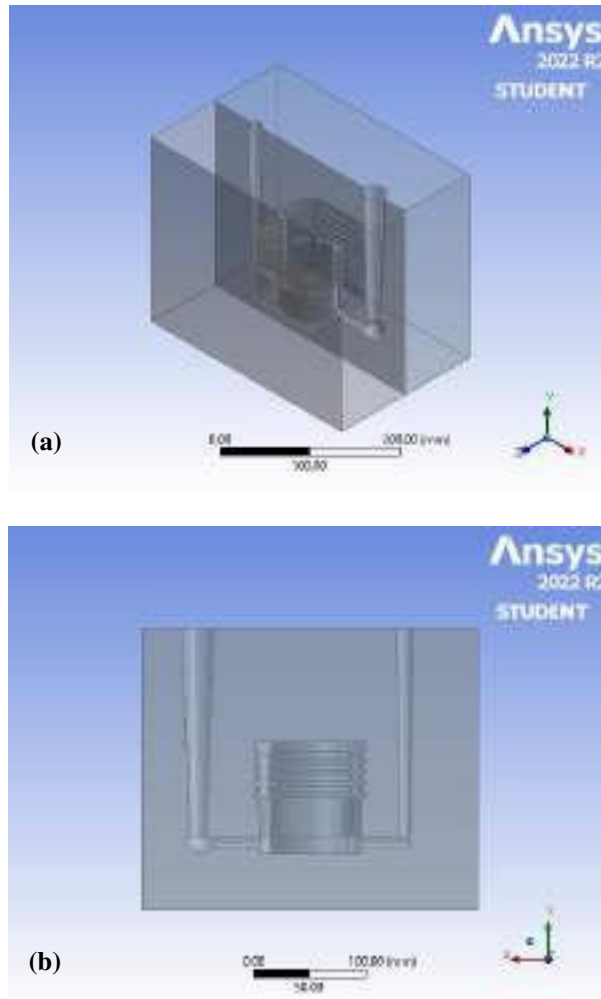
**Şekil 4.46.** a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm, d) 20 mm (Tasarlanmış Silindir Modeller)

Analiz sonucunda kum kalıplar için farklı cidar kalınlıklarında farklı Von Mises gerilmeleri bulunmuştur. Şekil 4.47’de Ansys’de maksimum ve minimum Von Mises gerilme grafikleri verilmiştir.



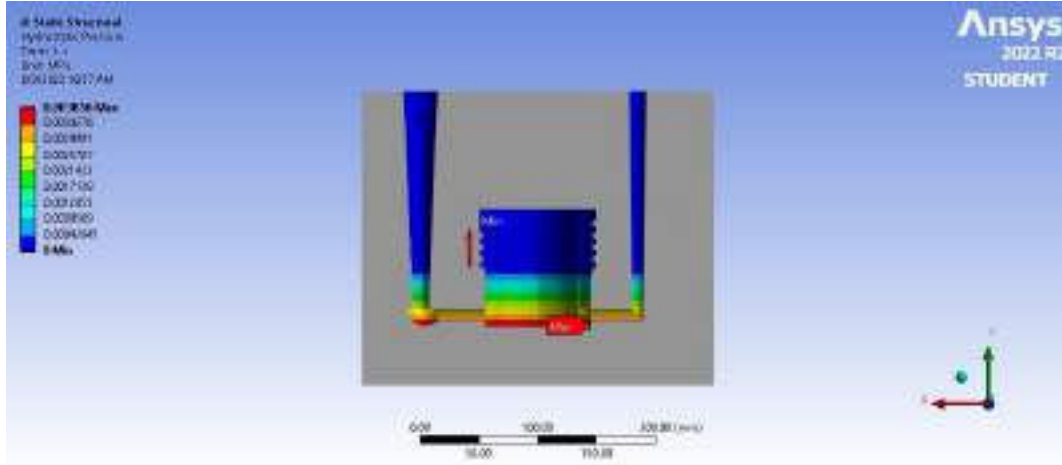
5-10-15-20 mm cidar kalınlığına sahip numunelerin sırasıyla maruz kaldığı maksimum Von Mises gerilmesi; 0,089 MPa, 0,051 MPa, 0,039 MPa, 0,033 MPa bulunmuştur. Numunede cidar kalınlığı arttıkça maksimum Von Mises gerilmelerinin azaldığı görülmüştür.

Ansys analiz programında, gerçek ölçülerde tasarlanan kompresör silindir gömleğinin hidrostatik basınç analizi yapılmış ve Von-Mises gerilme değerleri bulunmuştur. Şekil 4.48'de Ansys'de tasarlanmış modeller verilmiştir.



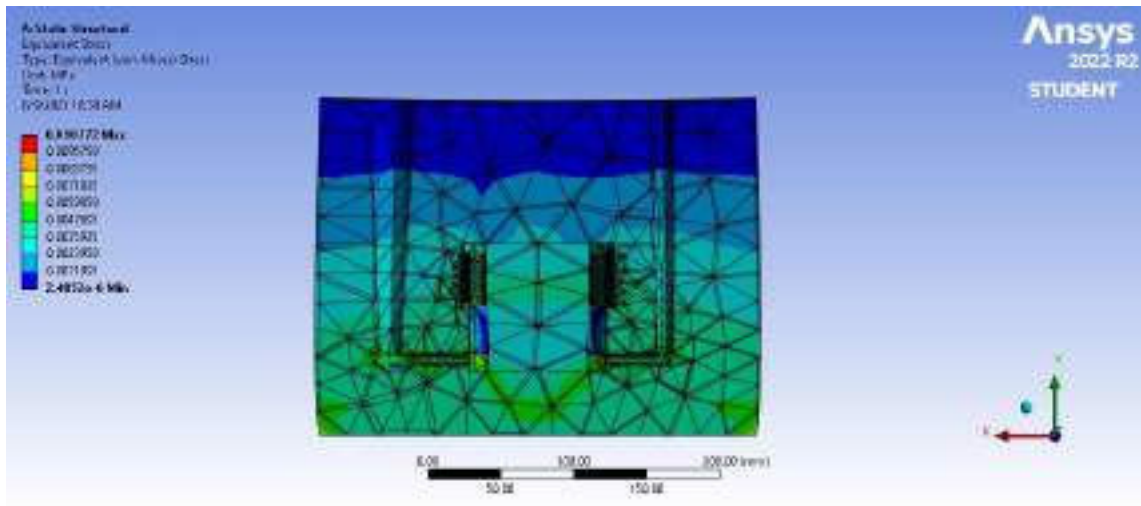
**Şekil 4.48.** a) Üç Boyutlu Görünüşü, b) İki Boyutlu Görünüşü (Tasarlanmış Kompresör Silindir Gömleği Modeli)

Şekil 4.49'da Ansys'de maksimum ve minimum hidrostatik basınç grafiği verilmiştir.



Şekil 4.49. Maksimum ve Minimum Hidrostatik Basınç Grafiği

Analiz sonucunda kompresör gömleğinin maksimum hidrostatik basınç değeri 0,003 MPa bulunmuştur. Şekil 4.50’de Ansys’de maksimum ve minimum Von Mises gerilme grafiği verilmiştir.



Şekil 4.50. Maksimum ve Minimum Von Mises Gerilme Grafiği

Analiz sonucunda kompresör gömleğinin maksimum Von-Mises gerilme değeri 0,010 MPa bulunmuştur. Bu sonuç döküm sırasında kum kalıbın kırılmadan görevini yerine getirmesi için gereken gerilme değeri hakkında fikir edinmemizi sağlamıştır. Ansys analiz sonucu, çalışmada deneysel olarak üretilen numunelerin dayanımının kum kalıp olarak kullanılabilirliği için yeterli seviyede olduğunu göstermiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında katmanlı imalat yöntemiyle üretilen kum döküm kalıplarının mekanik özelliklerine baskı parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Çalışmada öncelikle özel püskürtme sistemine sahip 3B yazıcı üretilmiş, sonrasında ise farklı baskı parametrelerinde kum kalıp numuneler üretilmiştir. Üretimde sarf malzeme olarak silis kumu, furan reçinesi ve katalizörü, baskı parametresi olarak ise kum tane boyutu, katalizör oranı ve baskı kafası ilerleme hızı kullanılmıştır. Mekanik özelliklerin incelenmesi için üretilen kum kalıpların gözeneklilik oranları, basma ve eğme dayanımları belirlenmiştir. Döküm özelliklerin incelenmesi için ise boyutsal doğruluk, gaz geçirgenliği ve yanma kaybı değerleri belirlenmiştir. Mikro yapısal özellikleri ise Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Ayrıca Ansys programında sonlu elemanlar yöntemiyle hidrostatik basınç analizi yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

#### **Bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcı ve kum kalıp üretimi sırasında edinilen bilgilere göre:**

- Katalizörle karıştırılan kumun, katalizörün zamanla buharlaşmasından dolayı kimyasal etkisini yitirmesi sebebiyle depo süresi kısıtlıdır. Bu sebeple kum ve katalizör karışımının her seferinde yazıcıda kullanılacak miktarda hazırlanması gerekmektedir.
- Üretilen numunelerin kürlenme prosesi için ortam sıcaklığı önem arz etmektedir. Bunun sebebi, furan reçinesinin katalizör ile kimyasal tepkiye girmesi için gereken minimum ortam sıcaklık değerinden kaynaklanmaktadır.
- Kum içerisindeki katalizör oranı ne kadar yüksek olursa, tanecikler arasındaki kohezyonlar artmakta ve kum parçacıklarının akışkanlığı o kadar düşük olmaktadır.

#### **Gözeneklilik testi sonuçlarına göre:**

- Deneysel yoğunlukları karşılaştırıldığı zaman ince kum taneli numunelerin içerisinde daha az boşluk olduğu için kalın kum taneli numunelere göre deneysel yoğunlukları daha fazla çıkmıştır. Ayrıca ince ve kalın kum taneli numuneler için

geçerli olmak üzere yapı içerisindeki reçine miktarı azaldıkça yapının kompaktlığı azaldığı için deneysel yoğunluk değerleri de azalmaktadır.

- Numunelerin arasında toplam gözeneklilik yüzdesi en fazla olan numunenin %56,65 ile K6F500 numunesi ve en az olan numunenin ise %38,69 ile İ6F300 numunesinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, genel olarak bakıldığı zaman aynı parametreler altında, ince kumdan üretilen numunelerin gözeneklilik oranının, kalın kumdan üretilen numunelere göre daha az olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ise ince kumdan üretilen numunelerdeki kum parçacıklarının birbirine daha fazla temas etmesi ve taneler arası boşlukların daha az olmasından kaynaklanmaktadır.
- Gözeneklilik oranı, numune içerisindeki reçine oranının sabit olması ve katalizör oranının ise artması durumunda, belirli bir katalizör oranına (%0,6) kadar çok düşük oranda azalmakta ve sonrasında artmaktadır. Eğer uygun reçine-katalizör oranı sağlanabilirse oluşacak kimyasal tepkime hızı daha optimum ve yapı içerisinde oluşacak taneler arası bağlar daha iyi seviyede olacağı için daha dayanımlı, gözeneklilik bakımından daha az boşluğa sahip numuneler üretilebileceği bulunmuştur. Aynı reçine oranı için %0,5 ve %0,6 katalizör oranlarında üretilen numunelerin gözeneklilik sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.
- Numune içerisindeki belirli bir katalizör oranında baskı kafası ilerleme hızı arttıkça, toplam gözeneklilik oranı artmaktadır. Bunun nedeni, baskı kafası ilerleme hızındaki artışın reçine miktarını azaltmasıdır. Böylece yapıdaki boşluklara daha az reçine girmesi sebebiyle yapının daha fazla gözeneklilik oranına sahip olduğu düşünülmektedir.

#### **Basma testi sonuçlarına göre:**

- Basma dayanımı en yüksek numune  $\sigma_{\text{basma}} = 0,6471$  MPa değeri ile İ6F300, basma dayanımı en düşük numune ise  $\sigma_{\text{basma}} = 0,0472$  MPa değeri ile K6F500 numunesidir. Basma şekil değiştirmesi en yüksek numune ise  $\epsilon_{\text{basma}} = 0,170$  mm/mm değeri ile K6F300 numunesi, basma şekil değiştirmesi en düşük numune ise  $\epsilon_{\text{basma}} = 0,052$  mm/mm değeri ile K6F500 numunesi olarak bulunmuştur. Bu durumda, numuneler arasında en sünek malzemenin K6F300 numunesi olduğunu göstermektedir.

- Reçine oranı sabit olduğunda, belirli bir miktara kadar katalizör oranı arttıkça basma dayanımının arttığı, daha sonra basma dayanımının azaldığı görülmektedir. Bunun uygun reçine ve katalizör doyma oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapıdaki reçine miktarı sabit olduğu için reçine ile reaksiyona girecek olan katalizör oranı önemlidir. Katalizör oranı olması gerekenden daha fazla veya daha az ise basma dayanımı, maksimum basma dayanımından daha düşük olmaktadır.
- Katalizör oranı sabit olduğunda, baskı kafası ilerleme hızı arttıkça basma dayanımının düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni, baskı kafası ilerleme hızının artmasının reçine miktarını azaltmasıdır. Tanecikler arasında reçine oranı azaldıkça taneler arası reçine köprüleri azalmakta ve yapıdaki gözenekler artabilmektedir. Bu durum basma dayanımını azaltmaktadır. Reçine bağlayıcı oranı ne kadar yüksek olursa, kum kalıbının basma dayanımının o kadar yüksek olduğu görülmüştür.
- 3B yazıcı ile üretilen kum kalıpların basma dayanımları için literatürdeki örnek çalışmalara bakıldığı zaman bu çalışmada elde edilen numunelerin basma dayanımının biraz daha düşük çıktığı görülmüştür. Ancak literatürdeki yaş kum numunelerin basma dayanımları incelendiği zaman ise bu çalışmada elde edilen numunelerin basma dayanımı verilerinin kum kalıp dayanımı için yeterli seviyede olduğu görülmektedir. Bu sebeple gerçek boyutlarda bir numune modellenerek Ansys programında sonlu elemanlar yöntemiyle hidrostatik basınç analizi yapılarak da sonuçlar incelenmiştir. İnceleme sonucunda, basma dayanımının yeterli seviyede olduğu görülmüştür.

### Üç noktadan eğme testi sonuçlarına göre:

- Eğme dayanımı en yüksek numune  $\sigma_{eğme} = 0,3844$  MPa değeri ile İ6F300, eğme dayanımı en düşük numune ise  $\sigma_{eğme} = 0,0301$  MPa değeri ile K6F500 numunesidir. Eğme şekil değiştirmesi en yüksek numune ise  $\epsilon_{eğme} = 0,0331$  mm/mm değeri ile K6F300 numunesi, eğme şekil değiştirmesi en düşük numune ise  $\epsilon_{eğme} = 0,007$  mm/mm değeri ile K6F500 numunesi olarak bulunmuştur. Bu durum, numuneler arasında en sünek malzemenin K6F300 numunesi olduğunu göstermektedir.

- Reçine oranı sabit olduğunda, belirli bir miktara kadar katalizör oranı arttıkça eğme dayanımının arttığı, daha sonra eğme dayanımının düştüğü görülmektedir. Katalizör oranı sabit olduğunda ise, reçine bağlayıcı oranındaki artışla birlikte kum kalıbın eğme dayanımı da artmaktadır. Reçine bağlayıcı oranı ne kadar yüksek olursa, kum kalıbının eğme dayanımının da o kadar yüksek olduğu görülmüştür.
- 3B yazıcı ile üretilen kum kalıpların eğme dayanımları için literatürdeki örnek çalışmalara bakıldığı zaman bu çalışmada elde edilen numunelerin eğme dayanımının biraz daha düşük çıktığı görülmüştür. Ancak numunelerin eğme dayanımı verilerinin kum kalıp dayanımı için yeterli seviyede olup olmadığı, gerçek bir numune modellenerek Ansys programında sonlu elemanlar yöntemiyle hidrostatik basınç analizi yapılarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda, eğme dayanımın yeterli seviyede olduğu görülmüştür.

#### **Boyutsal doğruluk testi sonuçlarına göre:**

- Silindir numuneler arasında boyutsal doğruluk nominal sapma değeri çap ölçüsü için en yüksek olan numunenin +1,9 mm ile K7F300 ve en düşük olan numunenin +0,6 mm ile İ6F300 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, boyutsal doğruluk nominal sapma değeri yükseklik ölçüsü için pozitif çıkmıştır ve en yüksek olan numunenin +0,8 mm ile İ5F300, en düşük olan numunelerin +0,3 mm ile İ6F500 ve K6F500 olduğu belirlenmiştir.
- Dikdörtgen prizma numuneler arasında boyutsal doğruluk nominal sapma değeri en ölçüsü için en yüksek olan numunenin +1,8 mm ile K7F300 ve en düşük olan numunenin +0,5 mm ile İ6F300 olduğu, boyutsal doğruluk nominal sapma değeri boy ölçüsü için en yüksek olan numunenin +1,5 mm ile K7F300, en düşük olan numunenin +0,4 mm ile İ6F300 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, boyutsal doğruluk nominal sapma değeri yükseklik ölçüsü hep pozitif çıkmıştır ve en yüksek olan numunenin +0,7 mm ile İ5F300, en düşük olan numunelerin +0,4 mm ile İ6F500, K6F500 olduğu belirlenmiştir.
- Silindir ve dikdörtgen prizma numunelerde, kum içerisine karıştırılan katalizör oranının nem miktarını değiştirmesi ve nem oranının artmasıyla kum sermede kum akıcılığını azaltıp yükseklik için nominal sapma değerini azaltmaktadır. Ayrıca, katalizör kaplı kumlara püskürtülen reçinenin oranının azalmasıyla yapı

içerisinde reçine köprü bağlantıların ve reçine doygunluğunun azalması sebebiyle yükseklik için nominal sapma değeri azalmaktadır. Ayrıca çap, boy ve en değeri için en iyi boyutsal doğruluğa kum tane boyutu ince olan numunenin sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ince kum tanelerine temas eden bağlayıcı reçinenin daha belirgin çerçevede aktive etmesidir. Kum tane boyutu kalın olan numunelerin yükseklik değeri için boyutsal doğruluğunun daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ince kum tanelerinin kum akışkanlığının kalın kum tanelerine göre daha yüksek olmasından ve kum serme tekrar sayısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### **Gaz geçirgenliği testi sonuçlarına göre:**

- Gaz geçirgenliği, sabit baskı kafası ilerleme hızında ve numune içerisindeki katalizör oranının artması durumunda, belirli bir katalizör oranına (%0,6) kadar çok düşük oranda azalmakta ve daha sonra artmaktadır. Bunun nedeninin uygun reçine-katalizör doyma oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapıdaki reçine miktarı sabit olduğu için reçine ile reaksiyona girecek olan katalizör oranı önemlidir. Katalizör oranı olması gerekenden daha fazla veya daha az ise gaz geçirgenliği minimumdan daha yüksektir. Aynı reçine oranı için %0,5 ve %0,6 katalizör oranlarında üretilen numunelerin gaz geçirgenlik sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.
- Sabit katalizör oranında, baskı kafası ilerleme hızı arttıkça gaz geçirgenliğinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeninin baskı kafası ilerleme hızındaki artışın veya azalmanın reçine miktarını etkilemesi olduğu düşünülmektedir. Yapıdaki reçine miktarı azaldıkça kum tanecikleri arasındaki kimyasal bağ azalmakta ve gaz geçirgenliği de artmaktadır.
- Numunelerin arasında gaz geçirgenliği en yüksek olan numunenin 180 GP ile K6F500 numunesi ve en az olan numunenin ise 150 GP ile İ6F300 numunesinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, genel olarak bakıldığı zaman aynı parametreler altında, ince kumdan üretilen numunelerin gaz geçirgenliği, kalın kumdan üretilen numunelere göre daha az olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise ince kumdan üretilen numunelerin taneler arası boşluklarının daha az olmasından kaynaklanmaktadır.

#### **Yanma kaybı testi sonuçlarına göre:**

- Sabit baskı kafası ilerleme hızında, katalizör oranı arttıkça yanma kaybının arttığı görülmektedir. Bunun nedeni numune içerisindeki katalizör oranının artmasından kaynaklanmaktadır.
- Sabit katalizör oranında, baskı kafası ilerleme hızı arttıkça yanma kaybının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni numune içerisindeki reçine oranının azalmasından kaynaklanmaktadır.
- Numunelerin arasında yanma kaybı en yüksek olan numuneler %7,39 ile İ7F300 numunesi, %7,37 ile K7F300 numunesi ve en düşük olan numuneler ise %3,06 ile K6F500, %3,07 ile İ6F500 numunesinin olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin numune içerisindeki reçine ve katalizör oranından kaynaklanmaktadır.
- Bu çalışmada farklı üretim parametrelerinde elde edilen numunelerin yanma kaybı değerlerinin, literatürdeki örnek çalışmalardaki numunelerin yanma kaybı değerlerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin literatürdeki çalışmalarda kullanılan furan reçine ve katalizör türünün özel olup 3B yazıcılar için üretilmişken, bu çalışmada kullanılan reçinenin ve katalizörün ise geleneksel kum kalıplarda kullanılan furan reçinesi ve katalizörü olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla özel olarak 3B yazıcılar için üretilen furan reçinesinin ve katalizörünün kum kalıp üretimi için kullanım miktarı, geleneksel kum kalıp üretimi için kullanılan furan reçinesi ve katalizörüne göre daha az miktardadır.

#### **Karşılaştırmalı test sonuçlarına göre:**

- Üretilen numunelerin basma ve eğme dayanımları arasında doğrusal orantı olduğu belirlenmiştir. Basma dayanımı yüksek olan numunenin eğme dayanımının da yüksek olduğu görülmüştür.
- Üretilen numunelerin basma dayanımları ve gözeneklilik oranları arasında ters orantı olduğu belirlenmiştir. Basma dayanımı yüksek olan numunenin gözeneklilik oranının düşük olduğu görülmüştür. Gözeneklilik azaldıkça kum taneciklerin birbirine teması artmakta, kum tanecikler arasında oluşan reçine köprü sayısı artmakta ve bu da basma dayanımını artırmaktadır.
- Üretilen numunelerin eğme dayanımları ve gözeneklilik oranları arasında ters orantı olduğu belirlenmiştir. Eğme dayanımı yüksek olan numunenin gözeneklilik oranının düşük olduğu görülmüştür. Gözeneklilik azaldıkça kum taneciklerin

birbirine teması artmakta, kum tanecikler arasında oluşan reçine köprü sayısı artmakta ve bu da eğme dayanımını artırmaktadır.

- Üretilen numunelerin gözeneklilik oranı ile gaz geçirgenliği arasında doğrusal orantı olduğu belirlenmiştir. Gözeneklilik oranı yüksek olan numunenin gaz geçirgenliğinin de yüksek olduğu görülmüştür. Numunelerde reçine miktarı azaldıkça tanecikler arasında boşluk miktarı artmakta ve böylece gözeneklerden gaz geçişi doğal olarak daha fazla olmaktadır.
- Bu çalışmada geleneksel dökümhane kumunun, furan reçinesinin ve katalizörünün bir 3B yazıcıda kum kalıpları üretebilmek için kullanılabileceği gösterilmiştir. Ancak kumların morfolojisi ve reçine-katalizörün kimyasal yapısı sebebiyle oluşturduğu bağlanma mekanizması, endüstriyel 3B yazıcılarda üretilen kum kalıplardan daha düşük basma ve eğme dayanım değerlerinde ama kum kalıp olarak da kullanılabilecek basma ve eğme dayanımına sahip kum kalıplar üretilmektedir. Ayrıca, boyutsal doğruluk, gaz geçirgenliği ve gözeneklilik değerleri bakımından literatürdeki örnek çalışmalarda üretilen kum kalıplara yakın olduğu görülmüştür.

#### **Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)-EDX ve makro yapı analiz sonuçlarına göre:**

- SEM görüntüleri incelenen numunelerde kum parçacıkları arasında çapraz bağlı furan reçine köprüleri ve gözenekler görülmektedir. Bu reçine köprülerinin bağlanma şekilleri ve sayıları, yapıdaki gözenekler ve kum tanelerinin şekillerinin numunenin mekanik özelliklerini etkilediği düşünülmektedir.
- EDX analiz sonuçları incelendiği zaman, numunelerin kimyasal yapısında genel olarak Oksijen, Karbon, Silisyum, Demir, Alüminyum ve Kükürt elementleri olduğu görülmüş ve bu elementlerin oranları farklılık arz etmektedir. Döküm kumu, Si elementinden oluştuğu için numuneler içerisindeki Si oranları değişkenlik (%3,52-0,37 atomik) arz edebilmektedir. Numunelerde Fe, Al ve S elementlerinin her birinden çok az miktarda max. %0,22 atomik oranında bulunmaktadır.
- Belirli bir orandaki bağlayıcı miktarında kum katman kalınlığı ne kadar fazla olursa tabakalar arası reçine akışı o kadar az olacağı için yapıdaki tabakalar arası kısımlar daha dayanıksız olacaktır. Böyle durumda tabaka geçişlerinin daha belirgin olduğu makroskobik olarak görüntülenmiştir.

**Ansysis hidrostatik basınç analizi sonuçlarına göre:**

- Ansys analiz programında, gerçek ölçülerde tasarlanan kompresör silindir gömleğinin hidrostatik basınç analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda kompresör gömleğinin maksimum hidrostatik basınç değeri 0,003 MPa bulunmuştur. Analiz sonucunda kompresör gömleğinin maksimum Von-Mises gerilme değeri 0,010 MPa bulunmuştur. Bu sonuç döküm sırasında kum kalıbın kırılmadan görevini yerine getirmesi için gereken gerilme değeri hakkında fikir edinmemizi sağlamıştır. Ansys analiz sonucu, çalışmada deneysel olarak üretilen numunelerin dayanımının kum kalıp olarak kullanılabilirliği için yeterli seviyede olduğunu göstermiştir.

**5.2. Öneriler**

Çalışma sonucunda yapılan işlemler gözden geçirilmiş ve geliştirilmesi için bazı fırsatlar belirlenerek aşağıda öneri olarak belirtilmiştir.

- Geleneksel kum kalıp üretiminde kullanılan farklı kum ve reçine türleri kullanılarak 3B yazıcıda kum kalıp üretilebilirliği incelenebilir.
- 3B yazıcıda üretilen kum kalıplarda çeşitli metallerin dökümü yapılarak üretilen parçaların mekanik özellikleri incelenebilir.
- Bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcılar ve bu yazıcılar için reçine, katalizör, kum gibi sarf malzemeleri ticari olarak üreten Voxeljet veya Exone gibi uluslararası firmalardan, bu sarf malzemeler temin edilerek üretilen yazıcıda kullanımı sağlanabilir.
- Bağlayıcı püskürtmeli 3B yazıcıya, otomatik karıştırıcı sistemi ilave edilerek yazıcı daha endüstriyel hale getirilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Aran, A., 2007, Döküm teknolojisi, *İTÜ Makine Fakültesi*, İstanbul.
- ASTM International, 2012, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, Designation: F2792 – 12a, USA.
- Azhari, A., Marzbanrad, E., Yilman, D., Toyserkani, E., Pope, M. A., 2017, Binder-jet powder-bed additive manufacturing (3D printing) of thick graphene-based electrodes, *Carbon*, 119, 257-266.
- Baş, H., Yapıcı, F., 2015, Ergonomik tasarım ve üretimde hızlı prototipleme teknolojisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3 (3), 199-204.
- Bilgetekin, A., 2010, Kokil kalıba alüminyum döküm proseslerinin iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Bobrowski, A., Grabowska, B., 2012, The impact of temperature on furan resin and binder structure, *Metallurgy and Foundry Engineering*, 38 (1), 73. <https://doi.org/10.7494/mafe.2012.38.1.73>
- Bonnefoy, H., Marquet, V., 2014, Mould design method with sand 3D printing.
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., Garrett, B., 2011, Strategic Foresight Report, *Atlantic Council*, 3.
- Can, A., Aslan, İ., 2018, Katmanlı üretim ile elde üretilmiş kum döküm kalıplarının incelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6 (4), 1269-1282.
- Chakraborty, S., Biswas, M. C., 2020, 3D printing technology of polymer-fiber composites in textile and fashion industry: A potential roadmap of concept to consumer, *Composite Structures*, 248, 112562.
- Chate, G., Patel, G. C., Bhushan, S. N., Parappagoudar, M. B., Deshpande, A. S., 2019, Comprehensive modelling, analysis and optimization of furan resin-based moulding sand system with sawdust as an additive. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, 1-24.
- Cheng, Y. L., Li, Y. T., Yang, Y. T., Tang, K. T., Jhuang, F. A., Li, K. H., Lu, C. W., 2022, Greyscale printing and characterization of the binder migration pattern during 3D sand mold printing, *Additive Manufacturing*, 56, 102929. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102929>
- Çavuşoğlu, E. N., 1981, Döküm teknolojisi, *İTÜ*, İstanbul.
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A., 2013, Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları, *DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31.

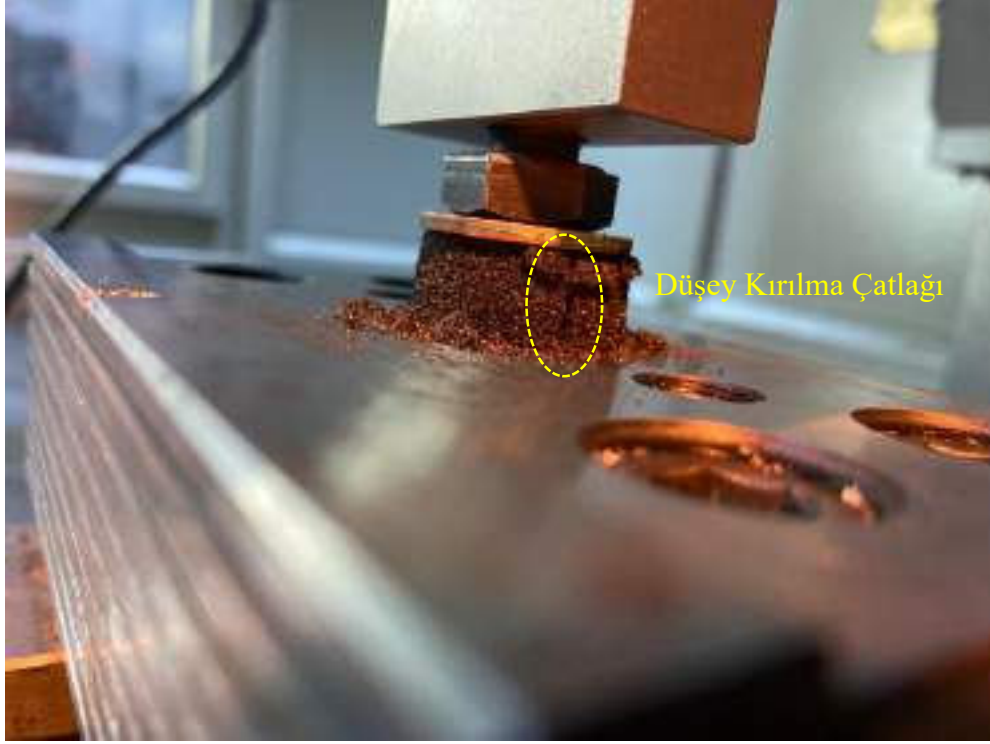
- Coniglio, N., Sivarupan, T., El Mansori, M., 2018, Investigation of process parameter effect on anisotropic properties of 3D printed sand molds, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 94, 2175–2185. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0861-5>
- Dana, H. R., El Mansori M., 2020, Mechanical characterisation of anisotropic silica sand/furan resin compound induced by binder jet 3D additive manufacturing technology, *Ceramics International*, 46, 17867–17880.
- Demir, S., Sezer, H. K., Özdemir, V., 2018, Topolojik nesnelere FDM (ergiyik biriktirerek modelleme) yöntemiyle üretimi: Klein şişesi örneği, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2 (2), 76-87.
- Deng, C., Kang, J., Shangguan, H., Hu, Y., Huang, T., Liu, Z., 2018, Effects of hollow structures in sand mold manufactured using 3D printing technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 516-523.
- Dini, F., Ghaffari, S.A., Jafar, J., Hamidreza, R., Marjan, S., 2020, A review of binder jet process parameters; powder, binder, printing and sintering condition, *Metal Powder Report*, 75, 95-100.
- Erol, G., 2016, Kayaçların yerinde ve laboratuvar ölçümleri ile belirlenen ısı geçirgenlikleri arasındaki farklılıkların araştırılması, Doktora Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas.
- Gao, G., Zhang, W., Du, Z., Liu, Q., Su, Y., Shi, D., 2021, Investigation of selected parameters effect on 3D printed sand mold properties through Taguchi method, *Rapid Prototyping Journal*, 27 (3), 627-635. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2019-0294>
- Gawronová, M., Lichý, P., Kroupová, I., Obzina, T., Beňo, J., Nguyenová, I., Merta, V., Jezierski, J., Radkovský, F., 2022, Evaluation of additive manufacturing of sand cores in terms of the resulting surface roughness, *Heliyon*, 8 (10), e10751. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10751>
- Gullapalli, R. A., 2016, A study of mixed manufacturing methods in sand casting using 3D sand printing and FDM pattern-making based on cost and time, M.S. Thesis, *Youngstown State University*, Ohio, USA.
- Guo, Z., Shan, Z., Liu, F., Du, D., Zhao, M., 2019, Experimental investigation on the performance and mesostructure of multi-material composite 3D-printed sand mold, *Rapid Prototyp. Journal*, 26 (2), 309–318.
- Günther, D., Mögele, F., 2016, Additive manufacturing of casting tools using powder-binder-jetting technology, *New Trends in 3D Printing*, Intech.
- Hackney, P., Wooldridge, R., 2017, Characterisation of direct 3D sand printing process for the production of sand cast mould tools, *Rapid Prototyping Journal*, 23 (1), 7-15.

- Hakan Verdu Martinez, E., Can, E., 2016, Bilgisayar destekli seramik üretim yöntemi olarak üç boyutlu yazıcılar ve günümüz koşullarında uygulama örneği, *Sanat ve Tasarım Dergisi*, Eskişehir, 6 (1), 1-15.
- Hawaldar, N., Zhang, J., 2018, A comparative study of fabrication of sand casting mold using additive manufacturing and conventional process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97 (1), 1037–1045. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2020-z>
- Hodder, K. J., Chalaturnyk, R. J., 2019, Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand, *Additive Manufacturing*, 28, 649–660.
- Holland, S., Tuck, C., Foster, T., 2018, Selective recrystallization of cellulose composite powders and microstructure creation through 3D binder jetting, *Carbohydrate polymers*, 200, 229-238.
- Jiménez-Martín, A., Mateos, A., Hernández, J. Z., 2021, Aluminium parts casting scheduling based on simulated annealing. *Mathematics*, 9 (7), 741. <https://doi.org/10.3390/math9070741>
- Kadıoğlu, S., 2014, Döküm endüstrisinde sodyum silikat bağlayıcılı kalıp / maça kum özelliklerinin mikrodalga yöntemiyle geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Kara, N., 2013, Havacılıkta katmanlı imalat teknolojisinin kullanımı, *Mühendis ve Makina*, 54 (636), 70-75.
- Khandelwal, H., Ravi B., 2016, Effect of molding parameters on chemically bonded sand mold properties, *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 127–133.
- Martinez, D., Bate, C. Manogharan, G., 2020, Towards functionally graded sand molds for metal casting: Engineering thermo-mechanical properties using 3D sand printing. *JOM*, 72, 1340–1354. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03975-x>
- Mitra, S., 2019, Experimental and numerical characterization of functional properties of sand molds produced by additive manufacturing (3D printing by jet binding) in a fast foundry, Ph.D. Thesis, *Hesam University*, Paris, France.
- Mitra, S., El Mansori, M., Rodríguez de Castro, A., Costin, M., 2020, Study of the evolution of transport properties induced by additive processing sand mold using X-ray computed tomography, *J. Mater. Process. Technol.*, 277, 116495.
- Mitra, S., Rodríguez de Castro, A., El Mansori, M., 2018, The effect of ageing process on three-point bending strength and permeability of 3D printed sand molds, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 97, 1241–1251.
- Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F. , Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., Chmielus, M., 2021, Binder jet 3D printing—process parameters, materials, properties, modeling, and challenges, *Progress in Materials Science*, 119, 100707. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>.

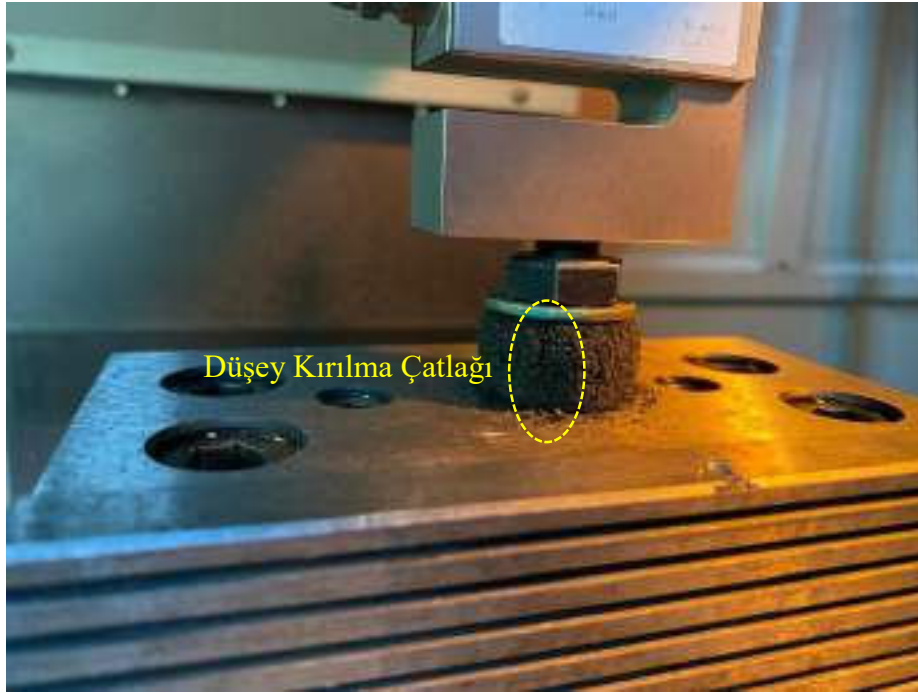
- Motoyama, Y., Inoue, Y., Saito, G., Yoshida, M., 2013, A verification of the thermal stress analysis, including the furan sand mold, used to predict the thermal stress in castings, *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 2270-2277.
- Naitoh, M., Kubota, Y., Katsumata, A., Ohsaki, C., Arijji, E., 2006, Dimensional accuracy of a binder jet model produced from computerized tomography data for dental implants, *Journal of Oral Implantology*, 32(6), 273-276.
- Özdemir, M. M., 2020, Sürekli döküm yöntemi ile çelik üretimine ait proses optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa.
- Özgül, S., 2015, Seramik sanatında üç boyutlu yazıcıların yeni bir ifade biçimi olarak kullanılması, *idil*, 4 (18), 167-183.
- Özsoy, K., Duman, B., 2017, Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1 (1), 36-48.
- Poyraz, Ö., Kuşhan, M. C., 2018, Metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerinin etkisinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (2), 729-742.
- Primkulov, B., Chalaturnyk, J., Chalaturnyk, R., Zambrano Narvaez, G., 2017, 3D printed sandstone strength: curing of furfuryl alcohol resin-based sandstones, *3D Print. Addit. Manuf.*, 4 (3), 149–156.
- Said, R. M., Kamal, M. R., Miswan, N. H., Ng, S., 2018, Optimization of moulding composition for quality improvement of sand casting, *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 12 (1(1)), 301-310.
- Salmi, M., 2016, Possibilities of preoperative medical models made by 3D printing or additive manufacturing, *Journal of Medical Engineering*, 2016.
- Sen, K., Mehta, T., Sansare, S., Sharifi, L., Ma, A. W., Chaudhuri, B., 2021, Pharmaceutical applications of powder-based binder jet 3D printing process—a review, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 177, 113943.
- Seidu, S., Kutelu, B., 2014, Effects of additives on some selected properties of base sand, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2, 507-512.
- Sinha, N. K., Choudhary, I. N., Singh, J. K., 2022, Influence of mold material on the mold stability for foundry use, *Silicon*, 14, 2895–2904. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01070-y>
- Sivarupan, T., El Mansori, M., Coniglio, N., Dargusch, M., 2020, Effect of process parameters on flexure strength and gas permeability of 3D printed sand molds, *J. Manuf. Process*, 54, 420–437.

- Skorulski, G., 2016, 3DP technology for the manufacture of molds for pressure casting, *Archives of Foundry Engineering*, 16 (3), 99-102.
- Snelling, D., Li, Q., Meisel, N., Williams, C. B., Batra, R. C., Druschitz, A. P., 2015, Lightweight metal cellular structures fabricated via 3D printing of sand cast molds, *Advanced Engineering Materials*, 17, 7.
- Snelling, D., Williams, C.B., Druschitz, A., 2014, A comparison of binder burnout and mechanical characteristics of printed and chemically bonded sand molds, *SFF Symp*, 197–209.
- Sobczak, J., Purgert, R., Galinski, A., Darlak, P., Szolc, M., 2002, The use of fly ash as an aggregate for foundry sand mold and core production. *Final Report Combustion by Products Research Consortium*.
- Solmaz, P., 2008, Atık döküm kumunun geçirimsiz perde yapılarak tekrar kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Srinivasarao Rao, P., Birru, A. K., 2017, Effect of mechanical properties with addition of molasses and flyash in green sandmoulding, *Materials Today: Proceedings*, 4, 1186-1192.
- Şahin, O., Özay, M. E., Uçan, R., 2021, Dökümhane maça üretimi çalışmalarında iş sağlığı ve güvenliği, *Efe Akademi*, İstanbul.
- Terzi, M., Hacıfazlıoğlu, H., Tombal, T. D., Kurşun, İ., 2016, Silis kumunun liç yöntemi ile saflaştırılmasında organik asitlerin verimliliğinin araştırılması, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3 (4), 11-18.
- Thomas S. P., Moreno L., 2019, *Mold & Core Test Handbook*, 5th Edition, *American Foundry Society*, Schaumburg, IL, USA, ISBN 978-0-87433-467-8
- Turhan, S., 2016, DMLS ile üretilen Ti6Al4V parçalarında lazer parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Upadhyay, M., Sivarupan T., Mansori M. E., 2017, 3D printing for rapid sand casting—A review, *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 211-220.
- Vanderploeg, A., Lee, S. E., Mamp, M., 2017, The application of 3D printing technology in the fashion industry, *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 10 (2), 170-179.
- Xia M., Nematollahi B., Sanjayan J., 2020, Post-processing techniques to enhance strength of portland cement mortar digitally fabricated using powder-based 3D printing process, *In: Rheology and Processing of Construction Materials: RheoCon2 & SCC9 2*, ss. 457-464. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22566-7\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22566-7_53)
- Xia, M., Sanjayan, J., 2016, Method of formulating geopolymers for 3D printing for construction applications, *Materials and Design*, 110, 382–390.

- Yalçın, B., Ergene, B., 2017, Metallurgy and method of new trend 3-D additive manufacturing in industry, *SDU International Journal of Technological Science*, 9 (3), 65-88.
- Yemen, M., 2019, Metal kaplama atık sularının arıtımında döküm atıklarının fenton yöntemine uygulanabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Nevşehir.
- Zhao, D., Guo, W., Zhang, B., Gao, F., 2018, 3D sand mould printing: a review and a new approach, *Rapid Prototyping Journal*, 24 (2), 285-300. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2016-0088>
- Zhao, N., Parthasarathy, M., Patil, S., Coates, D., Myers, K., Zhu, H., Li, W., 2023, Direct additive manufacturing of metal parts for automotive applications, *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 368-375.

**EKLER****EK-1 Basma Testi Yapılmış Numunelerin ve Kırılma Yüzeylerinin Fotoğrafları**

Şekil E1.1. K5F300 Basma Numunesi



Şekil E1.2. K6F300 Basma Numunesi



Şekil E1.3. K7F300 Basma Numunesi



Şekil E1.4. İ5F300 Basma Numunesi



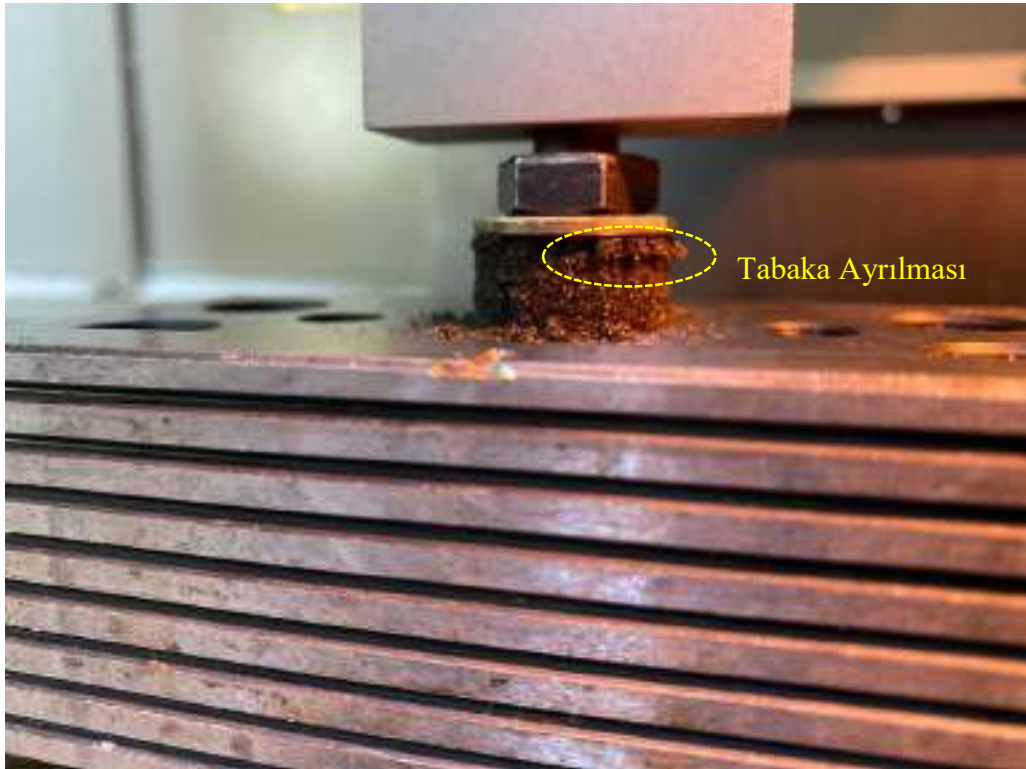
Şekil E1.5. 16F300 Basma Numunesi



Şekil E1.6. 17F300 Basma Numunesi



Ŗekil E1.7. İ6F400 Basma Numunesi



Ŗekil E1.8. İ6F500 Basma Numunesi



**Şekil E1.9.** İ6F500 Numunesi Test Sırasında Ayrılan Tabaka

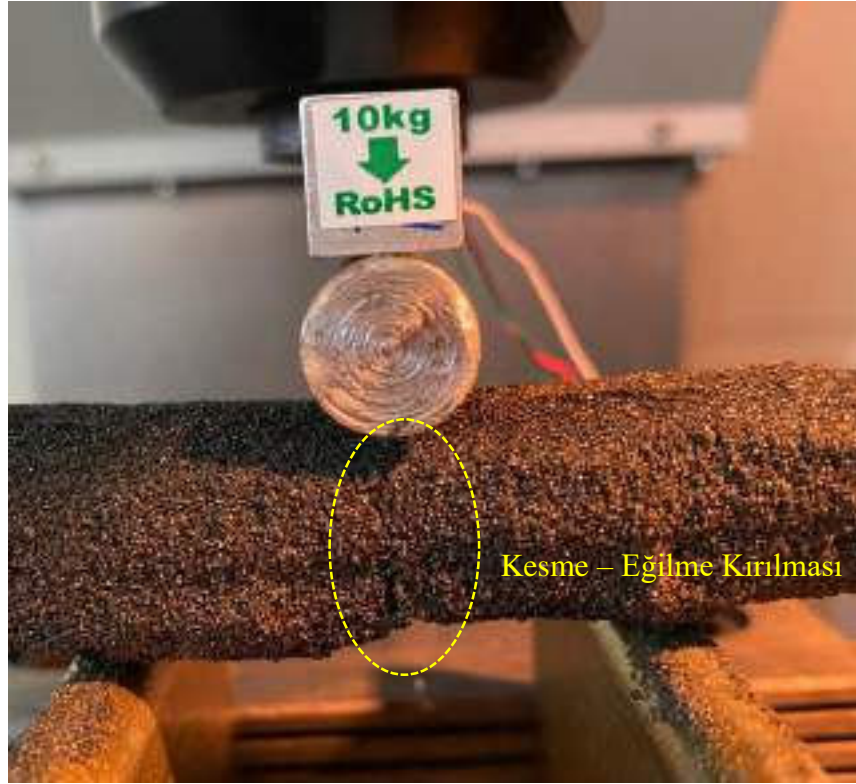
## EK-2 Üç Noktadan Eğme Testi Yapılmış Numunelerin ve Kırılma Yüzeylerinin Fotoğrafları



Şekil E2.1. K6F300 Eğme Numunesi



Şekil E2.2. K6F300 Eğme Numunesi Kırık Yüzey



Şekil E2.3. K7F300 Eğme Numunesi



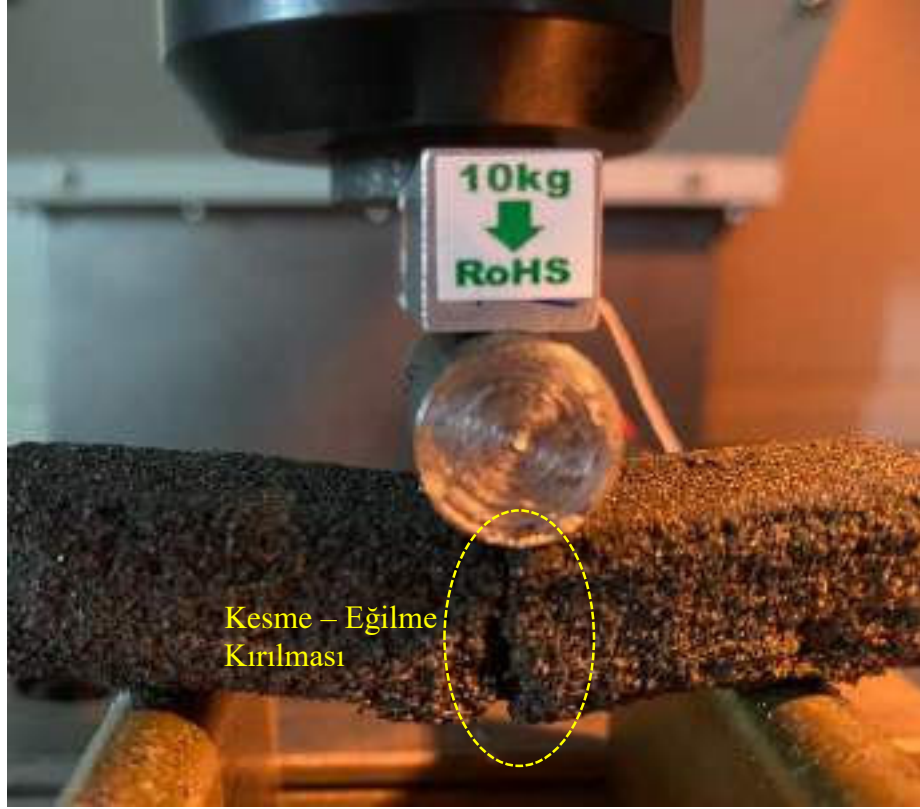
Şekil E2.4. K7F300 Eğme Numunesi Kırık Yüzey



Şekil E2.5. K6F400 Eğme Numunesi



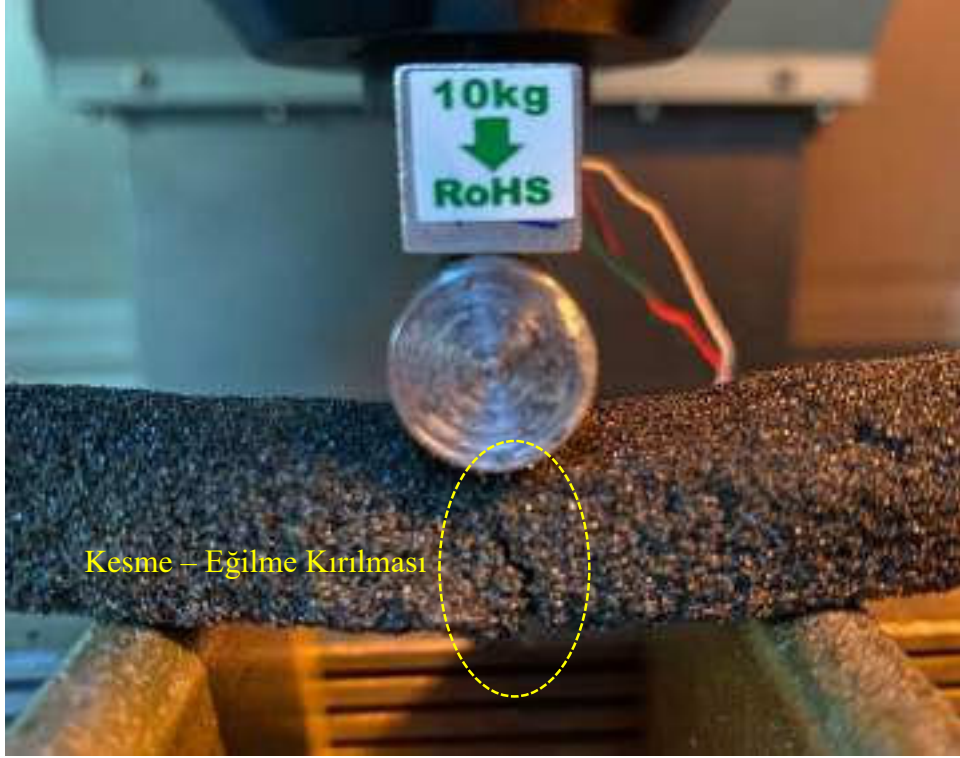
Şekil E2.6. K6F400 Eğme Numunesi Kırık Yüzeyi



Şekil E2.7. K6F500 Eğme Numunesi



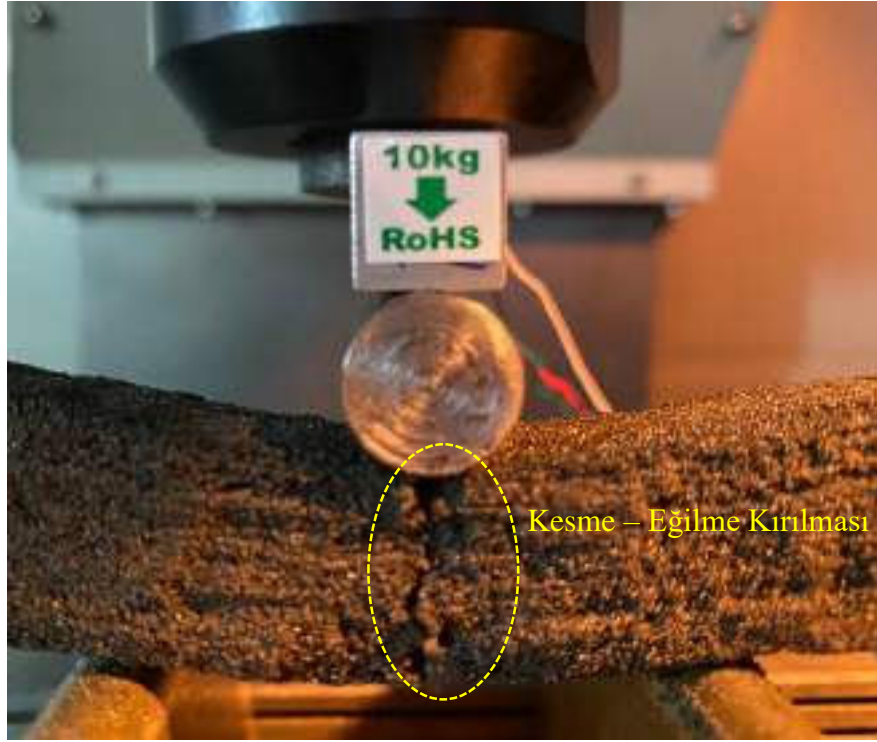
Şekil E2.8. K6F500 Eğme Numunesi Kırık Yüzey



Şekil E2.9. İ5F300 Eğme Numunesi



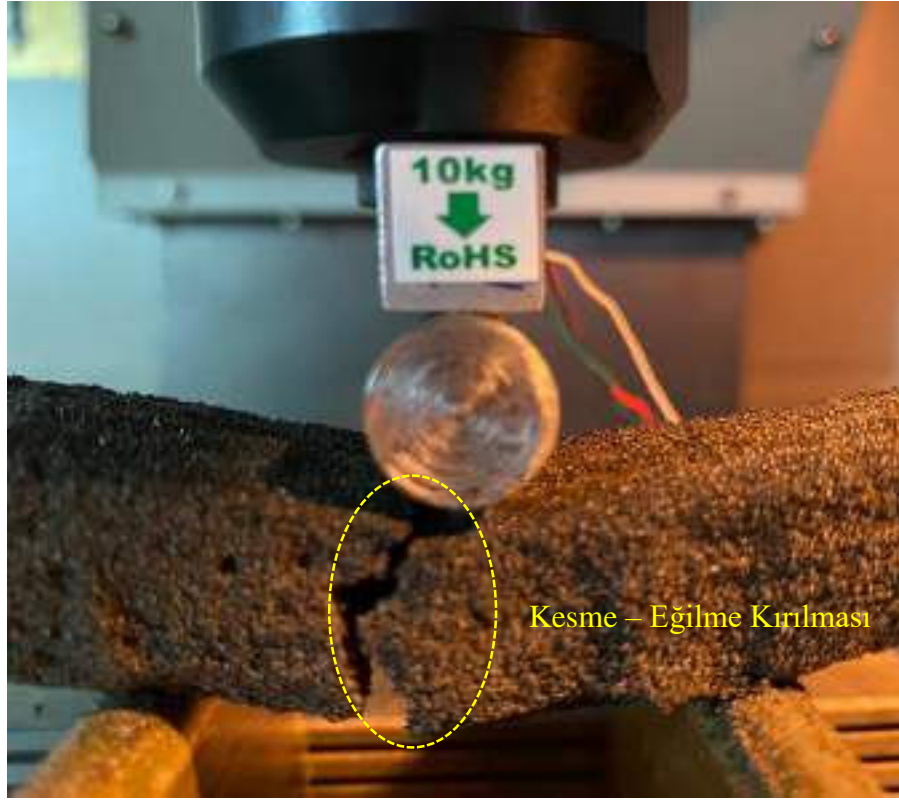
Şekil E2.10. İ5F300 Eğme Numunesi Kırık Yüzey



Şekil E2.11. İ6F300 Eğme Numunesi



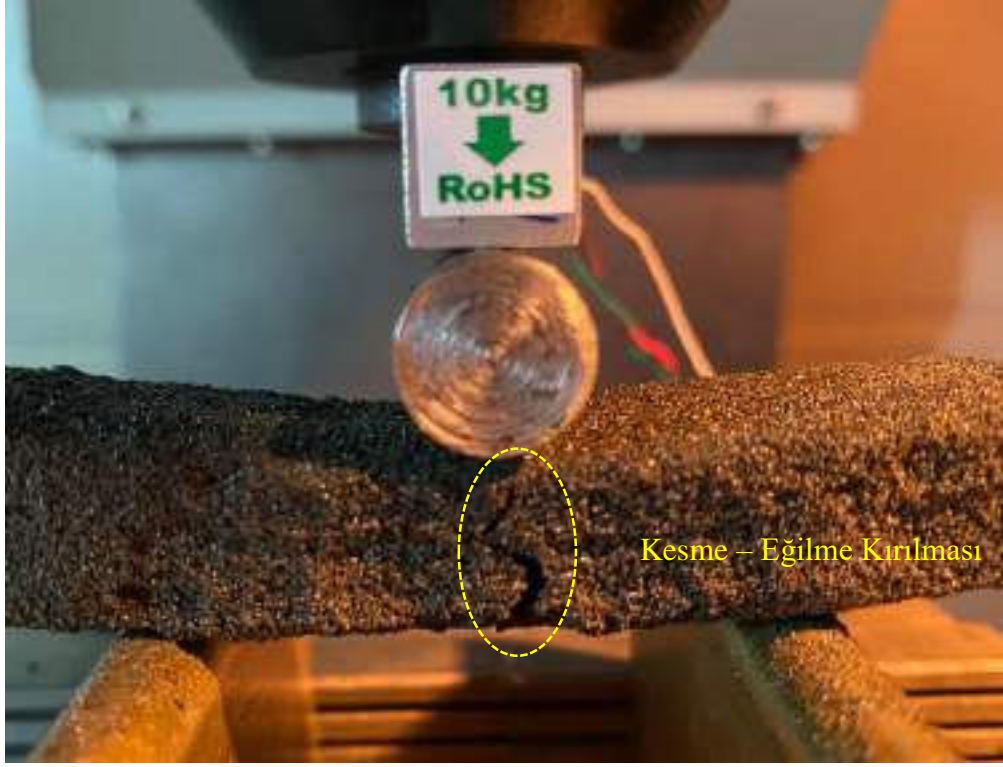
Şekil E2.12. İ6F300 Eğme Numunesi Kırık Yüzeyi



Şekil E2.13. İ7F300 Eğme Numunesi



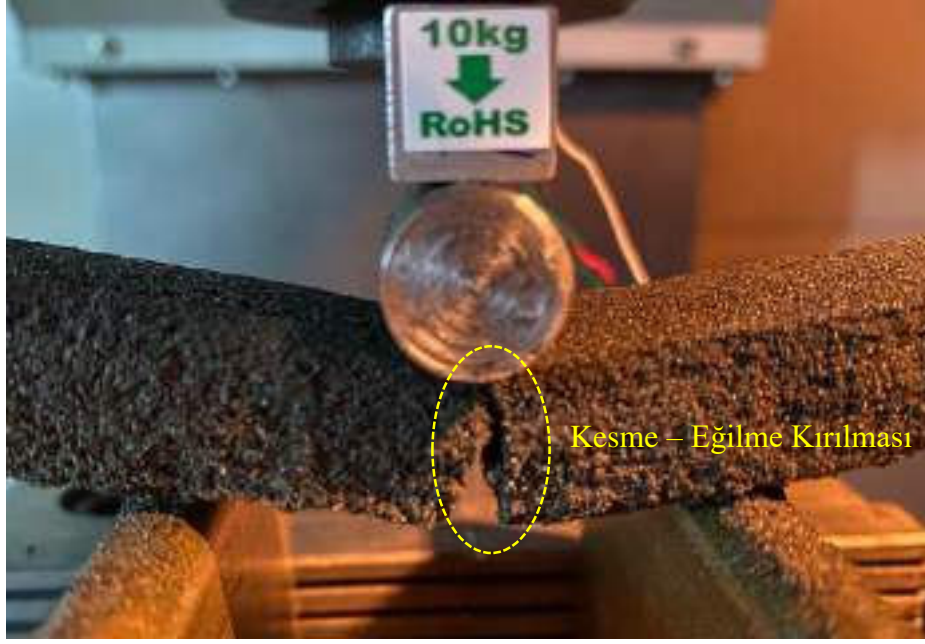
Şekil E2.14. İ7F300 Eğme Numunesi Kırık Yüzey



Şekil E2.15. İ6F400 Eğme Numunesi



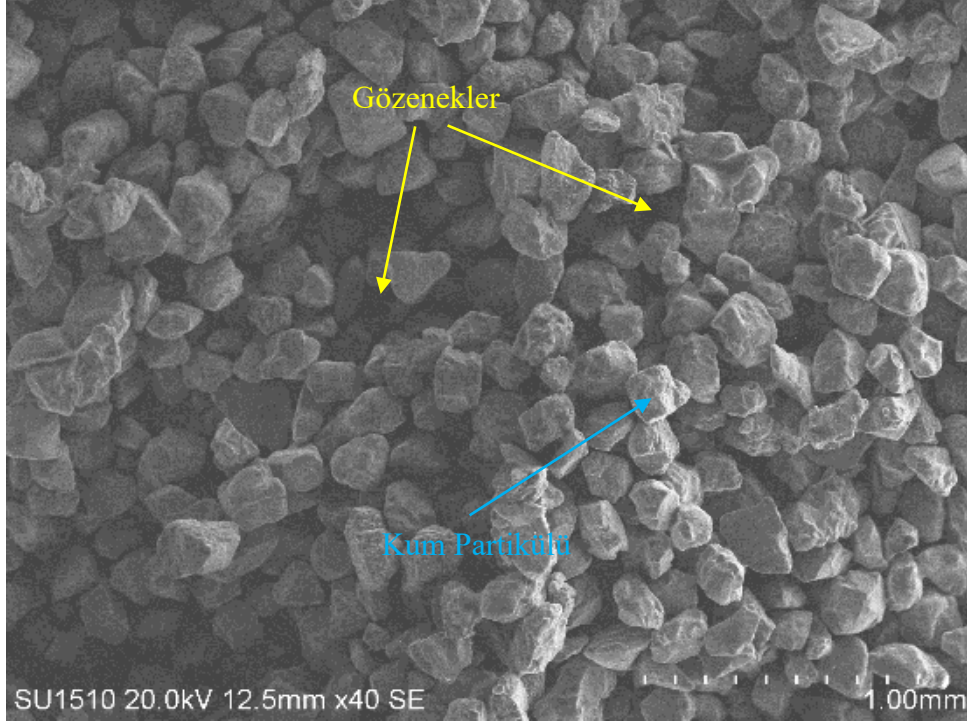
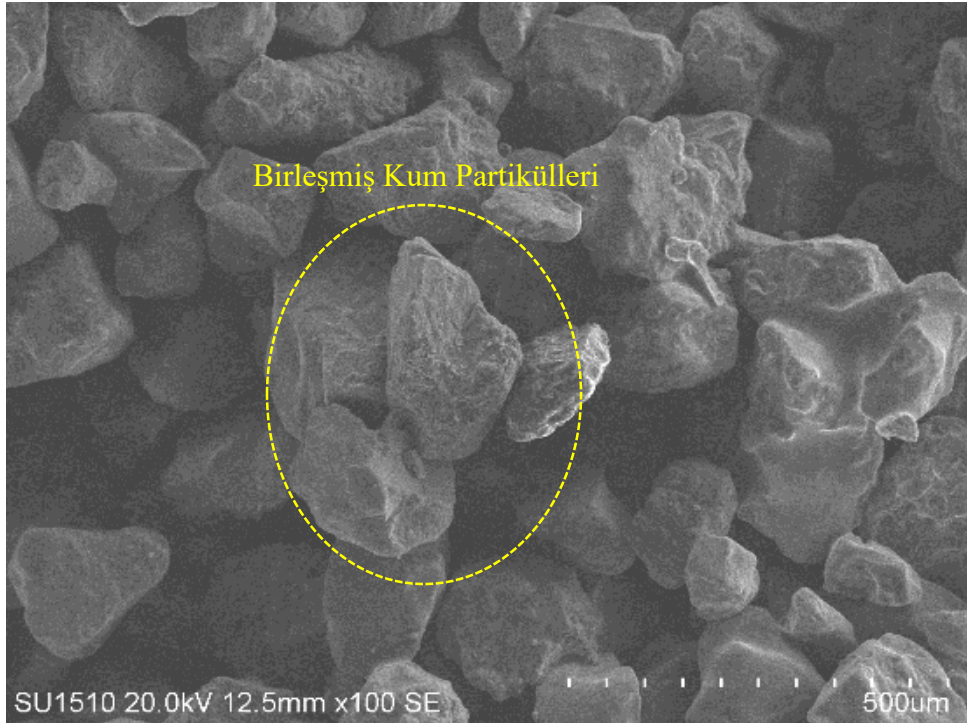
Şekil E2.16. İ6F400 Eğme Numunesi Kırık Yüzey

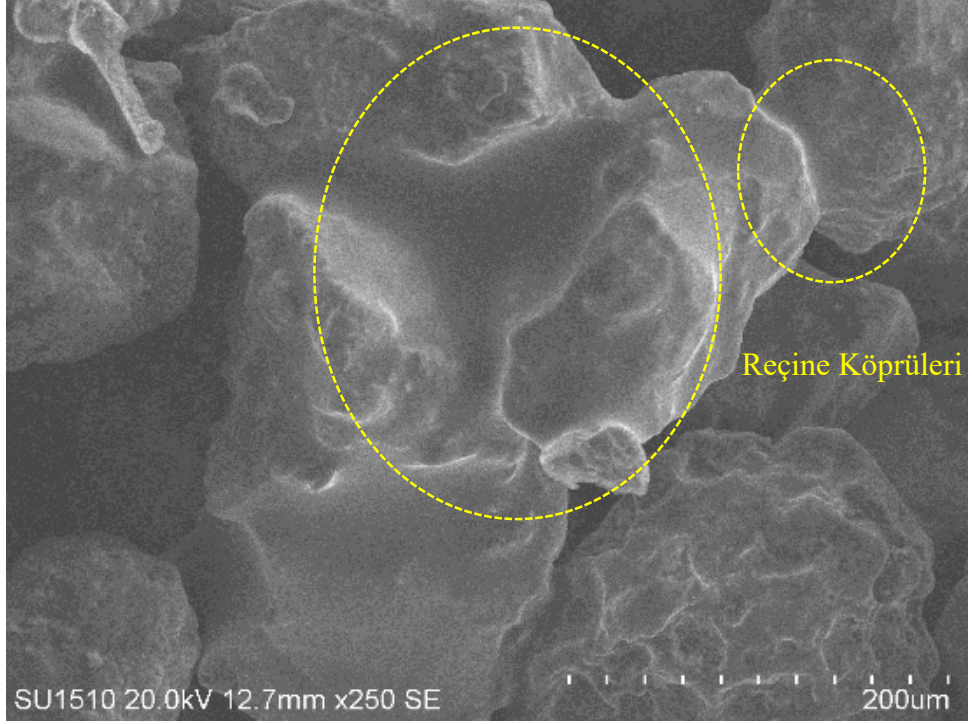


Şekil E2.17. İ6F500 Eğme Numunesi

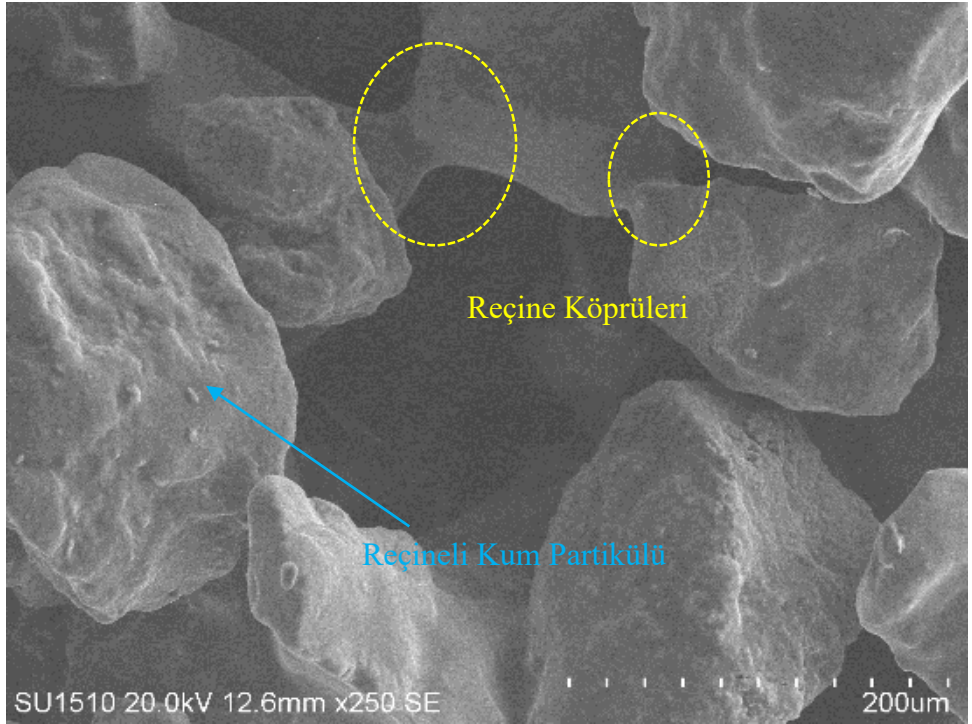


Şekil E2.18. İ6F500 Eğme Numunesi Kırık Yüzey

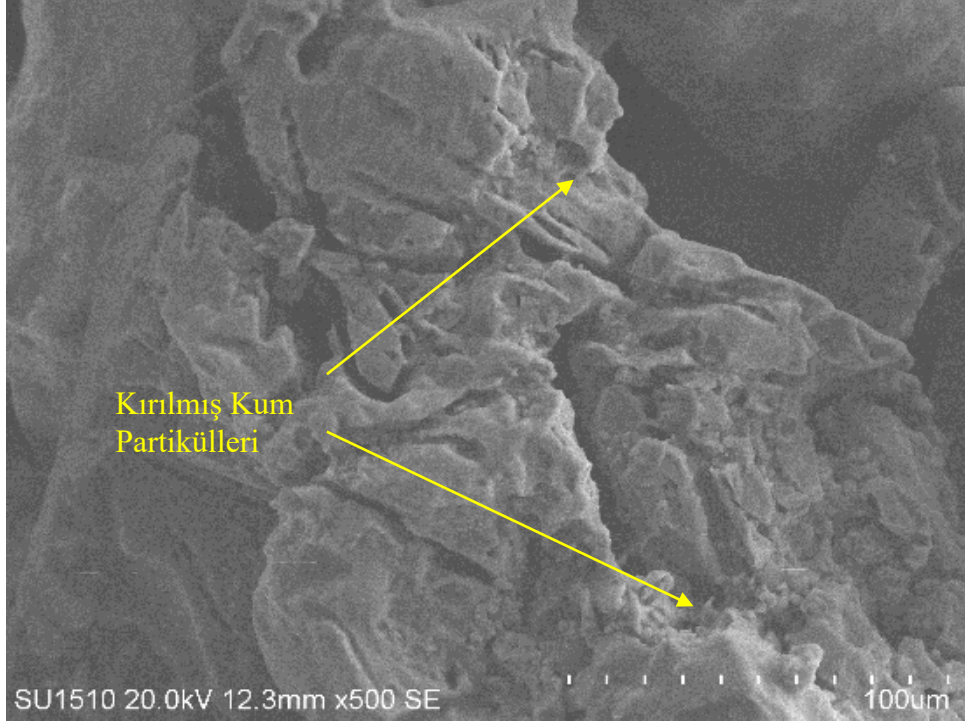
**EK-3 Numunelerin SEM Görüntüleri****Şekil E3.1.** İ6F300 x 40**Şekil E3.2.** İ6F300 x 100



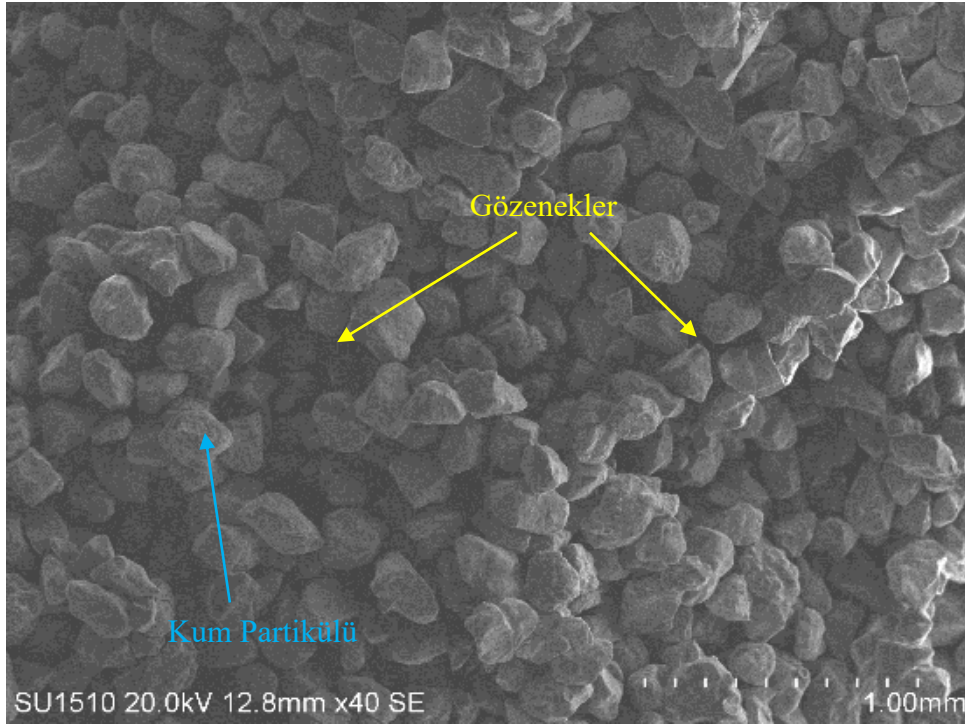
Şekil E3.3. İ6F300 x 250-I



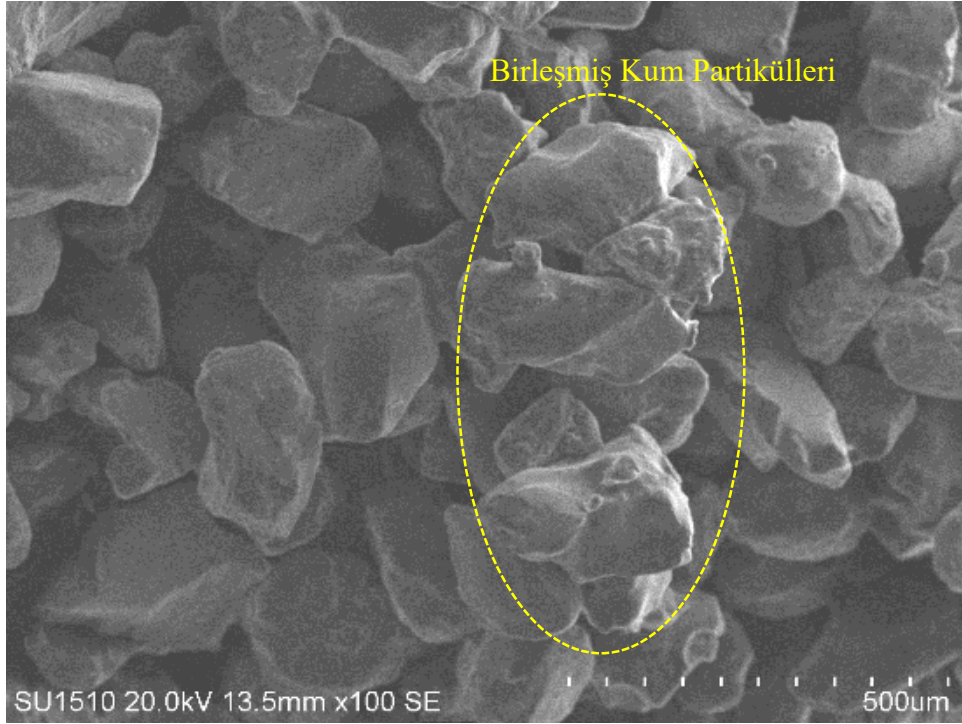
Şekil E3.4. İ6F300 x 250-II



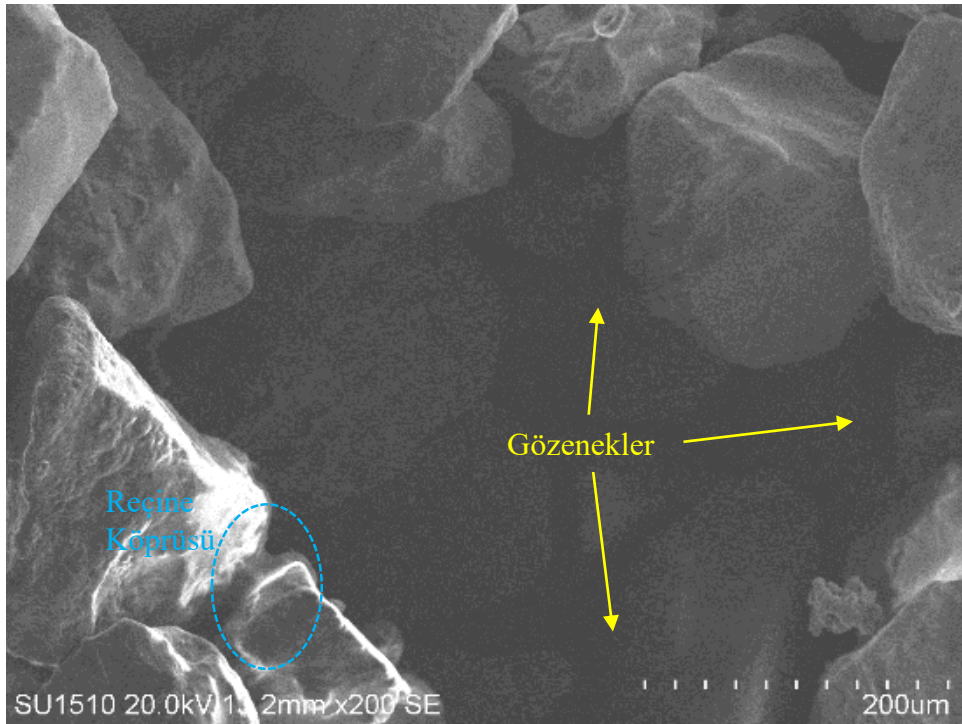
Şekil E3.5. İ6F300 x 500



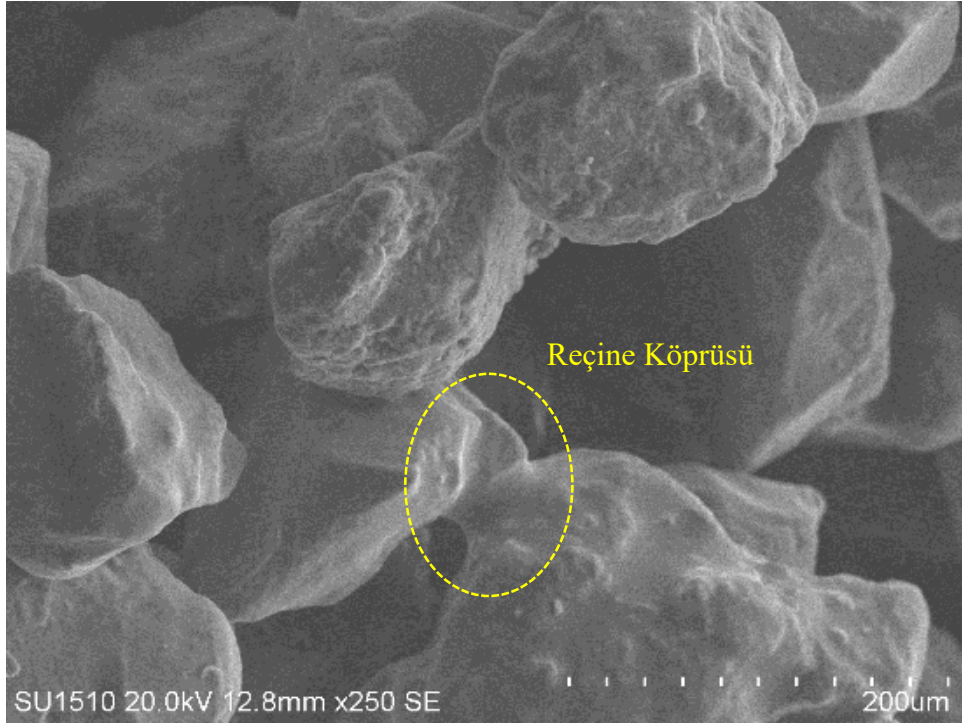
Şekil E3.6. İ6F400 x 40



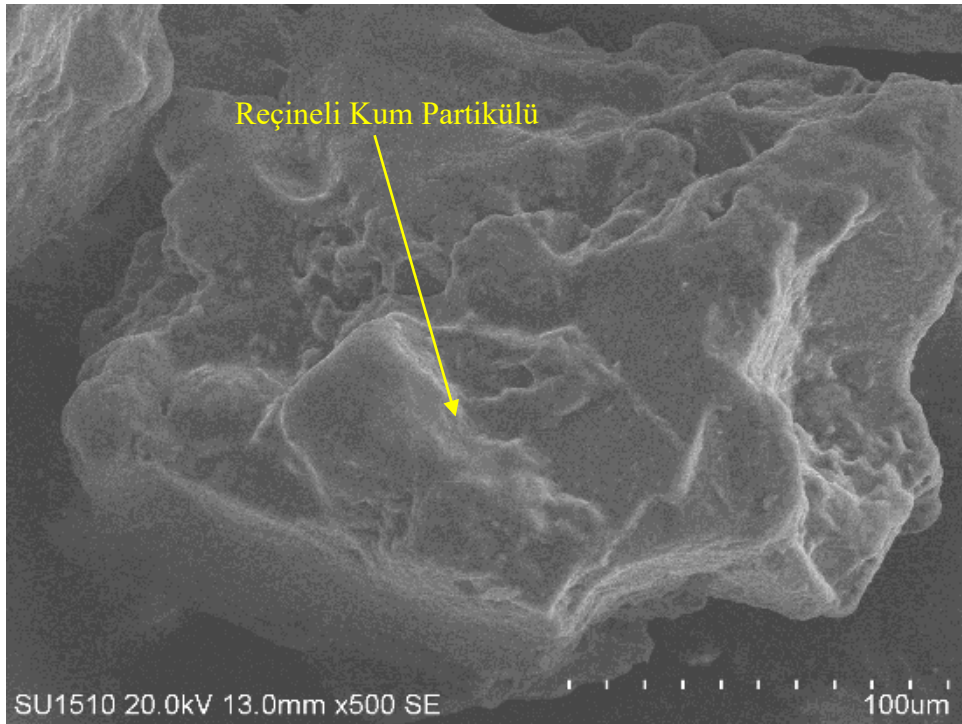
Şekil E3.7. İ6F400 x 100



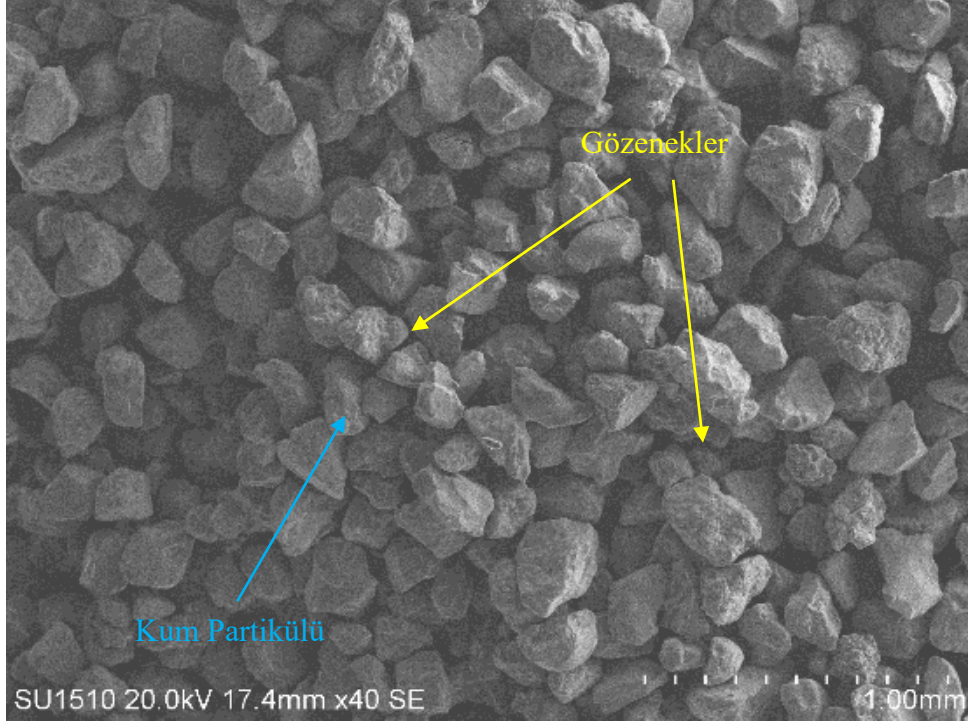
Şekil E3.8. İ6F400 x 200



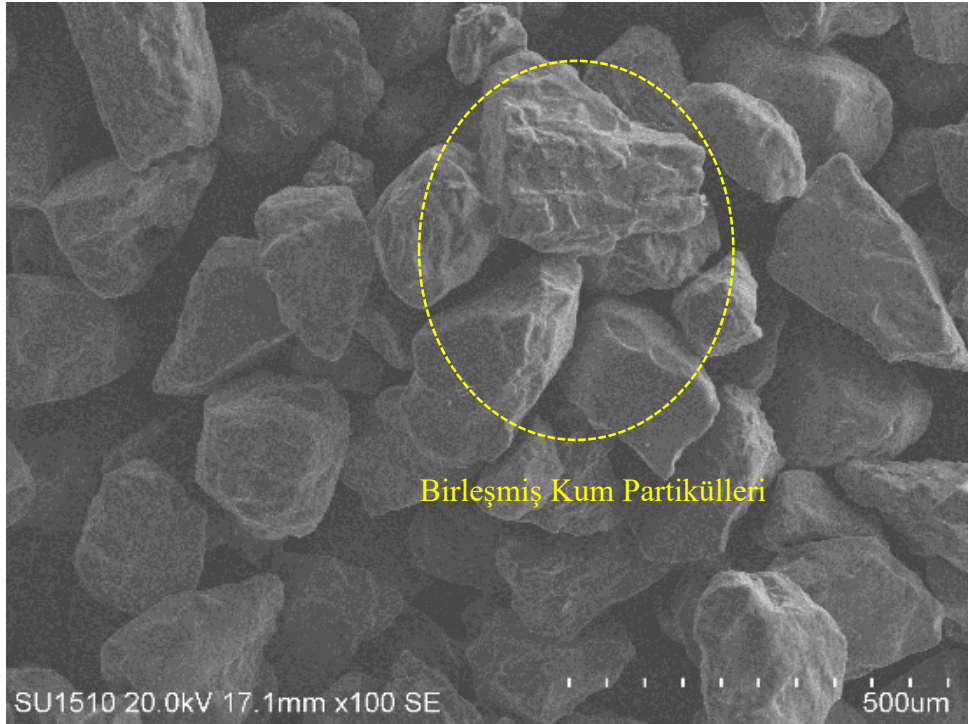
Şekil E3.9. İ6F400 x 250



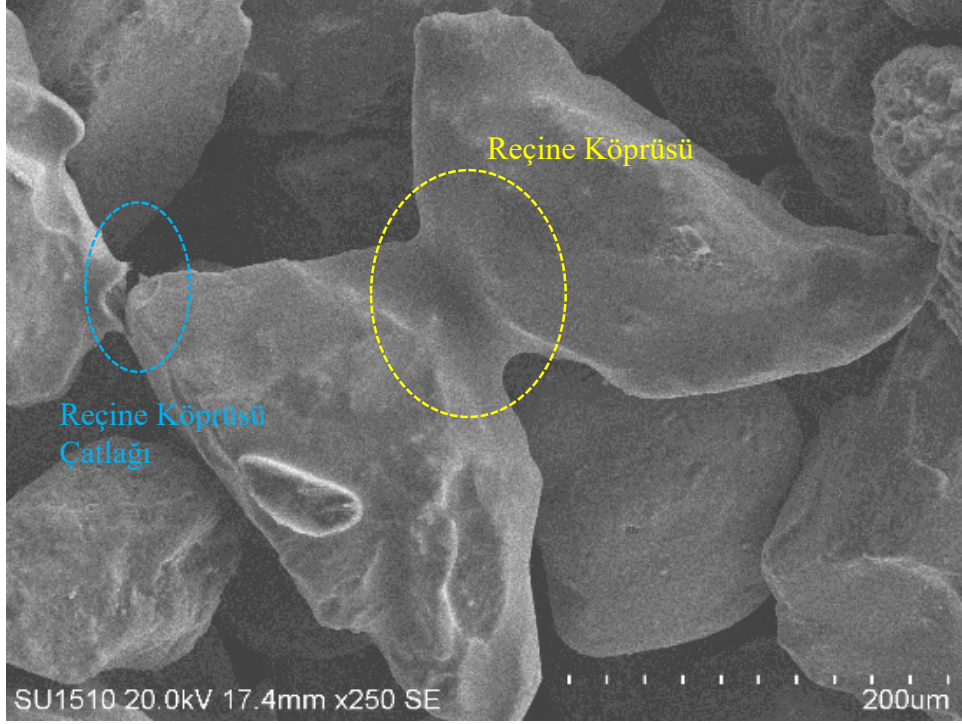
Şekil E3.10. İ6F400 x 500



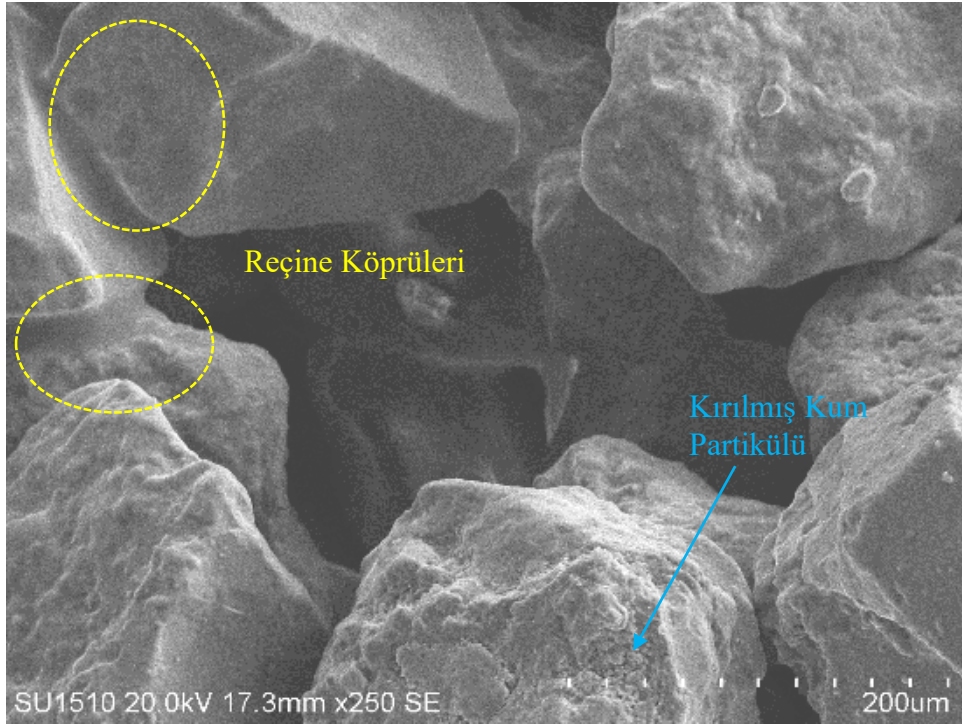
Şekil E3.11. İ7F300 x 40



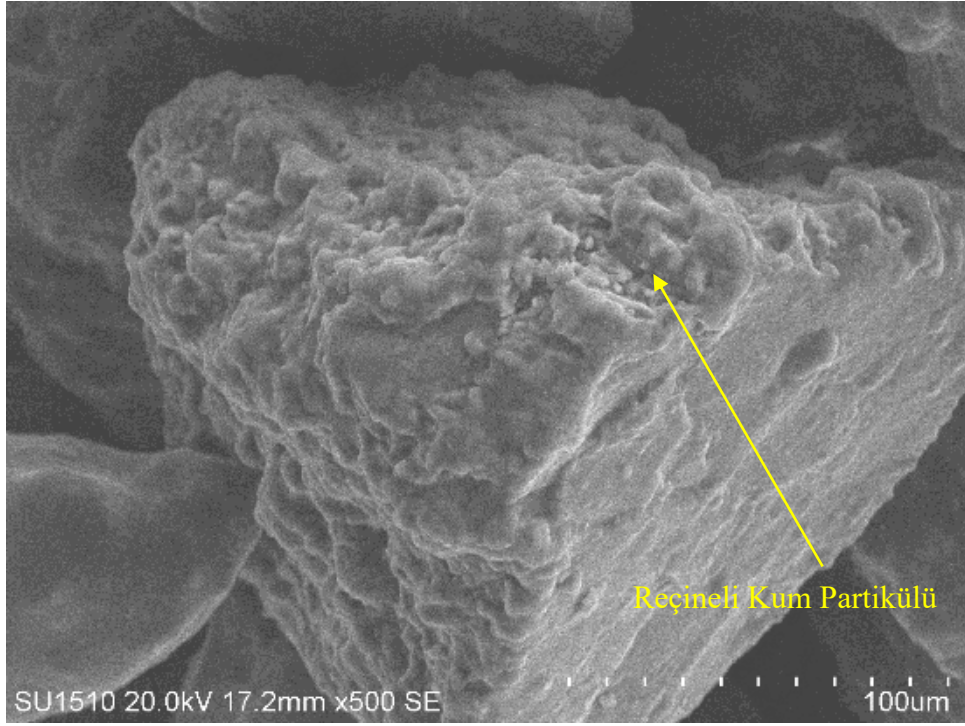
Şekil E3.12. İ7F300 x 100



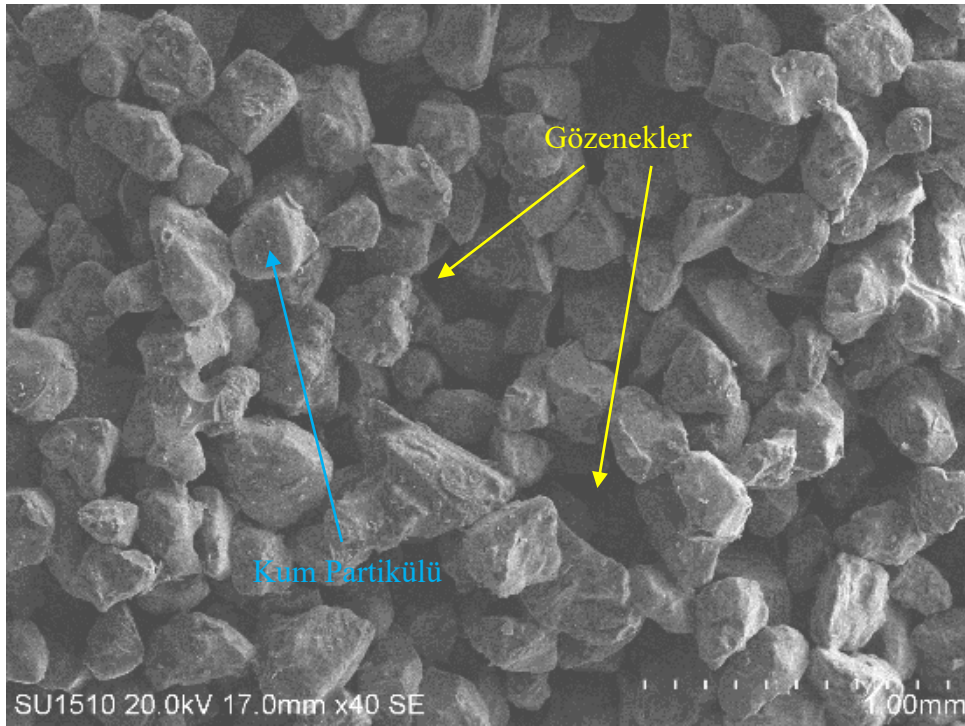
Şekil E3.13. İ7F300 x 250-I



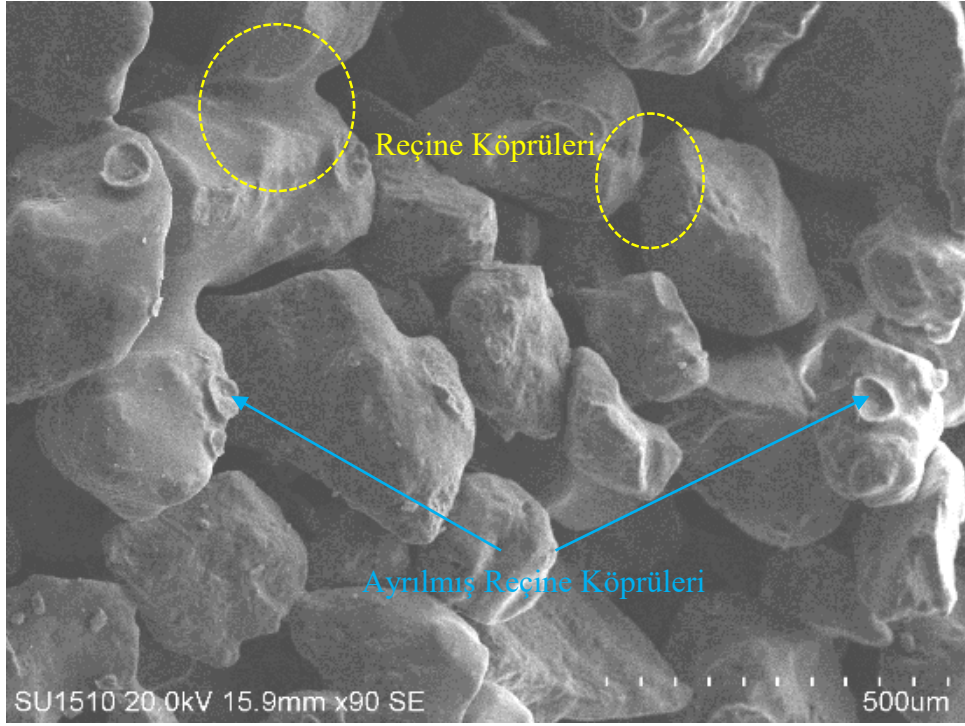
Şekil E3.14. İ7F300 x 250-II



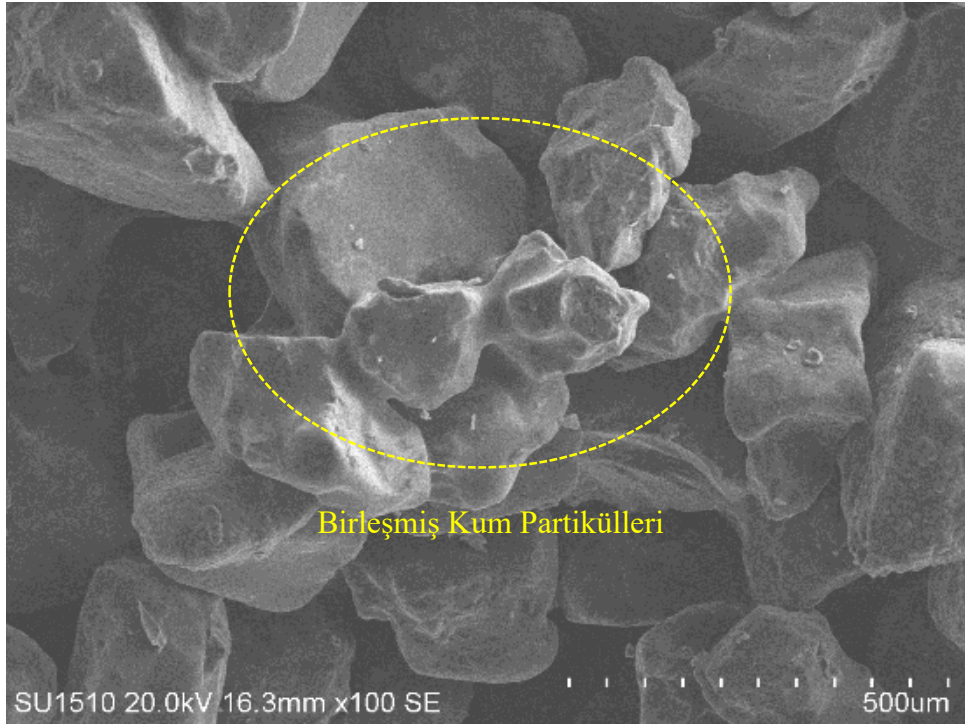
Şekil E3.15. İ7F300 x 500



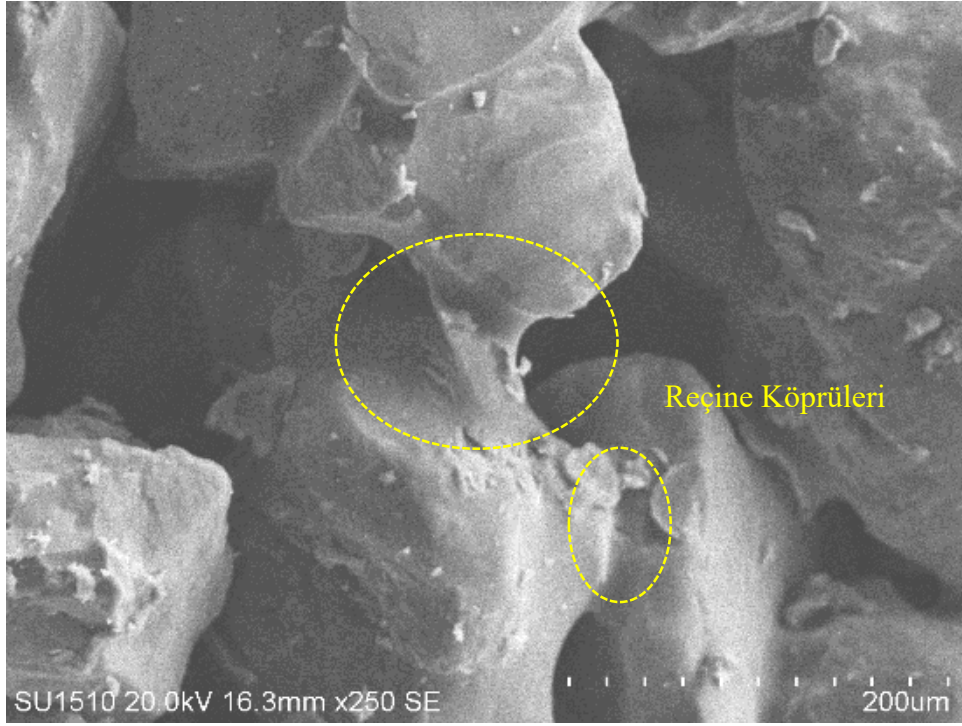
Şekil E3.16. K5F300 x 40



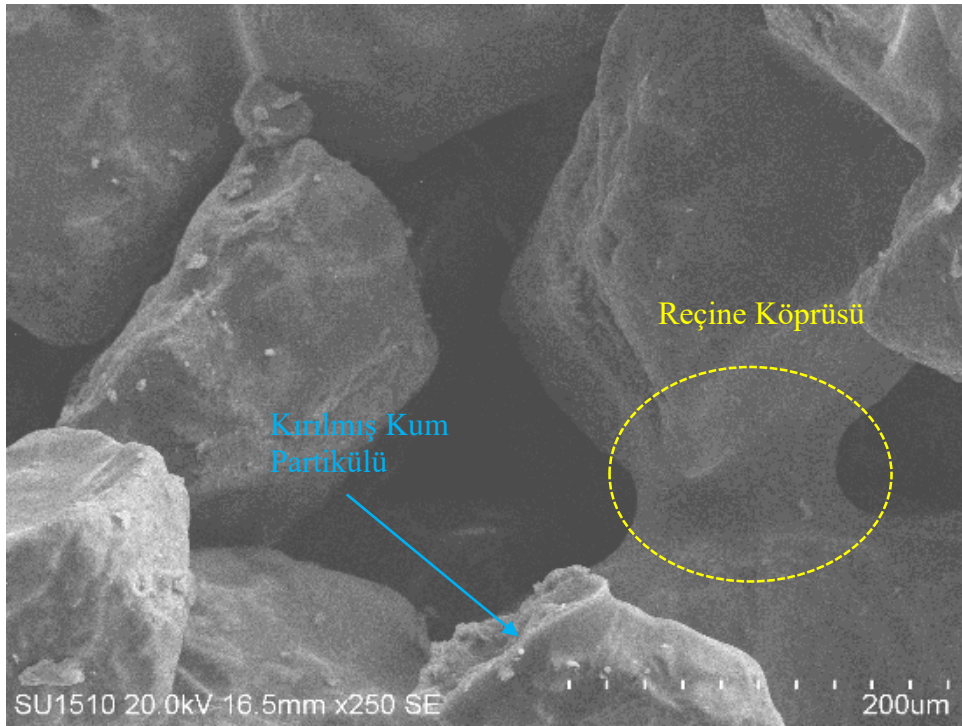
Şekil E3.17. K5F300 x 90



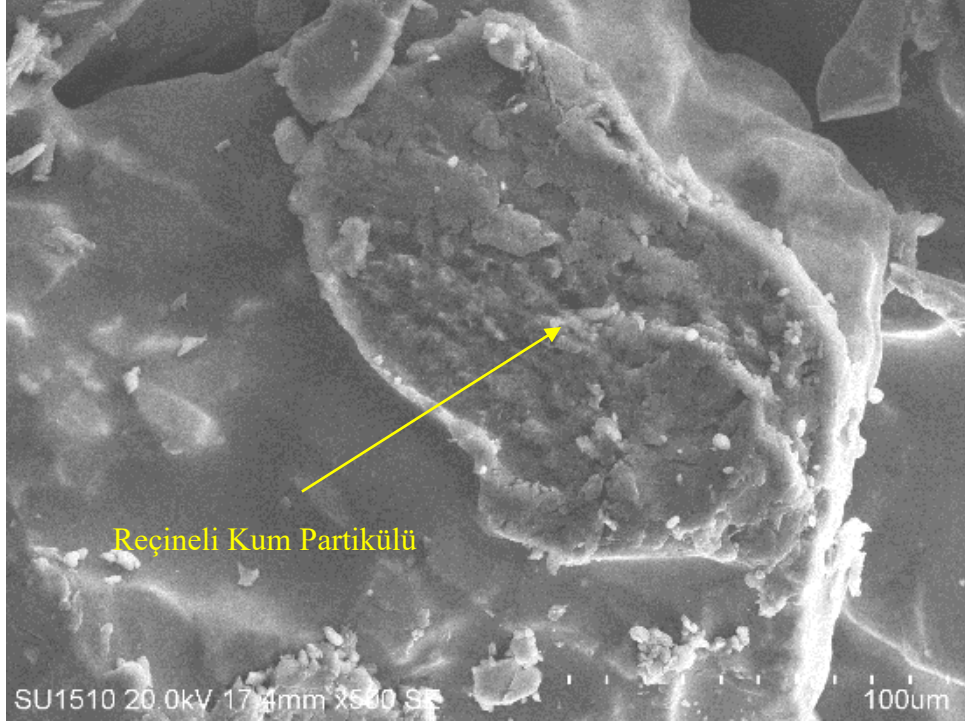
Şekil E3.18. K5F300 x 100



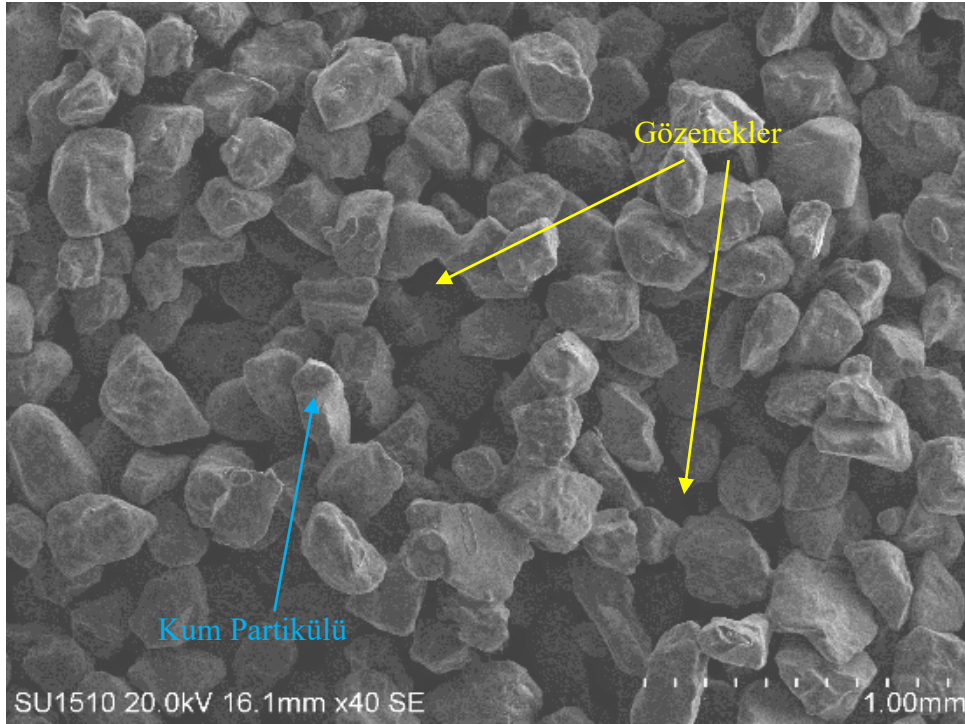
Şekil E3.19. K5F300 x 250-I



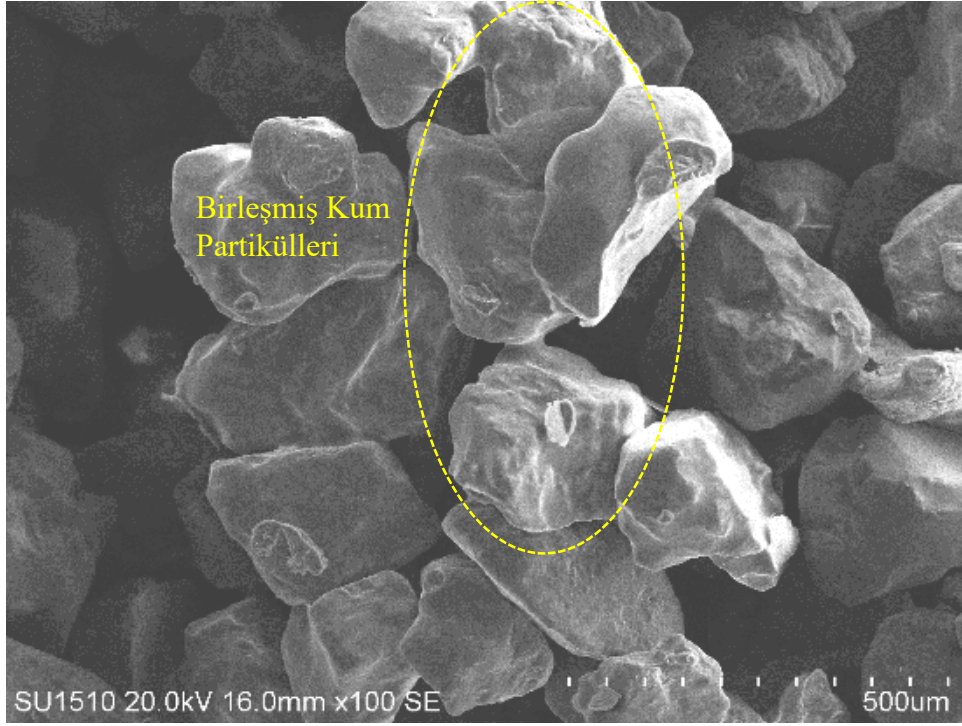
Şekil E3.20. K5F300 x 250-II



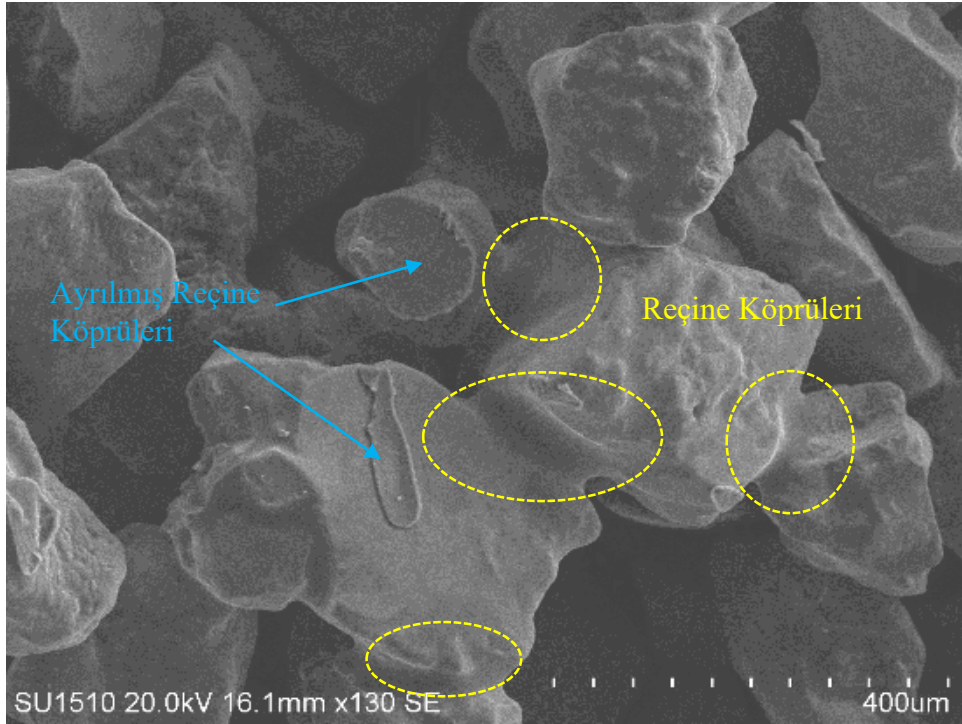
Şekil E3.21. K5F300 x 500



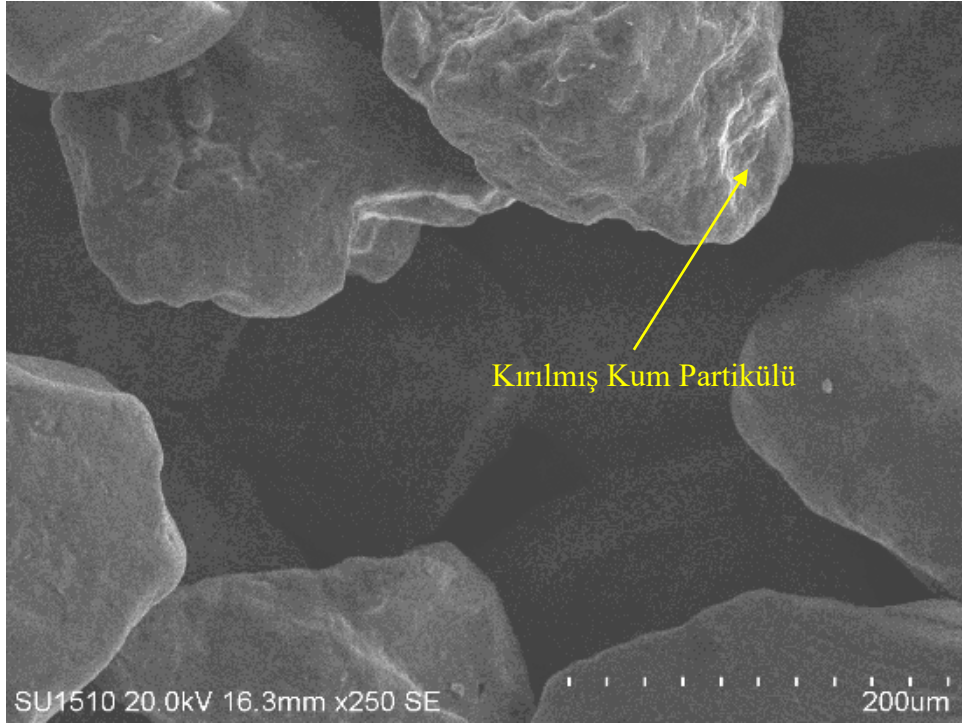
Şekil E3.22. K6F300 x 40



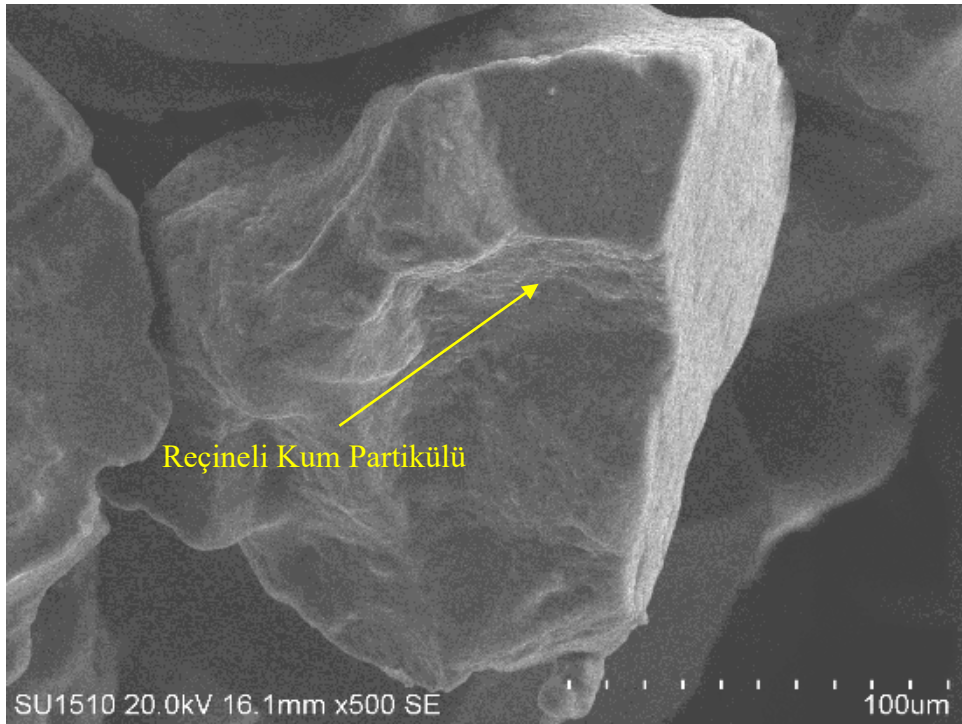
Şekil E3.23. K6F300 x 100



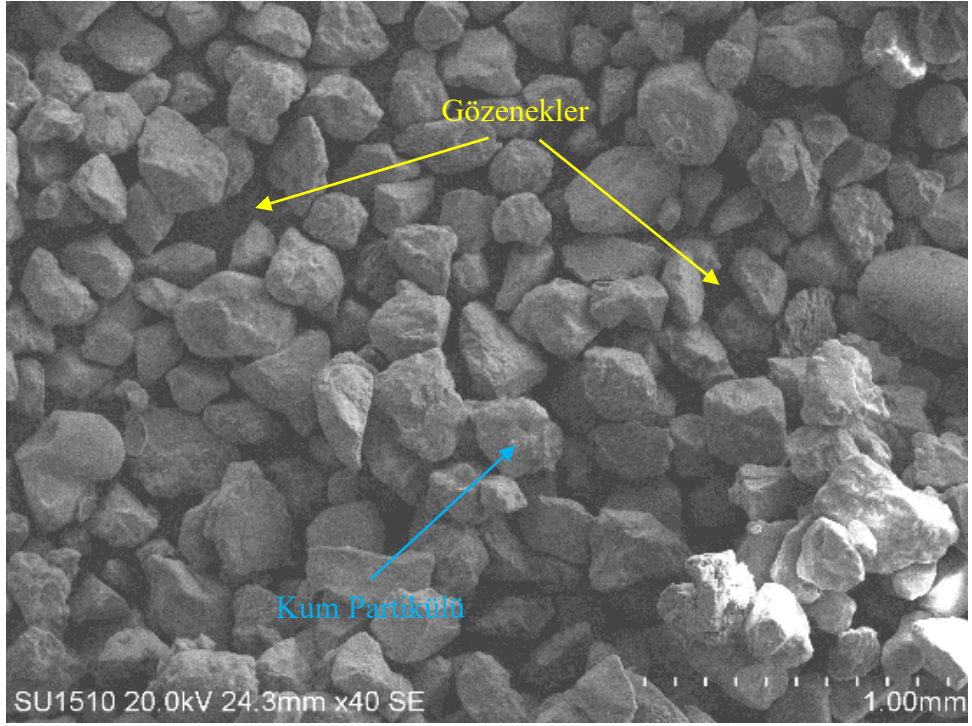
Şekil E3.24. K6F300 x 130



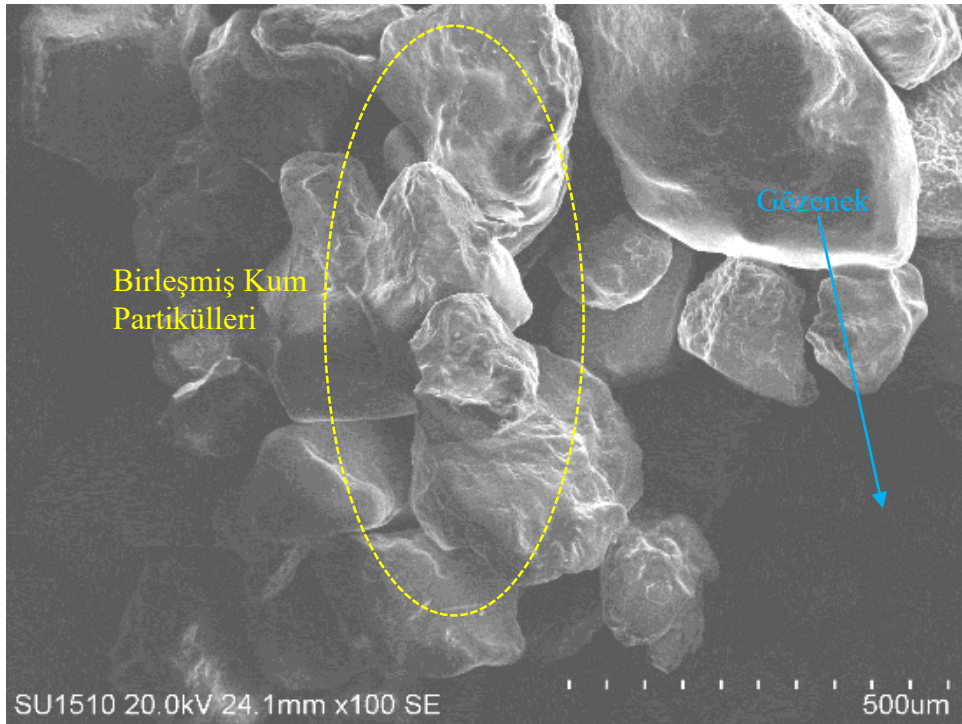
Şekil E3.25. K6F300 x 250



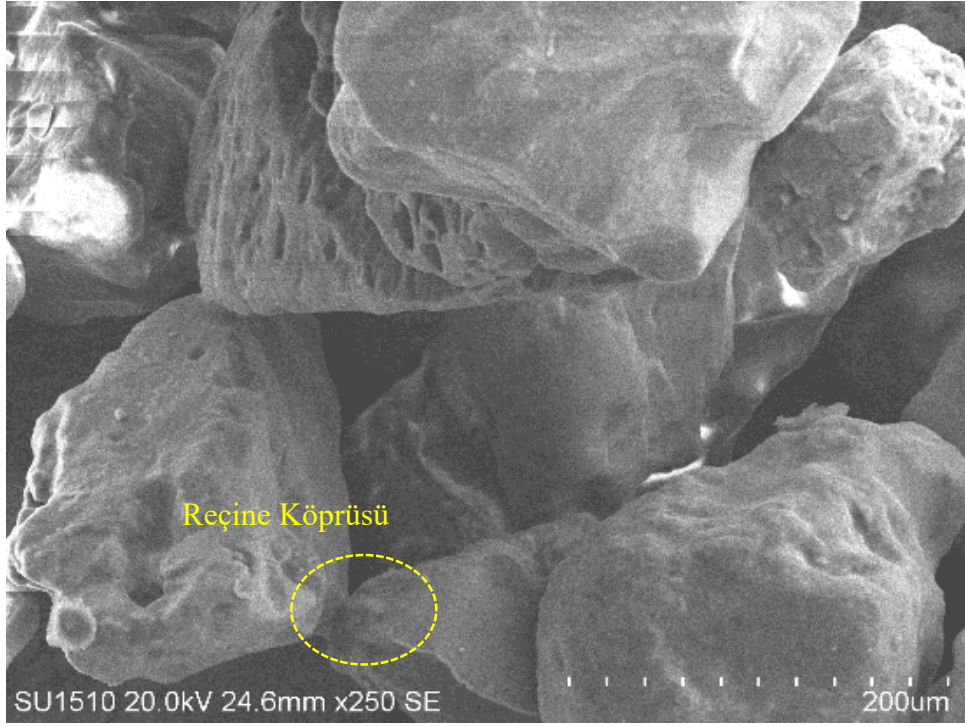
Şekil E3.26. K6F300 x 500



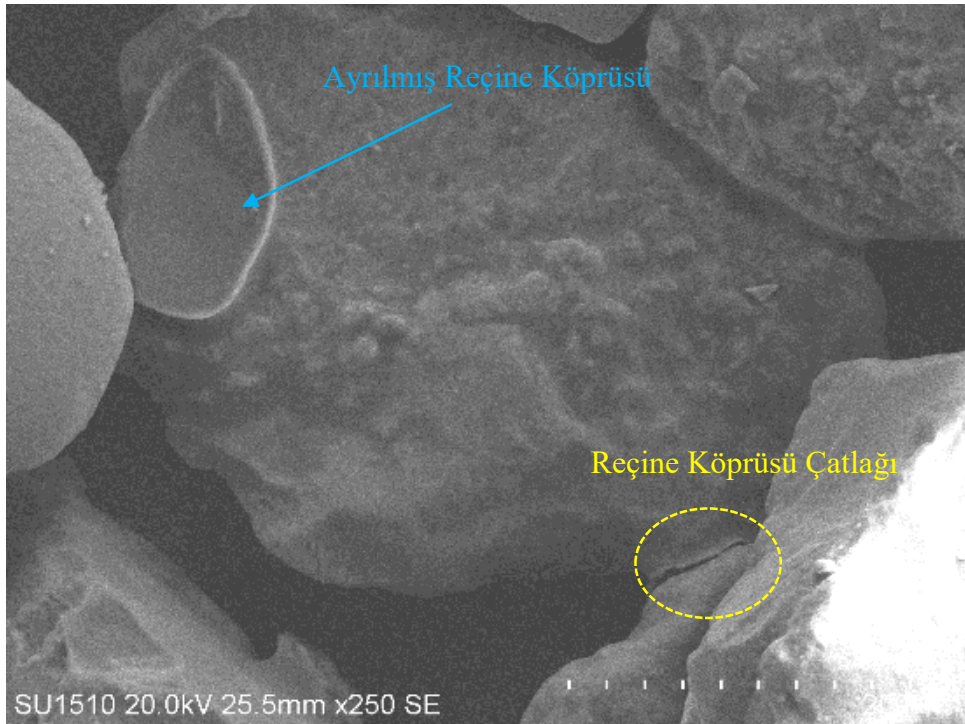
Şekil E3.27. K6F400 x 40



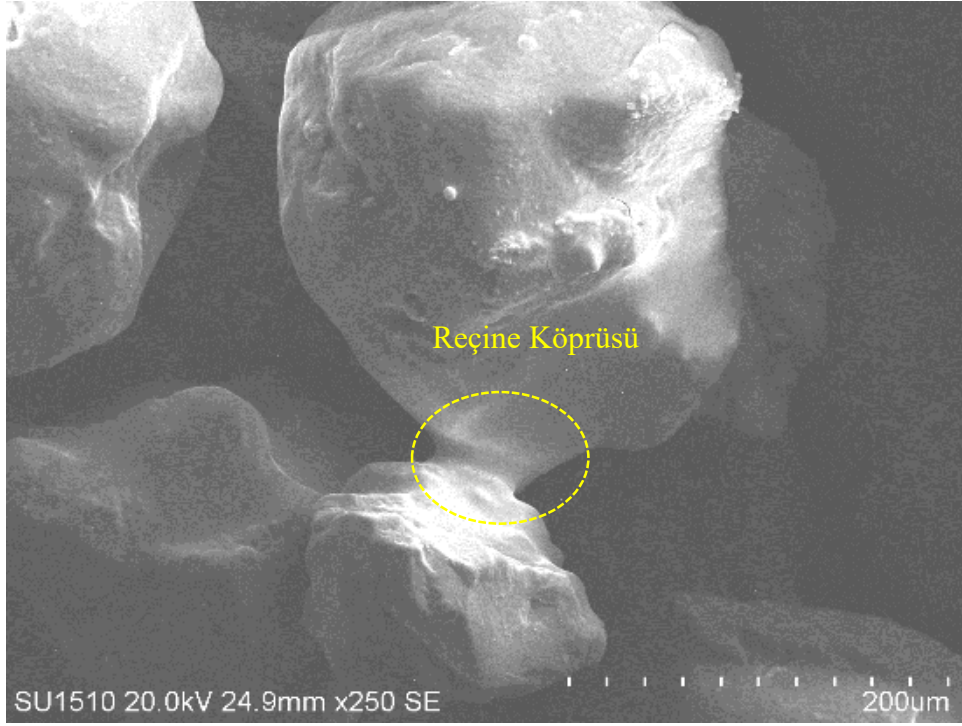
Şekil E3.28. K6F400 x 100



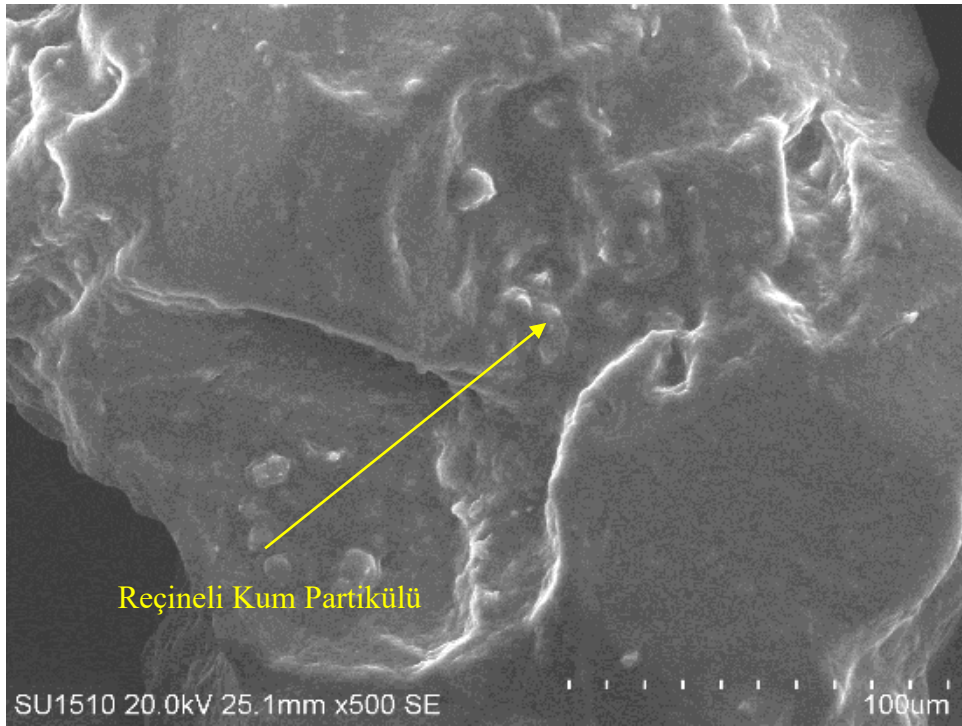
Şekil E3.29. K6F400 x 250-I



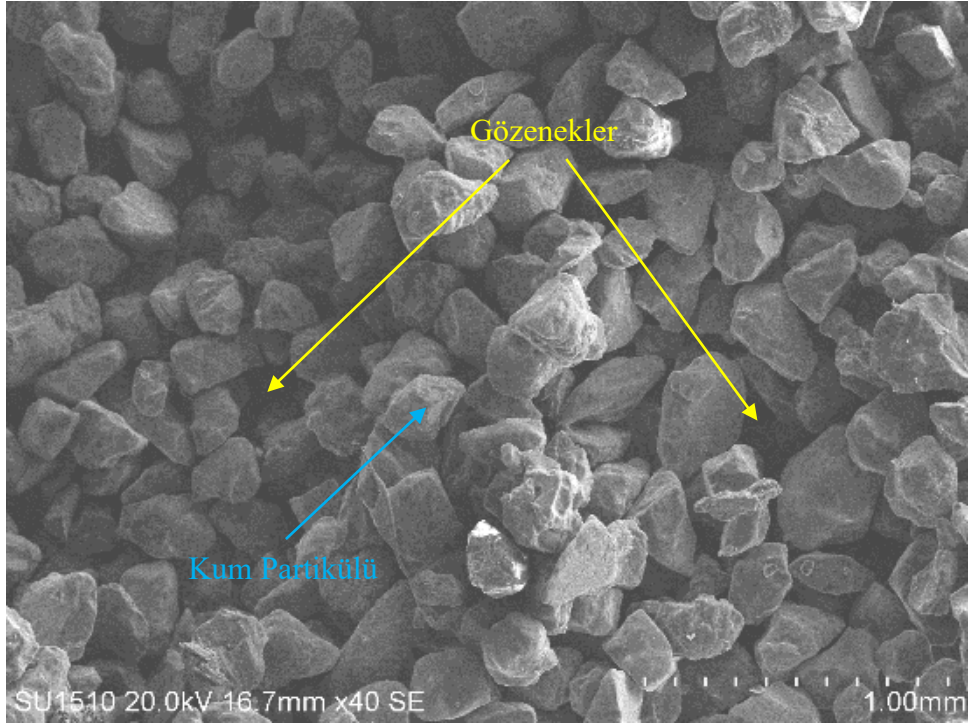
Şekil E3.30. K6F400 x 250-II



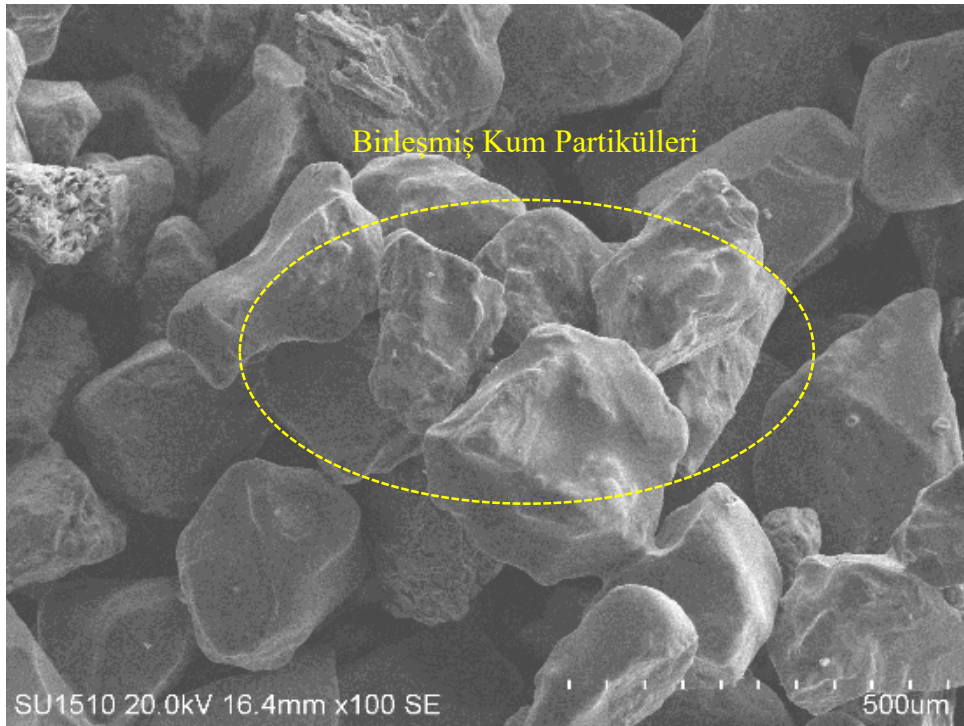
Şekil E3.31. K6F400 x 250-III



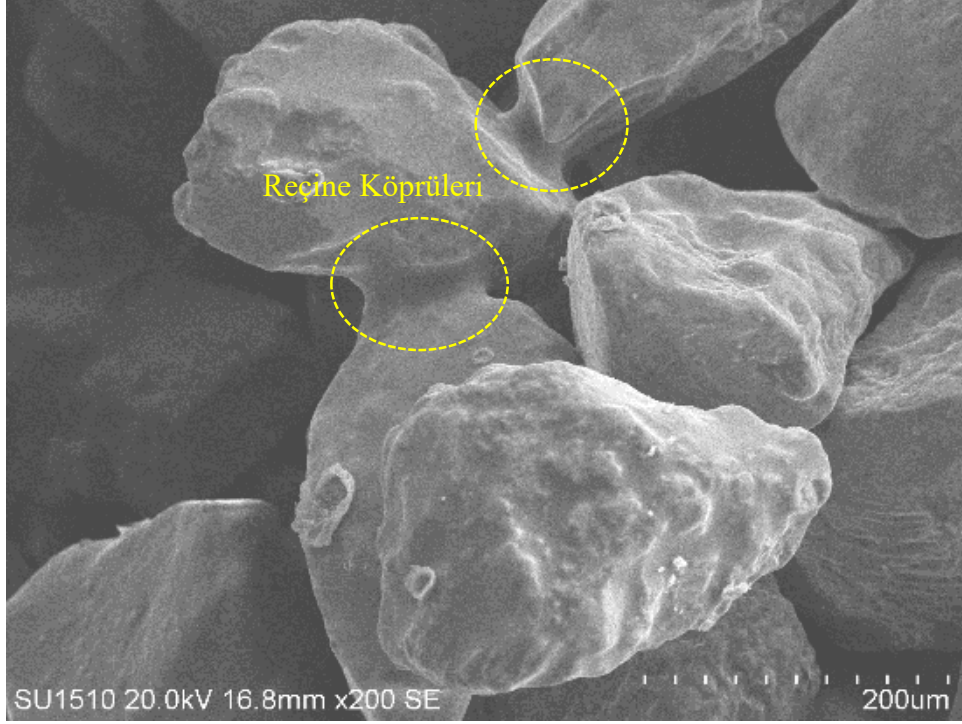
Şekil E3.32. K6F400 x 500



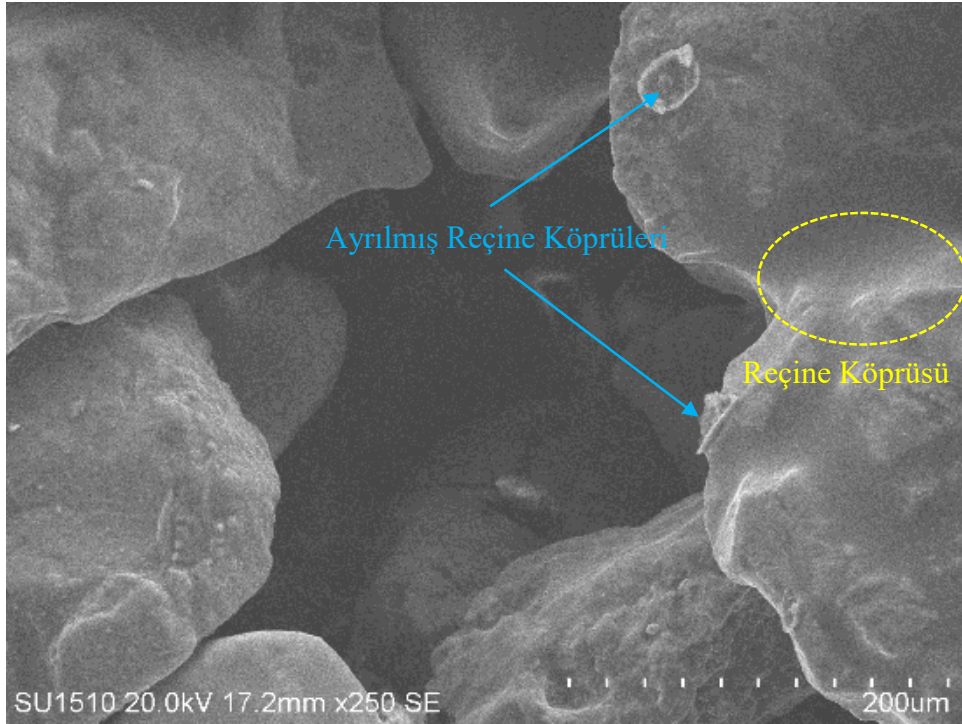
Şekil E3.33. K7F300 x 40



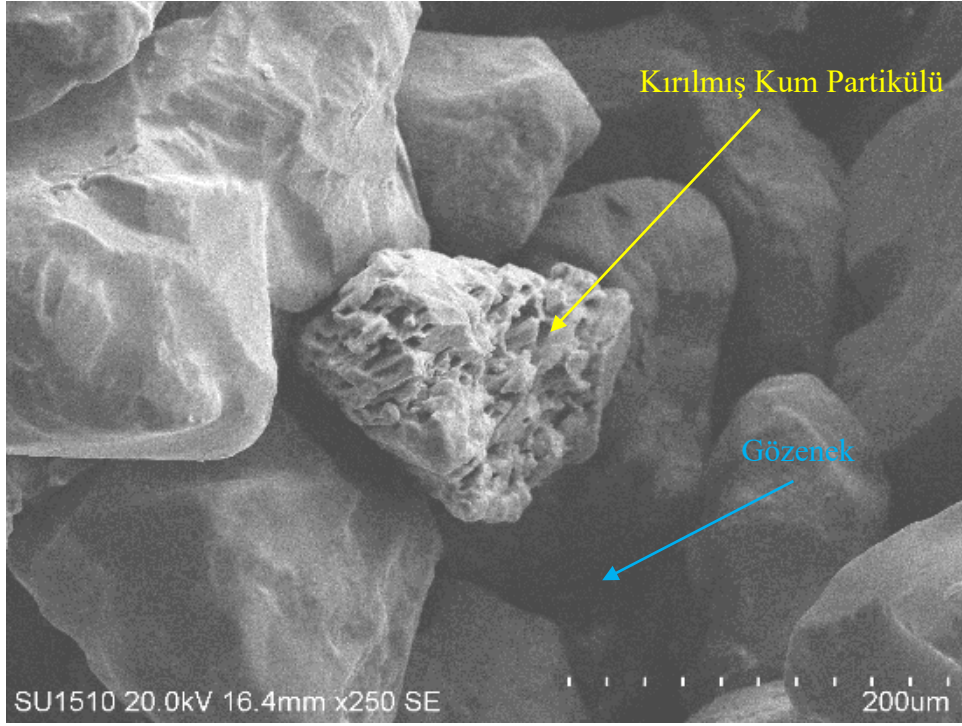
Şekil E3.34. K7F300 x 100



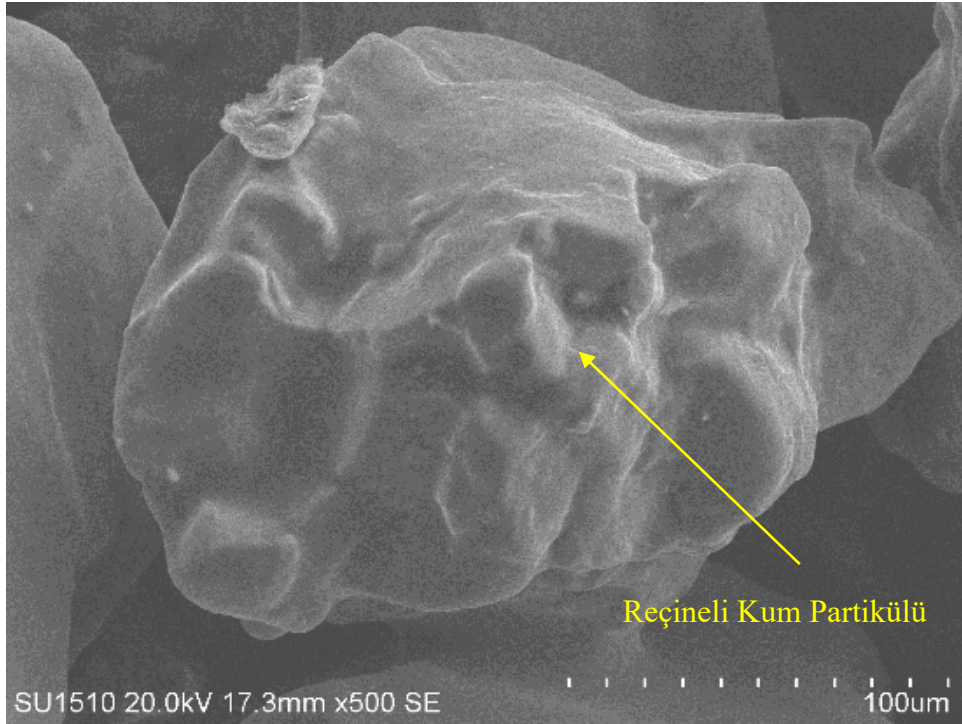
Şekil E3.35. K7F300 x 200



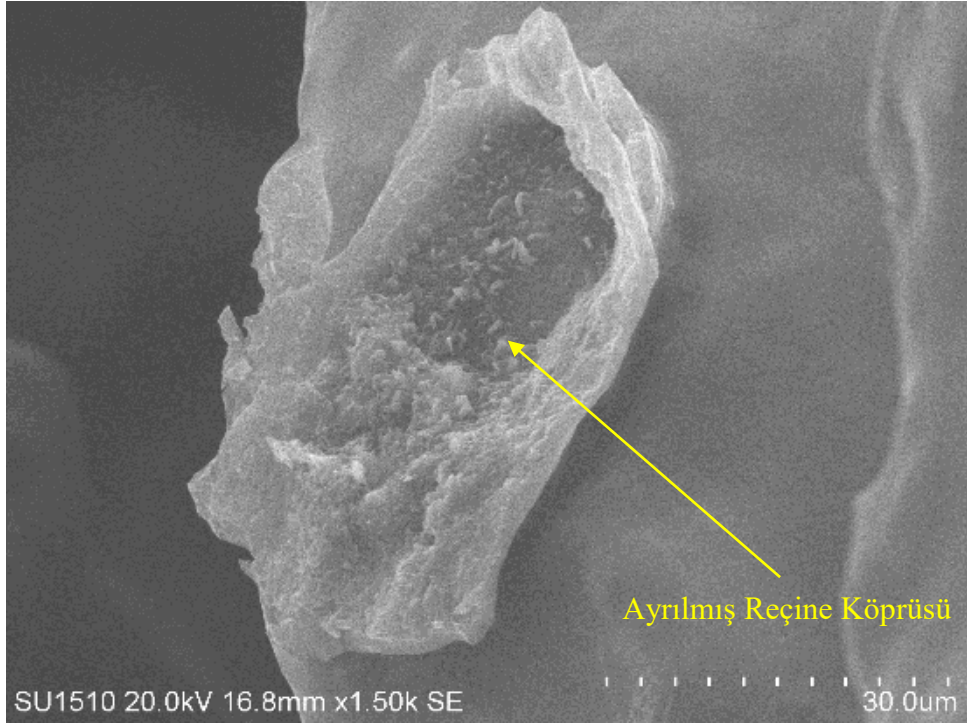
Şekil E3.36. K7F300 x 250-I



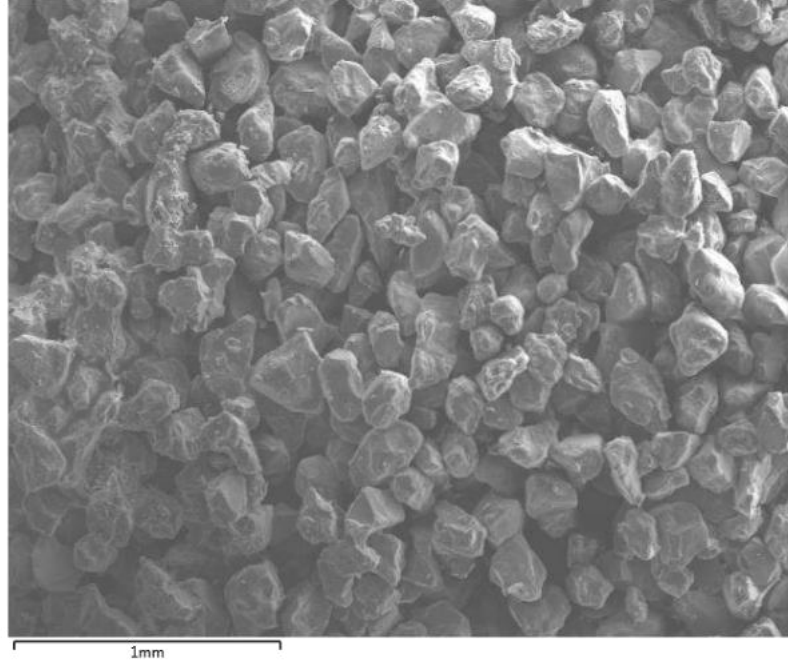
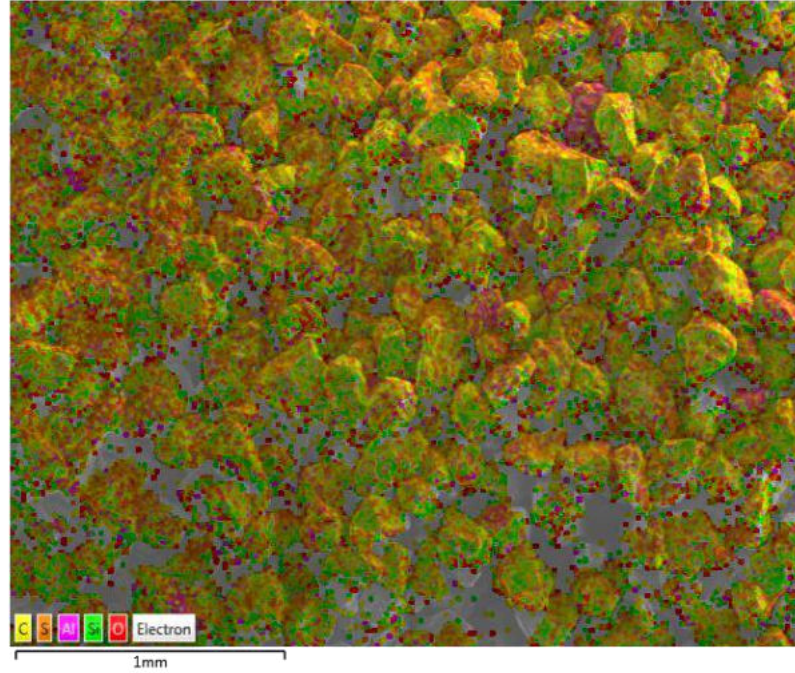
Şekil E3.37. K7F300 x 250-II

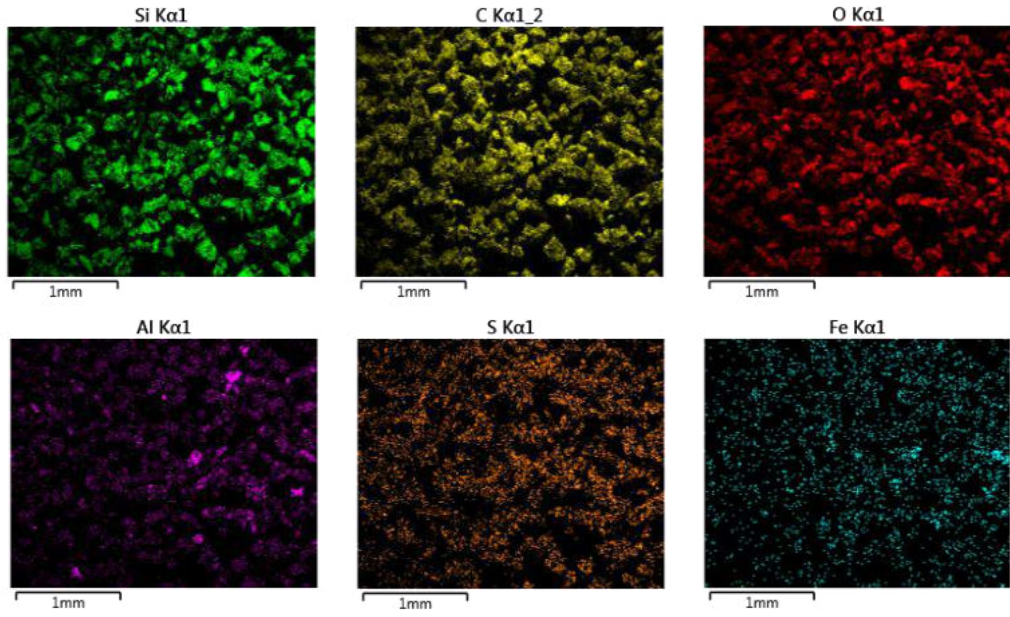


Şekil E3.38. K7F300 x 500

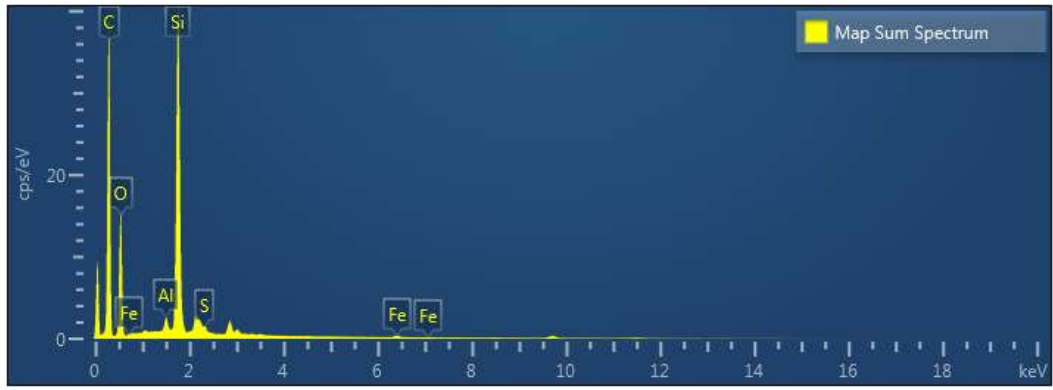


Şekil E3.39. K7F300 x 1500

**Ek-4 Numunelerin EDX Analizleri****Şekil E4.1. İ5F300 SEM****Şekil E4.2. İ5F300 EDS**



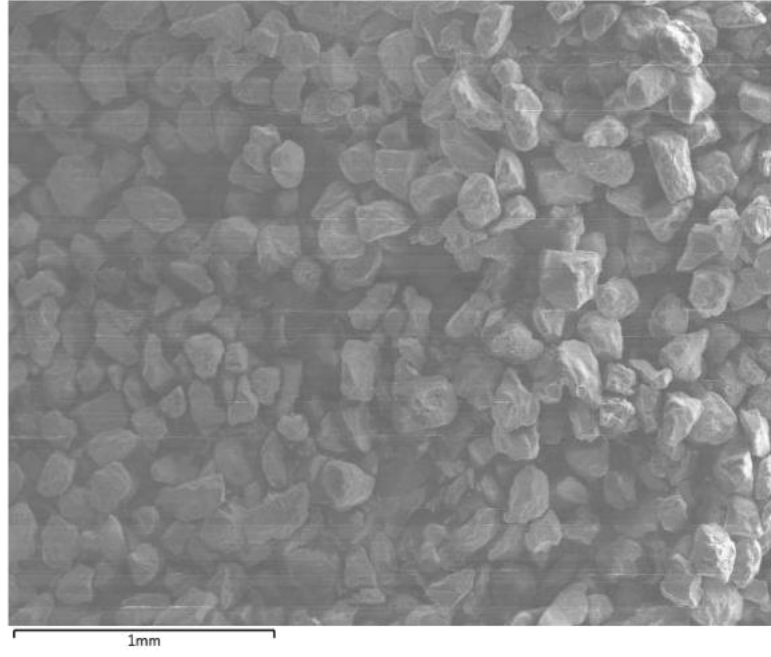
Şekil E4.3. İ5F300 Haritalama



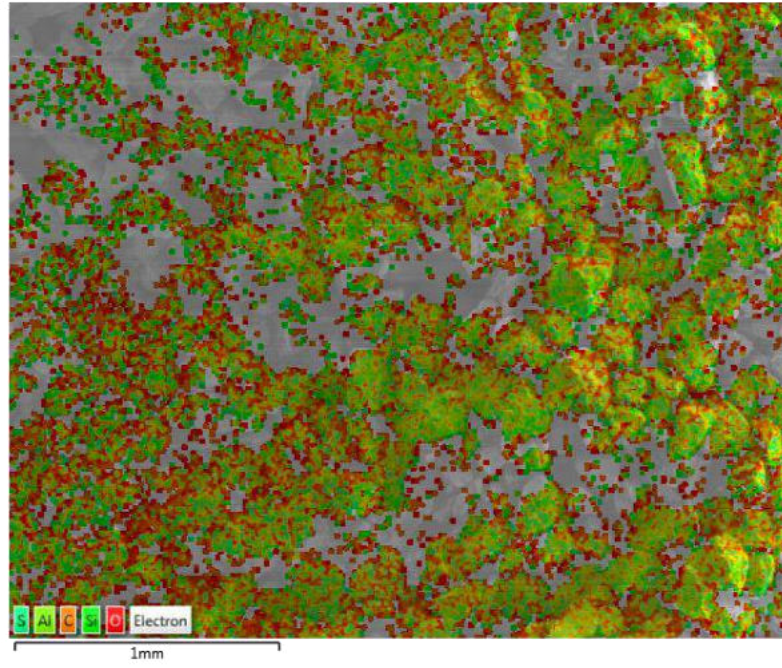
Şekil E4.4. İ5F300 EDX Grafiği

Çizelge E4.1. İ5F300 EDX Spektrum

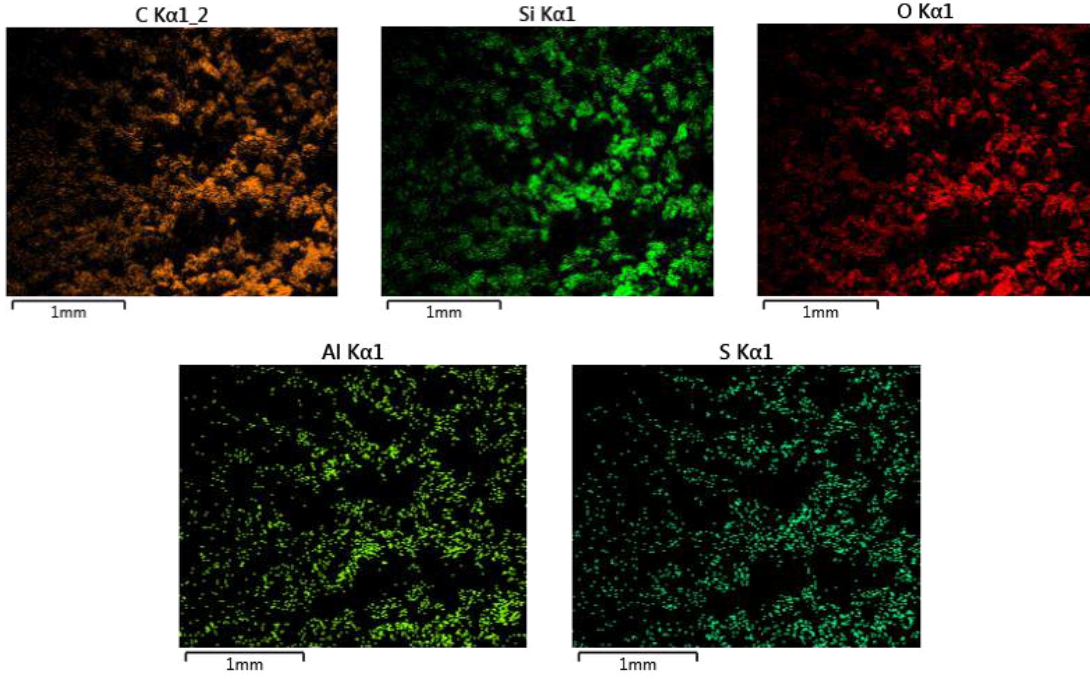
Harita Toplam Spektrumu				
Element	Çizgi Tipi	% Ağırlık	% Ağırlık Sigma	% Atomik
O	K Serisi	30,80	0,19	26,36
Al	K Serisi	0,33	0,01	0,17
Si	K Serisi	7,21	0,04	3,51
Fe	K Serisi	0,17	0,02	0,04
C	K Serisi	61,27	0,19	69,83
S	K Serisi	0,22	0,01	0,09
Toplam		100,00		100,00



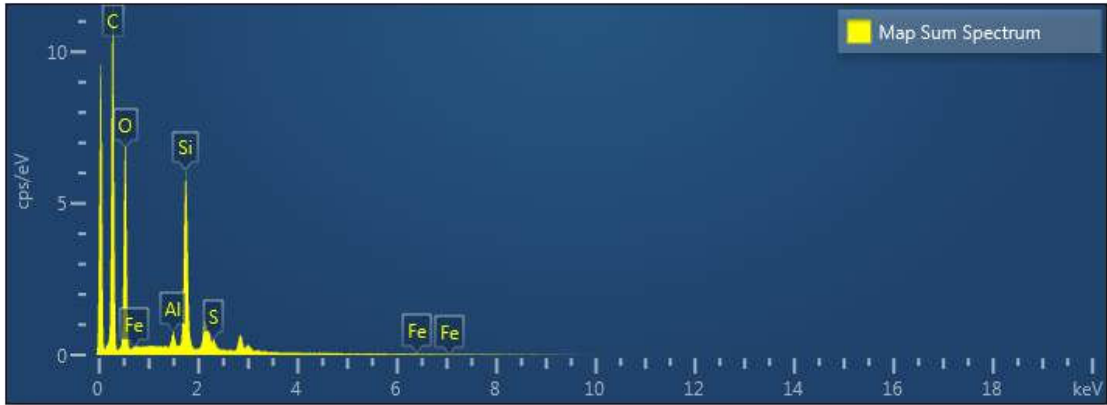
Şekil E4.5. İ7F300 SEM



Şekil E4.6. İ7F300 EDS



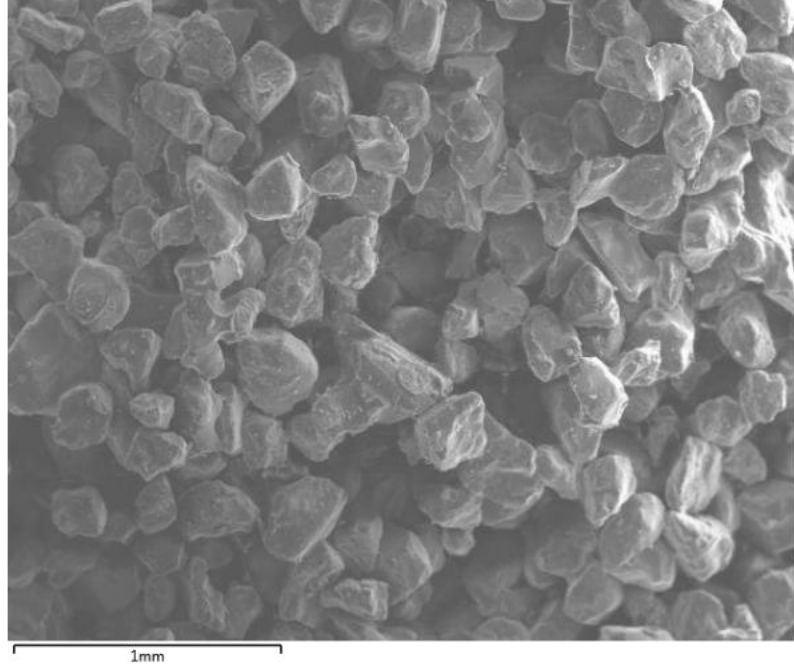
Şekil E4.7. İ7F300 Haritalama



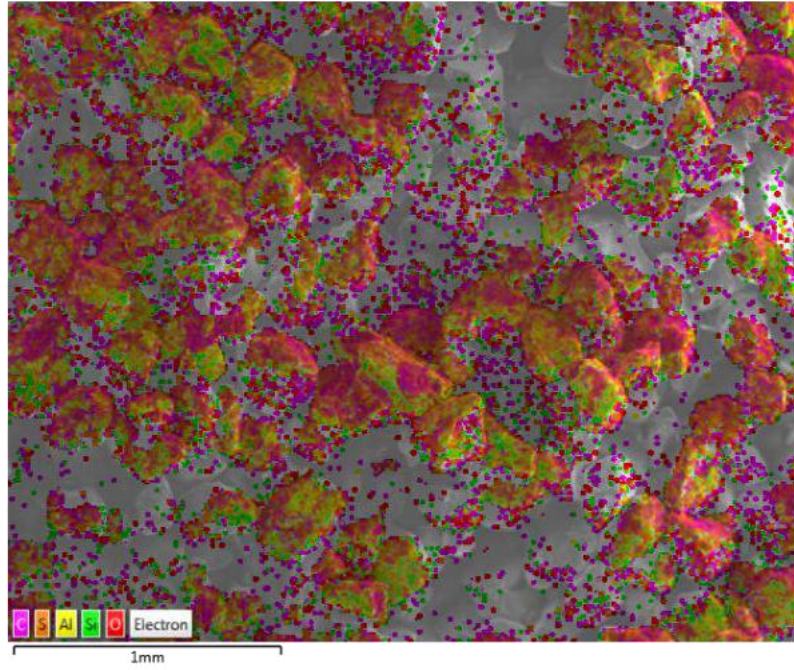
Şekil E4.8. İ7F300 EDX Grafiği

Çizelge E4.2. İ7F300 EDX Spektrum

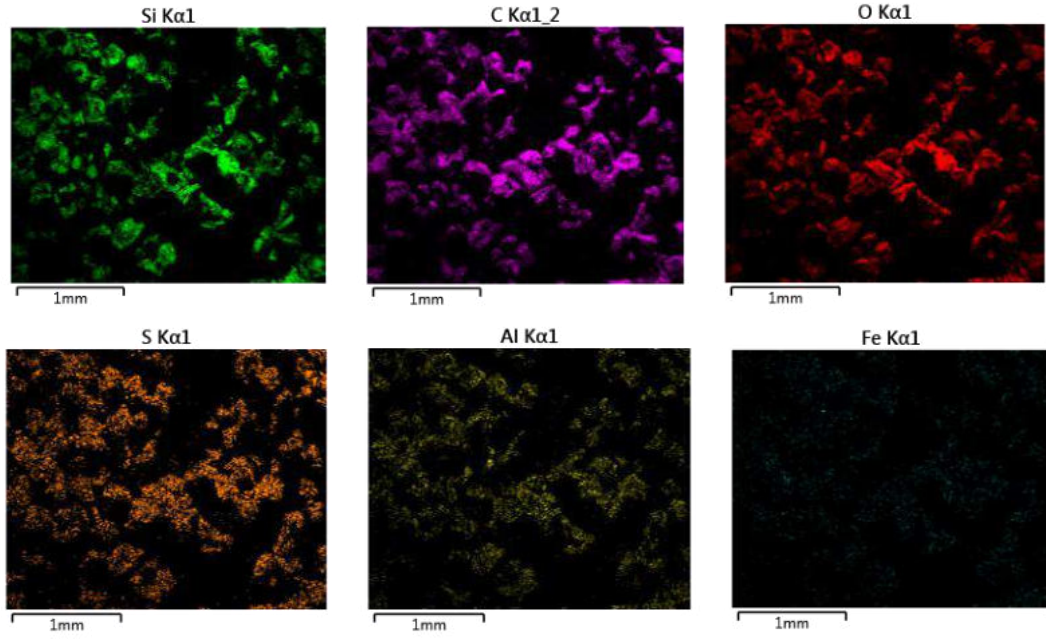
Harita Toplamı Spektrumu				
Element	Çizgi Tipi	% Ağırlık	% Ağırlık Sigma	% Atomik
O	K Serisi	41,24	0,35	35,53
Si	K Serisi	3,80	0,05	1,87
Al	K Serisi	0,37	0,02	0,19
C	K Serisi	54,28	0,35	62,29
Fe	K Serisi	0,00	0,02	0,00
S	K Serisi	0,30	0,02	0,13
Toplam		100,00		100,00



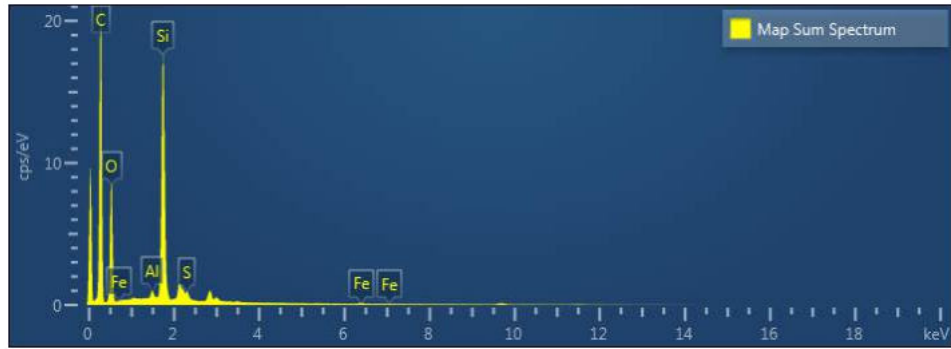
Şekil E4.9. K5F300 SEM



Şekil E4.10. K5F300 EDS



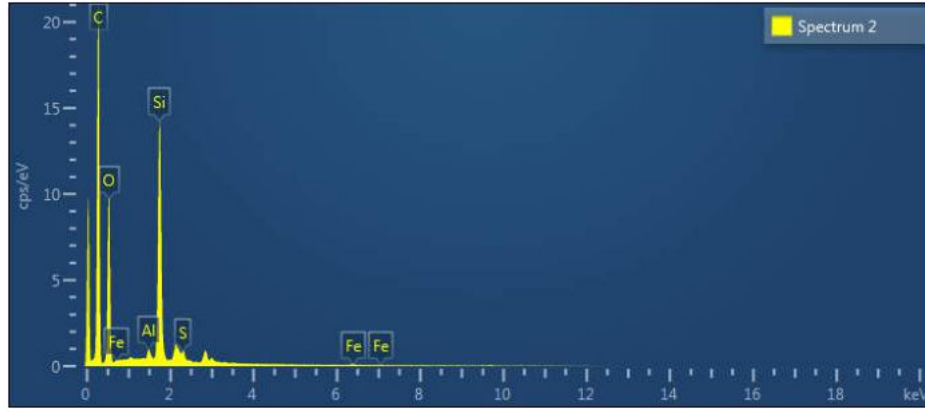
Şekil E4.11. K5F300 Haritalama



Şekil E4.12. K5F300 EDX Grafiği

Çizelge E4.3. K5F300 EDX Spektrum

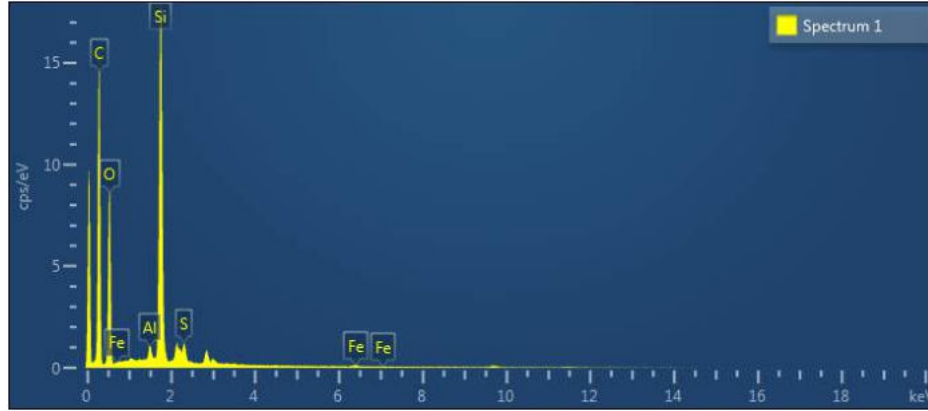
Harita Toplam Spektrumu				
Element	Çizgi Tipi	% Ağırlık	% Ağırlık Sigma	% Atomik
O	K Serisi	32,73	0,18	27,94
Si	K Serisi	6,09	0,03	2,96
Fe	K Serisi	0,11	0,02	0,03
C	K Serisi	60,55	0,18	68,84
S	K Serisi	0,30	0,01	0,13
Al	K Serisi	0,22	0,01	0,11
Toplam		100,00		100,00



Şekil E4.13. K6F300 EDX Grafiği

Çizelge E4.4. K6F300 EDX Spektrum

Spektrum 2				
Element	Çizgi Tipi	% Ağırlık	% Ağırlık Sigma	% Atomik
O	K Serisi	36,00	0,24	30,79
Si	K Serisi	5,03	0,04	2,45
Al	K Serisi	0,23	0,01	0,12
C	K Serisi	58,36	0,24	66,49
Fe	K Serisi	0,09	0,02	0,02
S	K Serisi	0,31	0,02	0,13
Toplam		100,00		100,00



Şekil E4.14. K7F300 EDX Grafiği

Çizelge E4.5. K7F300 EDX Spektrum

Spektrum 1				
Element	Çizgi Tipi	% Ağırlık	% Ağırlık Sigma	% Atomik
O	K Serisi	35,63	0,26	30,95
Si	K Serisi	7,12	0,05	3,52
C	K Serisi	56,28	0,27	65,11
Fe	K Serisi	0,14	0,02	0,03
Al	K Serisi	0,31	0,02	0,16
S	K Serisi	0,51	0,02	0,22
Toplam		100,00		100,00