



ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İÇİN POLİMER NANOKOMPOZİT FİLAMENTLERİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Ebubekir ÇANTI

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran – 2016

ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İÇİN POLİMER NANOKOMPOZİT FİLAMENTLERİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Ebubekir ÇANTI

Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Mustafa AYDIN

Haziran – 2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ebubekir ÇANTI'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı 'Üç Boyutlu Yazıcılar İçin Polimer Nanokompozit Filamentlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu' başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

15/06/2016

Üye : Doç. Dr. Mustafa AYDIN (Danışman)

Üye : Doç. Dr. Mehmet ŞENEL

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇELİKÜREK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../2016 gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hasan GÖÇMEZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % 1 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Doç. Dr. Mustafa AYDIN

İmza

Ebubekir ÇANTI

İmza

ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İÇİN POLİMER NANOKOMPOZİT FİLAAMENTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Ebubekir ÇANTI

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2016

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa AYDIN

ÖZET

Eklemeli imalat son yıllarda yaygınlaşarak endüstride de kullanılan bir üretim tekniği haline gelmiştir. Ergiyik Biriktirmeli İmalat (*FDM*) tekniği, eklemeli imalat teknikleri arasında en bilinen ve en yaygın kullanılan tekniklerden birisidir. Fakat bu cihazlarda inşa malzemesi (filament) olarak kullanılan polimer esaslı malzemelerin yetersiz mekanik özelliklere sahip olmasından dolayı, teknik genellikle model yapımı ve görsel prototiplerin oluşturulması gibi kısıtlı uygulama alanlarına sahiptir. Mekanik özellikleri iyileştirilmiş polimer esaslı malzemelerin geliştirilmesi ile tekniğin yaygınlaşması ve uygulama alanlarının artması sağlanabilir. Çalışmada, mevcut filamentlere nano/mikro partikül takviyesi yapılarak ticari üç boyutlu yazıcılarla uyumlu mevcut filamentlerden daha iyi özelliklere sahip kompozit filamentler üretilmiş ve bu filamentler “Üç Boyutlu Yazıcı” ile yazdırılmıştır. Matris malzemesi olarak Acrylonitrile butadiene styrene (*ABS*) seçilirken takviye malzemesi olarak ise ZrB_2 , SiO_2 , Çok duvarlı karbon nano tüp (*MWCNTs*) ve Al partikülleri kullanılmıştır. Filamentler ve üç boyutlu yazdırılmış numuneler üzerinde malzeme karakterizasyonu işlemleri yapılmıştır. Eş dönmeli ikiz-vidalı bir ekstrüder kullanılarak üretilen filamentler üzerinde çekme testi ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Takviye partiküllerin varlığının ispatlanması için filamentlerin çekme testi sonrası kırık yüzeyleri üzerinde Enerji-dağılımlı X-ışını spektroskopisi (*EDS*) ve Taramalı elektron mikroskopu (*SEM*) çalışmaları yapılmıştır. Üç boyutlu yazdırılmış numunelerin karakterizasyonu için çekme testi ve üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Testlerin ardından, kırık yüzeyler üzerinde *SEM* çalışmaları yapılarak numunelerin hasar davranışları incelenmiştir. Ek olarak, üç boyutlu yazdırılmış kompozit numuneler üzerinde sertlik testi yapılmış ve sonuçlar takviyesiz numune ile karşılaştırılmıştır. Netice olarak mikro-partikül takviyesinin 3 boyutlu yazdırılmış numunelerin birim uzama değerlerini en az %82,5 oranında iyileştirdiği görülmüştür. Bunun yanında nano-partikül takviyesi uzama değerlerini %76’ya varan oranlarda iyileştirirken, çekme değerleri en az %13,5 oranında iyileşmiştir.

Anahtar Kelimeler: ABS, Al, Eklemeli İmalat, FDM, MWCNTs, SiO_2 , ZrB_2 .

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF POLYMER NANOCOMPOSITE FILAMENTS FOR 3D PRINTERS

Ebubekir ÇANTI

Mechanical Engineering, M.Sc. Thesis, 2016

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa AYDIN

SUMMARY

Additive Manufacturing (*AM*) is becoming an industrial manufacturing standard with wide-spreading of the related techniques in recent years. Fused Deposition Modeling (*FDM*) is a technique which is one of the most well known and most prevalent among other *AM* techniques. However, this technique has limited application area including model making and creating visual mock-ups because of the inadequate mechanical properties of the polymeric materials which are used as building materials (filament). The technique may widen its application areas by creating improved building materials. In this work nano/micro particle reinforced filaments with superior mechanical properties, compatible with commercial *FDM* devices, were produced successfully and used as building material in a commercial 3D printer. Acrylonitrile butadiene styrene (*ABS*) was chosen as matrix material while ZrB_2 , SiO_2 , Multi wall carbon nanotubes (*MWCNTs*) and Al particles were used as reinforcement materials. Characterization of the both filaments and 3D printed samples which had been produced by using these filaments was done in the context of this work. A co-rotating twin screw extruder was employed for production of the filaments. Tensile test and the surface roughness measurements were conducted on the filaments subsequently. After completing of the tensile test Energy-dispersive X-ray spectroscopy (*EDS*) and Scanning electron microscope (*SEM*) examinations were conducted on the fractured surfaces of the test samples to validate presence of the reinforcement particles. For characterization of the 3D printed samples, tensile test and three-point bending tests were conducted firstly. After that, *SEM* investigations were conducted on the fractured surfaces for revealing underlying mechanisms. In addition to these, hardness-test was applied on the 3D printed samples' surfaces. Results show that reinforcement of *ABS* matrix with micro particle improves tensile-strain behavior of the 3D printed samples at least 82.5%. While nano particle reinforcement resulted with improvement up to 76% for tensile-strain value, strength of the 3D printed specimens shows at least 13.5% improvement for nano particle reinforcement.

Keywords: *ABS*, Additive Manufacturing, Al, Fused Deposition Modeling, *MWCNTs*, SiO_2 , ZrB_2 .

TEŞEKKÜR

Tezimle ilgili çalışmaların her aşamasında görüşleriyle yön veren, bilgilerini, tecrübelerini ve değerli katkılarını benden hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım ve çok değerli hocam Doç. Dr. Mustafa AYDIN'a, hayatımın en zor döneminde yanımda olan sevgili annem Nagihan ÇANTI'ya, değerli babam Halit ÇANTI'ya, tez konusunu 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	Vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
 1. GİRİŞ	 1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
3. ÜÇ BOYUTLU İMALAT.....	9
3.1. Üç Boyutlu İmalat Çeşitleri.....	9
3.1.1 Stereolithography (SLA)	9
3.1.2. Lamineli Nesne Üretimi (LOM).....	11
3.1.3. Seçici Lazer Sinterleme(SLS)	12
3.1.4. Toz Yatağı ve Püskürtme Temelli 3 Boyutlu İmalat.....	14
3.1.5. Ergiterek Biriktirmeli İmalat (FDM).....	15
3.2. Üç Boyutlu İmalat Çeşitlerinin Karşılaştırılması	16
4. POLİMERLER VE EKSTRÜZYON PROSESİ.....	20
4.1. Polimerlerin Sentezlenmesi (Polimerizasyon)	20
4.2. Polimerlerin Sınıflandırılması.....	21
4.2.1. Polimerlerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması	22
4.2.2. Polimerlerin bileşiklerin kaynağına göre sınıflandırılması	22
4.2.3. Polimerlerin zincir şekline göre sınıflandırılması	23
4.3. Polimerlerin İşleme Yöntemlerine Göre Sınıflandırılması.....	24
4.3.1. Termoplastikler	24
4.3.2. Termosetler.....	25
4.3.3. Elastomerler	25
4.4. Polimerler İşleme Teknikleri.....	25
4.4.1. Enjeksiyon yöntemi.....	26
4.4.2. Döner Kalıplama Yöntemi	26
4.4.3. Isı şekillendirme yöntemi (Thermoforming)	27
4.4.4. Şişirme yöntemi.....	28
4.4.5. Köpükleme yöntemi	28
4.4.6. Transfer kalıplama yöntemi	30
4.4.7. Ekstrüzyon yöntemi.....	30

İÇİNDEKİLER(devam)

4.5. Ekstrüzyon Yönteminde Kullanılan Ekstrüderler	31
4.5.1. Disk ekstrüderler	32
4.5.2. Koçbaşı ekstrüderler.....	32
4.5.3. Vidalı ekstrüderler.....	33
4.5.3.1. Tek vidalı ekstrüderler	33
4.5.3.2. İkiz vidalı ekstrüderler	35
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	36
5.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	36
5.2. Kompozit Filamentlerin Üretimi	39
5.3. Filament Üretimi İçin Tasarımı Yapılan Ekstrüder Kalıbı.....	42
5.4. Filament Üretimi Ve Üretilen Filamentler	43
5.5. Üretilen Filamentlerin DSC İncelemeleri	43
5.6. Üretilen Filamentlerin Çekme Testi.....	44
5.7. Üretilen Filamentlerin Yüzey Pürüzlülük Testi	44
5.8. Filamentlerin SEM-Mikroyapı İncelemeleri ve EDS Çalışmaları	45
5.9. Üç Boyutlu Yazıcı İle Numune Üretimi	46
5.10. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Çekme Testi	48
5.11. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Üç Nokta Eğme Testi.....	49
5.12. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Sertlik Testi.....	50
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	51
6.1. Üretilen Filamentlerin DSC Çalışması.....	51
6.2. Üretilen Filamentlerin SEM-EDS Çalışmaları.....	54
6.3. Filamentlerin Yüzey Pürüzlülük Testi Sonuçları	56
6.4. Üretilen Filamentlerin Çekme Testi Sonuçları.....	57
6.5. Filamentlerin Kırık Yüzeylerinin SEM-Mikroyapı İncelemeleri.....	58
6.6. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin EDS Sonuçları	64
6.7. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Sertlik Testi Sonuçları	66
6.8. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Çekme Testi Sonuçları.....	67
6.9. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	69
6.10. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin SEM-Mikroyapı İncelemeleri	71
7. ÖNERİLER VE TARTIŞMA	79

İÇİNDEKİLER(devam)

KAYNAKLAR DİZİNİ	83
------------------------	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. SLA Yöntemi İle Üretilmiş Bir Nesne.....	10
3.2. LOM Prosesinin Şematik Gösterimi	11
3.3. SLS Prosesini Anlatan Görsel.....	13
3.4. Bağlayıcı Püskürtme İle Eklemeli İmalatı Anlatan Görsel.....	14
3.5. Biriktirmeli İmalat Yönteminde Üretimin Şematik Gösterimi.....	15
3.6. Masaüstü Kullanıma Sahip Bir FDM Cihazı	18
3.7. Autodesk Firmasının Ember Adlı SLA Cihazı.....	19
4.1. Polietilenin polimerizasyonu.....	21
4.2. Polimerlerin sınıflandırılması.....	21
4.3. Polimer malzemelerdeki zincir yapıları.....	23
4.4. Enjeksiyon yöntemi ile polimer parçalarının üretimi.....	26
4.5. Döner kalıplama yönteminde üretim aşamaları.....	27
4.6. Termoplastiklerin ısı etkisi ile şekillendirilmesi.....	27
4.7. Şişirme yöntemi ile üretim.....	28
4.8. Polimerik köpük bir malzemenin üretim sonrası iç yapısı.....	29
4.9. Ekstrüzyon yöntemi ile polimerik köpük üretimi.....	29
4.10. Transfer kalıplama yöntemi ile üretim.....	30
4.11. Ekstrüzyon yöntemi.....	31
4.12. Davul tipi disk ekstrüder.....	32
4.13. Koçbaşı ekstrüder.....	33
4.14. Tek vidalı bir ekstrüderin bileşenleri.....	34
4.15. a) Eş dönmeli ikiz vida, b) karşıt-dönmeli ikiz vida.....	35
5.1. Çalışmada kullanılan ABS granülleri.....	36
5.2. Kullanılan MWCNT partiküllerinin SEM görüntüsü x100.000 büyütme ile.....	37
5.3. Kullanılan SiO ₂ tozlarının SEM görüntüsü x50.000 büyütme ile.....	37
5.4. Kullanılan ZrB ₂ partiküllerinin SEM görüntüsü x10.000 büyütme ile.....	38
5.5. Kullanılan Al partiküllerinin SEM görüntüsü x1.000 büyütme ile.....	38
5.6. Çalışmada kullanılan ikiz vidalı ekstrüder.....	39
5.7. Filamentlerin üretim aşamalarını gösteren görsel.....	40
5.8. Karışım sonrası granüllerin görüntüsü.....	41
5.9. Filament üretimi için tasarlanan ekstrüder kalıbı.....	42

ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)

5.10. Ekstrüder kalıbının teknik resmi.	42
5.11. Üretimi yapılmış olan takviyeli ve takviyesiz filamentler.	43
5.12. Filamentlerin çekme testine ait görsel.....	44
5.13. Mitutoyo Surf test SJ-201P yüzey pürüzlülük test ekipmanı.	45
5.14. Çekme testi sonrası ve SEM öncesi işlemler.	45
5.15. Çalışmada kullanılan 3 boyutlu yazıcı.	46
5.16. Çekme numunesi teknik resmi.	46
5.17. Üç nokta eğme numunesine ait teknik resim.	46
5.18. Numune üretimindeki örgü yönelimleri.	48
5.19. 3 boyutlu yazdırılan çekme numuneleri.	48
5.20. Numunelere uygulana çekme testi işlemi.....	49
5.21. 3 boyutlu yazdırılan 3 nokta eğme testi numuneleri.	49
5.22. Sertlik testinde kullanılan donanım ve numune.	50
6.1. Katkısız ABS'e ait DSC termal analiz değerleri.	51
6.2. MWCNT/ABS'e ait DSC termal analiz değerleri.....	52
6.3. Al/ABS'e ait DSC termal analiz değerleri.	52
6.4. SiO ₂ /ABS'e ait DSC termal analiz değerleri.....	53
6.5. ZrB ₂ /ABS'e ait DSC termal analiz değerleri.	53
6.6. MWCNTs/ABS nano-kompozit filamentin EDS sonucu.....	54
6.7. SiO ₂ /ABS nano-kompozit filamentin EDS sonucu.	55
6.8. ZrB ₂ /ABS kompozit filamentin EDS sonucu.....	55
6.9. Al/ABS kompozit filamentin EDS sonucu.....	55
6.10. Filamentlerin yüzey pürüzlülük değerleri.	56
6.11. Filamentlerin çekme-uzama grafiği.	57
6.12. Çekme testi sonrası ve SEM öncesi işlemler.	59
6.13. Takviyesiz ABS filamentin SEM mikro yapısı x150 büyütme ile.....	59
6.14. SiO ₂ takviyeli kompozit filamentin SEM mikroyapısı x150 büyütme ile.....	60
6.15. Takviyesiz ABS filamentin SEM görüntüsü x10.000 büyütme ile.	60
6.16. ZrB ₂ takviyeli kompozit filamentin SEM görüntüsü x10.000 büyütme ile.....	61
6.17. SiO ₂ takviyeli kompozit filamentin SEM görüntüsü x10.000 büyütme ve detay görünüm ile.....	61
6.18. MWCNTs takviyeli kompozit filamentin SEM görüntüsü x5.000 büyütme ve detay görünüm ile.	62

ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)

6.19. MWCNT'lerin filament kesitindeki aglomerasyonu, x1.000 ve x10.000 büyütme ile.	62
6.20. Al takviyeli filamentin SEM görüntüsü, x1.000 büyütme ile.	63
6.21. Takviyesiz numunenin EDS çalışması.	65
6.22. Al/ABS kompozit numunenin EDS çalışması.	65
6.23. MWCNTs/ABS nano-kompozit numunenin EDS çalışması.	65
6.24. SiO ₂ /ABS nano-kompozit numunenin EDS çalışması.	66
6.25. ZrB ₂ /ABS kompozit numunenin EDS çalışması.	66
6.26. Üretilen numunelerin Shore-D sertlik değerleri.	67
6.27. Numunelerin çekme-uzama grafiği.	67
6.28. Numunelerin ortalama çekme mukavemet değerleri.	68
6.29. Numunelerin ortalama Birim Uzama değerleri.	69
6.30. 3 nokta eğme testi sonrası numuneler; a) SiO ₂ /ABS, b) Al/ABS, c)MWCNTs/ABS, d) katkısız-ABS, e) ZrB ₂ /ABS.	69
6.31. 3 nokta eğme testi, sehim.	70
6.32. 3 nokta eğme testi, eğilme dayanımı.	70
6.33. Katkısız-ABS numunenin kırık yüzeyi, x1.000 büyütme ile.	71
6.34. Katkısız-ABS numunenin kırık yüzeyi, x5.000 büyütme ile.	72
6.35. Al/ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi, x500 büyütme ile.	72
6.36. Al/ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi, x2.000 büyütme ile.	73
6.37. ZrB ₂ /ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi, x1.500 büyütme ile.	74
6.38. ZrB ₂ /ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi, x5.000 büyütme ile.	74
6.39. MWCNTs/ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi, x100 büyütme ile.	75
6.40. MWCNTs/ABS kompozit numune kırık yüzeyi, x15.000 büyütme ile.	76
6.41. SiO ₂ /ABS kompozit numune kırık yüzeyi, x100 büyütme ile.	76
6.42. SiO ₂ /ABS kompozit numune kırık yüzeyi, x20.000 büyütme ile.	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. Takviye partiküllerin özellikleri.....	39
5.2. Ekstrüzyon makinesinin üretim parametreleri.	40
5.3. Filamentlere ait kompozisyondaki takviye ve matris malzemelerinin oranları.	41
5.4. Çekme ve 3 nokta eğme testi numunelerinin parametreleri.	47
5.5. 3 boyutlu yazıcıda kullanılan üretim parametreleri.....	47
6.1. Filamentlere ait elastisite modülü, çekme gerilmesi ve kopma uzaması değerleri.	57
7.1. Partikül takviyesinin çekme özelliklerine etkisi.....	80

1. GİRİŞ

Eklmeli imalat, diğer ismiyle üç boyutlu üretim ve üç boyutlu yazıcılar özellikle son on yılda büyük bir teknolojik ilerleme göstererek gündelik hayatta birçok uygulamada kullanılır hale gelmiştir. Diş implantı yapımından, motor parçalarının üretilmesine kadar çeşitli işlemlerde; biyomedikalden, havacılık ve robotik alanlarına kadar birçok farklı alanda uygulamalara konu olmuştur (Ding vd., 2015; Ning vd., 2015; Klahn vd., 2015; Gao vd., 2015).

Uygulamaların türü, kullanılan malzemenin çeşidi ve üretilmek istenen geometriye göre, eklemeli imalat teknikleri içerisinde uygun olan yöntem seçilebilir. Stereolitografi (SLA), Ergiterek Biriktirmeli İmalat (FDM), Lamineli Nesne Üretimi (LOM) ve Seçici Lazer Sinterleme (SLS) gibi çeşitli eklemeli imalat teknikleri günümüzde farklı uygulamalar için tercih edilmektedir. Bunlar en çok kullanılan eklemeli imalat teknikleri olmalarına karşın, ilk yatırım maliyetleri, bakım giderleri, sarf malzeme harcamaları ve ürün geometrisinin üretilebilirliği gibi çeşitli kriterlere göre birbirinden ayrılmaktadır.

FDM tekniği eklemeli imalat teknikleri arasında bazı özelliklerinden dolayı diğerlerinden ayrılmaktadır. Öncelikle tekniğin birleştirme yöntemi, inşa malzemesi olarak kullanılan termoplastik veya türevlerinin ergitilerek birbirine bağlanması prensibine dayanmaktadır. Kullanılan malzemelerin termoplastik esaslı malzemeler oluşu ve termoplastik malzemelerin düşük şekillendirilme sıcaklıkları bu yöntemin yaygınlaşmasına sebep olmuştur. Tekniğin çalışma prensibi ise basit ilkelere dayandığından, FDM tekniğini kullanan cihazların maliyetleri diğer eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan cihazlarla karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmaktadır. FDM tekniği bu özelliklerinden ötürü masa üstü kullanıma uygun FDM cihazlarının üretilmesine sebep olmuş, cihaz ve termoplastik malzemelerin düşük maliyetleri de bu tekniği bireysel kullanıcılar tarafından tercih edilebilir hale getirmiştir (www.3ders.org/pricecompare/3dprinters/).

FDM tekniği sahip olduğu avantajlara rağmen günümüzde genellikle bireysel kullanıcılar tarafından hobi amaçlı işlemlerde daha çok tercih edilmektedir. Kullanılan termoplastik esaslı malzemelerin, doğaları gereği sahip oldukları düşük mekanik özellikler tekniğin yaygınlaşmasının ve fonksiyonel parça imalatı yapılmasının önüne geçmektedir. Bu dezavantajlarının önüne geçilmesiyle FDM tekniği uygulama alanlarını genişletebilir ve genellikle bir model üretim tekniği olarak kullanılmasının yanında düşük maliyetli nihai ürünlerin üretimi için konvansiyonel yöntemlere alternatif olarak kullanılabilir. Bu amaçla, FDM cihazlarında kullanılabilecek özellikleri iyileştirilmiş yeni ve gelişmiş özellikli malzemelerin üretilmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Chatterjee ve Deopura, 2006).

Kompozit malzemeler, günümüzde özellikleri iyileştirilmiş malzemelerin üretiminde en çok tercih edilen malzemelerin başında gelmektedir. Kompozit malzeme üretimi ile birleşen malzemelerin özelliklerinden daha iyi özelliklere sahip malzemelerin üretimi mümkün olmakta; bu yöntemle mekanik özellikleri iyileştirilmiş, kimyasal etkileşimlere karşı kararlı, korozyon direnci yüksek, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği özelliklerine sahip malzemeler üretilmektedir (Chung, 2010). Polimer malzemeler ise kompozit malzeme üretiminde özel bir yere sahiptir. Polimerlerin düşük şekillendirilebilirlik maliyetleri ve birçok geleneksel üretim yöntemiyle çalışabilme gibi özellikleri, polimer malzemelerin kompozit malzeme imalatında matris malzemesi olarak tercih edilmesinin sebeplerindendir.

Polimer kompozitler arasında polimer nanokompozitler ise takviye malzemelerin en az bir boyutunun nano ölçekte olduğu malzemelerdir. Nano malzemelerin yüksek yüzey enerjileri ve çok düşük hacimlerde bile çok yüksek yüzey alanına sahip olmaları gibi özellikleri kompozit imalatında nano malzemelerin kullanılmasını cazip hale getirmektedir. Nano malzemelerin bu özelliklerinin kompozit malzemeye sağlayacağı en önemli katkı matris ve nano takviye malzemeler arasında, nano takviyelerin sahip olduğu özelliklerden dolayı oluşması beklenen yüksek etkileşimdir (Ciprari vd., 2006).

FDM tekniğinde kullanılan malzemelerin termoplastik ve termoplastik türevi polimer malzemeler olduğundan dolayı bu teknikte kompozit polimerlerin kullanımı ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Karbon fiber takviyeli ABS, demir katkılı P301 Naylon, cam fiber katkılı ABS ve LLDPE, bakır ve demir tozu takviyeli ABS; TiO_2 , SrTiO_3 takviyeli ABS gibi literatürde FDM cihazlarında kullanılmak üzere bazı takviyeli kompozit polimer filament hazırlanmıştır (Torrado vd., 2015; Nikzad vd., 2011; Ning vd., 2015; Zhong vd., 2001; Tekinalp vd., 2014).

Yapılan çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinin en yaygınlarından biri olan FDM tekniğinde kullanılmak üzere mikro/nano partikül takviyeli kompozit filamentlerin üretilmesi ve karakterizasyonunun yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla matris malzemesi olarak ABS; takviye malzemeler olarak da MWCNT, SiO_2 , ZrB_2 ve Al partikülleri kullanılmıştır. Çalışmada filament üretimi ikiz vidalı bir ekstrüder kullanılarak yapılmıştır. Karakterizasyon için ise sertlik, yüzey pürüzlülüğü, çekme testi, üç-nokta eğme, SEM-EDS ve DSC yöntemleri kullanılmıştır. Üretilen filamentler ve filamentler kullanılarak üretilen numuneler test edilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Polimer kelime olarak “pek çok tekrarlı alt birim” anlamına gelir. Doğada moleküler halde olmayan maddeler polimer sınıfına girer. Polimerler, farklı uzunluk ve yapısal düzenlerdeki makromoleküllerin karışımı olan çok sayıdaki atomun bir araya gelerek oluşturduğu uzun zincirlerdir. Farklı alanlarda, makromoleküler yapıların incelenmesi ile daha iyi anlaşılabilir malzemelerin varlığı; polimerlerin matematik, kimya, malzeme mühendisliği, makine mühendisliği gibi farklı disiplinlerde konu edilmesine sebep olmuştur. Polimer zincirleri farklı kimyasal varyasyona sahip moleküllerin bir araya gelmesiyle oluşur. Kimyasal farklılığın yanında polimerik malzemeler kendilerini oluşturan moleküllerin komşu zincirler ile arasındaki çeşitli ölçeklerdeki düzen ve organizasyonu ile de şekillenir. Bu yüzden üniform bir yapıya sahip değildir. Bu sebeplerle polimerik malzemelerin özellikleri kendisini oluşturan moleküllerin kimyasal ve fiziksel farklılıklarının malzemeyi etkileme düzeyleri ile ilişkili olarak kendini gösterir (Patterson, 2012; Peacock vd., 2006).

Doğadaki polimerler sentetik polimerler ve doğal polimerler olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Sentetik polimerler petrolden türetilmiştir. Teflon, naylon, polietilen, poliester ve epoksi bu sınıfa giren malzemelerdendir. Doğal polimerler genellikle su bazlıdır ve doğada kendiliğinden oluşur. Bunlara örnek olarak ipek, yün, DNA ve proteinler verilebilir. (<http://www.cmu.edu/gelfand/k12-teachers/polymers/natural-synthetic-polymers>).

Termoplastikler, polimer sınıfından malzemelerdir ve makromoleküllerin kimyasal olarak bağımsız olmalarından dolayı diğer polimerlere nazaran daha basit yapıya sahiptir. Çapraz bağlara sahip olmadıklarından şekil verilebilir hale gelmeleri için belirli bir sıcaklığa ısıtılmaları yeterlidir. Şekillenmeleri için çıkılan sıcaklık değerlerinde malzemenin kimyasal yapılarından bir değişme olmaz. Termoplastiklerin aksine termosetlerde ise sıcaklık etkisi ile ergime olmaz, sıcaklık termosetin yapısını geri dönüşü olmayacak şekilde bozar. Termoplastikler, şekillendirme işlemi bittikten sonra soğuyarak katılaşır ve bu şekilde istenilen ürün elde edilir. Çevrim halinde ısıtılıp soğutulmaları yapılarına hasar vermediğinden yeniden işlenebilirliğe ve geri dönüşüme uygun malzemelerdir. Bu özellikleri termoplastikleri en çok tercih edilen plastiklerden biri haline getirir. Bu gibi nedenlerle termoplastik malzeme kullanımı tüm plastik malzeme kullanımının %80’ini oluşturur. Akrilik, polietilen, naylon, polipropilen, Teflon, PVC gibi malzemeler termoplastik malzemelerdir ve gündelik hayatta labaratuvar malzemesi yapımından, araba parçalarının imalatına kadar farklı alanlarda kullanılır (Biron, 2013).

Kompozit malzemeler çok fazlı malzemeler olup, kendini oluşturan malzemelerin birleşmesi ile oluşan ve kendini oluşturan malzemelerin özelliklerinden daha iyi özellikler gösteren malzemelerdir. Bu malzemeler kimyasal reaksiyon veya faz dönüşümleri veya benzer etkileşimler ile meydana gelmez. Kompozit malzemeler döküm yöntemi ile üretilen alaşımlar gibi de değildir. İstenilen özelliklere bağlı olarak oluşturduğu malzemelerin farklı oranlarına, dağılımlarına ve morfolojilerine göre şekillendirilebilir. İstenilen özelliklere göre şekillendirilebilir oldukları için havacılıktan otomotiv parçalarına, elektronik ekipmanların yapımından biyomedikal cihazların imalatına kadar farklı alanlarda kullanılabilirler. Örneğin karbonfiberin polimer matrise emdirilmesi vasıtasıyla hafif yapıların üretimi kompozit malzeme teknolojisi ile yapılabilir. Bu yapının içerisindeki karbon fiberler dayanıklılık ve sağlamlık sağlarken, polimer bir bağlayıcı görevi görür (Chung, 2010).

Polimer malzemelere ısı dayanım, mekanik dayanım ve darbe dayanımı gibi birçok özelliğin iyileştirilmesi için parçacık takviyesi yapılarak polimer kompozitler üretilir. Takviye edilen parçacıkların boyutlarına göre matris ve takviye arasındaki etkileşim düşük düzeyde kalabilir. Polimer nanokompozitler ise kendisini oluşturan malzemelerin en az bir boyutunun nanometre ölçeğinde olduğu hibrit malzemelerdir. Takviye malzeme parçacıklarının boyutları küçülerek nano ölçeklere inildiğinde polimer malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri önemli derecede artar. Bunun sebebi nano boyuttaki takviyelerin makro boyutlu takviyelere nazaran aynı hacimde daha yüksek yüzey alanına sahip olmalarıdır. Bu sayede matris ve takviye arasındaki etkileşim artarak büyük boyutlardaki takviyelerin sağlayamadığı özellikler polimere kazandırılmış olur. Matris içerisindeki nano boyuttaki takviyeler yüksek yüzey alanlarından dolayı matris ile daha yoğun bir bağ kurar. Takviyenin dağılımındaki homojenlik artarsa takviye ve matris arasındaki bağ daha da güçlenmiş olur. Bununla birlikte takviyenin boyutları küçüldükçe takviye malzemede topaklaşma görülür. Bu topaklaşma takviyenin malzeme içerisindeki dağılımındaki homojenliği azaltarak hedeflenen özelliklere tam olarak ulaşılamamasına sebep olur (Ciprari vd., 2006).

Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) polimer malzemelerin uygulamalarında malzemelerin şekillendirilebilirliği ile ilgili önemli değerlerden biridir. Polimer malzemeler metaller veya seramikler gibi kristal yapıya sahip malzemelerden farklıdır. Kristal yapı malzemeler belli düzenlerde tekrar eden iç yapılara sahip iken amorf polimerler spagetti düzenine sahip monomerlerden oluşur (plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/polymers/orient/orient.htm). Polimerler daha çok yarı-kristal yapıda bulunurlar. Kristal yapı malzemeler gibi net bir ergime noktası değerine sahip olmayıp belirli bir sıcaklık aralığının üzerinde erirler. Camsı geçiş sıcaklığı ise polimerler için belirli bir sıcaklık değeri üzerinde kauçuğumsu kıvama geline

sıcaklığı nitelemek için kullanılır. T_g sıcaklığının altındaki değerlerde malzeme gevrek bir davranış sergilerken bu sıcaklığın üzerine çıkılmasıyla malzeme yüksek viskoz özellik sergiler. Örneğin polietilen (PE) için T_g değeri -78°C 'dir (www.polymerprocessing.com/polymers/PE.html). PE malzeme oda sıcaklığında dahi camsı geçiş sıcaklığının üzerinde bulunmaktadır. Polimerlerin bu özellikleri gündelik hayatta kullanım alanlarını belirleyen önemli bir parametredir. PE düşük camsı geçiş sıcaklığına sahip olma özelliğinden dolayı gündelik hayatta plastik tüp yapımından poşet yapımına kadar birçok alanda kullanılır.

FDM cihazlarında kullanılan birçok termoplastik veya termoplastik malzeme mevcuttur. ABS, ABS Plus, ULTEM 101, PC bunlardan bazılarıdır (www.stratasys.com/materials/fdm). Bununla birlikte literatür çalışmaları genellikle ABS üzerinedir (Rodriguez vd., 2003; Dawoud vd., 2016; Saude vd., 2013). ABS iki fazlı bir amorf polimer karışımıdır. Birinci faz olan styrene-acrylonitrile devamlı fazı polimere rijitlik, sertlik ve ısı direnç kazandırırken, polybutadiene parçacıkları malzemeye tokluk kazandırır (www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/). ABS amorf bir terpolimer malzeme olduğundan belirli bir ergime sıcaklığı yoktur (Frounchi vd., 1993). Belirli bir ergime sıcaklığı olmamasına rağmen 105°C civarında camsı geçiş sıcaklığına sahiptir. ASTM D638 standardına göre 47 MPa çekme mukavemeti varken, ASTM D790 standardına göre eğilme mukavemeti 66 MPa'dır (Ozelik vd., 2010).

Geleneksel imalat yöntemleri, parçaların imalatı sırasında ham malzemeden malzeme eksiltilmesi prensibine dayanır. Günümüzde yaygınlaşan yeni üretim tekniklerinden biri olan eklemeli imalat ise parçadan malzeme eksiltme tekniklerine dayalı olan geleneksel imalat yöntemlerinden farklı olarak parçanın malzemeden direkt olarak üretilmesi söz konusudur. İmalatta kullanılan cihaz, üretimi yapılacak parça geometrisinden türetilen bir takım yolunu izleyerek parçayı katman katman imal eder. Eklemeli imalatın bu kendine has özelliğinden dolayı karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi mümkün olduğu gibi imalat sırasındaki malzeme kaybı minimum düzeydedir (Klahn vd., 2015; Ning vd., 2015).

FDM tekniği, üretimi yapılacak parçanın CAD ortamındaki modelinden türetilen bir takım yolu izleyen çıkıcıdan püskürtülen ergimiş malzeme bloğunun (genellikle polimer) üst üste yığılmasıyla istenen geometrinin elde edildiği bir prosestir (Novakova-Marcincinova ve Novak-Marcincin, 2012; Hossain vd., 2013). Bu yöntemde kullanılan termoplastik besleme bloklarına filament adı verilmiştir. Filamentler kullanılarak üretimi yapılacak olan parçalar termoplastiklerin mekanik özelliklerinin bazı uygulamalar için yetersiz olmasından dolayı yük

altındaki durumlarda istenilen sonucu vermemektedir. Malzeme konusundaki bu yetersizlik FDM'nin yeni alanlarda uygulama bulmasının önüne geçtiği gibi tekniğin yaygınlaşmasını da engellemektedir. Bu gibi sorunların üstesinden gelebilmek adına FDM tipi cihazlarda kullanılacak mekanik özellikleri iyileştirilmiş yeni malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır (Chatterjee ve Deopura, 2006).

Nikzad ve arkadaşları yaptıkları çalışmada FDM prosesinde kullanılan polimerlerin doku mühendisliği uygulamaları için iyileştirilmeye çalışıldığından veya bu uygulamalar için yeni malzemeler geliştirilmesine yönelik çalışmaların olduğundan bahsetmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, Nikzad ve arkadaşları ABS tozları ile demir ve bakır tozları karıştırılarak yeni bir filament üretmişlerdir. Metal tozları karışımında %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarını kullanmışlardır. Çalışmalarında bakır ve demir tozlarının kullanılmasının sebebinin bu metallerin iyi mekanik ve termik özelliklerinin yanında polimer ile iyi bir bağ kurması olduğu vurgulamışlardır. Filamentlerin üretimi için tek-vidalı bir ekstrüder makinası kullanılmışlardır. Yaptıkları çalışmada üretilen filamentlerin çap kararlılığının sağlanması adına kalıp uzunluğu 5mm'den 10mm'ye çıkartmışlardır. Bu sayede 1,65 mm kalıp çapıyla çapı 1,778-1,85 mm aralığında değişen filamentler üretilebilmiştir. Yaptıkları çalışmada demir ve bakır takviyeli Kompozit filamentler başarı ile üretilmiştir. Üretilen filamentler FDM3000 tipi cihazda kullanılarak örnek parçalar üretilmişler ve üretilen parçaları enjeksiyon tekniği ile üretimde kalıp olarak kullanılmışlardır. Metal takviyeli kompozit malzeme ile üretilen bu kalıpların ise saf polimerden üretilen kalıplara göre daha yüksek dayanım gösterdiği ve daha yüksek enjeksiyon basınçlarında kullanılabildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte yaptıkları çalışmada bu malzemelere ait ısı iletkenlik ve dinamik mekanik test değerlerinin FDM tipi cihazların uygulamaları konusunda gelecek vaat ettiği vurgulanmışlardır (Nikzad vd., 2011).

Yapılan başka bir çalışmada Torrado ve arkadaşları FDM prosesinde malzemenin biriktirme yönünün parçanın mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma için altı farklı ABS matrisli polimer kompozit filament üretilmiş, üretilen bu filamentler ile farklı oryantasyonda numuneler üç boyutlu yazdırılmış, numuneler test edilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Kullanılan takviyeler ise şu şekildedir: JUTE FIBER, MayaCrom Blue, TiO_2 , $SrTiO_3$ ve Al_2O_3 . Yaptıkları çalışmada filament üretimi için ikiz-vidalı bir ekstrüder kullanmışlar ve $1,75 \pm 0,05$ mm çapında filamentler üretilmişlerdir. Filamentlerin üretiminde kullanılan ekstrüderde 5 farklı sıcaklık bölgesi olup, filamentlerin üretiminde optimum özellikleri yakalamak amacıyla sıcaklık değerleri farklı takviyeler için farklı değerlere göre ayarlanmıştır. Bununla birlikte ekstrüder ana vidası hızı ve besleme vidası hızı da üretime göre farklı değerlere ayarlanmıştır. Çalışmada üzerinde durdukları diğer bir konu ise filament üretimi

sırasında çıkılan yüksek sıcaklıkların, matris içerisindeki bazı takviyelerin ayrışmasına sebep olduğu ve bu ayrışma esnasında ortaya çıkan gazların filamentin iç yapısında boşluklar oluşturmasıdır (Torrado vd., 2015).

Ning ve arkadaşları yaptıkları çalışmada fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin FDM prosesinde kullanımları ile alakalı yeterli çalışma olmamasından yola çıkmıştır. Çalışmalarında ABS matris içerisine karbon-fiber takviye edilerek kompozit filamentler üretilmiştir. Bu filamentler ile üretmiş oldukları numunelerin ASTM standartlarına göre çekme ve 3 nokta eğme testlerini yapmışlardır. Her numunenin kırılma yüzeyleri SEM altında incelenmiş ve kırılma davranışları analiz edilmiştir. Numuneleri katkısız ABS dışında, ağırlıksal olarak %3, %5, %7,5, %10, %15 oranında fiber takviyeli şekilde üretilmişlerdir. Üretimini yaptıkları her farklı filament için 5 adet numune hazırlayarak testlere sokmuşlardır. Çalışmada kullandıkları karbon-fiberlerin boyu ortalama 150 μm 'dir. Numuneler üzerinde yapılan çekme testlerinde karbon fiber ağırlık oranı %3 ve %5 olan takviyelerde saf ABS'ye göre dayanımın yükseldiğini gözlemlemişlerdir. %5 ve %7,5 ağırlık oranına sahip karbon-fiber kompozitin dayanımı ise birbirine yakındır ve bunlar %3'lük kompozitten daha iyi sonuçlar vermiştir. Ağırlık oranı olarak 10% ve 15% karbon-fiber içeren numuneler incelendiğinde bunların sonuçlarının saf ABS'ye yakın değerler verdiği gözükmemektedir. En yüksek ortalama çekme dayanımı 42 MPa'lık değer ile %5 ağırlık oranına sahip karbon-fiber kompozite aittir. En düşük çekme dayanımı ise 34 MPa'lık değer ile 10%'lük ağırlık oranına sahip karbon fiber kompozite aittir. Karbon-fiber takviyesinin elastisite modülü üzerinde ise etki şu şekilde olmaktadır: ağırlık oranı 0%'dan %7,5'a çıktığında elastisite modülü yükselmekte; %7,5'dan %10'a çıkıldığında ise elastisite modülü düşmektedir. %15 ağırlık oranına çıkıldığında ise elastisite modülü tekrar yükselmektedir. Elastisite modülleri ise tüm kompozitlerde saf ABS'ye göre daha yüksektir. Çalışmalarında karbon-fiber takviyeli polimer kompozit filamentleri ekstrüzyon prosesi ile başarı ile üretmişler ve takviyenin farklı ağırlık oranlarının mekanik özelliklere olan etkisi incelenmişlerdir. Saf ABS numuneler ile kıyaslandığında, polimer matrise karbon-fiber takviyesinin çekme dayanımı ve elastisite modülünü artırırken; tokluk, akma dayanımı ve süneklik özelliklerini azaltabileceği gösterilmişlerdir (Ning vd., 2015).

Zhong ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ABS matrise kısa cam-fiber katkılı ABS ve LLDPE kullanarak kompozit filament üretmişlerdir. Üretim için öncelikle malzemeler ikiz-vidalı bir ekstrüder ile ön filament haline getirip hazırlanan ön filamentlerden ise kırıcı yardımıyla granüller üretilmişlerdir. Üretilen granüller tek-vidalı bir ekstrüder ile çekilerek filament haline getirilmişlerdir. Ekstrüder parametreleri ayarlanarak filamentin çap kalınlığının 1,75-1,90 mm olması sağlanmıştır. Ardından bu filamentler kullanılarak numune üretmişlerdir. Numuneleri

250°C nozül ve 60°C ortam sıcaklığında hazırlanmışlardır. Saf ABS'nin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kısa cam-fiber takviye malzemesi olarak kullanılmışlardır. Takviyeli ABS kompozit malzemeyi, saf ABS ile kıyasladıklarında dayanımın önemli ölçüde iyileştiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kompozit malzemenin yumuşama sıcaklığında da yükselme kaydedilmiştir. Üretim sırasındaki kritik noktalardan biri ister FDM ile üretim söz konusu olsun ister enjeksiyon ile üretim söz konusu olsun, bu iki işlem için de gereken kuvvetin fiber takviyesi ile doğru orantılı olarak artmasıdır. Yaptıkları çalışmada ekstrüzyon ile üretilen kompozit filamentlerin, FDM cihazları ile uyumlu çalıştığını görmüşlerdir (Zhong vd., 2001).

Literatür çalışmaları incelendiğinde mevcut FDM tipi 3 boyutlu yazıcılarda kullanılan filamentlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için karbon bakır (Cu), demir (Fe), cam-fiber, karbon fiber, TiO_2 , $SrTiO_3$ ve Al_2O_3 gibi bazı malzemelerin ABS matris içerisinde takviye partikül olarak kullanıldığı görülmüştür. Bu tez kapsamında yapılmış olan çalışmada ise literatürde kullanılanlardan farklı olarak MWCNTs, SiO_2 , ZrB_2 ve Al partikülleri takviye olarak kullanılmıştır. Üretimi yapılan kompozit filamentlerin matris malzemesi olarak ise ABS seçilmiştir.

3. ÜÇ BOYUTLU İMALAT

Üç boyutlu imalat ya da kullanılan diğer adıyla eklemeli imalat 3 boyutlu nesnelerin imalatında kullanılan çeşitli yöntemleri kapsayan genel bir isimlendirmedir. Basit ya da karmaşık geometriye sahip nesnelerin geometri verilerinden türetilen bir veri dosyasının kullanıldığı bilgisayar kontrollü bir üretim şeklini ifade eder. Üretimi yapılacak parçalar, türetilmiş veri dosyasından kullanılan geleneksel yöntemlere göre farklı birleştirme prensiplerine dayanarak katman katman imal edilir (Ding vd., 2015).

FDM tipi 3 boyutlu yazıcılarda parça üretimi kompozit malzeme üretimine benzer. Ergiyik halde çıkıcıdan çıkan termoplastik veya termoplastik esaslı malzeme öncelikle inşa platformuna biriktirilir ve daha sonra biriktirme işlemi katman katman devam ederek parça son haline gelir. Katman katman üretim söz konusu olduğu için üretilmiş malzeme dikine yığılmış lamineli kompozittir (Sood vd., 2012).

3.1. Üç Boyutlu İmalat Çeşitleri

Üç boyutlu imalat prosesi kullanılan malzemelere ve malzemelerin birleştirilmesi prensibine göre SLA, LOM, SLS ve FDM gibi alt sınıflara ayrılmıştır.

3.1.1 Stereolithography (SLA)

Polimer kimyasında, monomer moleküllerinin kimyasal reaksiyonla bir araya gelerek polimer oluşturması işlemine polimerizasyon denir (Young, 1987)

Fotopolimerizasyon ise zincir büyümesine dayanan bir polimerizasyon çeşididir. Görünür veya kızılötesi ışığın malzeme tarafından absorbe edilmesi ile başlar. Işığa maruz kalan bölgelerde komonomerler arasında bir reaksiyon tetiklenir. Fakat tetiklenen bu reaksiyon yayılmalı bir özellik taşımayıp sadece ışığa maruz kalan bölgede polimerizasyonun gerçekleşmesi şeklinde olur (Allock vd.,2003).

Stereolithography, fotopolimerizasyonun kullanıldığı ve üretimi yapılmak istenen nesnenin, kullanılan malzemeden katman katman imal edildiği bir eklemeli imalat yöntemidir. Optik ile imalat, fotokatılaştırma, optik ile şekillendirme gibi birçok farklı isimle de nitelenir. Bu alanda yapılan çalışmalar 1970'li yıllarda başlamış olsa da terim Charles W. Hull'ın bu yöntemi patentlemesi ile literatüre girmiştir. SLA, fotopolimer reçinenin üzerine odaklanan kızılötesi lazerin polimerizasyonu tetiklemesi ile başlar. Üretimi yapılacak nesnenin geometri dosyası bilgisayar kontrollüyle önceden belirlenmiş bir yolu takip eden lazer ışınlarının reçinenin üzerine düşürülmesi ile gerçekleşir. Bu yöntem izlenerek nesne katman katman imal

edilir ve polimerizasyon işlemi her basamakta tekrar tekrar uygulanır. Bu işlemler nesne oluşturulana kadar devam eder (www.photopolymer.com/stereolithography.htm).



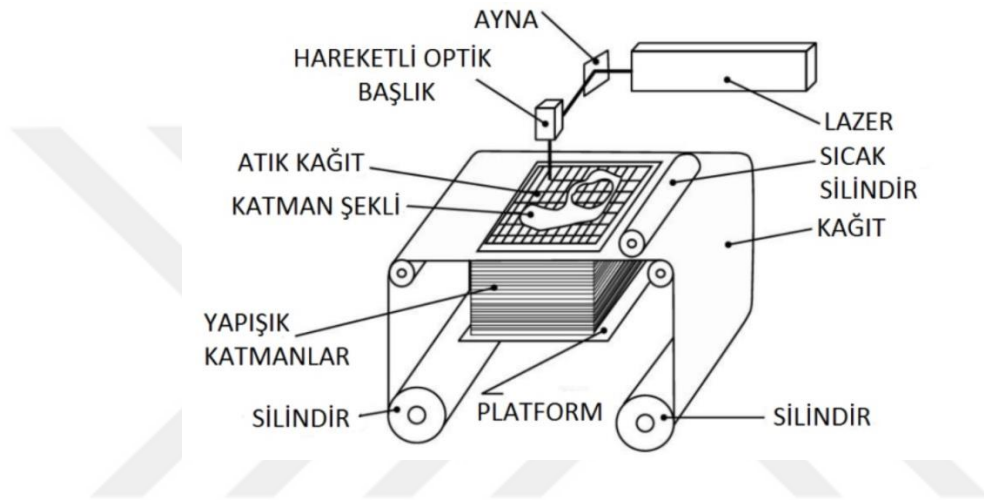
Şekil 3.1. SLA yöntemi ile üretilmiş bir nesne

Şekil 3.1’de üretim yöntemi gösterilmiştir (www.all3dp.com). Makinaya bağlı olarak hareket eden platform bir reçine havuzuna daldırılır. Platform üzerine odaklanan lazer ışığı ile nesne oluşturulmaya başlanır. Daha önceden belirlenmiş tabaka yüksekliği kadar hareket eden platform üzerine, nesne katman katman imal edilir. İşlem sonrasında istenilen geometriyi elde etmek için destek yapıları örülebilir. Örülen destek yapıları bir son işlem basamağı olarak temizlenerek nihai üretim gerçekleşir. SLA yönteminde katman kalınlığı olarak genellikle kullanılan değer 0,05 mm ve 0,15 mm arasındadır. Son işlem basamağında ise fazla malzemelerin veya destek yapılarının kaldırılması amacıyla kimyasal bir banyo işlemi, nesne üzerine uygulanabilir.

Üretim zamanı üretilen nesnenin geometrisine bağlı olarak değişebilir. Üretim saatler içerisinde gerçekleşebildiği gibi günü aşan üretim süreleri de söz konusudur. Parça boyutlarını, kullanılan cihazın özellikleri belirler. Fotopolimer reçinelerin maliyetli olmasından dolayı maliyet açısından dezavantajlı olduğu söylenebilir.

3.1.2. Lamineli Nesne Üretimi (LOM)

Lamineli Nesne Üretim yöntemi (LOM), Helisys tarafından geliştirilmiş bir eklemeli imalat yöntemidir. İmalat metal, plastik veya kâğıt temelli laminelerin yapıştırılması esasına dayanır. Yapıştırma işlemi sırasında katman konturları bir kesici aparat veya lazer yardımıyla şekillendirilir ve şekillendirilen katmanlar bu işlemlerden sonra yapıştırılır (www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/lom.cfm).



Şekil 3.2. LOM prosesinin şematik gösterimi

Şekil 3.2’de LOM prosesi şematik olarak gösterilmiştir (www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing). LOM prosesinde kullanılan malzeme bir makaraya bağlı olarak cihazın üzerinde yer alır. Bu malzemenin bağlı olduğu bir başka makara tarafından malzemenin platform üzerinde konumlanması sağlanır. Platform üzerine gelen malzeme üzerine ilk olarak ısıtma silindiri ile ısı uygulanarak yüzeye yapışkan özellik kazandırılır. Katmanlar halinde olan nesne geometrisi verisinde, her bir katmanın sınırları bir lazer yardımıyla kesilir ve katman bir önceki katman üzerine yapışmaya uygun hale gelir. Nesne laminelerin üzerinde olduğu bir platformun Z ekseninde hareket etmesiyle katman katman inşa edilir. Her katman tamamlandıktan sonra platform Z ekseninde aşağı yönlü hareket eder. O katmanın inşası tamamlandıktan sonra makaralar yardımıyla platform üzerine yeni bir katman serilir. Bu proses nesne tamamlanıncaya kadar devam eder.

LOM prosesinde kullanılan malzemeler kâğıt, plastik türü olduğu için malzeme maliyeti bakımında avantajlı olduğu söylenebilir. SLA yönteminde kullanılan reçinenin maliyeti göz önüne alınırsa malzeme gideri nispeten daha azdır. Bununla birlikte bir diğer avantajı da görece büyük hacimdeki nesnelerin üretimine izin vermesidir. Malzemenin ucuzluğu ve

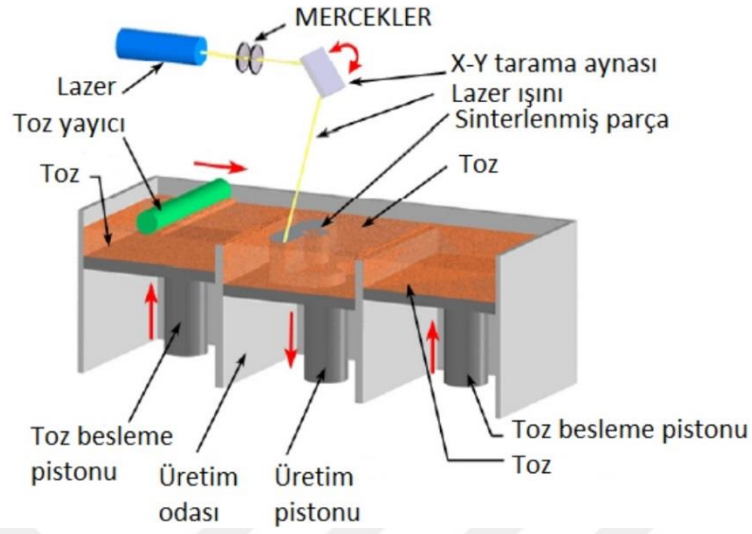
birleştirme tekniği olarak kimyasal bir işlem gerektirmemesi hacmi büyük nesnelerin üretilmesi konusunda tercih edilebilirliğini arttıran faktörlerdir. Bununla birlikte diğer imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında boyutsal doğruluk noktasında dezavantajlı olduğu söylenebilir. İstenilen geometriye göre proses sonrası bir son işlem basamağı gerekebilir.

3.1.3. Seçici Lazer Sinterleme(SLS)

Seçici lazer sinterleme (SLS), literatürde “selective laser sintering” olarak geçmektedir. Bir eklemeli imalat yöntemidir ve birleştirme işlemi lazer ışını ile gerçekleşir. Bu yöntemde kullanılan malzeme toz formundadır. Üretilmek istenen nesnenin CAD verisinden türetilen bir takım yolunu izleyen lazer ışını, etki ettiği malzeme üzerinden noktasal sinterleme yaparak arzu edilen nesnenin katman katman üretilmesini sağlar. Toz formundaki malzemeden lokal sinterleme sayesinde katı formda nesneler oluşturulur (<http://3dprinthq.com/how-does-selective-laser-sintering-work/>).

SLS tekniği 1980’li yılların ortalarında Texas Üniversitesi’nin Makine Mühendisliği Bölümü’nde icat edilmiştir. Teknik günümüze değin, ileri teknoloji bir imalat yöntemi olarak korunagelmıştır (<http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry#ch4>). Eklemeli imalat, literatürde hızlı prototipleme olarak geçiyor olsa da SLS yönteminde geniş yelpazede sunulan malzeme seçeneği ile fonksiyonel parçaların düşük hacimlerde üretimleri mümkün olabilmektedir.

Teknik prensip olarak yüksek güçte bir lazer ışının toz formundaki malzeme üzerine düşürülmesi ve absorbe edilen enerji ile sinterlenen lokal bölgelerin birleşmesiyle katı formundaki parçanın oluşmasına olanak sağlayan bir prensip ile çalışır.



Şekil 3.3. SLS prosesini anlatan görsel.

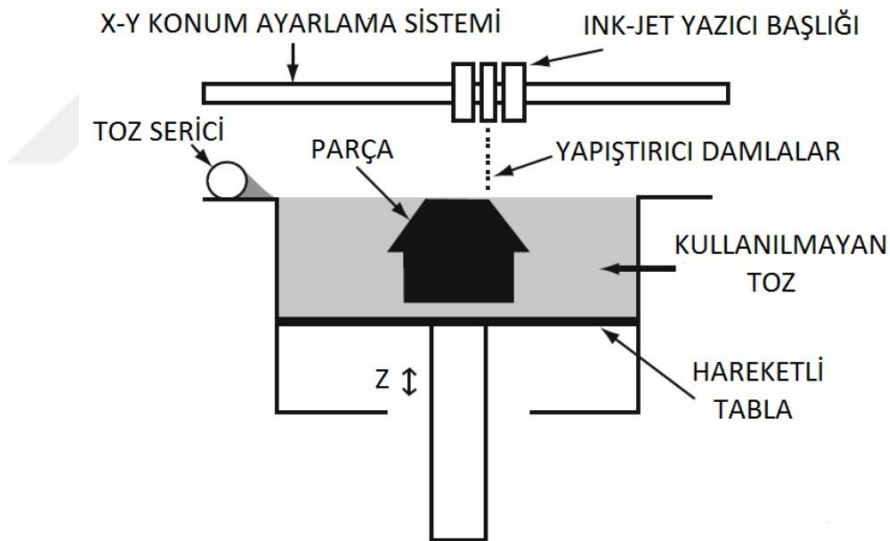
SLS prosesinin çalışma prensibini açıklayan görsel Şekil 3.3'te gösterilmiştir (https://www.printspace3d.com/wpcontent/uploads/2014/03/SelectiveLaserSintering_Illustration_1.jpg). Makine üzerinde iki ayrı platform yer alır. Bu platformlardan birincisi üzerinde üretimde kullanılacak olan tozlar vardır. Diğer platform ise inşa platformudur ve nesne bu platform üzerinde inşa edilir. Nesnenin üzerinde bulunduğu platform daha önceden belirlenmiş olan katman kalınlığı kadar, her katman imalatı bittikten sonra Z ekseninde aşağı yönlü hareket yapar. Diğer platform ise Z yönünde yukarı yönlü bir hareket yapar ve bir toz yayıcısı yardımıyla bu platformdaki tozlar süpürülerek inşa platformuna aktarılır. Bu çevrim nesnenin imalatı bitinceye kadar devam eder.

SLS prosesinde toz formunda bulunabilen hemen hemen her malzeme kullanılabilir. Bunun sebebi malzemenin toz formunda bulunması ile ısı etkisiyle sinterlenmesinin daha kolay olmasıdır. Bu proste polikarbonat (PC) tozları gibi amorf polimerlerinin yanı sıra, poliamid (PA) gibi yarı-kristal polimer tozları da kullanılabilir. Amorf polimer tozlarının kullanılması ile elde edilen parçalar mekanik özellik gerektiren uygulamalar için yeterli dayanım ve sağlamlık gösteremese de, yarı kristalli polimerler tozları kullanılan uygulamalarda sonuçlar bu tozlar için enjeksiyon kalıplama yöntemine yakın mekanik özellikler vermektedir. Bu malzemelerin yanında cam takviyeli PA tozları ve PA kaplamalı bakır tozları da SLS prosesinde kullanılabilmektedir. Bu malzemelerin yanı sıra bir ZnO, SiO₂, TiC gibi seramik malzemelerin yanı sıra Fe, Cu, Ti gibi bir çok malzeme de SLS prosesinde kullanılan malzemeler arasındadır (Kruth vd., 2003).

3.1.4. Toz Yatağı ve Püskürtme Temelli 3 Boyutlu İmalat

Toz yatağı ve püskürtme temelli 3 boyutlu imalat yöntemi literatürde, “bağlayıcı püskürtme” olarak da geçmektedir. Toz formunda malzemenin kullanıldığı bir diğer eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde SLS yönteminden farklı olarak bağlama işlemi bir takım kimyasal etkileşimler için değil, tozların üzerine bir kafa yardımıyla püskürtülen bağlayıcı tarafından gerçekleştirilir. Yöntem ilk olarak Massachusetts Teknoloji Enstitüsü’nde bulunmuştur ve Z Corporation tarafından ticari hale getirilmiştir (<http://www.news.bbc.co.uk/2/hi/technology/3126625.stm>).

Bağlayıcı püskürtme ile eklemeli imalat yönteminde diğer eklemeli imalat yöntemlerinde olduğu gibi nesne geometrisinden türetilen veri dosyası üzerinden parça katman katman imal edilir. Mürekkep püskürtmeli yazıcılarda kullanılan püskürtme kafalarının içine konulan bağlayıcı, tozların üzerine püskürtülere tozların birbirine bağlanmasını sağlar.



Şekil 3.4. Bağlayıcı püskürtme ile eklemeli imalatı anlatan görsel.

SLS prosesinde olduğu gibi bu yöntemde de iki ayrı platform makine üzerinde yer alır. Platformlardan biri inşa platformu iken, diğer platform toz besleme görevi yapar. İnşa platformu üzerine serilen tozlar, bağlayıcı etkisiyle birbirine yapışır ve nesne katman katman imal edilir. Her katmanın inşasından sonra serici bir silindir toz haznesindeki malzemeyi inşa platformu üzerine serer ve bu işlemler nesne imalatı tamamlanıncaya kadar devam eder.

Şekil 3.5'te üretimi anlatan görsel verilmiştir (<http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>). Üretim için filament ismi verilen besleme blokları kullanılır. Bu besleme blokları genellikle termoplastik veya termoplastik esaslı malzemelerdir. İnşa platformu Z eksenin dikey olarak hareket ederken, besleme bloğunun bağlı olduğu çıkıcıdan malzeme ergitilerek platformun üzerinde biriktirilir. Besleme bloğunun bağlı olduğu çıkıcı aslında bir ekstrüderdir ve X,Y eksenlerinde hareket edebilir. Çıkıcı ve platformun bağlı hareketleri neticesinde parça 3 boyutlu olarak imal edilir. Çıkıcının sonunda bir ısıtma birimi bulunur. Bir kanal ile çıkıcı girişinden alınan besleme bloğu ısı etkisiyle yumuşar. Filamentin katı olan noktası piston görevi görerek daha ileri uçtaki yumuşak malzeme yığınının platform üzerine biriktirilmesini sağlar. Çıkıcıdan çıkan ergiyik haldeki polimer malzeme platform üzerine yapışır. Çıkıcı takım geometrisinden türetilen GCode verilerine göre X,Y ekseninde hareket ederek, tanımlanmış kalınlıktaki malzemeyi platforma yığar. Ergiyik haldeki polimer katılaşırken, çıkıcıdan ergiyik haldeki maddenin akışı devam eder. Bu iki bölgede, ergiyik haldeki maddenin yapışkanlığı sebebiyle bir bütünleşme görülür. Katman iman edildikten sonra inşa platformu Z ekseninde belirlenmiş katman kalınlığı kadar aşağı iner. Nesne tamamlanıncaya kadar bu döngü devam ederek, nesnenin katman katman inşası tamamlanır.

FDM prosesinde parça geometrisine göre destek yapılarının kullanılması gerekebilir. Nesnenin geometrisinde platforma paralel düzlemde çıkıntıları var ise, bu çıkıntısız unsurların boyut doğruluğu adına desteklenmeleri gerekir. Bu sebeple ikinci bir filament ve çıkıcı bazı FDM cihazlarında kullanılmaktadır. Bu filamentler destek malzemesinden üretilmiş olup uygun görülen yerleri boşluklu hacimler şeklinde doldurur. Bu malzemeler bazıları: Polyethersulfone (PPSF), Polyphenylene ether copolymer (PC), Acrylic copolymer (SR-100)'dür (<http://www.stratasys.com/materials/material-safety-data-sheets/fdm/support-materials>). Destek malzemesi objenin üretimi tamamlandıktan sonra fiziksel veya kimyasal bir müdahale ile nesneden uzaklaştırılır.

3.2. Üç Boyutlu İmalat Çeşitlerinin Karşılaştırılması

3 boyutlu imalat temelde geleneksel yazıcılarla benzer bir prensiple çalışmaktadır. Bununla birlikte her teknik farklı bir prensibi temel alarak çalışır. SLS ve toz bağlama ile eklemeli imalat tekniği toz formunda malzemelerin kullanılması bakımında ortak bir nokta taşırken, tozların bağlanması SLS yönteminde lokal lazer ışını absorpsiyonu ile olurken toz bağlama ile eklemeli imalat tekniğinde tozlar bir bağlayıcı ile bağlanır. Bununla birlikte LOM tekniğinde malzeme lamine haldedir ve tekniğin içerisinde iki boyutlu kesim işlemi yapan bir

tür CNC cihazı bulunur. SLA tekniği fotopolimerizasyon ile çalışırken, polimer malzeme FDM’de filament denilen özel bir formdadır ve polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı üzerinde kauçuğumsu davranış göstermesini temel alır. İstenilen uygulamaya göre bu tekniklerden bir veya bir kaç tercih edilebilir.

Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla eklemeli imalat yöntemleri karmaşık geometrilerin üretilmesine imkân sağlar. Konvansiyonel yöntemlerde parça imalatı için gerekli olan takım, kalıp ve üretim sonrası işlemler genelde olmadığından dolayı üretim maliyetleri ve üretim için gerekli zaman düşüktür. Son yıllarda üretim tekniklerinin artması ve yaygınlaşmasına ek olarak artan malzeme seçeneği eklemeli imalatı bir hızlı prototipleme konsepti olmaktan çıkartıp konvansiyonel üretim yönlerine ikame bir yöntem haline getirmiştir. Biyomedikal sektöründen, otomotive, havacılık sektöründen dış implantlarının üretilmesine kadar birçok farklı alanda farklı eklemeli imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Bu proseslerin bazı avantajları ve dezavantajları sıralanacak olursa (Gao vd., 2015).

Biriktirme yöntemi ile eklemeli imalat; termoplastik, seramik ve metal macunları kullanılabilir. Malzemeler termal enerji ile bağlanır. Düşün maliyetli cihazlar ve farklı malzemelerin desteklenmesi avantajları iken, üretilen parçanın düşük yüzey kalitesi ve düşük çözünürlüğü dezavantaj olarak gösterilebilir. Toz yatağı yöntemi ile eklemeli imalat Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS), Seçici Lazer Ergitme (SLM), Elektron Işın ergitme (EBM) gibi farklı yöntemleri kapsar. Paslanmaz çelik, kobalt-krom, seramik ve poliamid tozlarının kullanıldığı bu tekniklerde birleştirme prensibi, yüksek güçlü lazer ışını veya elektron ışınlarıdır. Avantajları olarak tam yoğunlukta parça imalatına izin vermesi, yüksek boyutsal doğruluklarda çalışabilme imkânı ve destek yapılarının prosesin kendisi tarafından sağlanması gösterilebilir.

Fotopolimerizasyona dayanan imalat yöntemi SLA prosesidir. Fotopolimer reçine kullanılan bu yöntemde kızılötesi ışın birleştirme tekniği olarak kullanılır. İyi parça çözünürlüğü, yüksek inşa hızı avantajı iken malzeme giderlerinin yüksek olması dezavantajıdır. LOM prosesinde metal, plastik folyolar üretimde kullanılan malzemelerdir. Malzeme ve ekipman giderlerinin düşük olması avantajı ile parçaların delaminasyona uğrama ihtimali dezavantajıdır. Bağlayıcı yolu ile eklemeli imalatta metal, seramik veya polimer tozlar kullanılır. Bu imalat yönteminde renkli ürünler geniş yelpazede malzeme seçeneği ile imal edilebilirken, nihai parçanın porozite içermesi ve nihai parçanın bir son işleme gerek duyması dezavantajları olarak gösterilebilir.

Görüldüğü gibi eklemeli imalat yöntemleri her bir ayrı teknik için tekniğin temelinde yatan sebeplerden ötürü avantajlara ya da dezavantajlara sahiptir. Örneği SLS tekniği tam yoğunluklu parça üretimine imkân verirken bağlayıcı ile eklemeli imalat yönteminde parçalar porozite içerir. Bununla birlikte görsel prototip olarak kullanılacak parçaların bağlayıcı ile eklemeli imalat ile üretilmesi renkli parça üretimine izin verirken, SLA yönteminde renkli parçaların imalatı şu an mümkün değildir. Bunlarla birlikte malzemelerin birleştirme yöntemleri farklı teknolojiler kullandığından dolayı cihazlar boyut ve fiyat açısından farklı yerlerde konumlandırılırlar. SLS yönteminde genelde CO₂ lazer ışını kullanılır ve bu sebeple makine büyük yer kapladığı gibi işletme giderleri ve ilk yatırım maliyetleri yüksektir. FDM prosesinde ise termoplastik esaslı malzemelerin camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıkmasını sağlayacak kadar ısı yeterli olduğundan proses diğer yöntemlere göre daha basittir, ilk yatırım maliyetleri ve malzeme giderleri daha düşüktür. Günümüzde SLS makinaları 846.000 dolar gibi yüksek fiyatlarla satılmaktadır. SLA cihazları ise 5.000 dolar seviyelerinde fiyat aralığına sahiptir. Bununla birlikte FDM tekniği kullanan cihazların fiyat aralığı nispeten daha geniştir. 140 dolar fiyata sahip kalem formundaki FDM cihazlarından 19.000 dolar fiyata sahip büyük boyutlu FDM cihazları vardır. Piyasada masaüstü kullanımına uygun fiyata sahip FDM cihazları ise 1.000-5.000 dolar arasında bir fiyat aralığına sahiptir (www.3ders.org/pricecompare/3dprinters/). Toz bağlama yöntemini esas alan cihazlar ise kullanılan malzemenin cinsine göre 250.000 dolara kadar çıkabilmektedir (www.aniwaa.com/product/3d-printers/exone-m-flex/).



Şekil 3.6. Masaüstü kullanıma sahip bir FDM cihazı

Şekil 3.6’da masaüstü kullanımına uygun bir FDM cihazı gösterilmiştir (static.makerwise.com/static/img/3d-printer/orig/543/ultimaker-ultimaker-2-08.jpg). Bu cihaz 493x342x688 mm boyutlara sahip olup 12,3 kg ağırlığındadır (ultimaker.com/en/products/ultimaker-2-plus/specifications).



Şekil 3.7. Autodesk firmasının Ember adlı SLA cihazı.

Şekil 3.7’de Autodesk firmasına ait Ember isimli SLA cihazının görseli verilmiştir (<https://all3dp.com/wp-content/uploads/2015/05/Ember-e1432042121695.jpg>). Cihaz 325x340x434 mm boyutlara sahip olup 10 kg ağırlığındadır.

Yukarıdaki bilgiler göz önünde alındığında SLA ve FDM cihazlarının makine boyutu olarak kapladıkları alanın asgari olması ve diğer eklemeli imalat cihazlarına göre nispeten ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması bu cihazları eklemeli imalat teknolojileri arasında yaygınlık ve erişilebilirlik açısından öne çıkarmaktadır. Bununla birlikte unutulmaması gereken nokta SLA cihazlarının ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması gibi bir avantajının yanında fotopolimer reçinelerin yüksek maliyetli malzemeler olmasıdır. FDM cihazlarında kullanılan iki yaygın malzeme olan ABS ve PLA filamentlerinin ise maliyeti oldukça düşüktür. Makinelerinin yaygınlığı ve hatta kendin-yap cihazlarının ön plana çıkması ve avantajlı maliyet giderleri FDM cihazlarını bir adım daha öne çıkarmaktadır.

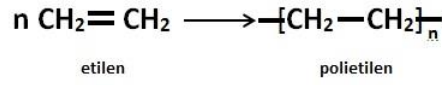
4. POLİMERLER VE EKSTRÜZYON PROSESİ

Polimerler plastikler olarak da adlandırılan; seramikler, metaller, yarı iletkenler ve kompozitler gibi gündelik hayatta pek çok uygulamada sıklıkla kullanılan mühendislik malzemelerinden biridir. Metallerin aksine amorf yapıda bulunabilirler ve bazı durumlarda amorf ve kristal yapı, ikisi birlikte polimerin içerisinde yer alabilir. Doğada; DNA, protein gibi çeşitli formlarda olabilecekleri gibi sentetik yollarla da elde edilebilen günlük hayatta çeşitli özelliklerinden faydalanılan polimer malzemeler de mevcuttur. Neopren, polivinilklorür (PVC), polisitiren (PS) gibi polimerler sentetik polimerdir ve gündelik hayatta farklı alanlarda oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Kolay işlenebilirlikleri/şekillendirilebilirlikleri, hafif olmaları, kimyasal etkileşimlere ilgisiz olmaları ve düşük maliyetleri polimerlerin tercih edilmelerinde rol oynayan özelliklerdir. Polimerler, doğası gereği bazı sınırlı özelliklere sahiptir fakat son yıllarda mukavemetlerinin, rijitliklerinin ve alev dayanımlarının artırılmasına yönelik önemli çalışmalar bu malzemelerin mühendislik malzemeleri olarak kullanılmasını yaygınlaştırmıştır.

Sentetik polimerler petrol türevi malzemelerdir. Yapılarında S, O, C, H, N atomlarını ihtiva ederler. Yapılarında “mer” adı verilen birleşenlerin birleşerek uzun zincirler oluşturması işlemi temel alınarak sentezlenirler. Polimerler “mer”lerin kuvvetli çapraz bağlar veya zayıf ikincil bağlar ile bağlanması ile oluşan yüksek molekül ağırlıklı maddelerdir ([web.itu.edu.tr/~dikicioglu/WEBMAL201/Mal201Atom-Duzlem\(1\).pdf](http://web.itu.edu.tr/~dikicioglu/WEBMAL201/Mal201Atom-Duzlem(1).pdf))

4.1. Polimerlerin Sentezlenmesi (Polimerizasyon)

Polimerlerin, monomer birimlerinden elde edilmesini sağlayan kimyasal reaksiyonlara polimerizasyon denilmektedir. Polimer kelime olarak tekrarlı alt birim anlamına gelmektedir. Buradan yola çıkarak polimer isimlendirmesi yapılabilir. Eğer polimeri oluşturan alt birim tek ise polimer isimlendirmesi bu birimin başına “poly-“ getirilerek yapılır. Örneğin etilen monomerlerinin polimerizasyonu sonucu oluşan polimere polietilen denmektedir (Şekil 4.1). Bundan farklı olarak polimerler birden fazla alt birim içerebilir. Böyle durumlarda isimlendirme en büyük alt birim baz alınarak yapılır ve polimerin başına parantez içerisinde “poly” eki getirilir. Örnek olarak poly[oxy(1-fluoroethylene)] verilebilir. (<http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/polymers/chem/chem.htm>).

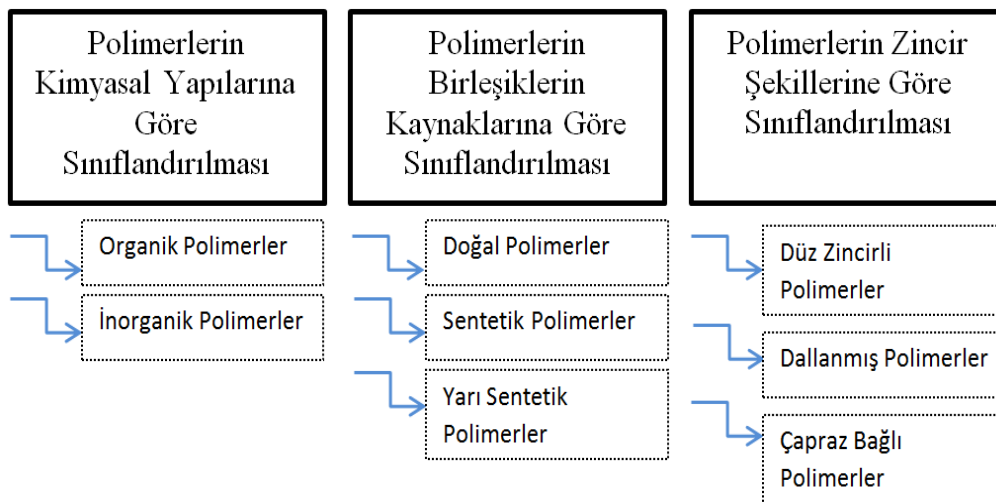


Şekil 4.1. Polietilenin polimerizasyonu

Polimerizasyon, monomerlerin ısı ve basınç altında birleşerek uzun zincirler oluşturmasıyla meydana gelir. Polimerizasyon türleri; aşamalı polimerizasyon ve katılma polimerizasyonu olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Katılma polimerizasyonu, zincir polimerizasyonu olarak da isimlendirilir. Bu polimerizasyon yönteminde monomerler birbirlerinden çift bağ-tek bağ farkıyla ayrılırlar. Bu işlemde yinelenen monomerlerde bir atom ya da molekül kaybı söz konusu değildir. Örnek olarak poliüretan, polikarbonat, poliasetal verilebilir. Aşamalı polimerizasyon ise basamaklı polimerizasyon veya kondensasyon polimerizasyonu olarak isimlendirilir. Bu polimerizasyon yönteminde $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$ ve $-\text{NH}_2$ gibi bifonksiyonel çıkış maddeleri bulunur ve kondensasyon sırasında H_2O ve HCl gibi küçük moleküller ayrılır. Bunlara örnek olarak polietilen, polistren, poli(vinil klorür) verilebilir (Sacak, 1998).

4.2. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerler, yapılarına göre içerdikleri organik veya inorganik maddelere göre, kullanım yerlerine göre çeşitli kriterler kullanılarak sınıflandırılabilir. Şekil 4.2’de polimerlerin kimyasal yapılarına göre, birleşiklerinin kaynaklarına göre, zincir şekillerine göre başlıca üç ana başlıkta polimerlerin sınıflandırılması yapılmıştır.



Şekil 4.2. Polimerlerin sınıflandırılması.

4.2.1. Polimerlerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması

Organik polimerlerin yapılarında ana zincirde karbon atomu olmak üzere F, Cl, Br, I gibi atomlar bulunur. Günlük hayatta kullanılan polimerlerin çoğu organik polimerdir. Bununla birlikte organik polimerler doğal ve sentetik polimerlerin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Polikarbonatlar, poliesterler, selülozlar; yaygın olarak kullanılan organik polimerlerdir (en.wikipedia.org/wiki/Category:Organic_polymers). Bununla birlikte protein, selüloz ve doğal kauçuk da doğada kendiliğinden bulunan organik polimerlerdir.

İnorganik polimerlerde ana zincirde karbon atomu yerine Ge, Si, B gibi elementler bulunur. Karbonun ana zincirinde temel bileşen olarak bulunduğu inorganik polimerler de mevcuttur. Organik ve inorganik bileşenleri içeren polimerlere ise hibrit polimerler denmektedir (en.wikipedia.org/wiki/Inorganic_polymer). İnorganik polimerlerin kullanımları organik polimerler kadar yaygın değildir.

4.2.2. Polimerlerin bileşiklerin kaynağına göre sınıflandırılması

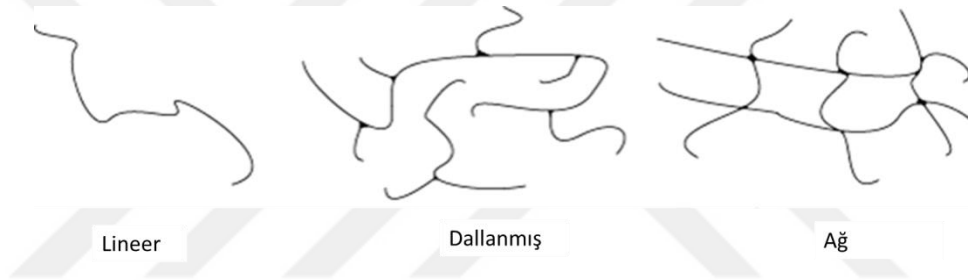
Bileşiklerinin kaynaklarına göre polimerler; doğal, sentetik ve yarı-sentetik polimerler olmak üzere üç gruba ayrılır. Doğal polimerler doğadaki canlı veya cansız varlıkların yapılarında bulunabilir. Enzimler, nükleik asitler (DNA, RNA) ve proteinler doğada bulunan doğal polimerlere örnektir ve canlıların canlılık aktivitelerinin devamında rol oynayan bu polimerlere biyopolimer denilmektedir. Bununla birlikte günümüz taşıtlarında lastik olarak kullanılan kauçuk polimeri, kauçuk ağacından elde edilerek kullanılan doğal bir polimerdir. Kauçuk kaynağından çıkarıldığı hali ile yüksek yapışkanlık ve düşük esneklik gösterir. Kauçuğun içerisine kükürt elementinin katılarak uygulamalara uygun hale getirilmesi işlemine vulkanizasyon işlemi denilmektedir. Vulkanizasyon işleminde doğal ya da sentetik polimerler kükürtle etkinleştirilerek polimer zincirleri arasında çapraz bağ oluşumu sağlanır. Taşıt lastikleri vulkanize edilmiş kauçuk polimerlerdir ve vulkanizasyon işlemi ile maddenin rezilyansı ve elastikliği artırılır (www.cmu.edu/gelfand/k12-teachers/polymers/natural-synthetic-polymers/).

Sentetik polimerler insan yapımı polimerler olup petrolün hammadde olarak kullanılması ile sentezlenir. Günlük hayatta yapıştırıcı yapımından, para yapımına; otomobil lastiklerinden göz lenslerine kadar pek çok alanda sentetik polimerler kullanılır. Polietilen, polistren gibi sentetik polimerlerin ana zincirlerinde karbon-karbon etkileşimi varken; poliester, polikarbonat gibi sentetik polimerler hetero zincirli polimerlerdir. Sentetik polimerler plastikler, elastomerler ve fiberler olmak üzere 3 alt gruba ayrılırlar (www.bayar.edu.tr/besergil/2_ticari_polimerler.pdf).

Yarı sentetik polimerler doğal polimerlerin kimyasal yollarla yapılarının değiştirilmesi ile oluşturulan polimerlerdir. Otomobil lastiklerinde kullanılan vulkanize kauçuğun hammaddesi olan kauçuk doğal polimer iken vulkanizasyon işlemi ile yarı-sentetik polimer oluşturulur. Ayrıca boya yapımından, dolgu maddelerinin yapımına kadar birçok uygulaması mevcuttur.

4.2.3. Polimerlerin zincir şekline göre sınıflandırılması

Polimerizasyon yöntemi ile üretilen polimerlerdeki “mer” bileşenlerinin bir araya gelmesi ile oluşan yapı zincir şeklindedir. Bu zincir benzeri yapıdan dolayı polimerler makromolekül olarak isimlendirilirler. Zincir şekline göre polimerler; düz zincirli polimerler, dallanmış polimerler ve çapraz bağlı polimerler olmak üzere Şekil 4.3’te gösterildiği gibi üç gruba ayrılır (www.doitpoms.ac.uk/tlplib/polymerbasics/images/branching-arrangements.gif).



Şekil 4.3. Polimer malzemelerdeki zincir yapıları.

Doğrusal zincirli polimerlerde ana zincir üzerinde atomlara kovalent bağlarla bağlanmış başka zincirler yoktur ve bu atomlara yalnız yan gruplar bağlıdır. Bu yapılarından ötürü çözücülerde çözünürler ve eritilerek defalarca kullanılabilirler.

Dallanmış polimerlerde ana zincirler üzerinde ana zincirin kimyasal yapısıyla özdeş başka zincirler bulunur. Bu yan zincirler ana zincire kovalent bağlarla bağlıdır ve görüntü bir dal şeklindedir. Bu polimerlerde yan zincirler ikincil tepkimelerle oluşur ve kimyasal etkileşimlere bağlı olarak yan zincirler üzerinde de başka dallanmalar oluşabilir.

Dallanmış ve doğrusal polimerlerin ana zincirleri arasında kovalent bağlar bulunmaz. Genelde bu zincirleri London kuvvetleri, hidrojen bağları ve polar etkileşimler gibi ikincil etkileşimler bir arada tutar. London kuvvetleri zayıf “Van-der-Waals” olarak da bilinen moleküller arası indüklenmiş polarize bağlardır. Tüm polimerler içerisinde bulunan bu bağ büyük moleküllerin polarize olma eğilimlerinin yüksek olmasından dolayı, yüksek ağırlıklı moleküllere sahip polimerlerde daha yoğun gözlemlenir (faculty.uscupstate.edu/llever/polymer%20resources/IM_Forces.htm). Hidrojen bağı ise

elektronegatif bir atoma bağlanan hidrojenin kısmi olarak artı yüklenmesi sonucu başka bir elektronegatif molekül veya atom ile oluşturduğu bağıdır. Bu bağ türü H atomu ile F, O, N atomları arasında gerçekleşir. Polimerlerde H atomu taşıyan gruplarının, taşıdığı kısmi artı yükün etkisi ile başka moleküller ile arasında kurulan bağ hidrojen bağıdır. Ayrıca H bağları polimer karışımlarının hazırlanmasında, polimerlerin birbiri içinde daha kuvvetli bağlar kurulmasını sağlayarak polimerler karışımlarının oluşmasında etkili rol oynar (He vd., 2004).

Çapraz bağlı polimerlerde durum dallanmış ve doğrusal polimerlerden farklıdır. Bu polimerlerde ana zincirler birbirine kovalent bağlar ile bağlıdır. Bu yoğun bağlardan dolayı polimer içerisinde ağırsı bir yapı mevcuttur. Ana zincirler üzerindeki bu yüksek etkileşimlerden dolayı çapraz bağlı polimerler bir çözücü içerisinde çözünmezler. Çözücü içerisinde çapraz bağların yoğunluğuna göre şişme gözlenebilir. Çapraz bağların yoğunluğu arttıkça polimerin çözücüdeki şişme derecesi azalır.

4.3. Polimerlerin İşleme Yöntemlerine Göre Sınıflandırılması

Polimerler, birçok sınıflandırma yönteminin yanında işleme şekillerine/ yöntemlerine göre üç gruba ayrılır. Bunlar; termoplastikler, termosetler ve elastomerlerdir.

4.3.1. Termoplastikler

Isı etkisiyle eritilerek yeniden şekillendirilebilen polimerlere termoplastik ya da kısaca plastik denilmektedir. Isı etkisiyle şekillendirilebilir olmaları ve tekrar tekrar kullanılabilmeleri plastiklerin kullanım alanlarının geniş olmasına sebep olmuştur. PE, PS ve PVC ticari kullanımları olan bazı plastiklerdir.

Zincir çeşitlerine göre doğrusal veya dallanmış yapıda olabilirler. Polimer molekülleri arasında kovalent bağlar yerine London kuvvetleri, hidrojen bağları ve polar etkileşimler gibi ikincil etkileşimler görülür. Bu zayıf bağlar ısı etkisiyle kırılabilir ve termoplastikler bu ikinci bağların etkisi ile başka çözücüler içerisinde çözünebilirler. Termoplastiklerin molekül zincirleri arasındaki ikincil bağların ısı etkisiyle kırılması, termoplastiklerin şekillendirilmelerinde önemli rol oynar. Oyuncak yapımında, poşet üretiminde ve ambalaj imalatında hammadde olarak kullanılabilirler.

Termoplastikler sentezlendikten sonra granül veya pelet gibi küçük taneciklere dönüştürülerek şekillendirme prosesleri için uygun hale getirilir. İstenilen son ürüne göre uygun proseslerle şekillendirilen termoplastikler eritilerek tekrar kullanılabilir hale getirilebilirler.

4.3.2. Termosetler

Termosetler, termoplastiklerden farklı olarak molekülleri arasında çapraz bağlara sahiptir. Ağsı yapıdaki bu çapraz bağların etkisiyle termosetler çözücüler içerisinde çözünmezler. Yine termoplastiklerden farklı olarak sıcaklık etkisiyle ergimezler. Termosetler yüksek sıcaklıklarda geri dönüşümsüz bir şekilde bozunurlar.

Termosetlerin ısı etkisiyle şekillendirilememelerinden dolayı geri dönüştürülerek tekrar kullanılmaları mümkün değildir. Bu sebeple termosetlerin polimerizasyonları iki aşamada yapılır. İlk olarak reçine formunda bulunan termoset malzeme gerekli katkı maddelerinin de katılmasıyla bir kalıplama işlemine tabi tutulur. Kalıplama esnasında ısı ya da ışın etkisiyle kalıplanan termoset reçine içerisinde çapraz bağlar oluşur ve termosetlerin şekillendirilmesi tamamlanır.

4.3.3. Elastomerler

Kauçuk özellikleri gösteren polimerlere elastomer denir. Elastomerler kuvvet etkisi altında kuvvet yönünde uzama göstererek düzgün bir yapıya geçerler. Kuvvet etkisi ortadan kaldıktan sonra elastomer molekülleri yüksek entropiye sahip karmaşık yapılarına geri dönerler ve depoladıkları enerjiyi bu şekilde bırakırlar.

Elastomerler camsı geçiş sıcaklığının üzerinde kullanılan amorf polimerlerdir ve az oranda çapraz bağ içerirler. Elastomer moleküllerinin arasındaki çapraz bağlar sayesinde kalıcı deformasyon önlenerek elastomerler ilk şekillerini koruyabilirler.

Doğal bir polimer olan kauçuk vulkanizasyon işlemi ile elastomer yapıya geçirilebilir. Vulkanizasyon işleminde, kauçuk zincirlerine bağlanan sülfür(S) atomları sayesinde zincirler arasında az oranda çapraz bağ oluşturulur. Bu işlem sırasında gereğinden fazla kükürt kullanımı çapraz bağların artmasına ve kauçuğun elastomer yerine termoset oluşturmaya sebep olur.

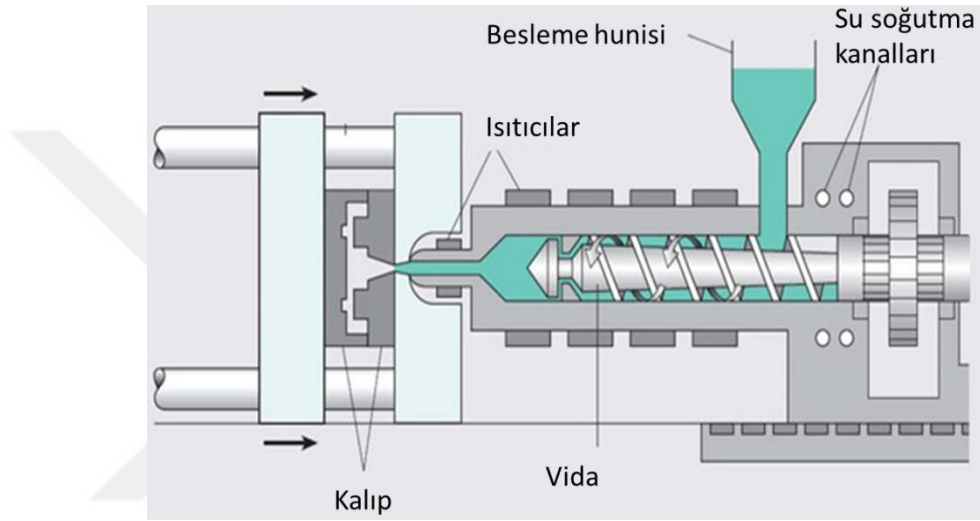
Aynı zamanda bir kopolimer olan stiren-bütadien (SBR) dünya elastomer kullanımının büyük çoğunluğunu oluşturur.

4.4. Polimerler İşleme Teknikleri

Polimerler, polimerizasyon işlemi ile üretildikten sonra pelet, granül ya da reçine halindedir. Bu malzemelerin nihai ürün olarak kullanılmaları için bazı teknikler ile işlenmeleri gerekmektedir. Endüstride kullanılan polimer işleme teknikleri şunlardır: enjeksiyon yöntemi, döner kalıplama yöntemi, ısı şekillendirme yöntemi, şişirme yöntemi, köpükleme yöntemi, transfer kalıplama yöntemi ve ekstrüzyon yöntemi.

4.4.1. Enjeksiyon yöntemi

Enjeksiyon ile üretim yönteminde, ham polimer bir besleme ünitesinden kovana beslenir. Kovan üzerinde yer alan ısıtıcılar ile şekillendirmeye hazır hale gelen polimerler, kovan boşluğunda yer alan sonsuz vida tarafından basınçlandırılır ve tasarımı istenilen ürüne göre yapılmış olan kalıp boşluğuna basılır. Üretimi anlatan görsel Şekil 4.4'te verilmiştir (www.aplusplastics.com.au/images/injection%20moulding.jpg).



Şekil 4.4. Enjeksiyon yöntemi ile polimer parçalarının üretimi.

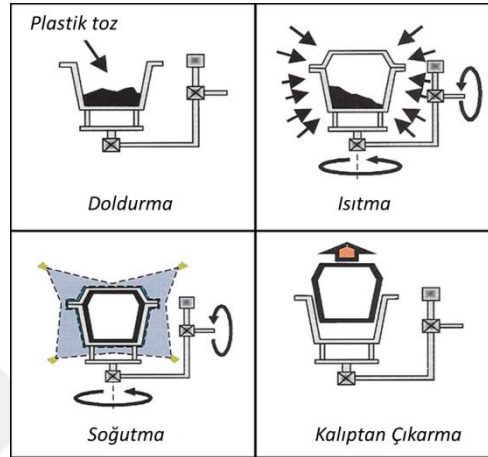
Enjeksiyonla üretim yönteminde nihai parçanın istenilen mukavemet değerlerini sağlayabilmesi için proseste kullanılacak polimerin reolojisi önemli bir parametredir. Kalıp içerisine enjekte edilen polimerin kalıp boşluğunu kolay bir biçimde doldurması, nihai ürünün dayanımını arttırdığı gibi bu sayede ürün üzerinde oluşabilecek artık gerilmenin önüne geçilir. Bu şartlar üretimin döngü zamanını düşürerek maliyetlerin azaltılmasında önemli rol oynar (da Silva vd., 2016).

4.4.2. Döner Kalıplama Yöntemi

Döner kalıplama yöntemi kalıp kullanılarak şekillendirmenin yapıldığı diğer bir polimer işleme tekniğidir. Bu teknik içi boş parçaların üretimine imkân verir. Enjeksiyon veya ekstrüzyon yönteminden farklı olarak döner kalıplama yönteminde hammaddenin kalıba transferi işlemi basınç gerektiren bir işlem değildir.

Döner kalıplama yöntemine ait üretim basamaklarını gösteren görsel Şekil 4.5'te verilmiştir (http://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/rotational_moulding.aspx). İşlem,

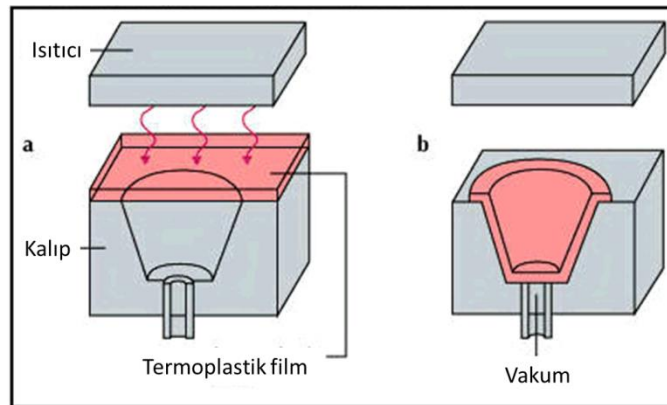
kalıbının içerisine boşaltılan hammaddenin ardından kalıbın kapatılması ile başlar. Kalıp içerisinde işleme sıcaklığına getirilen polimer daha sonra kalıbın döndürülmesi ile kalıp cidarlarına sıvanır ve elde edilen formun soğutulması sağlanır. Üretim işlemi gerçekleştirildikten sonra ürün kalıptan ayrılır ve üretim tamamlanır.



Şekil 4.5. Döner kalıplama yönteminde üretim aşamaları.

4.4.3. Isı şekillendirme yöntemi (Thermoforming)

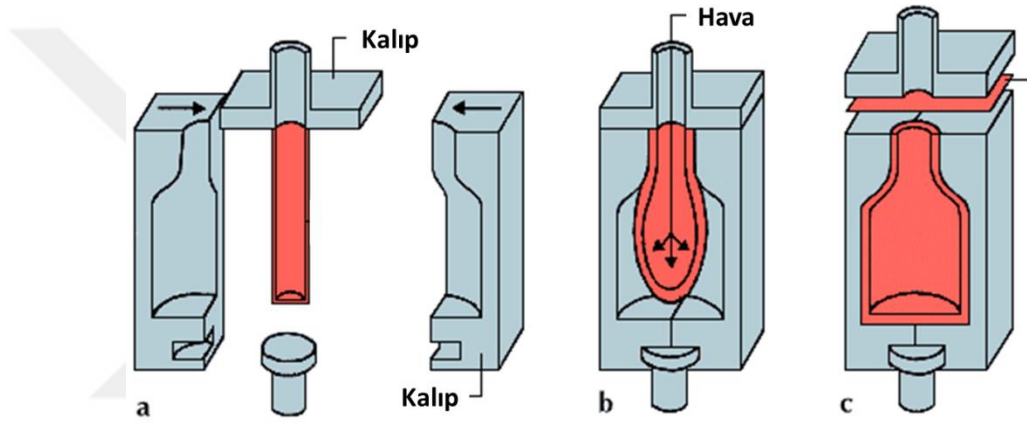
Polimerler ürünlerin üretilmesinde kullanılan bir diğer yöntemde ısı şekillendirme yöntemidir. Bu yöntem ile termoplastik polimerlerin üretimi yapılır. Bu üretim yönteminde şekillendirme vakum yardımıyla yapılabildiği gibi levhanın bir dişi bir erkek kalıbın arasına yerleştirilmesi ve bu sayede kalıp boşluğunun şeklini almasına dayanan bir prensipte de üretim yapılabilir. Isı şekillendirme yönteminin vakum yöntemiyle yapıldığı türüne ait görsel Şekil 4.6’da verilmiştir (media.web.britannica.com/eb-media/36/62936-004-11EC1F98.gif).



Şekil 4.6. Termoplastiklerin ısı etkisi ile şekillendirilmesi.

4.4.4. Şişirme yöntemi

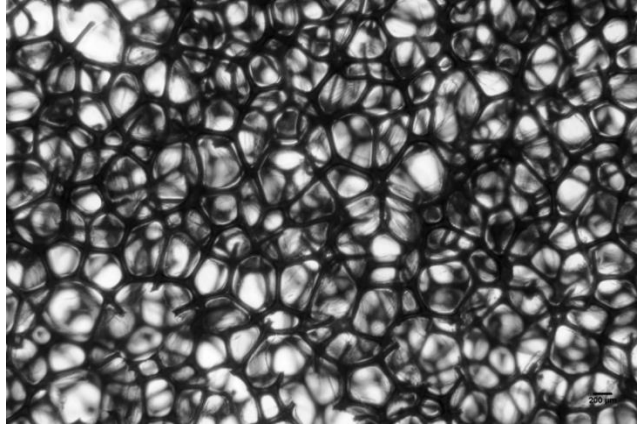
Şişirme yöntemi döner kalıplama yöntemi gibi içi boş ürünlerin üretimine imkân veren bir yöntemdir. Üretim işlemi kalıp içerisine konan hammaddenin içerisine hava üflenerek kalıbın şeklini almasını prensibine dayanır. Şişirme yöntemi enjeksiyon ve ekstrüzyon yöntemlerinin her ikisi ile de kullanılabilir. Enjeksiyon yönteminde üretim kesintilidir ve üretim döngüleri şeklinde bir üretim vardır. Ekstrüzyon yönteminde ise malzeme devamlı olarak kalıba beslenebilir ve bu sebeple hızlı, kesintisiz bir üretim söz konusudur. Üretime ait görsel Şekil 4.7’de verilmiştir (media.web.britannica.com/eb-media/38/62938-004-8BFC3D68.gif)



Şekil 4.7. Şişirme yöntemi ile üretim.

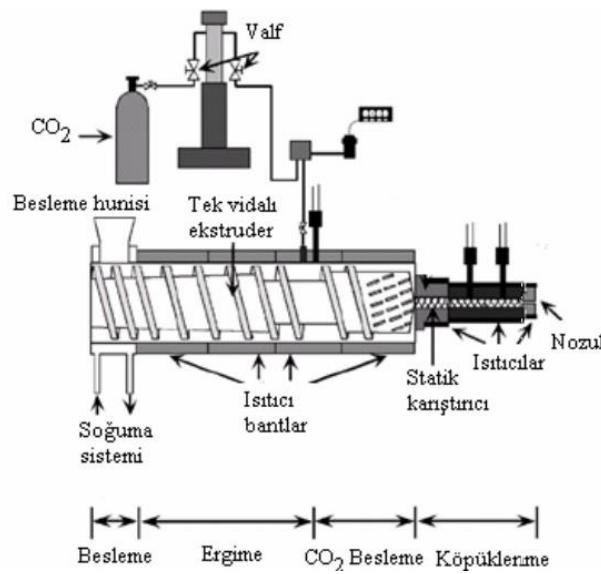
4.4.5. Köpikleme yöntemi

Polimer malzemelerin diğer mühendislik malzemelerine göre (metal, seramik, cam) ağırlık avantajlarının olmasına karşın, bazı uygulamalarda polimerik ürünlerin boşluklu iç yapılarla üretilerek daha da hafif olmaları sağlanabilir. Polimerik köpükler, ağırlık avantajlarının yanında yalıtkanlığın istendiği, yüzebilme koşulunun arandığı gibi birçok uygulamada da tercih edilen ürünlerdir. Termoplastik ve termoset polimerlerden üretilerler. Doğaları gereği termoset malzemelerden üretilen polimerik köpüklerin geri dönüştürülebilirliği mümkün değilken, termoplastik köpükler geri dönüşüm ile tekrar tekrar kullanılabilirler (Khemani, 1997).



Şekil 4.8. Polimerik köpük bir malzemenin üretim sonrası iç yapısı.

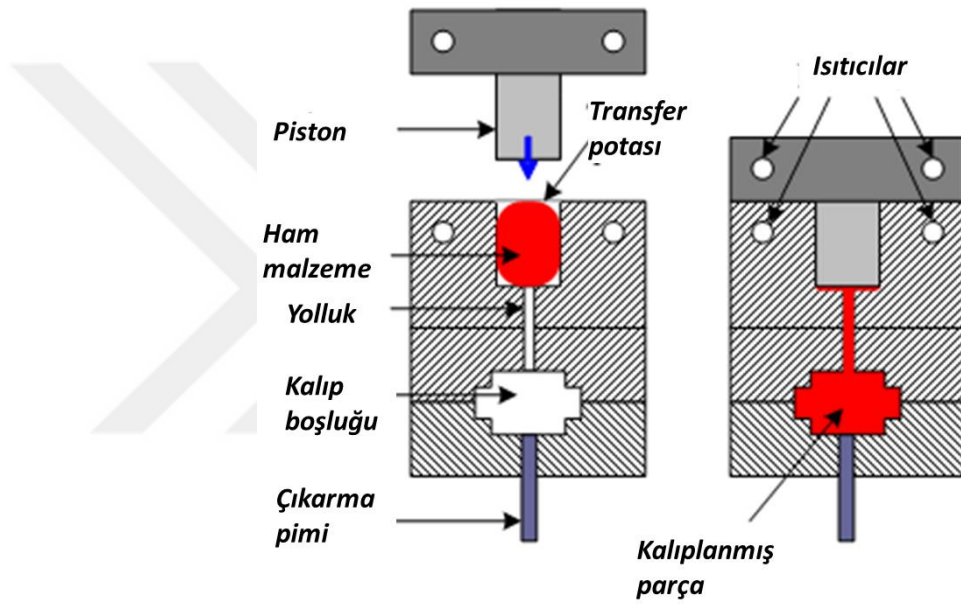
Köpükleme ile imalat yönteminde PU, PS, PVC, PP, PE gibi birçok termoplastik ve termoset polimer kullanılabilir (Lee ve Ramesh, 2004). Polimerik köpüklerin üretiminde enjeksiyon ve döküm yöntemleriyle yapılan üretimlerde kullanılan cihazlar, köpüklendirme donanımları ile entegre çalışarak üretimi gerçekleştirir. Köpüklendirme ajanı olarak genellikle CO₂ veya nitrojen gazları kullanılır. Üretimi yapılacak malzeme köpüklendirme ajanları ile köpürülerek nihai malzemenin içerisinde açık veya kapalı bağlantılı olmak üzere boşluklar oluşturulur. Polimerik bir malzemenin üretim sonrası iç yapısı Şekil 4.8’de gösterilmiştir (https://www.nibib.nih.gov/sites/default/files/SMP_closeup.png). Polimerik köpük malzemelerin ekstrüzyon yöntemi ile üretimine ait görsel Şekil 4.9’da verilmiştir (Yetgin ve Unal, 2008).



Şekil 4.9. Ekstrüzyon yöntemi ile polimerik köpük üretimi.

4.4.6. Transfer kalıplama yöntemi

Transfer kalıplama yöntemi termoset polimerlerin üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde hammadde ilk olarak bir ön ısıtma odasında tutulur. Isınan malzemenin vizkozite kazanmasıyla birlikte malzeme şekilleneceği kalıba yüksek basınç altında transfer edilir. Kalıp içerisinde termoset malzemenin çapraz bağlar oluşturarak kürlenmesi sağlanır ve nihai ürün kalıptan çıkartılır. Bu işleme ait görsel Şekil 4.10'da verilmiştir (<http://www.westcoastgasket.com/transfer-molding.html>).

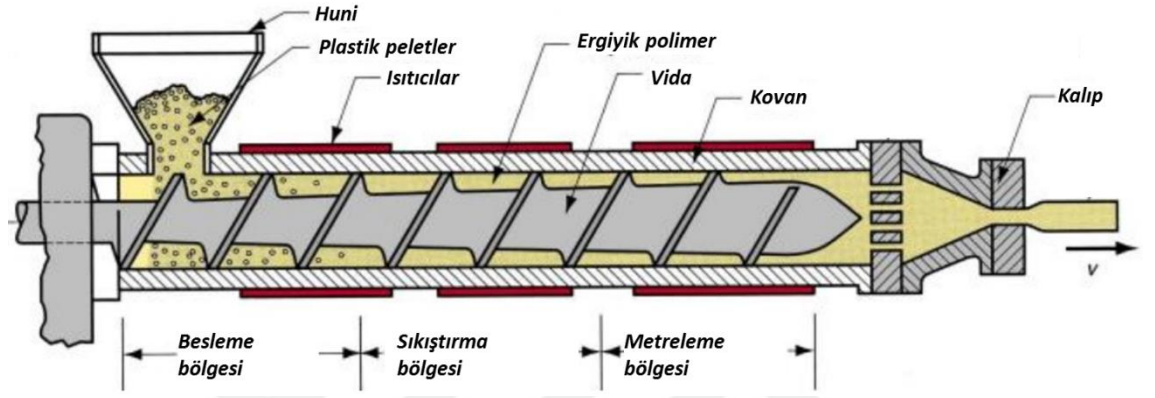


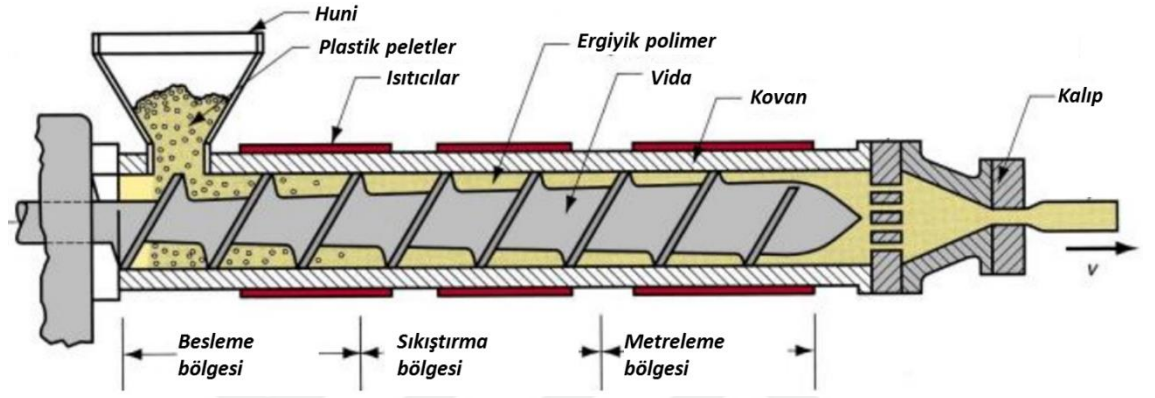
Şekil 4.10. Transfer kalıplama yöntemi ile üretim.

Transfer kalıplama yöntemi polimer kompozitlerin üretiminde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Oksman, 2001; Levakou vd., 1996; Holmberg ve Berglund, 1997). Kompozit üretiminde, üretim destek malzemesinin kalıp boşluğuna konularak başlar ve bu kalıba basınç altında matris malzemesinin destek transferi ile son bulur.

4.4.7. Ekstrüzyon yöntemi

Ekstrüzyon yöntemi polimer işleme yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Yöntem, enjeksiyon ile üretim yöntemi ile benzerlikler gösterse de kullanılan kalıplar bakımından birbirinden ayrılır. Enjeksiyon ile üretim yönteminde üretim işlemi, üretim döngülerinin tekrar ettiği kesintili bir düzende gerçekleşir. Ekstrüzyon yönteminde ise malzemenin devamlı beslenmesi söz konusudur ve kesintisiz bir üretim vardır. Enjeksiyon ile

üretim yönteminde kullanılan kalıp kapalı içen, ekstrüzyon yönteminde açık kalıp kullanılır. Kovan içindeki ergimiş termoplastik malzeme sonsuz bir vida ile basınçlandırılarak kalıptan çıkar. Malzeme kalıbı, üretilen ürünün kesit geometrisini belirler. Üretim yöntemini anlatan görsel  4.11'de verilmiştir (www.kuet.ac.bd/webportal/ppmv2/uploads/1409805385Polymer%20Processing.pdf).



Şekil 4.11. Ekstrüzyon yöntemi.

Ekstrüzyon ile üretim yönteminde termoplastik malzeme kovan etrafındaki ısıtıcılar tarafından yumuşatılır. Ayrıca sonsuz vidanın dönme hareketi ile malzemenin etkileşimi de bir ısı açığa çıkartır ve bu ısılar yardımıyla malzeme istenilen viskoziteye sahip olur (www.teppfa.eu/production-processes/). Bu yöntem kullanılarak boy uzunluğu kesit alanın kat be kat fazlası olan ürünler imal edilebilir. Kullanılan kalıplar sayesinde karmaşık kesitli geometriye sahip ürünler imal edilebilir. PVC doğramalar bu yöntemle üretildiği gibi PE ve PP boruların yapımında da ekstrüzyon yöntemi kullanılır.

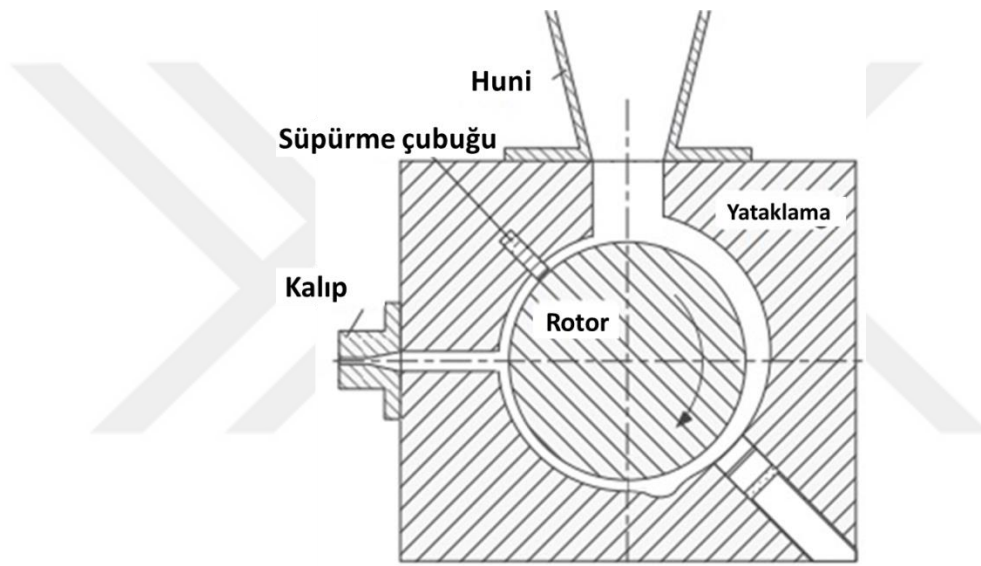
4.5. Ekstrüzyon Yönteminde Kullanılan Ekstrüderler

Ekstrüzyon yönteminde nihai ürüne ve nihai ürünün üretim şekline göre farklı tipte ekstrüderler kullanılabilir. Enjeksiyon kalıp veya şişirme kalıp yöntemi kullanılarak üretim yapılmak isteniyorsa ekstrüderin kesintili malzeme transferi yapması gerekir. Devamlı bir üretim yapılması isteniyorsa bu noktada seçilmesi gereken ekstrüder genellikle vida tipi ekstrüderdir.

En çok tercih edilen ekstrüder çeşitleri şu şekildedir: disk ekstrüderler, koçbaşı ekstrüderler ve vida tipi ekstrüderler.

4.5.1. Disk ekstrüderler

Vida tipi ekstrüderlerin yanı sıra devamlı üretime izin veren diğer bir ekstrüder çeşidi disk ekstrüderdir. Bu tip ekstrüderlerde üretim devamlılığı vida tipi ekstrüderlerde olduğu gibi arşimed vidası prensibine dayanmaz. Malzemenin ekstrüzyonu için disk şeklinde dönen bir eleman içerir. 1950’li yıllardan beri kullanıyor olsalar da vida tipi ekstrüderler kadar yaygın değildirler. Şekil 4.12’de davul tipi bir disk ekstrüder gösterilmiştir (Rauwendaal, 2013).



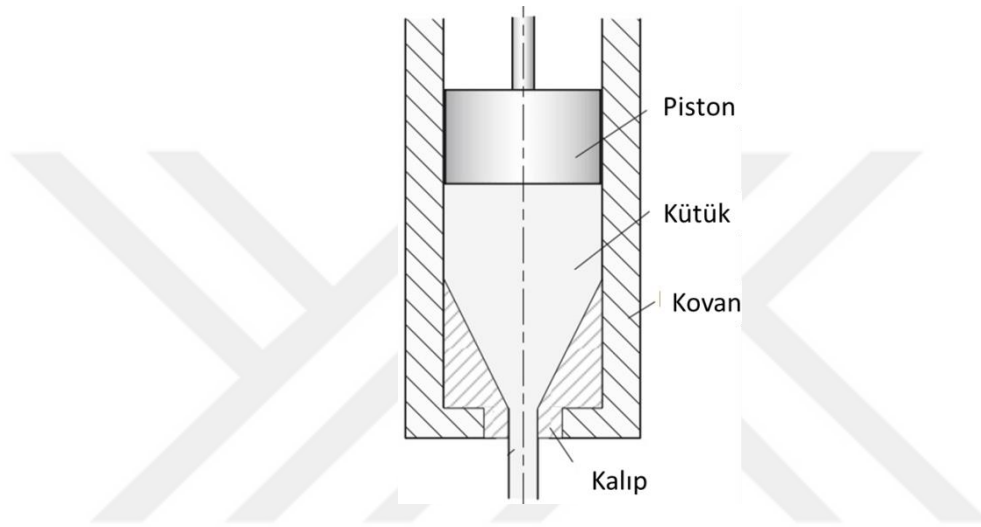
Şekil 4.12. Davul tipi disk ekstrüder.

Farklı tiplerde disk ekstrüderler geliştirilmiş olmasına rağmen, bu ekstrüderler kesintisiz üretim bakımından vidalı ekstrüderlerin performansına yaklaşamamışlardır. Yüksek performanslı disk ekstrüderlerin karmaşık tasarımları beraberinde getirdiği maliyet dezavantajları ile birlikte pratik çözümler olmaktan uzaktır.

4.5.2. Koçbaşı ekstrüderler

Literatürde “ram ekstrüder” olarak geçen koçbaşı ekstrüderler, ekstrüzyon proseslerinin tarihteki ilk örneklerini teşkil eder. Şekil 4.13’te bir koçbaşı ekstrüdere ait görsel verilmiştir (Rauwendaal, 2013). Tek başlı tipleri olduğu gibi birden fazla başın bir arada kullanıldığı çoklu koçbaşı ekstrüderler de vardır. Çalışma prensibi olarak devamlı üretim yapamazlar. Tasarımlarının getirdiği kesintili üretim yapma durumu onları, şişirme kalıplama ve enjeksiyon kalıplama yöntemleri gibi döngülü üretim yapılan uygulamalarda tercih edilebilir kılmaktadır.

Yüksek basınçlara çıkabilme gibi avantajları varken, polimer haznesi içerisindeki üniform olmayan sıcaklık dağılımı olumsuz özelliklerindendir. Polimer ergiyiği üzerine basınç uygulayan makine elemanı ile ergiyik arasındaki sürtünmeyi azaltarak, daha düşük basınçlar ile çalışılmasına imkân veren hidrostatik koçbaşı ekstrüderler de vardır. Bu ekstrüderler de genellikle basınç iletimi için bir yağ kullanılır. Sistemde sıvı sirkülasyonunu sağlayan hidrolik donanımlar bu ekstrüderlerde ek ekipman olarak kullanılır.



Şekil 4.13. Koçbaşı ekstrüder.

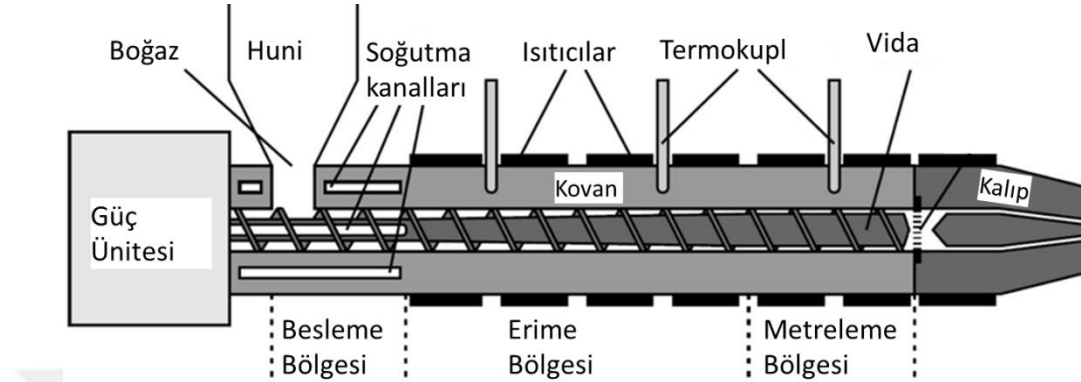
4.5.3. Vidalı ekstrüderler

Polimer şekillendirme proseslerinde istenilen üretim şekli ve yöntemi, kullanılacak ekstrüzyon işlemini de belirler. Disk tipi ve koçbaşı ekstrüderler, çalışma prensiplerinin sonucu olarak döngüsel üretimin yapıldığı uygulamalarda tercih edilir. Bu ekstrüderler, enjeksiyon kalıplama ve şişirme kalıplama yöntemleri için uygun olsalar da kesintisiz üretimin istendiği uygulamalara yönelik çözümleri ya mevcut değildir ya da karmaşık tasarımları ile birlikte gelen maliyet dezavantajına sahiptir. Devamlı üretimin istendiği uygulamalarda en çok tercih edilen ekstrüderler vida tipi ekstrüderlerdir. Bu ekstrüderler vida sayılarına göre tek vidalı ve çok vidalı olmak üzere başlıca iki gruba ayrılabilir.

4.5.3.1. Tek vidalı ekstrüderler

Tek vidalı ekstrüderler basit tasarımları, sağlamlıkları ve görece düşük maliyetleri sebebiyle en çok tercih edilen vidalı ekstrüderlerdir. Çalışma prensibi şu şekildedir: polimer granülleri veya tozları ısıtma ünitesine beslenerek, polimerin eritilmesi sağlanır. Erimiş polimer

bir vida yardımıyla basınçlandırılarak şekilleneceği kalıba taşınır. Vida hareketin sürekli dönmesi ile proses devam eder ve kesintisiz bir şekillendirme işlemi gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.14. Tek vidalı bir ekstrüderin bileşenleri.

Şekil 4.14'te tek vidalı bir ekstrüderin komponentleri gösterilmiştir (Peacock ve Calhoun, 2006). Katı formdaki polimer malzeme besleme kanalından makinanın kovan bölgesine taşınır. Vidanın dönme hareketiyle birlikte katı polimer, ergime bölgesine taşınır. Burada polimerin taşınmasını sağlayan temel mekanizma "arşimed prensibi"dir. Sabit bir noktadan yataklanmış vida kendi eksenini etrafında bir dönme hareketi yapar. Kovan ve vida arasındaki polimer malzeme ise bu dönme hareketiyle kovan boyunca taşınarak kalıba iletilir. Kovan üzerinde 3 ana ısı bölgesi vardır. İlk bölge "besleme bölgesi" olarak isimlendirilir. İkinci bölge ise polimerin taşındığı "ergime bölgesi"dir. Son bölge ise "metreleme bölgesi" olarak isimlendirilir. Bu son bölgede ergiyik polimer basınçlandırılarak kalıptan çıkmaya uygun hale gelir.

Kovan üzerindeki bu üç bölgenin uzunlukları işlenecek polimerlerin reolojik karakteri ile alakalıdır. PE ve PP malzemeler için, bu üç bölgenin uzunlukları yaklaşık olarak eşittir. Görece düşük viskoziteye sahip polimerlerde metreleme bölgesi daha uzundur. Poliamid gibi görece düşük viskoziteye sahip bir polimerin işlenmesi sırasında, metreleme bölgesi polimer ergiyeğinin basıncının artırılması ve bu sayede kesintisiz bir üretimin olması için daha uzundur. Yüksek viskoziteli polimerlerde ise kovan sonunda basıncın belirli bir eşik değerini aşmaması için ergime ve metreleme bölgeleri daha kısa seçilir.

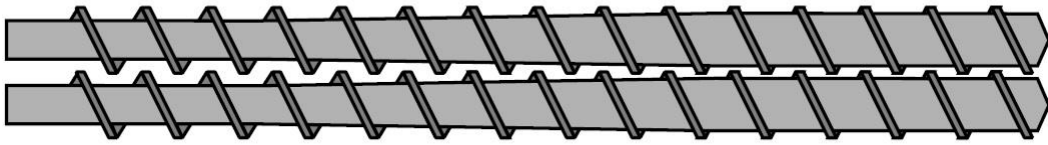
Bir ekstrüderin karakteristik özelliklerinden biri kovan-vida oranıdır (L/D). Bir tek vidalı ekstrüderin üretim kapasitesi L/D oranına bağlıdır. Yüksek kovan-vida oranına sahip ekstrüderlerin ergitme ve karıştırma kapasitesi yüksektir. Kısa L/D oranına sahip ekstrüderler ise kapladıkları hacim, işgal ettikleri alan ve düşük tork gereksinimi gibi özelliklerinden dolayı

tercih edilebilirler. Yüksek L/D oranına sahip ekstrüderler ise karıştırma kapasitesi ve üretim kapasiteleri olarak tercih edilebilirler.

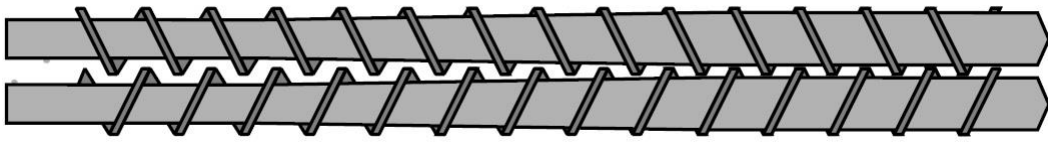
4.5.3.2. İkiz vidalı ekstrüderler

İkiz vidalı ekstrüderler çok vidalı ekstrüderlerin en çok kullanılan tipidir. Tek vidalı ekstrüderden farklı olarak kovan içerisinde iki adet vida bulunur. İkiz vidalı ekstrüderler, vidalarının bağıl dönme yönlerine göre eş-dönmeli ve karşıt-dönmeli olarak iki sınıfa ayrılır.

a)



b)



Şekil 4.15. a) Eş dönmeli ikiz vida, b) karşıt-dönmeli ikiz vida.

Şekil 4.15 a ve b’de eş-dönmeli ve karşıt-dönmeli ikiz vidalar gösterilmiştir (Peacock ve Calhoun, 2006). Eş-dönmeli ikiz vidalı ekstrüderlerde vidalar aynı özelliklere sahiptir. Karşıt-dönmeli ikiz vidalı ekstrüderlerde vidalar zıt adımlıdır. İkiz vidalı ekstrüderlerde polimerin kovan içerisindeki karışma durumu tek vidalı ekstrüderlere göre daha verimlidir. Vidaların kovan içerisindeki dönüşleri ve birbirlerine olan görece hareketlerinden dolayı bu ekstrüderlerde daha yüksek kayma gerilmeleri oluşur. Kovan ve vidalar arasındaki polimerik ergiyik yüksek kayma gerilmelerinden dolayı daha efektif bir şekilde karışır. Bununla birlikte tasarımların karmaşıklığından dolayı karşıt-dönmeli ikiz vidalar eş-dönmeli vidalara nazaran daha az tercih edilirler. Bu sebeple uygulamalarda daha çok eş-dönmeli ikiz vidalı ekstrüderler kullanılır.

Çalışma kapsamında filamentlerin üretimi için ikiz vidalı bir ekstrüder kullanılmıştır. Benzer şekilde Torrado ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada kompozit ABS filamentlerinin üretiminin ikiz vidalı bir ekstrüder kullanılarak yapıldığı görülmüştür (Torrado vd., 2015). Bir

diğer çalışmada Nikzad ve arkadaşları Fe tozu katkılı ABS filamentlerin imalatı için tek vidalı bir ekstrüder kullanmışlardır (Nikzad vd., 2011). Masood ve arkadaşları (Masood vd., 2004) ise çalışmalarında filament üretimi için tek vidalı bir ekstrüder kullanmışlardır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada piyasada en yaygın kullanılan eklemeli imalat tekniği olan FDM tekniğe yönelik yeni ve özellikleri iyileştirilmiş filamentlerin üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla aşağıdaki üretim basamakları ve karakterizasyon yöntemleri kullanılmıştır.

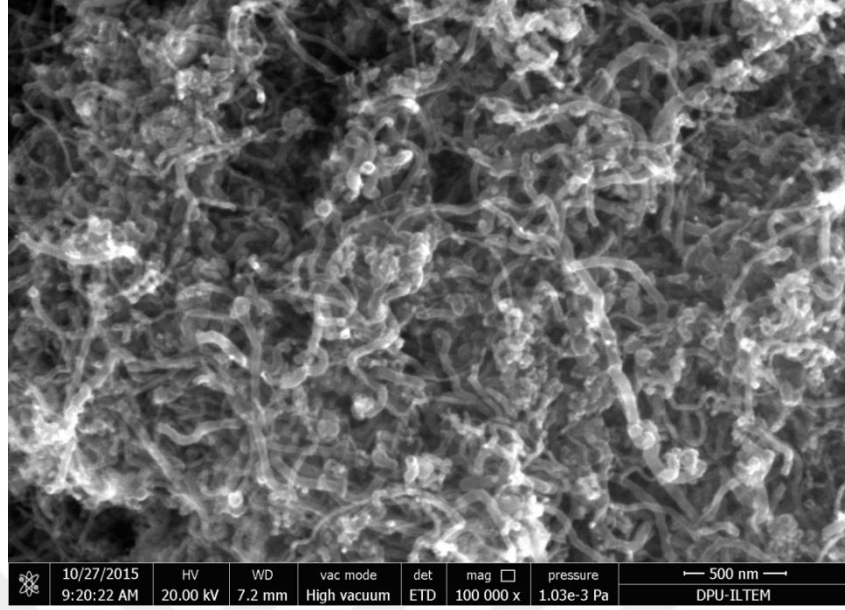
5.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Çalışmada kullanılan ABS granülleri Bhansali Engineering LTD. (Hindistan)'den IM-21 AS kodu ile alınmıştır. Granüllere ait görsel Şekil 5.1'de verilmiştir.

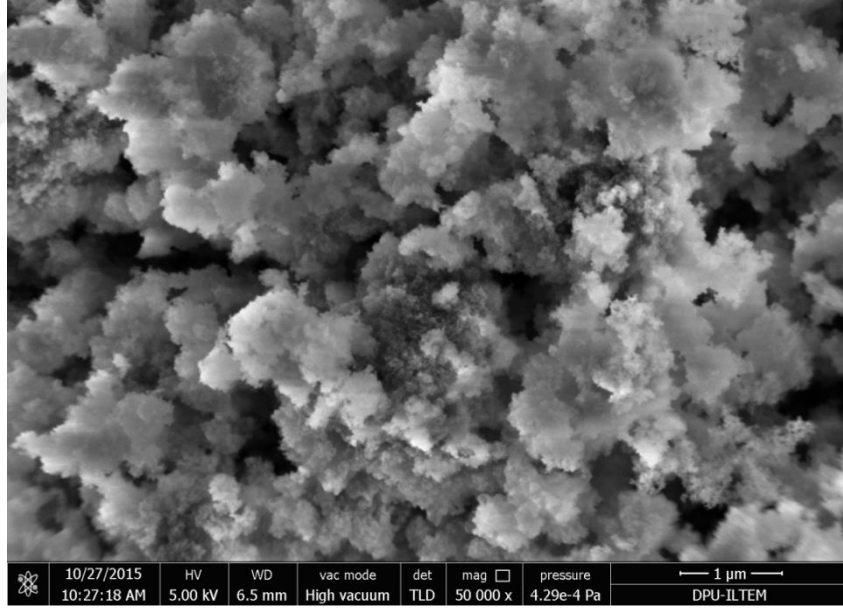


Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan ABS granülleri.

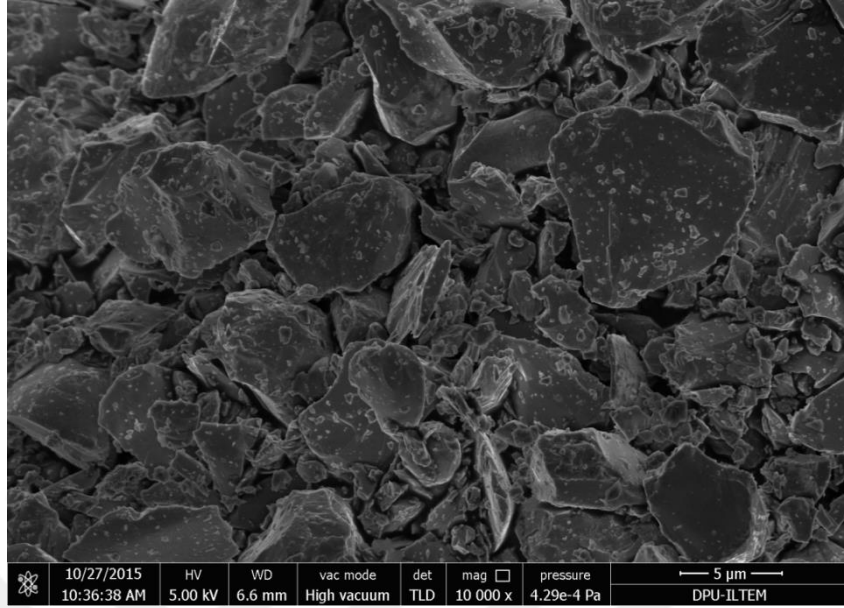
Çalışma kapsamında farklı tip ve özellikteki malzeme partikülleri takviye olarak kullanılmıştır. Bunlar; MWCNTs, SiO₂, ZrB₂, Al partikülleridir. Al partikülleri Dumlupınar Üniversitesi'nde gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilmiştir. SiO₂ ve MWCNTs tozları ise EgeNanotech (İzmir, Türkiye, kod EN/N-EA234 ve EN/N-KNT14-1, sırasıyla) firmasından satın alınmıştır. ZrB₂ tozları ise ABCR (Karlsruhe, Germany, kod 82299) firmasından satın alınmıştır.



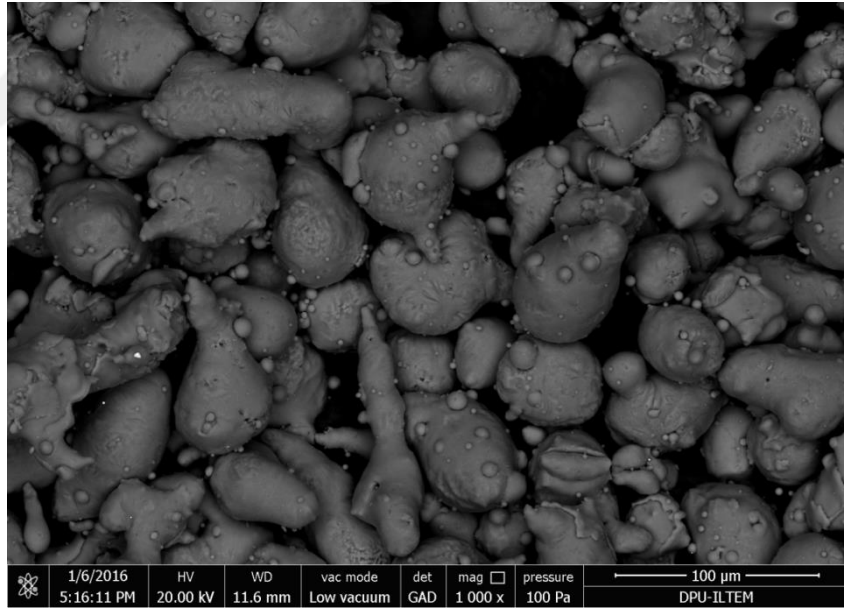
Şekil 5.2. Kullanılan MWCNT partiküllerinin SEM görüntüsü, x100.000 büyütme ile.



Şekil 5.3. Kullanılan SiO₂ tozlarının SEM görüntüsü, x50.000 büyütme ile.



Şekil 5.4. Kullanılan ZrB_2 partiküllerinin SEM görüntüsü, x10.000 büyütme ile.



Şekil 5.5. Kullanılan Al partiküllerinin SEM görüntüsü, x1.000 büyütme ile.

Takviye partiküllerine ait SEM görselleri Şekil 5.2-5'te verilmiştir. Partiküllere ait özellikler Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelgede ve SEM görüntülerinde görüldüğü üzere takviye malzemeleri; özgül kütle, yüzey alanı, saflık ve morfolojileri bakımından farklı özelliklere sahiptir.

Çizelge 5.1. Takviye partiküllerin özellikleri.

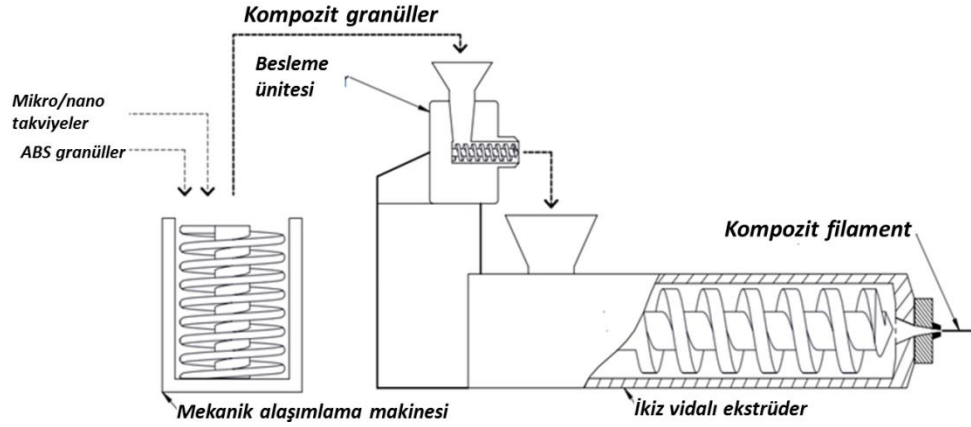
Özellikler	Birim	Takviye			
		MWCNTs	SiO ₂	ZrB ₂	Al
Yoğunluk	gr/cm ³	2,1	2,2-2,6	6,1	2,64
Yüzey Alanı	m ² /gr	40	440	1,6	-
Safılık	%	>95	99,90	96-97	96-98
Morfoloji		Tüp	Küresel	Hekzagonal, Düzensiz	Küresel
Dış Çap	nm	< 50	30	10 mikron	35 mikron
İç Çap	nm	<5-15	-	-	-
Uzunluk	µm	10-20	-	-	-

5.2. Kompozit Filamentlerin Üretimi

Takviyesiz ve kompozit filamentler AES Lab-30 model (Aysa Makine, İstanbul) eş dönmeli ikiz vidalı ekstrüder kullanılarak üretilmiştir (Şekil 5.6). İkiz vidaların çapları 22 mm'dir. Kullanılan cihazın, ekstrüder makinalarının karakteristiklerinden olan uzunluk/çap (L/D) oranı ise 32'dir. Cihazın çalışma sıcaklığı aralığı 60-400°C'dir.

**Şekil 5.6.** Çalışmada kullanılan ikiz vidalı ekstrüder.

Kompozit filamentlerin imalatında ikiz vidalı ekstrüder ile filamentlerin üretiminden önce ABS granülleri ve takviye tozlar mekanik alaşımlama ünitesinde 10 dk. süresince çelik bilyeler olmadan karıştırılmıştır. Bu karıştırma işlemi yapılmadan önce ABS granüllerinin herhangi bir kurutma işlemine tabi tutulmadığı not edilmelidir.



Şekil 5.7. Filamentlerin üretim aşamalarını gösteren görsel.

Kompozit granüller karıştırma işleminden sonra katkısız granüller ise karıştırma işlemine tabi tutulmadan Şekil 5.7’deki adımlar takip edilerek ekstrüder makinasına beslenmiştir. Bu işlemler sırasında 1,75 mm çap değerine ulaşmak için makine parametreleri, Çizelge 5.2’deki değerlere ayarlanmıştır.

Çizelge 5.2. Ekstrüzyon makinesinin üretim parametreleri.

Parametre	Değer
Besleme motoru hızı (dev/dak.)	15
Ana motor hızı (dev/dak.)	73
Çekme rotoru hızı (dev/dak.)	50
Kovan sıcaklığı (°C)	175-210

Üretim için öncelikle hazırlanan granüller besleme haznesine dökülmüştür. 15 dev/dak. hız ile hareket eden besleme mili, üretim sırasında kovanın sabit bir hızla kesintisiz olarak dolmasını sağlamıştır. Bu esnada besleme haznesinden sabit hızla ana kovana dolan granüller sıcaklığın etkisiyle –camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıkarak kauçuğumsu hale gelmiş ve kalıptan sabit bir debi ile çıkması için ana mil hızı 73 dev/dak. değerine ayarlanmıştır. Karşı tarafta bulunan çekme rotoru ise ekstrüde edilmiş filamentleri sabit 50 dev/dak. hız ile çekmiştir.

Filamentlerin üretiminde karşılaşılan en büyük problemlerden biri FDM cihazlarında kullanılan filament çaplarının sabit 1,75 mm olması ve bu çap değerinin dışında kalan filamentlerin ticari üç boyutlu yazıcılarda kullanılamamasıdır. Kararlı çapa sahip filamentlerin

üretilebilmesi için ekstrüzyon parametrelerinin iyi ayarlanması gerekmektedir. Optimum ve kararlı çapa ulaşmak amacıyla filamentler kalıptan çıkmalarının ardından soğumaları için 19°C sıcaklığa sahip suya daldırılmıştır. Denemeler sonrasında bu parametrelerde optimum çapa ve kararlılığa ulaşıldığı görülmüş ve tüm üretimlerde belirlenen bu parametreler üzerinden yapılmıştır.



Şekil 5.8. Karışım sonrası granüllerin görüntüsü.

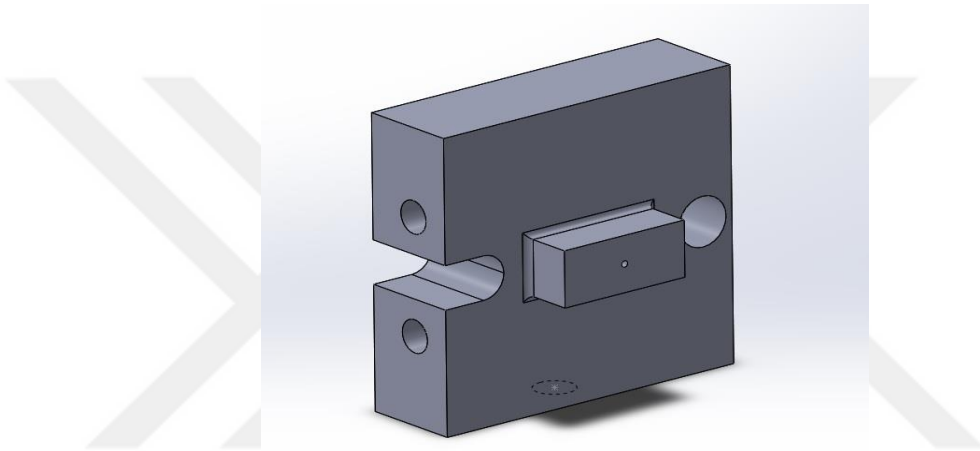
Kompozit granüllerin karışım işleminden sonraki görüntüsü Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Üretim esnasında kompozit filamentler için hedeflenen ağırlık oranı (a.o.) %1,5 partikül takviyesidir. Bu hedefe ulaşmak için, partikül kayıplarının olacağı ön görüşüyle kompozit granüller mekanik alaşımlama ünitesine %2 takviye oranı ile hazırlanmıştır. Çizelge 5.3’te kompozit ve takviyesiz filamentlerin üretimlerinde kullanılan matris malzemesi ve katkı malzemelerinin ağırlık oranları verilmiştir.

Çizelge 5.3. Filamentlere ait kompozisyonadaki takviye ve matris malzemelerinin oranları.

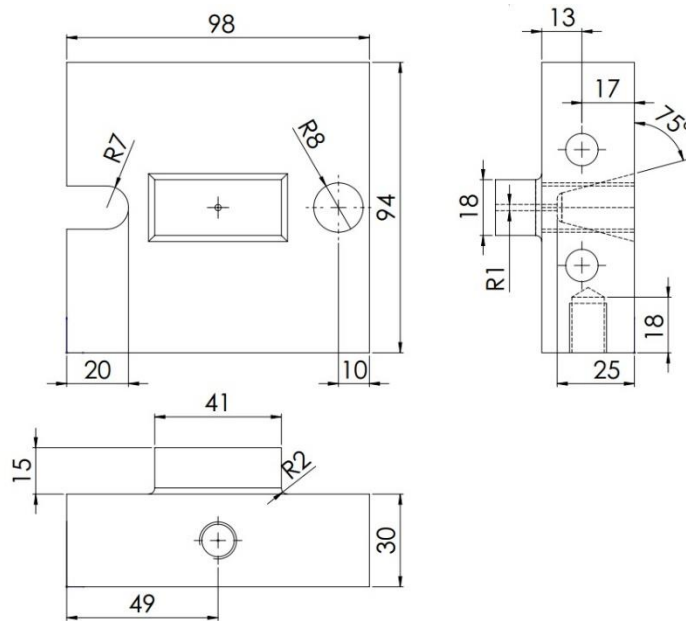
ABS Matris Oranı (% a.o.)	Katkı Malzemesi Oranı, (% a.o.)	Takviye Malzemesi
98,5	1,5	MWCNTs
98,5	1,5	SiO ₂
98,5	1,5	ZrB ₂
98,5	1,5	Al
100	0	Katkısız-ABS

5.3. Filament Üretimi İçin Tasarımı Yapılan Ekstrüder Kalıbı

Üretilen filamentlerin FDM cihazları ile uyumlu çalışabilmeleri için istenen özelliklerden biri kararlı bir çapa sahip olması ve çap değerinin filament boyunca üç boyutlu yazıcılarda kullanılmalarını engelleyecek şekilde değişmemesidir. Bu açıdan bakıldığında, ekstrüder kalıbı filament üretiminin en önemli parçalarından biridir. Yapılan çalışmada, doğru çapa sahip ve düzgün kararlılıkta filamentlerin üretilmesi için yeni bir ekstrüder kalıbı tasarlanmış, üretilmiş ve bu kalıp filamentlerin üretiminde kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Filament üretimi için tasarlanan ekstrüder kalıbı.



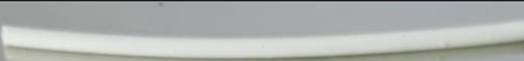
Şekil 5.10. Ekstrüder kalıbının teknik resmi.

Şekil 5.9’da kalıbın CAD çizimine ait görsel gösterilmiştir. Şekil 5.10’da ise üretilen kalıbın teknik resmi verilmiştir.

Yapılan çalışmada kalıp şişmesi fenomeninin minimuma indirilmesi için kalıp kanalı 20 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda filamentler için istenen 1,75 mm çapa ulaşamadığı görülmüş ve kalıp kanalı üzerinde değişiklik yapılmıştır. Kalıp kanalı uzunluğu değişmeden çıkış ve giriş çapları 2 mm’ den 2,5 mm değerine genişletilmiştir.

5.4. Filament Üretimi Ve Üretilen Filamentler

Çizelge 5.2’de verilmiş olan ekstrüder parametreleri ve Çizelge 5.1’deki matris ve takviye malzemelerinin oranları kullanılarak yapılmış olan üretim sonucu elde edilen filamentler Şekil 5.11’de gösterilmiştir.

Filament Kompozisyonu	Üretilen Filamentlerin Görselleri
ABS/MWCNT	
ABS/SiO ₂	
ABS/ZrB ₂	
ABS/Al	
Katkısız ABS	

Şekil 5.11. Üretimi yapılmış olan takviyeli ve takviyesiz filamentler.

5.5. Üretilen Filamentlerin DSC İncelemeleri

Filamentlerin üretimi yapıldıktan sonra takviye partiküllerin ABS matrisin T_g değerinde ne gibi değişikliklere sebep olduğunun tespiti için DSC çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda, üretilen filamentler T_g ’lerinin belirlenmesi için 60°C-200°C aralığında, Ar atmosferi içerisinde 40°C/dk. sabit ısıtma hızıyla test edilmiştir. Tez kapsamında üretilen kompozit malzemelerin DSC incelemeleri SETSYS Evolution TGA&DTA/DSC (SETARAM Instrumentation, Amerika) ile Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi (DPÜ-İLTEM)’de yapılmıştır.

5.6. Üretilen Filamentlerin Çekme Testi

Üretilen filamentler çekme testleri, Zwick BF2-FZ0.5TH.D16 (Zwick, Almanya) üniversal test makinesi (Şekil 5.12) kullanılarak NURSAN Elektrik (Tavşanlı, Kütahya) firmasının kalite-kontrol laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Her farklı filament kompozisyonu için 100 mm uzunluğundaki 5 numune test edilmiştir.



Şekil 5.12. Filamentlerin çekme testine ait görsel.

5.7. Üretilen Filamentlerin Yüzey Pürüzlülük Testi

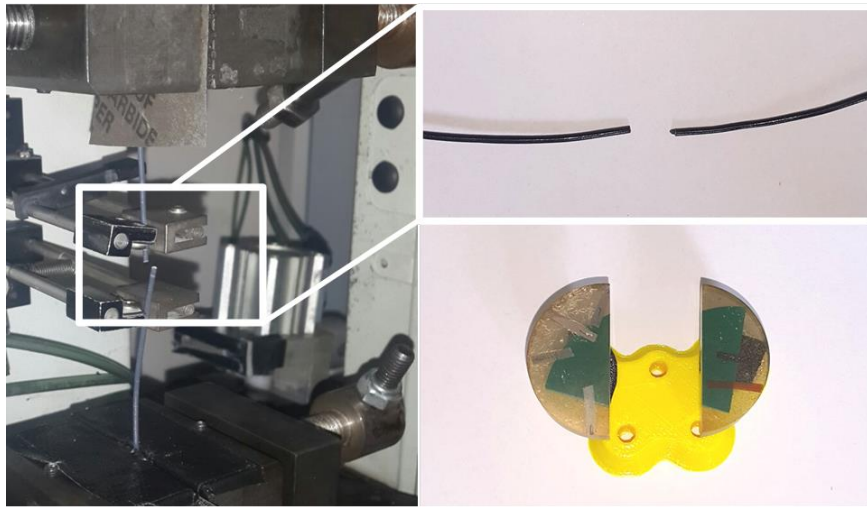
Filamentlerin yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmek için Mitutoyo Surftest SJ-201P (Mitutoyo, Berlin, Almanya) test ekipmanı kullanılmıştır. Her kompozisyondan 5 adet numune seçilmiş, her numunenin farklı bölgeleri üzerinden 10'ar adet ölçüm yapılmıştır.



Şekil 5.13. Mitutoyo Surftest SJ-201P yüzey pürüzlülük test ekipmanı.

5.8. Filamentlerin SEM-Mikroyapı İncelemeleri ve EDS Çalışmaları

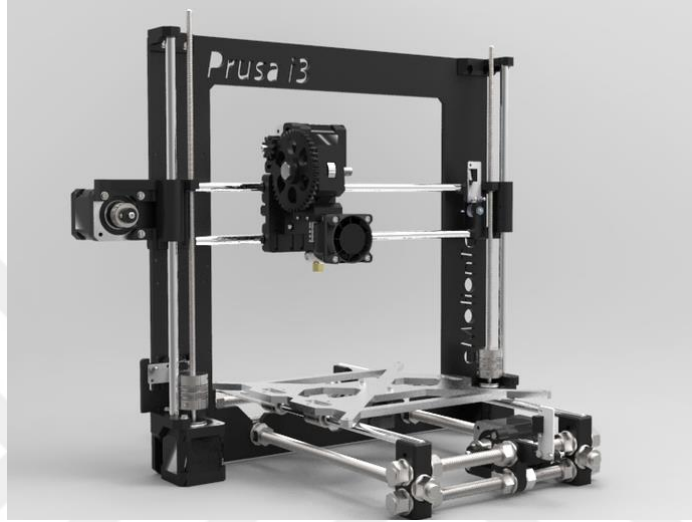
Filamentler çekme testinden sonra kırılma mekaniklerinin altında yatan sebepleri daha iyi incelemek amacıyla kırık yüzeyler üzerinde SEM-mikroyapı çalışmaları yapılmıştır. Takviye partiküllerin filamentler ve filamentler kullanılarak yazdırılan 3 boyutlu numuneler içerisindeki varlıklarının doğrulanması için EDS çalışmaları yapılmıştır. Teste, test sonrasına ve numunelerin SEM incelemesine hazır hala getirmek için yapılan yüzey kaplama işlemlerine ait görseller Şekil 5.14’de gösterilmiştir. Bu çalışmalarda FEI Nova NanoSEM 650 (FEI, Oregon, Amerika) test cihazı ile kullanılmıştır. Çalışmalar DPÜ-İLTEM’de gerçekleştirilmiştir.



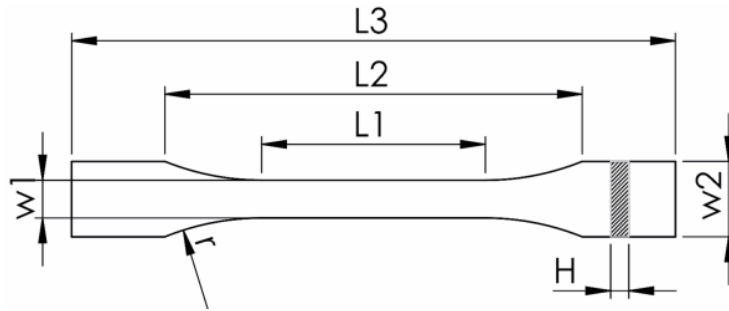
Şekil 5.14. Çekme testi sonrası ve SEM öncesi işlemler.

5.9. Üç Boyutlu Yazıcı İle Numune Üretimi

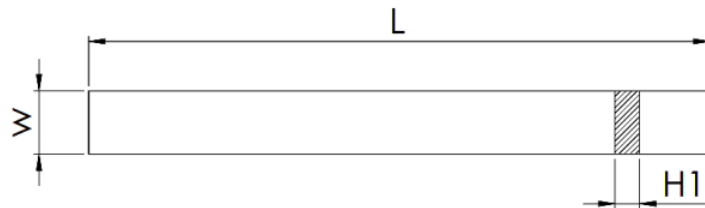
Filamentler, üretildikten sonra yazdırılabilirliklerinin incelenebilmesi için Şekil 5.15 (www.thingiverse.com)’de gösterilen 3B yazıcı ile yazdırılmış, bu yöntemle eğme ve çekme numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 5.15. Çalışmada kullanılan 3 boyutlu yazıcı.



Şekil 5.16. Çekme numunesi teknik resmi.



Şekil 5.17. Üç nokta eğme numunesine ait teknik resim.

Üretilen takviyesiz filament ve kompozit filamentler kullanılarak Şekil 5.16-17’de teknik resimleri gösterilen çekme ve 3 nokta eğme numuneleri üretilmiştir. Çekme numuneleri DIN EN-ISO 527-2 standardına uygun olarak üretilmiştir. 3 nokta eğme testi için kullanılan standart ise ASTM-D790 standardıdır. Numune üretiminde kullanılan parametreler Çizelge 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Çekme ve 3 nokta eğme testi numunelerinin parametreleri.

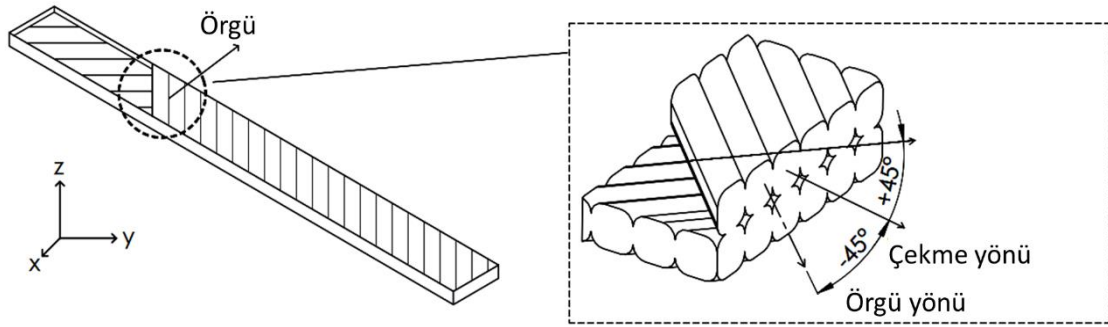
Parametre	Değer	Parametre	Değer
Toplam Uzunluk [mm]	L3 150	Kalınlık [mm]	H 4±0,2
Omuzlar arasındaki mesafe [mm]	L2 112±2	Yuvarlama yarıçapı [mm]	R 70,1±0,2
Paralel bölüm uzunluğu [mm]	L1 60±2	Toplam uzunluk [mm]	L 125±2
Uçlardaki genişlik [mm]	W0 20±0,2	Uçlardaki genişlik [mm]	W 12,7±0,2
Dar bölgedeki genişlik [mm]	W1 10±0,2	Kalınlık [mm]	H1 3,2±0,2

Numunelerin 3 boyutlu yazıcıda yazdırılmasına ait üretim parametreleri Çizelge 5.5’de verilmiştir. Tüm numuneler aynı üretim parametreleri kullanılarak 3 boyutlu olarak yazdırılmıştır. Numunelerin üzerine etkileyebilecek ısı gradyanlarının etkisini minimuma indirmek amacıyla tüm numuneler üretim platformunun orta noktasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır.

Çizelge 5.5. 3 boyutlu yazıcıda kullanılan üretim parametreleri.

Parametre	Değer
Yazdırma Sıcaklığı	220 (°C)
Yatak Sıcaklığı	100 (°C)
Katman Yüksekliği	0,15 (mm)
Kabuk Kalınlığı	1 (mm)
Doldurma Yoğunluğu	100 (%)
Akış	100 (%)
Yazdırma Hızı	50 (mm/s)

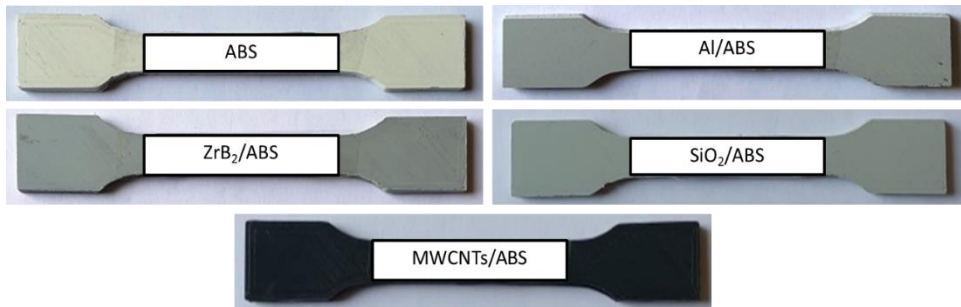
Numunelerin 3 boyutlu yazdırılmasında örgü yönü olarak +45/-45 örgü yönlenimi tercih edilmiştir. Bu yönlenim Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



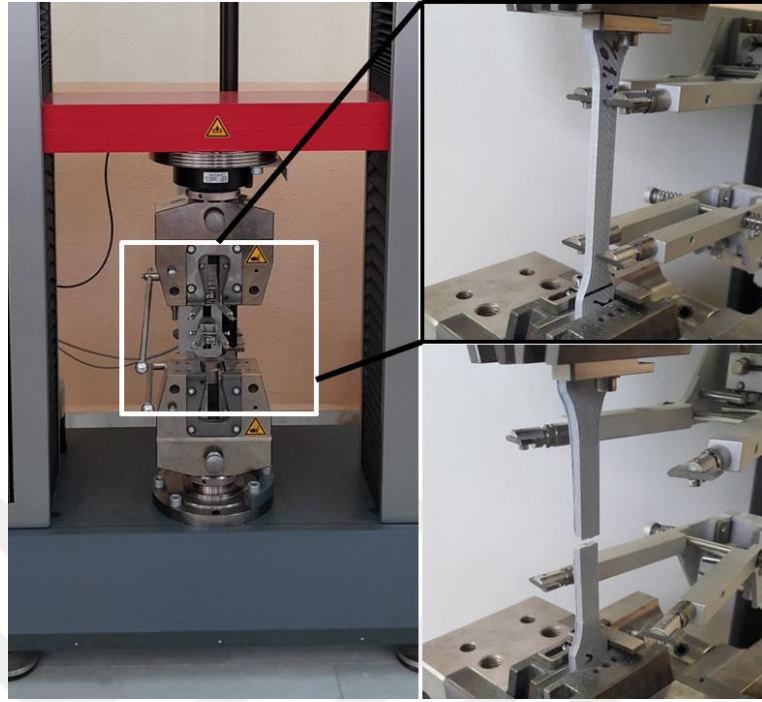
Şekil 5.18. Numune üretimindeki örgü yönelimleri.

5.10. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Çekme Testi

Çekme testi için, DIN EN-ISO 527-2 normlarına uygun olarak 3B yazdırılan çekme testi numuneleri Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Hazırlanan numuneler Zwick Roell ZR-100 test makinesi ile aynı standarda uygun olarak test edilmiştir (Şekil 5.20). Her kompozisyon için en az 5 adet çekme numunesi hazırlanıp test edilmiştir. Testler 2MPa ön yükleme ile yapılmıştır ve tüm numuneler 1mm/dak sabit hızla çekilmiştir.



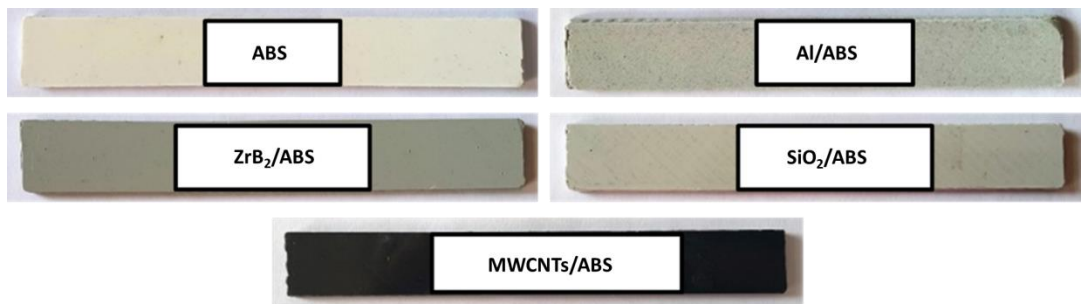
Şekil 5.19. 3 boyutlu yazdırılan çekme numuneleri.



Şekil 5.20. Numunelere uygulanan çekme testi işlemi.

5.11. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Üç Nokta Eğme Testi

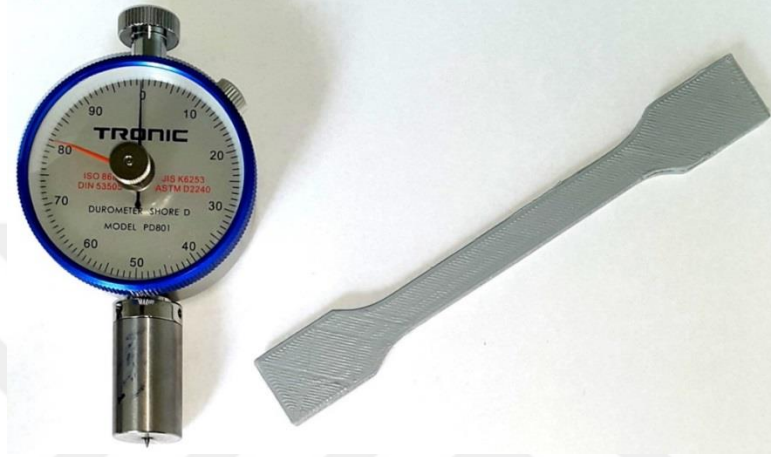
Üç nokta eğme testi için, eğme testi numuneleri ASTM D-790 standardına uygun olarak 3B yazdırılmış ve test edilmiştir. Üç boyutlu yazdırılan numuneler Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Bu test kapsamında her farklı kompozisyon için en az 5 adet numune test edilmiştir. Test, numuneler hasara uğramadan sonlandırılmıştır.



Şekil 5.21. 3 boyutlu yazdırılan 3 nokta eğme testi numuneleri.

5.12. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Sertlik Testi

Numune yüzeylerinde yapılan sertlik ölçümleri, Tronic Model PD-801 Analog Shore meter D (Teskon, Türkiye) kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan cihaz ve örnek bir numune Şekil 5.22’de gösterilmiştir.



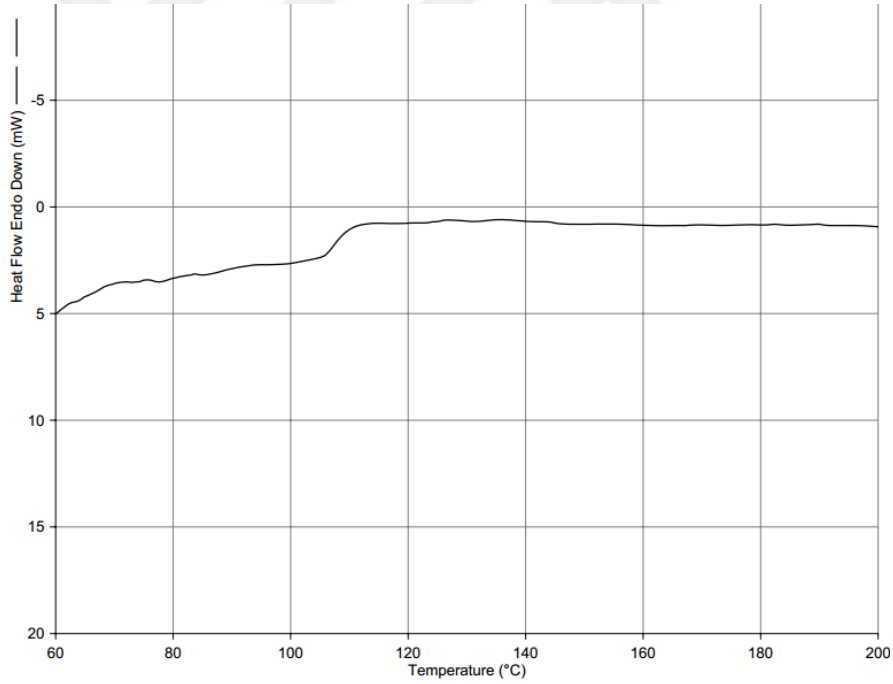
Şekil 5.22. Sertlik testinde kullanılan donanım ve numune.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

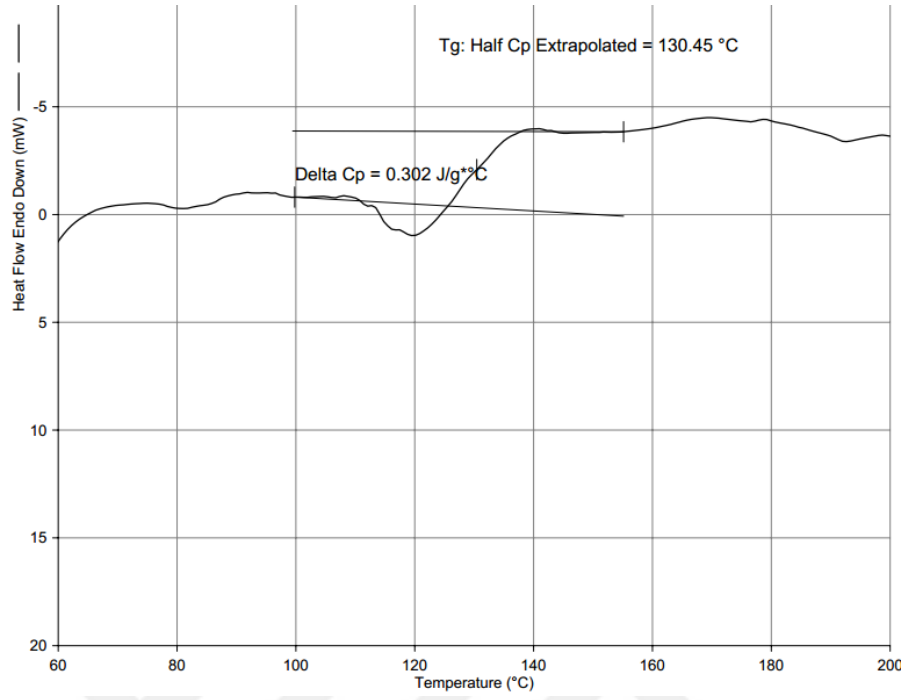
Üretilen katkısız ve kompozit filamentler ile bu filamentlerin 3B yazdırılması ile üretilen numunelerin karakterizasyonları ile ilgili çalışmaların sonuçları bu bölümde incelenmiştir.

6.1. Üretilen Filamentlerin DSC Çalışması

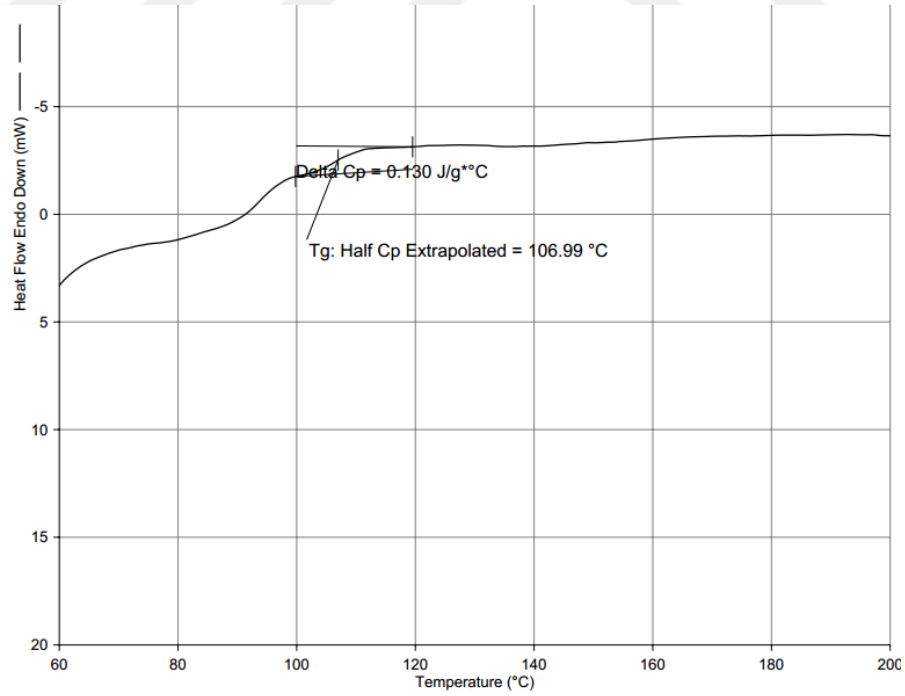
DSC çalışmalarının sonuçları Şekil 6.1-5’de grafikler halinde gösterilmiştir. Yapılan çalışmada katkısız ABS 107°C civarında bir T_g göstermiştir. Katkısız ABS’in literatürdeki T_g değeri de çalışmada bulunan değere oldukça yakındır. Faes ve arkadaşları (Faes vd, 2016) yaptıkları çalışmada ABS için T_g değerini 108°C bulmuşlardır. Bunlara ek olarak literatürde ABS için T_g değerinin 105°C’den 108°C’ye kadar olduğu çalışmalar mevcuttur (Dul vd., 2016; Forest vd., 2015).



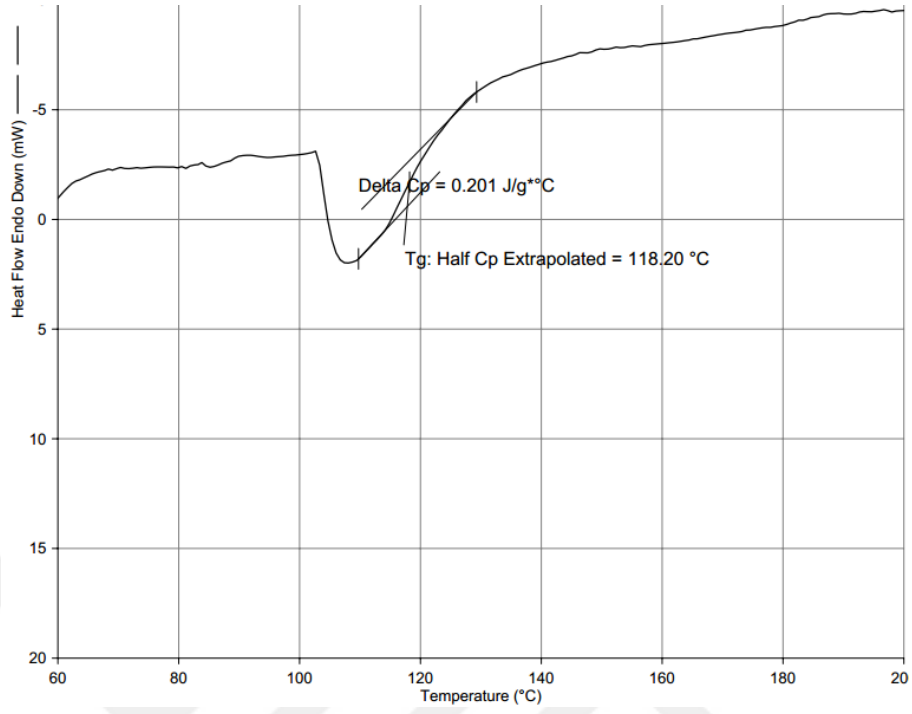
Şekil 6.1. Katkısız ABS’e ait DSC termal analiz değerleri.



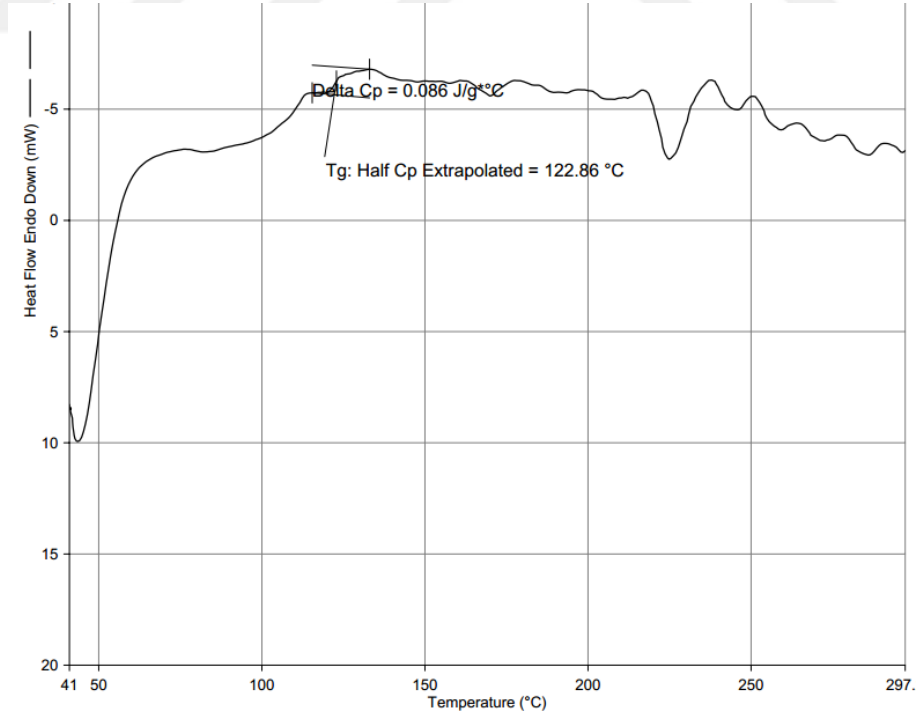
Şekil 6.2. MWCNT/ABS'e ait DSC termal analiz değerleri.



Şekil 6.3. Al/ABS'e ait DSC termal analiz değerleri.



Şekil 6.4. SiO₂/ABS'e ait DSC termal analiz değerleri.



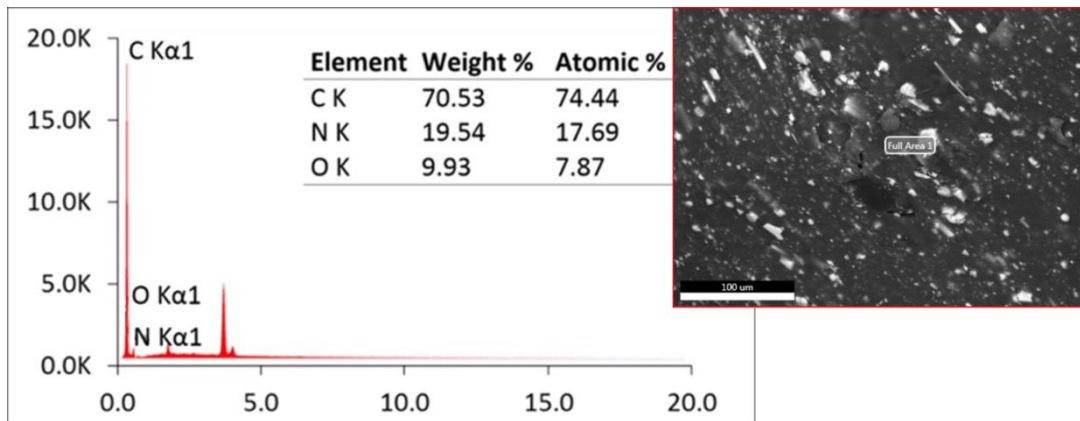
Şekil 6.5. ZrB₂/ABS'e ait DSC termal analiz değerleri.

Sonuçlara göre Al/ABS, ZrB₂/ABS, MWCNTs/ABS ve SiO₂/ABS kompozit filamentler için T_g değerleri sırasıyla 107°C, 123°C, 130°C ve 118°C'dir. Buna göre ABS matris içerisine katılan takviye partiküller camsı geçiş sıcaklığını katkısız-ABS malzemeye göre arttırmış olsalar da bu değerler malzemelerin ticari FDM cihazlarında kullanılmalarının önünde engel değildir. Bu cihazlarda 3B yazım için kullanılan sıcaklık değeri 230°C'dir. Bununla birlikte takviyeli malzemeler arasında en yüksek T_g değerine MWCNTs/ABS kompozit filament sahiptir ve bu değer 130°C civarındadır. Bu değer 230°C'nin oldukça altında kalmaktadır. Test sonuçları, şu an kullanılan FDM cihazlarının ısıtma komponentleri üzerinde değişiklik yapılmadan üretilen filamentlerin bu cihazlarda kullanılabileceğini göstermektedir.

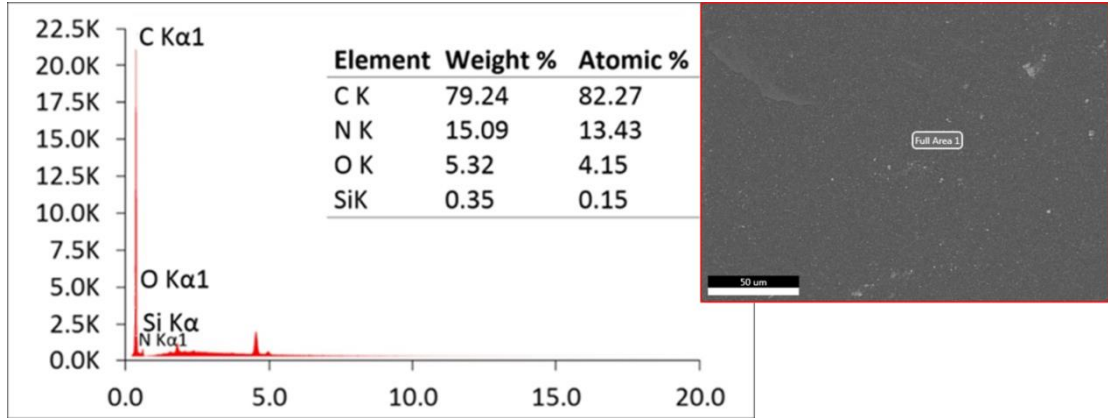
Yapılan çalışmada kullanılan ikiz vidalı ekstrüderin kovan bölgesi üzerinde 6 adet kontrol edilebilir sıcaklık bölgesi bulunmaktadır. Bu 6 adet bölge ayrı ayrı kontrol edilebilme ve birbirlerinden bağımsız çalışabilme özelliklerine sahiptir. Filament üretiminde kovan sıcaklık değerleri katkısız ABS granüllerin DSC sonuçları baz alınarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre üretim sıcaklıkları kovanın ilk bölgesinin sıcaklığı 175°C ve son bölgesinin sıcaklığı 210°C olmak üzere, ara bölgelerde sabit aritmetik sıcaklık artımı olacak şekilde belirlenmiştir.

6.2. Üretilen Filamentlerin SEM-EDS Çalışmaları

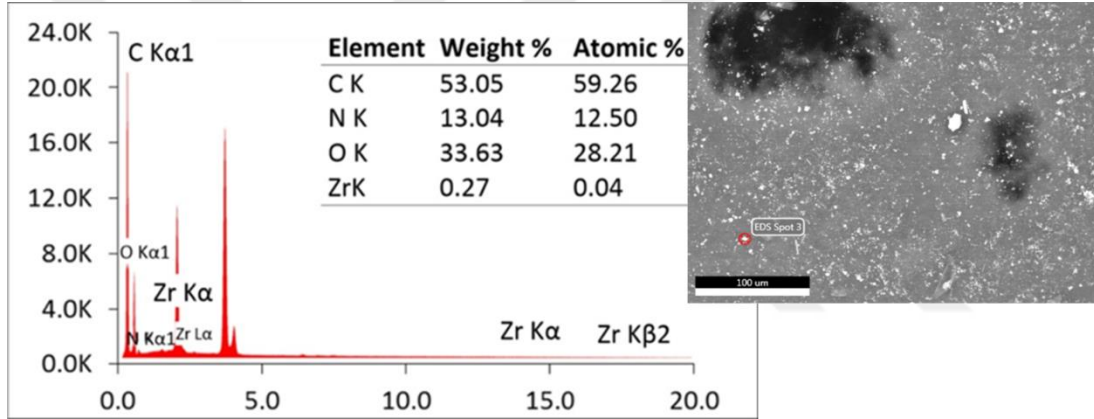
EDS çalışmasıyla filamentlerin matris malzemesinin içerisinde takviye edilen nano-tozların (SiO₂, MWCNTs) ve mikro-partiküllerin (Al, ZrB₂) varlığı kanıtlanmıştır. Şekil 6.6-7'de nano takviyeli filamentlere ait EDS sonuçları verilirken mikro partikül takviyeli filamentlerin EDS sonuçları Şekil 6.8-9'da verilmiştir.



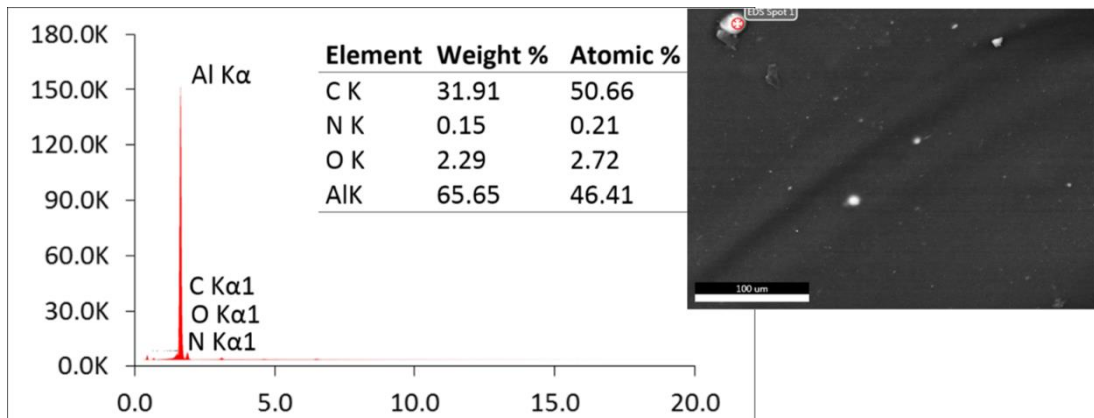
Şekil 6.6. MWCNTs/ABS nano-kompozit filamentin EDS sonucu.



Şekil 6.7. SiO₂/ABS nano-kompozit filamentin EDS sonucu.



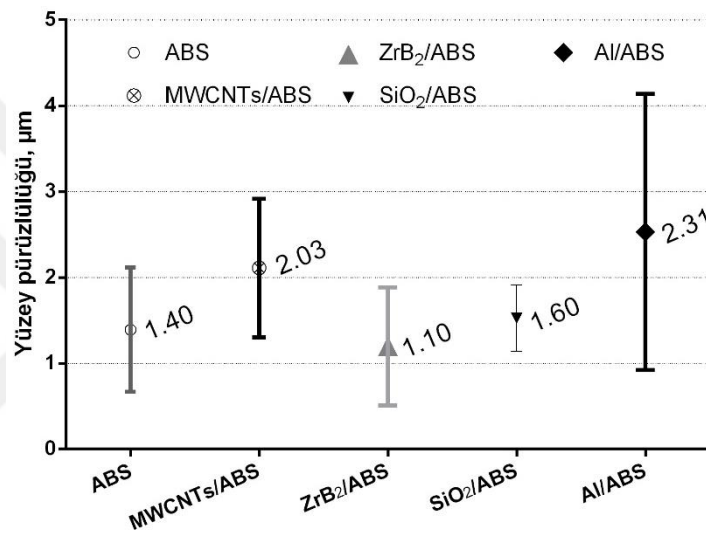
Şekil 6.8. ZrB₂/ABS kompozit filamentin EDS sonucu.



Şekil 6.9. Al/ABS kompozit filamentin EDS sonucu.

6.3. Filamentlerin Yüzey Pürüzlülük Testi Sonuçları

Filamentlerin yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 6.10'da grafik olarak verilmiştir. Grafiğe göre Al katkılı ABS filamentin yüzey pürüzlülük değerlerinin maksimum ve minimum noktaları arasındaki farkın en yüksek olduğu görülmektedir (1,04-4,24 μm). Bununla birlikte Al/ABS kompozit filamentin ortalama pürüzlülük değeri 2,31 μm 'dir. Bu pürüzlülük değerinin Al partiküllerinin ortalama çapıyla ilgisi olduğu düşünülmektedir. Al partikülleri 35 μm ile en yüksek ortalama boyuta sahiptir.



Şekil 6.10. Filamentlerin yüzey pürüzlülük değerleri.

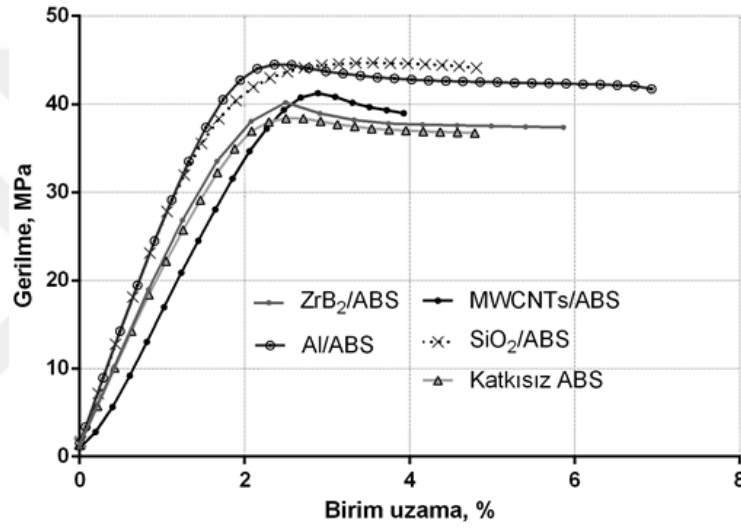
Bu yüksek partikül boyutları beraberinde filamentin yüzeyinde pürüzlülük sorunu meydana getirmektedir. Bununla birlikte Al gibi görece büyük boyutlara sahip partiküllerin yerine nano boyutlardaki MWCNTs takviyeli filamentin yüzey pürüzlülük değeri, ortalama değerler göz önüne alındığına 2,03 μm ile en yüksek ikinci değerdir. Bu değer diğer nano-partikül takviyeli filament olan SiO₂/ABS kompozit filamentin değerinin 27% daha fazladır. Bu duruma, MWCNT partiküllerinin yüksek enerjilerinin ve morfolojilerinin sebep olduğu düşünülmektedir. Filamentlerin ekstrüzyonu sırasında MWCNT partiküllerinin yüksek yüzey enerjileri partiküllerin birbirinden uzaklaşmasını engelleyerek partiküllerin matris içerisinde toplanma eğilimini doğurmuştur. Bununla birlikte MWCNT'lerin tüpsü morfolojileri de partiküllerin toplanmasına sebep olan diğer bir sebeptir (Fiedler vd., 2006).

SiO₂ partikülleri 30 nm boyutla en küçük ortalama boyuta sahip partiküldür. Bununla birlikte SiO₂/ABS kompozit filament 1,11-1,87 μm ile yüzey pürüzlülüğü açısından en küçük aralığa sahiptir. ZrB₂ takviyesi 6,1 gr/cm³ ile en yüksek yoğunluğa sahip takviye malzemedir.

Tüm takviye malzemelerin %1,5 ağırlık oranında matris malzemelerin içerisinde olduğu düşünülürse, hacim olarak en az orana sahip olan malzeme ZrB_2 'dir. Bu düşük hacim oranı ZrB_2 partiküllerinin topaklanmasını engellemiş ve bu durum kompozit filament için ortalama yüzey pürüzlülük değerinin $1,60\ \mu m$ olması ile sonuçlanmıştır.

6.4. Üretilen Filamentlerin Çekme Testi Sonuçları

Filamentlerin çekme testleri yapıldıktan sonra, bu testlere ait ortalama değerler Şekil 6.11'de verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Filamentlerin çekme-uzama grafiği.

Çizelge 6.1'de çekme testine ait sonuçlar tablo halinde gösterilmiştir. Filamentlere ait elastisite modülü, çekme gerilmesi ve kopma uzaması değerleri çizelgede yer almaktadır.

Çizelge 6.1. Filamentlere ait elastisite modülü, çekme gerilmesi ve kopma uzaması değerleri.

Matris	Takviye	Elastisite Mod., (GPa)	Çekme Muk., (MPa)	Kopma uzaması, (%)
ABS	-	2,05	38,44	4,99
ABS	(nm)SiO ₂	2,49	44,72	4,84
ABS	(μm)ZrB ₂	2,14	40,2	5,88
ABS	(μm)Al alaşım	2,55	44,56	6,99
ABS	(nm)MWCNTs	1,68	41,2	4,05

Çizelge 6.1 ve Şekil 6.11’de görüldüğü üzere ABS matris içerisine SiO_2 nano-tozlarının ilavesi nano-kompozit filamentin çekme mukavemet değerini takviyesiz filamente göre %16 arttırmıştır (44,72-38,44 MPa). Bununla birlikte kopma uzaması değeri aynı kompozit filament için referans filamente göre %3 oranında azalmıştır. ZrB_2 /ABS kompozit filamentin çekme gerilmesi takviyesiz filamente göre %4,5, kopma uzaması değeri ise %17,8 oranında artmıştır. ABS matrisin içerisine mikro Al partikül takviyesi yapılması gerilme ve kopma uzamasını önemli ölçüde arttırmıştır. Takviyesiz filamente göre Al takviyeli kompozit filamentin çekme mukavemet değeri 16% oranında artmıştır. Bununla birlikte kopma uzaması değerinin aynı kompozit filament için referans filamente göre artışı %40’dır. Tüm mikro/nano kompozit filamentler içerisinde MWCNTs/ABS nano-kompozit filamentin kopma uzaması değeri %4,05 ile en küçük değere sahiptir. Takviyesiz filamente göre MWCNTs takviyeli filamentin kopma uzaması değeri %18,8 oranında azalmıştır. Çekme mukavemeti değerindeki artış aynı kompozit filament için %7’dir. Tüm test edilen filamentler içerisinde MWCNTs takviyeli filamentin elastisite modülü 1,68 GPa ile en küçük değere sahiptir.

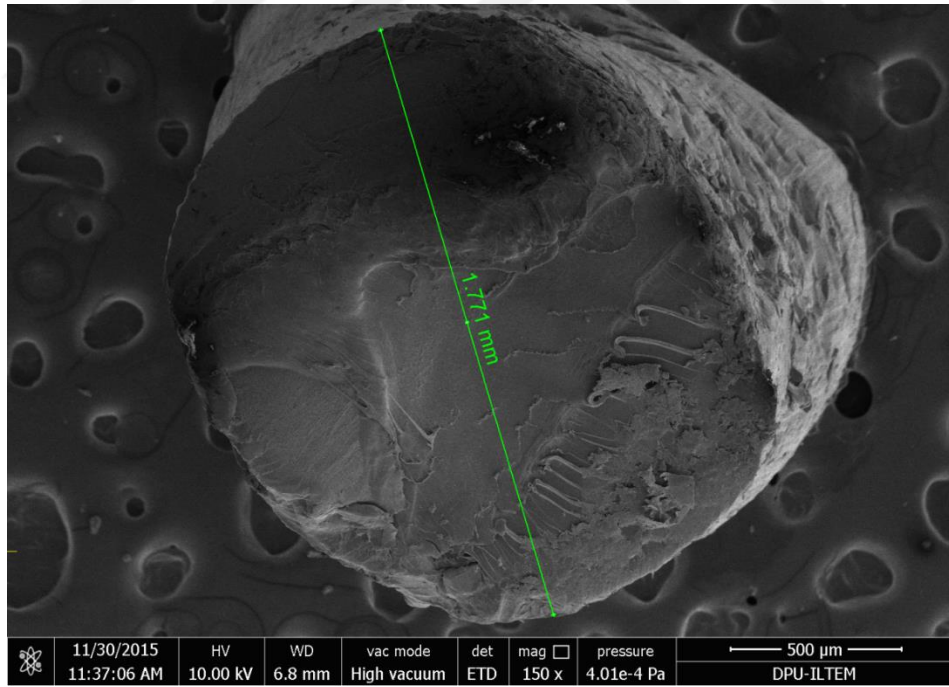
6.5. Filamentlerin Kırık Yüzeylerinin SEM-Mikroyapı İncelemeleri

Filamentler çekme testinden sonra kırılma mekaniklerinin altında yatan sebepleri anlamak ve daha iyi incelemek amacıyla kırık yüzeyler üzerinde SEM çalışması yapılmıştır. Teste, test sonrasına ve numunelerin SEM incelemesine hazır hala getirmek için yapılan yüzey kaplama işlemine ait görseller Şekil 6.12’de gösterilmiştir.

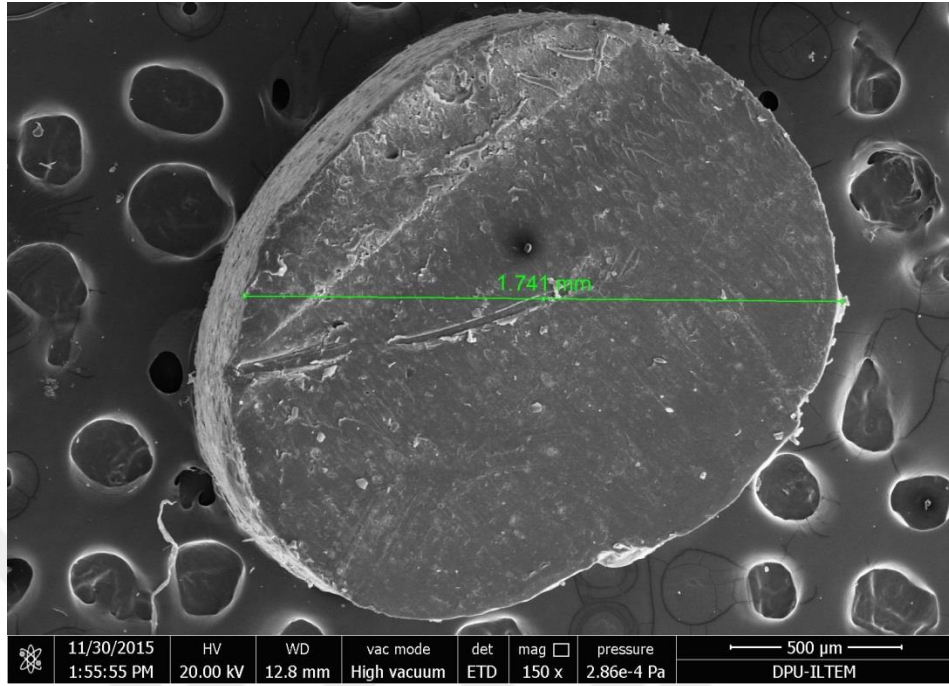
Filamentlerin çap kararlılıklarını incelemek için de SEM görsellerinden faydalanılmıştır. Bu amaçla iki filament numunesi seçilip, bu filamentlerin çap değerleri örnek olarak karşılaştırılmıştır. Takviyesiz filamentin x150 büyütme ile SEM görüntüsü Şekil 6.13’de gösterilmiştir. SiO_2 takviyeli kompozit filamentin x150 büyütme ile alınmış SEM görüntüsü ise Şekil 6.14’de gösterilmiştir. Bu görsellerde filamentlere ait çap değerleri yer almaktadır. Takviyesiz filament için çap değeri 1,771 mm’dir. SiO_2 takviyeli kompozit filamentin çap değeri ise 1,741 mm’dir. FDM yazıcılarda kullanılan filamentler 1,75 mm çap değerine sahiptir. SEM görsellerinde de ispatlandığı üzere üretilen filamentler FDM yazıcılarda kullanılan filamentlerle yaklaşık aynı çap değerlerine sahiptir ve bu cihazlarda kullanılmaya uygundur.



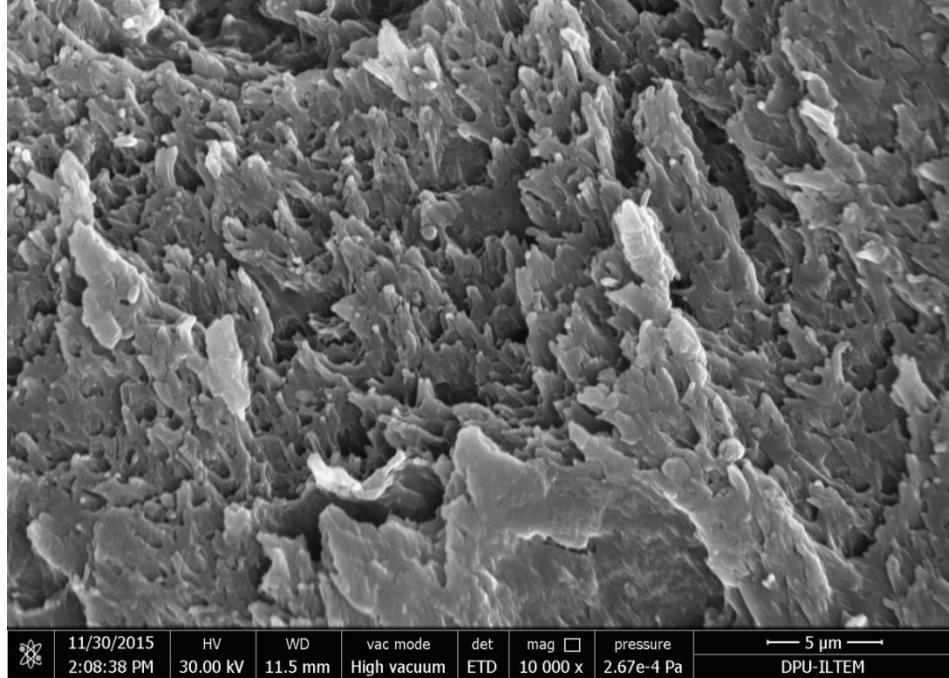
Şekil 6.12. Çekme testi sonrası ve SEM öncesi işlemler.



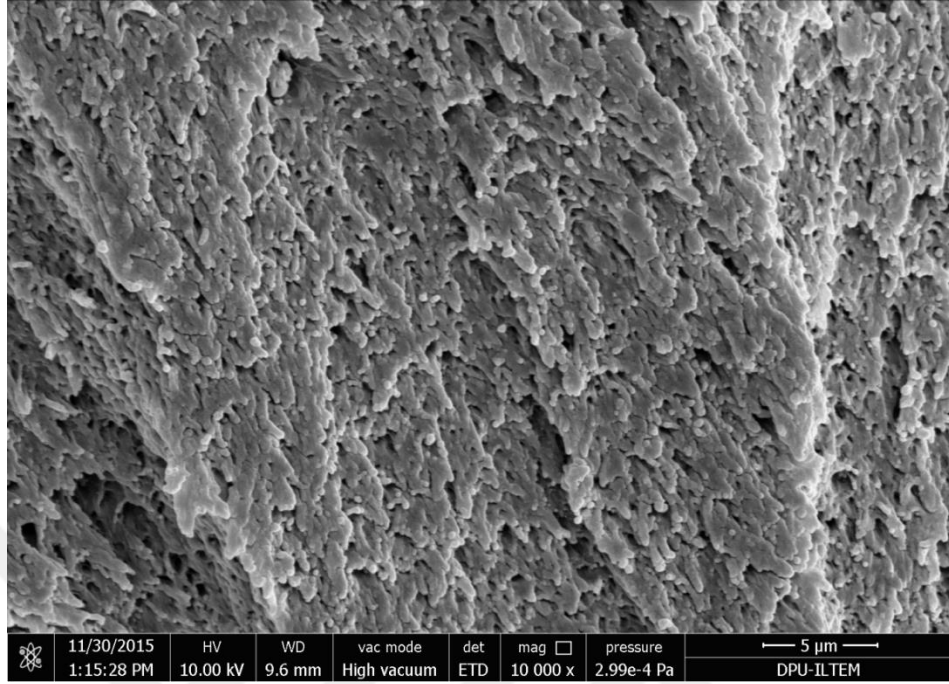
Şekil 6.13. Takviyesiz ABS filamentin SEM mikro yapısı x150 büyütme ile.



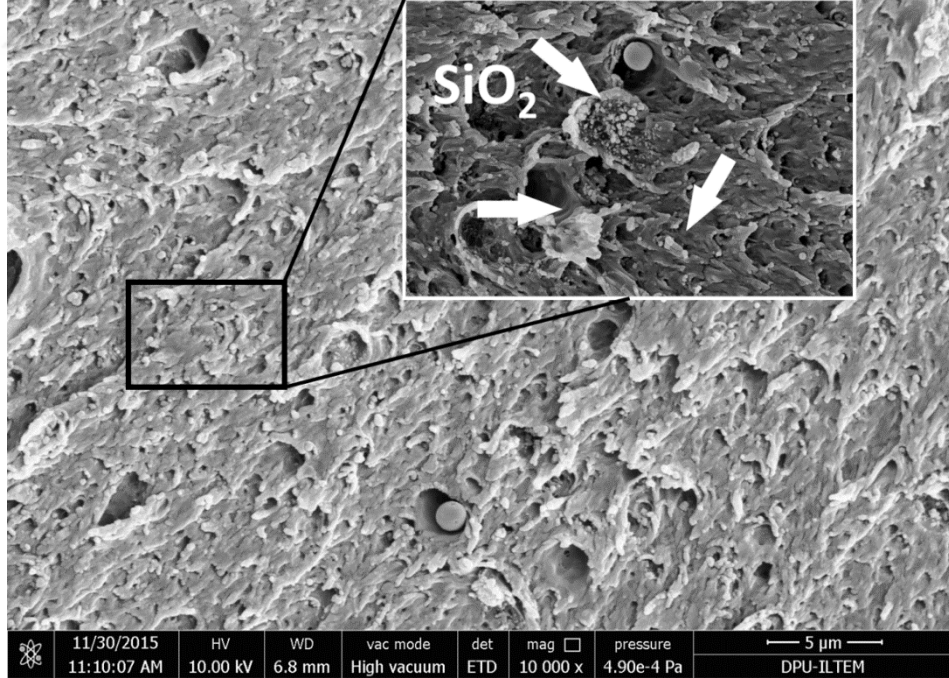
Şekil 6.14. SiO₂ takviyeli kompozit filamentin SEM mikroyapısı x150 büyütme ile.



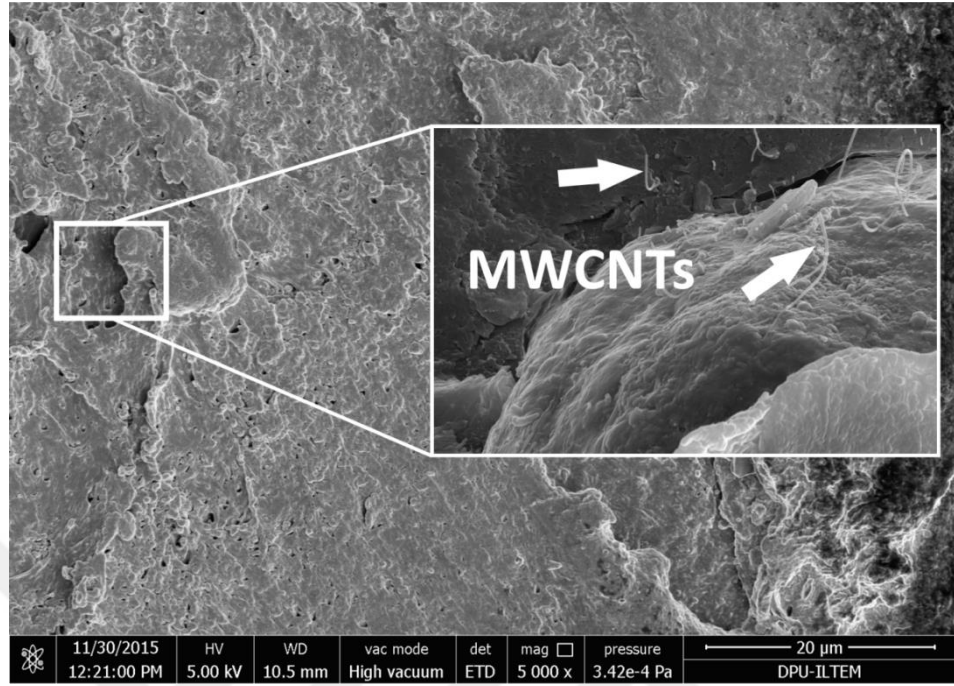
Şekil 6.15. Takviyesiz ABS filamentin SEM görüntüsü x10.000 büyütme ile.



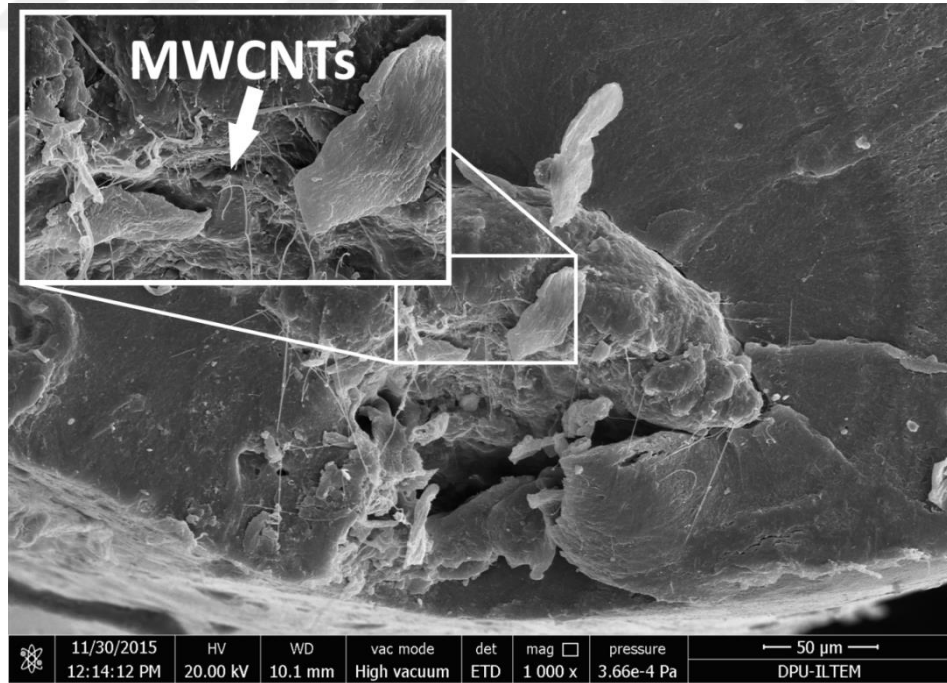
Şekil 6.16. ZrB₂ takviyeli kompozit filamentin SEM görüntüsü x10.000 büyütme ile.



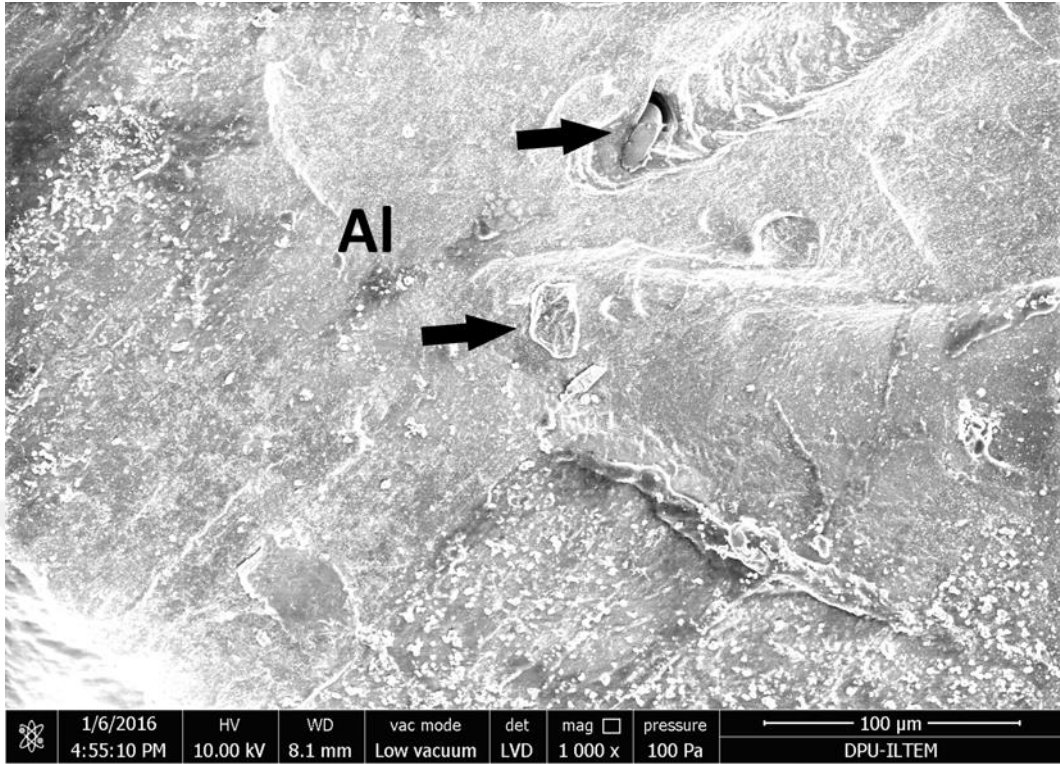
Şekil 6.17. SiO₂ takviyeli kompozit filamentin SEM görüntüsü x10.000 büyütme ve detay görünüm ile.



Şekil 6.18. MWCNTs takviyeli kompozit filamentin SEM görüntüsü x5.000 büyütme ve detay görünüm ile.



Şekil 6.19. MWCNT'lerin filament kesitindeki aglomerasyonu, x1.000 ve x10.000 büyütme ile.



Şekil 6.20. Al takviyeli filamentin SEM görüntüsü, x1.000 büyütme ile.

Filamentlerin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 6.15-20’de verilmiştir. Şekil 6.15’de katkısız ABS filamentin kırık yüzeyi görülmektedir. Şekil 6.16’da ise ZrB_2 takviyeli filamentin kırık yüzeyi gösterilmektedir. Şekil 6.16 incelendiğinde yüzeyde sünek kırılmaya işaret eden yapılar görülmektedir. Şekil 6.15’de ise katkısız ABS filamentin kırık yüzeyinin Şekil 6.16’da verilen ZrB_2 takviyeli numuneye göre daha düz olduğu görülmektedir. SiO_2 takviyeli filamentte ait SEM görseli Şekil 6.17’de 10.000 büyütme ile gösterilmiştir. SiO_2 /ABS kompozit filamentin içyapısı ZrB_2 katkılı filament (Şekil 6.16) ile karşılaştırıldığında, içyapıda sünek kırılmaya işaret eden benzer uzanmış yapılar görülebilir. Bu noktada SEM görüntülerinin çekme-testi sonuçları ile örtüştüğü, sonuçları desteklediği söylenebilir. Filamentlere ait çekme-testi sonuçlarının yer aldığı Çizelge 6.1’de uzama değerleri SiO_2 /ABS kompozit, katkısız ABS ve ZrB_2 /ABS kompozit filamentler için sırasıyla %4,84, %4,99 ve %5,88’dir. Bu değerler SEM görsellerinin incelenmesiyle elde edilen bulgular ile uyum göstermektedir.

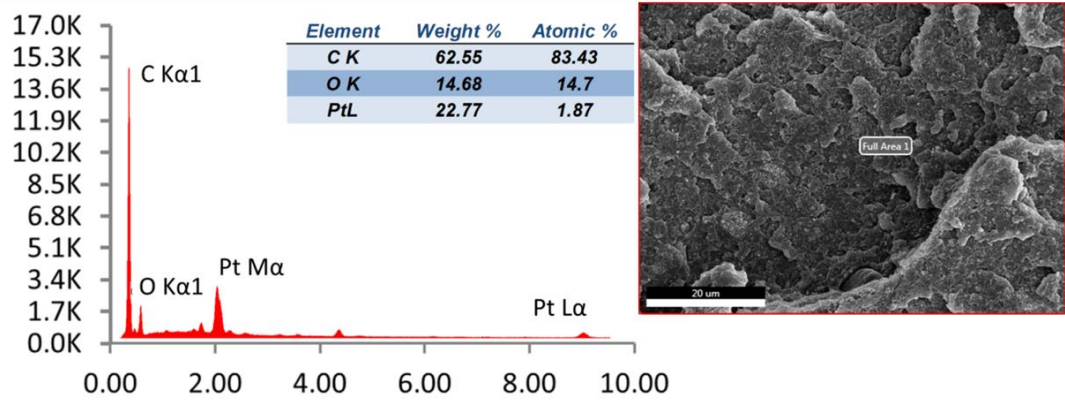
Al/ABS kompozit filamentin içerisindeki takviye Al partiküllerinin ispatı için bu filamentte ait SEM görseli Şekil 6.20’de gösterilmiştir. Önemli bir bulgu da Şekil 6.18 ve 6.19’da verilmiş olan MWCNT/ABS kompozit filamentin SEM görsellerinde tespit edilen partikül toplanmasıdır. SEM görsellerinden yola çıkarak MWCNT partiküllerinin matris içerisinde üniform olmayan, yer yer toplanmış bir dağılım gösterdiği söylenilebilir. Bu

dağılımın sebebi olarak da Wu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada değindikleri üzere MWCNT'lerin tüpsü morfolojileri ve ABS matris ile kurdukları zayıf etkileşim gösterilebilir (Wu vd., 2015). MWCNT'ler karmaşık morfolojileri sebebi ile birbirlerinden daha zor ayrılırlar, bu da partiküllerin ABS matris içerisinde topaklanma eğilimi göstermesine sebep olur. Bununla birlikte kompozit filamentin kesitinde topaklanan MWCNT partikülleri gerilim yoğunlaştırıcı bir etki göstererek filamentin mekanik özelliklerini zayıflattığı söylenebilir.

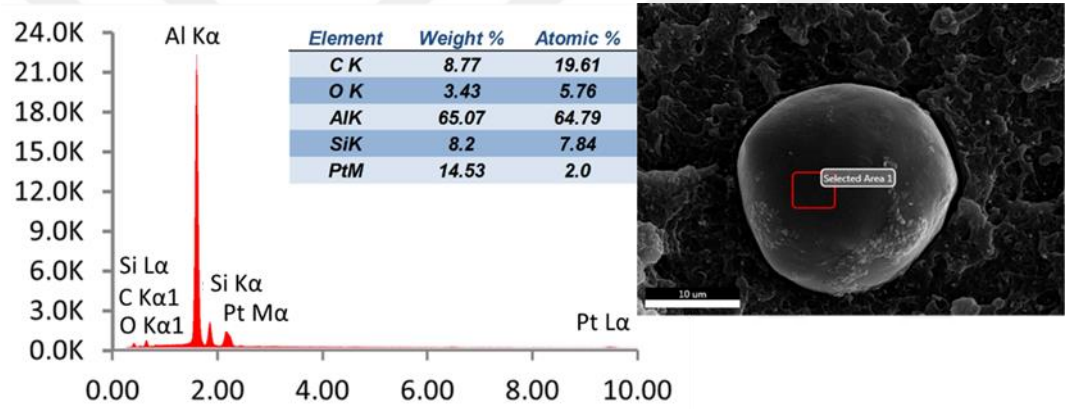
Çizelge 6.1'de MWCNT/ABS filamentin çekme-mukavemet değeri 41,2 MPa olarak verilmiştir. Bu değer katkısız ABS filamentin değerinin %7 üzerindedir. Bununla birlikte kompozit filamentin kopma uzaması değeri katkısız ABS filamente göre %18 daha düşüktür. SEM görselleri incelemeleri SiO₂/ABS, ZrB₂/ABS ve Al/ABS filamentleri içerisinde takviye malzemelerinin MWCNTs/ABS kompozit filamentte göre daha iyi dağıldığını göstermektedir. Çekme-testi sonuçlarında en yüksek çekme-mukavemet değeri 44,72 MPa ile SiO₂/ABS kompozit filamentte aittir. SiO₂ tozları 440 m²/gr ile tüm takviyeler arasında en yüksek yüzey alanına sahip partiküllerdir. Şekil 6.17'de SiO₂/ABS kompozit filamentin sünek kırılmaya işaret eden yüzey morfolojisi ve Şekil 6.10'da verilen yüzey pürüzlülüğüne ait değerler de takviye partiküllerinin ABS matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir. SiO₂ takviyeli kompozit filamentin mekanik özelliklerindeki artışa partiküllerin sahip olduğu yüksek yüzey alanı ve küresel morfolojileri gösterilebilir. Liang ve arkadaşlarının (Liang vd., 2010) yaptıkları çalışmada da bu tür partiküllerin matris ile daha iyi bağ kurduğuna işaret edilmiştir.

6.6. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin EDS Sonuçları

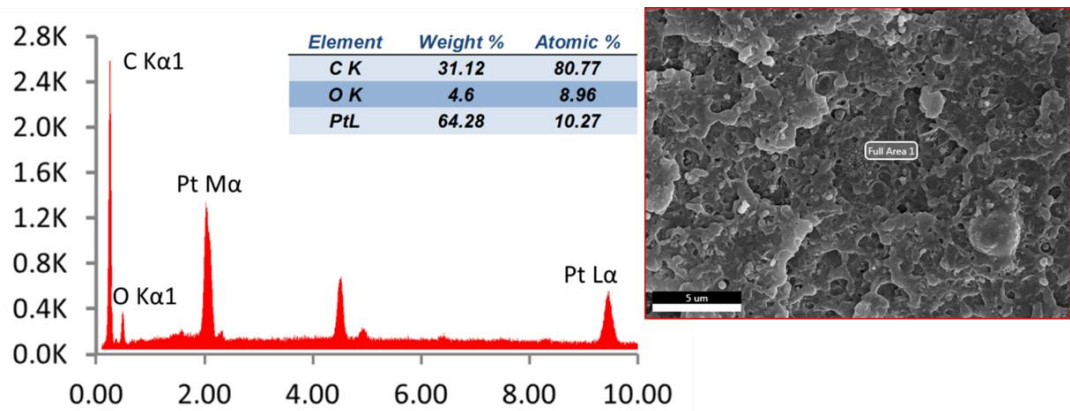
Çalışmada yalnızca filamentlerin karakterizasyonu yapılmamış, filamentler kullanılarak üretilen numuneler de karakterize edilmiştir. 3B numuneler yazdırıldıktan sonra mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için numuneler üzerinde çekme-testi ve 3-nokta-eğme testleri yapılmıştır. Çekme testinin ardından sonuçların değerlendirilmesi ve kırılma mekanizmalarının incelenmesi için SEM-mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. SEM-mikroyapı çalışmasının yanında numunelerin içerdikleri takviyelerin doğrulanması için EDS çalışması yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları Şekil 6.21-6.25'de tablolar halinde gösterilmiştir.



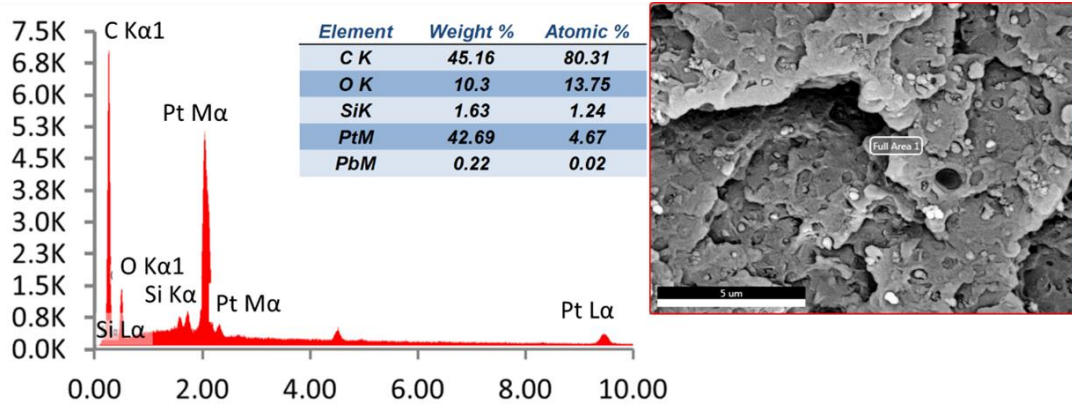
Şekil 6.21. Takviyesiz numunenin EDS çalışması.



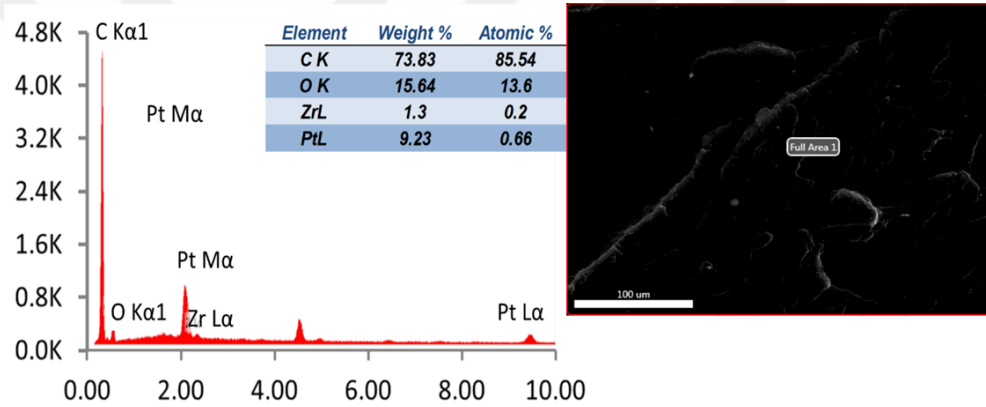
Şekil 6.22. Al/ABS kompozit numunenin EDS çalışması



Şekil 6.23. MWCNTs/ABS nano-kompozit numunenin EDS çalışması.



Şekil 6.24. SiO₂/ABS nano-kompozit numunenin EDS çalışması.

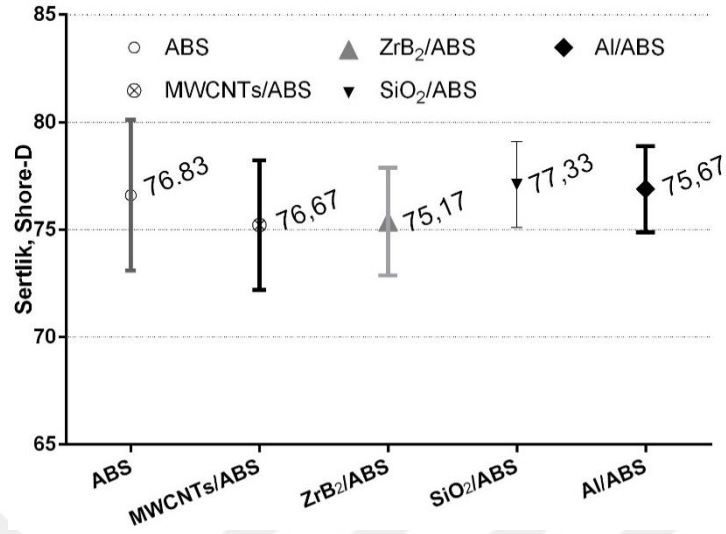


Şekil 6.25. ZrB₂/ABS kompozit numunenin EDS çalışması.

EDS çalışması ile takviye edilen partiküllerin ABS matris içerisindeki varlıkları doğrulanmıştır. Bununla birlikte numunelerin içeriklerinde yer alan Pt elementi, numunelerin SEM öncesi incelemeye uygun hale getirilmesi amacıyla yapılan kaplama işleminden gelmektedir. Tüm kırık yüzeyler SEM öncesi Pt ile kaplanmıştır.

6.7. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Sertlik Testi Sonuçları

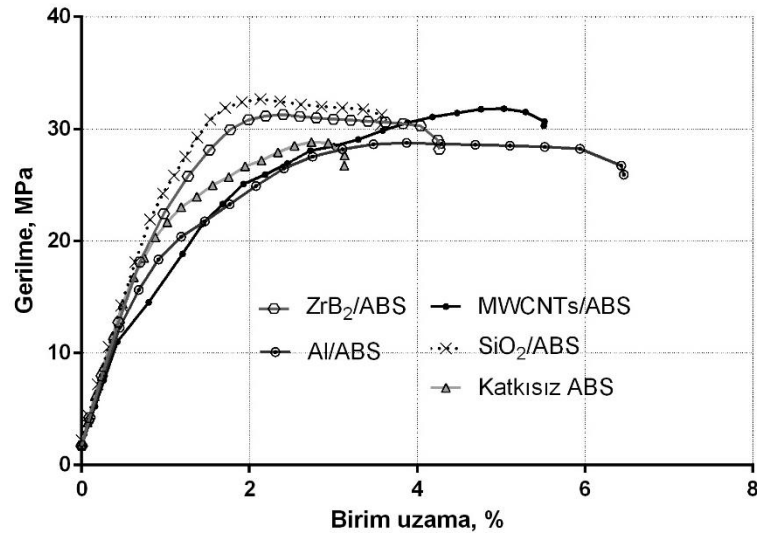
Her numune kompozisyonu üzerinde 10 farklı noktada alınan sertlik ölçümleri değerlerinin ortalaması alınarak ortalama sertlikler hesaplanmış sonuçlar Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Sonuçlara göre mikro-nano takviyelerin kullanılması üç boyutlu yazdırılan numunelerin sertliğini önemli derecede değiştirmemektedir.



Şekil 6.26. Üretilen numunelerin Shore-D sertlik değerleri.

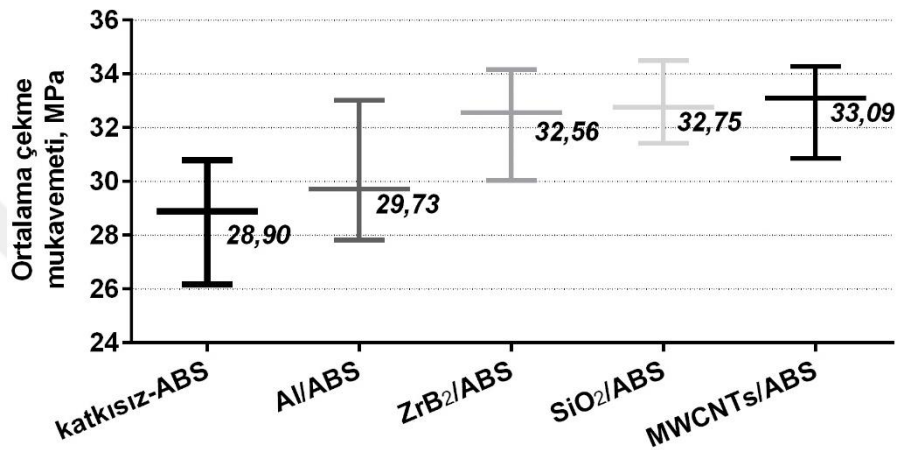
6.8. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Çekme Testi Sonuçları

3B yazdırılan numunelerin çekme testlerinin ardından teste ait çekme-uzama grafiği Şekil 6.27’de grafik halinde gösterilmiştir. Şekil 6.28’de numunelerin minimum, maksimum ve ortalama çekme mukavemet değerleri gösterilmiş, Şekil 6.29’da ise ortalama kopma noktasındaki uzama değerleri verilmiştir.



Şekil 6.27. Numunelerin çekme-uzama grafiği.

Grafiklere göre katkısız-ABS numunenin ortalama çekme-mukavemet değeri 28,9 MPa bulunmuştur. Benzer şekilde Tymrak ve arkadaşları (Tymrak vd., 2014) yaptıkları çalışmada katkısız-ABS numune için ortalama çekme-mukavemeti değerini 28,5 MPa bulmuştur. Tez kapsamında yapılan çalışma ve Tymrak ve arkadaşlarının (Tymrak vd., 2014) yaptıkları çalışmada 3B yazdırılmış numunelerin örgü yönleri +45/-45 oryantasyonunda seçilmiştir. Çalışma sonuçlarının birbirleriyle olan uyumu dikkat çekmektedir.

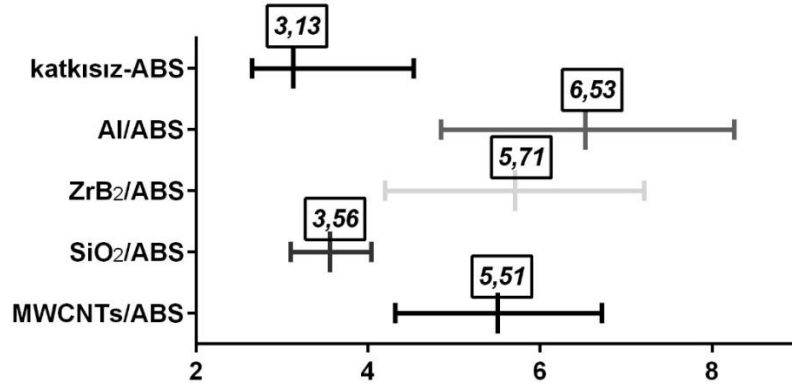


Şekil 6.28. Numunelerin ortalama çekme mukavemet değerleri.

Al/ABS kompozit numunelerin ortalama çekme-mukavemeti değeri katkısız numuneye göre %3 civarında artış göstermiştir. Bunun aksine ZrB₂/ABS kompozit numunelerin ortalama çekme-mukavemeti artışı %12,7 değeri ile Al/ABS numuneye göre daha çarpıcıdır. ZrB₂ takviyesi sadece ortalama çekme-mukavemeti artışı ile değil ortalama birim uzama değeri artışı ile de sonuçlanmıştır. Katkısız numuneye kıyasla ZrB₂/ABS kompozit numunenin birim uzama değeri %82,5 oranında artmıştır (Şekil 6.29). Al takviyesi ise ortalama çekme-mukavemeti değerini diğer kompozit numunelere kıyasla minimum seviyede etkilemesine rağmen katkısız numuneye göre birim uzama değerindeki artış %108'dir.

MWCNTs ve SiO₂ takviyeli kompozit numunelerin ortalama çekme mukavemetleri sırasıyla 33,09 MPa ve 32,75 MPa'dır. Bu numunelerin katkısız numuneye göre çekme-mukavemeti değerlerindeki artış MWCNTs ve SiO₂ takviyeli numuneler için sırasıyla %14,5 ve %13,5'dir. Ortalama birim uzama değeri artışı SiO₂ takviyeli kompozit numunede %14 civarında iken, MWCNTs/ABS kompozit numune için bu değer %76'dır.

Yapılan çalışmada mikro parçacık takviyesinin ortalama birim uzamayı en azından %82,5 oranında iyileştirdiğini göstermiştir.



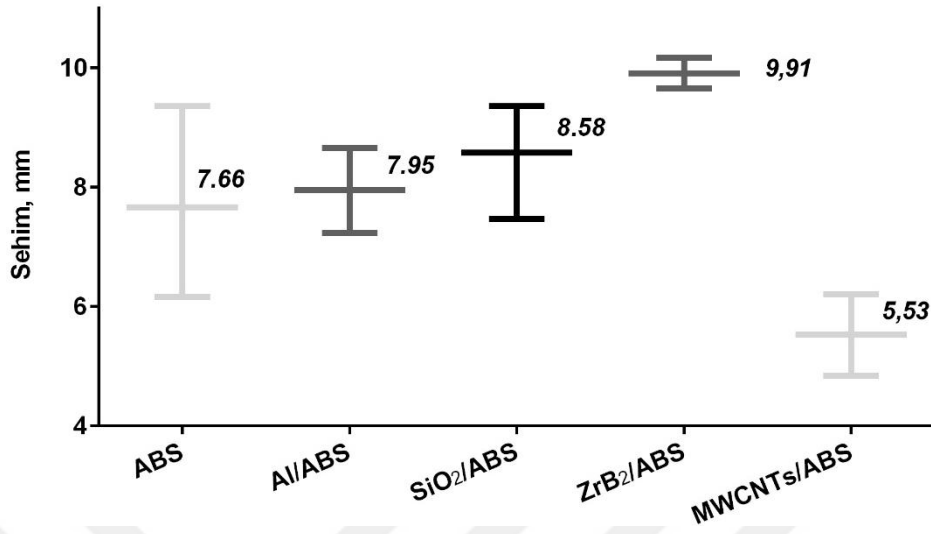
Şekil 6.29. Numunelerin ortalama birim uzama değerleri.

6.9. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

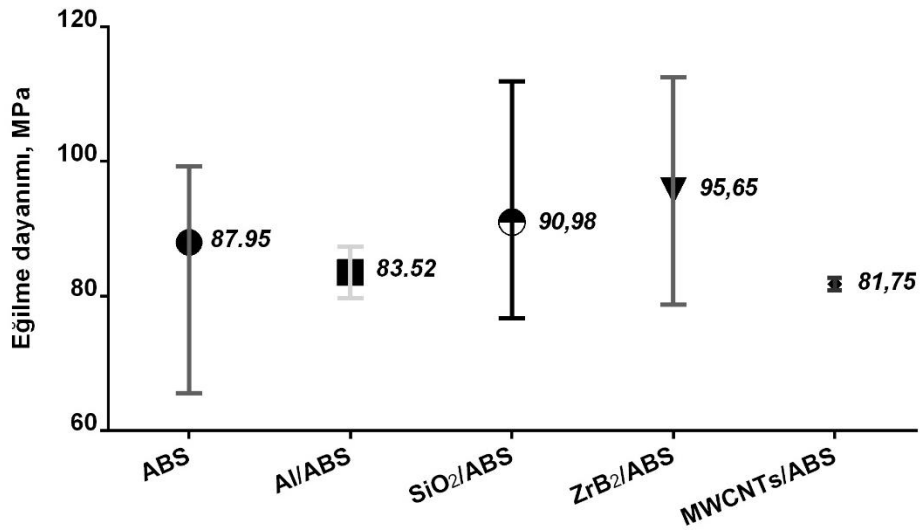
3 nokta eğme testi sonrası numunelere ait görseller Şekil 6.30'da verilmiştir. Ortalama sehîm değeri Şekil 6.31'de, ortalama eğilme dayanımları da Şekil 6.32'de verilmiştir. Sonuçlara göre ABS matrise Al takviyesi eğilme dayanımını %5 oranında düşürmüştür. Buna rağmen ZrB₂ ilavesi eğilme dayanımını %8,7 oranında iyileştirmiştir. Hasar öncesi sehîm miktarı bakımından Al/ABS kompozit numune katkısız-ABS numuneye göre %3,7 oranında daha iyidir. ZrB₂/ABS kompozit numunede ise bu oran %26'dır. Sonuçların işaret ettiği gibi Al partikül takviyesi polimer matrisin eğilme dayanımını düşürmüştür. Bu noktada Al makro partiküllerinin bulundukları lokal bölgelerde gerilmeyi arttığı yorumu yapılabilir.



Şekil 6.30. 3 nokta eğme testi sonrası numuneler; a) SiO₂/ABS, b) Al/ABS, c) MWCNTs/ABS, d) katkısız-ABS, e) ZrB₂/ABS.



Şekil 6.31. 3 nokta eğme testi, sehim.



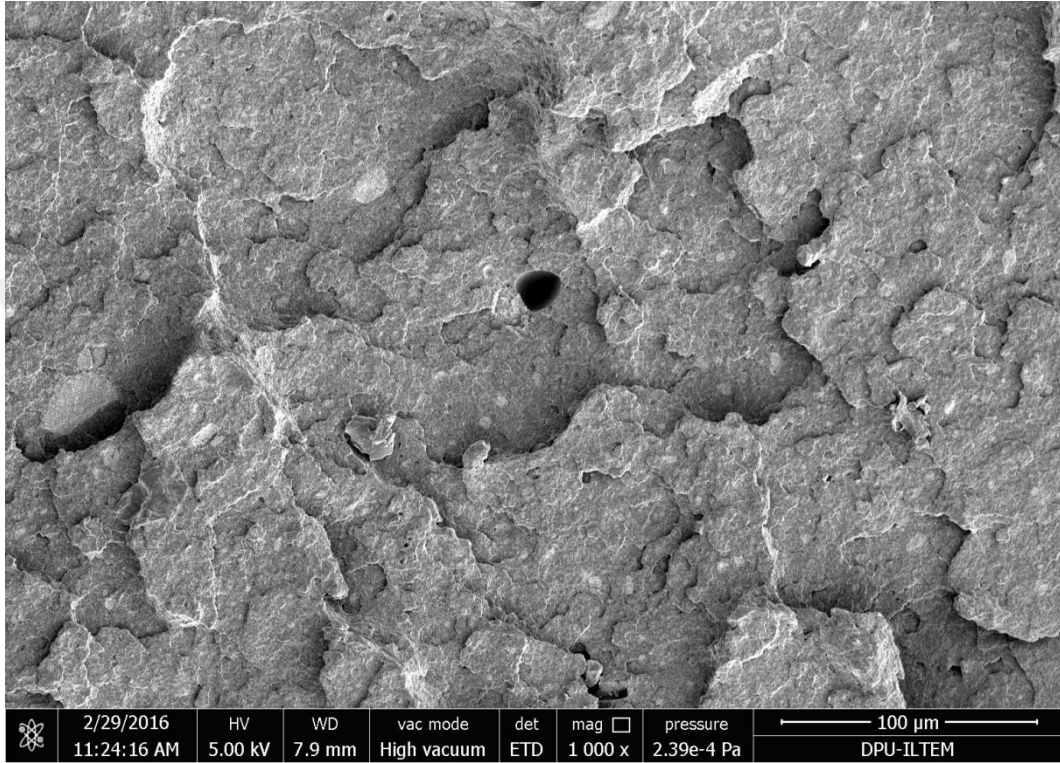
Şekil 6.32. 3 nokta eğme testi, eğilme dayanımı.

Sonuçlara göre MWCNTs takviyesinin ise eğilme dayanımını %7 oranında düşürdüğü görülmektedir. Sehim miktarındaki düşüş ise %28 oranı ile eğilme dayanımındaki düşüşten oldukça yüksektir. SiO₂ takviyeli ABS numunede ise katkısız-ABS numuneye göre eğilme dayanımında %3,5 oranında artış vardır. Bununla birlikte sehim miktarındaki iyileşme %12'dir.

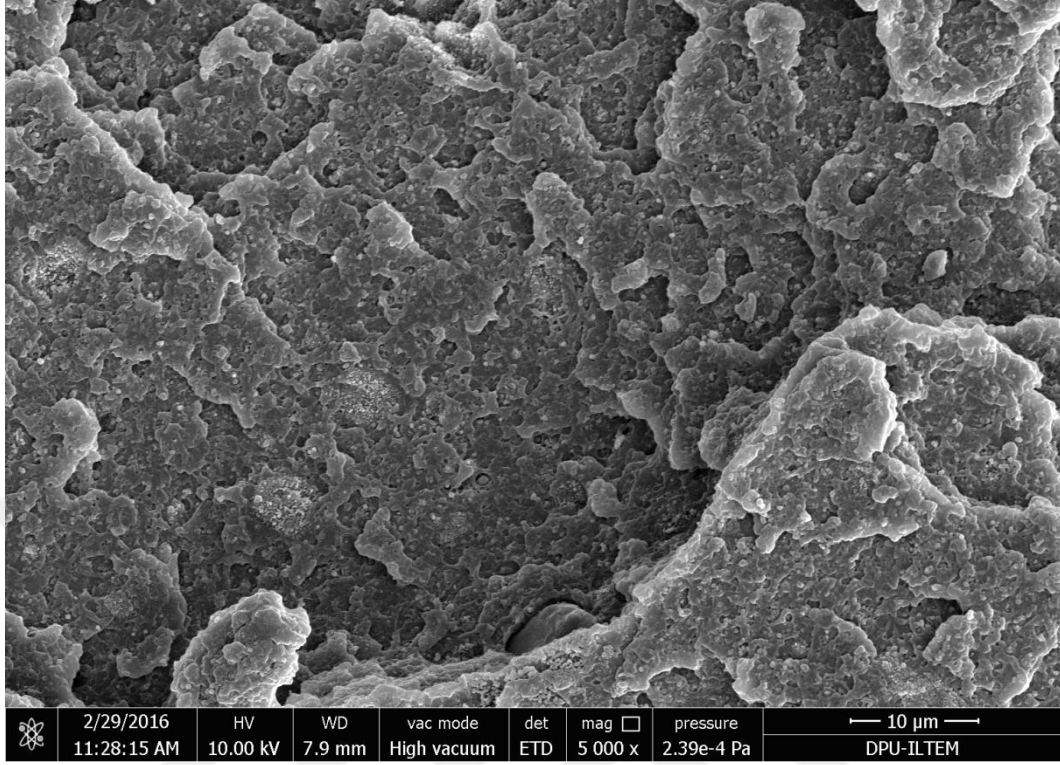
Sonuçlara göre, mikro-parçacık ilavesi (Al, ZrB₂) çekme mukavemeti değerlerini olumlu ölçüde iyileştirirken eğilme gerilme değerleri aynı oranda değişim göstermemiştir. Bununla birlikte tüm takviyeler arasında MWCNTs partikül takviyesi eğilme özelliklerini her iki kategoride de düşürmüştür.

6.10. Üç Boyutlu Yazdırılan Numunelerin SEM-Mikroyapı İncelemeleri

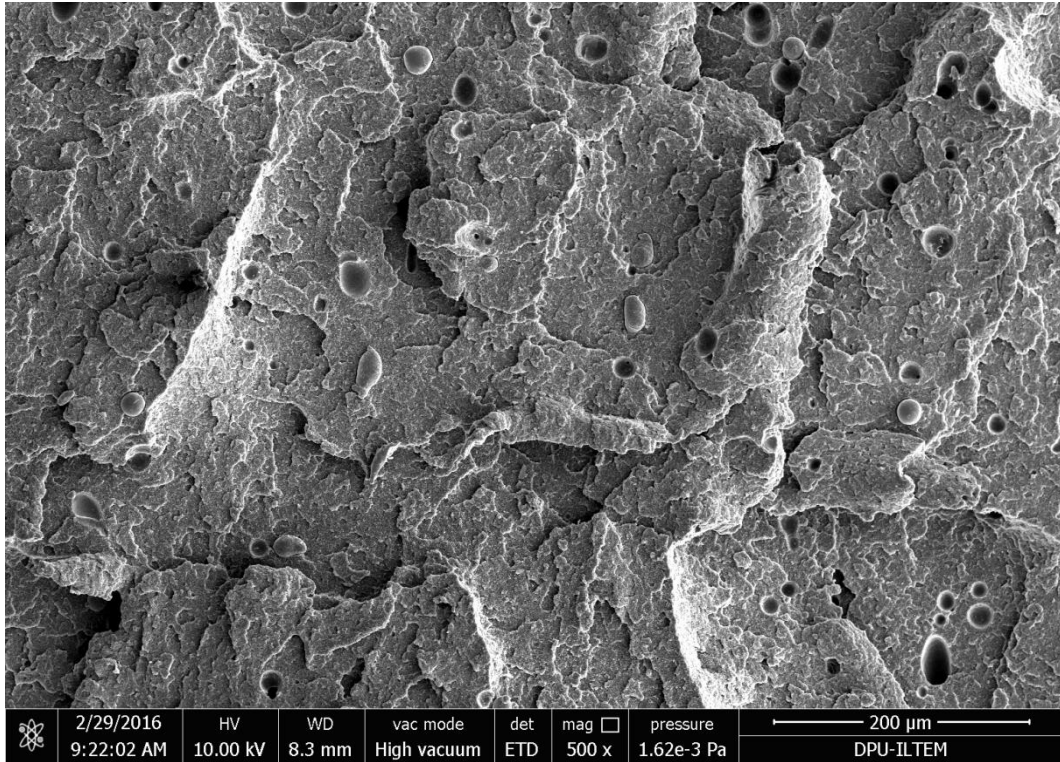
Şekil 6.33-34’de katkısız ABS numunenin kırılma sonrası yüzeylerine ait SEM görselleri sırasıyla x1.000 ve x5.000 büyütme ile gösterilmiştir.



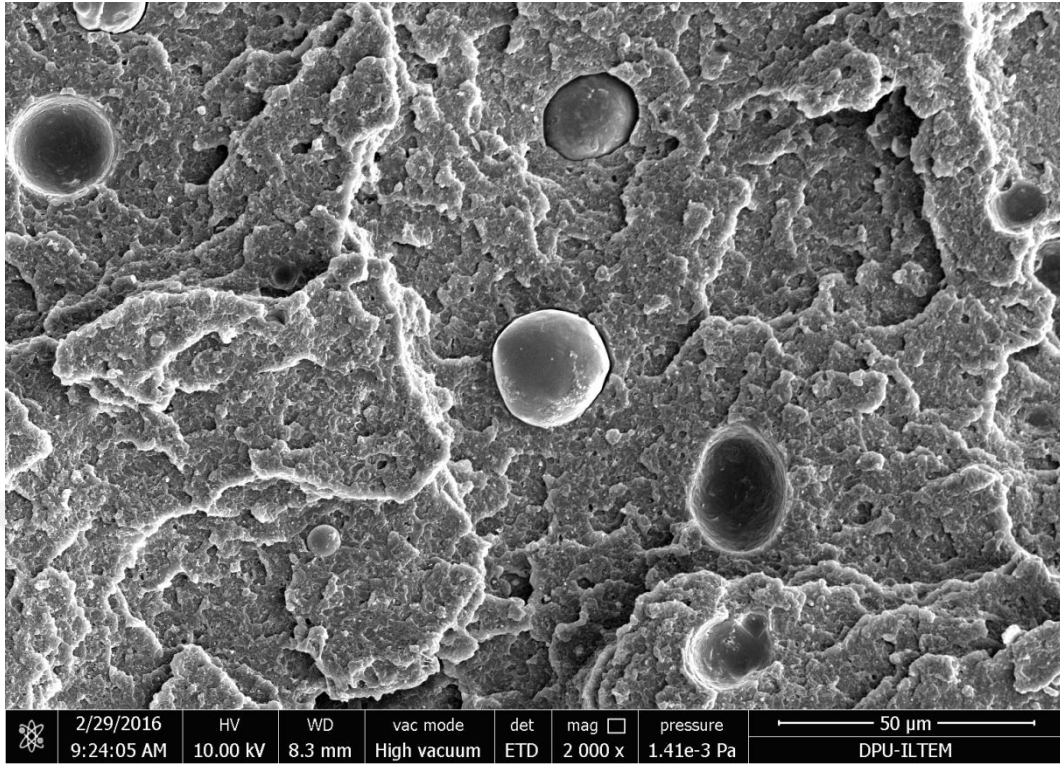
Şekil 6.33. Katkısız-ABS numunenin kırık yüzeyi, x1.000 büyütme ile.



Şekil 6.34. Katkısız-ABS numunenin kırık yüzeyi, x5.000 büyütme ile.



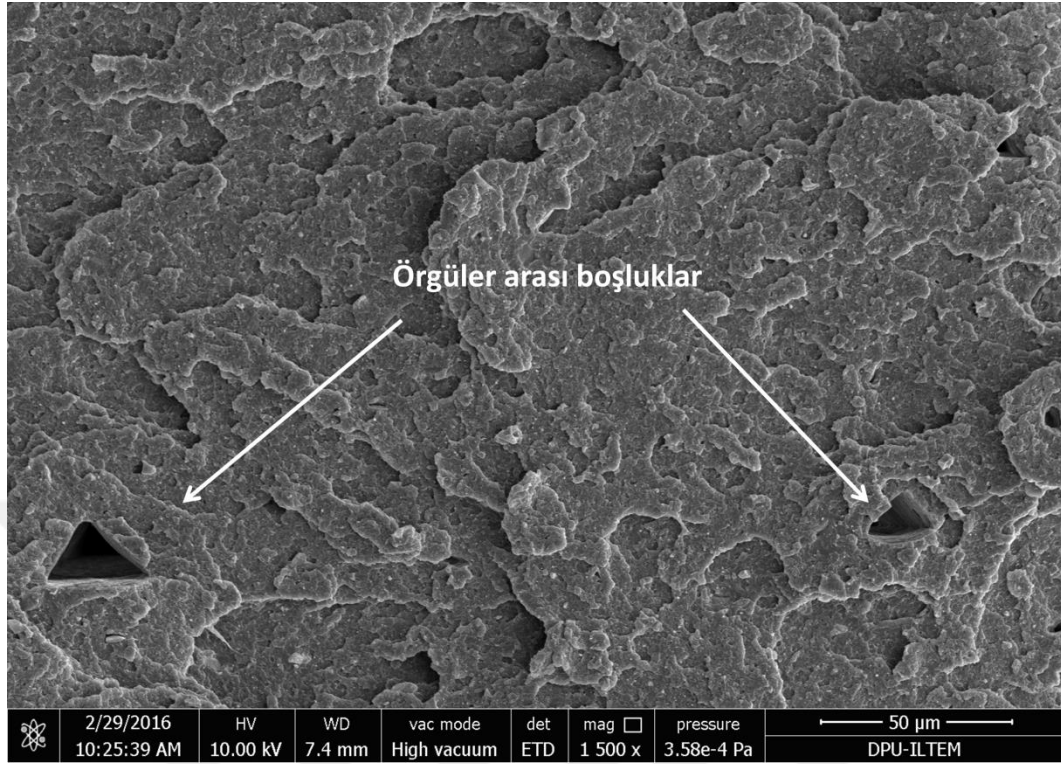
Şekil 6.35. Al/ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi, x500 büyütme ile.



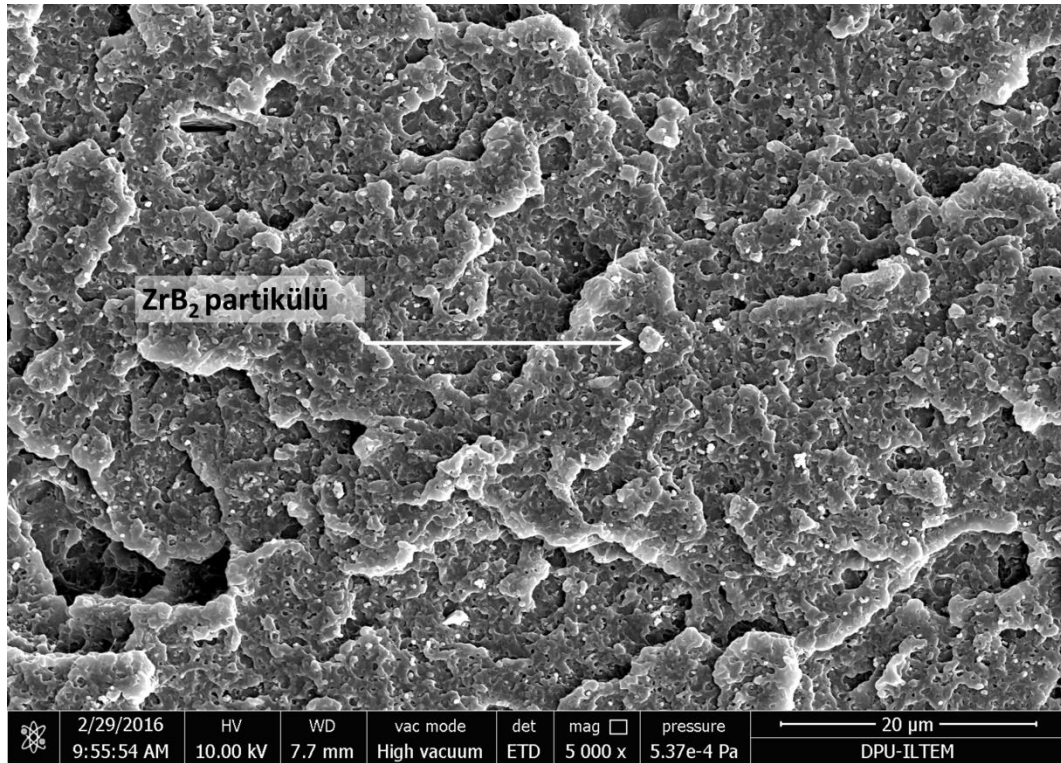
Şekil 6.36. Al/ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi, x2.000 büyütme ile.

Şekil 6.35-36'da ise Al takviyeli ABS numunenin kırık yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 6.36'da Al parçacığının etrafındaki bölgenin incelenmesi önemlidir. Bu bölgede yüksek yüzey enerjisine işaret eden açık renkli bölgeler mevcuttur. Ayrıca Al parçacığının yüzeyinin diğer bölgelere nazaran daha açık renkte oluşu, parçacık yüzeyinde oksit tabakasının varlığını göstermektedir. Bu iki bulgu Al parçacığı ve polimer zincirleri arasında yüksek enerjili bir etkileşim olduğuna işaret etmektedir. Bu yüksek düzeyli etkileşim Al takviyeli polimer kompozit numunenin çekme testinde verdiği yüksek uzama değerini açıklamaktadır.

ZrB₂/ABS kompozit numunelerin kırık yüzey incelemelerinde ZrB₂ partiküllerinin boyutlarının beklenenden daha küçük olduğu görülmüştür. Filamentlerin üretiminde kullanılan ZrB₂ partiküllerinin ortalama boyutları 20 µm iken SEM incelemelerinde partikül boyutları yaklaşık 5 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 6.38). Bu olayın sebebi olarak monofilamentlerin ekstrüzyon işlemi sırasında, ikiz-vida ve ergiyik polimer arasındaki yüksek kayma gerilmelerinin partikülleri parçalayarak boyutlarını küçültmesi gösterilebilir.



Şekil 6.37. ZrB₂/ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi, x1.500 büyütme ile.

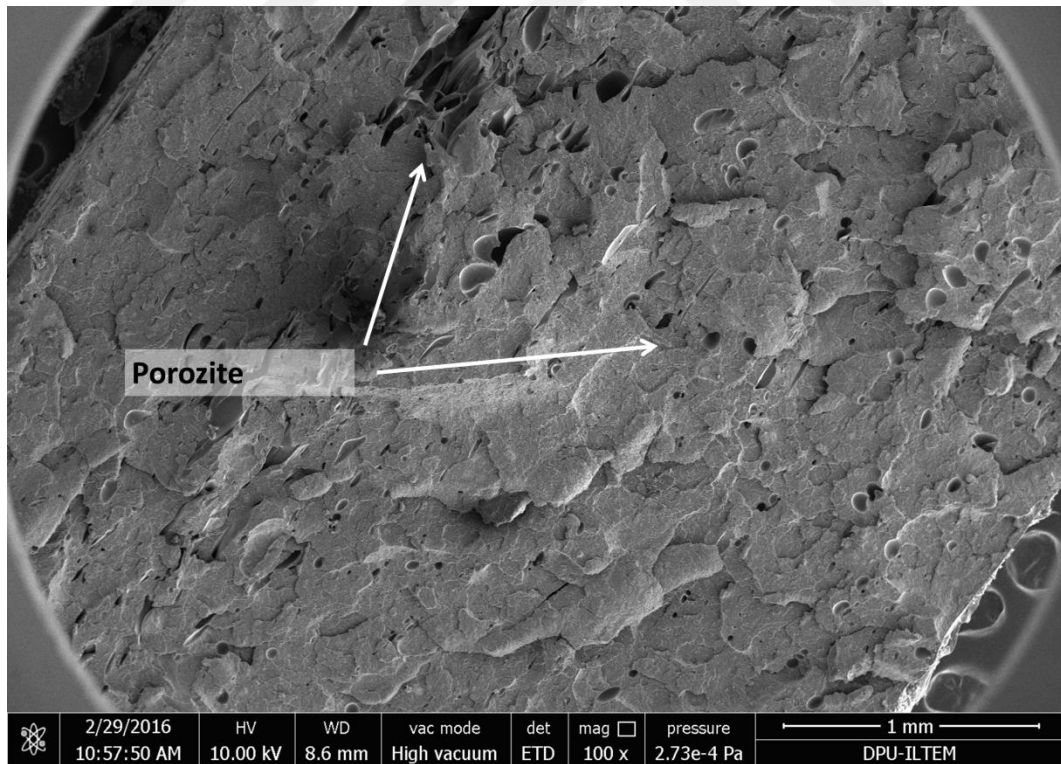


Şekil 6.38. ZrB₂/ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi, x5.000 büyütme ile.

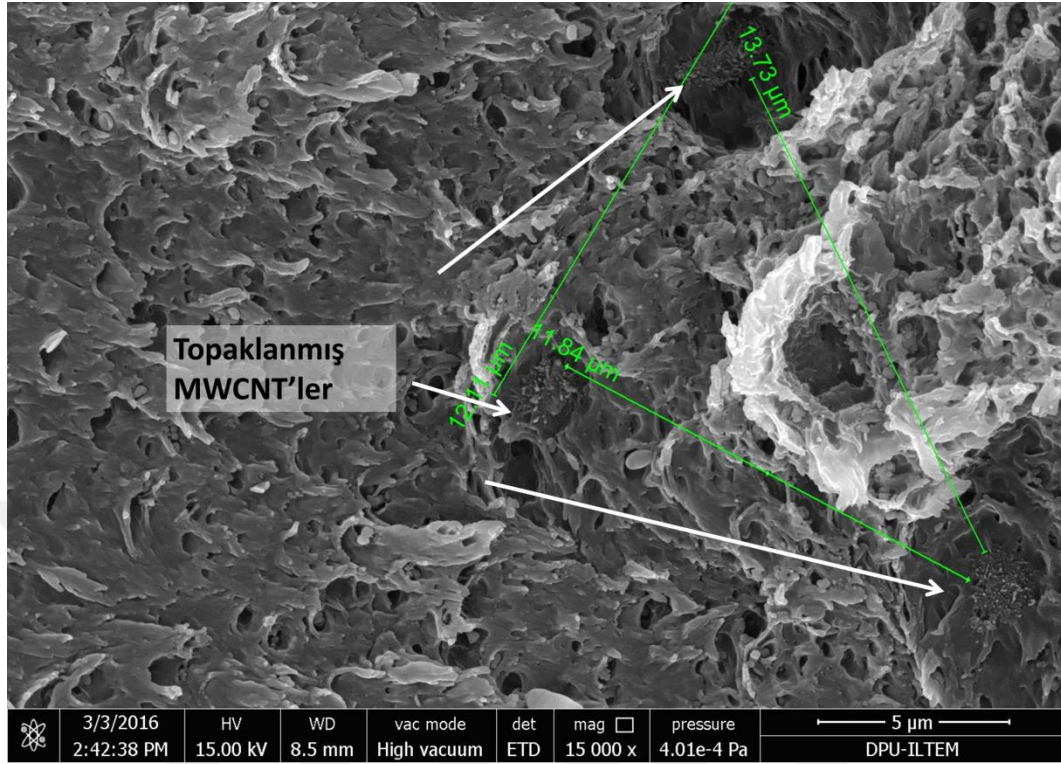
Bütün bunlara ek olarak numunelerin 3 boyutlu üretimlerinde sıfır hava-boşluğu seçilmesine rağmen Şekil 6.37’de ZrB_2 takviyeli numunenin örgüleri arasında görülen üçgen şeklindeki hava boşlukları dikkat çekicidir. Bu hava boşlukları ZrB_2 /ABS kompozit numunenin Al/ABS numuneye göre daha düşük ortalama çekme-uzama değerine sahip olmasının sebebini açıklayabilir.

Katkısız-ABS numunenin x5.000 büyütme altında yüzeyinde görülen düz bölgeler kırılmanın gevrek kırılma olduğuna işaret etmektedir. Bu yüzey morfolojisi ZrB_2 /ABS kompozit numunenin yüzeyi ile karşılaştırılırsa yüzeyin işaret ettiği morfolojinin gevrek kırılmaya ait olduğu daha da belirgin olarak görülecektir. Ayrıca katkısız-ABS numunenin tüm numuneler arasında %3,13 değer ile en düşük ortalama çekme-uzama değerine sahiptir.

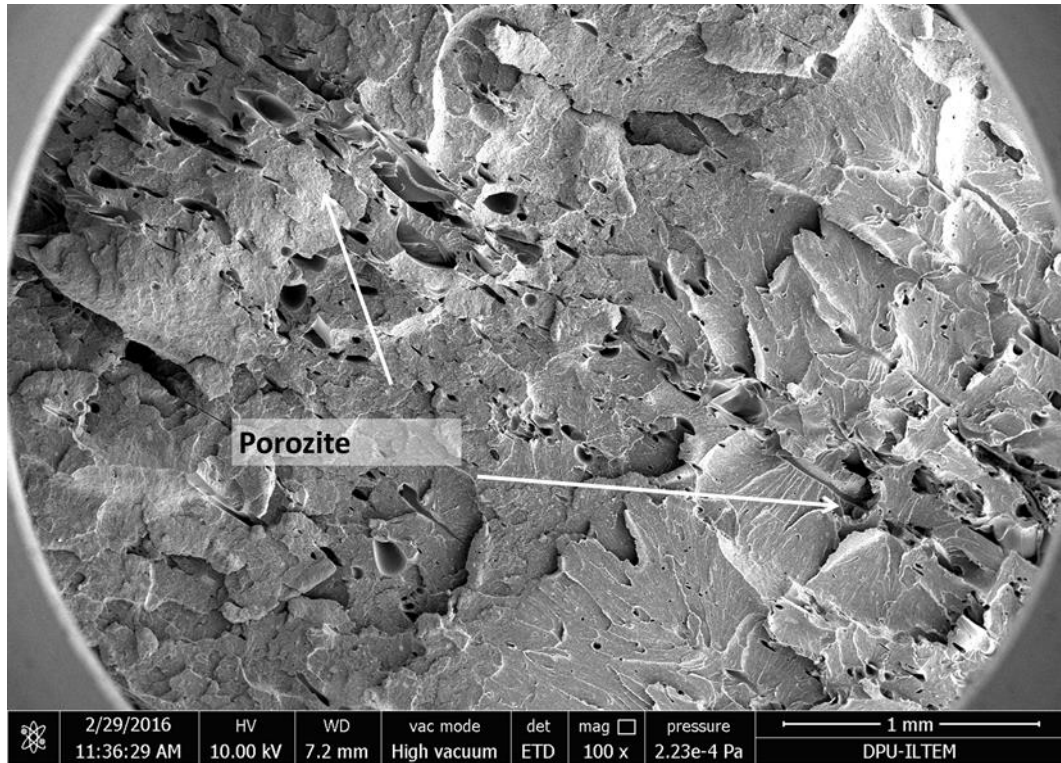
Çalışmanın sonucu ABS malzeme içerisine mikro parçacık takviyesinin çekme uzama değerlerini ZrB_2 /ABS ve Al/ABS kompozit numuneler üzerinde %82,5 ve %108 oranında iyileştirdiğini göstermiştir. Yapılan testlerin sonucu, SEM görüntüleri ile birbirini desteklemektedir.



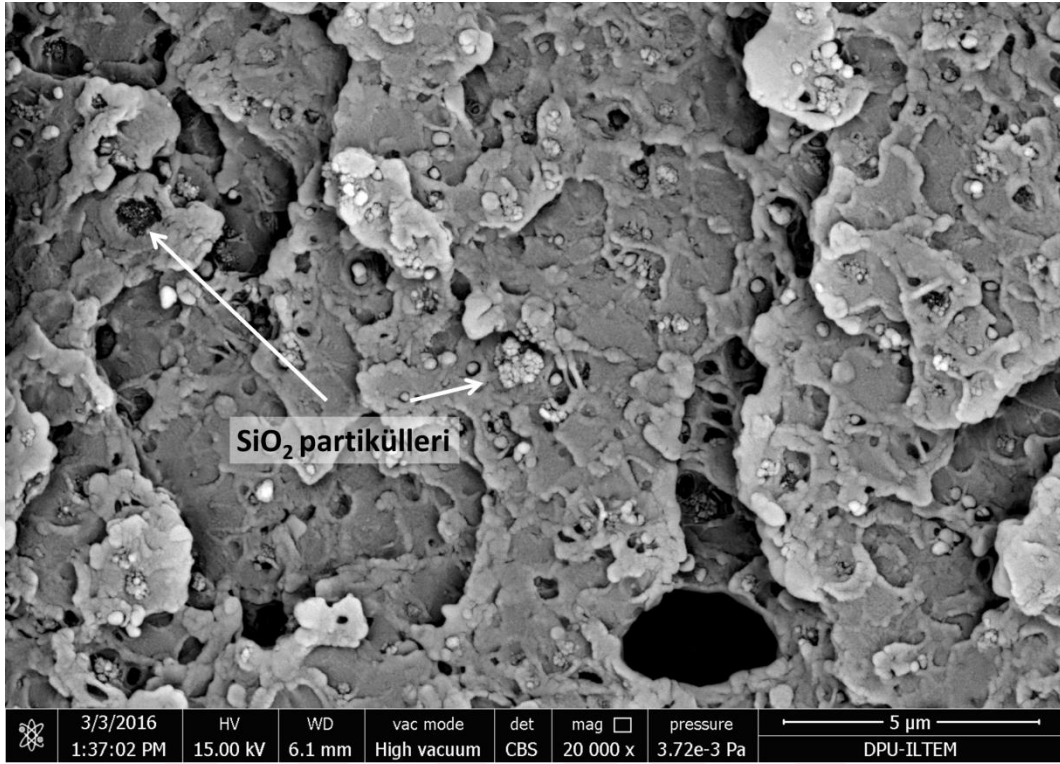
Şekil 6.39. MWCNTs/ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi, x100 büyütme ile.



Şekil 6.40. MWCNTs/ABS kompozit numune kırık yüzeyi, x15.000 büyütme ile.



Şekil 6.41. SiO₂/ABS kompozit numune kırık yüzeyi, x100 büyütme ile.



Şekil 6.42. SiO₂/ABS kompozit numune kırık yüzeyi, x20.000 büyütme ile.

Şekil 6.39-42’de SiO₂ ve MWCNTs takviyeli kompozit numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. İncelemelerde kırık yüzeylerdeki poroz yapılar dikkat çekmektedir. Bu porozitenin sebebi numunelerin 3 boyutlu olarak yazdırılması sırasında kullanılan üretim parametreleri ya da üretim ile ilgili diğer etkenler değildir. ABS granülleri monofilamentlerin üretimlerinden önce kurutma işlemine tabi tutulmamıştır. Polimer granüller içerisindeki nem sıcaklık ile buharlaşarak numunelerin içerisinde porozite oluşturmuştur. Bu olgu filamentlerin kırık yüzey incelemelerine ait SEM görsellerinde de yer almaktadır.

Şekil 6.39’da MWCNTs/ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi x100 büyütme ile verilmiştir. Numune yüzeyindeki porozite katkısız-ABS numuneye kıyasla daha fazladır. Şekil 6.40’da yine aynı kompozit numunenin yüzeyi x15.000 büyütme ile gösterilmektedir. Yüzey üzerinde MWCNT’lerin oluşturduğu üçgensel bölge dikkat çekicidir. Üçgensel bölgenin ortasında daha açık renkli ve uzantıların olduğu alan yüksek enerjili bir bölgeye işaret etmektedir. Bu yüksek enerjili bölgedeki uzamalar kırılma yüzeyinde sünek kırılmaya ait morfolojinin oluştuğunu düşündürmektedir. Üçgensel bölgenin köşelerindeki topaklanmış MWCNT’ler ile polimer matris arasındaki yüksek düzeyli etkileşimin, kırılma yüzeyinde

gözlenen sünek morfolojinin sebebi olabilir. Bu bulgular çekme testi sonuçlarını da desteklemektedir.

Şekil 6.41’de SiO_2 /ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi 100 büyütme ile gösterilmiştir. Bu görseldeki dikkat çekici detay ise SiO_2 /ABS kompozit numunenin kırık yüzeyindeki porozitenin MWCNT/ABS numuneden oldukça yüksek olduğudur. Şekil 6.42’de ise SiO_2 /ABS kompozit numunenin kırık yüzeyi x20.000 büyütme ile gösterilmiştir ve kırık yüzeyin kırılma mekaniği açısından daha düz bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Katkısız-ABS ve SiO_2 /ABS kompozit numune çekme testinde MWCNT/ABS kompozit numuneden daha düşük değerler vermiştir. SEM incelemeleri bu açıdan çekme testi sonuçlarını desteklemektedir.

7. ÖNERİLER VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada mikro ve nano partikül takviyeli ABS kompozit filamentler ikiz vidalı ekstrüder ile başarılı bir şekilde üretilmiştir. Çalışmaya göre;

FDM cihazlarıyla uyumlu ABS kompozit filamentlerin 175°C-210°C aralığında degradasyon olmadan üretilbildiği görülmüştür. Kompozit filamentlerin üretiminde takviye partiküller üzerinde herhangi bir yüzey modifikasyonu uygulanmamıştır. Buna rağmen özellikle nano takviyelerin aglomerasyonunun önüne geçmek, takviye malzemenin matris içerisinde daha iyi dağılmasını sağlamak ve bu sayede takviye matris etkileşimi arttırmak kompozit filamentlerin daha verimli sonuçlar ile neticelenmesi için göz önüne alınması gereken noktalardan biridir (Li vd., 2010). Kompozit filamentler üzerinde yapılan DSC çalışmalarında filamentler için en yüksek T_g değeri MWCNTs/ABS kompozit filament için 130°C çıkmıştır. Bu değer takviyesiz-ABS filamentin T_g değerinin %21 üzerindedir. Bununla birlikte şu an kullanılmakta olan FDM cihazlarında çalışma sıcaklığı olarak 230°C tercih edilmektedir. Bu açıdan bakıldığında kompozit filamentlerin T_g değeri 3 boyutlu yazıcıların çalışma sıcaklığı değerinin oldukça altında kalmaktadır. Buradan yola çıkarak 3 boyutlu yazıcıların ısıtma donanımları üzerinde değişiklik yapılmadan, üretilen filamentlerin kullanılabileceği görülmektedir.

Filamentlerin yüzey pürüzlülük sonuçları değerlendirildiğinde; SiO_2 ve ZrB_2 takviyeli filamentler sırasıyla ortalama 1,6 μm ve 1,1 μm yüzey pürüzlülük değeri vermiştir. Bununla birlikte MWCNTs ve Al takviyeli filamentler için bu değerler sırasıyla 2,03 μm ve 2,31 μm 'dir. MWCNTs takviyeler nano takviyeler olmalarına rağmen yüzey pürüzlülük değerlerindeki yüksekliğin olası bir aglomerasyona işaret ettiği düşünülmektedir. SEM incelemelerinde filamentlerin kırık yüzeylerinde topaklanmış MWCNT partiküllerinin varlığı görülmüştür. MWCNTs/ABS kompozit filamentteki elastik modüldeki azalış ve çekme testi-uzama miktarındaki düşüş de bu bulgular ile açıklanabilir. SEM incelemelerinde SiO_2 partiküllerinin de aglomere olmuş olduğu görülse de bu durum filamentlerin yüzey pürüzlülük değerlerini etkilememiştir. Seramik partiküllerin boyut farkından ya da aglomerasyondan bağımsız olarak filamentin yüzey pürüzlülüğünü pozitif etkilediği görülmektedir.

Filamentler üzerinde yapılan çalışmada ortaya çıkan diğer bir önemli bulgu da mikro partikül takviyesinin filamentlerin birim uzama değerlerini %18 civarında iyileştirmesidir (ZrB_2 /ABS için: %17,8; Al/ABS için %40). Nano partikül takviyesi ise çekme mukavemeti değerlerinde katkısız-ABS filamente göre en az %3 civarında bir düşüşe sebep olmuştur (SiO_2 /ABS için: -%3; MWCNTs/ABS için -%18,8). Çalışmada, takviye partikül kullanılmasının

ABS kompozit filamentlerin çekme mukavemet değerlerini en az %4,5 civarında iyileştirdiği görülmüştür (ZrB₂/ABS için: %4,5; Al/ABS için %15,9; SiO₂/ABS için: %16; MWCNTs/ABS için %7).

Çalışma kapsamında üretilen filamentlerin karakterizasyonu yapıldıktan sonra filamentlerin 3 boyutlu yazıcıda kullanılarak yazdırılabilirlikleri gözlemlenmiş; bu filamentler kullanılarak numuneler üretilmiş ve üretilen numuneler üzerinde sertlik, çekme ve eğme testleri yapılmıştır. Filamentler ile numune üretimi sırasında 3 boyutlu yazıcılarda kullanılan 0,4 ve 0,5 mm çaplara delik çaplarına sahip nozüller kullanıldığında, takviye malzemenin zamanla nozül çıkışında toplandığı ve zamanla yazdırma problemlerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Bunu engellemek amacıyla 1mm delik çapına sahip nozül tasarlanmış, üretilmiş ve 3 boyutlu yazıcıda yazdırma işlemi için kullanılmıştır. Benzer şekilde Dawoud ve arkadaşları da (Dawoud vd., 2016) yaptıkları çalışmada 1 mm delik çapına sahip bir nozül kullanmıştır.

Çizelge 7.1. Partikül takviyesinin çekme özelliklerine etkisi.

	Filament		3B yazdırılmış numune	
	Çekme	Uzama	Çekme	Uzama
ABS (Referans)	38,44 MPa	4,99 (%)	28,9 MPa	3,13 (%)
SiO₂/ABS	%16	-%3	%13,5	%14
MWCNTs/ABS	%7	-%18,8	%14,5	%76
ZrB₂/ABS	%4,50	%17,8	%12,7	%82,5
Al/ABS	%15,9	%40	%3	%108

Çizelge 7.1’de filamentlerin ve 3B yazdırılmış numunelerin çekme testleri sonuçlarına ait değerler katkısız ABS referans olmaz üzere verilmiştir. Üretilen filamentler kullanılarak yazdırılan numunelerde katkısız numune için ortalama çekme mukavemeti değeri 28,9 MPa olarak bulunmuştur. Benzer şekilde Tymrak ve arkadaşları (Tymrak vd., 2014) yaptıkları çalışmada katkısız-ABS numune için çekme mukavemetini 28,5 MPa bulmuşlardır. İki çalışmada da numunelerin örgü yönleri +45/-45 oryantasyonunda seçilmiştir ve çalışma sonuçlarının birbirleriyle olan uyumu dikkat çekmektedir. Mikro partikül takviyesi çekme mukavemeti değerleri açısından en azından %3’lük iyileşme ile sonuçlanmıştır (Al/ABS için: %3; ZrB₂/ABS için: %12,7). Nano partikül takviyesi ise çekme mukavemeti değerlerini en az %13,5 civarında iyileştirmiştir (SiO₂/ABS için: %13,5; MWCNTs/ABS için %14,5). Ortalama çekme mukavemeti değerlerindeki artış ise şu şekildedir; Al/ABS için: %108, ZrB₂/ABS için %82,5, SiO₂/ABS için %14, MWCNTs/ABS için %76. Yapılan çalışmadaki kompozit filament ve numunelerin test sonuçlarının literatürdeki başka çalışmalarla kıyaslanamaması, takviye

malzemelerin başka çalışmalarda henüz kullanılmaması dolayısıyla yapılamamıştır. Bununla birlikte 3B yazdırılmış numuneler için literatürdeki diğer çalışmalarda Perez ve arkadaşları (Perez vd., 2014) katkısız ABS için çekme dayanımı değerini 28,5 MPa bulmuşlardır. Raut ve arkadaşlarının (Raut vd., 2014) yaptıkları çalışmada aynı malzeme için bulunan çekme dayanımı değeri 28,52 MPa'dır. Tez kapsamında yapılan çalışmanın sonuçları, katkısız-ABS malzeme için literatürdeki çalışma sonuçları ile büyük uyum göstermektedir. Çalışmadaki diğer bir bulgu ise 3B imalat sırasında partikül birikiminin nozül çıkışını tıkamaması için kullanılan 1 mm çaplı nozül kullanmanın numunenin çekme dayanımını değiştirmemesidir (Tymrak vd., 2014).

Çizelge 7.1'de görüleceği üzere partikül takviyeli ABS kompozit malzemenin 3B numunelerinin çekme-uzama değerleri filament halindeki çekme-uzama değerlerinden daha yüksektir. SiO₂ ve MWCNTs takviyesi filamentin çekme-uzama değerlerini düşürmesine rağmen bu filamentler kullanılarak üretilen 3B numunelerde çekme-uzama değerleri en az %14 artmıştır. ZrB₂ partiküllerinin ortalama boyutu 20 µm iken 3B yazdırılmış numunelerin çekme testi sonrası kırık yüzey incelemelerinde tane boyutlarının 5 µm mertebelerinde olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ZrB₂ partiküllerinin ekstrüzyon işlemi sırasında ikiz vidalı ekstrüder ve ergiyik polimer malzeme etkileşmesinden doğan yüksek kayma gerilmeleri altında boyut kararlılığını koruyamaması olduğu düşünülmektedir. Yüksek gerilmeler altında ZrB₂ partikülleri parçalanmış ve boyut olarak küçülmüştür. SEM incelemeleri Al partiküllerinin bu gerilmeler altında boyut kararlılığını koruduğunu göstermektedir.

Üç nokta eğme testi sonuçlarına göre ABS matrise Al takviyesi eğilme dayanımını %5 oranında düşürmüştür. Buna rağmen ZrB₂ ilavesi eğilme dayanımını %8,7 oranında iyileştirmiştir. Hasar öncesi sehim miktarı olarak Al/ABS kompozit numune katkısız-ABS numuneye göre %3,7 oranında daha iyidir. ZrB₂/ABS kompozit numunede ise bu oran %26'dır. Sonuçların işaret ettiği gibi Al partikül takviyesi polimer matrisin eğilme dayanımını düşürmüştür. Bu noktada Al makro partiküllerinin bulundukları lokal bölgelerde gerilmeyi arttırdığı yorumu yapılabilir. Sonuçlara göre MWCNTs takviyesinin ise eğilme dayanımını %7 oranında düşürdüğü görülmektedir. Sehim miktarındaki düşüş ise %28 ile eğilme dayanımındaki düşüşten oldukça yüksektir. SiO₂ takviyeli ABS numunede ise katkısız-ABS numuneye göre eğilme dayanımında %3,5 oranında artış vardır. Bununla birlikte sehim miktarındaki iyileşme %12'dir.

Sonuçlara göre, mikro-parçacık ilavesi (Al, ZrB₂) çekme mukavemeti değerlerini olumlu ölçüde ve yüksek oranlarla iyileştirirken eğilme gerilme değerleri aynı oranda değişim

göstermemiştir. Bununla birlikte tüm takviyeler arasında MWCNTs partikül takviyesi eğilme özelliklerini her iki kategoride de düşürmüştür.

Yapılan çalışmanın sonuçları filamentler ve 3B üretilen numunelerin sonuçları bakımından farklılıklar göstermektedir. Filamentlerin sahip olduğu ortalama 1,75 mm çap değeri göz önüne alınırsa, kesit içindeki partiküllerin lokal olarak topaklanmış olmasının ya da o kesit içerisinde partikül miktarının diğer kesitlerden farklı olmasının filamentin mekanik özelliklerini değiştirebileceği açıktır. 3B numune üretiminde ise çekme gerilmesinin etkidiği kesit daha büyük olduğundan malzeme kusurlarının sonuçları daha az etkilediği düşünülmektedir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda filamentlerin ekstrüzyon işleminden önce kurutulmadığı dikkate alınmalıdır. ABS granülleri içerisindeki nemin ekstrüzyon sıcaklığı ile buharlaşarak filament kesitinde boşluklar oluşturduğu görülmüştür. Ekstrüzyon işlemi öncesi ABS granüllere kurutma işleminin uygulanması malzemedeki nem kaynaklı boşluk oluşumunun önüne geçebilir. Bütün bunların yanında Tekinalp ve arkadaşlarının (Tekinalp vd., 2014) yaptığı çalışmada takviye partiküllere yüzey modifikasyon işlemi uygulanmasının matris malzeme ve takviye arasındaki etkileşimi arttıracak vurgulanmıştır. Kompozit filamentlerin üretilmesinden önce partiküllere uygulanan yüzey iyileştirme işlemleri sonuçları pozitif yönde etkileyeabilmekle birlikte bu işlemlerin kullanılmasının ek bir üretim basamağı oluşturması ve maliyet gerektirmesi dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Allcock H.R., Lampe F.W. ve Mark J.F., (2003), Contemporary Polymer Chemistry, Pearson Prentice-Hall, New Jersey.
- Biron, M., (2013), Thermoplastics And Thermoplastic Composites, Elsevier, UK.
- Chatterjee, A., ve Deopura, B. L., (2006), High modulus and high strength PP nanocomposite filament, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 37, s.813-817.
- Chua C.K., Leong K.F., Lim C.S., (2003), Rapid Prototyping: Principles and Applications, 2nd Edition, World Scientific, Singapore.
- Chung, D.D.L., (2010), Composite Materials Science and Applications, Springer, New York.
- da Silva, S. P. M., Lima, P. S., & Oliveira, J. M., (2016), Rheological behaviour of cork-polymer composites for injection moulding, *Composites Part B: Engineering*.
- Dawoud, M., Taha, I., & Ebeid, S. J., (2016), Mechanical behaviour of abs: an experimental study using FDM and injection moulding techniques, *Journal of Manufacturing Processes*. 21, s.39-45.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Larkin, N., & van Duin, S., (2016), Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 37, s.139-150.
- Dul, S., Fambri, L., & Pegoretti, A., (2016), Fused deposition modelling with ABS–graphene nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Cilt. 85, s.181-191.
- Faes, M., Ferraris, E., & Moens, D., (2016), Influence of inter-layer cooling time on the quasi-static properties of ABS components produced via Fused Deposition Modelling. In *Procedia CIRP* (No. accepted). Elsevier BV.
- Fiedler, B., Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Nolte, M. C., & Schulte, K., (2006), Fundamental aspects of nano-reinforced composites, *Composites Science and Technology*. Cilt. 66, No. 16, s.3115-3125.
- Forest, C., Chaumont, P., Cassagnau, P., Swoboda, B., & Sonntag, P., (2015), Generation of nanocellular foams from ABS terpolymers, *European Polymer Journal*. Cilt. 65, s.209-220.
- Frounchi, M., & Burford, R. P., (1993), State of compatibility of crystalline polypropylene/abs amorphous terpolymer thermoplastic blends. effect of styrenic copolymers as compatibilisers, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.(Engl. Ed.)*. Cilt. 2, No.2, s.59-68.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Zavattieri, P. D., (2015), The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Computer-Aided Design*. 69, s.65-89.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

He, Y., Zhu, B., & Inoue, Y., (2004), Hydrogen bonds in polymer blends, Progress in Polymer Science. 29(10), s.1021-1051.

Holmberg, J. A., & Berglund, L. A., (1997), Manufacturing and performance of RTM U-beams, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 28(6), s.513-521.

Hossain, M. S., Ramos, J., Espalin, D., Perez, M., & Wicker, R., (2013), Improving tensile mechanical properties of FDM-manufactured specimens via modifying build parameters, In International Solid Freeform Fabrication Symposium: An Additive Manufacturing Conference. Austin, TX (Cilt. 2013, s. 380-392).

<http://3dprintheq.com/how-does-selective-laser-sintering-work/>

http://faculty.uscupstate.edu/llever/polymer%20resources/IM_Forces.htm

<http://media.web.britannica.com/eb-media/36/62936-004-11EC1F98.gif>

<http://media.web.britannica.com/eb-media/38/62938-004-8BFC3D68.gif>

<http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/polymers/chem/chem.htm>

<http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/polymers/orient/orient.htm>

<http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/polymers/therm/tg.gif>

<http://reprap.org/wiki/ABS>

<http://static.makerwise.com/static/img/3d-printer/orig/543/ultimaker-ultimaker-2-08.jpg>

[http://web.itu.edu.tr/~dikicioglu/WEBMAL201/Mal201Atom-Duzlem\(1\).pdf](http://web.itu.edu.tr/~dikicioglu/WEBMAL201/Mal201Atom-Duzlem(1).pdf)

<http://web.mit.edu/nmf/research/phenomena/Demos.pdf>

<http://www.3ders.org/pricecompare/3dprinters/>

<http://www.aniwaa.com/product/3d-printers/exone-m-flex/>

<http://www.aplusplastics.com.au/images/injection%20moulding.jpg>

http://www.bayar.edu.tr/besergil/2_ticari_polimerler.pdf

http://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/ABS_and_Other_Specialist_Styrenics.aspx

http://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/rotational_moulding.aspx

<http://www.cmu.edu/gelfand/k12-teachers/polymers/natural-synthetic-polymers/>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

<http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>

<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>

<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/polymerbasics/images/branching-arrangements.gif>

http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/lom.cfm

<http://www.kuet.ac.bd/webportal/ppmv2/uploads/1409805385Polymer%20Processing.pdf>

<http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry#ch4>

<http://www.news.bbc.co.uk/2/hi/technology/3126625.stm>

<http://www.photopolymer.com/stereolithography.htm>

<http://www.polymerprocessing.com/polymers/PE.html>

<http://www.stratasys.com/materials/fdm>

<http://www.stratasys.com/materials/material-safety-data-sheets/fdm/support-materials>

<http://www.teppfa.eu/production-processes/>

http://www.westcoastgasket.com/transfer_molding.png

<https://all3dp.com/sla-3d-printing-is-in-an-arms-race-part-1/>

<https://all3dp.com/wp-content/uploads/2015/05/Ember-e1432042121695.jpg>

https://ember.autodesk.com/overview#tech_specs

https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Organic_polymers

https://en.wikipedia.org/wiki/Inorganic_polymer

https://thingiverse-production-new.s3.amazonaws.com/renders/be/dd/ba/e9/d8/PRUSA_i3_Front_preview_featured.jpg

<https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-2-plus/specifications>

https://www.nibib.nih.gov/sites/default/files/SMP_closeup.png

https://www.printspace3d.com/wp-content/uploads/2014/03/SelectiveLaserSintering_Illustration1.jpg

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Khemani, K. C., (1997), Polymeric foams: an overview, ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington.
- Klahn, C., Leutenecker, B., & Meboldt, M., (2015), Design strategies for the process of additive manufacturing, *Procedia CIRP*. 36, s.230-235.
- Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., & Froyen, L., (2003), Lasers and materials in selective laser sintering, *Assembly Automation*. 23(4), s.357-371.
- Lee S.T. ve Ramesh N.S., (2004), Polymeric Foams: Mechanisms and Materials, CRC Press, Londra.
- Lekakou, C., Johari, M. A. K., Norman, D., & Bader, M. G., (1996), Measurement techniques and effects on in-plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 27(5), s.401-408.
- Li, S., Lin, M. M., Toprak, M. S., Kim, D. K., & Muhammed, M., (2010), Nanocomposites of polymer and inorganic nanoparticles for optical and magnetic applications, *Nano reviews*. 1.
- Liang, J. Z., & Li, A., (2010), Inorganic particle size and content effects on tensile strength of polymer composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. Cilt.29 No.18, s.2744-2752.
- Masood, S. H., & Song, W. Q., (2004), Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling, *Materials & Design*. Vol.25 No.7, s.587-594.
- Nikzad, M., Masood, S. H., & Sbarski, I., (2011), Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling, *Materials & Design*. 32(6), s.3448-3456.
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S., (2015), Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Composites Part B: Engineering*. 80, s.369-378.
- Novakova-Marcincinova, L., & Novak-Marcincin, J., (2012), Testing of materials for rapid prototyping fused deposition modelling technology, *World Academy of Science, Engineering and Technology*. s.70.
- Oksman, K., (2001), High quality flax fibre composites manufactured by the resin transfer moulding process, *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*. 20(7), s.621-627.
- Ozcelik, B., Ozbay, A., & Demirbas, E., (2010), Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 37(9), s.1359-1365.
- Patterson, G., (2012), A Prehistory of Polymer Science, Springer, USA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Peacock, J., ve Calhoun, A., (2006), Polymer Chemistry Properties and Applications, Hanser Gardner Publications, Cincinnati.
- Perez, A. R. T., Roberson, D. A., & Wicker, R. B., (2014), Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials, *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 14(3), s.343-353.
- Raut, S., Jatti, V. S., Khedkar, N. K., & Singh, T. P., (2014), Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts, *Procedia Materials Science*. 6, s.1625-1630.
- Rauwendaal, C., (2013), Polymer Extrusion: 5th Edition, Hanser Publications, Cincinnati.
- Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E., (2003), Design of fused-deposition ABS components for stiffness and strength, *Journal of Mechanical Design*. 125(3), s.545-551.
- Sa'ude, N., Masood, S. H., Nikzad, M., Ibrahim, M., & Ibrahim, M. H. I., (2013), Dynamic mechanical properties of copper-ABS composite for FDM feedstock, *International Journal of Engineering Research and Application*. 3(3), s.257-1263.
- Sacak, M., (2012), Polimer Teknolojileri, Gazi Yayınevi, Ankara.
- Saçak, M., (1998), Polimer Kimyasına Giriş, A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, Ankara.
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S., (2012), Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement, *Journal of Advanced Research*. 3(1), s.81-90.
- Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., ... & Ozcan, S., (2014), Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing, *Composites Science and Technology*. 105, s.144-150.
- Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B., & Roberson, D. A., (2015), Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing, *Additive Manufacturing*. 6, s.16-29.
- Tymrak, B. M., Kreiger, M., & Pearce, J. M., (2014), Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, *Materials & Design*. 58, s. 242-246.
- Wu, C. C., Su, C. C., & Yang, C. F., (2015), Preparation, structure and properties of carbon nanotube reinforced polymer nanocomposites, *Synthetic Metals*. 205, s.98-105.
- Yetgin, S.H., Unal, H., (2008), Polimer esaslı köpük malzemeler, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 17, s.117-128.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Young, R. J. (1987), Introduction to Polymers, Chapman & Hall, United Kingdom.

Zhong, W., Li, F., Zhang, Z., Song, L., & Li, Z., (2001), Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling, Materials Science and Engineering: A. 301(2), s.125-130.

