

Biomaterials Used in Additive Manufacturing Technologies and Biomedical Applications

Esra ÖZMEN¹  Cem ERTEK^{2,*} 

¹Sivas Cumhuriyet University, Graduate School of Naturel and Applied Sciences, Department of Manufacturing Engineering, 58140, Merkez/SİVAS

²Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 58140, Merkez/SİVAS

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Review article
Received: 29.07.2022
Revision: 26.08.2022
Accepted: 1.09.2022

Highlights

- JSON.
- MongoDB.
- Location Services.

Keywords

Additive manufacturing technologies,
Biomaterials,
Biomedical applications

In this study, additive manufacturing technologies, the types of biomaterials used in the biomedical field, their basic properties and the properties that a good biomaterial should have, their advantages and disadvantages, their use in additive manufacturing techniques and the applications of additive manufacturing techniques in the biomedical field are summarized.

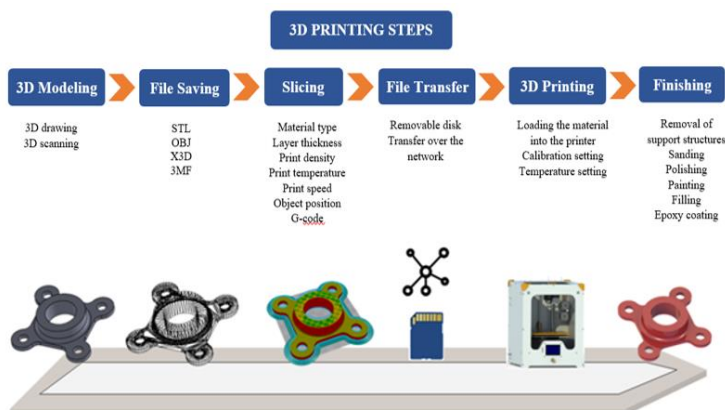


Figure A. Steps of the 3D printing (additive manufacturing) process [5]

Purpose: With the application of additive manufacturing techniques in the biomedical field, biomaterials have also become important for additive manufacturing techniques. Apart from metal and ceramic biomaterials, polymer and composite biomaterials, which have an increasing use in the biomedical field in recent years, have been used in additive manufacturing techniques in various studies. The aim of the article is to provide information about the additive manufacturing method and the studies on the production of long-lasting parts that are fully compatible with the body, do not have allergic and toxic properties, and can integrate with the tissue.

Results: In general, when the studies carried out until today are examined, it can be said that the use of additive manufacturing technologies in the biomedical field provides great advantages, the use of polymer materials is widespread and gives positive results, the properties that a good biomaterial should have are found in polymers, and the mechanical properties can be improved by using composite materials when necessary.

Conclusion: Work continues on the production of long-lasting parts that are fully compatible with the body, do not have allergic and toxic properties, and can integrate with the tissue. In the future, by using additive manufacturing techniques and different composite materials in the biomedical field, parts that are compatible with the body and have higher mechanical strength can be developed. It is foreseen that the use of polymer-ceramic composite materials will become widespread and will be the most used materials in the biomedical field.



Biomaterials Used in Additive Manufacturing Technologies and Biomedical Applications

Esra ÖZMEN¹ Cem ERTEK^{2,*}

¹Sivas Cumhuriyet University, Graduate School of Naturel and Applied Sciences, Department of Manufacturing Engineering, 58140, Merkez/SİVAS

²Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 58140, Merkez/SİVAS

Abstract

Additive manufacturing technologies are a technology that is widely used in many sectors today and enables the use of multiple materials in the manufacture of parts and it is also very important for biomedical applications. Additive manufacturing technologies have been highly preferred in the biomedical field in recent years due to offering personalized designs, it uses various biomaterials in applications such as implant and prosthesis manufacturing and the development of various medical devices.

In this study, additive manufacturing technologies are explained in general terms and information about biomaterials and the use of additive manufacturing in the biomedical field is presented.

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 29.07.2022
Düzeltilme: 26.08.2022
Kabul: 1.09.2022

Keywords

Additive manufacturing technologies,
Biomaterials,
Biomedical applications

Anahtar Kelimeler

Eklemele imalat teknolojileri,
Biyomalzemeler,
Biyomedikal uygulamalar

Eklemele İmalat Teknolojilerinde Kullanılan Biyomalzemeler ve Biyomedikal Uygulamaları

Öz

Eklemele imalat teknolojileri günümüzde birçok sektörde yaygın olarak yararlanılan, parça imalatında çoklu malzeme kullanımını mümkün kılan bir teknolojidir ve biyomedikal uygulamalar için de oldukça önemlidir. Eklemele imalat teknolojileri kişiye özel tasarımlar sunması nedeniyle son yıllarda biyomedikal alanında oldukça tercih edilmekte, implant ve protez imalatı, çeşitli tıbbi cihazların geliştirilmesi gibi uygulamalarda çeşitli biyomalzemeler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, eklemele imalat teknolojileri genel hatları ile açıklanmış, biyomalzemeler ve biyomedikal alanda eklemele imalatın kullanımı hakkında bilgi sunulmuştur.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemele imalat, ortaya çıkışı ile devrim niteliğinde bir teknoloji olmuştur. Tasarım esnekliği sunan bu teknoloji, kompleks parça imalatını mümkün kılmanın yanı sıra sürecin iyileştirilmesi, parça imalatı için gerekli olan sürenin kısaltılması, parça mukavemetinin artırılması gibi önemli avantajlar da sunmaktadır. Günümüzde çok sayıda eklemele imalat tekniği mevcuttur. Bu tekniklerin temel prensibi, malzemelerin katmanlar halinde serilerek işlenmesine dayanmaktadır. Teknikler, kullanılan malzemeler ve çalışma prensiplerinin farklı olmasıyla birbirlerinden ayrılmaktadır.

Eklemele imalat teknolojileri havacılık, otomotiv, savunma sanayinde ve tasarım esnekliği ve kişiye özel tasarımların gerçekleştirilebilmesini sağlaması nedeniyle biyomedikal alanda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan malzemelerin özellikleri nihai mamulün özelliklerini etkilemektedir. Bu teknolojide katmanların oluşumu, malzemenin ısı kaynağı tarafından bölgesel olarak ergitilmesiyle gerçekleştiğinden, genellikle kullanılacak olan malzemelerin termofiziksel özelliklerinin önemli olduğu söylenebilir [1]. Özellikle biyomedikal alanda kullanılacak olan malzemelerde termofiziksel özelliklerin yanında biyoyoumluluk, biyobozunurluk, mekanik ve kimyasal dayanım gibi özellikler de aranır.

Eklemeli imalat tekniklerinin biyomedikal alanda uygulanması ile beraber biyomalzemeler de eklemeli imalat teknikleri için önemli hale gelmiştir. Metal ve seramik biyomalzemelerin dışında, son yıllarda biyomedikal alanda gittikçe büyüyen bir kullanım alanına sahip olan polimer ve kompozit biyomalzemeler, çeşitli çalışmalarda eklemeli imalat tekniklerinde kullanılmıştır.

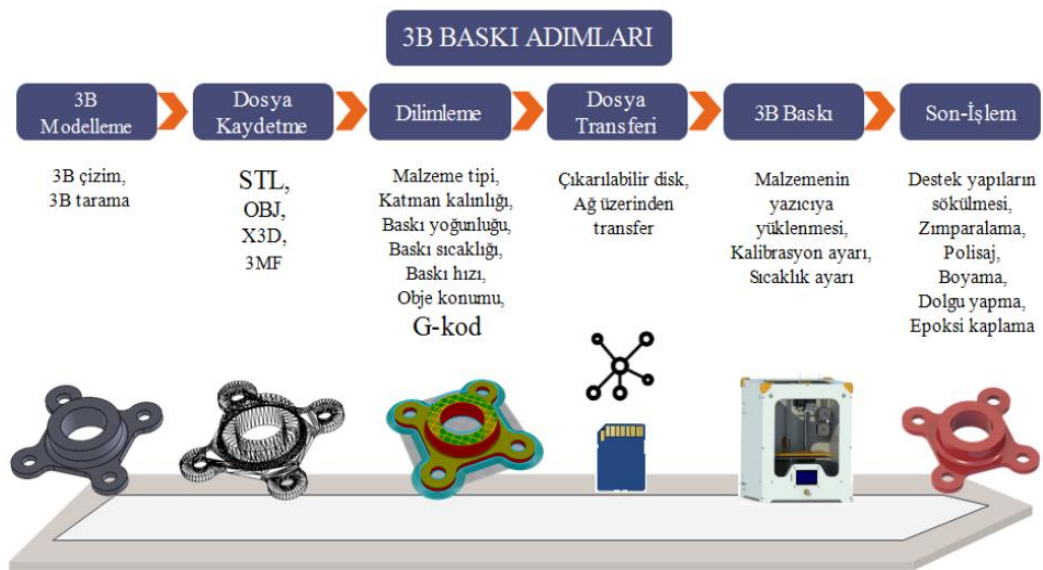
2. EKLEMELİ İMALAT (ADDITIVE MANUFACTURING)

Eklemeli imalat, yüksek tasarım özgürlüğü sunan, imalat sürecindeki ara işlemleri ortadan kaldırarak parça imalatına hız kazandıran ve bu özellikleri sayesinde geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak değil zorunluluk olarak ortaya çıkmış bir imalat yöntemidir. Eklemeli imalat teknolojisi, malzemelerin katman katman serilerek işlenmesi prensibine dayanır. Eklemeli imalat, bir CAD yazılımıyla tasarımdan nihai mamulün elde edilmesine kadar olan süreçleri içerir [2].

Eklemeli imalat, esnek ve hızlı tasarımlar, uygun maliyetli mamuller, dayanıklı ve hafif parçalar, kolay erişim ve daha birçok avantaj sunduğu için sadece prototiplerle sınırlı kalmayıp, gerçek parça imalatı için de kullanılmaktadır [3].

Devrim niteliğinde olan eklemeli imalat teknolojisi, montajı yapılacak parça sayısını ve kaynak gibi birleştirme işlemlerini azaltarak parça mukavemetinin artmasını sağlar. Ayrıca geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında atık malzeme sonucu oluşan israfı en düşük seviyeye indirir. Bu imalat tekniği ile imal edilen parçalar genellikle yüksek mukavemet ve darbe dayanımı, düşük yoğunluk gibi iyi mekanik özellikler sergiler [4].

Hat kurulumu ve kalıp gerektirmeyen 3B baskı (eklemeli imalat) prosesi altı temel adımdan oluşur. Bu adımlar Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. 3B baskı (eklemeli imalat) prosenin adımları [5]

Eklemeli imalat teknolojisi Amerikan Test ve Malzemeler Topluluğu (ASTM F42) tarafından 7 kategoride sınıflandırılmıştır:

1. Vat Fotopolimerizasyon (Vat Photopolimerization)
2. Bağlayıcı Jet (Binder Jetting)
3. Malzeme Jeti (Material Jetting)
4. Toz Yataklı Füzyon (Powder Bed Fusion)
5. Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)
6. Doğrudan Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition)
7. Levha Laminasyon (Sheet Lamination)

Sınıflandırmadaki her bir kategori, imalat tanımına uygun olarak çeşitli eklemeli imalat tekniklerini içermektedir. Yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat teknikleri Tablo 1’ de ait oldukları kategori, süreç tanımı ve temel özellikleri ile verilmiştir.

Tablo 1. Yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat teknikleri

Eİ TEKNİĞİ	3B BASKI KATEGORİSİ	SÜREÇ TANIMI	ÖZELLİKLER
SLA	Vat Fotopolimerizasyon	Sıvı haldeki fotopolimer reçinenin UV ışını ile kürlenmesi ile parça imalatı sağlanır.	-Yüksek çözünürlük ve detay -Yüksek baskı hızı -Yüksek maliyet
FDM	Malzeme Ekstrüzyonu	Nozul aracılığıyla dağıtılan malzemenin soğuyup katılaşması ile parça imalatı gerçekleştirilir.	-Düşük maliyet -Düşük çözünürlük -Düşük yüzey kalitesi -Çoklu malzeme kullanımı -Yüksek mukavemet
EBM	Toz Yataklı Füzyon	Bir elektron ışını tarafından metal tozların veya filamentlerin tamamen ergitilmesi ile parça imalatı gerçekleştirilir.	-Yüksek mukavemet -Düşük enerji tüketimi -Yüksek doğruluk ve detay
SLM		Toz malzemenin bir lazer ışını ile tamamen ergitilerek birleştirilmesi ile parça imalatı gerçekleştirilir.	
SLS		Toz malzemenin bir lazer ışını ile sinterlenerek birleştirilmesi ile parça imalatı gerçekleştirilir.	

Eklemeli imalat teknolojisinin uygulaması yaygındır ve kullanım kolaylığı nedeniyle büyük endüstriyel uygulamalar, onu yüksek potansiyelli bir imalat tekniği haline getirmektedir [2]. Günümüzde eklemeli imalat teknolojisi, havacılık ve otomotiv sanayi, savunma sanayi, sağlık endüstrisi, elektronik ve yapı sektörü gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir.

3. BİYOMALZEMELER (BIOMATERIALS)

Niteliklerinin artırılabilmesi amacıyla senelerdir tıp ve mühendislik alanında çalışmalara konu olan biyomalzemeler, vücudun zarar gören doku ve organlarının yitirdiği fonksiyonlarını yeniden sağlayabilmek amacıyla kullanılan, doğal veya sentetik maddelerden imal edilen malzemelerdir [6]. Bu malzemeler, mühendislerle birlikte çalışan cerrahların uygulama alanlarından, mühendislerin, kimyagerlerin ve fizikçilerin hakim olduğu bir alana doğru yol almıştır [7].

3.1. Biyomalzeme Çeşitleri (Types of Biomaterials)

Biyomalzemeler; metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere 4 ana kategoride incelenebilir. Bu kategorilerin avantajları ve dezavantajları Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. Biyomalzemelerin sınıflandırılması [8]

MALZEME TÜRÜ	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
METAL	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek dayanım - Yüksek gerilme direnci - Sert - Sünek 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek yoğunluk - Korozyona uğrayabilme
SERAMİK	<ul style="list-style-type: none"> - İyi biyouyumluluk - Korozyona dayanıklı - Bası kuvvetlerine dayanıklı 	<ul style="list-style-type: none"> - Esnek değildirler - Kırılabilirler - Gerilme dayanımları düşüktür - Fabrikasyon zorlukları vardır
POLİMER	<ul style="list-style-type: none"> - Esnekler - Düşük yoğunluk - Kolay fabrikasyon 	<ul style="list-style-type: none"> - Düşük dayanım - Zamanla deformasyona uğrayabilir
KOMPOZİT	<ul style="list-style-type: none"> - İnerttirler - Yüksek dayanım - İyi biyouyumluluk - Korozyona dayanıklı - Gerilme dirençleri yüksektir - İhtiyaca göre hazırlanabilir 	<ul style="list-style-type: none"> - Malzeme fabrikasyonu zordur

Metalik biyomalzemeler ya da diğer adıyla biyometaller, mükemmel elektriksel ve termal iletkenlikleri ve mekanik özellikleri nedeniyle biyomedikal alanında sıkça kullanılan malzemelerdendir. Metal ve metal alaşımları, sahip oldukları kristal yapılar ve güçlü metalik bağlar sayesinde üstün mekanik özellikler sergilediğinden biyomalzemeler içerisinde önemli bir yere sahiptirler [9]. Bazı metaller, mükemmel mekanik özellikleri ve korozyon dayanımları nedeniyle kemik plakaları ve vidalar, omurga sabitleme cihazları, diş implantları ve sert doku replasmanlarında kullanılır. Bununla birlikte bazı biyometallerin, çok

sert ve yüksek yoğunluğa sahip olmaları, düşük biyouyumlulukları, korozyona karşı dirençlerinin zayıf olması ve alerjik doku reaksiyonlarına sebep olabilmeleri gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır [10]. Örneğin korozyona karşı Ti oldukça dirençliken Mg zayıf bir dirence sahiptir ancak her iki metal de yüksek biyouyumluluk özelliği sunar.

Seramik biyomalzemeler, biyoinert (alumina, zirkonya) ve biyoaktif (hidroksiapatit, β -trikalsiyum fosfat, biyocamlar) seramikler olarak iki grup altında incelenebilir [11]. Biyoinert seramiklerde malzeme ile doku arasındaki etkileşim son derece yavaş olduğundan herhangi bir reaksiyon gerçekleşmemekte ve bu durumda malzeme yüksek ölçüde inertlik kazanmaktadır. Biyoinert seramikler dokularla etkileşimini mekanik bağ şeklinde gerçekleştirmektedir. Doku üzerinde olumsuz bir etki oluşturmayacak şekilde, kullanılan malzeme ile dokunun bir arada tutulması mekanik bağ ile sağlanır [12]. Biyoaktif seramikler kemikle etkileşime girdiğinde bağlanma gerçekleştirebilen seramiklerdir. Biyoaktif seramikler de genel olarak kalsiyum esaslı seramikler ve biyocamlar olarak iki kategoriye ayrılır [13]. Biyoaktif seramik malzemelerin biyoaktiviteleri yüksek olduğundan, doku hücrelerinin biyomalzeme içerisine doğru büyüme eğilimleri çok iyidir. Osseointegrasyon, biyouyumluluk ve korozyon dayanımı biyoaktif seramik malzemelerin sağladığı en önemli avantajlardır. Ancak, tokluk ve sünekliklerinin düşük, sertlik ve kırılgenliklerinin yüksek olması da önemli bir dezavantajdır.

Polimerler, çok büyük moleküllerden veya tekrar eden birçok alt birimden oluşan makromoleküllerden oluşan malzemelerdir. Biyopolimerler, tüm organizmaların büyüme döngüleri sırasında doğada oluşan polimerlerdir; bu nedenle doğal polimerler olarak da adlandırılırlar [14]. Polimerler, çok çeşitli mekanik, termal, elektriksel ve biyouyum özelliklerinden dolayı farklı uygulamalarda öne çıkan malzemelerdendir [15]. Özellikle son yıllarda tıbbi uygulamalar için kullanılan malzemeler arasında en çok öne çıkan grup polimerlerdir. Bu durumun nedeni polimerlerin sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek biyoinert ve elastik özellikler, sergiledikleri iyi biyouyumluluk, kolay fabrikasyon ve sundukları düşük maliyet avantajlarıdır. Fiziksel yapı olarak vücutta bulunan yumuşak dokulara benzerlik gösteren polimerler, vücudun kıkırdak, cilt ve damar gibi özel dokuya sahip bölgelerinde protez malzemesi olarak kullanılabilirler. Ancak, ortopedik alanda kullanıldıklarında düşük mekanik dayanım sergilemekte ve sterilizasyon işlemi gerçekleştirilirken polimer özellikleri etkilenmektedir [16]. Buna rağmen bu alanda yüksek potansiyele sahip malzemeler olduğu söylenebilir. Biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan polimerlere örnek olarak ABS, PCL, PLA, PLGA, PGA ve PEEK polimerleri verilebilir.

Kompozitler, belirgin şekilde farklı fizikokimyasal özelliklere sahip iki ya da daha fazla malzeme veya fazdan oluşan ve özellikleri, bu malzemelerin özelliklerinin bir karışımı olan malzemelerdir [17]. Bu malzemelerin avantajı, bileşenlerin özellikleri ile kıyaslandığında önemli ölçüde değiştirilebiliyor olması ve ihtiyaç duyulan nitelikte oluşturulabilmesidir [18]. Kompozit malzemeler hazırlanırken, matris adı verilen bir malzeme içerisine çeşitli güçlendirici malzemeler eklenir [19]. Kompozit malzemelerin yüksek dayanımı ve düşük elastisite modülü, özellikle ortopedik uygulamalar için tercih edilmesini sağlamaktadır. İmplantlarda kullanılan kompozit malzemelerin, vücutta kullanılacağı alana uygun olarak, mekanik ve fizyolojik koşullara kolay uyum sağlayabilmesi için bileşimleri değiştirilebilir [20]. Korozyona direnç, metal yorgunluğunun ve kırılgenliğin azalması da kompozitlerin sağladığı diğer avantajlardır. Kompozitler, yumuşak doku implantlarında, ortopedi ve diş hekimliği uygulamalarında kullanılırlar [19].

3.2. Biyomalzeme Seçimi (Choosing Biomaterials)

Biyomalzemelerde bulunması oldukça önemli olan özellikler biyouyumluluk, biyobozunurluk, biyoaktivite ve osseointegrasyondur. Biyomalzemelerde bulunması istenen diğer temel özellikler ise mekanik ve kimyasal dayanımdır.

Biyoyumluluk, bir biyomalzemedeki dikkate alınması gereken en önemli özelliktir. Malzemenin vücudun mekanik davranışına ve vücut dokularına sağladığı fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak optimum uyumunu ifade eder [12]. Ayrıca biyouyumluluk, malzemenin belirli uygulamada uygun bir konakçı tepkisi ile kullanılabilme yeteneği olarak da tanımlanabilir [11]. Biyouyumluluk terimi, bazı araştırmacılar tarafından bir biyomalzemenin yüzey ve yapısal uyumluluğu olarak ikiye ayrılmış ve bu şekilde tanımlanmıştır. Yüzey uyumluluğu, bir biyomalzemenin vücut dokularına fiziksel, kimyasal ve biyolojik

olarak sağladığı uyum olarak tanımlanırken yapısal uyumluluk ise malzemenin vücut dokularının mekanik davranışına sağladığı uyumdur [10].

Biyobozunurluk, biyomalzemenin vücut içerisinde belirli bir süre içerisinde doğal olarak parçalanmasıdır. Biyobozunur malzemeler zaman içerisinde biyolojik olarak bozunarak doku ile yer değiştirir. Özellikle ortopedik implant imalatında dikkate alınması gereken bir özelliktir.

Biyoaktivite, biyomalzemenin canlı doku ile ara yüzeyinde kuvvetli fiziksel bağ oluşturması ve bu sayede dokuya bağlanmasıdır. Biyoaktif malzemeler, doku ile malzeme arasında meydana gelen biyolojik tepkime sonucunda olumlu etkileşim ve birleşme sağlamalıdır. Ayrıca etkileşim içerisinde olduğu dokuyu iyileştirmeli ve yitirilmiş organ işlevlerini yerine getirmek amacıyla biyoaktif molekül salınımı gerçekleştirmelidir [6].

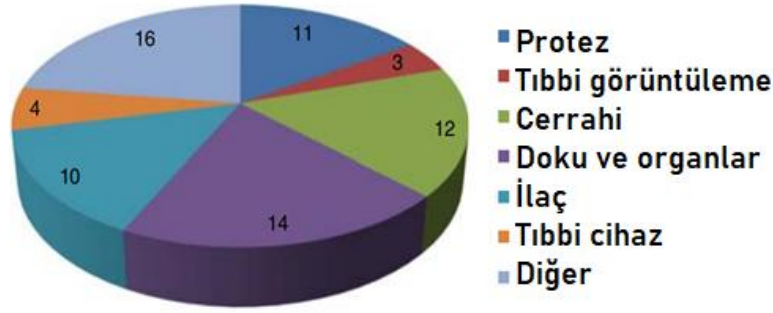
Osseointegrasyon, kemik dokusu ile implant yüzeyinde yapısal ve fonksiyonel bir bağlantının oluşması olarak tanımlanabilir. İmplantın vücut içerisine yerleştirilmesinden sonra implantı çevreleyen kemikler implantın yüzeyini kaplar ve bu şekilde implantın kemiğe tutunması sağlanmış olur. Duran veya hareket halinde olan insan bedeninde implantın ağırlık yüklenmelerine ve kas kasılmalarına vereceği yanıt aynı zamanda implantın osseointegrasyon kapasitesini de etkileyecektir [21]. Osseointegrasyonun başarılı bir şekilde sağlanmasında cerrahi yöntem ve implant tasarımı önemli rol oynamaktadır. Dolayısıyla implant tasarımına etki eden faktörler de osseointegrasyon için oldukça önemlidir. Özellikle kullanılan implantın düz bir yapıdan ziyade gözenekli yapıda olması, besin takviyesini, hücrelerin göçünü, osteoblastların çoğalmasını ve iskele hücre yapışmasını sağladığından osseointegrasyonu artırmaktadır. Osseointegrasyonun gerçekleşmediği durumlarda ise implantın kemiğe tutunması başarısız olmaktadır.

Gün içerisinde gerçekleştirilen aktiviteler sırasında kemikler farklı gerilmelere maruz kalmaktadır. Ayrıca, hareket halindeyken ortopedik malzemeler de çok sayıda yüklemeye maruz kaldıkları için kullanılan biyomalzemelerin mekanik dayanımları ve yorulma dayanımları oldukça önem taşımaktadır [22]. Biyomalzemelerin genel mekanik özellikleri, çekme ve basma mukavemetleri, akma mukavemeti, elastik modülü, sertlik ve işlenebilirlik miktarıdır. Kullanılan biyomalzemenin mekanik etkilerden dolayı zarar görmesi, malzemenin biyomekanik olarak uygun olmadığını gösterir. Bu şekilde istenmeyen etkilerin oluşmaması için kullanılan biyomalzeme ile temas halindeki kemik dokusunun mekanik özelliklerinin birbirlerine oldukça yakın olması gerekmektedir. Mekanik özelliklerden biri olan elastik modülü değerleri arasında büyük fark olması durumunda gerilme kalkanı etkisi ortaya çıkar ve biyomalzeme ile kemiğin bütünleşmesi gerçekleşemez [6]. Gerilme kalkanı etkisi implant tasarımındaki önemli problemlerden biridir ve implantasyon işleminden sonra revizyon ameliyatlarına ihtiyaç duyulmasına neden olur [23].

Biyomalzeme seçimini etkileyen bir diğer özellik de malzemenin korozyona karşı gösterdiği dayanımdır. Malzeme bilimi alanında, biyomalzemelerin akut kalp hastalıkları, artrit, osteoporoz ve diğer eklem komplikasyonlarından mustarip insanların hayatta kalması için gerekli olması nedeniyle biyomalzemelerin korozyonu büyük önem taşımaktadır [24]. Korozyon, metal veya alaşımlarının buldukları ortam ile aralarında kimyasal bir tepkime gerçekleşmesi sonucu bozunması ve özelliklerini kaybetmesi olarak tanımlanabilir. İnsan vücudu biyometaller için oldukça korozif bir ortamdır [10]. Bu nedenle insan vücudunda korozyon dayanımı iyi olmayan bir malzeme kullanılması, malzemenin zayıflaması ve korozyon ürünlerinin hücrelere zarar vermesi ile sonuçlanır.

4. EKLEMELİ İMALAT TEKNİKLERİNİN BİYOMEDİKAL ALANDAKİ UYGULAMALARI (APPLICATIONS OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNIQUES IN THE BIOMEDICAL FIELD)

Prototip hazırlama amacı ile imalat sektörüne giriş yapan eklemeli imalat teknolojisi, karmaşık şekilli parçaların imalatını mümkün kılma, kişiye özel tasarım ve sağlık masraflarını düşürme fırsatı sunması ile tıbbi sektöre de girmiştir. Günümüzde bu teknoloji, protez ve implantların, medikal cihazların ve teşhis cihazlarının imalatında önemli bir yere sahiptir. Daha iyi malzeme özellikleri, daha yüksek parça kalitesi, boyutsal doğruluk ve imalat maliyetinde yapılan nispi iyileştirmelerle sektörün ihtiyaç duyduğu karmaşık şekilli parçaların imalatı mümkün hale geldiğinden, eklemeli imalat teknolojisinin medikal alanda kullanımı ivme kazanmıştır [25].



Şekil 2. 3D baskı ile sağlık sektörünün farklı alanlarında yapılan uygulamalar [26]

Eklemeli imalat teknolojisi sayesinde, implantların imalat süresi geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında önemli ölçüde azaltılabilir. Ayrıca implantlar, kişinin anatomisine bağlı olarak da imal edilebildiğinden kişiye daha iyi uyum sağlayarak seri olarak imal edilen implantlardaki yaygın hata ve buna bağlı olarak ortaya çıkan başarısızlık olasılığını azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, 3D baskı teknolojileri, biyomimetik yapıya sahip nesnelere elde etmek için oldukça uygundur. Çok karmaşık ve özel parçaların düşük maliyetli olarak imal edilebilmesi eklemeli imalatın medikal alandaki en önemli avantajıdır [27].

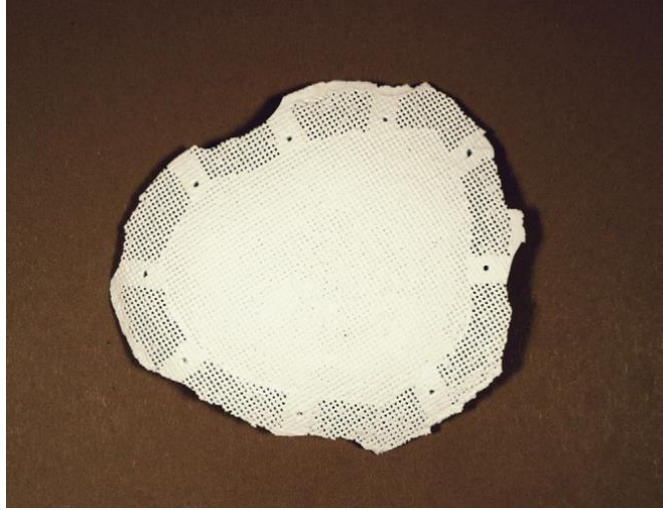
Eklemeli imalatın ortopedik ve dental implantlarda uygulanma, karmaşık geometriler ve yapılar elde edebilme, daha etkili kemik entegrasyonu için pürüzlü yüzeyler oluşturma ve implantların her hastanın bireysel ihtiyaçlarına uyacak şekilde kişiselleştirilmesine izin verme yeteneğinden önemli ölçüde yararlanır [28].

Eklemeli imalat teknolojileri ile medikal sektörde birçok alaşım türü elde edilebilmektedir. Çelik türleri (316L, 17-4PH), kobalt-krom bazlı alaşımlar (Co-Cr/Co-Cr-Mo), saf titanyum ve alaşımları (Ti6Al4V, CPTi) ve alüminyum alaşımları (AlSi10Mg) gibi biyometaller başarılı bir şekilde imal edilmiş ve medikal implant pazarında yerlerini almışlardır [29]. Doku mühendisliği çalışmaları doğrultusunda gerçekleştirilen 3B kemik iskelesi tasarımlarında Ca, Mg ve Fe öne çıkmaktadır. Ti ise gözenekli iskelelerde kemik rejenerasyonunun gerçekleşmesi amacıyla kullanılmıştır [30].



Şekil 3. CoCrMo alaşımının dental alandaki uygulaması [31]

Seramik biyomalzemeler implantların biyouyumluluğunu artırmak için metalik biyomalzemelere alternatif olarak geliştirilmiş ve eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılmıştır. Bununla beraber Ma vd. [32] tümör tedavisi ve kemik dokusu onarımında kullanılmak üzere 3B baskılı biyoseramik iskeleler imal etmiş ve kemik kusurlarının onarılmasında büyük potansiyele sahip olduğunu göstermişlerdir.



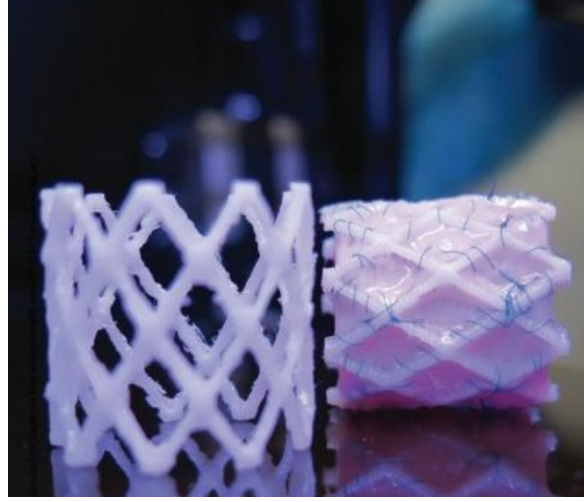
Şekil 4. *Kraniyofasiyal kemik kusuru için tasarlanmış HA implant [33]*

Kompozit malzemeler, ortopedik ve dental uygulamalarda sergilemiş oldukları yüksek dayanım ve yapısal uyumluluktan dolayı tercih edilmektedir. Jiao vd. [34], FDM yöntemi ile HA/PCL kompozit malzemesini kullanarak doku mühendisliği iskeleleri imal etmişlerdir. Çalışmada mekanik ve yapısal özellikler analiz edilmiş ve sonuçta HA/PCL kompozitinin eklemeli imalat tekniği ile kemik doku mühendisliği için potansiyel uygulamaya sahip olduğu belirtilmiştir.



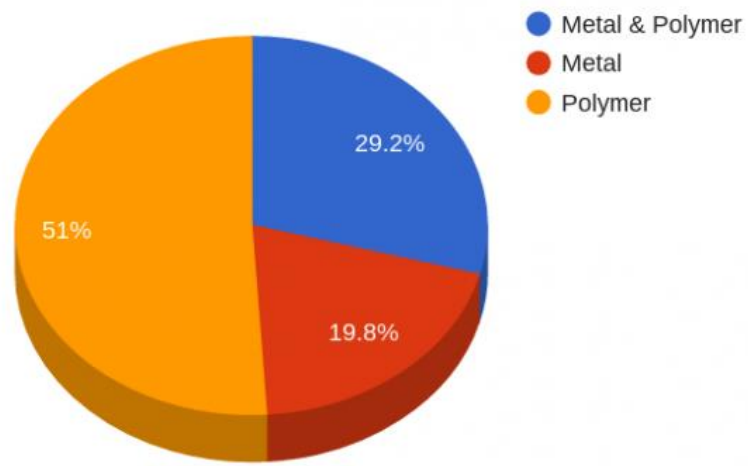
Şekil 5. *Biyoemilebilir polimer/hidroksiapatit hibrit malzemeli PEEK implantı [35]*

Polimer malzemeler için de geniş bir uygulama alanı sunan eklemeli imalat yöntemleri ile işitme cihazı ve kalp stentleri başta olmak üzere protez ve implant imalatı, kemik iskelelerinin geliştirilmesi gibi birçok uygulamada polimer malzemeler kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6. 3B yazıcı ile imal edilen polimer stent [36]

2016 Wohler Raporu'nda da eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan malzeme çeşitlerinin içerisinde polimer malzemelerin öne çıktığı görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 7. 3D baskı teknolojilerinde kullanılan malzeme çeşitlerinin oranları [37]

Tablo 3. Medikal alanda polimer malzemelerle birlikte yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat teknikleri ve özellikleri [38]

Eİ TEKNİĞİ	MALZEMELER	SINIRLAMALAR	FAYDALAR
FDM	ABS Nylon PC PCL PLA PLLA PLGA PET-G TPC TPS	<ul style="list-style-type: none"> - Biyomedikal alanda kullanılan sınırlı malzeme seçimi - Daha kısa kullanım ömrü ve zayıf mekanik özellikler - Basılı nesnelerin düşük yüzey kalitesi - Biyomedikal implantlarda tercih edilmez. 	<ul style="list-style-type: none"> - Çeşitli geometriler - Karmaşık yapılar ve şekil - Hazır filamentler - Uygun maliyet
SLA	PCL PEGDA PDL PDLLA PPF	<ul style="list-style-type: none"> - Sınırlı sayıda malzeme (foto-çapraz bağlanabilir bir malzemenin gerekliliği) - Sınırlı sayıda potansiyel malzeme (fotopolimerizasyon sırasında toksik maddeler) 	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek boyutsal doğruluk - Karmaşık ayrıntılar - Pürüzsüz yüzey
SLS	PCL PEEK PVA PLGA PDLLA PCL/HA PEEK/HA	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek sıcaklıklı enerji kaynağı kullanma - Pahalı teknik - SLS cihazının büyük boyutu - Toz mikroyapısına ve lazerin nokta boyutuna bağlı çözünürlük 	<ul style="list-style-type: none"> - Hızlı proses - Büyük boyutta ve karmaşık parçaların imalatı - Malzeme çok yönlülüğü - Tek bir üretim sürecinde üretilen küçük seriler - Yüksek parça doğruluğu

Biyomedikal alanda eklemeli imalat teknolojisi ile polimer malzemeler kullanılarak yapılan ve olumlu sonuçlar veren çalışmalar mevcuttur.

Hutmacher vd. [39], çalışmalarında PCL kullanarak FDM yöntemi ile elde ettikleri yapı iskelelerini incelemiştir. PCL termoplastik işleme için uygun özelliklerinden dolayı seçilen bir polimerdir. Çalışmada gözenekli ve biyolojik malzeme olarak rezorbe edilebilen 3D yapı iskeleleri imal edilmiştir.

Çalışma sonucunda iskelelerin iyi mekanik özellikler sergilediği ve insan fibroblast ve periosteal hücre kültürü sistemleri ile mükemmel biyouyumluluk gösterdiği görülmüştür.

Geven vd. [40], orbit tabanı rekonstrüksiyonu için hastaya özel implantların sanal modellerinin oluşturulması için bir çalışma yapmışlardır. Sanal modeller, beş klinik vakanın klinik bilgisayarlı tomografi görüntüleri kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada yüksek çözünürlüklü bir eklemeli imalat tekniği olan stereolitografi (SLA) kullanılmış ve kompozit implantlar imal etmek amaçlanmıştır. Bu nedenle biyolojik olarak rezorbe edilebilir, fotokürlenebilir poli(trimetilen karbonat) oligomerlerden ve osteoindüktif nano-hidroksiapatitten reçineler hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda, hazırlanan kompozit reçineler kullanılarak hastaya özel, homojen ve mekanik olarak stabil implantlar hazırlanabileceği ve stereolitografi tekniğinin homojen kompozitlerin imalatına izin verdiği belirtilmiştir.

Özsoy ve Kayacan [41], çalışmalarında FDM yöntemi ile biyomedikal alanda yaygın olarak kullanılan PLA malzemesi kullanmış ve kişiye özel hafifletilmiş kafatası implantının prototip imalatını gerçekleştirmişlerdir. Arı peteği mimarisinden yararlanarak hem hafif bir tasarım oluşturmuş hem de malzemedeki tasarruf sağlanan bir implant elde etmişlerdir. Buna bağlı olarak da implantın kullanılabilirliğinin ve tercih edilebilirliğinin çok olması beklenmektedir.

Bahsedilen çalışmalar bu alanda yapılan araştırmaların yalnızca birkaçıdır. Benzer şekilde polimer malzemeler ve eklemeli imalat teknikleri kullanılarak biyomedikal alanda oldukça başarılı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırmalarda herhangi bir uyumsuzluk ya da zararlı bir oluşum gözlenmemiştir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada eklemeli imalat teknolojileri, biyomedikal alanda kullanılan biyomalzemelerin çeşitleri, temel özellikleri ve iyi bir biyomalzemenin taşınması gereken özellikler, avantajları ve dezavantajları, eklemeli imalat tekniklerinde kullanımları ve eklemeli imalat tekniklerinin biyomedikal alandaki uygulamaları özetlenmiştir. Vücutla tamamen uyumlu, alerjik ve toksik özellik taşımayan, doku ile bütünleşebilen uzun ömürlü parçaların imal edilmesi ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Genel olarak günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde eklemeli imalat teknolojilerinin biyomedikal alanda kullanımının oldukça büyük avantajlar sağladığı, polimer malzeme kullanımının yaygınlaştığı ve olumlu sonuçlar verdiği, iyi bir biyomalzemenin taşınması gereken özelliklerin polimerlerde bulunduğu ve gerektiğinde mekanik özelliklerin kompozit malzemeler kullanılarak iyileştirilebileceği söylenebilir.

Gelecekte biyomedikal alanda eklemeli imalat teknikleri ile farklı kompozit malzemeler kullanılarak hem vücuda olumsuz etkisi olmayan ve uyumlu hem de mekanik dayanımı daha yüksek parçalar geliştirilebilir. Özellikle polimer-seramik kompozit malzemelerin, kullanımının yaygınlaşacağı ve biyomedikal alanda en çok kullanılan malzemeler olacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Özsolak O., “Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler”, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1): 9-14, (2019).
- [2] Kawalkar R., Dubey H. K., Lokhande, S. P., “A review for advancements in standardization for additive manufacturing”, *Materials Today: Proceedings*, 50:1983-1990, (2021).
- [3] Bhatia A., Sehgal A. K., “Additive manufacturing materials, methods and applications: A review”, *Materials Today: Proceedings*, 1-8, (2021).
- [4] Bozkurt Y., Özkan H. G., Karayel E., “Eklemeli imalat teknolojilerinin tıbbi ekipmanların üretiminde kullanımı”, *El-Cezeri*, 8(2): 962-980, (2021).
- [5] Sürmen H. K., “Eklemeli imalat (3B Baskı): Teknolojiler ve uygulamalar”, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(2): 373-392, (2019).

- [6] Yılmaz Y., Avcı B., Demirören H., “Biyomalzeme sektöründe kullanılan titanyum ve alaşımları”, *Fourth International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences*, 4: 357-362, (2019).
- [7] Ratner B. D., Zhang G., “A history of biomaterials”, *Biomaterials science: An Introduction to Materials in Medicine*, Elsevier, (2020).
- [8] Kayacan M. C., Delikanlı Y. E., Duman B., Özsoy K., “Ti6Al4V toz alaşımı kullanılarak SLS ile üretilen geçişli (değişken) gözenekli numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1): 127-143, (2018).
- [9] Gür A. K., Taşkın M., “Metalik biyomalzemeler ve biyoyum”, *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 2(2): 106-113, (2004).
- [10] Pasinli A., “Biyomedikal uygulamalarda kullanılan biyomalzemeler”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(4): 25-34, (2004).
- [11] Güner A. T., Meran C., “Ortopedik implantlarda kullanılan biyomalzemeler”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1): 54-67, (2019).
- [12] Çırak Z. D., Yakıncı D. B., “Tıbbi uygulamalarda kullanılan biyoyumlu biyomalzemeler”, *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi*, 8(2): 515-526, (2020).
- [13] Mahyudin F., Widhiyanto L., Hermawan H., “Biomaterials in orthopaedics”, In *Biomaterials and Medical Devices*. Springer, Cham, (2016).
- [14] Chandra R., Rustgi R., “Biodegradable polymers”, *Progress In Polymer Science*, 23(7): 1273-1335, (1998).
- [15] Kafle A., Luis E., Silwal R., Pan H. M., Shrestha P. L., Bastola A. K., “3D/4D Printing of polymers: Fused deposition modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA)”, *Polymers*, 13(18): 1-37, (2021).
- [16] Vroman I., & Tighzert L., “Biodegradable polymers”, *Materials*, 2(2): 307-344, (2009).
- [17] https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=bb68wb0R_EAC&oi=fnd&pg=PA1&ots=TD4I6xIIKO&sig=QoStvh-gi10Cw6P0r6igFRMWkOw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [18] Turan M., “Seramik oksit katkılı nano sentetik hidroksiapatit kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2020).
- [19] Özkan A., Şişik N., Öztürk U., “Kompozit malzemelerin ağız, yüz, çene cerrahisinde kullanımı ve malzeme uygunluklarının belirlenmesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1): 227-242, (2016).
- [20] <https://www.frmtr.com/biyoloji/1002705-biyomalzeme-bilimi.html>
- [21] Köse N., “Biyomalzemeler ve implantlara biyolojik yanıt”, *Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği*, (2013).
- [22] Güven Ş., “Biyoyumluluk ve biyomalzemelerin seçimi”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(3): 303-311, (2014).

- [23] Murat F., Korkmaz İ.H., Şensoy A. T., Kaymaz İ., “Functionally graded porous implants obtained by additive manufacturing”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(3): 540-553, (2019).
- [24] Manivasagam G., Dhinasekaran D., Rajamanickam A., “Biomedical implants: corrosion and its prevention-a review”, *Recent Patents on Corrosion Science*, 2: 40-54, (2010).
- [25] Yalçın B., Ergene B., “Endüstride yeni eğilim olan 3-d eklemeli imalat yöntemi ve metalürjisi”, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3): 65-88, (2017).
- [26] Ramola M., Yadav V., Jain R., “On the adoption of additive manufacturing in healthcare: a literature review”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, (2019).
- [27] Özer G., “Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1): 606-621, (2020).
- [28] Guo N., Leu M. C., “Additive manufacturing: technology, applications and research needs”, *Frontiers Of Mechanical Engineering*, 8(3): 215-243, (2013).
- [29] Aygül E., Yalçınkay, S., Şahin Y., “Biyomedikal uygulamalarda kullanılan Co-Cr-W ve Co-Cr-Mo metal alaşımlarının eklemeli imalat yöntemi ile üretilmesi”, *Mühendislik ve Multidisipliner Yaklaşımlar*, 30-41, (2019).
- [30] Top N., Gökçe H., “Doku mühendisliğinde bilgisayar destekli yapay kemik iskelesi tasarımı”, Ed: İsmail Şahin, *İksad Yayınevi*, Ankara, (2020).
- [31] Koç E., Yılmaz F., “Biyomedikal Parçaların Eklemeli İmalatla (3D Baskı) Üretimi”, *UBİCTÜS*, (2016).
- [32] Ma H., Feng C., Chang J., Wu C., “3D-printed bioceramic scaffolds: From bone tissue engineering to tumor therapy”, *Acta Biomaterialia*, 79: 37-59, (2018).
- [33] Brie J., Chartier T., Chaput C., Delage C., Pradeau B., Caire F., Moreau J. J., “A new custom made bioceramic implant for the repair of large and complex craniofacial bone defects”, *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 41(5): 403-407, (2013).
- [34] Jiao Z., Luo B., Xiang S., Ma H., Yu Y., Yang W., “3D printing of HA/PCL composite tissue engineering scaffolds”, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2(4): 196-202, (2019).
- [35] Gibbs D. M., Vaezi M., Yang S., Oreffo R. O., “Hope versus hype: what can additive manufacturing realistically offer trauma and orthopedic surgery?”, *Regenerative Medicine*, 9(4): 535-549, (2014).
- [36] Cabrera M. S., Sanders B., Goor O. J., Driessen-Mol A., Oomens C. W., Baaijens F. P., “Computationally designed 3D printed self-expandable polymer stents with biodegradation capacity for minimally invasive heart valve implantation: A proof-of-concept study”, *3D printing and Additive Manufacturing*, 4(1): 19-29, (2017).
- [37] <https://gfxspeak.com/2017/04/04/wohlers-printing-industry/>
- [38] Szymczyk-Ziółkowska P., Łabowska M. B., Detyna J., Michalak I., Gruber P., “A review of fabrication polymer scaffolds for biomedical applications using additive manufacturing techniques”, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 40(2): 624-638, (2020).

- [39] Hutmacher D. W., Schantz T., Zein I., Ng K. W., Teoh S. H., Tan K. C., “Mechanical properties and cell cultural response of polycaprolactone scaffolds designed and fabricated via fused deposition modeling”, *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 55(2): 203-216, (2001).
- [40] Geven M. A., Varjas V., Kamer L., Wang X., Peng J., Eglin D., Grijpma D. W., “Fabrication of patient specific composite orbital floor implants by stereolithography”, *Polymers For Advanced Technologies*, 26(12): 1433-1438, (2015).
- [41] Özsoy K., Kayacan M. C., “Ergiyik biriktirme yöntemiyle hafifletilmiş kişiye özel kafatası implantın hızlı prototiplenmesi”, *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 1(1): 1-11, (2018).