



### 3 Boyutlu Baskı Teknolojilerinin Ortotik ve Protetik Rehabilitasyona Katkıları Contributions of 3D Printing Technologies to Prosthetics and Orthotics Rehabilitation

Serap ALSANCAK<sup>1</sup> , Ahmet Gökhan ACAR<sup>1\*</sup> , Ali Koray ÖZGÜN<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Ankara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Ortez ve Protez Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi	ÖZ
<i>Geliş Tarihi:</i> 12.12.2023	Bu çalışma, 3 boyutlu (3B) baskı teknolojisinin ortez ve protez üretimindeki etkisini incelemekte ve değerlendirmektedir. Geleneksel üretim yöntemlerinin alternatifi olabilecek bu teknoloji, özellikle fonksiyonunu kaybetmiş veya eksik uzuvlara sahip bireyler için özelleştirilmiş ve uygun maliyetli yardımcı ürünlerin üretimini mümkün kılmaktadır. Makale, 3B baskı teknolojisinin temel prensiplerini, kullanılan malzemeleri ve üretim yöntemlerini ayrıntılı olarak açıklamaktadır. Ayrıca, 3B baskıyla üretilen ortez ve protezlerin rehabilitasyon süreçlerine katkılarını ve kullanıcılar üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Çalışmada, 3B baskı teknolojisinin sağladığı hızlı üretim süreci ve uygun maliyet avantajları vurgulanmaktadır. Özellikle, hastalara özel tasarımların kolayca yapılabilmesi ve üretilmesi, rehabilitasyon süreçlerinde önemli bir ilerleme sağlamaktadır. Üretilen ortez ve protezlerin vücut yüzeyine tam uyum sağlaması, kullanıcıların konforunu ve işlevselliğini artırmaktadır. Ayrıca, 3B baskı teknolojisinin geleneksel üretim yöntemlerine göre daha az zaman ve kaynak kullanarak daha iyi sonuçlar elde etmeyi mümkün kıldığına dikkat çekilmektedir. Çeşitli araştırma ve uygulama örnekleri üzerinden yapılan değerlendirmeler, 3B baskı teknolojisinin mevcutta birçok ortez ve protez ile alakalı alanda kullanıldığını ortaya koymaktadır. Bu noktadan hareketle ortez ve protez alanında gelecekte daha da yaygınlaşacağını ve geleneksel üretim yöntemlerine alternatif bir çözüm olacağını göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, 3B baskı teknolojisinin temel prensiplerine değinerek ortez ve protez üretimindeki önemli potansiyelini vurgulamaktadır. Ortez ve protez alanındaki güncel çalışmaları ortaya koymakta ve 3B baskı yönteminin önemini vurgulamaktadır ve bu alandaki araştırma ve uygulamaları teşvik etmektedir.
<i>Kabul Tarihi:</i> 29.06.2024	

**Anahtar Kelimeler:** 3 boyutlu baskı, ortez, protez, rehabilitasyon

Article Information	ABSTRACT
<i>Received:</i> 12.12.2023	This study examines and evaluates the impact of 3-dimensional (3D) printing technology on orthosis and prosthesis production. This technology, which replaces traditional production methods, makes it possible to produce customized and cost-effective assistive products, especially for individuals with impaired function or missing limbs. The article explains in detail the basic principles of 3D printing technology, the materials used and production methods. It also discusses the contributions of orthoses and prostheses produced by 3D printing to rehabilitation processes and their effects on users. The study emphasizes the rapid production process and cost-effective advantages provided by 3D printing technology. In particular, the ability to easily create and produce patient-specific designs provides significant progress in rehabilitation processes. The fact that the orthoses and prostheses produced fully adapt to the body surface increases the comfort and functionality of the users. It is also noted that 3D printing technology makes it possible to obtain better results by using less time and resources compared to traditional production methods. Evaluations made through various research and application examples reveal that 3D printing technology is currently used in many orthotics and prosthesis-related areas. From this point of view, it shows that it will become more widespread in the field of orthoses and prosthetics in the future and will be an alternative solution to traditional production methods. In conclusion, this study touches on the basic principles of 3D printing technology and highlights its significant potential in the production of orthoses and prostheses. It reveals current studies in the field of orthotics and prosthetics, emphasizes the importance of the 3D printing method and encourages research and applications in this field.
<i>Accepted:</i> 29.06.2024	

**Keywords:** 3D printing, orthosis, prosthesis, rehabilitation

doi: 10.46971/ausbid.1399730

Derleme (Review)

**Atf vermek için/To cite:** Alsancak, S., Acar, A. G., & Özgün, A. K. (2024). 3 Boyutlu baskı teknolojilerinin ortotik ve protetik rehabilitasyona katkıları. *Ankara Sağlık Bilimleri Dergisi*, 13(1), 41-54. <https://doi.org/10.46971/ausbid.1399730>

\* **Corresponding Author/Sorumlu yazar:** Ahmet Gökhan Acar, [agacar@ankara.edu.tr](mailto:agacar@ankara.edu.tr)

## Giriş

Eksik ekstremitelerin yerini alan ve onların işlevlerini taklit eden protezler ile fonksiyonunu yitiren ya da dizilimi, şekli bozulan ekstremiteler veya bu bölüme komşu vücut bölümlerini tedavi sürecinde korumak, stabilizasyonunu sağlamak, ağrıyı azaltmak, zayıf kasları desteklemek ve işlevini kaybedenlere hareket kazandırmak için hastaya özel oluşturulan ortezler kullanılmaktadır. Ortez ve protezlerin yapım amacına ulaşabilmesi için kişiye özel olarak uygulanıp; kişinin durumu, anatomik yapısı, fiziksel özellikleri, kişisel tercihleri ve ekonomik koşulları dikkate alınarak yapılmalıdır. Geleneksel olarak ortez ve protezler yıllardır ciddi zaman harcayarak ve yüksek maliyetle üretilmektedirler (Marable, 2020; Nicoloso ve ark., 2021).

Dünya Sağlık Örgütü, yüksek maliyetler, farkındalık, ulaşılabilirlik, eğitimli personel, politika ve finansman eksikliği gibi nedenlerle ihtiyaç sahibi her on kişiden sadece birinin protezler ve ortezler dâhil olmak üzere yardımcı ürünlere erişebildiğini belirtmektedir. Bu nedenle de kaliteli ve uygun fiyatlı yardımcı ürünlere erişimi iyileştirmek için “Yardımcı Teknolojiler Küresel İş birliği (GATE)” girişimini koordine etmektedir. Dünya Sağlık Örgütü 2014-2021 Eylem Planı ile üye ülkelerden protez ve ortezler dâhil olmak üzere yardımcı ürünlerin ihtiyacı olan herkes için erişilebilir olması yönünde finansman ve tedarik politikaları geliştirmelerini talep etmektedir (WHO, 2017; Alsancak, 2000).

Ortezlerin ve protezlerin vücudu destekleyen bölümleri deri, metal, ahşap ve plastik gibi malzemelerin anatomik yapıyla uyumlandırılması ve ahşap malzemelerin oyularak veya metallerin dövülerek şekillendirilmesi ile başlayan ilk üretimler yerini derin çekme ve laminasyon yöntemlerine bırakmıştır. Bu yöntemlerle ürünün oluşturulması için ciddi işçilik ve zaman harcanmıştır ve bazı üretim yöntemlerinin halen kullanımı ile de bu durum devam etmektedir. Ancak günümüzde geleneksel yöntemlerle uygulanan ortez ve protezler yerini, gereksinimi olan kişilerin eksik ya da fonksiyonunu kaybetmiş uzuvlarının veya vücut bölümlerinin üzerinde üretimin yapıldığı yeni yöntemlerin kullanılması noktasına getirmiştir. Teknoloji ve üretim yöntemlerindeki gelişmeler, geleneksel üretim yöntemlerinden dijital ve kişiye özel üretim yöntemlerine geçişi hızlandırmıştır. Özellikle 3B yazıcılar ve dijital tasarım teknolojileri sayesinde, bireylerin vücut yapılarına uygun olarak üretilen ortez ve protezlerin üretimi daha hızlı ve etkili hale gelmiştir. Ancak, bu yeni teknolojilerin kullanımı da belirli teknik ve maliyet zorlukları ile karşı karşıyadır. Bazı durumlarda maliyetleri düşürebilirken, diğer durumlarda ise yüksek kaliteli malzemelerin ve uzmanlık gerektiren tasarım süreçlerinin maliyetleri artırabilmektedir. Bu yöntemler üretim süresini oldukça kısaltsa da vücut üzerinde kullanılan teknik ve materyale bağlı olarak maliyeti düşürmemiş, tersine bazı uygulamalarda artırmış veya eş değerde tutmuştur (Marable, 2020).

Ancak son zamanlarda pek çok sektör üretim süreçlerinde 3B baskı teknolojisini benimsemiştir. Üç boyutlu baskı teknolojisinin farklı alanlarda ve farklı uygulamalarla kullanım alanını genişletmesi, diğer üretim yöntemlerinin önüne geçmesine ve protez ve ortez sektöründe de çalışmalarını bu yöne kaydırılmasında etken olmuştur. Katman katman karmaşık iç tasarım modellemelerinin üretilebildiği eklemeli imalat yöntemi anatomik yapı ile bütünleşme, hızlı prototipleme teknolojisi, tasarımın karmaşıklığına rağmen kısa sürede üretilirlik boyutu ile de öne çıkmaktadır. Teknoloji, üreticilerin bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanarak son ürün üretilmeden önce 3 boyutlu modellerin test etmesine ve değerlendirmesine de olanak tanımaktadır (Azlin ve ark., 2022).

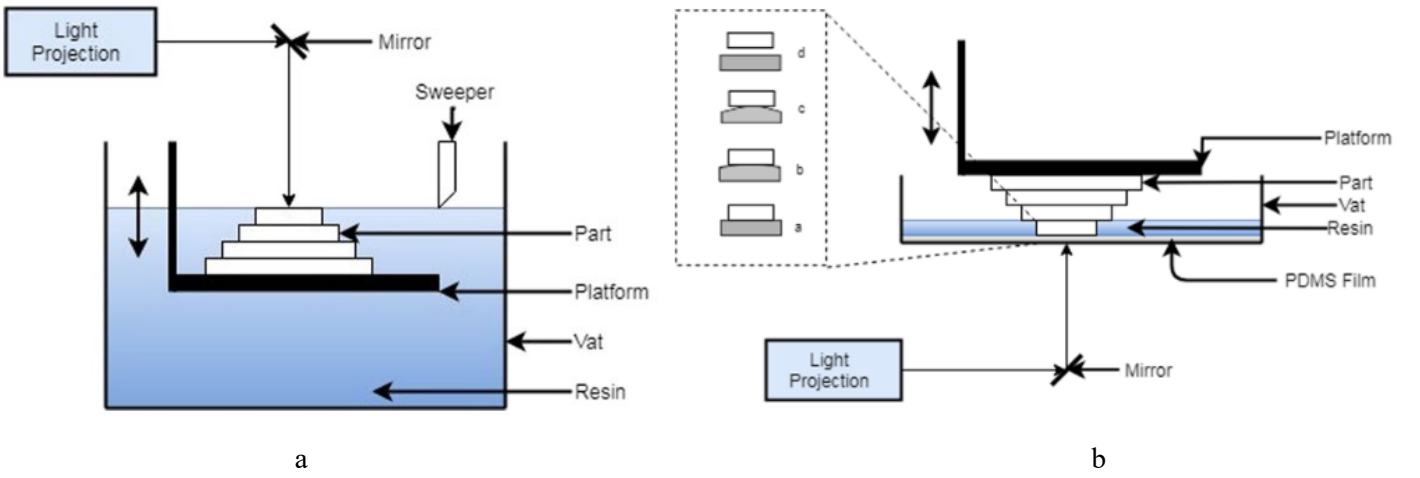
Bu derleme, 3B baskı ve üretim yöntemlerinin protez ve ortezlerin üretimine ve rehabilitasyona katkıları üzerindeki etkilerini ve bu alandaki farklı bakış açılarını ayrıntılı olarak ele alacaktır. Ayrıca, küresel düzeyde ortez ve protezlerin 3B baskı yöntemleriyle üretimine ve rehabilitasyonuna yönelik yapılan çalışmaları ve potansiyel çözümleri tartışacaktır. Bu

makale daha geniş bir nüfusun kaliteli ve uygun maliyetli ortez ve protezlere erişimini sağlamak için yapılan çalışmaları değerlendirmek ve çabaları desteklemeyi amaçlamaktadır.

### Tarihçe

3 boyutlu yazıcıların ilk kullanımları genelde prototip üretimler şeklindedir. Özellikle otomotiv ve havacılık endüstrileri, tasarım prototiplerini hızlı üretmek amacı ile bu yönetime başvurdu ve bu sayede ürün geliştirme süreçleri büyük ölçüde hızlandı ve maliyetler azaldı.

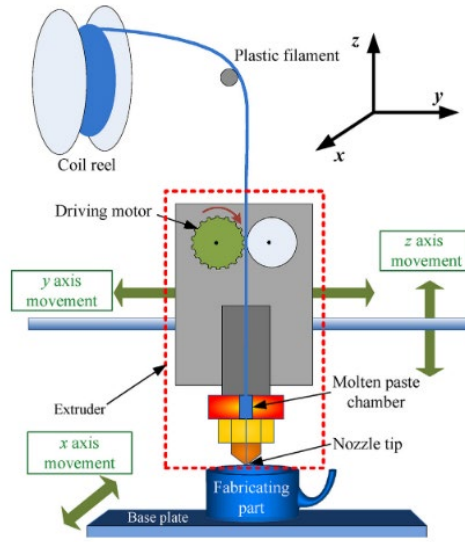
1986 yılında Amerikalı mühendis Chuck Hull'un 3 boyutlu yazıcılarla stereolitografi tekniğini kullanarak elde ettiği ürünler ortez ve protez alanı için inovatif yaklaşımlara yönelik temel oluşturdu (Hull, 1986). Stereolitografi (SLA) tekniğinde, UV kaynağı ile sıvı reçine katmanlar halinde fotopolimerizasyon işlemiyle sertleştirilip 3 boyutlu nesnelerin üretilmesi sağlanmaktadır (Campbell & Ivanova, 2013) (Şekil 1) (Khadilkar ve ark., 2019).



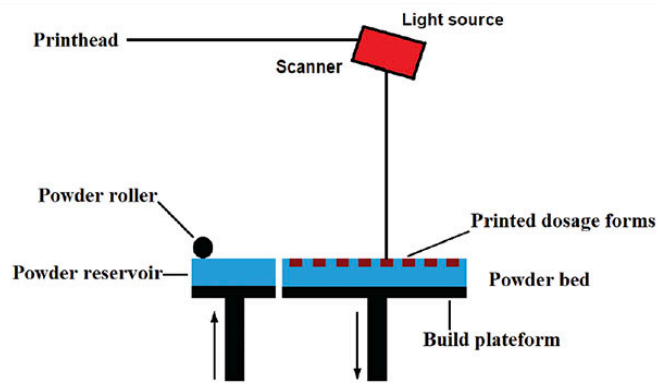
Şekil 1. SLA Yazıcı işleyiş şeması: a) Yukarıdan aşağıya, b) Aşağıdan yukarıya

1989 yılında Scott Crump ve Lisa Crump Fused deposition modeling (FDM) olarak bilinen eriyik yığıma teknolojisini geliştirdi. Bu yöntemde filament ısınan makaralardan geçerken erir ve yarı-erişik nozüle (başlığa) inerek akıtılarak üretim tablasında katman katman 3B modelin inşaatı sağlanır (Şekil 2) (Jin ve ark., 2019).

1990'lı yılların başında, Carl Deckard ve Joe Beaman geliştirdikleri Selective Laser Sintering (SLS) tekniğinde seçici lazer sintereleme işleminin kullanılması yolu ile 3B baskı teknolojilerinin ortez ve protez alanında yaygınlaşmasına katkı sağlandı. İnce toz plastik malzemenin UV lazer kaynağı ile katmanlar halinde birleştirilmesine dayanan yöntemde, toz plastik bölmesinde bulunan pistonun yukarı hareketi ile gereken miktarda toz yan bölmeye bir rollerla yönlendirilir. Her şekillendirmede piston bir miktar aşağı iner ve güçlü lazerle eriyen plastik birleşir (Şekil 3) (Charoo ve ark., 2021).



Şekil 2. FDM Yazıcı Şeması



Şekil 3. SLS Yazıcı Şeması

2000'li yılların başlarından itibaren 3 boyutlu yazıcılar, daha geniş kullanım yelpazesi için erişilebilir hale geldi. Kişisel 3B yazıcılar, ev kullanıcılarına ve küçük işletmelere sunuldu. 3 boyutlu yazıcıların yaygınlaşması, tasarım, eğitim, sağlık hizmetleri, gıda üretimi ve daha birçok sektörde kullanılmasına olanak tanımıştır. Günümüzde 3 boyutlu yazıcılar, karmaşık parçaların üretiminden kişisel kullanım için özel eşyaların üretilmesine kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır (Wohlers, 2015).

Bu teknoloji, sürekli olarak geliştirilmeye devam ediyor ve gelecekte daha fazla endüstri ve sektörde kullanılması beklenmektedir. Ortez ve protez alanında kendisine yer bulmaya başlayan 3 boyutlu yazıcılar, 1980'li yılların sonlarından bugüne büyük bir evrim geçirmiş ve geleneksel üretim süreçlerini değiştirmeye başlamıştır. Başlangıçta endüstriyel kullanım için geliştirilen bu teknoloji, bugün herkesin erişebileceği bir araç haline gelmekle birlikte inovasyonun önünü açmaya da devam etmektedir (Gibson ve ark., 2010).

### Üretim Yöntemleri ve Malzemeleri

3 boyutlu imalat ya da bir diğer adıyla “eklemeli imalat” yöntemleri farklı sınıflandırma yöntemleri kullanılarak gruplandırılabilir. Kullanılan ekipmanlara ya da üretim süreci gibi kriterlere göre sınıflandırma yapılabilmektedir (Derby & Reis, 2003). Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) tarafından 2010 yılında eklemeli imalat yöntemleri sınıflandırılmıştır (Alakas ve ark., 2023). Buna göre üretim yöntemleri fotopolimerizasyon, malzeme ekstrüzyonu, malzeme püskürtme, yapıştırıcı katkılı imalat ve toz yatağı eritme olarak 5 ana grupta toplanmaktadır. Her

ana grup kullanılan teknolojiler ve kullanılan malzemelere göre alt gruplara ayrılır. Bu sınıflandırmalar içerisinde yer alan eklemeli imalat teknolojilerinden SLA, SLS, FDM, Polijet, Çok Püskürtmeli Ergitme (Multi Jet Fusion, MJF) olarak sıralanabilir.

Polijet baskı olarak da bilinen fotopolimer püskürtme, ince katmanlar üretmek için tabakaların damlacıklar biçiminde biriktirilmesini ve biriktirilen katmanların üç boyutlu parçaları oluşturmak üzere ultraviyole (UV) ışığı kullanılarak kürlenmesini içerir. Polijet, yazıcı başlığının X ve Y eksenlerinde hareket ettiği, ince termoplastik reçine katmanlarını biriktirdiği bir yapı platformu içerir. UV odası, biriken katmanları UV ışığını kullanarak kürleyen ve sertleştiren bir UV lambası içermektedir (Patpatiya ve ark., 2022).

SLS yöntemiyle aynı grupta yer alan bir yöntem olan MJF, detaylandırma ve birleştirme için püskürtmeli yazıcı kafası tarafından uygulanan üretim elemanlarının ve kızılötesi lambadan gelen ısının bir kombinasyonunu kullanır. Isıtıcı ve yazıcı kafasının üretim alanı üzerinden geçişi sırasında, püskürtmeli yazıcı kafası, birleştirme ve detaylandırma maddesini toz yatağındaki bir katmanı üzerine bırakır. Bunu takiben kızılötesi ısıtıcıdan gelen ısı, yüksek emiciliğe sahip kaynaştırma maddesine aktararak yeni katman oluşturulur. SLS'nin aksine MJF, bir katmanının tüm kesitlerini tek bir geçişte işleyebilir, bu da daha yüksek işlem hızlarının elde edilmesini sağlar (Thiede ve ark., 2021).

Bu yöntemlerde kullanılan bazı malzemeler de reçineler, seramikler, metaller ve termoplastikler olarak sıralanabilir. Ortez ve protez üretiminde en yaygın kullanılan malzemeler termoplastikler grubunda yer almaktadır. Üretilen cihazda olması istenen sertlik, esneklik özelliklerine göre uygun malzeme seçimi yapılmaktadır. Bu gruptaki malzemelere polilaktik asit (PLA), polietilen tereftalat glikol (PETG), akrilonitril bütadien stiren (ABS), termoplastik poliüretan (TPU), Naylon, Polipropilen, high density polyethylene (HDPE) örnek olarak gösterilebilir (Miclaus ve ark., 2017).

Yapılan çalışmalarda PLA, PETG, ABS'den yapılmış ortez cihazları başarıyla test edilmiş ve kullanılmıştır (Hazubski ve ark., 2021). PLA uygun fiyatlı, erişilebilir ve kullanımı kolay olduğu için en fazla kullanılan malzemelerden biridir. Yapılan çalışmalarda statik ve dinamik ortez parçalarının üretiminde kullanılabilirdiği ve gerekli özellikleri sağladığı görülmüştür (Portnova ve ark., 2018; Wang ve ark. 2018). Bunun yanında protez komponentlerinin yapımında da kullanılmış, yapılan ilk testlerde gerekli dayanımı sağladığı, fakat daha detaylı analizlerin yapılması gerektiği görülmüştür. PETG esnekliği, darbeye ve sıcaklığa karşı olan direnci nedeniyle uygulama alanı geniş bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde protezlerin farklı bölgelerinde kullanımına olumlu yönde bakılmakta ve üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (Silva & Guilhon, 2019). ABS nispeten güçlü, sert ve dayanıklıdır ve kullanım sırasındaki yüklenme koşullarında zamanla deforme olmaz. Bu özellikleri sayesinde el-bilek ortezlerinde (WHO'larda), ayak-bilek ortezlerinde (AFO'larda) ve protez parçalarının üretiminde kullanılabilir (Patel & Gohil, 2022).

TPU aşınmaya, darbeye, yırtılmaya karşı mükemmel mekanik dirence sahip yarı esnek bir malzemedir. Esnekliği sayesinde el, parmak ortezleri ve çeşitli yardımcı cihazların üretiminde kullanılabilir (Venumbaka ve ark., 2020, Kuo ve ark., 2023). Naylon (PA 12) geniş uygulama alanlarına sahip bir malzemedir ve sağlamlığı, gerilme mukavemeti, darbe mukavemeti ve kırılmadan esneme kabiliyeti ile bilinir. Bu mekanik özellikleri nedeniyle son zamanlarda fonksiyonel parçalar ve prototipler oluşturmak için eklemeli imalat teknolojilerinde de kullanılmaktadır. Farklı ortez tiplerinde rahatlıkla kullanılabilen ve üstün özellikleri sayesinde protez aksamaları ve soketlerinin eklemeli imalat yöntemleriyle geliştirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır (Chen ve ark., 2016). Yüksek kimyasal, çekme, aşınma dayanımı ve düşük özgül

ağırlığı nedeniyle geleneksel üretim yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan polipropilen de eklemeli imalat teknolojileri aracılığıyla ortez ve protez parçalarının üretiminde kullanılabilir (Banga ve ark., 2018). HDPE mekanik özellikleri çok iyi olan, çekme ve darbe dayanımı yüksek, suya ve kimyasallara direnci iyi yüksek yoğunluklu polietilen malzemedir. Ortezlerin üretiminde kullanılabileceği gibi aşırı yüklenme altında protez ayaklarda da kullanılabileceği görülmüştür (Yousif ve ark., 2018).

### **Üretim Süreci**

Ortez ve protezin 3B baskı sistemi ile üretim sürecinde ilk aşama, taşınabilir bir tarayıcı ile vücut bölümüne ait tüm geometrinin, değişkenleri ve düzensizliklerinin bir dakikadan daha kısa süre içerisinde 1 mm hassasiyetle tarama işleminin gerçekleştirilmesidir. Tarama verileri, bilgisayar yazılımlarına aktararak incelenir. Üzerinde düzeltmeler ve iyileştirilmeler yapılarak tasarım yapmaya hazır hale getirilir (Kumar ve ark., 2021).

### **Tasarım**

Yazılımlar tasarımda büyük kolaylık sağlar. Bir dijital arayüz aracılığıyla örneğin taranan bölge için planlanan ortez veya protezin tasarımı gerçekleştirilir. Tasarımda donanımlı ortez protez uzmanının fizyopatoloji ve biyomekanik bilgisi ile fizyoterapistin beklediği işlevsellik ve mühendislik temel bilgileri, kullanıcının gereksinimleri ile birleştirilerek ve mevcut yazılımlardan yararlanılarak tasarımda mükemmellik sağlanır. Bazı şirketlerin açık kaynaklı tasarımlarının olması ve herkesin bu kaynaklara erişimine izin verilmesi, inovatif yaklaşımların depolanması, kullanıma sunulması tedavide çeşitliliğin artmasına ve olumlu gelişmelere başlangıç oluşturulmasına neden olmaktadır (Wendo ve ark., 2022).

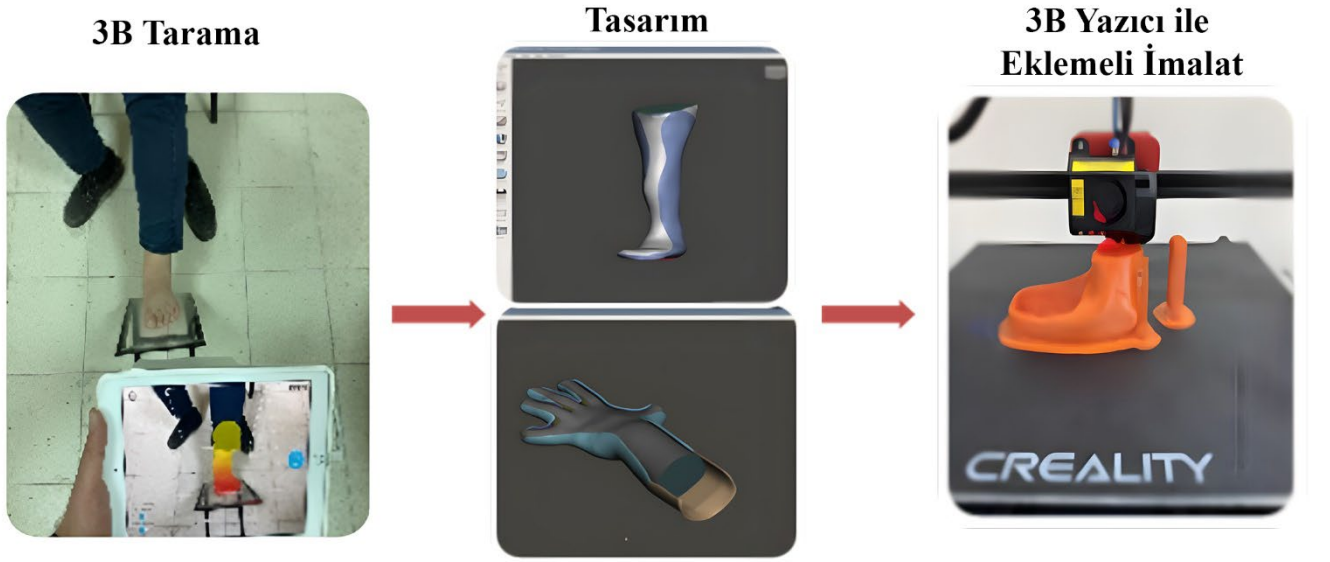
### **3B Baskı**

3B baskıda üretim öncesi planlanan ortez veya protez için uygun malzemenin belirlenmesi önemli bir parametredir. Malzemeler ISO sertifikalı, hafif, temizlenebilir, su geçirmez ve geri dönüştürülebilir özellikte olmalıdır (Kumar ve ark., 2021).

### **Ortez veya Protezin Uyumu**

Tıbbi olarak onaylanmış malzemelerden üretilen ortez veya protezin hasta ile bire bir uyumu, konforu gerekir, ciltte herhangi bir tahriş oluşturmaması ve hava sirkülasyonunu sağlaması esastır (Kumar ve ark., 2021).

Ankara Üniversitesi Ortez ve Protez Laboratuvarında FDM teknolojisi kullanarak üretilen tabanlık, splint ve AFO'lar Structure® 3B tarayıcı ile taranarak, Autodesk Meshmixer® yazılımında rektifikasyonu yapılarak, katı cisim olarak STL uzantısı ile kaydı gerçekleştirilerek, Creality 3B yazıcıda üretimi yapılan 2020 yılından beri tabanlık, AFO, el-bilek ortezi, parmak splinti, soket denemeleri yapılmaktadır. Hafif, hastaya özel (custom-made), hızlı ve uygun maliyette gerçekleştirilen üretimler rehabilitasyona katkı sağlamaya başlamıştır (Şekil 4). Tabanlık ve AFO'lar hastaların yürüyüş hızlarını artırmış, ağırlarında azalma, adım uzunluklarında artış, adım genişliğinde azalma ve kullanıcı memnuniyetinde artış sağlamıştır (Wang ve ark., 2021; Seo ve ark., 2023).



a)



b)

**Şekil 4.** Ankara Üniversitesi Ortez ve Protez Laboratuvarı 3B baskılı ortez ve protez üretimi: a) İşlem sırası b) Ürün örnekleri (tabanlık, suprakondiller AFO, WHO, TF soket, TT modüler protez kaplaması).

### Ortez ve Protez Üretim Çalışmaları ve Rehabilitasyona Katkıları

Kim ve ark. (2018), Zheng ve ark. (2020), Guida ve ark. (2019) çalışmalarında üst ekstremiteye yönelik WHO'ları; overuse sendromu, colles kırığı, distal radius kırığı, spinal kord yaralanması gibi farklı endikasyonlarda kullanmış ve çoğu 3B tarayıcılarla taradıkları bölgenin hastaya özel tasarımlarını yaparak, 3B yazıcılarla TPU ve PLA malzemeler kullanarak üretmişlerdir. Overuse sendromlu olgularda bir hafta içinde ağrıda belirgin azalma ve el fonksiyonlarında artış gözlerken, memnuniyet anket sonuçlarının yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Spastisite, stabilite, mobilite, ağrı ve ödem üzerindeki 6 hafta sonraki kullanım sonuçları da oldukça etkili bulunmuştur. Geleneksel yöntemlerle üretildiklerinde oldukça karmaşık, ağır, giyip çıkarma zorluğu olan tenodez gibi üst düzey ustalık gerektiren splintlerin çok daha estetik, hafif ve giyilip çıkarma pratikliği, kullanım kolaylığı büyük avantaj olarak görülmektedir. Stroke gibi spastisite ve ağrının olduğu, buna bağlı eklem hareketlerinde ve el-bilek fonksiyonlarında, kavrama kuvvetlerinde azalmanın olduğu olgularda 3 haftalık tedavi sonuçları başarılı bulunmuştur (Wang ve ark., 2018).

Cha ve ark. (2017) drop foot'lu hasta üzerinde yaptıkları çalışmada TPU malzeme kullanarak 3B yazıcıda ürettikleri AFO'yu geleneksel üretilenle karşılaştırmışlar, yürüyüş hızında, adım uzunluğunda artış, adım genişliğinde azalma gibi temporal-spatial yürüyüş parametrelerinde olumlu etkilenme tespit etmişlerdir. Memnuniyet anket sonuçları da geleneksel

yöntemle üretilmiş AFO'lara göre daha başarılı bulunmuştur. Liu ve ark. (2019)'nın stroke'lu hastalar üzerindeki çalışmalarında ise multijet fusion yöntemi kullanarak PLA'dan oluşturdukları AFO ile temporal-spatial yürüş parametrelerinde tedavi öncesi ve sonrası arasında önemli fark olduğu belirtilmiştir.

3B Baskı yöntemi kullanılarak üretilen tabanlıklar üzerine yapılan çalışmalar sağlıklı ve hasta bireylerde oldukça fazladır. Bu çalışmalarda ortak belirtilen memnuniyetler ağrının azalması, konforun sağlanması ve hafifliktir. Basınç sensörleri ile ayak tabanındaki dağılımların dengeli olması ve yürüyüş parametrelerine olumlu yansımaları çalışmalarda görülmüştür. (Jin ve ark., 2019; Tarrade ve ark., 2019; Mannisi ve ark. 2019).

Kuo ve ark. (2019) sağlıklı gençlerin 3 farklı pozisyonda baş, boyun ve gövde açıları sırt destekli oturma ve ayakta durma dahil olmak üzere akıllı telefon kullanmaları sırasında ölçülüp kendilerine özel tasarımlarla 3B baskılı ortezler oluşturulup, bu ortezlerin birbirine göre üstünlükleri değerlendirilmiştir. Akıllı telefon kullanımı tüm duruşlarda baş ve boyun fleksiyon açılarını artırdığı ve sırt desteği olmadan oturmanın baş ve boyun fleksiyon açılarında artışa neden olduğu belirtilmektedir. Özelleştirilmiş tasarımların duruş düzeltici etkisi ve rahatlığının tasarımın tipine göre farklılık gösterdiği belirtilmektedir.

3B baskılı ortezler biyomekanik ve kinematik parametreler yönüyle geleneksel üretime göre benzer veya üstün etkiler göstermiş, memnuniyet uyum ve konfor yönüyle yüksek bulunmuştur. 3B baskılı ortezlerin gelecekte geleneksel ortezlerin yerini alabileceği, daha fazla popülerlik oluşturacağı belirtilmektedir (Portnova ve ark., 2018).

Servikal bölgeyi destekleyen 3B yazıcıda üretilmiş yastık ve travmatik el için üretilmiş splintlerin tedavi sürecine olumlu katkıları gösterilmiştir (Li ve ark., 2022).

FDM teknoloji kullanarak PLA malzemeden üretilen tabanlıklar, TPU malzeme kullanarak nörolojik bozukluğu olan hastaların özel gereksinimlerini gidermek için üretilen yardımcı teknolojiler günlük yaşamlarında ellerini fonksiyonel kullanmalarında önemli katkı sağlamıştır (Kuo ve ark., 2023; Mancuso ve ark., 2023).

Multi Jet Fusion (MJF), çok püskürtmeli ergitme yöntemi kullanılarak plagiocephaly'de uygulanan kraniyal kask geleneksel sistemlere kıyasla taşıma konforu, hafiflik, optimum uyum ve kolay giyip-çıkarılabilirlik, terlemeyi azaltma özellikleri ile yüksek kalitede üretim olarak ortetik yaklaşımda yerini almıştır (Kropla ve ark.,2023).

Sekiz katılımcıya Batı Afrika ülkesi-Gine yakınındaki 'Masanga' köyünde 3B baskı soketi 8 transtibial (TT) amputeye özel tasarlayarak üretilmiştir. Katılımcıların memnuniyetini ve bununla ilgili olası komplikasyonları araştırmayı amaçlayan çalışmada protez uygulanmadan beş ila altı hafta öncesi ve protez uygulandıktan altı hafta sonra değerlendirmeleri yapıldığında katılımcıların kişisel kısa vadeli hedeflerine 6 katılımcının ulaştığı, 3B tarayıcıda taranan ve 3B yazıcıda üretilen soketleri, altı hafta sonrasında tüm katılımcıların hala taktıkları belirlenmiştir. Protezlerin katılımcılar tarafından koltuk değneklerine ihtiyaç duyulmadan protezlerin kullanılması değerli bulunmuştur. Twente Üniversitesi araştırmacıları tarafından yapılan bu çalışmada amaç uzun vadeli takip sonuçları ile konsepti geliştirmektir. Maliyeti düşük olan uygulama, düşük ve orta gelir düzeyine sahip ülkeler için önemli bir yaklaşım olarak düşünülebilir (Van der Stelt ve ark., 2020).

California Sandiego Üniversitesi'nde yapılan çalışmada 'monokok' protez 3B baskı yoluyla başarılı bir şekilde üretilmiştir. Çalışmada geliştirilen protez kırsal kesimde yaşamını sürdüren kullanıcılar için büyük bir potansiyel oluşturduğu



belirtilmektedir. Ortetist prostetiste erişimin olmadığı veya zor olduğu topluluklarda öngörülen, TT protezin 3B baskıyla tek gövdeli olarak oluşturulması ve protez kullanıcısına uygulanması, protezin kullanıcı üzerinde düzgün hizalanması ve bu uygulamanın kullanıcıda rahatlık ve işlevsellik sağlaması mümkün olabilmıştır. Çalışmada 3B baskı yöntemiyle üretilen protez, geleneksel yöntemle üretilen protezle karşılaştırıldığında maliyetin, ağırlığın ve üretim süresinin kısalmış (%90) olduğu belirtilmektedir. Düzgün hizalanmış tek parça TT protezin dijital olarak geliştirilmesi, amputenin protez kliniğine ziyaret sayısını büyük ölçüde azaltacağı ön görülmektedir (Nicoloso ve ark., 2021).

## Sonuç

Sonuç olarak 3B baskı teknolojisi ile üretilen ortez ve protezler;

1. Rehabilitasyona katkı bağlamında iyi bir temel ve başlangıç oluşturmaktadır.
2. Ortez üretimlerinin hızlı ve maliyetlerinin uygun olması araştırma ve geliştirme döngüsüne olumlu etkilemektedir.
3. Vücut yüzeyine, patolojiye ve biyomekaniğe birebir uyum sağlamaktadır.

3B baskı teknolojisinin ortez ve protez üretimindeki etkisi büyük bir ivme kazanmış ve geleneksel üretim yöntemlerine alternatif bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknolojinin sağladığı hız, özelleştirme imkânı ve düşük maliyet, özellikle düşük gelirli bölgelerdeki ihtiyaç sahiplerine erişim konusunda önemli bir avantaj sunmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'nün yardımcı ürünlere erişim konusundaki çağırısı, 3B baskı teknolojisinin bu alandaki potansiyelini ön plana çıkarmaktadır. Ağrı azalma, fonksiyonellikte artış, konforlu kullanım ve hastaların günlük yaşamlarında daha aktif olmaları gibi avantajlar, bu teknolojinin rehabilitasyon alanında önemli bir araç haline gelmesine katkı sağlamaktadır.

Geleneksel üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında, 3B baskı sayesinde hastaya özel ortez ve protezlerin hızlı üretilmesi, hafif, estetik ve kullanıcıya özel olarak tasarlanabilmesi mümkün olmuştur. Bu da tedavi süreçlerinde ve hastaların günlük yaşamlarında olumlu etkiler yaratmaktadır. Farklı 3B baskı teknolojileri olan SLA, FDM, SLS, ve MJF gibi yöntemler, çeşitli malzemelerle (PLA, PETG, ABS, TPU, Naylon, Polipropilen, HDPE gibi) birleşerek ortez ve protez üretiminde geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Ancak, 3B baskının sağlık sektöründeki kullanımının yaygınlaşabilmesi için standartlar, kalite kontrol mekanizmaları ve uzun vadeli etkileri değerlendiren daha fazla klinik çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu teknolojinin gelişimi, yardımcı ürünlere erişim konusundaki küresel eşitsizlikleri azaltmada önemli bir adım olabilir.

## Geleceği

Gelecekte 3B baskı yöntemi:

1. Modellemenin basitleştirilmesi
2. Kalıplanma ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi
3. Malzemelerin çevre dostu ve cilt dostu olarak geliştirilmesi
4. Mobil sensörlü cihazlar aracılığıyla gerçek zamanlı olarak alınan verilerle ortezlerin optimizasyonunun sağlanması tasarımı iyileştirmesi ile tedaviyi destekleyecektir.

3B baskı teknolojisinin ortez ve protez alanındaki rolü arttığında geleneksel üretim yöntemleri de bütünüyle değişecektir. Bu teknolojinin iyi yetenekleri, daha fazla kişiye erişimi artıracak ve özel tasarımların daha hızlı ve uygun maliyetle gerçekleştirilmesine olanak tanıyacaktır.

Dünya Sağlık Örgütü'nün "Yardımcı Teknolojiler Küresel İş birliği (GATE)" girişimi gibi küresel çabalar, yardımcı ürünlere erişimi artırmak adına önemli adımlar atacaktır. 3B baskı teknolojisi, bu çabaları destekleyerek yüksek kaliteli ve ekonomik yardımcı ürünlere olan ihtiyacı karşılamada kilit bir rol oynayacaktır. 3B yazıcılar daha da yaygınlaşacak ve kişisel kullanım için erişilebilir hale gelecektir. Bireyler sağlık profesyonelleri tarafından tasarlanan çözümlere kolay erişim sağlayabileceklerdir. Malzeme teknolojilerindeki gelişmeler, dayanıklı, hafif ve hasta dostu materyallerin kullanımını mümkün kılacaktır. Bu da ortez ve protezlerin daha uzun ömürlü, konforlu ve hastaya özel hale gelmesini sağlayacaktır. Gelişen yazılım ve tarayıcı teknolojileri, hastaların vücut geometrisini hızlı ve hassas tarama, verileri kullanarak özel tasarımlar oluşturma kolaylığı sağlayacaktır. Tüm bu gelişmeler, teknolojinin rehabilitasyon süreçlerine ve yaşam kalitesine daha fazla katkı sağlamasını mümkün kılacaktır.

## Kaynaklar

- Alakas, H. M., Yazici, E., Ebiri, U., Kizilay, B. A., & Oruc, O. (2023). Selection of 3D printing technologies for prosthesis production with multi-criteria decision making methods. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 18, 911–927. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01489-0>
- Alsancak, S. (2000). Ortez ve Protez Tarihçesi, *Ankara Üniversitesi Dikimevi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokul Yılığ*, 1(1).
- Azlin, M., Ilyas, R., Zuhri, M., Sapuan, S., Harussani, M., Sharma, S., Nordin, A., Nurazzi, N., & Afiqah, A. (2022). 3D Printing and Shaping Polymers, Composites, and Nanocomposites: A Review. *Polymers*, 14(1), 180. <https://doi.org/10.3390/polym14010180>
- Banga, H. K., Belokar, R. M., Kalra, P., & Kumar, R. (2018). Fabrication and stress analysis of ankle foot orthosis with additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(2), 301–312. <https://doi.org/10.1108/rpj-08-2016-0125>
- Campbell, T. A., & Ivanova, O. S. (2013). 3D printing of multifunctional nanocomposites. *Nano Today*, 8(2), 119–120. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2012.12.002>
- Cha, Y. H., Lee, K. H., Ryu, H. J., Joo, I. W., Seo, A., Kim, D.-H., & Kim, S. J. (2017). Ankle-foot orthosis made by 3D printing technique and automated design software. *Applied Bionics and Biomechanics*, Article e 9610468. <https://doi.org/10.1155/2017/9610468>
- Charoo, N. A., Funkhouser, C., Kuttolamadom, M. A., Mansoor Khan, Ph. D., & Rahman, Z. (2021). Opportunities and challenges of Selective Laser Sintering 3D printing in Personalized Pharmaceutical Manufacturing. *American Pharmaceutical Review*.
- Chen, R. K., Jin, Y., Wensman, J., & Shih, A. (2016). Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses—a review. *Additive Manufacturing*, 12, 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.04.002>
- Derby, B., & Reis, N. (2003). Inkjet printing of highly loaded particulate suspensions. *MRS Bulletin*, 28(11), 815–818. <https://doi.org/10.1557/mrs2003.230>
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2010). Direct Digital Manufacturing. In: Additive Manufacturing Technologies (pp. 378–399). Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_14)
- Guida, P., Casaburi, A., Busiello, T., Lamberti, D., Sorrentino, A., Iuppariello, L., D’Albore, M., Colella, F., & Clemente, F. (2019). An alternative to plaster cast treatment in a pediatric trauma center using the CAD/CAM technology to manufacture customized three-dimensional-printed orthoses in a totally hospital context: A feasibility study. *Journal of Pediatric Orthopaedics B*, 28(3), 248–255. <https://doi.org/10.1097/bpb.0000000000000589>
- Hazubski, S., Bamerni, D., & Otte, A. (2021). Conceptualization of a sensory feedback system in an anthropomorphic replacement hand. *Prosthesis*, 3(4), 415–427. <https://doi.org/10.3390/prosthesis3040037>
- National Center for Biotechnology Information (2024). PubChem Patent Summary for US-6027324-A, Apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/patent/US-6027324-A>.
- Jin, H., Xu, R., Wang, S., & Wang, J. (2019). Use of 3D-printed heel support insoles based on arch lift improves foot pressure distribution in healthy people. *Medical Science Monitor*, 25, 7175–7181. <https://doi.org/10.12659/msm.918763>
- Khadilkar, A., Wang, J., & Rai, R. (2019). Deep learning-based stress prediction for bottom-up SLA 3D printing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5–8), 2555–2569. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03363-4>

- Kim, S. J., Kim, S. J., Cha, Y. H., Lee, K. H., & Kwon, J. Y. (2018). Effect of personalized wrist orthosis for wrist pain with three-dimensional scanning and printing technique. *Prosthetics & Orthotics International*, 42(6), 636–643. <https://doi.org/10.1177/0309364618785725>
- Kropla, F., Hoffmann, M., Winkler, D., Krause, M., Scholz, S., & Grunert, R. (2023). Development of an individual helmet orthosis for infants based on a 3D scan. *3D Printing in Medicine*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s41205-023-00187-7>
- Kumar Banga, H., Kalra, P., M. Belokar, R., & Kumar, R.. (2021). Design and Fabrication of Prosthetic and Orthotic Product by 3D Printing. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94846>
- Kumar, R., & Sarangi, S. K.. (2021). 3D-Printed Orthosis: A Review on Design Process and Material Selection for Fused Deposition Modeling Process. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 531–538). Lecture Notes in Mechanical Engineering. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0909-1\\_55](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0909-1_55).
- Kuo, F.L., Wu, S., Kuo, T.Y., Lee, Y.S., Huang, S.W., & Lee, H.C. (2023). Effects of 3D-printed assistive device on daily life function in patients with neurological impairment: A pilot study. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/17483107.2023.2227222>
- Kuo, Y.R., Fang, J.J., Wu, C.T., Lin, R.M., Su, P.F., & Lin, C.L. (2019). Analysis of a customized cervical collar to improve neck posture during smartphone usage: A comparative study in healthy subjects. *European Spine Journal*, 28(8), 1793–1803. <https://doi.org/10.1007/s00586-019-06022-0>
- Li J., Chen S., Shang X., Li N., Aiyiti W., & Gao F. (2022). Research Progress of Rehabilitation Orthoses Based on 3D Printing Technology: *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2022/5321570>
- Liu, Z., Zhang, P., Yan, M., Xie, Y., & Huang, G. (2019). Additive manufacturing of specific ankle-foot orthoses for persons after stroke: A preliminary study based on Gait Analysis Data. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 16(6), 8134–8143. <https://doi.org/10.3934/mbe.2019410>
- Mancuso, M., Bulzomì, R., Mannisi, M., Martelli, F., & Giacomozzi, C. (2023). 3D-printed insoles for people with type 2 diabetes: An Italian, ambulatory case report on the Innovative Care Model. *Diabetology*, 4(3), 339–355. <https://doi.org/10.3390/diabetology4030029>
- Mannisi, M., Dell’Isola, A., Andersen, M. S., & Woodburn, J. (2019). Effect of lateral wedged insoles on the knee internal contact forces in medial knee osteoarthritis. *Gait & Posture*, 68, 443–448. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.12.030>
- Marable W.R, Smith C, Sigurjónsson B.Ð, Atlason I.F, Johannesson G.A. (2020). Transfemoral socket fabrication method using direct casting: outcomes regarding patient satisfaction with device and services. *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*. 3(2) 34672. <https://doi.org/10.33137/cpoj.v3i2.34672>
- Miclaus, R., Repanovici, A., & Roman, N. (2017). Biomaterials: Polylactic acid and 3D printing processes for orthosis and prosthesis. *Materiale Plastice*, 54(1), 98–102. <https://doi.org/10.37358/mp.17.1.4794>
- Nicoloso, D. V., Pelz, Barrack, & Kuester. (2021). Towards 3D printing of a monocoque transtibial prosthesis using a bio-inspired design workflow. *Rapid Prototyping Journal*, 67-80. <https://doi.org/10.1108/rpj-06-2021-0136>
- Patel, P., & Gohil, P. (2022). Custom orthotics development process based on additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 59, 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.858>

- Patpatiya, P., Chaudhary, K., Shastri, A., & Sharma, S. (2022). A review on polyjet 3D printing of polymers and multi-material structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(14), 7899–7926. <https://doi.org/10.1177/09544062221079506>
- Portnova, A. A., Mukherjee, G., Peters, K. M., Yamane, A., & Steele, K. M. (2018). Design of a 3D-printed, open-source wrist-driven orthosis for individuals with Spinal Cord Injury. *PLOS ONE*, 13(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193106>
- Seo, K.-J., Kim, B., & Mun, D. (2023). Development of customized ankle-foot-orthosis using 3D scanning and printing technologies. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 37(12), 6131–6142. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2406-1>
- Silva, A., & Guilhon, D. (2019). Comparative analysis of ankle prosthesis connector adapters in 3D printed using PLA and PETG. *XXVI Brazilian Congress on Biomedical Engineering*, 70(1), 155–161. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2119-1\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2119-1_24)
- Tarrade, T., Doucet, F., Saint-Lô, N., Llari, M., & Behr, M. (2019). Are custom-made foot orthoses of any interest on the treatment of foot pain for prolonged standing workers?. *Applied Ergonomics*, 80, 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.05.013>
- Thiede, S., Wiese, M., & Herrmann, C. (2021). Upscaling strategies for Polymer Additive Manufacturing: An assessment from economic and environmental perspective for SLS, MJF and DLP. *Procedia CIRP*, 104, 653–658. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.110>
- van der Stelt, M., Verhulst, A. C., Vas Nunes, J. H., Koroma, T. A., Nolet, W. W., Slump, C. H., Grobusch, M. P., Maal, T. J., & Brouwers, L. (2020). Improving lives in three dimensions: The feasibility of 3D printing for creating personalized medical aids in a rural area of Sierra Leone. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 102(4), 905–909. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.19-0359>
- Venumbaka, S. A., Covarubias, M., Cesaro, G., Ronca, A., De Capitani, C., Ambrosio, L., & Sorrentino, A. (2020). Application of multi materials additive manufacturing technique in the design and manufacturing of hand orthoses. *Lecture Notes in Computer Science*, 461–468. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58805-2\\_55](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58805-2_55)
- Wang, K., Shi, Y., He, W., Yuan, J., Li, Y., Pan, X., & Zhao, C. (2018). The research on 3D printing fingerboard and the initial application on cerebral stroke patient's hand spasm. *BioMedical Engineering OnLine*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12938-018-0522-4>
- Wang, Y., Jiang, W., Gan, Y., Yu, Y., & Dai, K. (2021). Clinical Observation of 3D Printing Technology in Insoles for Flexible Flatfoot Patients. *Journal of Shanghai Jiaotong University (science)*, 26(3), 398–403. <https://doi.org/10.1007/s12204-021-2311-7>
- Wendo, K., Barbier, O., Bollen, X., Schubert, T., Lejeune, T., Raucent, B., & Olszewski, R. (2022). Open-Source 3D Printing in the Prosthetic Field—The Case of Upper Limb Prostheses: A Review. *Machines*, 10(6), 413. <https://doi.org/10.3390/machines10060413>
- World Health Organization & USAID. (2017). *Standards for prosthetics and orthotics*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/259209> . License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
- Wohlers T. T. & Caffrey T. (2015). *Wohlers report 2015: 3d printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. Wohlers Associates.
- Yousif, L. E., Resan, K. K., & Fenjan, R. M. (2018). Temperature effect on mechanical characteristics of a new design prosthetic foot. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 9(13). 1431-1447
- Zheng, Y., Liu, G., Yu, L., Wang, Y., Fang, Y., Shen, Y., Huang, X., Qiao, L., Yang, J., Zhang, Y., & Hua, Z. (2019). Effects of a 3D-printed orthosis compared to a low-temperature thermoplastic plate orthosis on wrist flexor spasticity in chronic hemiparetic

stroke patients: A randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation*, 34(2), 194–204.  
<https://doi.org/10.1177/0269215519885174>