



Polimer Esaslı Ayak Ortezlerinin Mekaniksel Davranışlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Tahmini

Mustafa Güneş^{1*}, Abdulhamit Sevgi², Cebrail Ölmez³, Zehra Sever⁴

^{1*} OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0002-0266-6370),
mustafa.gunes@ostimteknik.edu.tr

² OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0003-3567-848X),
abdulhamit.sevgi@ostimteknik.edu.tr

³ OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9111-0325),
cebrail.olmez@ostimteknik.edu.tr

⁴ OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0002-2928-1323),
zehra.sever@ostimteknik.edu.tr

(2nd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2022, March 10-13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1083267)

ATIF/REFERENCE: Güneş, M., Sevgi, A., Ölmez, C. & Sever, Z. (2022). Polimer Esaslı Ayak Ortezlerinin Mekaniksel Davranışlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Tahmini. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 525-530.

Öz

3B baskı alanındaki teknolojik gelişmeler son yıllarda hızlı bir şekilde büyüyerek birçok sektörde kullanılmaya başlanmıştır. 3B baskı, tasarım süreçlerini ve tasarımlara ait prototiplerin imalat süreçlerini hızlandırmaktadır. Tasarım optimizasyonu ve karmaşık modellerin imalatında, geleneksel imalat yöntemlerinin aksine daha düşük maliyetlerle günler yerine saatler içinde yapılabilir. Bunun yanı sıra 3B baskı, farklı özelliklere sahip malzemelerle kişiye özel, fonksiyonel ve güvenilir biyomekanik modellerin tasarlanarak imalatına olanak tanımakta ve istenen mekanik özelliklerin önceden tahmin edilebilmesi için sonlu elemanlar yöntemiyle birleştirilebilmektedir. Yapılan çalışmada da 3B baskıda kullanılan PLA, ABS ve PETG olmak üzere 3 farklı polimerin, tasarlanan bir ayak ortezine ait mekanik özelliklerin baskı öncesinde tahmin edilebilmesine yönelik simülasyonu bu yöntemle gerçekleştirilmiştir. Yetişkin bir birey referans alınarak sınır koşulları ve uygulanması gereken aksel kuvvetler belirlenerek, 3 farklı polimer için toplam deformasyon, eşdeğer (Von-Mises) gerilimi ve güvenlik faktörü ANSYS programı ile analiz edilerek simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, karşılaştırmalı olarak incelenen polimerler arasında aksel olarak uygulanan kuvvetleri en iyi sönümlemeyi gerçekleştiren polimerin, ABS olduğu tespit edilmiştir. Diğer iki polimer malzeme arasında ise sönümlemeyi en iyi sağlayan polimer sırasıyla PETG, PLA şeklinde olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: 3B Baskı, Polimerler, Ortez, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

Prediction of Mechanical Behavior of Polymer-Based Foot Orthoses Using Finite Element Method

Abstract

Technological developments in the field of 3D printing have grown rapidly in recent years and have been used in many sectors. 3D printing speeds up the design processes and the manufacturing processes of prototypes of designs. In design optimization and manufacturing of complex models, it can be done in hours instead of days, with lower costs, unlike traditional manufacturing methods. In addition, 3D printing allows the design and manufacture of personalized, functional and reliable biomechanical models with materials with different properties, and can be combined with the finite element method to predict the desired mechanical properties. In the study, 3 different polymers, namely PLA, ABS and PETG used in 3D printing, were simulated to predict the mechanical properties of a designed foot orthosis before printing, using this method. By taking an adult individual as a reference, boundary conditions and axial forces to be applied were determined, and total deformation, equivalent (Von-Mises) stress and safety factor for 3 different polymers were analyzed and simulated with the ANSYS program. According to the simulation results, it has been determined that ABS is the polymer that performs the best damping of the axially applied forces among the comparatively examined polymers. Among the other two polymer materials, it was concluded that the polymer that provides the best damping is in the form of PETG and PLA, respectively.

Keywords: 3D Printing, Polymers, Orthotics, Finite Element Method.

* Sorumlu Yazar: mustafa.gunes@ostimteknik.edu.tr

1. Giriş

Ayak ortezleri yardımcı veya terapötik cihazlar olarak alt ekstremité fonksiyonu bozulmuş hastalarda yürüyüş performansını iyileştirmek için kullanılmaktadır [1]. Bu ortezler kişiye özel olacak şekilde geleneksel imalat yöntemleriyle veya 3B baskı yöntemleriyle üretilebilmektedir. Kişiyeye özel bir ayak ortezinin geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi alçı döküm ile yapılmaktadır [2]. Bu yöntemde antropometrik veriler elde etmek için etkilenen bacak veya ayak bileği öncelikle alçıyla kaplanarak negatif modeli hazırlanır (şekil 1). Daha sonra elde edilen model kullanılarak, bacak veya ayak bileğinin pozitif modeli üretilir. Son aşama olarak, üretilen pozitif model tabaka şeklindeki polipropilen ve polietilen gibi termoplastik malzemeler ile manuel olarak kaplanarak, ısıtma ve vakumlama işlemleriyle şekillendirilir [3].



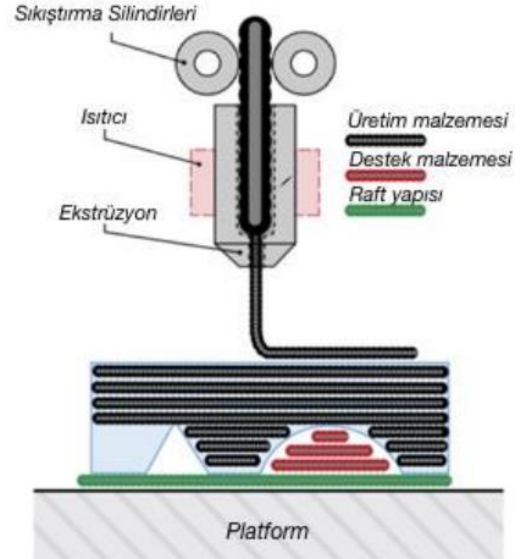
Şekil 1. Negatif modelin hazırlanışı [4].

Polimer kullanılarak kişiye özel bir ayak ortezinin tasarımı ve üretimi, ağırlık, şekil, yapı, kalınlık ve fonksiyonel özelliklerin optimizasyonu ile doğrudan bağlantılıdır. Farklı polimer malzemeler veya kompozitlerinden üretilen özel bir ayak ortezinin kaslarda zayıflık, ayak bileği dorsifleksiyonu gibi durumlarda hastanın yürümede rijitliğini ve stabilitesini iyileştirerek, zayıf bölgenin güvende tutulmasına yardımcı olmaktadır [5]. Bu ortezlerin tercih edilmesinde, ayak bileğini duruş esnasında veya yürüyüş boyunca döndürmek için yeterli olan destek ve mekanik gücün elde edilmesi, düzgün ve verimli yürüyüş döngüsünün sağlanması gibi birçok klinik nedeni vardır [6]. Fakat polipropilen gibi polimer malzeme kullanılarak üretilen ayak ortezlerinin düzgün ve verimli yürüyüş döngüsünün sağlanmasında verimli olmayıp, yürüme hızının sınırlandırılmasına ve vücudun öne doğru itilmesine yol açmaktadır [7]. Bu noktada, hastaların yürüyüş performansını ve yürüme hızını iyileştirmek için hafif ve sert polimerler kullanılarak protezlerin üretilmesi oldukça fayda sağlamaktadır [8]. Polimer malzeme kullanılarak geleneksel imalat yöntemleriyle şekil 2'deki gibi kişiye özel bir ortez veya protez, implant gibi biyomekanik parçaların üretimi, eklemeli imalat olarak da bilinen 3B baskıya kıyasla daha zordur [9]. 3B baskı teknolojilerinde ki gelişmeler sayesinde, istenilen polimer malzemeyle karmaşık ve hassas parçaların üretimi kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir [10]. Gelişmelere paralel olarak kullanılabilen malzemelerde çeşitlilikte artarak, ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), PC (Polikarbonat), PLA (Polilaktik Asit), PPSF (Polifenilsülfon) gibi birçok polimer ve bu polimerlerden elde edilen kompozitleri kullanılabilir hale gelmiştir [11].



Şekil 2. 3B baskı işlemi ile üretilen örnek bir ortez [12].

3B baskı işlemi şematik olarak Şekil 3'te gösterilmiştir. Basit olarak, sıkıştırma silindirlere tarafından ekstrüzyon işleminin gerçekleştirildiği uca iletilen polimer malzeme sıcaklığın etkisi ile eriyik hale getirilerek katmanlar halinde üst üste eklenmektedir. Herhangi bir katmanın baskı işlemi tamamlandığında, sistem belirlenen katman yüksekliği kadar yukarı doğru hareket ederek bir sonraki katmanın baskısı gerçekleştirilir. Son olarak basılan parçanın temizliği, parça yüzeyine zarar vermeden destek malzemesini çıkarmak için genellikle su bazlı bir çözelti ile gerçekleştirilir [13].



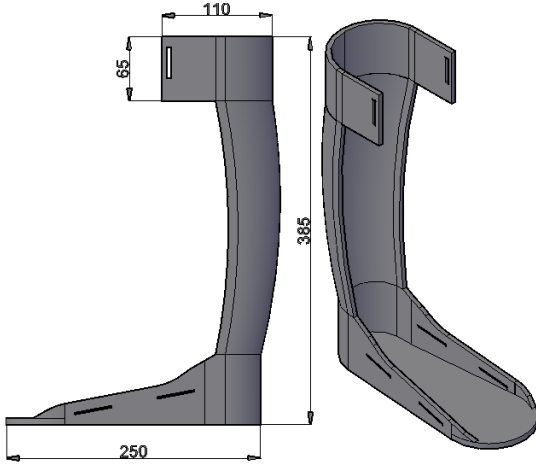
Şekil 3. 3B Baskı işleminin şematik olarak gösterilişi [14].

3B baskıyla yürüme gibi kayda değer bir yük altında olan tamamen işlevsel parçalar üretilmek istendiğinde parçanın mukavemetinde bir azalma olmaktadır. Bu durum 3B baskı teknolojisinin daha yaygın kullanılmasında bir dezavantajdır [15]. Sonlu elemanlar yöntemiyle, bu tip parçaların üretiminden önce model tasarımını gerçekleştirmek, simüle etmek, analiz etmek ve optimize mümkün hale gelmektedir. Bu yöntemle CAD modeli kullanılarak uygun gerilimi ve gerinim tahmini yapılabildiği gibi protez ve ortez alanında çeşitli modellerini tasarımı, simülasyonu ve analizi üretim öncesi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca model tasarımındaki farklı malzemelerin gerilim-gerinim dağılımı ve toplam deformasyonları olan etkisi de yöntem sayesinde önceden tahmin edilebilmektedir [16].

Bu çalışmada da PLA, ABS ve PETG olmak üzere 3 farklı polimerle bir ayak ortezinin üretim öncesi biyomekanik özelliklerinin önceden tahmini için sonlu elamanlar yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve stress dağılımları kendi aralarında karşılaştırmalı olarak incelenerek, duruş ve yürüyüş durumunda hasta ayağının orteze temas ettiği kısımlarda ki yüksek basıncı en iyi sönmüleyebilen malzeme tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Ayak ortezinin katı modellemesi yetişkin bir insanın bacak boyutları referans alınarak SOLİDWORKS paket programında tasarlanmıştır (şekil 4). Daha sonra tasarımı gerçekleştirilen model, toplam deformasyon, eşdeğer (Von-Mises) gerilimi ve güvenlik faktörünün hesaplanması için ANSYS programına aktarılmıştır.



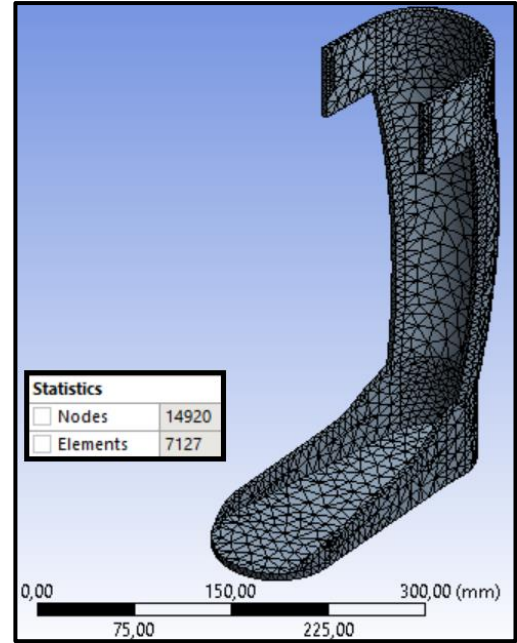
Şekil 4. Tasarımı gerçekleştirilen ayak ortezine ait genel ölçüler ve katı model görünümü.

Bu program deneysel maliyetleri ve üretim süreçlerini düşürmek, üretimde kaliteyi arttırmak, bilgisayar ortamında ürünleri analiz ve test etmek gibi birçok amaçla kullanılan mükemmel bir araçtır. Ayrıca prototip imalatına geçmeden bilgisayar ortamında sanal testler ve simülasyonlar gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır [17]. Programa malzeme ataması yapılan polimerlere ilişkin mekanik özellikler tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Programa tanıtılan polimer malzemelere ait mekanik özellikler [18].

	PLA	ABS	PETG
Young Modülü (Pa)	3.45e+09	2.39e+09	2.95e+09
Yoğunluk (kg/m^3)	1250	1040	1375
Poisson’s Oranı	0,39	0,399	0,33

Sonlu elamanlar yöntemiyle ayak ve bacağın orteze temas eden kısımlarında yük ve gerilim bilgileri tahmin edilebilmektedir. Bu tahminlere yönelik analiz işlemi için katı model ANSYS programına aktarıldıktan sonra sırasıyla mesh yapısının oluşturularak eleman ve düğüm noktalarının tayin edilmesi, sınır koşullarının girilmesi ve modelin çözümlenerek analizlerin gösterilmesi adımları uygulanmıştır. Mesh yapısı oluşturularak eleman ve düğüm noktaları belirlenmiş modele ait görseller şekil 5’te verilmiştir.



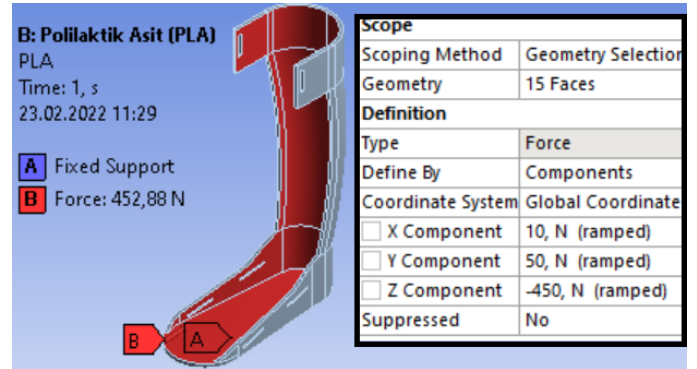
Şekil 5. Mesh yapısı ve düğüm noktaları oluşturulmuş ortez modeli.

Modelin mesh yapısı oluşturulduktan sonra ANSYS programının malzeme kütüphanesine eklenen polimer malzemelerden öncelikle PLA seçilerek tablo 2’de verilen sınır koşulları girilmiştir.

Tablo 2. Eksenel olarak uygulanan kuvvetler.

F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
10	50	-450

Tabloda verilen koşullar diğer iki polimer malzeme içinde aynı tutulmuştur. Eksenel olarak uygulanan kuvvetler ve modelin sabitlenen yüzeyi şekil 6’te verilmiştir. Ortez alt yüzeyinden hareket etmeyecek şekilde sabitlenmiştir.

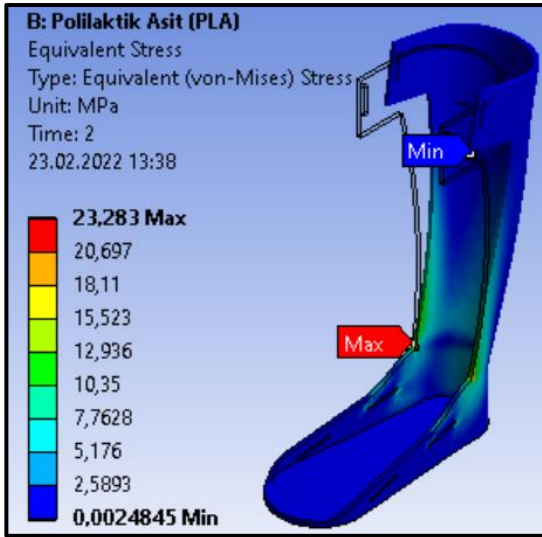


Şekil 6. Orteze uygulanan eksenel kuvvetlerin ve sabitlenen yüzeyin gösterimi.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

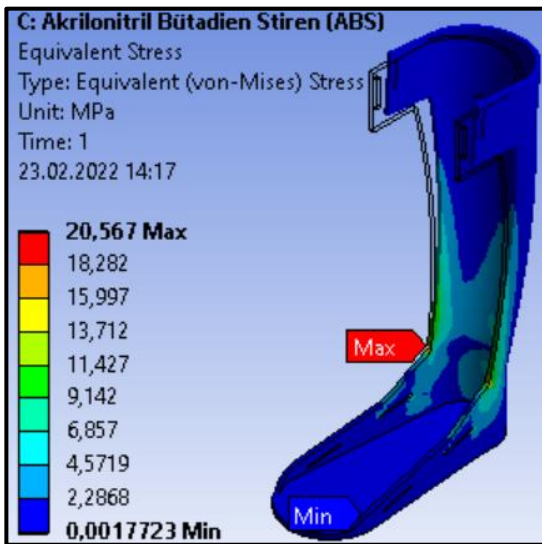
3.1. Analiz Sonuçları

Sonlu eleman analizi için sınır şartları modele uygulandıktan sonra her bir polimer için öncelikle oluşan eşdeğer gerilimin (Von-Mises) maksimum ve minimum değerleri hesaplanmıştır. PLA polimerine ait eşdeğer gerilim şekil 7’de verilmiştir. Maksimum gerilim 23,283 MPa ve minimum gerilim 0,0024 MPa olarak hesaplanmıştır.



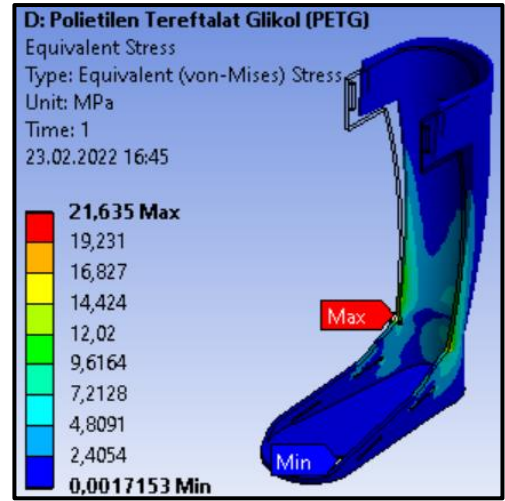
Şekil 7. PLA polimeriyle elde edilen eşdeğer gerilim.

Şekil 8’de ise malzemesi ABS polimer olarak atanan ortez üzerinde oluşan eşdeğer gerilim gösterilmiştir. Maksimum gerilim, 20,567 MPa ve oluşan minimum gerilim ise 0,0017 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8. ABS polimeriyle elde edilen eşdeğer gerilim.

Son olarak, Şekil 9’da malzemesi ABS polimer olarak atanan ortez üzerinde oluşan eşdeğer gerilim gösterilmiştir. Maksimum gerilim, 21,635 MPa ve oluşan minimum gerilim ise 0,0017 MPa olarak hesaplanmıştır. Her 3 polimer malzeme için eşdeğer gerilim hesaplandıktan sonra toplam deformasyon ve güvenlik faktörleri hesaplanmıştır.



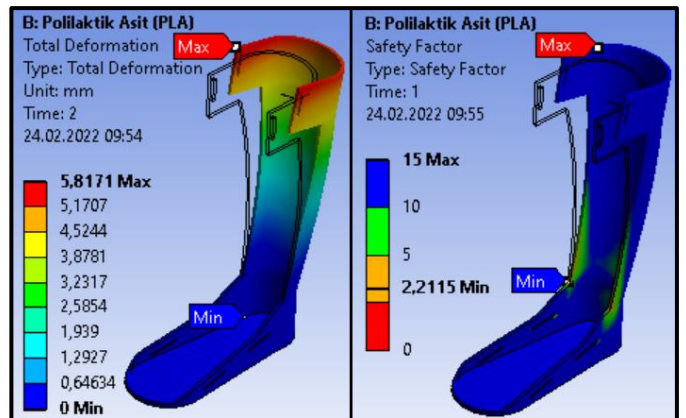
Şekil 9. PETG polimeri elde edilen eşdeğer gerilim.

Ayrıca her üç polimeri için hesaplanan gerilim değerlerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi tablo 3’te verilmiştir. Tablodan da anlaşılacağı üzere elde edilen gerilim sonuçları, uygulanan sınır koşulları altında en iyi sönümlemeyi ABS polimerin gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Tablo 3. 3 farklı polimer malzemeye ait maksimum ve minimum gerilim değerleri.

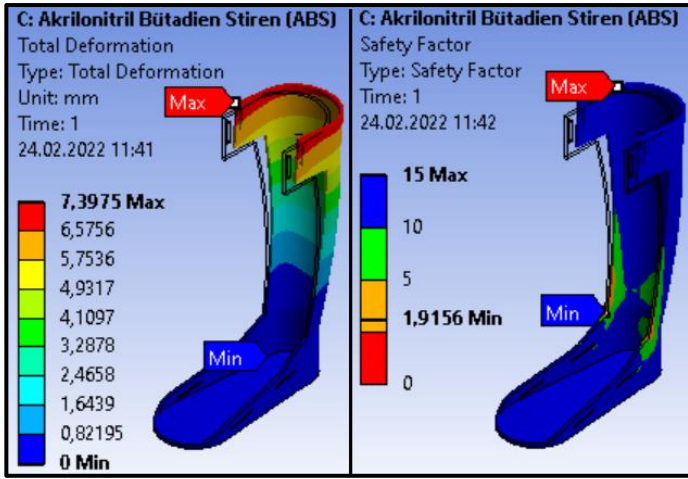
	PLA	ABS	PETG
Max. Gerilim (MPa)	23,283	20,567	21,635
Min. Gerilim (MPa)	0,0024	0,0017	0,0017

Malzemesi PLA polimer olarak atanan ortez üzerinde oluşan toplam deformasyon ve hesaplanan güvenlik faktörü şekil 10’da verilmiştir. Maksimum deformasyon 5,81 mm ve oluşan minimum deformasyon ise 0 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde güvenlik faktörünün maksimum değeri 15, minimum değeri 2,21 olarak hesaplanmıştır.



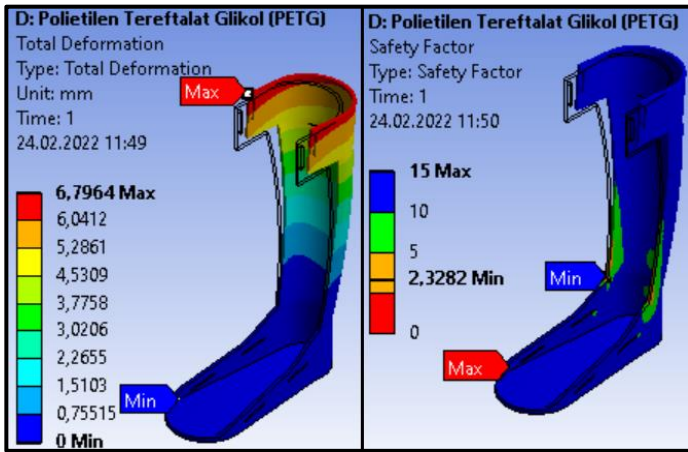
Şekil 10. PLA polimeri elde edilen toplam deformasyon ve güvenlik faktörü.

Malzemesi ABS polimer olarak atanan ortez üzerinde oluşan toplam deformasyon ve hesaplanan güvenlik faktörü şekil 11’de verilmiştir. Maksimum deformasyon 7,39 mm ve oluşan minimum deformasyon ise 0 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde güvenlik faktörünün maksimum değeri 15, minimum değeri 1,91 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11. ABS polimeri elde edilen toplam deformasyon ve güvenlik faktörü.

Malzemesi PETG polimer olarak atanan ortez üzerinde oluşan toplam deformasyon ve hesaplanan güvenlik faktörü ise şekil 12’de verilmiştir. Maksimum deformasyon 6,79 mm ve oluşan minimum deformasyon ise 0 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde güvenlik faktörünün maksimum değeri 15, minimum değeri 2,32 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 12. PETG polimeri elde edilen toplam deformasyon ve güvenlik faktörü.

3.2. Tartışma

Mühendislik uygulamaları ve sektörün her alanında olduğu gibi medikal uygulamalarda ANSYS programı kullanılarak, biyomekanik parçaların istenilen analizler yapılabilir. Duruş veya yürüyüş esnasında ayak ortezlerine farklı kuvvetler uygulandığından dolayı hem geleneksel imalat yöntemleriyle hem de 3B baskı yöntemiyle üretim öncesi malzeme analizlerinin yapılması gerekmektedir.

Bu analizler, ortezlerin maliyet bakımından daha uygun malzeme kullanılarak üretilmesine ve kaslarda zayıflık, ayak bileği dorsifleksiyonu gibi durumlarda hastanın yürümede rijitliğini ve stabilitesini iyileştirme açısından oldukça faydalı olacaktır. Ayrıca ANSYS programıyla gerilme, yer değiştirme ve güvenlik faktörünün hesaplanması gibi gerçekleştirilen analizlerin, ortezlerin istenilen özellikte olup olmadığı, imalatı gerçekleştirilmeden ve kullanımına geçilmeden önce uygunluğu test edilerek, bu tip biyomekanik parçaların tasarım ve gelişimine de katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

3. Sonuçlar

Yapılan çalışma kapsamında tasarımı gerçekleştirilen ortez modeli, üretim aşamasına geçmeden önce sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu yöntem 3 boyutlu katı modelleri bilgisayar ortamında analiz ve test etmek için harika bir araç olmakla birlikte, imalat aşamasına geçilmeden tasarlanan model üzerinde istenilen değişiklikler yapılabilmesine imkân sunmaktadır. Ayrıca hem deneysel çalışmalardan kaynaklanan maliyet ve zaman kaybının önüne geçilebilmekte hem de gerçekleştirilen simülasyonlar gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Tasarım gerçekleştirilen ortez modeli 3 farklı polimerle çalışma koşulları, boyutlar ve sınır koşulları eşit tutularak analiz edilmiştir. Karşılaştırmalar sonucu elde edilen sonuçlar, uygulanan sınır koşulları altında sönümlemeyi en iyi sağlayan polimerin 20,56 MPa gerilim değeriyle PLA polimerin olduğunu göstermiştir.

Kaynakça

- [1] A., Bashir, D., Dinkel, I., Pipinos, and S., Myers, “Implementation of an ankle foot orthosis to improve mobility in peripheral artery disease,” *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 102 (10), e24, 2021.
- [2] S., Shahar, M. T. H., Sultan, S. H., Lee, M., Jawaid, A. U. M., Shah, S. N. A., Safri, and P. N., Sivasankaran, “A review on the orthotics and prosthetics and the potential of kenaf composites as alternative materials for ankle-foot orthosis,” *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 99, 169-185, 2019.
- [3] A., Esmanhotto and G., Esmanhotto, “A simple idea for reducing the cost and weight of plaster-cast orthoses,” *Revista Brasileira de Ortopedia*, 48, 17-21, 2013.
- [4] N., Tırpan, “Uzun yürüme ortezlerinde ölçü alma, pozitif model oluşturma, biyomekanik prensipler,” 10. Uluslararası Protez-Ortez Kongresi, Hacettepe Üniversitesi Kültür Merkezi, ANKARA, 54-60, 2018.
- [5] N., Sabyrov, Z., Sotsial, A., Abilgaziye, D., Adair and M. H., Ali, “Design of a flexible neck orthosis on Fused Deposition Modeling printer for rehabilitation on regular usage,” *Procedia Computer Science*, 179, 63-71, 2021.
- [6] H., Choi, K. M., Peters, M. B., MacConnell, K. K., Ly, E. S., Eckert and K. M., Steele, “Impact of ankle foot orthosis stiffness on Achilles’ tendon and gastrocnemius function during unimpaired gait” *Journal of biomechanics*, 64, 145-152, 2017.
- [7] S., Petersmann, M., Spoerk, W., Van De Steene, M., Üçal, J., Wiener, G., Pinter and F., Arbeiter, “Mechanical properties of polymeric implant materials produced by extrusion-based additive manufacturing,” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 104, 103611, 2020.
- [8] D., Totah, I., Kovalenko, M., Saez, and K., Barton, “Manufacturing choices for ankle-foot Orthoses: a multi-objective optimization,” *Procedia CIRP*, 65, 145-150, 2017.
- [9] A., Dal Maso and F., Cosmi, “3D-printed ankle-foot orthosis: a design method,” *Materials Today: Proceedings*, 12, 252-261, 2019.
- [10] L. A., Melnyk and M. O., Oyewumi, Integration of 3D printing technology in pharmaceutical compounding: Progress, prospects, and challenges,” *Annals of 3D Printed Medicine*, 4, 100035, 2021.

- [11] A., Kantaros, O., Diegel, D., Piromalis, G., Tsaramirsis, A. O., Khadidos, A. O., Khadidos and S., Jan, "3D printing: Making an innovative technology widely accessible through makerspaces and outsourced services," *Materials Today: Proceedings*, 49, 2712-2723, 2022.
- [12] S., Chunhua and S., Guangqing, "Application and Development of 3D Printing in Medical Field. *Modern Mechanical Engineering*, 10 (03), 25, 2020.
- [13] B., Barroqueiro, A., Andrade-Campos and R. A., Valente, "Integrated Methodology for Designing Structures coming from Additive Layer Manufacturing," *Procedia Manufacturing*, 47, 425-428, 2020.
- [14] Ü. G., Başçı ve R., Yamanoğlu, "Yeni nesil üretim teknolojisi: FDM ile eklemeli imalat," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5 (2), 339-352, 2021.
- [15] M., Walbran, K., Turner and A. J., McDaid, "Customized 3D printed ankle-foot orthosis with adaptable carbon fibre composite spring joint," *Cogent Engineering*, 3 (1), 1227022, 2016.
- [16] H. K., Banga, P., Kalra, R. M., Belokar and R., Kumar, "Effect of 3D-printed ankle foot orthosis during walking of foot deformities patients," In *Recent Advances in Mechanical Engineering*, Springer, Singapore, 275-288, 2020.
- [17] W., Jia, J., Sun, T., Guan and Z., Xing, "Thermal-mechanical coupling analysis of 3D printing nozzle based on Ansys," In *Second IYSF Academic Symposium on Artificial Intelligence and Computer Engineering*, 12079, 272-277, 2021.
- [18] Ü., Çevik and M., Kam, "A review study on mechanical properties of obtained products by FDM method and metal/polymer composite filament production," *Journal of Nanomaterials*, 2020.