YÜRÜME ENGELLİLERİNİN FİZİK REHABİLİTASYONUNDA KULLANILAN DIŞ İSKELETTEKİ TİBİA PARÇASININ EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMESİ İÇİN GEOMETRİK AĞ TASARIMI VE AĞ MODELLERİNİN YAPISAL DAYANIMA ETKİSİ[1]

Ilkin SHAHBAZOV[1], Abdulmecit GÜLDAŞ[2]

[1-2]Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara / Türkiye

Öz: Medikal alanda kullanılan humanoid ortezlerin bağlantı parçalarının en önemli iki özelliği dayanıklı ve hafif olmasıdır. Bu iki kriter malzeme seçimi ve geometrik yapıyla değişiklik göstermektedir. Plastik malzemelerin çeşitli geometrik şekillerle üretilerek dayanımlarının ve ağırlıklarının optimum değeri bulunabilir. Bu geometrik şekiller şekiller plastik enjeksiyon, talaşlı imalat yöntemleriyle zorlu olup sadece 3B baskı yöntemleriyle yapılabilmektedir. Mevcut çalışmalarla ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Genel olarak kompozit katkılı filamentlerin dayanım testleriyle ilgili akademik yayınlar mevcuttur. 3B baskıda geometrik şekillerin iyileştirilmesiyle ilgili akademik yayınlar da mevcuttur. Ama geometrik şekil değişimi ve bu değişimin malzemeden bağımsız olarak dayanıma olan etkisiyle ilgili çalışmaya raslanmamıştır. Bu tezde hem ideal geometrik baskı şekli, hem de hafif ve dayanıklı plastik filament seçiminin sonuçları araştırılmıştır. 3B filament baskı yöntemiyle belirlenen tibia (alt ekstremite) ölçülerine uygun tasarım PLA malzemesi kullanılarak sinusoid, üçgen, dörtgen, lineer, giroid, sekizgen şeklinde iç doluluk geometrileriyle ve 25% iç doluluk oranı, 1 mm nozül ucu ve 210 Co derece sıcaklıkla baskı yapılmıştır. Bu baskı örnekleri burkulma testiyle kırılmış, en iyi doluluk geometrisi üçgen olarak belirlenmiştir. Üçgen geometri ile PLA malzemeden aynı parça 25%, 45%, 65% ve 85% iç doluluk oranlarıyla üretilip burkulma testi tekrar edilmiştir. En iyi iç doluluk oranı 85% olarak belirlenmiştir. Üçgen iç doluluk geometrisi ve 85% iç doluluk oranıyla PLA, ABS, PETG ve ASA malzemelerinden ISO 527-2 Plastik Çekme Testi, ISO 604-1973 Plastik Basma Testi'ne uygun parçalar tasarlanmış, ilgili testler yapılmıştır. Test sonucunda denenen malzemelerden en iyi sonuca PLA malzemesiyle ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik, FDM Eklemeli İmalat, Geometrik Doluluk Oranı

[1] Bu çalışma Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği birinci yazara ait "Yüksek Lisans Tezi"nden üretilmiştir. ORCID NO: 0009-0005-8609-9981

GİRİŞ VE KURAMSAL ÇERÇEVE

Son yıllarda, dış iskelet cihazlarının gelişimi hız kazanmıştır. Günümüzde, birçok yeni nesil cihaz, daha hafif ve kullanımı kolay malzemelerden yapılmaktadır. Ayrıca, cihazlara entegre edilmiş sensörler sayesinde daha doğru ve hassas hareket kontrolü sağlanmaktadır. Bu gelişmeler, felçli hastaların daha fazla hareket özgürlüğüne sahip olmalarını ve yaşamlarını aktif hale getirmelerini sağlamaktadır. Dış iskelet cihazlarının yapısının hafifliği ve dayanımı son derece önemlidir. Hafif bir yapı, cihazın kullanıcısının hareketlerini daha doğru bir şekilde takip etmesine ve rahat bir kullanım sağlamasına yardımcı olur. Ayrıca, kullanıcının cihazı uzun süre kullanabilmesini sağlar ve cihazın enerji tüketimini azaltır.

3D baskı yöntemi, dış iskelet cihazlarının tasarım ve üretim süreçlerinde son derece önemli bir rol oynamaktadır. 3D baskı, dış iskelet cihazlarının parçalarının hızlı ve hassas bir şekilde üretilmesini sağlar. Bu yöntem sayesinde, cihazların parçaları hızlı bir şekilde prototip olarak üretilebilir ve tasarımların görselleştirilmesi daha kolay hale gelir. Bununla birlikte, 3D baskı yöntemi, dış iskelet cihazları için kullanılan malzemelerin özelliklerini değiştirmek için kullanılabilir. Örneğin, kişisel ölçülere göre üretim yapılabilmesini sağlar, böylece cihazların kullanıcılara tam olarak uygun olması sağlanabilir. 3D FDM baskı yöntemiyle üretimde iç doluluk miktarı ve doldurma geometrisi, parçanın yapısal özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İç doluluk miktarı, parçanın hafifliği ve dayanıklılığı arasındaki dengeyi etkiler. İç doluluk miktarı, parçanın termal özelliklerini de etkileyebilir. Daha fazla iç doluluk miktarı, parçanın ısıl genleşme katsayısını azaltırken, daha az iç doluluk miktarı parçanın ısıl genleşme katsayısını artırır.

Bu tez çalışmasında örnek bir dış iskelet parçası üzerinde (tibia) oluşan kuvvet ve momentler incelenmiştir. Genel olarak bu tarz medikal ürünlerin üretiminde tercih edilen aluminyum veya titanyum gibi malzemelerin yerine PLA, ABS, karbon elyaf takviyeli filamentler kullanılarak çeşitli iç doluluk oranı ve geometrik iç yapılarla 3 boyutlu baskı yapılmıştır. Hem malzemenin, hem geometrik desenin yapısal dayanıma olan etkisi sonuçlarda tartışılmış, özellikle dış iskelet cihazlarında yüksek dayanım, esneklik ve hafiflik gereksinimlerini sağlaması açısından varolan üretim metotlarına alternatif olma olasılığı değerlendirilmiştir.

AMAÇ

Medikal alanda kullanılan humanoid ortezlerin bağlantı parçalarının en önemli iki özelliği dayanıklı ve hafif olmasıdır. Bu iki kriter malzeme seçimi ve moleküler yapıyla değişiklik göstermektedir. Dayanımlı plastik malzemelerin çeşitli geometrik şekillerle üretilerek

dayanımlarının ve ağırlıklarının optimum değeri bulunabilir. Bu geometrik şekiller plastik enjeksiyon, talaşlı imalat yöntemleriyle zorlu olup sadece 3B baskı yöntemleriyle yapılabilmektedir. Tezin amacı farklı geometrik şekillerle çeşitli malzemelerden üretilen aynı parça modelnin dayanım ve ağırlık testlerinin araştırma sonucuna ulaşmaktır.

KAPSAM

Mevcut çalışmalarla ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Genel olarak kompozit katkılı filamentlerin dayanım testleriyle ilgili akademik yayınlar mevcuttur.

Marton Tamas Birosz, Daniel Ledenyak, Matyas Ando'nun (2022) yapmış olduğu "Effect of FDM infill patterns on mechanical properties" başlıklı çalışma, Fused Deposition Modeling (FDM) 3D baskı yöntemi ile üretilen plastik parçaların iç doluluk geometrisinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Çalışmada, üç farklı iç doluluk geometrisi kullanılmıştır: honeycomb, gyroid ve diamond. Ayrıca, parçaların katman yönüne göre değişen etkileri de değerlendirilmiştir. Çekme, eğilme ve basınç testleri gibi çeşitli mekanik testler kullanılarak, her bir doluluk geometrisinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, farklı doluluk geometrilerinin farklı mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Honeycomb doluluk geometrisinin en yüksek mukavemet ve en düşük elastik deformasyon modülüne sahip olduğu tespit edilirken, gyroid doluluk geometrisinin en yüksek elastik deformasyon modülüne sahip olduğu bulunmuştur. Diamond doluluk geometrisi ise en düşük mukavemete sahip olmuştur. Katman yönü değişikliklerinin ise genellikle mukavemette azalma ve elastik deformasyon modülünde artışa neden olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, bu çalışma, FDM yöntemi ile üretilen plastik parçaların iç doluluk geometrisinin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, 3D baskı üretiminde doluluk geometrisinin doğru bir şekilde seçilmesi, parçaların optimize edilmiş mekanik özelliklere sahip olmasını sağlayabilir.

Sonuç olarak 3B baskıda geometrik şekillerin iyileştirilmesiyle ilgili akademik yayınlar da mevcuttur. Ama geometrik şekile değişimi ve bu değişimin malzemeden bağımsız olarak dayanıma olan etkisiyle ilgili çalışmaya raslanmamıştır. Bu tezde hem ideal geometrik baskı şekli, hem de hafif ve dayanıklı filament seçiminin sonuçlarını araştırmaktır.

YÖNTEM

Dış iskeletler, bir insan operatör tarafından giyilen ve kullanıcının fiziksel performansını artırmak için tasarlanmış elektromekanik cihazlardır. Bu performans artışı, artan yük taşıma kapasitesi, daha düşük metabolik harcama veya daha yüksek hızlarda veya daha uzun mesafelerde koşmayı içerebilir. Kullanıcı ile dış iskelet arasındaki yakın etkileşim nedeniyle, bu cihazlar insan anatomisiyle mekanik olarak uyumlu olmalı, hareketi

engellemeden veya harekete direnç göstermeden kullanıcıyla birlikte güvenli bir şekilde hareket edebilmelidir (Cenciarini ve Dollar, 2011).

Dış iskeletin tasarımında dikkate alınması gereken kritik biyomekanik faktörler aşağıdakilerdir (Cenciarini ve Dollar, 2011):

- Serbestlik dereceleri (DOF'lar)
- Hareket aralığı (ROM)
- Eklem torku gereksinimleri
- Eklem dönme hızı
- Eklem açısal bant genişliği

Bu tez kapsamında tibia parçasının yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla tork gereksinimleri ana kriter olarak kabul edilmiştir. Tam mobilizasyon için dış iskeletler arasında halihazırda satın alınabilen birkaç ticari ürün bulunmaktadır (Vouga vd., 2017):

- FreeGait (Bama Teknoloji, Ankara, Türkiye)
- Ekso GT (Ekso Bionics, Richmond, CA, ABD)
- ReWalk (ReWalk Robotics, Yokneam, İsrail)
- Rex (Rex Bionics, Auckland, Yeni Zelanda)
- Indego (Parker Hannifin Corporation, Macedonia, OH, ABD)

Artık ticari ürünler oldukları için, bu cihazlar hakkında genellikle sınırlı bilgi mevcuttur. Bu yüzden yapısal analiz çalışmasında Tristan Vouga ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan "TWIICE – A Lightweight Lower-limb Exoskeleton for Complete Paraplegics" isimli çalışmada yer alan cihaz özellikleri ve tork dayanım gereksinimleri güvenilir referans olarak kabul edilmiştir. Gerekli tork bilgileri Tablo 1'de belirtilmiştir. Tibia parçası Resim 1 (Vouga vd., 2017)'de 6.numarayla işaretlenmiştir.

Yöntem olarak tasarlanan tibia parçası üzerinde burulma testleri uygulanmıştır. Burulma testi iki aşamalı olarak yapılmıştır. Burulma testine uygun tibia parçası tasarlanmıştır. Tasarım şekli ve ölçüleri Resim 2'de belirtilmiştir. İlk aşamada tibia parçası farklı iç doluluk geometrileriyle 3B FDM metodu ile ve 25% dolulukla üretilmiştir. Resim 3'de üretilen iç doluluk geometri türleri paylaşılmıştır. İlk aşamadaki testler bittikten sonra, ikinci aşamada aynı geometri türü ve PLA malzemesi ile 25%, 45%, 65% ve 85% iç doluluk oranları ile aynı tasarımda tibia tekrar üretilmiştir. İkinci aşama testler

sonucunda en dayanımlı iç doluluk oranı belirlenmiştir. Test sürecine ilişkin görüntüler Resim 4'tedir.

BULGULAR

Burulma testinin ilk aşamasında triangular (üçgen) iç yapısının burulmaya karşı en dayanıklı geometri yapısı olduğu belirlendi. İkinci aşamada PLA malzeme ve triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle farklı iç doluluk oranlarıyla (45%, 65%, 85%) aynı tasarımdan baskı alındı. Bu parçalarla burulma testi tekrarlandı. İlk aşamanın sonuçları Tablo 2'de belirtilmiştir. İkinci aşama ile ilgili baskı parametreleri Tablo 3'te belirtilmiştir. Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle 45% dolulukla PLA malzemeden üretilen tibia parçası 77,8 Nm torkla kırılmıştır. Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle 65% dolulukla PLA malzemeden üretilen tibia parçası 83,2 Nm torkla kırılmıştır. Triangular (üçgen) iç doluluk geometrisiyle 85% dolulukla PLA malzemeden üretilen tibia parçası 100,5 Nm torkla kırılmıştır. Sonuçlar Tablo 4'te özetlenmiştir.

SONUÇ

Yarı felçli hastalar için tasarlanan medikal dış iskelet sisteminin tasarımında en temel hedefler parçaların hafif ve dayanıklı olmasıdır. Ayrıca üretim yöntemlerinin ucuzluğu ve de her hastaya uygun adapte olabilen tasarım çeşitliliği de göz ardı edilmemelidir. Tablo 1'deki tork gereksinimleri kapsamında PLA malzemeden triangular (üçgen) geometrik iç yapısı ve 85% dolulukla üretilen tibia parçası 100,5 Nm torka dayanmaktadır ki, bu maksimum eğilme momentinden de fazladır. Ayrıca cihaza takılı motor (aktüatör) torkuna ve hastanın kendi ağırlığının oluşturduğu momentlere de dayanıklıdır. Bu bulgular gelişen 3B eklemeli imalat yönteminin teknolojiye getirdiği en akıllıca çözümleri ortaya koymaktadır. Tablo 4'te parçaların baskı süreleri de diğer geleneksel üretim yöntemlerinden daha kısadır. Dolayısıyla ilerleyen zamanda bu tarz medikal araştırma ve geliştirme faaliyetinde bulunan şirketlerin cihazlarında kullanacakları parçalar için daha çok eklemeli imalata uygun gelişmiş tasarım ve üretim yöntemlerini tercih edecekleri düşünülmektedir.

TABLOLAR

Tablo 1. Çalıştırma Modülünün Özellikleri

Paremetre	Değer
Sürekli tork (Nm)	34
En yüksek tork (Nm)	57
Ağırlık (kg)	1,4
Geri tahrik torku (Nm)	12
Maksimum redüksiyon oranı	140

Maksimum eğilme momenti (Nm)	91

Tablo 2. Burulma Testinin İlk Aşamasında İç Doluluk Geometrilerinin Kırılma Değerleri

İç Doluluk Geometri Tipi	Kırılma Değeri (Nm)
Grid (ızgara)	53,3
Octahedral (sekizgen)	60,7
Full honeycomb (tam petek)	60,0
Sinusoidal	47,6
Cubic (kübik)	64,5
Rectilinear (doğrusal)	20,5
Triangular (üçgen)	70,1
Gyroid (jiroskopik)	63,6

Tablo 3. Triangular (Üçgen) İç Doluluk Geometrisiyle Farklı İç Doluluk Oranlarının Baskı Parametreleri

Parametre	Triangular 25%	Triangular 45%	Triangular 65%	Triangular 85%
Baskı Süresi (dakika)	104	119	131	144
Kullanılan filament uzunluğu (m)	28,63	33,49	37,66	41,97
Parça hacmi (mm^3)	68870	80548	90572	100949
Parça ağırlığı (g)	86,09	100,68	113,22	126,19

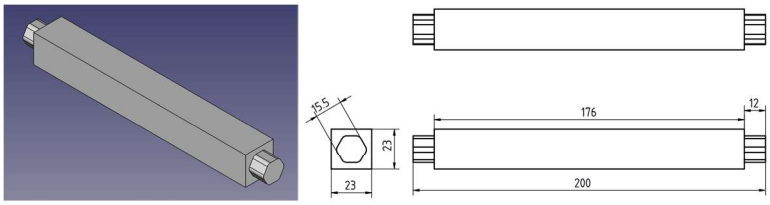
Tablo 4. Burulma Testinin İkinci Aşamasında İç Doluluk Oranlarının Kırılma Değerleri

İç Doluluk Oranı	Kırılma Değeri (Nm)
25%	70,1
45%	77,8
65%	83,2
85%	100,5

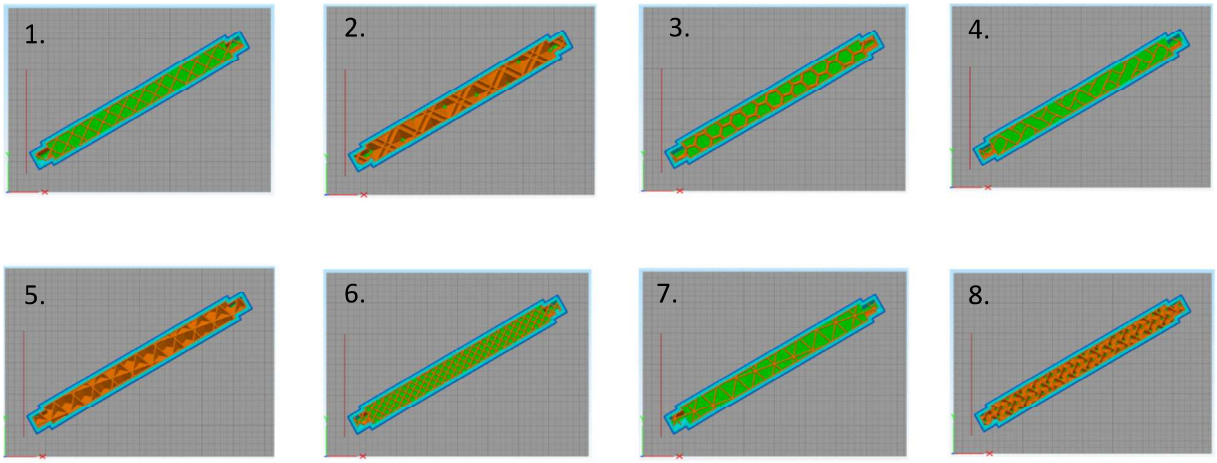
RESİM, GRAFİK, ŞEKİL



Resim 1. TWIICE, Önden ve Arkadan Görünüm: Yukarıdan Aşağıya: Elektronik Muhafaza (1), Sırt Yapısı (2), Kalça Çalıştırma (3), Uyluk Segmenti (4), Diz Çalıştırma (5), İncik Segmenti (6) ve Ayak Plakası (7) Cırt Cırtlı Kayışlara (8) Sahip Manşetler



Resim 2. Burulma Testi için Tasarlanan Tibia Parçası: 1. İzometrik Görüntü, 2. Parçanın Teknik Ölçüleri



Resim 3. İç Doluluk Geometrileri: 1. Grid (Izgara), 2. Octahedral (Sekizgen), 3. Full Honeycomb (Tam Petek), 4. Sinusoidal, 5. Cubic (Kübik), 6. Rectilinear (Doğrusal), 7. Triangular (Üçgen), 8. Gyroid (Jiroskopik).



Resim 4. Burulma Testi Süreci: 1. Test Düzeneği, 2. Kullanılan Torkmetre Cihazının Ön Görüntüsü, 3. Torkmetre Cihazının Yan Görüntüsü, 4. Gyroid Geometrisinin Testi, 5. Octahedral Geometrisinin Testi, 6. Üçgen Geometrisi 45% Dolulukla Test, 7. Sinusoid Geometrisinin Testi, 8. Cubic Geometrisinin Testi, 9. Grid Geometrisinin Testi, 10. Rectilinear Geometrisinin Testi, 11. Üçgen Geometrisinin 25% Dolulukla Testi, 12. Üçgen Geometrisinin 65% Dolulukla Testi, 13. Üçgen Geometrisinin 85% Dolulukla Testi

KAYNAKÇA

Birosz, M. T. Ledenyák, D. Andó, M. (2022). Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. Polymer Testing, 113:107654. Doi:10.1016/j.polymertesting.2022.107654

Cenciarini, M. Dollar, A. M. (2011). Biomechanical considerations in the design of lower limb exoskeletons. 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. Doi:10.1109/icorr.2011.5975366

Vouga, T. Baud, R. Fasola, J. Bouri, M. Bleuler, H. (2017). TWIICE — a lightweight lower-limb exoskeleton for complete paraplegics. 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). Doi:10.1109/icorr.2017.8009483