

El Fonksiyonunu Kaybeden Kişiler İçin Bir Dış İskelet El Tasarımı ve Üretimi

Fatih KAHRAMAN^{*1}, Gökçe Mehmet GENÇER², Aytaç GÖREN³

^{1,2,3}Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, 35390, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 22.11.2021, Kabul Tarihi: 08.02.2022

Özet

Bu çalışmada, doğuştan veya sonradan meydana gelen inme gibi hastalıklar sonucunda elini ve parmaklarını kullanamayan hastaların fizik tedavisine yardımcı olabilecek ve eklem hareketlerini yönlendirebilecek bir dış iskelet el tasarlanmıştır ve üretilmiştir. Dış iskelet el tasarımı SolidWorks programı ile gerçekleştirilmiş ve kritik parçalarının statik analizi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Tasarlanan dış iskeletin parçaları 3B yazıcı ile basılarak üretilmiştir. 3B yazıcı ile üretimde ara yüz olarak Cura programı kullanılmıştır. Dış iskelet parçalarının birbirine montajı yapıldıktan gerekli fiziksel terapi hareketlerini sağlamak için iki adet birbirinden bağımsız servo motor kullanılmıştır. Her iki servo motor da arduino sürücüsü ile kontrol edilmektedir. Tasarlanan dış iskelet sisteminin prototipini üretmek için, 3D yazıcıda yazdırırken mümkün olan en kısa üretim süresi ve en iyi mukavemeti sağlayacak şekilde baskı parametresi seçilmiştir. Model PLA malzeme kullanılarak basılmıştır. PLA malzeme kullanılarak dış iskelet parçalarının üretilmesi ile hafif ve mukavemetli parçalar elde edilmiştir. Ayrıca küçük ebatlı ve düşük ağırlığa sahip yüksek kapasiteli servo motorlar, bataryalar ve kullanılarak sistem hafifletilmiştir. Kullanıcının kolay kullanımı için el ateli ve eldiven gibi kullanımı kolaylaştıracak aparatlar konstrüksiyona eklenmiştir. Tüm parçalar eklendiğinde toplam ağırlığı 450g civarında olan çok hafif ve kullanıcı dostu bir dış iskelet sistemi oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Dış iskelet el, Fizik tedavi, Statik analiz, 3B yazıcı.

An Exoskeleton Hand Design and Manufacturing for Persons Losing Hand Function

Abstract

This article is to design an exoskeleton hand that can assist physical therapy and direct joint movements of patients who cannot use their hands and fingers, such as congenital or acquired stroke, etc. The exoskeleton hand has been designed with SolidWorks program and static analysis has been made for the critical parts using the finite element method by SolidWorks. Parts of the designed exoskeleton were printed with a 3D printer, and the Cura program was used as the 3D interface. After the assembly of the exoskeleton parts, two separate servo motors were used to provide the necessary physical therapy movement. Both of the servomotors are controlled by the Arduino driver.

In order to produce the prototype of the designed exoskeleton system, it was chosen printing parameter for possible the shortest production time and in a way that provides the best strength while printing on the 3D printer. The model is printed using PLA material. Lightweight and durable parts were obtained by producing exoskeleton parts by using PLA material. In addition, the system has been lightened by using high-capacity servo motors, batteries, and low weight. Apparatuses such as hand splint and gloves are added to the construction for easy use of the user. When all the parts are added, a very light and user-friendly exoskeleton system has been produced with a total weight of around 450g.

Keywords: Exoskeleton hand, Physiotherapy, Static analysis, 3D printer.

*Sorumlu yazar fatih.kahraman@deu.edu.tr, ²mehmet.gencer@deu.edu.tr, ³aytac.goren@deu.edu.tr

1. GİRİŞ

Son yıllarda, giyilebilir robotik dış iskelet giderek daha çok araştırmacının ilgisini çekmekte ve özellikle insan hareket kabiliyetinin artırılması ve nöro-motor rehabilitasyonu gibi alanlarda kullanımı araştırılmaktadır (Marconi vd., 2019). Ancak rehabilitasyon ve destekleme amacıyla kullanılan dış iskelet el robot ve cihazları insanın yaradılıştan sahip olduğu motor ve algılayıcılara olan gereksinimleri nedeniyle kollar ve bacaklar için kullanılan dış iskeletler kadar hızlı bir şekilde ilerlememiştir (Heo vd., 2012). Günümüzde nöromüsküler hastalıklar veya yaşlanma nedeniyle el yeteneklerini kaybeden veya zayıflayan insanlar için dış iskelet teknolojilerini kullanarak el işlevlerinin geliştirilmesi giderek daha da önemli bir konu haline gelmiştir. Özellikle inme sonrası kas güçsüzlüğü, tonus bozukluğu, yüzeysel ve derin duyu kaybı nedeniyle el fonksiyonları bozulabilir. İnme hastalarında sıklıkla fleksör hipertoni ve parmak ekstansör zayıflığı vardır (Beydoğan, 2008) bu da etkilenen ellerini fonksiyonel kavrama için açmayı zorlaştırır. Bu bozulma nedeniyle, günlük yaşam aktivitelerinde herhangi birine olan bağımlılığın ortadan kaldırılmasını hedefleyen inme rehabilitasyonunda el rehabilitasyonu ağırlıklı olarak yer tutmaktadır (Başaran, 2009).

El fonksiyonunu kaybeden kişiler için başarılı bir rehabilitasyon sağlanabilmesi yoğun ve sürekli terapötik egzersiz yapılması çok önemlidir (Taub vd., 2002). Geleneksel manuel olarak gerçekleştirilen tedavide düşük verimliliğin aşılması için robotik rehabilitasyon ile aşılabileceği yapılan araştırmalarla ortaya konmuştur (Heller vd., 1987). Robotik tekrarlanan hareket eğitimi, özellikle bir yardım almaksızın tekrarlı hareket yapmakta zorluk çeken hastalar için çok daha önemli ve etkili bir tedavi imkânı sağlamaktadır.

Mevcut el rehabilitasyonu cihazları her ne kadar birbirlerine göre yapı ve mekanik özellikler bakımından büyük farklılıklar gösterse de hepsinin genel amacı parmak hareketlerine yardımcı olmaktır. Parmak hareketlerini sağlayan mevcut cihazların çoğu, elektrikli veya pnömatik motorlarla çalışan aktif sistemlerdir (Tablo 1). Motorların ve güç kaynaklarının büyük ağırlığı nedeniyle toplam cihaz ağırlığı daha da artar. Normal bir insanın elinin ağırlığına göre daha ağır olan bu yapı hastanın kullanımını zorlaştırmaktadır. Özellikle bu durum, proksimal kol zayıflığının yaygın olduğu inme hastaları ile günlük yaşam koşulları altında rehabilite edilmek istenen kişilerin bu sistemleri kullanılmasını engellemektedir (Brokaw vd., 2011). Bu sistemlerin bir

diğer dezavantajı da cihazlarının çoğu aşırı derecede iridir (hacimsel olarak büyük yer kaplar) ve bu nedenle de hareket kabiliyetini ve elin kullanım yönünü sınırlandırır.

Tablo 1. El rehabilitasyonu için yapılmış mevcut dış iskelet çalışmaları

Cihaz Adı/Çalışmayı	Aktüatör	Kuvvet iletimi yürüten
ExoGlove (Yap vd., 2015)	Pnömatik	
Thompson-Bean vd.,2015)	Pnömatik	Soft aktüatör
Polygerinos vd., 2015	Hidrolik	
Safe Glove (Ma ve Ben-Tzvi, 2015)	DC motor	
CyberGrasp (Turner vd.,1998)	DC motor	Kablo tahrikli
Park vd., 2018	DC motor	
AirExGlove (Stilli vd.,2018)	Pnömatik	
HEXOSYS (Iqbal vd., 2014)	DC motor	
HEXOTRAC (Sarakoglou vd., 2016)	DC motor	
Son ve Park, 2018	DC motor	Tahrik bağlantılı
Rutgers Master II (Bouzit vd., 2002)	Pnömatik	
Exok'ab (Sandoval-Gonzalez vd., 2016)	DC motor	
Jo ve Bae, 2017	DC motor	

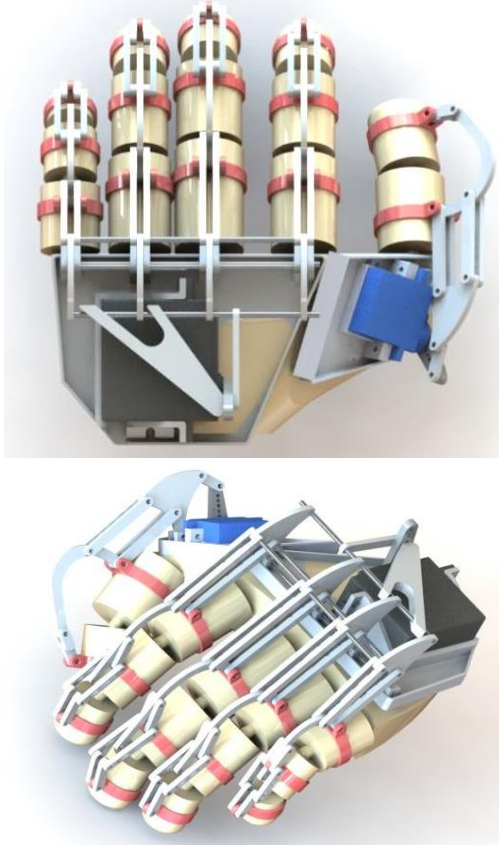
Yukarıda verilen tüm nedenler dolayısıyla bu çalışmanın amacı, el fonksiyonunu kaybeden kişiler için günlük yaşam aktivitelerinin gerçekleştirilmesi için el hareketi ve terapisine yardımcı olacak mevcutlardan çok daha hafif ve hacimsel olarak küçük, giyilebilir bir dış iskelet el geliştirmektir. Böylece kolay bir şekilde yanlarında taşıyabilir, başkasına ihtiyaç duymadan kendi kendilerine ellerine bağlayabilir ve istedikleri zaman istedikleri ortamda rahatça kullanabilirler.

2. DIŞ İSKELET EL TASARIMI

Dış iskelet el tasarımı tutma-kavrama hareketleri sırasında elin normal kinematik yörüngesini takip edecek, parmak fleksör hipertonusine iyi bir şekilde rehabilite etmesine yardım eden, gerekli tork profilini ayarlamayı sağlayan ve küçük bir kodlayıcı kullanarak (Arduino Uno) kavrama açısını ayarlayacak şekilde tasarlanmıştır.

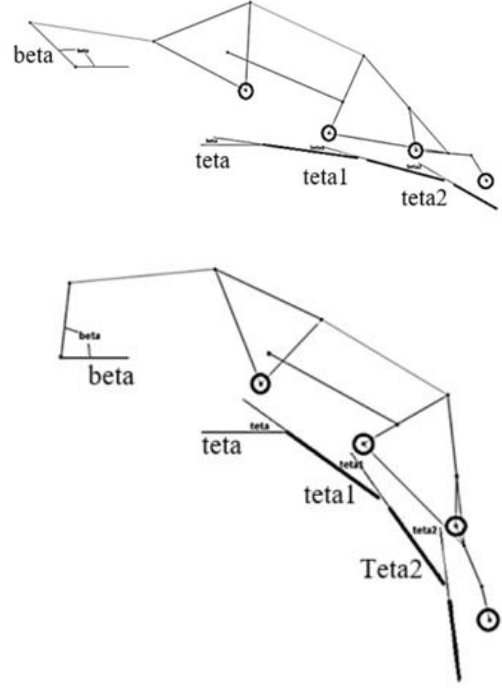
Dört parmağın kavramadaki hareketini koordineli çalışmaya zorlamak için 4 çubuklu bir bağlantı tasarlanmıştır. Başparmak ve diğer parmakların birbiri ile koordinasyonu için kodlama ve motor açısı ayarı yapılmıştır.

Servomotor bloğu içerisine yerleştirilecek servo motorun konumu, motorun verdiği hareketi iyi iletebilecek bir şekilde konumlandırılmıştır. Parçaların motordan aldığı yükü iletirken meydana gelen gerilmelerden dolayı hasara uğramaması (eğilmelerini önlemek) için kiriş parçalar çift olarak kullanılmıştır. Şekil 1'de oluşturulan 3B modelin görselleri verilmiştir.



Şekil 1. 3B Modelin a) üst görünüşü, b) perspektif görünüşü

Tasarım yapılırken ortalama bir insan için parmak boyutları (mekanizma için uzunluk değerleri), her bir parmağın (Serçe, Yüzük, Orta ve İşaret Parmaklarının) hareket mekanizması, bu parmakların hareketlerindeki sınırlar ve açı değerleri dikkate alınarak yapılmıştır. Şekil 2 ve Tablo 2 her bir parmak (Serçe, Yüzük, Orta ve İşaret Parmakları) için tam açık ve tam kapalı pozisyonlardaki mekanizmaya ait açı değerlerini göstermektedir.

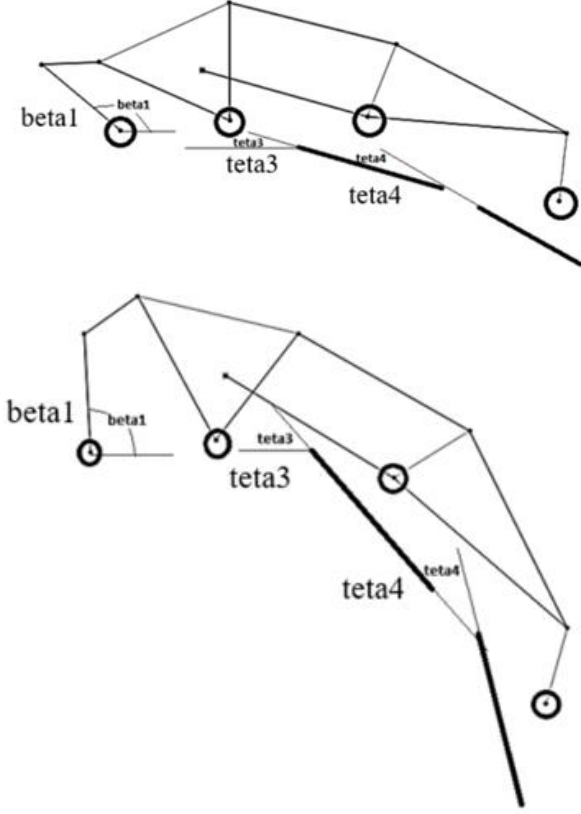


Şekil 2. Dört parmak (işaret orta yüzük serçe) için mekanizma açı değerleri a) Tam açık konumu için b) Tam kapalı konumu için

Tablo 2. Model mekanizmasının belirli konumları için Teta değerleri

	Parmak açık konumda açı değerleri	Parmak kapalı konumda açı değerleri
beta	105°	79°
teta	13,24°	20,52°
teta1	16,38°	39,44°
teta2	26,01°	42,52°

Başparmak diğer parmaklardan farklı yönlerde ve açılarla çalıştığı için bu parmağa ait mekanizma farklı bir servo motor ile hareket ettirilmiştir (Şekil 3 ve Tablo 3).



Şekil 3. Başparmak için a) Mekanizma açı değeri tam açık konumu için b) Tam kapalı konumu için

Tablo 3. Başparmak model mekanizmasının belirli konumları için Teta değerleri

	Parmak açık konumda açı değerleri	Parmak kapalı konumda açı değerleri
beta1	132°	85°
teta3	19,16°	41,21°
teta4	10°	33,79°

2.1. Modelde Kullanılan Parçalar

Dış iskelet genel olarak 12 adet Polilaktik Asit (PLA) malzemeden basılmış farklı tipte parçadan oluşmaktadır. Polilaktik Asit (PLA) yenilenebilir kaynaklardan yapılmış bir polimerdir. Petrol bazlı diğer termoplastiklerin aksine, PLA üretimi için kullanılan hammaddelerin bazıları mısır nişastası, tapyoka kökleri veya şeker kamışıdır. PLA Filament 3B Yazıcılarda en çok kullanılan filament malzemedir.

Modeldeki parmak boyutuna göre kullanılacak her bir parçanın boyutu serçe parmağa göre tasarlanmıştır, diğer parmaklar için kullanılacak parçalar ise daha sonra ölçülen parmakların ebatlarına göre büyütülmüştür (Şekil 4).



Şekil 4. Yapılan tasarımda kullanılan tüm elemanlar (1. Yüzük, 2. Pim, 3. Kanallı link bağlantısı, 4. Uzun link bağlantısı, 5. Kısa link bağlantısı, 6. Dört nokta bayrak elemanı, 7. Kuvvet aktarım elemanı, 8. Motor montaj bloğu1, 9. Motor montaj bloğu2, 10. Destek elemanı, 11. M2 cıvata ve somunu)

Yapılan mekanizma çalışması sonrasında üç boyutlu yazıcı ile çıktı alınacak olan parçaların (3B) modelleri tasarlanmıştır. Parçaların ve montajın 3B katı modelini oluşturmak için Solidworks yazılımı kullanılmıştır. Dış iskeletin tüm parçaları, bunların montajları ve tüm hareket analizleri yine Solidworks kullanılarak oluşturulmuştur. Mesnet noktalarındaki parçalar arasında parçaların birbirine sürtünmelerini azaltmak için aralıkları 0,2 mm olacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Servomotor montaj bloğu içerisine yerleştirilecek olan servomotorların konumu, parmaklara hareketi en iyi şekilde iletebilecek bir noktaya yerleştirilecek şekilde belirlenmiştir.

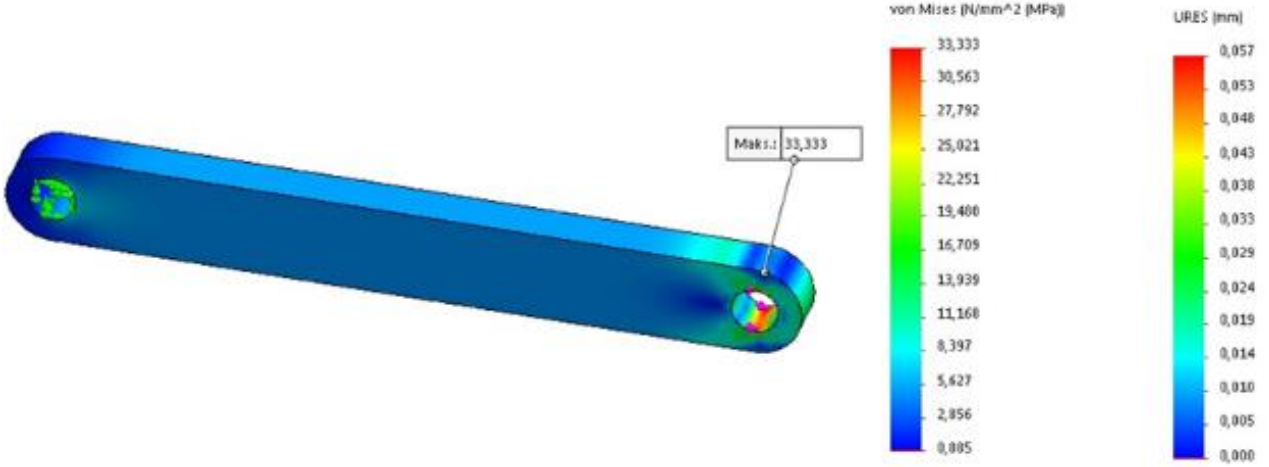
3. KRİTİK PARÇALARIN ANALİZ VERİLERİ

Parçanın üzerine gelen yüklere göre her parçada oluşan kritik gerilme bölgelerinin tespiti ve oluşan bu gerilmelere göre parçanın bu yükleri taşıyıp taşıyamayacağını tespitinin yapılması amacıyla her bir parça üzerine gelen yüklere göre gerilme analizleri yapılmıştır.

3.1. 30mm Taşıyıcı Parça

Şekil 5'te görüleceği üzere 30mm uzunluğundaki parçaya elin kapalı konumdan açık konuma gelebilmesi için gerekli olan kuvvetleri, sürtünmeden dolayı oluşan kayıpları ve emniyet faktörü (2) göz önünde bulundurarak 40N'luk bir çeki yükü uygulandığında maksimum gerilme minimum kesitte oluşmaktadır ve değeri 33,3MPa'dır. PLA malzemesinin akma gerilmesi yaklaşık 70MPa olduğundan malzeme 2 Factor of Safety (emniyet faktörü) ile çalışırsa SolidWorks'de yapılan

analiz verilerine göre uygulanacak maksimum kuvvet yaklaşık 42N'dur, dolayısıyla emniyetli bir şekilde çalışmaktadır.

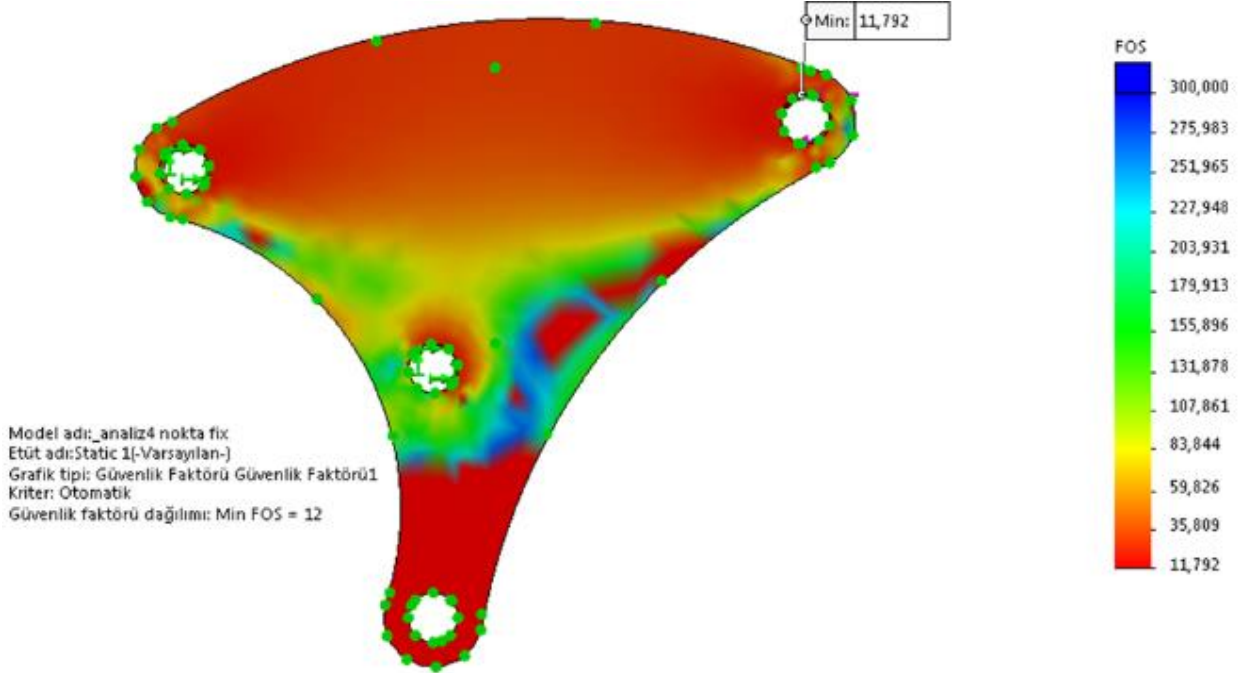


Şekil 5. 30mm taşıyıcı parçanın statik analizi

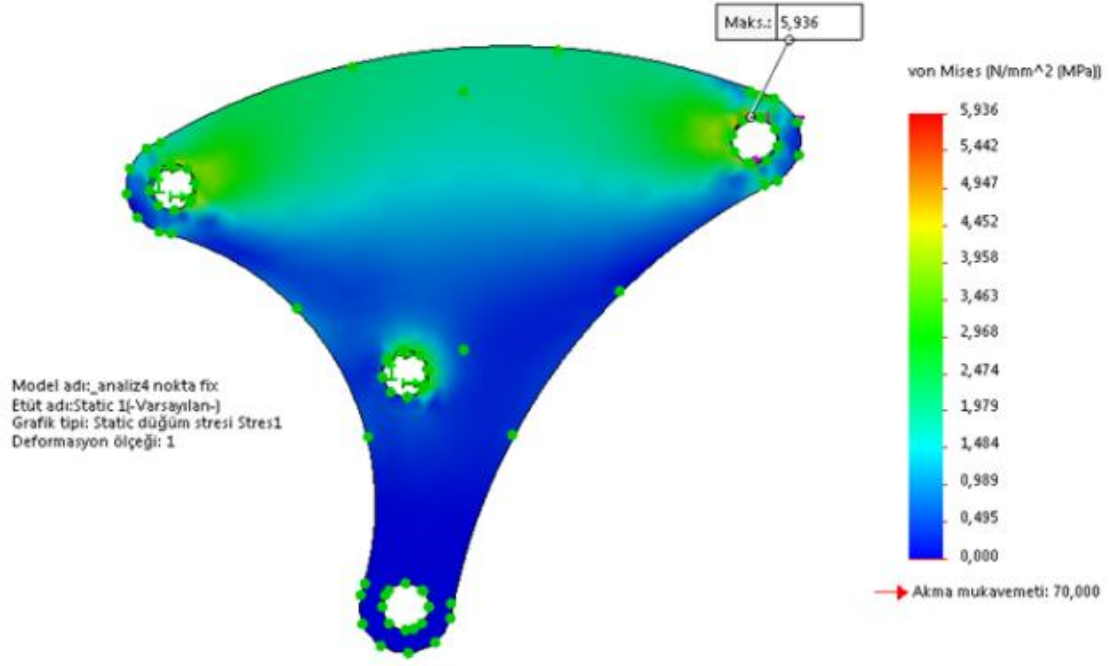
3.2. Dört Nokta Bayrak Elemanı

İki farklı tipte kullanılan dört Nokta Bayrak Elemanı aldıkları kuvvetleri iki ayrı noktaya ileterek parmaklarının birbirlerine göre hareket etmelerini sağlamaktadır. Bu parçalar, üzerlerine gelen kuvvetleri aktarabilecek ve bu kuvvet iletimini yaparken deforme olmayacak bir şekilde tasarlanmıştır. SolidWorks'de yapılan analiz için, servo motordan tahrik edilen taşıyıcı

parça ve destek elemanına gelebilecek olası ani döndürme momenti ve motorun maksimum aktarabileceği tork göz önünde bulundurularak 30N yük altında parçanın emniyet faktörü grafiği aşağıdaki gibidir Şekil 6. Bu emniyet grafiğinden anlaşılacağı üzere minimum emniyet yaklaşık 11 çıkmıştır. Analizden de anlaşılacağı gibi 30N yüke 11 emniyet faktörü göz önüne alırsak 175N yük altında parçanın güvenlik faktörü 2'nin üstündedir ve en yüksek gerilme değeri kuvvetin uygulandığı noktada meydana gelmektedir Şekil 7.



Şekil 6. Dört nokta bayrak elemanı emniyet faktörü verisi



Şekil 7. Dört nokta bayrak elemanı gerilim verisi

4. KONUM ANALİZİ

4.1. Serçe Parmak Konum Analizi

MG945 servo motorun başlangıç açısı olan ilk açı değeri yapılan prototip için 105°'dir. Aşağıdaki tabloda motorun dönüşüne göre serçe parmağın teta açılarının beta açısına göre değişimi görülmektedir. 6. Konumdan 7. Konuma geçerken serçe parmağın açı değerleri incelendiğinde bu değerlerin serçe parmak için kritik bir değer olduğu gözükmektedir (Tablo 4) çünkü beta değeri küçüldükçe yani parmak kapandıkça teta2 değerinin küçüldüğü ve parmağı ters olarak büktüğü gözükmektedir.

Tablo 4. Serçe parmağın konum analizi

Konum	beta	teta	teta1	teta2
1	105	13,24	16,38	26,01
2	100	14,67	21,82	28,68
3	95	16,09	26,67	32,58
4	90	17,5	31,06	36,99
5	85	18,89	35,07	40,82
6	80	20,25	38,75	39,44
7	79	20,52	39,44	42,52

4.2. Yüzük Parmağın Konum Analizi

Tablo 5'te MG945 servo motorun dönüşüne göre yüzük parmağın teta açılarının beta açısına göre değişimi görülmektedir.

Tablo 5. Yüzük parmağın konum analizi tablosu

Konum	beta	teta	teta1	teta2
1	105	22	4,41	28,65
2	100	23,4	8,49	28,89
3	95	24,79	12,23	29,59
4	90	26,17	15,67	30,67
5	85	27,52	18,86	32,06
6	80	28,85	21,82	33,67
7	79	29,11	22,38	34,07

1.1. Orta Parmağın Konum Analizi

Tablo 6'da MG945 servo motorun dönüşüne göre orta parmağın teta açılarının beta açısına göre değişimi görülmektedir.

Tablo 6. Orta parmağın konum analizi tablosu

Konum	beta	teta	teta1	teta2
1	105	26,12	0	31,56
2	100	27,52	2,55	31,32
3	95	28,9	5,8	31,44
4	90	30,26	8,79	31,86
5	85	31,61	11,55	32,53
6	80	32,92	14,09	33,39
7	79	33,19	14,58	33,58

4.3. İşaret Parmağın Konum Analizi

Tablo 7’de MG945 servo motorun dönüşüne göre işaret parmağın teta açılarının beta açısına göre değişimi görülmektedir.

Tablo 7. İşaret Parmak İçin Teta’nın Beta’ya Göre Değişimi

Konum	beta	teta	teta1	teta2
1	105	23,35	3,7	25,01
2	100	24,75	7,81	25,36
3	95	26,14	11,58	26,17
4	90	27,51	15,06	27,36
5	85	28,86	18,3	28,88
6	80	30,19	21,31	30,64
7	79	30,45	21,89	31,02

4.4. Başparmak Konum Analizi

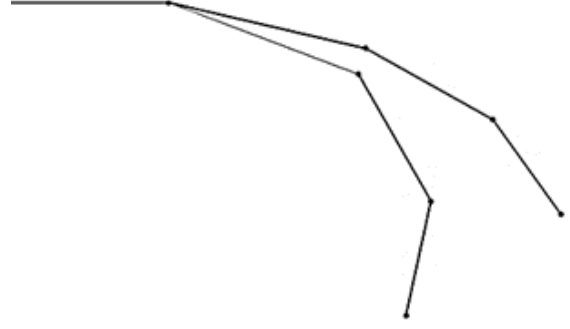
Tablo 8’de SG90 servo motorun dönüşüne göre işaret parmağın teta açılarının beta açısına göre değişimi görülmektedir.

Tablo 8. Başparmak için Teta’nın Beta’ya göre değişimi

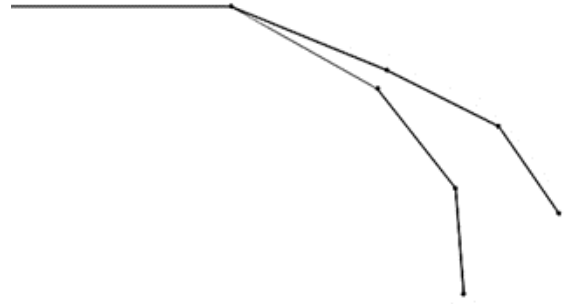
Konum	beta1	teta3	teta4
1	132	19,16	10
2	125	22,82	16,02
3	120	25,21	19,31
4	115	27,57	22,18
5	110	29,91	24,73
6	105	32,25	27
7	100	34,57	29,03
8	95	36,84	30,83
9	90	39,07	32,41
10	85	41,21	33,79

4.5. Parmakların Tam açık ve Tam Kapalı Konumları

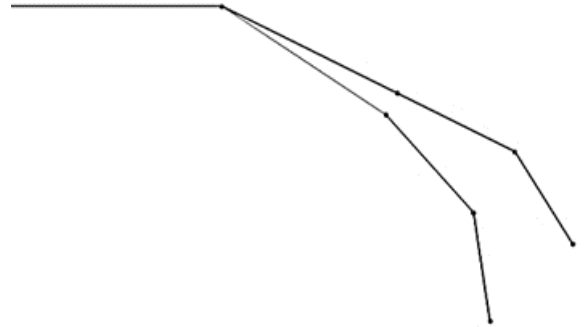
Her bir parmağın tam kapalı ve tam açık konumu için oluşturulan modellerde işaret, orta, yüzük ve serçe parmak ortalama aynı kapalı konuma gelmektedir ve her bir eklem noktasının hareketi sağlanmaktadır. Şekil 8, 9, 10, 11 ve 12 incelendiğinde, bu değerlerin 0,5 L’lik standart bir su şişesini tutabilecek kabiliyette olduğu açıkça gözlemlenmektedir.



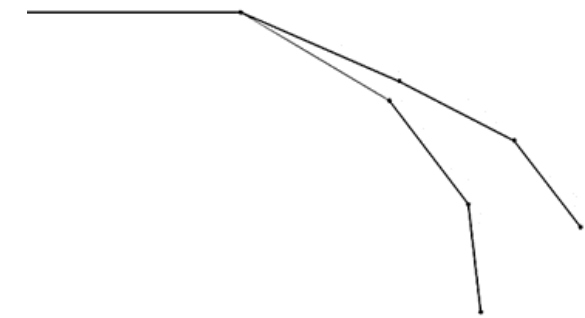
Şekil 8. Serçe parmağın açık ve kapalı konumu



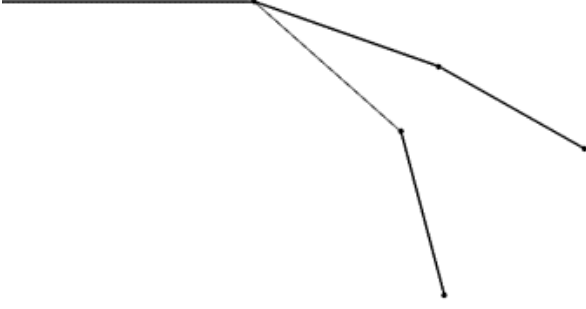
Şekil 9. Yüzük parmağın açık ve kapalı konumu



Şekil 10. Orta parmağın açık ve kapalı konumu



Şekil 11. İşaret parmağının açık ve kapalı konumu



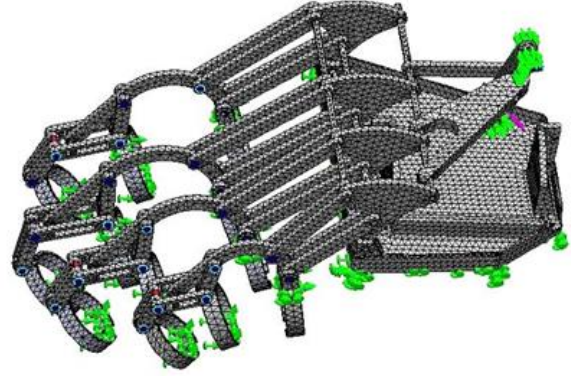
Şekil 12. Başparmağın açık ve kapalı konumu

Tablo 7 ve Şekil 12'den anlaşılacağı üzere başparmaktaki teta4 açısının beta1 açısına göre değişimi için kritik bir açı değeri mevcut değildir. Yani teta3 açısı ve teta4 açısı orantılı bir şekilde büyümektedir hiçbir şekilde beta1 açısı küçülmeye giderken teta3 ve teta4 açılarında ani bir azalış gözlenmez. Dolayısıyla Serçe Parmak mekanizmasında karşılaşılan istenmeyen kapanma olayına başparmak mekanizmasında rastlanmamaktadır. Tasarımda başparmak için kullanılan mekanizmanın diğer parmaklar için kullanılan mekanizmalardan farklı olmasının bu durum üzerinde etkisi büyüktür. Bu nedenle Teta4 değerinin veya diğer ilgili açıların belirli bir açıdan sonra küçülmeye gitmesi gibi bir durum söz konusu değildir. Çalışmamızda servo motorların dönüş açıları parçaların birbirlerine çarparak zarar görmesini engellemek sebebiyle başlangıç ve son durum için 55° ile sınırlanmıştır.

5. Elin Başlangıç Konumu İçin Statik Analizi

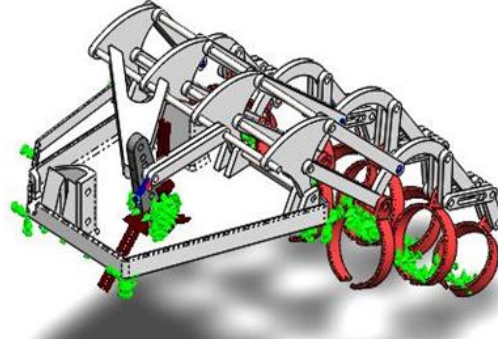
Elin başlangıç konumu servo motorun ilk hareket haline geçme konumudur. Parmakların üzerine gelen kuvvetler elini hareket ettiremeyen bir kişinin elini kapatmasına yetmek zorunda olduğu için çalışma titreşimi ve motorun verdiği ilk moment çok önemlidir. Bu nedenle hareket iletimi olabildiğince en kısa yoldan olmalıdır ve sürtünmeler minimize edilmelidir. Bu nedenle bu çalışmada yapılan tasarımda sürtünmeler azaltılmaya çalışılmış, böylece motordan alınan gücün azalması engellenmeye çalışılmıştır. Yüksek tork değerlerinin elde edilebilmesi için güç kaynağı (5V 2.1A) motora uygun seçilmiştir. MG945 servo motor kullanılan güç kaynağına göre verdiği tork değeri yaklaşık olarak 5kg.cm dir. Bu tork değeri dört parmağı birden hareket ettireceğinden dört parmağın hareketinin analizi bu değere göre yapılmıştır. Yapılan analiz işlemlerinde analiz sonuçlarını etkilemeyen fakat analizin oluşmasını yavaşlatan servo motorlar SolidWorks montajı içerisinde pasifleştirilmiştir. Montaj yapılırken parçalar arasında 0,1mm'lik boşluklar bırakılmıştır. Her bir birleşme

noktası için pim atanmış ve analiz yapılan konum için pimlerde rotasyon kapatılmıştır (Şekil 13).



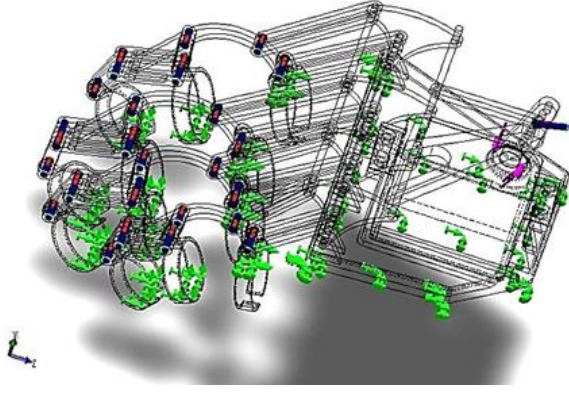
Şekil 13. Montajlanmış exoskeleton için yapılan mesh

Şekil 13'ten görüleceği üzere mesh boyu 2mm olarak seçilmiştir. Çalışmada parça kalınlıkları da 2mm olarak seçildiği için mesh kalitesi oldukça yüksektir. Ayrıca dört nokta bayrak elemanına bağlı pimlerdeki gerilme değerlerinin daha hassas çıkması için 1mm'lik mesh kontrolü uygulanmıştır.



Şekil 14. Montaj: sabit elemanlar ve tork

Motorun hareketini parmaklara iletecek olan yüzükler, iç yüzeylerinden sabitlenmiştir (Şekil 14). Böylece reaksiyon kuvvetleri ölçülebilmektedir. Analizin daha basit ve anlaşılır olabilmesi için MG945 servo motor analizden çıkarılarak yerine torku ileten silindirik bir parça konulmuştur.



Şekil 15. Montaj pim bağlantısı

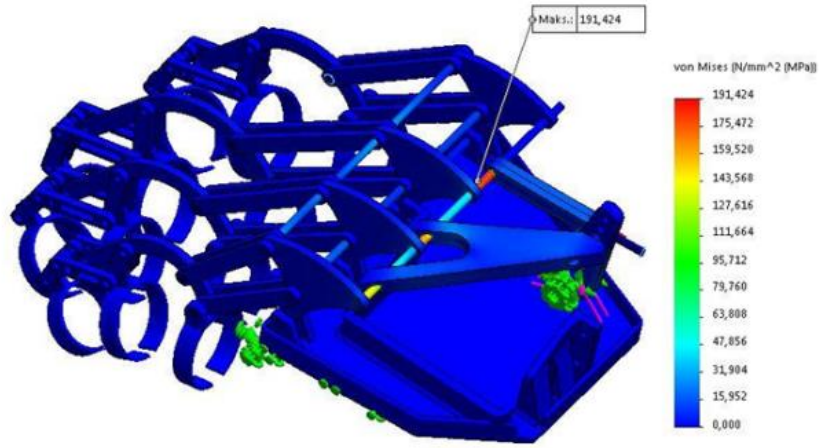
Ayrıca güvenlik faktörüne bakıldığında servo motorun uyguladığı 5kg.cm tork değeri için bütün parçalar en az emniyet katsayısı 2 olarak emniyetlidir. Bu durumda emniyetli çalışma söz konusudur. Çıkan analiz

Şekil 15'teki montaj üzerinde mavi renk ile gösterilen parçalar pim bağlantısını göstermektedir ve üzerlerindeki kırmızı renkler ise belirlenen konum için rotasyonun kapalı olduğunu belirtmektedir.

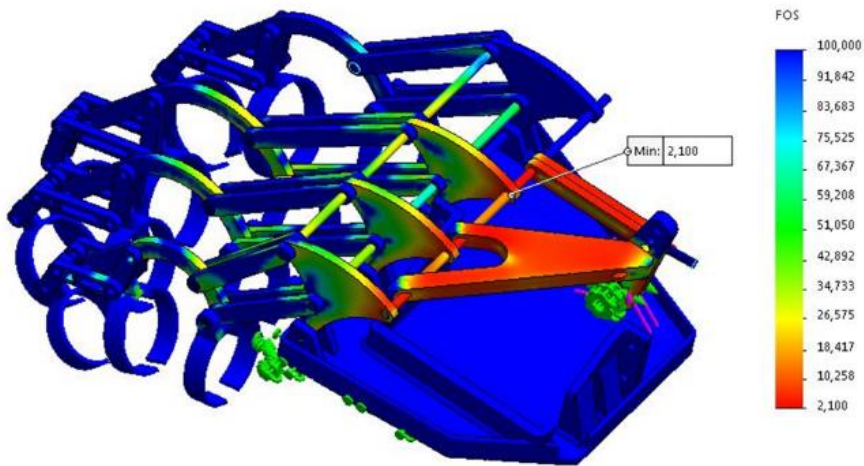
5.1. Analiz Sonuçları

Yapılan Statik analiz sonucunda taşıyıcı elemana bağlı olan ve motordan gelen kuvveti ileten büyük pim bağlantısında maksimum 191MPa gerilme tespit edilmiştir. Fakat Şekil 16'da gösterilen pimin mukavemet değeri bu değer üzerinde olduğu için emniyetli çalışmaktadır.

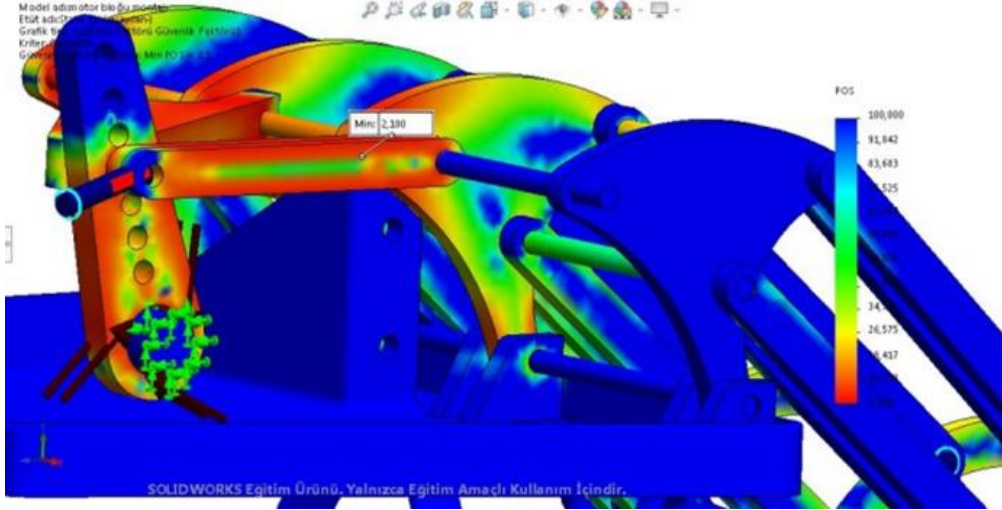
sonuçlarına göre minimum FOS (emniyet katsayısı değeri) 2,1 olarak taşıyıcı parçada bulunmuştur (Şekil 17, 18).



Şekil 16. Statik analiz Von Mises Gerilmesi



Şekil 17. Statik analizi güvenlik faktörü



Şekil 18. Statik analizi güvenlik faktörü detay

Statik analiz sonuçları incelendiğinde özellikle 30mm taşıyıcı parçada yüksek miktarda gerilme olduğu görülmektedir. Bu parça PLA malzemeden üretilmiştir (akma gerilmesi yaklaşık 70MPa). Emniyet faktörü 2 olarak seçilmesi durumunda SolidWorks’de yapılan analiz verilerine göre uygulanacak maksimum kuvvet yaklaşık 42N olacaktır, dolayısıyla emniyetli bir şekilde çalışacaktır. Ancak uzun süreli ve tekrarlı yüklerde bu parçanın ince kesitinden dolayı hasara uğraması mümkündür. Bu sorun bu parçanın 3B yazıcı ile kolay bir şekilde çıktı alınması ile çözülebilir.

6. 3B Yazıcı ile Parça İmalatı ve Dış İskeletin Montajı

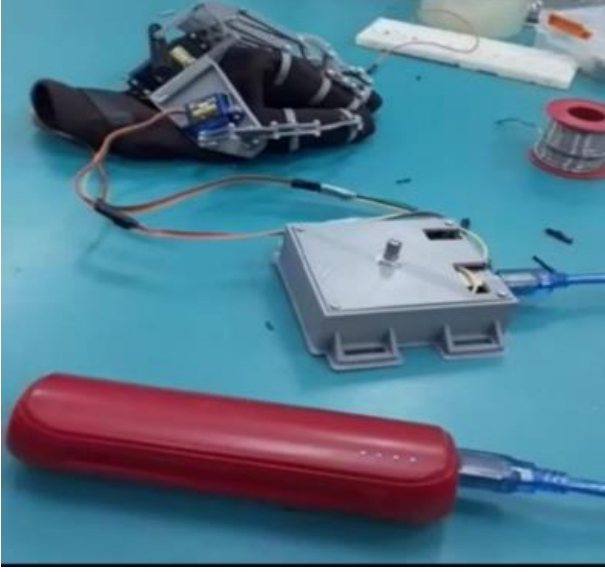
Katı modeli oluşturulan tasarımın 3B yazıcı ile imalatında tüm parçalar için doluluk oranı %100, çizgi aralığı olarak 0.15 mm, baskı sıcaklığı 212 °C, cam tabla sıcaklığı 79 °C ve baskı hızı 20 mm/s baskı parametreleri olarak seçilmiştir.

Katı modeli oluşturulan tasarımda motorlar hareketi sağlamaya uygun konumlara yerleştirilmiştir. Sonrasında elin doğal kapanma hareketinin simülasyonu yapılmıştır. Tam hareket aşağıdaki fotoğraf dizisinde gösterilmektedir.

Şekil 19 ve Şekil 20’de görüldüğü üzere, tasarımın el üzerinde kaymasını önlemek için servo motoru tutan ana şasi parçasının altına silikon parça yerleştirilmiştir. Servo motorlara sinyal gönderen ve gücünü sağlayan Arduino mikroişlemci kartını ve güç kaynağını tasarımın yakınında tutabilmek amacıyla el ateli kullanılmıştır.



Şekil 19. Üretilen prototipin parmaklar tam kapalı ve tam açık görüntüleri



Şekil 20. Prototip dış iskelet elin elektriksel bağlantıları

Kullanışlı bir tasarım olması için konstrüksiyon eldiveni ile tasarlanan dış iskelet el ile kullanacak olan kişinin eldiveni kolayca eline geçirip hızlı bir şekilde kullanabilmesi amaçlanmıştır. Bağlantı elemanları olarak cıvata kullanılmıştır. Cıvata kullanılarak eklemler arasındaki hareket iletimi ve sürtünmeden kaynaklanan olumsuz etkenlerin azaltılması hedeflenmiştir.

7. SONUÇ

Bu çalışmada, doğal kapanma hareketi katı modelleme programı kullanılarak ile oluşturulan mekanizmalar kullanılarak dış iskelet el tasarımı gerçekleştirilmiş, elin doğal kapanma hareketi incelenmiştir. Tasarlanan prototipin, gerçek ele olabildiğince yakın bir hareketi olması gerektiğinden bu önemli bir noktadır. Kullanılan malzemeler ve üretim süreci sayesinde hafif bir dış iskelet el üretilmiştir. Pasif hareketi gerçekleştirmek için servo motorlar, katı modelde hareket analizi ile belirlenen yerlere montajlanmıştır. Her parmakta hareket analizi yapılmış, piyasadaki hafif ve boyut kısıtına uygun güçlü servolar kullanılarak sistemin fonksiyonel hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Tasarlanan mekanik sistemin prototipinin üretilmesi için 3B yazıcıda baskı alınırken mümkün olan en kısa üretim süresinde, en iyi mukavemet elde edilmeye çalışılmıştır. Model PLA malzeme kullanılarak basılmıştır. İşlem, tek bir adımda, tüm modeli bir adımda üretmek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Yazım işlemi, toplamda bütün tasarım elemanlarıyla birlikte 30 saat sürmüştür. Baskı %100 doluluk oranıyla yapılmıştır. Yüzey kalitesi ve

mukavemet açısından en uygun baskı parametreleri seçilmeye çalışılmıştır.

Ayrıca kullanıcının kolay kullanımı için el ateli ve eldiven gibi kullanımı kolay ve bu nedenle de daha hızlı bir şekilde el üzerine yerleştirilmesi sağlanan aparatlar konstrüksiyona eklenerek kullanılmıştır.

Küçük ebatlı ve düşük ağırlığa sahip yüksek kapasiteli servo motorlar ve bataryalar kullanılarak sistem hafifletilmiştir. Ayrıca bu ağırlık azaltılmasına önemli bir katkı da 3B yazıcı kullanılarak dış iskelet parçalarının hafif ve mukavemetli PLA malzemeden üretilmesidir. Tüm parçalar eklendiğinde toplam ağırlığı 450g civarında olan çok hafif ve kullanıcı dostu bir dış iskelet sistemi oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

Başaran, P. Ö. Y., & Bölükbaşı, A. T. D. (2009). İnme sonrası hemiplejik el fonksiyonlarının geliştirilmesinde ayna karşısında nöromusküler elektrik stimülasyonunun etkisi (Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Fizik Tedavi ve Rehabilitasyon Anabilim Dalı).

Beydoğan, A., & Öneş, K. (2008). Serebrovasküler Olay Geçiren Hastalarda Volar Statik El-El Bileği Ortez Kullanımının Etkinliği. Uzmanlık tezi, İstanbul.

Bouzit, M., Popescu, G., Burdea, G., Boian, R. (2002, March). The Rutgers Master II-ND force feedback glove. In Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002 (pp. 145-152).

Brokaw, E. B., Black, I., Holley, R. J., & Lum, P. S. (2011). Hand Spring Operated Movement Enhancer (HandSOME): a portable, passive hand exoskeleton for stroke rehabilitation. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 19(4), 391-399.

Heller, A., Wade, D. T., Wood, V. A., Sunderland, A., Hewer, R. L., & Ward, E. (1987). Arm function after stroke: measurement and recovery over the first three months. Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry, 50(6), 714-719.

Heo, P., Gu, G. M., Lee, S. J., Rhee, K., & Kim, J. (2012). Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13(5), 807-824.

- Iqbal, J., Khan, H., Tsagarakis, N. G., Caldwell, D. G. (2014). A novel exoskeleton robotic system for hand rehabilitation—conceptualization to prototyping. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 34(2), 79-89.
- Jo, I., and Bae, J. (2017). Design and control of a wearable and force-controllable hand exoskeleton system. *Mechatronics*, 41, 90-101.
- Ma, Z., Ben-Tzvi, P. (2015). Design and optimization of a five-finger haptic glove mechanism. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7 (4), 041008 (8 pages), 10.1115/1.4029437
- Marconi, D., Baldoni, A., McKinney, Z., Cempini, M., Crea, S., & Vitiello, N. (2019). A novel hand exoskeleton with series elastic actuation for modulated torque transfer. *Mechatronics*, 61, 69-82.
- Park, Y., Jo, I., Lee, J., Bae J. (2018). A dual-cable hand exoskeleton system for virtual reality. *Mechatronics*, 49, 177-186, 10.1016/j.mechatronics.2017.12.008
- Polygerinos, P., Galloway, K. C., Savage, E., Herman, M., O'Donnell, K., Walsh, C. J. (2015, May). Soft robotic glove for hand rehabilitation and task specific training. In 2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 2913-2919). IEEE.
- Sandoval-Gonzalez, O., Jacinto-Villegas, J., Herrera-Aguilar, I., Portillo-Rodriguez, O., Tripicchio, P., Hernandez-Ramos, M., Flores-Cuautle, A., Avizzano, C. (2016). Design and development of a hand exoskeleton robot for active and passive rehabilitation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(2), 66.
- Sarakoglou, I., Brygo, A., Mazzanti, D., Hernandez, N. G., Caldwell, D. G., Tsagarakis, N. G. (2016, October). HEXOTRAC: A highly under-actuated hand exoskeleton for finger tracking and force feedback. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 1033-1040). IEEE.
- Son, B., and Park, J. (2018, October). Haptic feedback to the palm and fingers for improved tactile perception of large objects. In Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (pp. 757-763).
- Stilli, A., Cremonesi, A., Bianchi, M., Ridolfi, A., Gerii, F., Vannetti, F., Wurdemann, H.A., Allotta, B., Althoefer, K. (2018). AirExGlove—a novel pneumatic exoskeleton glove for adaptive hand rehabilitation in post-stroke patients, 2018 IEEE international conference on soft robotics (RoboSoft). 579–584. 10.1109/ROBOSOFT.2018.8405388.
- Taub, E., Uswatte, G., & Elbert, T. (2002). New treatments in neurorehabilitation founded on basic research. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(3), 228-236.
- Thompson-Bean, E., Steiner, O., McDaid, A. (2015). A soft robotic exoskeleton utilizing granular jamming. 2015 IEEE International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 165–170. 10.1109/AIM.2015.7222526.
- Turner, M.L., Gomez, D.H., Tremblay, M.R., Cutkosky, M.R. (1998). Preliminary tests of an arm-grounded haptic feedback device in telemanipulation. *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division DSC*, 64, 145-149.
- Yap, H. K., Lim, J. H., Nasrallah, F., Goh, J. C., Yeow, R. C. (2015, May). A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness. In 2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 4967-4972). IEEE.
- Tsiftsis, K., and Choriantopoulos, A. (2009). Data mining techniques in CRM: *Inside Customer Segmentation*. John Wiley & Sons, Ltd.