

REHABİLİTASYON EGZERSİZLERİ İÇİN BİR PARMAK DIŞ İSKELET MEKANİZMASI

Furkan KIPCAK, Emirhan İNANÇ, Mert ÖZKAN, Rüstem Can ÖZTÜRK, Ege Toprak GÜLEÇ,
Gökhan KİPER

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü 35430,
İZMİR

furkankipcak@std.iyte.edu.tr, emirhaninanc@std.iyte.edu.tr, mertozkan@std.iyte.edu.tr,
rustemozturk@std.iyte.edu.tr, egegulec@std.iyte.edu.tr, gokhankiper@iyte.edu.tr

Bu çalışmada, özellikle inme ve yaralanmalar sonrasında rehabilitasyon amaçlı kompakt, düşük maliyetli ve iki serbestlik dereceli bir parmak dış iskeletinin tasarımı, prototip üretimi ve testleri sunulmuştur. Kompakt bir tasarım olması çalışmanın özgün yanı olarak parmak etrafında fazla-kısıtlı çift-küresel 6-çubuk mekanizması kullanılmıştır. Önce bir el işaret parmağının hareketi tespit edilmiş ve bu hareket uyarınca 6-çubuk mekanizmasının kinematik sentezi yapılmıştır. Literatürdeki kuvvet değerleri uyarınca iş hesabı yapılarak motor-tork gereksinimleri hesaplanmış ve uygun motorlar seçilmiştir. Servo motorların denetim için Arduino kartı ve Matlab Simulink kullanılmış ve mekanizma uzuvları büyük ölçüde 3D yazıcıda üretilmiş olup kişiye özel üretime yönelik bir sistem mimarisi oluşturulmuştur. Son olarak üretilen prototipin işlevsellik testleri gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan çift-küresel 6-çubuk mekanizmalı bu ilk prototip ancak kavram kanıtlama amaçlı olup sonuçlar ile ileriki çalışmalara ışık tutmak hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Parmak dış iskeleti, rehabilitasyon, çift-küresel 6-çubuk mekanizması

A FINGER EXOSKELETON MECHANISM FOR REHABILITATION EXERCISES

ABSTRACT

This paper addresses the design, prototyping and tests of a compact, cost-effective and two-degree-of-freedom finger exoskeleton system for rehabilitation of after-stroke and injured patients. As the main novelty of the system, an over-constrained double-spherical 6R mechanism is used around the finger to obtain a compact design. First, the desired motion of an index finger is determined and kinematic synthesis of the 6R mechanism is performed accordingly. Motor torque requirements are calculated using virtual work principle based on using force values available in the literature. Then appropriate motors are selected. Arduino control card and MATLAB Simulink are used to control the servo-motors, whereas the mechanism links are mainly 3D-printed which enables a system architecture for customized production. Finally, functional tests for the built prototype are carried out. This is merely a first prototype with a double-spherical 6R mechanism and serves as a proof-of-concept. The results may shed light to further studies.

Keywords: Finger exoskeleton, rehabilitation, double-spherical 6R mechanism

1. GİRİŞ

İnme ya da yaralanma sonrasında motor sınırlarında oluşan hasarlar el ve parmaklarda işlev kaybına neden olabilmektedir. İşlev kaybı oluşan uzuvların güçlendirilerek tekrar işlev kazanması için rehabilitasyon süreci önem arz etmektedir. Günümüzde büyük ölçüde uzman personel yardımı ile gerçekleştirilen

rehabilitasyon süreci hem hasta, hem de uzman için çok zahmetli ve yorucu olabilmektedir. Rehabilitasyon sürecinde tutarlılık ve rutin önemli olup düzenli egzersizler ile parmakların güçlendirilmesi ve iyileşmenin hızlanması sağlanır [1]. Robotik sistemlerin kullanılması ile rehabilitasyonda geleneksel yöntemlere göre daha hızlı ve daha ekonomik sonuca

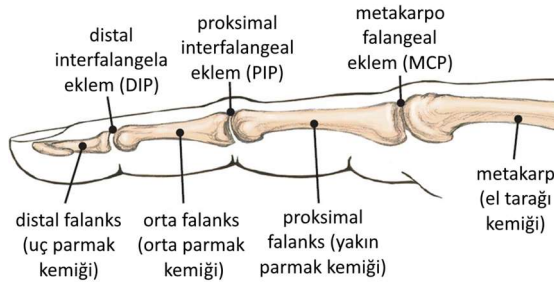
ulaşılabilirliği gösterilmiştir [2]. Hassas ve tekrarlanabilir hareketi sağlayabildikleri için robotik sistemlerin rehabilitasyonda kullanımı uygun olmaktadır [3-4]. Yue vd. 1990lardan beri geliştirilen el rehabilitasyon robotları ile ilgili detaylı bir inceleme sunmuşlardır [5].

Bu çalışmanın amacı, parmakları hareket edebilen ancak güçlendirme egzersizleri yapması gereken hastalara yönelik olmak üzere yeni bir parmak dış iskelet sistemi geliştirilmesidir. Sisteme İngilizce adının baş harfleri ve aynı zamanda çalışma grubundaki kişilerin baş harflerinden oluşan FEMRE adı verilmiştir.

Rehabilitasyon amaçlı parmak dış iskelet mekanizmalarının detayına girmeden önce parmak anatomisi ve el rehabilitasyon egzersizlerini irdelemek gerekmektedir.

1.1. Parmak Anatomisi ve Rehabilitasyon Egzersizleri

Elin dört parmağında üç uzuv ve üç eklem bulunmaktadır. Üzuvler el tarağı kemiğine (metakarp) bağlı olan proksimal (yakın), orta ve distal (uç) parmak kemikleridir (falankslar). Bu kemiklerin aralarındaki bağıl hareketi sağlayan eklemler ise sırası ile metakarpo falangeal (MCP) eklem, proksimal interfalangeal (PIP) eklem ve distal interfalangeal (DIP) eklemdir (Şekil 1).



Şekil 1. Rehabilitasyon egzersizlerinde bazı el konumları [6]

İşaret parmağının düzlemsel hareketi her ne kadar üç serbestlik dereceli olarak görülse de orta ve uç parmak uzuvlarının hareketleri genelde birbirine bağlı olarak gerçekleştiği için genelde düzlemsel iki serbestlik dereceli hareket olarak modellenmektedir. Bu iki serbestlik derecesini üç parmak uzvunun dümdüz halde ele göre MCP eklemi etrafında dönmesi (MCP hareketi) ve MCP eklemi hareket etmezken PIP ve DIP eklemlerinin birlikte hareket etmesi (PIP/DIP hareketi) olarak ifade edebiliriz.

Parmakların düzlemsel hareketi ile yapılan rehabilitasyon egzersizleri incelendiğinde hem MCP hem de PIP/DIP hareketinin bağımsız ya da birlikte yapılması gerektiği görülür. Bazı temel el rehabilitasyon egzersizlerinde el pozları Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Rehabilitasyon egzersizlerinde sık kullanılan bazı el pozları [7]

1.2. Parmak Dış İskelet Mekanizmaları

Literatürde pek çok parmak dış iskelet mekanizması bulunmaktadır. Troncossi vd. 60 işaret parmağı dış iskelet mekanizması listelemiş olup bunlardan 37si tek serbestlik dereceli mekanizmalardır [8]. Tek serbestlik dereceli mekanizmalar incelendiğinde genellikle parmak boyutuna göre oldukça büyük mekanizmaların tasarlandığı görülmektedir (örn. [9-10]). Öte yandan nispeten kompakt tasarımlar da bulunmaktadır (örn. [11]). Ancak bir önceki bölümde açıklandığı üzere tek serbestlik dereceli bir mekanizma ile ancak belirli bir rehabilitasyon egzersizi (genellikle yumruk yapma açma) yapılabilmektedir.

MCP ve PIP/DIP hareketlerine bağımsız izin veren iki serbestlik dereceli parmak dış iskelet mekanizma örnekleri de bulunmaktadır. Carbone vd. [12] rehabilitasyon amaçlı bir dış iskelet mekanizması geliştirmiş, Lucas vd., [13] ise engelli bir kişinin bir nesneyi tutma hareketini sağlamak üzere bir parmak iskelet mekanizması geliştirmişlerdir. Her iki

mekanizmanın da istenilen hareketi sağladığı, ancak pek kompakt tasarımlar olmadıkları görülmektedir.

Mekanizma parçaları talaşlı imalat, lazer kesim, döküm ya da 3D yazıcı ile üretilebilmektedir. 3D yazıcı ile üretim düşük maliyet ve tasarım esnekliği sağlamaktadır. Pek çok parmak/el dış iskelet mekanizmasının üretiminde ergiyik biriktirmeli modelleme (İng. fused deposition modelling – FDM) kullanıldığı görülmektedir [14-16]. 3D yazıcı ile üretimde malzeme, yoğunluk, mukavemet, direngenlik, üretim maliyeti gibi pek çok parametre bulunmaktadır. ABS ve PLA sıklıkla kullanılan plastik malzemeler olup ABS malzemeden üretilen parçalar, PLA ile üretilenlere göre daha mukavim ve daha esnek olmaktadır [17].

Parmak dış iskelet mekanizmalarında elektrik motorları, pnömatik eyleticiler, şekil hafızalı alaşımlar gibi farklı eyletici sistem çözümleri kullanılmakla birlikte pille enerji beslemesi, yaygın ve çok çeşitte bulunması ve hassas hareket sağlaması gibi nedenlerle dönel ya da doğrusal doğru akım elektrik motorları en sık kullanılan eyleticiler olarak görülmektedir. Motor-mekanizma arasındaki güç aktarımı için ise dişli, kayış/kablo-makara ya da kablo-kasnak (İng. capstan drive) sistemleri kullanılmaktadır.

Düzlemsel parmak hareketi için literatürde genellikle düzlemsel mekanizmalar geliştirildiği görülmektedir. Bu çalışmada hedeflenen kompakt, düşük maliyetli ve iki serbestlik dereceli mekanizma için farklı kavramsal tasarımlar irdelendikten sonra MCP hareketi bir 4-çubuk mekanizması ile sağlanırken, özgün bir yapı olarak PIP/DIP hareketi için parmak uzuv ve mafsallarının da mekanizmanın birer parçası olduğu bir çift-küresel 6-çubuk mekanizması kullanılmıştır [18-19].

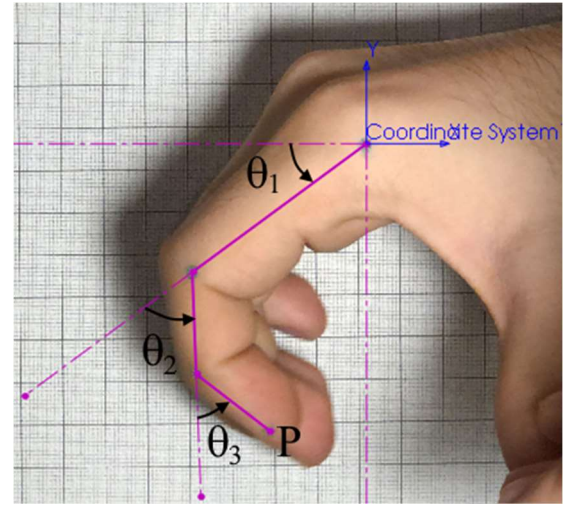
2. MEKANİZMA TASARIMI

Bir rehabilitasyon dış iskelet mekanizmasının verimli çalışması için kişiye özel tasarlanması pratik olmaktadır. Bu çalışmadaki tasarım yazarlardan Emirhan İnanç'ın parmak ölçümlerine göre yapılmıştır.

2.1. Mekanizma Tasarımı İçin Geometrik İsterlerin Belirlenmesi

MCP hareketi MCP eklemi etrafında parmağın 90° dönmesinden ibaret olup bu hareketi sağlayan bağlama açısı en iyilenmiş bir çift-sarkaç mekanizması tasarımı yapılmıştır [20].

PIP/DIP hareketi için ise parmak uzuv boyları ve parmak hareketi ölçümleri gerekmektedir. Uzuv boyları için [21]'den faydalanılmış, eklem açılarının ölçümü için ise [22]'dekine benzer bir yol izlenmiştir. Şekil 3'te görüldüğü üzere üç eklemi kalemle işaretlenmiş olan sağ el bir grafik kağıdı üzerinde hareket ettirilerek bir kamera ile seri fotoğraf çekimi yapılmıştır. Ayrıca toplam parmak boyu bir cetvel ile ölçülerek çekilen fotoğraflar bir görüntü düzenleme programında parmak boyuna oranla ölçeklendirilmiştir. Bir katı modelleme programında MCP eklem noktası merkezli olarak çizilen bir eksen takımına göre her pozda uzuv boyutları ve eklem açıları 12 pozda ölçülmüştür. Ölçümlere göre en küçük kareler yaklaşımı kullanılarak uzuv boyutları 49.6 mm, 20.7 mm ve 20.3 mm olarak belirlenmiştir.

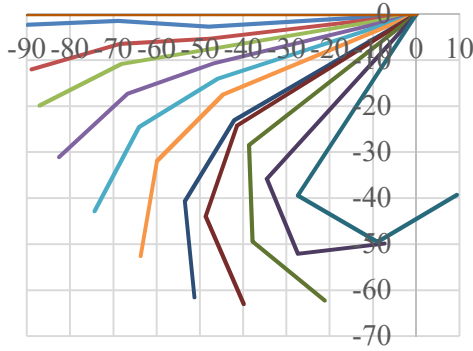


Şekil 3. Parmak uzuv boylarının ve eklem açılarının ölçümü

Parmak ucu koordinatları (x_p , y_p) (mm) ve her uzvun bir önceki uzva göre saat yelkovanının tersi yönünde ölçülen uzuv açısı ($^\circ$) değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo 1'deki değerler uyarınca tüm parmak pozları Excel'de çizdirilmiştir (Şekil 4).

Tablo 1. Parmak ucu koordinatları (x_p , y_p) ve uzuv açı değerleri

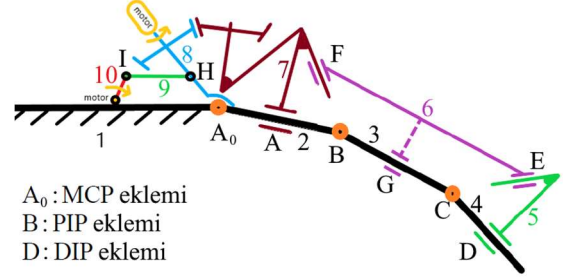
Poz	x_p (mm)	y_p (mm)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ_3 (°)
1	-91.38	-2.04	3.3	-6.83	5.92
2	-90.25	-11.69	6.35	-3.19	12.15
3	-88.09	-19.53	9.06	-0.15	16.56
4	-83.84	-30.67	12.8	5.61	22.62
5	-75.97	-42.73	17	12.96	30.78
6	-65.39	-53.31	21.35	22	36.43
7	-52.84	-62.42	28.68	28.44	38.94
8	-40.89	-64.03	30.31	39.53	44.84
9	-21.12	-63.02	36.34	55.89	50.29
10	-7.27	-59.49	43.92	65.98	52.83
11	-2.67	-49.80	48.2	80.88	56.99
12	10.32	-38.33	55.16	96.17	57.66



Şekil 4. Ölçümlere göre 12 parmak pozunu

2.2. Çift-Küresel 6-Çubuk Mekanizmasının Kinematik Sentezi

PIP/ DIP hareketi için Tablo 1'de son iki kolondaki θ_2 ve θ_3 açıları kullanılarak Şekil 5'te görülen çift-küresel 6-çubuk mekanizmasının işlev sentezi yapılmıştır. Bu mekanizmada 2, 3 ve 4 nolu uzuvlar parmağın uzuvları olup 3 uzvuna göre 2 ve 4 uzuvlarının hareketleri B ve C noktaları olarak görülen PIP ve DIP eklem açıları (θ_2 ve $180^\circ - \theta_3$) ile ifade edilmektedir. PIP (şekle dik), A ve F mafsalsel eksenleri B noktasında, DIP (şekle dik), D ve E eksenleri ise C noktasında kesilmektedir. Bu şekilde oluşan 6-uzuvlu ABCDEF devresi, aslında 3-2-7-6 ve 3-4-5-6 uzuvlarından oluşan ve sırası ile B ve C merkezli iki küresel dört-çubuk devresinden ibarettir [18]. Konstürksiyon gereği 6 uzvu 3 uzvu etrafında G eksenini etrafında dönme hareketi yapmaktadır, ancak pratikte bu uzuvlar arasında herhangi bir döner mafsalsel bulunmamaktadır (bu yüzden 6-3 bağlantısı çizgili olarak gösterilmiştir). Alizade vd.'nin [19] çift-küresel 6-çubuk mekanizması sentez yöntemine benzer bir yöntem ile işlev sentezi yapılmış ve sırası ile A-F, F-G, F-E, GE ve E-D eksenleri arasındaki açılar 131.6° , -48.4° , 15° , -34.7° ve 145.6° olarak tasarlanmıştır.



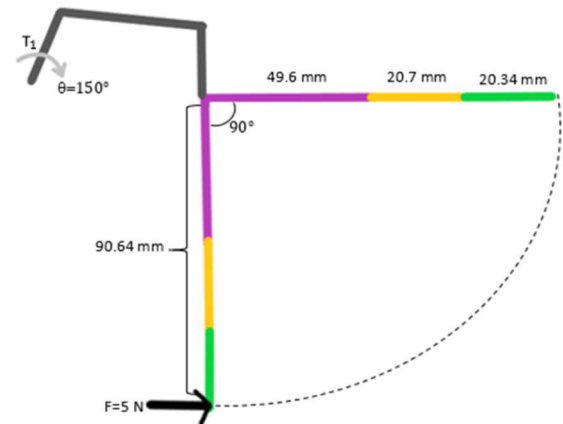
Şekil 5. Çift-küresel 6-çubuk mekanizması

3. MOTOR SEÇİMİ

Motor tork gereksinimlerini hesaplamak parmak ucuna etki eden kuvvet değerlerine ihtiyaç vardır. İnme ya da kaza sonrası durumlarda, eli açılmış ve parmaklar kasılmadan hareket edebilen hastaların parmaklarını güçlendirmek için bir dış iskelet mekanizması tasarımı yapılmakta olduğundan sağlıklı bir elde parmak ucuna etki eden kuvvet değerlerine göre tork hesabı yapılmıştır. El parmakları kapanırken 5-ila-20 N, açılırken ise 2-ila-20 N kuvvete dayanabilmektedir [23]. Ancak ele herhangi bir dış etki etkemediği durumda literatürde genellikle parmak ucuna ortalama 5 N kuvvet etki etmesine göre tasarım yapıldığı görülmüştür [24-26].

MCP hareketini yapmak için Şekil 5'te 10 uzvunu döndürecek şekilde 1-10-9-8 uzuvlarından oluşan 4-çubuk devresinin 10 uzvu eyletilmektedir. Hobi servo motor kullanılacağı ön görülerek girdi uzvunun 150° dönüşü için hesap yapılmıştır. MCP hareketinde parmaklar düz şekilde iken parmak ucuna 5 N kuvvet uygulandığında (Şekil 6) yapılan iş $5\pi/6$ radyana bölünerek gerekli motor torku hesaplanır:

$$T_1 = (5 \text{ N})(90.6 \text{ mm})(\pi/2)/(5\pi/6) = 0.27 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (1)$$



Şekil 6. MCP hareketi için kuvvet/tork senaryosu

Çift-küresel 6-çubuk mekanizmasına Şekil 5'te gösterildiği gibi bir doğrusal redüksiyon ile hareket girdisi sağlayan ve yakın parmak kemiği üzerine monte edilecek motorun tork gereksiniminin belirlenmesi için Şekil 4'te görülen parmak hareketinde parmak ucunda uç parmak uzvuna dik olarak etki eden 5 N kuvvete göre sana iş prensibi uygulanmıştır. Öncelikle Tablo 1'de verilen ardışık parmak ucu koordinatları arasındaki mesafeler

$$d_i = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} ; j = i + 1 \quad (2)$$

ile hesaplanmıştır. Her konumda uç parmak uzvunun yörüngesi yaklaşık olarak bir önceki ve bir sonraki konuma göre belirlenerek ve parmak ucuna dik olarak etki eden kuvvetin bu yörüngeye olan teğet ile yaptığı açı, α , hesaplanarak kuvvetin yaptığı iş yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Denklem (2) ile hesaplanan mesafe değerleri ve kuvvet/yörünge arasındaki açı değerleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Parmak ucu deplasmanı ve kuvvet/yörünge arasındaki açı değerleri

Noktalar (i)	d_i (mm)	α_i (°)
1	7.1	2.9
2	5.8	1.4
3	8.8	8
4	11	10.8
5	11.7	17.4
6	6.4	39
7	18	36
8	17.7	17.1
9	12.9	20
10	12.4	0.5
11	17.3	41.1
Toplam yol	129	

Yapılan toplam iş şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\sum_{i=1}^{11} W_i = (5 \text{ N}) d_i \cos \alpha_i = 0.58 \text{ J} \quad (3)$$

Kısım 2'de tasarımı anlatılmış olan çift-küresel 6-çubuk mekanizmasının giriş uzvunun (Şekil 5'te uzuv 7) 52° dönüş hareketi söz konusudur. 8 uzvuna bağlı motor ile 7 uzvu arasında 1:3 oranında bir dişli redüksiyonu kullanıldığı için motorun $156^\circ = 2.72 \text{ rad}$ dönüş yapması gerekmektedir. Bu durumda ortalama motor tork gereksinimi şu şekilde hesaplanır:

$$T_2 = \frac{0.58 \text{ J}}{2.72 \text{ rad}} = 0.22 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4)$$

Oldukça kabaca yapılan bu tork hesaplarında pek çok ihmal edilen etki bulunmaktadır. Öncelikle tüm mekanizma elin ve parmakların üzerine oturtulacağından bu bağlantılarda rijit bir sabit uzuv ve rijit mafsallar (Şekil 5'te A ve D mafsalları) olmayacaktır. Ayrıca çift-küresel 6-çubuk mekanizmasının üç uzvu parmak uzuvları olup parmak mafsalları sabit eksenli döner mafsal değildirler (ancak mekanizma tasarımında öyle modellenirler) ve 2, 3 ve 4 nolu uzuv boyları pratikte hareket sırasında sabit kalmamaktadır. Üretilen mekanizma uzuv ve mafsallarında da esneklik olacaktır. Tüm bu uzuv ve mafsal esnekliklerinden dolayı esneklik potansiyeline karşı yapılan iş Denklem (1) ve (4)'te hesaba katılmamıştır. Ayrıca uzuv ağırlıkları, ataletleri ve sürtünme ihmal edilmiştir. Tüm bu etkenlerin modellenmesi yerine 4 gibi nispeten yüksek bir güvenlik katsayısı kullanılarak $T_1 = 1.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ve $T_2 = 0.9 \text{ N} \cdot \text{m}$ anma torku değerlerine göre motor seçimi yapılması kararlaştırılmıştır. Tork gereksinim değerleri yakın olduğundan ve denetimde de kolaylık sağlaması açısından eş motorlar kullanılması uygun görülmüştür. Küçük boyutlarda seçilen motor 6V gerilimde $1.2 \text{ kg} \cdot \text{cm} (= 1.18 \text{ N} \cdot \text{m})$ tork sağlayan Emax ES3005DE tipi servo motordur.

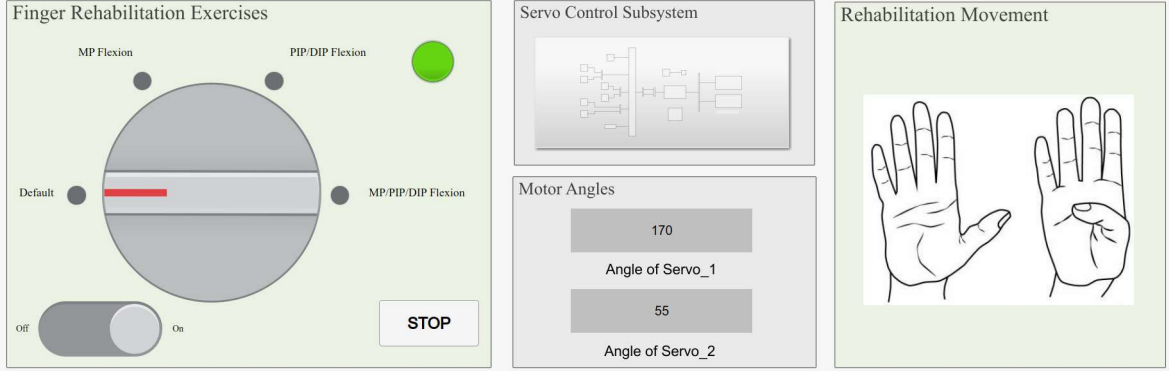
4. SİSTEM DENETİMİ VE KULLANICI ARAYÜZÜ

Sistem denetimi ve kullanıcı arayüzü Matlab Simulink kullanılarak oluşturulmuş, servo motorlar bilgisayarın seri portuna bağlı Arduino Uno kartı ile sürülmüştür. Kullanıcı arayüzü Şekil 7'de, servo denetim alt sistem yapısı ise Şekil 8'de görülmektedir. Motor denetimi açık çevrim denetim şeklinde çalışmakta olup, öncelikle motorlarla yapılan alt sistem testleri ve daha sonra tüm sistem testleri ile gerekli motor girdi değerleri kalibre edilmiştir.

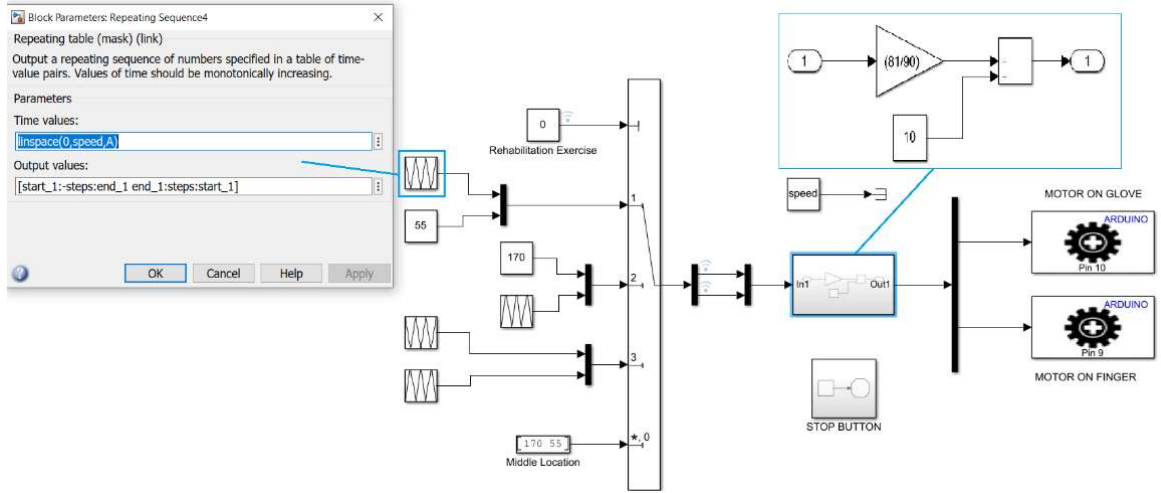
Şekil 7'de varsayılan konumda (default position) motorlar çalışmazken sadece MCP hareket modu, sadece PIP/DIP hareket modu ve iki motorun eş-zamanlı olarak birlikte çalıştıkları MCP/PIP/DIP modu bulunmaktadır. Kullanıcı arayüzünde manuel olarak her iki motorun salınım açısı da belirtilebilmektedir. Motorlardan birinin ya da ikisinin birden çalıştığı bu modlardaki tekrarlı

hareketler kullanıcı STOP düğmesine basana kadar devam etmektedir. Denetim sistemi önce bilgisayarda benzetimler ile, daha sonra

motorlarla alt sistem testlerinde ve son olarak nihai prototipte denenerek doğrulanmıştır.



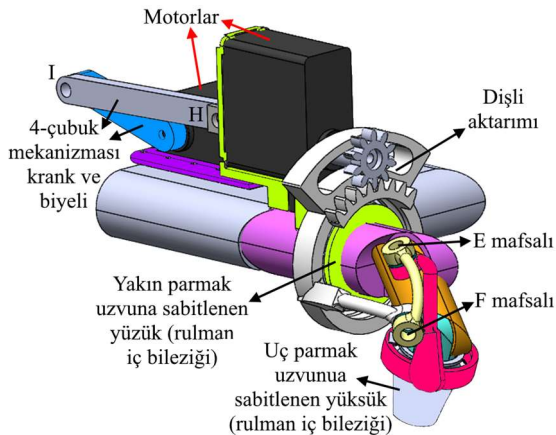
Şekil 7. Kullanıcı arayüzü



Şekil 8. Servo denetim alt sistemi yapısı

5. KONSTRÜKTİF TASARIM VE PROTOTİP ÜRETİMİ

Pek çok denemeden sonra uzuvların 3D yazıcıda PLA malzeme ile basılmasına karar verilmiştir. Oluşturulan katı modelin son hali Şekil 9’da sunulmaktadır.



Şekil 9. Sistem katı modeli

Şekil 5’te görülen E, F, H, I mafsallarında M4 kartela vidası ve pullar; motor-uzuv bağlantılarında M3 vidalar ve parmağa yüzük şeklinde geçen A ve D mafsallarında 3D yazıcıdan üretilen parçaların içine yerleştirilen çelik kürecikler ile oluşturulan rulmanlar kullanılması kararlaştırılmıştır. 3D yazıcıda üretilen ve parmaklara bağlanan uzuvlar Şekil 10’da, sabit motor bir eldiven üzerine sabitlenerek montajı tamamlanan sistem ise Şekil 11’de sunulmuştur.

Kişiyeye özel üretim gerektiren rehabilitasyon uygulamaları için uygun bir üretim yöntemi olan 3D yazıcı ile üretilen uzuvların arzu edilen işlevi gerçekleştirmek için yeterli olduğu görülmüştür. Uygun tasarım ile düşük boşluklu ve az sürtünmeli mafsallara sahip bir mekanizma üretimi yapılabilmektedir.



Şekil 10. Parmaklara takılan uzuvlar



Şekil 11. Montajı tamamlanan dış iskelet sistemi

Denetim sistemi ve prototipi hazırlanan sistemde tüm modlar denenerek işlev testleri gerçekleştirilmiştir. Kullanıcı parmağını hareket ettirirken sistemin yardımcı olduğu, ancak mukavemet gösterirse (hastaya hasar gelmemesi gerekmektedir) parmağı zorlamadığı görülmüştür.

6. SONUÇ

Bu çalışmada inme ya da yaralanmalar sonrasında el parmaklarının güçlendirilmesi için yardımcı bir parmak dış iskelet sisteminin tasarımı ve prototip üretimine yer verilmiştir. Bir parmak dış iskeleti için düzlemsel bir mekanizma yerine ilk kez bir çift-küresel 6-çubuk mekanizmasının kullanılmış ve etkinliği prototip testleri ile görülmüştür. Prototip 1100 TL'ye mal edilmiş olup 1000 TL altında satılabilecek bir ürünün mümkün olduğu görülmüştür. Elde edilen ilk prototip ancak kavram kanıtlama amaçlı olup sonuçlar ile ileriki çalışmalara ışık tutmak hedeflenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma son yazarın danışmanlığında İYTE ME402 dersi kapsamında diğer yazarlarca yapılmış bir proje çalışmasıdır. 2. yazar 219M483 nolu TÜBİTAK projesinde STAR programı kapsamında finansal destek almıştır.

KAYNAKLAR

[1] Becky, A. (2019). *How Can I Regain Hand Function After a Stroke?*, <https://www.neofect.com/us/blog/how-can-i-regain-hand-function-after-a-stroke>.

[2] Sale, P., Lombardi, V., Franceschini, M. (2012). Hand robotics rehabilitation: feasibility and preliminary results of a robotic treatment in patients with hemiparesis, *Stroke Research and Treatment*, 2012, 820931. DOI 10.1155/2012/820931.

[3] Sandoval-Gonzalez, O., Jacinto-Villegas, J., Herrera-Aguilar, I. vd. (2016). Design and development of a hand exoskeleton robot for active and passive rehabilitation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(2), 66. DOI 10.5772/62404.

[4] Abdallah, I. B., Bouteraa, Y., Rekik, C. (2017). Design and development of 3D printed myoelectric robotic exoskeleton for hand rehabilitation. *International Journal on Smart*

- Sensing and Intelligent Systems*, 10(2), 341-366. DOI 10.21307/ijssis-2017-215.
- [5] Yue, Z., Zhang, X., Wang, J. (2017). Hand rehabilitation robotics on poststroke motor recovery, *Neural Engineering for Rehabilitation*, 2017, 3908135. DOI 10.1155/2017/3908135.
- [6] Winslow, V.L. (2015). *Classic Human Anatomy in Motion: The Artist's Guide to the Dynamics of Figure Drawing*, Watson-Guption Publications, New York.
- [7] Loh, P.Y., Yeoh, W.L., Nakashima, H., Muraki, S. (2018). Deformation of the median nerve at different finger postures and wrist angles, *PeerJ*, 6:e5406. DOI 10.7717/peerj.5406
- [8] Troncossi, M., Mozaffari-Foumashi, M., Parenti-Castelli, V. (2016). An original classification of rehabilitation hand exoskeletons. *Journal of Robotics and Mechanical Engineering Research*, 1(4): 17-29. DOI 10.24218/jrmer.2016.18.
- [9] Ertas, I.H., Hocaoglu, E., Barkana, D.E., Patoğlu, V. (2009). Finger exoskeleton for treatment of tendon injuries, *IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Kyoto Uluslararası Konferans Merkezi, Kyoto.
- [10] Wolbrecht, E.T., Reinkensmeyer, D.J., Perez-Gracia, A. (2011). Single degree-of-freedom exoskeleton mechanism design for finger rehabilitation, *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2011, 5975427. DOI ICORR.2011.5975427.
- [11] Pu, S., Pei, Y., Chang, J. (2020). Decoupling finger joint motion in an exoskeletal hand: a design for robot-assisted rehabilitation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(1), 686-697. DOI 10.1109/TIE.2019.2912793.
- [12] Carbone, G., Gerding, E.C., Corves, B., Cafolla, D., Russo, M., Ceccarelli, M. (2020). Design of a two-dofs driving mechanism for a motion-assisted finger exoskeleton, *MDPI Applied Sciences*, 10, 2619. DOI 10.3390/app10072619.
- [13] Lucas, L., DiCicco, M., Matsuoka, Y. (2004). An EMG-controlled hand exoskeleton for natural pinching, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 16(5), 482-488. DOI 10.20965/jrm.2004.p0482.
- [14] Tzu, H.H., Yen, C.C., Wei, T.C., Shih, J.C. (2017). A finger exoskeleton robot for finger movement rehabilitation. *Inventions*, 2(3), 12. DOI 10.3390/inventions2030012.
- [15] Kalami, H., Khayat, A., Urbanic, R.J. (2016). Investigating 'exo-skeleton' design and fabrication challenges for the hand region using material extrusion processes. *IFAC-PapersOnLine*, 49(31), 30-35. DOI 10.1016/j.ifacol.2016.12.157.
- [16] Abdul Wahit, M.A., Ahmad, S.A., Marhaban, M.H., Wada, C., Izhar, L.I. (2020). 3D printed robot hand structure using four-bar linkage mechanism for prosthetic application. *Sensors*, 20(15), 4174. DOI 10.3390/s20154174
- [17] Sathish, T., Vijayakumar, M.D., Krishnan Ayyangar, A. (2018). Design and fabrication of industrial components using 3D printing. *Materials Today: Proceedings*, 5(6), 14489-14498. DOI 10.1016/j.matpr.2018.03.036.
- [18] Alizade, R.I., Kiper, G., Dede, M.İ.C., Uzunoğlu, E. (2014). Derivation of input-output relationship for the Bennett 6R linkages based on the method of decomposition. *New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications: Proceedings of the Second Conference MeTrApp 2013*, Springer. DOI 10.1007/978-94-007-7485-8_28.
- [19] Alizade, R.I., Kiper, G., Bağdadioğlu, B., Dede, M.İ.C. (2014). Function synthesis of Bennett 6R mechanisms using Chebyshev approximation, *Mechanism and Machine Theory*, 81, 62-78. DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2014.06.010.
- [20] Söylemez, E. (2017). *Makina Teorisi I: Mekanizma Tekniği*, 4. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [21] Buchholz, B., Armstrong, T.J., Goldstein, S.A. (1992). Anthropometric data for describing the kinematics of the human hand, *Ergonomics*, 35(3), 261-273. DOI 10.1080/00140139208967812.
- [22] Bataller, A., Cabrera, J.A., Clavijo, M., Castillo, J.J. (2016). Evolutionary synthesis of mechanisms applied to the design of an exoskeleton for finger rehabilitation, *Mechanism and Machine Theory*, 105, 31-43. DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2016.06.022.
- [23] Shahid, T., Gouwanda, D., Nurzaman, S. G., Gopalai, A.A. (2018). Moving toward soft

robotics: a decade review of the design of hand exoskeletons. *Biomimetics*, 3(3), 17. DOI 10.3390/biomimetics3030017.

[24] Fontana, M., Fabio, S., Marcheschi, S., and Bergamasco, M. (2013). Haptic hand exoskeleton for precision grasp Simulation, *ASME Journal of Mechanisms and Robotics*, 5(4), 041014. DOI 10.1115/1.4024981.

[25] Hernández-Santos, C.; Davizón, Y.A.; Said, A.R.; Soto, R.; Félix-Herrán, L.C.; Vargas-Martínez, A. (2021). Development of a wearable finger exoskeleton for rehabilitation, *Applied Sciences*, 11(9), 4145. DOI 10.3390/app11094145.

[26] Brossa, M. (2020). *Development of a Hand Exoskeleton Actuated With SMA*, Yüksek Lisans Tezi, Politecnico di Torino, Mekatronik Mühendisliği.