

مروری بر مشخصه‌های موثر در قابلیت تجاری شدن یک پروتز دست و مقایسه پروتزهای موجود

سعید یآوری^{1*}، علی رحمانی²

1 - کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۵۷۹۸۶۳۱۵، yavari_sd@yahoo.com

چکیده

در طول تاریخ همیشه نقص عضو به عنوان یک معضل، همراه زندگی انسان بوده است. انسان هم برای حل این معضل به ساخت انواع پروتزها روی آورده است. این مقاله به بررسی خصوصیت‌های اصلی یک پروتز کارآمد دست با قابلیت تجاری سازی می‌پردازد. منظور از پروتزهای تجاری، پروتزی‌هایی هستند که به تولید انبوه می‌رسد و توسط مردم در بازار پذیرفته می‌شوند. به همین منظور، در این مقاله ابتدا تمامی مشخصه‌های مهم و تاثیرگذار در طراحی پروتزها از روی پروتزهای تجاری شده مرور شده و سپس هریک از آنها بطور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین با استفاده از این خصوصیت‌ها، انواع پروتزهای تجاری شده در سال‌های اخیر که گسترش قابل توجهی هم داشته‌اند، به همراه مشخصات کامل آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به منظور بررسی دقیق‌تر و مقایسه سریع‌تر اطلاعات بدست آمده از پروتزها، تمامی مشخصات آنها در قالب یک جدول در کنار یکدیگر ارائه شده است. از آنجا که پروتزهای بررسی شده مربوط به سال‌های اخیر می‌باشند، این تحقیق می‌تواند گرایش محققان در نحوه‌ی طراحی پروتزها را نیز نشان دهد. در پایان مقاله نیز با توجه به اطلاعات بدست آمده از بررسی پروتزها، چند مشخصه‌ی اصلی برای طراحی پروتزهای تجاری دست ارائه شده است.

کلید واژگان

پروتز دست، طراحی پروتز، مشخصه‌های طراحی، استاندارد طراحی، پروتز تجاری

A review on the characteristics of hand prostheses affecting the possibility of their commercialization and the existing prostheses comparison

Saeed Yavari^{1*}, Ali Rahmani²

1- Master of Mechanical engineering, Shahid Rajaee teacher training University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor of Mechanical engineering, Shahid Rajaee teacher training University, Tehran, Iran

* P.O.B 1457986315, Tehran, Iran, yavari_sd@yahoo.com

Abstract

Throughout history, different types of disabilities have been accompanying mankind. To cope with this problem, human has made a variety of prostheses. This article investigates the main characteristics of an efficient commercialized hand prosthesis. Commercial prostheses are mass-produced prostheses that have been accepted by people in the market. Therefore, in this article, first, all the important and effective characteristics in the design of prostheses are reviewed from commercialized prostheses and then, each of them is studied separately. In addition, using these features, the types of prostheses commercialized in recent years that have expanded significantly, along with their complete specifications have been compared. In order to more accurately explore and compare the information obtained from the prostheses, all their specifications are presented in the form of a table. Because the prostheses examined are from recent years, the study could also show researchers how to design prostheses. At the end of the article, according to the information obtained from the study of prostheses, some main characteristics for designing commercial prostheses are presented.

Keywords

Hand prosthesis, prosthesis design, design features, design standard, commercial prosthesis

۱- مقدمه

می‌شود. همچنین با توجه به نقش کلیدی که دست در ایجاد ارتباط انسان با محیط پیرامون خودش ایفا می‌کند، یکی از مهمترین زمینه‌ها در مبحث پروتزها مربوط به پروتز دست می‌باشد. بنابراین تمرکز اختصاصی این تحقیق بر روی پروتزهای دست می‌باشد که در ادامه به بحث گذارده می‌شود. شروع ساخت پروتزهای امروزی را می‌توان به دهه 1950 میلادی و به پروتز ریترا اختصاص داد [1]. دلیل این انتخاب را می‌توان در دو عامل استفاده از علم رباتیک در یک

در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت سریع علم و تکنولوژی، در زمینه‌های مختلفی رشد و شکوفایی بسیاری صورت گرفته است. یکی زمینه‌هایی که در دو دهه اخیر پیشرفت‌های خوبی را تجربه کرده است، مبحث توانبخشی^۱ می‌باشد. از مهم‌ترین زمینه‌های موجود در مبحث توانبخشی می‌توان به طراحی و ساخت پروتزها اشاره کرد که هر ساله تحقیقاتی بسیاری در این زمینه انجام

² Reiter

¹ Rehabilitation



می شود بیشتر تحقیقات در زمینه‌ی پروتز دست به صورت متمرکز بر موضوعی خاص دلالت دارند. اما به منظور طراحی یک پروتز کارآمد و کاربردی نیاز به بدست آوردن ترکیبی ایده‌آل بین مشخصه‌های تاثیر گذار در طراحی پروتز دست می‌باشد. در واقع نمی‌توان با در نظر گرفتن یک یا دو مشخصه (مانند وزن و دوام) به پروتزی کاربردی و کارآمد رسید. به همین منظور در این تحقیق تلاش شده است تا بررسی کاملی از مشخصه‌های تاثیر گذار در طراحی پروتزهای دست صورت بگیرد تا بتوان به یک ترکیب بهینه‌ای از مشخصه‌ها دست یافت. بنابراین در ادامه ابتدا مهم‌ترین مشخصه‌های تاثیر گذار در طراحی پروتزها معرفی می‌شوند. سپس به منظور مقایسه‌ی بهتر نقش این مشخصه‌ها در طراحی پروتزها و همچنین پیدا کردن گرایش طراحان در چند سال اخیر، چندین مدل از پروتزهای ساخته شده و شناخته شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مقایسه بهتر بین پروتزهایی که مشخصات آنها در تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، تمامی اطلاعات مربوط به این پروتزها در قالب جدولی در کنار یکدیگر ارائه شده است. در آخر نیز با توجه به اطلاعات استخراج شده از جدول، مشخصه‌های مورد نیاز جهت طراحی و تولید یک پروتز دست تجاری (نه صرفاً آزمایشگاهی) ارائه شده است.

۲- مشخصه‌های طراحی

برای طراحی یک محصول در هر زمینه‌ای ابتدا می‌بایستی اطلاعات کاملی از پارامترهای مورد نیاز آن محصول را بدست آورد تا بتوان بر مبنای این اطلاعات به مشخصه‌های تاثیر گذار در طراحی دست یافت. همچنین با توجه به قدمت ۵۰ ساله‌ی پروتزهای دست، براحتی می‌توان با بررسی و مطالعه تحقیقات پیشین به عوامل مهم و تاثیر گذار در طراحی پروتزها دست یافت. با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه از جمله مهم‌ترین مشخصه‌هایی که در طراحی پروتزها تاثیر گذار هستند می‌توان به کارایی، دوام، سرویس و نگهداری، قیمت و وزن اشاره کرد که دو عامل آخری به مراتب از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. البته مشخصه‌های فرعی دیگری نظیر زیبایی نیز وجود دارند که به دلیل اهمیت کمتر نسبت به مشخصه‌های ذکر شده، در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. در این تحقیق 20 مدل از نمونه‌های ساخته شده پروتز دست انسان به منظور بررسی دقیق تر نقش هر مشخصه در طراحی پروتز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. تلاش شده است انتخاب پروتزهای مورد بررسی قرار گرفته به گونه‌ای باشد که تمامی روش‌های موجود در طراحی پروتز دست را شامل شود تا مقایسه‌ی بهتری صورت گیرد. در این تحقیق بازه‌ی مورد نظر برای بررسی پروتزها بین سال‌های 2007 تا 2019 بوده است. اطلاعات استخراج شده از پروتزها در قالب جدولی در کنار هم ارائه شده است تا مقایسه بین پروتزها راحت‌تر و سریع‌تر صورت گیرد. در ادامه به منظور تحلیل دقیق‌تر مطالب، هریک از مشخصه‌های موجود در جدول به صورت جداگانه معرفی و مورد بحث قرار می‌گیرند.

پروتز برای اولین بار و همچنین تولید یک پروتز به صورت انبوه دانست. اما امروزه در پروتزهای دست از آخرین تکنولوژی‌های روز دنیا استفاده می‌شود تا بتوان به هدف نهایی که رسیدن به پروتزی چابک و کارآمد همانند دست طبیعی انسان است، نزدیک شد. البته این نکته قابل ذکر است که تا به امروز پروتزی به چابکی و کارآمدی دست انسان و در همان وزن و ابعاد طراحی و تجاری سازی نشده است. به همین دلیل حتی در پروتزهایی که با پیشرفته‌ترین تکنولوژی‌ها ساخته می‌شوند هم ترکیب کاملی از کارایی، ظاهر و ابعاد مناسب، قیمت و وزن مطلوب مشاهده نمی‌شود. شاید بتوان عدم وجود یک ترکیب ایده‌آل در بین مشخصه‌های موجود در طراحی یک پروتز را مهم‌ترین دلیل برای تجاری نشدن بسیاری از پروتزهای آزمایشگاهی دانست. در مبحث مقالات مرتبط به پروتزهای دست می‌توان گفت که عمده‌ی این مقالات در سه دسته‌ی کلی زیر جای می‌گیرند: 1- شرایط آناتومی دست انسان و چگونگی مدل‌سازی دینامیکی دست 2- انتخاب جنس پروتز و نحوه‌ی طراحی انگشتان دست 3- انتخاب نوع محرک و نحوه‌ی انتقال حرکت در انگشتان دست. البته در چند سال اخیر دسته‌ی اول که مربوط به آناتومی و مدل‌سازی دینامیکی دست می‌باشد از نظر تعداد مقالات علمی نسبت به دو دسته‌ی دیگر کاهش محسوسی داشته است. دلیل این اتفاق را می‌توان کامل شدن مباحث در این زمینه دانست. به عبارت دیگر این زمینه‌ی تحقیقی به حد اشباع خود رسیده است. از جمله منابعی که به طور کامل در این زمینه بحث کرده‌اند می‌توان به وبر [2] و پیتارک [3] اشاره کرد. دسته‌ی بعدی مقالات که مربوط به انتخاب جنس پروتز و نحوه‌ی طراحی انگشتان است، دارای بیشترین تنوع و تعداد در پژوهش‌های علمی می‌باشد. این دسته همواره مورد توجه محققان بوده است و هیچگاه از اهمیت آنها کاسته نشده است. از جمله مقالاتی که در مبحث جنس پروتز تحقیق کرده‌اند می‌توان به کار میناس و همکاران [4]، ژین‌هوا و همکاران [5] و وانگ و همکاران [6] اشاره کرد. همچنین در مبحث نوع طراحی انگشتان هم می‌توان از پژوهش یانگ و همکاران [7] و پالی و همکاران [8] نام برد که روش‌های متداول در طراحی انگشتان را بررسی نموده‌اند. اما دسته‌ی سوم که مربوط به انتخاب نوع محرک و نحوه‌ی انتقال حرکت در انگشتان می‌شود دارای محبوبیت کمتری نسبت به دسته‌ی قبلی می‌باشد. در زمینه‌ی انتخاب نوع محرک ماورودیس [9] به طور مفصل در مورد تمامی محرک‌های موجود در پروتزها بحث کرده و آنها را از جهات مختلف مورد بررسی قرار داده است. در بحث نحوه‌ی انتقال حرکت در انگشتان نیز مارکو و همکاران [10] و روسی و همکاران [11] به بررسی کامل دو روش اصلی در این زمینه پرداختند. اما همان طور که پیش‌تر گفته شد، عمده‌ی مقالات در زمینه‌ی پروتزهای دست محدود به سه دسته‌ی بالا می‌شوند بنابراین مقالات دیگری وجود دارند که در دسته بندی گفته شده قرار نگیرند. بطور مثال بیدیس و همکاران [12] به بررسی انواع چالش‌های موجود بین افراد دارای نقص عضو با پروتزها و همچنین میزان سطح رضایت‌مندی افراد از پروتزها پرداخته‌اند. همان طوری که مشاهده

⁷ Palli

⁸ Mavroidis

⁹ Marco

¹ Rossi

¹ Biddis

¹ Weir

² Pitarch

³ Minas

⁴ Xinhua

⁵ Wang

⁶ Yang

۱-۲- وزن

پیدا می‌کند که نکته‌ای منفی در طراحی پروتزها می‌باشد.



Fig 1 brunel prosthesis

شکل 1 پروتز برنل [28]

انتخاب بین این سه مشخصه یعنی تعداد محرک، وزن و قیمت بستگی به هدف کلی پروتز دارد که برای انجام چه اهدافی طراحی می‌شود. بنابراین بسته به شرایط کاربری پروتز نوع و تعداد محرک‌ها انتخاب می‌شود. محرک‌ها مورد استفاده در پروتزها به چهار دسته کلی: بدنی^۵، پنیوماتیکی، SMA^۶ و موتورهای الکتریکی تقسیم می‌شوند. البته محرک‌های دیگری هم وجود دارند اما چهار محرک گفته شده بیشترین محبوبیت را دارا هستند. همان طور که در جدول 1 مشاهده می‌شود محرک‌های موتوری نسبت به باقی محرک‌ها بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند بطوری که 13 مورد از 20 پروتز مورد مطالعه در جدول از این نوع محرک استفاده کرده‌اند. دلیل این برتری را می‌توان در تنوع بسیار زیاد آنها در شکل و اندازه و همچنین دسترسی راحت‌تر نسبت به باقی محرک‌ها دانست. البته این نکته دلیل بر آن نمی‌شود که باقی محرک‌ها را بطور کامل کنار گذاشت و مورد بررسی قرار نداد. چراکه هر یک دارای برتری‌های مخصوص به خود هستند که در ادامه بررسی می‌شوند. به طور مثال پروتزهایی که از محرک بدنی استفاده می‌کنند به دلیل اینکه از حرکت بدن فرد به منظور ایجاد حرکت در انگشتان بهره می‌برند، بسیار سبک و ارزان هستند اما در عوض از نظر سطح کارایی نسبت به باقی پروتزها در شرایط ضعیف‌تری قرار می‌گیرند. در نقطه‌ی مقابل نیز محرک پنیوماتیک قرار دارد که دارای کنترلی بسیار دقیق و سطح کارایی خوبی می‌باشد.

همان طور که پیشتر گفته شده، یکی از مهم‌ترین عوامل در مقبولیت یک پروتز وزن نهایی آن می‌باشد. طبق بررسی آریانتو^۱ و همکاران در [13]، بهترین محدوده‌ی وزنی برای طراحی پروتز زیر 500 گرم می‌باشد. این محدوده به صورت تجربی و بر اساس سطح رضایتمندی افراد نسبت به پروتزهای مختلف بدست آمده است. نیاز به وزن کمتر در پروتزها سبب به وجود آمدن دو روش اصلی در پروتزها شده است. یکی از آنها روش کم محرک‌می‌باشد که در قسمت محرک‌ها به آن پرداخته می‌شود و دیگری روش استفاده از مواد پلیمری و سبک در طراحی پروتزها می‌باشد. با مطالعه جدول 1 براحتی می‌توان دریافت که در سالهای اخیر استفاده از فلزات در ساخت پروتزها بشدت کاهش یافته است. دلیل این اتفاق را می‌توان در سه عامل اصلی سبک‌تر بودن مواد پلیمری نسبت به فلزات، آسان و کم هزینه بودن فرآیند ساخت پروتزها با استفاده از مواد پلیمری و در آخر هم هزینه‌ی سرویس و نگهداری کمتر پروتز نسبت به مواد فلزی جستجو نمود. از متداول‌ترین مواد پلیمری که در ساخت پروتزها مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به^۲ ABS و^۳ PLA اشاره کرد که بسیار در دسترس هستند. با مشاهده جدول 1 این نکته به وضوح مشخص می‌باشد که تمامی پروتزهایی که با مواد پلیمری ساخته شده‌اند، دارای وزنی در محدوده‌ی ایده‌آل یعنی زیر 500 گرم می‌باشند. دلیل آسانی ساخت پروتزها به وسیله‌ی مواد پلیمری را می‌توان در استفاده از چاپگرهای سه بعدی در ساخت پروتزها دانست. با استفاده از این تکنولوژی براحتی می‌توان پروتزهایی با ابعاد و شکل‌های مختلفی تولید نمود. به همین دلیل در چند سال اخیر استفاده از پرینتر سه بعدی و مواد پلیمری بسیار مورد توجه قرار گرفته است، بطوری که از 20 نمونه‌ی مورد بررسی 15 مورد از این روش برای ساخت استفاده کرده‌اند. پس می‌توان این نتیجه را گرفت که روش ایده‌آل برای ساخت یک پروتز تجاری، استفاده از پرینتر سه بعدی به همراه مواد پلیمری می‌باشد تا هم پروتزی سبک‌تر و هم ساختی آسان‌تر حاصل گردد. امروزه این نوع پروتزها در ابعاد و گونه‌های مختلفی ساخته می‌شوند که هر یک دارای کارایی مخصوص به خود می‌باشند. شکل 1 یک نمونه‌ی تجاری از پروتزهای ساخته شده با مواد پلیمری را نمایش می‌دهد. این پروتز دست که برنل نام دارد، یکی از پر فروش‌ترین پروتزهای تولیدی در بازار می‌باشد. این پروتز دارای نه درجه‌ی آزادی و چهار محرک است که یک محرک جداگانه برای هر سه انگشت شست، اشاره و میانی و یک محرک مشترک برای دو انگشت حلقه و کوچک دارد. وزن نهایی این محصول 330 گرم می‌باشد که وزنی بسیار مناسب با توجه به کارایی این محصول می‌باشد. این محصول با استفاده از PLA ساخته شده است.

۲-۲- محرک

مبحث محرک رابطه‌ی مستقیمی با قیمت، وزن و کارایی پروتز دارد. این رابطه به صورتی می‌باشد که هرچه تعداد محرک‌ها در پروتز بیشتر شود کنترل پذیری و به تبع آن کارایی پروتز بیشتر می‌شود اما از طرفی وزن و قیمت نیز افزایش

⁵ Brunel hand 2

⁶ Body actuated

⁷ Shape memory alloy

¹ Ariyanto

² Under actuated

³ Acrylonitrile Butadiene Styrene

⁴ Poly Lactic Acid



جدول 1 مقایسه پروتزها

Table 1 Comparison of prostheses

سال و مرجع	روش ساخت و جنس پروتز	مفصل بندی	درجه آزادی	تعداد انگشت فعال	نوع محرک	تعداد محرک	نوع انتقال حرکت	قیمت (دلار)	وزن (گرم)
2007 [14]	لیزر، پلکسی گلس	دورانی	15		موتور الکتریکی	2	سیمی	150	-
2009 [15]	ماشین کاری، آلومینیوم	دورانی	15	5	موتور الکتریکی	5	سیمی	580	
2011 [16]	چاپ سه بعدی، ABS	دورانی	10	5	موتور الکتریکی	5	سیمی	500	
2014 [17]	ماشین کاری، آلومینیوم	دورانی	15	5	موتور الکتریکی	5	گیربکس	450	
2014 [4]	لیزر، پلکسی گلس	پیوسته		5	موتور الکتریکی	5	سیمی	100	200
2014 [18]	چاپ سه بعدی، ABS	پیوسته	2	0	موتور الکتریکی	2	مکانیزم		
2014 [19]	ماشین کاری، آلومینیوم	دورانی	15	5	SMA، موتور الکتریکی	10	سیمی		
2015 [20]	چاپ سه بعدی، ----	دورانی	10		بدنی	1	سیمی	31	
2015 [21]	ماشین کاری، آلومینیوم	دورانی	20	5	پنوماتیک	40	تیوب هوا	1000	1500
2015 [22]	چاپ سه بعدی، PLA	دورانی	10		بدنی	1	سیمی	50	184
2015 [23]	چاپ سه بعدی، ----	پیوسته		5	SMA	5	سیمی	600	282
2015 [24]	چاپ سه بعدی، ----	پیوسته	-	5	پنوماتیک	5	تیوب هوا	100	350
2016 [25]	چاپ سه بعدی، ABS	دورانی	10	5	موتور الکتریکی	5	سیمی	400	380
2016 [26]	چاپ سه بعدی، PLA	دورانی	10		بدنی	1	سیمی	55	159
2016 [13]	لیزر، پلکسی گلس	دورانی	15	5	موتور الکتریکی	6	سیمی	150	450
2017 [5]	چاپ سه بعدی، -----	دورانی	15	5	موتور الکتریکی	10	مکانیزم		
2016 [6]	ماشین کاری، آلومینیوم	دورانی	15	2	موتور الکتریکی	4	مکانیزم	560	
2016 [27]	چاپ سه بعدی، -----	دورانی	15	5	تار مصنوعی	5	سیمی	100	140
2018 [28]	چاپ سه بعدی، PLA	دورانی	9	3	موتور الکتریکی	4	سیمی	1000	332
2019 [29]	چاپ سه بعدی، -----	دورانی	15	1	موتور الکتریکی	2	سیمی		330



انگشت و یک درجه برای حرکت عرضی آن می‌باشد [25]. اما طراحان به دلیل جلوگیری از پیچیدگی پروتز، از مفصل عرضی انگشتان صرف نظر می‌کنند. بنابراین متداول ترین مدل دینامیکی مفاصل در پروتزها دارای 15 درجه آزادی یا به عبارتی دارای 15 مفصل می‌باشد. با بررسی اطلاعات جدول 1 نیز می‌توان به محبوبیت مدل 15 درجه پی‌برد، چرا که نه مورد از 20 پروتز بررسی شده از همین مدل استفاده کرده‌اند. البته در برخی پروتزهای تجاری به منظور کاهش هزینه و وزن، یک درجه‌ی آزادی دیگر نیز از هر انگشت حذف می‌کنند که با این کار درجه‌ی آزادی پروتز به 10 درجه کاهش پیدا می‌کند [23]. اخیرا با توجه به بیشتر شدن استفاده از مواد پلیمری و چاگرهای سه بعدی در ساخت پروتزها، نوعی دیگر از طراحی انگشتان به وجود آمده است که در آنها دیگر مفصلی وجود ندارد. در واقع در این نوع طراحی، انگشتان همانند دست انسان به صورت بندبند ساخته نمی‌شوند و بجای آن از یک تکه‌ی به هم پیوسته استفاده می‌شود. بنابراین در این روش برای ایجاد حرکت در انگشتان از خاصیت خم شونده‌ی عضو پیوسته استفاده می‌شود. از مزیت‌های این روش می‌توان به ساخت راحت‌تر، تطبیق پذیری بیشتر و وزن کمتر در قیاس با نوع مفصل‌دار اشاره کرد. اما با توجه به جدول، محبوبیت پروتزهای مفصل‌دار همچنان بیشتر از پروتزهای پیوسته بوده است. شاید بتوان مهم‌ترین دلایل عدم موفقیت پروتزهای پیوسته نسبت به پروتزهای مفصل‌دار را در سختی به دست آوردن معادلات سینماتیکی انگشتان و عدم پیش بینی رفتار انگشتان در هنگام گرفتن اجسام دانست. در واقع به دلیل اینکه حرکت انگشتان در نوع مفصلی براساس چرخش دو عضو صورت می‌گیرد بنابراین معادلات سینماتیکی آن براحتی قابل محاسبه می‌باشد. اما در نوع پیوسته به دلیل اینکه حرکت انگشت بر مبنای خمش عضو صورت می‌گیرد، بنابراین معادلات سینماتیکی آن به محث مکانیک مواد مربوط می‌شود که به سادگی روش‌های موجود در نوع مفصل‌دار نیست. از این روی تا به امروز در تمامی پروتزهای تجاری ساخته شده از روش مفصل‌دار استفاده شده است و نوع پیوسته فقط محدود به نمونه‌های تحقیقاتی بوده است.

۲-۴- انگشت فعال

یکی از مشخصه‌هایی که نقش مستقیمی با کارایی پروتز دارد مشخصه‌ی انگشت فعال می‌باشد. این مشخصه نشان دهنده‌ی تعداد انگشتانی از پروتز می‌باشد که دارای حداقل یک (یا بیشتر) محرک مستقل باشند. چراکه در صورت وجود این حالت، امکان کنترل هر انگشت به صورت جداگانه و مستقل وجود دارد که در نتیجه‌ی آن کارایی پروتز افزایش پیدا می‌کند. اما اگر برای هر انگشت حداقل یک محرک وجود نداشته باشد، در واقع در این حالت می‌بایستی چند انگشت به وسیله‌ی یک محرک به حرکت در بیایند که در این صورت حرکت آنها دیگر مستقل نبوده و کوپله می‌باشد. از طرفی چون در حرکت کوپله دیگر امکان کنترل انگشتان بطور مستقل وجود ندارد، بنابراین می‌توان گفت این انگشتان از حالت فعال یا مستقل خارج شده‌اند. همچنین ذکر این نکته حائز اهمیت می‌باشد که فعال بودن یا نبودن انگشت ارتباطی با حرکت انگشت ندارد و به

محرک‌های پنوماتیک از نظر حرکتی شبیه‌ترین نوع به دست انسان می‌باشد چراکه برای ایجاد حرکت در انگشتان از ماهیچه‌ی بادی استفاده می‌نماید [13]. اما این محرک هم به دلیل استفاده از شیرهای برقی که عموما بسیار گران هستند و همچنین حساسیت بالایی که نسبت به نشتی دارد، بطور معمول در پروتزهای تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و جنبه‌ی تجاری سازی بسیار کمی دارد. و اما گروه چهارم محرک‌ها که محرک SMA نام دارد قدمت کمتری نسبت به باقی محرک‌ها دارد ولی به دلیل نسبت نیروی تولید شده به وزن بسیار خوبی که دارد به سرعت در حال پیشرفت بوده و در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته‌است. از این محرک هم به صورت مفتول و هم به صورت تیغه در پروتزها استفاده شده است. اما مهم‌ترین نکته‌ی منفی در این محرک سرعت عملکرد آن می‌باشد که بسیار پایین است. بنابراین به منظور جبران این ضعف نیاز به استفاده از گرم کن و سردکن می‌باشد تا سرعت واکنش اس ام ای افزایش پیدا کند. اما اخیرا در برخی مقالات به منظور جبران سرعت کم این محرک، آن را با محرک موتوری ترکیب می‌کنند تا شرایط حرکتی انگشتان بهبود پیدا کند [11]. در مجموع با توجه به مقبولیت محرک‌های موتوری در بین تحقیقات چند سال اخیر می‌توان این محرک را بهترین انتخاب برای تولید یک پروتز تجاری دانست. اما با توجه به وزن نسبتا زیاد این نوع محرک، تعداد آنها در پروتز حائز اهمیت می‌باشد تا وزن کلی پروتز از محدوده‌ی ایده‌آل (زیر 500 گرم) عبور نکند. به همین دلیل به جای استفاده از روش تمام محرک‌آز روش کم محرک‌آز پروتزها استفاده می‌شود تا بتوان پروتزهایی با وزن کمتر تولید نمود. در روش تمام محرک برای هر درجه آزادی، یک محرک در نظر گرفته می‌شود اما در روش کم محرک به منظور کاهش وزن پروتز، از تعداد محرک‌ها کم می‌کنند. بنابراین در این روش تعداد درجات آزادی بیشتر از تعداد محرک‌ها می‌باشد. این کار به این دلیل صورت می‌گیرد که عمدتا بخش زیادی از وزن پروتزها مربوط به محرک‌هایشان می‌شود. اگرچه با انجام این کار سطح توانایی حرکتی انگشتان کاهش پیدا می‌کند ولی اثر مثبت کاهش وزن پروتز بسیار پررنگ‌تر می‌باشد. درستی این مطلب را به راحتی می‌توان با بررسی جدول 1 تصدیق کرد، چراکه از 20 پروتز بررسی شده 19 مورد آنها کم محرک بوده‌اند. اما اینکه چه تعداد محرک می‌بایستی در پروتز استفاده شود تا حالت بهینه به وجود آید، مسئله‌ی مهمی می‌باشد. با نگاه دقیق‌تر به جدول می‌توان دریافت که نه عدد از 20 مقاله بررسی شده دارای پنج محرک بوده‌اند، یعنی برای هر انگشت یک محرک. پس می‌توان گفت پنج عدد محرک بهینه حالت برای انتخاب تعداد محرک می‌باشد تا هم کارایی و هم وزن آن در محدوده‌ی قابل قبولی باشد.

۲-۳- مفصل بندی

امروزه مدل‌های دینامیکی متفاوتی برای دست انسان ارائه شده است اما متداول‌ترین و پر استفاده‌ترین روش در مقالات، مدل 20 درجه آزادی می‌باشد. تمام این 20 درجه از نوع مفصل دورانی می‌باشد. در این روش برای هر انگشت چهار درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود. که سه درجه برای حرکت صفحه‌ای

³ Under actuated

¹ Air muscle
² Full actuated



زمینه‌ها، ابتدا می‌بایست تمامی عوامل تاثیرگذار در طراحی شناسایی شوند. سپس با بررسی این عوامل که به آنها مشخص‌های طراحی می‌گویند، می‌توان به نحوه‌ی تاثیرگذاری هریک از این مشخصه‌ها در طراحی پروتز دست یافت. همچنین به منظور درک بهتر تاثیر هر یک از مشخصه‌های موثر در طراحی پروتزها، 20 نمونه از انواع پروتزهای ساخته شده در 12 سال اخیر در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مقایسه راحت‌تر اطلاعات بدست آمده از بررسی پروتزها، این اطلاعات به صورت یک جدول در کنار یکدیگر ارائه شده‌اند. سپس هریک از مشخصه‌های موجود در جدول بطور کامل معرفی و مورد بحث قرار گرفته‌اند. در پایان هر مبحث نیز بر اساس اطلاعات استخراج شده از جدول 1 موثرترین روش برای تولید یک پروتز تجاری ارائه شده است. در واقع در این تحقیق تلاش شده است تا یک استاندارد عمومی از مشخصه‌های موجود در طراحی پروتزهای دست با محوریت پروتزهای کاربردی و تجاری بدست آید. البته ذکر این نکته حائز اهمیت می‌باشد که هیچگاه نمی‌توان به صورت دقیق استانداردی مشخص برای طراحی پروتزهای دست ارائه داد چراکه این استاندارد می‌تواند با توجه به هدف اصلی طراحی پروتز تغییر کند. بنابراین با توجه به بررسی‌های انجام شده در این تحقیق می‌تواند گفت پروتزی که شامل مشخصه‌های زیر باشد می‌تواند از محبوبیت بالایی بین افراد استفاده کننده از آن داشته باشد و صرفاً تبدیل به یک نمونه‌ی آزمایشگاهی نشود.

* با استفاده از مواد پلیمری مانند ABS و PLA و با روش چاپ سه بعدی ساخته شده باشد.

* دارای انگشتانی با مفاصل دورانی باشد.

* کم محرک باشد

* پنج انگشت فعال داشته باشد.

* از موتورهای الکتریکی به منظور محرک استفاده شود.

* از انتقال حرکت سیمی در آن استفاده شود.

* وزنی کمتر از 500 گرم داشته باشد.

* قیمتی در محدوده‌ی زیر 400 دلار داشته باشد.

۴- مراجع

- [1]. Childress. Dudley S, Historical aspects of powered limb prostheses , *Clin Prosthet Orthot* , Vol. 9, No. 1, pp2-13, 1985.
- [2]. Weir. R.F. Design of Artificial Arms and Hands for Prosthetic Application. *Standard Handbook of Biomedical Engineering & Design*, pp. 1-32, 2002.
- [3]. Peña Pitarch. E. *Virtual human hand: Grasping strategy and simulation*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.
- [4]. Liarokapis. M.V, Zisimatos. A.G, Bousiou. M.N and Kyriakopoulos. K.J, Open-source, low-cost, compliant, modular, underactuated fingers: Towards affordable prostheses for partial hand amputations. In *36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 2541-2544 , 2014.
- [5]. Liu. X., Zheng. X. and Li. S, Development of a humanoid robot hand with coupling four-bar linkage. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 1, p.1687814016686313, 2017.

جنبه‌ی کنترلی آن بر می‌گردد. در مجموع می‌توان بر اساس اطلاعات بدست آمده از جدول 1، بهترین تعداد انگشت فعال در یک پروتز را عدد پنج دانست چراکه از 20 پروتز بررسی شده، 12 عدد از آنها، پنج عدد انگشت فعال داشته‌اند.

۲-۵- انتقال حرکت

نحوه انتقال حرکت در پروتزها به سه دسته مکانیزم یا لینک بندی، سیمی و چرخنده‌ای تقسیم می‌شوند. البته نوع چرخنده‌ای یا گیربکس‌دار به دلیل سنگین بودن دیگر مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. اما دو نوع دیگر انتقال حرکت در پروتزها رایج بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته با بررسی جدول 1 این نکته مشخص می‌شود که نوع انتقال حرکت سیمی در طراحی پروتزها محبوب‌تر می‌باشد. دلیل این محبوبیت را می‌توان در ساخت راحت‌تر، وزن کمتر و ساختار ساده‌تر این نوع انتقال حرکت دانست. به همین دلیل 13 مورد از پروتزهای مورد بررسی از این نوع انتقال حرکت استفاده کرده‌اند. بنابراین می‌توان از انتقال حرکت سیمی به عنوان بهترین روش برای استفاده در پروتزها انتخاب نام برد.

۲-۶- قیمت

در طراحی پروتزها، قیمت تنها مشخصه‌ای است که محدوددهی خاصی برای آن نمی‌توان در نظر گرفت چراکه این محدوده بسته به نوع کاربری و منطقه‌ای که پروتز برای آنجا ساخته می‌شود، تفاوت پیدا می‌کند. به طور مثال محدوده‌ی قیمتی ایده‌آل برای طراحی یک پروتز در کشورهای جهان اول در مقایسه با کشورهای جهان سومی متفاوت می‌باشد. به همین دلیل در مبحث قیمت پروتزها، بازه‌ی بزرگ 50 دلار تا 4000 دلار مشاهده می‌شود که به ترتیب مربوط پروتزهای محرک بدنی تا پروتزهای تمام محرک پیشرفته می‌باشد [14]. قیمت پروتز رابطه‌ی مستقیمی با محبوبیت و مقبولیت یک پروتز تجاری دارد. در واقع بر خلاف پروتزهای تحقیقاتی، پروتزهای تجاری می‌بایستی به گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند نظر جامعه آماری بزرگ‌تری از افراد را به خود جلب کنند. به همین دلیل هرچه قیمت نهایی و همچنین هزینه‌ی سرویس و نگهداری یک پروتز کمتر باشد، افراد بیشتری توانایی استفاده از آن را پیدا می‌کنند. البته این نکته را نیز باید در نظر گرفت که کارایی پروتز هم در مقبولیت آن نقش بسزایی دارد و باید مورد توجه قرار بگیرد. اما همان طور که پیشتر گفته شد چون رابطه‌ی کارایی یک پروتز با قیمت آن یک رابطه‌ی مستقیم می‌باشد بنابراین نمی‌توان عددی مشخصی را برای آن در نظر گرفت. ولی با توجه به اعداد به دست آمده از جدول 1 می‌توان گفت محدوده‌ی قیمتی ایده‌آل جهت طراحی پروتزهای تجاری، زیر 400 دلار می‌باشد چراکه 10 مورد از پروتزهای بررسی شده در بازه‌ی کمتر از این مقدار بوده‌اند.

۳- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این بررسی تلاش شده است تا مروری کامل بر نحوه‌ی طراحی و ساخت پروتزهای دست صورت بگیرد تا به نقاط ضعف و قوت موجود در زمینه‌ی طراحی پروتزها پی‌برده شود. همچنین محوریت اصلی بررسی‌های انجام شده در این تحقیق در حوزه‌ی مکانیک می‌باشد لذا از بررسی پروتزها در حوزه الکترونیک صرف نظر شده است. در مبحث طراحی پروتز دست نیز همانند سایر



- [21]. Oliver-Salazar, M.A., Szwedowicz-Wasik, D., Blanco-Ortega, A., Aguilar-Acevedo, F. and Ruiz-González, R., Characterization of pneumatic muscles and their use for the position control of a mechatronic finger. *Mechatronics*, Vol. 42 , pp.25-40, 2017.
- [22]. Zuniga,J., Katsavelis. D., Peck. J., Stollberg. J., Petrykowski. M., Carson. A. and Fernandez. C, Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences. *BMC research notes*, Vol. 8 , No. 1 , p.10 , 2015.
- [23]. She. Y., Li, C. Cleary. J. and Su. H.J, Design and fabrication of a soft robotic hand with embedded actuators and sensors. *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 7, No. 2 , 2015
- [24]. Deimel. R and Brock. O, A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 35, No. 1-3, pp.161-185, 2016.
- [25]. J Raines, *Robotics Hand Development Kit-Ada VI.1 -Datasheet*, Accessed on may 2016; <https://www.Bebionic.com/prosthetics/upper-limb-prosthetics/openBionics/bebionic-hand>
- [26]. Zuniga. J.M., Carson. A.M., Peck. J.M., Kalina. T, Srivastava. R.M. and Peck. K, The development of a low-cost three-dimensional printed shoulder, arm, and hand prostheses for children. *Prosthetics and orthotics international*, Vol.41, No. 2, pp.205-209, 2017.
- [27]. Wu. L, de Andrade. M.J, Saharan. L.K., Rome. R.S., Baughman, R.H. and Tadesse. Y, Compact and low-cost humanoid hand powered by nylon artificial muscles. *Bioinspiration & biomimetics*, Vol. 12, No. 2, pp. 004-026, 2017.
- [28]. OpenBionic, commercial prosthesis hands , Accessed on june 2018 ; <https://openbionicslabs.com/shop/brunel-hand2>
- [29]. Liu. H, Xu. K., Siciliano. B. and Ficuciello.F, The MERO Hand: A Mechanically Robust Anthropomorphic Prosthetic Hand using Novel Compliant Rolling Contact Joint. In *2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* ,pp. 126-132 , 2019.
- [6]. Wang. N, Lao. K. and Zhang. X , Design and myoelectric control of an anthropomorphic prosthetic hand. *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp.47-59, 2017.
- [7]. Yang. J, Pitarch. E.P, Abdel-Malek. K., Patrick. A. and Lindkvist. L, A multi-fingered hand prosthesis. *Mechanism and Machine Theory*,Vol. 39 ,No. 6 , pp.555-581, 2004.
- [8]. Palli. G, Melchiorri. C., Vassura. G., Scarcia. U., Moriello. L., Berselli. G., Cavallo. A., De Maria. G., Natale. C., Pirozzi. S. and May. C. The DEXMART hand: Mechatronic design and experimental evaluation of synergy-based control for human-like grasping. *The International Journal of Robotics Research*,Vol. 33, No. 5 , pp.799-824, 2014.
- [9]. Mavroidis. C, Development of advanced actuators using shape memory alloys and electrorheological fluids. *Journal of Research in Nondestructive Evaluation*,Vol. 14, No. 1, pp.1-32, 2002.
- [10]. Groenewegen. M.W., Aguirre. M.E. and Herder, J.L, Design of a partially compliant, three-phalanx underactuated prosthetic finger. In *ASME 2015 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection , 2015.
- [11]. Rossi. C., Savino. S., Niola. V. and Troncone. S.. A study of a robotic hand with tendon driven fingers. *Robotica*, Vol. 33, No. 5, pp.1034-1048, 2015
- [12]. Biddiss, E., Beaton, D. and Chau, T. Consumer design priorities for upper limb prosthetics. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, Vol. 2, No. 6 , pp.346-357, 2007.
- [13]. Ariyanto. M., Ismail, R., Nurmianto, A., Caesarendra, W. and Franke, J., December. Development of a low cost anthropomorphic robotic hand driven by modified glove sensor and integrated with 3D animation. In *2016 IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES)* .pp. 341-346 , 2016.
- [14]. Chen. T, Haas-Heger, M. and Ciocarlie, M., May. Underactuated hand design using mechanically realizable manifolds. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* pp. 7392-7398, 2018.
- [15]. Dalley. S.A., Wiste. T.E., Withrow. T.J. and Goldfarb. M., Design of a multifunctional anthropomorphic prosthetic hand with extrinsic actuation. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, Vol. 14, No. 6, pp.699-706, 2009.
- [16].Bebionic, *prosthesis upper limb hands* , Accessed on 1 July 2018 <https://www.ottobockus.com/prosthetics/upper-limb-prosthetics/solution-overview/bebionic-hand>
- [17]. Zhang. T., Jiang. L., Fan, S., Wu. X. and Feng, W. Development and experimental evaluation of multi-fingered robot hand with adaptive impedance control for unknown environment grasping. *Robotica*, Vol. 34, No.5, pp.1168-1185, 2016.
- [18]. Jing. X, Yong. X., Jiang. Y., Yokoi. H. and Kato. R, A low-degree of freedom EMG prosthetic hand with nails and springs to improve grasp ability. In *2014 7th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics(IEEE)* .pp. 562-567, 2014.
- [19]. Gao, F., Deng, H. and Zhang, Y. Hybrid actuator combining shape memory alloy with DC motor for prosthetic fingers. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 223 , pp.40-48, 2015.
- [20]. Dally, C., Johnson, D., Canon, M., Ritter, S. and Mehta, K., Characteristics of a 3D-printed prosthetic hand for use in developing countries. In *2015 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)* , pp. 66-70 , 2015.