طراحی ، ساخت و کنترل ربات توان‌بخشی برای حرکت انگشتان دست

نیلوفر آزادی سهی [۱]، مجید ساده‌دل [۲*] ، مجید محمدی مقدم [۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد ، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران،ایران، niloufarazadi@modares.ac.ir

[۲*] نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، majid.sadedel@modares.ac.ir

[۳] استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، m.moghadam@modares.ac.ir

چکیده

سکته مغزی امروزه یکی از عوامل شایع ناتوانی دست است که برای بازیابی عملکرد آن از اسکلت‌های بیرونی رباتیک استفاده می‌شود. در این پژوهش، طراحی و ساخت نمونه اولیه ربات پوشیدنی مبتنی بر پارچه ارائه شده‌است که قابلیت حرکت همزمان انگشتان دست و تنظیم سرعت را دارد و از روش کابلی برای کمک به حرکت خم‌شدن و برای کشش و بازشدن انگشتان از تیغه‌های فنری استفاده شده‌است که کابل‌ها به کمک نیروی موتور گیربکس جمع‌شده و با معکوس‌شدن جهت حرکت موتور و نیروی فنرها انگشتان به حالت طبیعی برمی‌گردند. بنابراین، برای تعیین محل مناسب قرارگیری اجزا از جمله تیغه‌های فنری و کابل‌ها شبیه‌سازی ربات در نرم‌افزار سالیدورکس انجام‌شده و به کمک آزمایش‌های تجربی، تیغه‌های فنری مناسب از نظر داشتن قدرت و نیروی مناسب انتخاب و در ادامه به کمک مدار مدولاسیون پهنای باند و برنامه‌نویسی در میکروکنترلر، حرکت و سرعت ربات ساخته‌شده، کنترل شده‌است. در این پروژه، با تعریف پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد یک سیستم و استفاده از نمره‌دهی به سوالات یک پرسشنامه مبتنی بر پارامترهای تاثیرگذار، سیستم ارزشیابی شد. پس از بررسی میانگین نمرات هر یک از پارامترها، مدت زمان یادگیری کار با سیستم، بالاترین میانگین را کسب نمود که بیانگر کاربرپسندبودن سیستم و پارامتر مربوط به احساس راحتی انگشتان در دستکش کمترین میانگین را به دلیل ساختار متراکم دستکش به خود اختصاص‌داده‌است.

کلمات کلیدی

سکته مغزی، توان‌بخشی انگشتان دست، ربات‌های پوشیدنی، انتقال قدرت کابلی

۱- مقدمه

بیماران می‌توانند به طور فعال در آموزش توان‌بخشی با ربات‌های اسکلت بیرونی شرکت کنند که برای بهبود اثر توان‌بخشی در عمل بالینی ثابت شده‌است. ربات‌های توان‌بخشی می‌توانند با تحریک سیستم عصبی برای بهبود سیستم ایمنی بدن و در نتیجه تسهیل بهبود طبیعی، عملکرد فیزیولوژیکی را تا حد معقولی ارتقا دهند. روش مرسوم برای توان‌بخشی عملکردهای حرکتی انگشتان دست، فیزیوتراپی سنتی است. درمان فیزیکی سنتی تکراری نتایج مثبتی را برای بازماندگان سکته مغزی به همراه داشته است. برای ارائه فیزیوتراپی سنتی به تعداد زیادی از بازماندگان سکته مغزی و زمان زیادی از متخصصان درمانگر لازم است. همچنین، فیزیوتراپی برای هر بازمانده از سکته مغزی نیاز به جلسات تمرینی تکراری، وظیفه‌محور و طولانی دارد. به علاوه، فرایند دستی عمدتا براساس قضاوت درمانگران فیزیکی است و هیچ روش عینی برای ثبت و ردیابی الگوهای بهبودی وجود ندارد. ربات‌ها قادر به ارائه جلسات درمانی طولانی‌مدت تکراری، وظیفه محور، فشرده و از نظر اقتصادی مناسب هستند. هم‌چنین، ابزار دقیق رباتیک می‌تواند پارامترهای حرکتی بیماران را ردیابی کند که می‌تواند به ارزیابی عینی پیشرفت و بهبود بیماران کمک کند. هم‌چنین، می‌توان با کمک الگوهای کنترل، ربات سفارشی را مطابق سطح کمک به بیماران تنظیم کرد[۱]. این امکان وجود دارد که ساختارهای سفت و سخت این

ACCEPTED MANUSCRIPT

دستگاه‌ها با کاهش کیفیت زیست تقلید[1] آنها، پتانسیل درمانی رباتیک را مختل کند. این ممکن است شامل کاهش حرکت در جهت‌های غیرفعال مانند بازکردن انگشت باشد یا می‌تواند شامل داشتن محورهای چرخشی سفت و سخت باشد که در حین حرکت با محور آناتومیک[2] انگشت ناهماهنگ می‌شوند[۲]. در مقابل، ربات‌های نرم از موادی مانند سیالات، ژل‌ها و پلیمرهای نرم که به راحتی تغییر شکل می‌دهند ساخته‌می‌شوند که به دلیل انطباق و تطبیق‌پذیری بیشتر در عین انطباق با خطوط بدن انسان، کیفیت‌های بیومیمتیک (زیست سازگار) بهتری دارند[۳]. در زمینه استفاده از رباتها به منظور توان‌بخشی، تلاش‌های متعددی انجام گرفته است. توسط بائه و همکاران ، یک ربات پوشیدنی ساخته‌شده‌است که یک ارتز[3] رباتیک[4] دارای سه درجه آزادی برای کمک به حرکات مچ دست و تمام انگشتان به استثنای انگشت شست است و توسط سه محرک خطی فعال می‌شود: یک سیلندر پنوماتیک تقویت‌شده برای مچ دست و دو عملگر خطی الکتریکی برای انگشتان[۴]. در مقاله جو و همکاران ، یک سیستم اسکلت بیرونی دست پوشیدنی برای تمرین خمیدگی/کشش انگشتان با ساختاری ساده و پوشیدنی برای کمک به حرکت انگشت در ۱ درجه آزادی طراحی‌شده است. نمونه اولیه که به دو قسمت تقسیم‌شده‌است، یک قسمت برای انگشت شست، قسمت دیگر برای بقیه انگشتان ، تنها توسط دو موتور خطی فعال می‌شود. برای کاهش تعداد محرک‌ها و پیچیدگی سیستم، فقط یک موتور چهار انگشت را هدایت می‌کند[۵]. در مقاله چنگ و همکاران ربات دارای ساختار مدولار شده با ۹ درجه آزادی برای کنترل مستقل انگشتان بیمار ساخته شده‌است که برای کاهش وزن اعمال‌شده بر روی دست و بازوی بیمار، کل سیستم حرکت ربات شامل موتور، درایور ، کنترلر و ماژول‌های منبع تغذیه در یک کوله پشتی قرار می‌گیرد و از رویکرد کابلی استفاده می‌شود[۶]. در مقاله پارک و همکاران یک ارتز رباتیک پوشیدنی به نام اگزوتاندون[5] طراحی‌شده‌است و هنگامی که قصد پوشنده برای بازکردن دست به کمک بازوبند الکترومایوگرافی [6] تشخیص‌داده می‌شود، محرک جمع می‌شود و از طریق شبکه اگزوتاندون، گشتاورهای امتدادی را روی مفاصل انگشتان اعمال می‌کند. برعکس، وقتی قصد بستن دست تشخیص داده‌شود، موتور امتداد می‌یابد و نیروهای موجود در شبکه تاندون را شل می‌کند و به انگشتان اجازه می‌دهد خم شوند[۷]. در مقاله مورنو و همکاران دست رباتیک[7] به عنوان یک اسکلت بیرونی ساخته‌شده‌است که ساختار مکانیکی از پنج زیرمجموعه تشکیل‌شده‌است که هر کدام به یک انگشت مرتبط است. مجموعه های فرعی انگشت اشاره، وسط، حلقه و انگشت کوچک بر روی پلت‌فرمی که در پشت دست قراردارد، نصب می‌شوند[۸]. در مقاله یپ و همکاران یک دستکش رباتیک نرم از محرک های پنوماتیک نرم تقویت‌شده با پارچه طراحی‌شده‌است. این محرک‌ها از لاستیک سیلیکونی است که با فشار هوا، قادر به پشتیبانی از دامنه حرکتی انگشت و ایجاد تحریک مورد نظر در مفاصل انگشت هستند[۹]. در همان سال در مقاله دیگری از یپ بررسی شده است که در مقایسه با محرک‌های مبتنی بر الاستومری توسعه‌یافته قبلی، محرک‌ها می‌توانند به شعاع خمش کوچک‌تری دست‌یابند و نیرو و گشتاور کافی برای کمک به خم شدن و امتداد انگشت در فشار هوای پایین‌تر ایجاد کنند[۱۰]. در مقاله کپلو و همکاران هر محرک مبتنی بر پارچه از سه لایه پارچه و دو کیسه ضد هوا که بین هر جیب پارچه قرار گرفته است، تشکیل شده است. خم‌شدن و کشش انگشت با فشار دادن انتخابی این کیسه‌ها با یک پمپ هوا به دست می‌آید. یک حلقه کنترل فشار برای روشن‌کردن پمپ الکتریکی و به حرکت درآوردن شیرهای برقی نصب‌شده‌است[۱۱]. در مقاله تانگ و همکاران یک دستکش رباتیک نرم بر اساس یک محرک کامپوزیتی نرم الاستیک [8] طراحی‌شده‌است که یک لایه جبران‌کننده گشتاور الاستیک را برای افزایش نیروی خروجی و

[1] Biomimetic
[2] Anatomic
[3] Orthosis
[4] Robotic
[5] Exo-tandon
[6] Electromyography
[7] Robotic Hand
[8] Soft-Elastic Composite Actuator

ACCEPTED MANUSCRIPT

همچنین دستیابی به حرکت دو جهته ادغام می‌کند. چنین طراحی ترکیبی همچنین درجه غیرخطی‌بودن را در مقایسه با یک محرک کاملاً نرم کاهش‌می‌دهد[۱۲]. در مقاله یورکویچ و همکاران یک ارتز ربات بازکردن انگشتان دست[۹] ساخته‌شده‌است که شامل یک دستکش با تاندون‌های مصنوعی تعبیه‌شده در انگشتان دستکش است. تاندون‌ها توسط یک محرک خطی کشیده و هل‌داده‌می‌شوند تا انگشتان را باز و خم کنند[۱۳]. در مقاله یورکویچ و همکاران در سال بعد ، دستکش رباتیکی که به کشش انگشت و بازکردن انگشت شست با گسترش محرک در سمت پشتی مچ برای اعمال کشش در امتداد تاندون‌های پشتی و جمع‌کردن محرک در سمت کف دست کمک‌میکند ، مطرح شده است. تاندون‌های کف دست دستکش موردنظرکمک به خم شدن انگشت اشاره و میانی و کمک به بازگشت شست را با گسترش محرک در سمت کف مچ و جمع‌کردن محرک در سمت پشتی مچ ارائه می‌دهد[۱۴].

در مقاله آدینه و همکاران، یک کنترل‌کننده غیرخطی پشت‌سرگذارنده[۱۰] پیشنهادشده که سیگنال‌های مناسب را برای جایگزینی سیگنال‌های از دست‌رفته تولید و با یک تحریک الکتریکی عملکردی با استفاده از یک مدل اسکلتی عضلانی مسطح که شامل شش عضله و دو مفصل (شانه و آرنج) است، به توان‌بخشی اندام فوقانی کمک میکند[۱۵]. در مقاله سعیدی و همکاران، یک ربات توان‌بخشی شش درجه آزادی طراحی شده است که در سینماتیک ربات سه محرک اول به طور فعال کنترل می‌شوند و بقیه می‌توانند به صورت غیرفعال عمل کنند و از کنترل امپدانس استفاده‌شده‌است[۱۶]. در مقاله قاسمی و همکاران، یک ربات پوشیدنی که قادر به ارائه سه حرکت آناتومیک سر برای توان‌بخشی گردن با استفاده از کنترل امپدانس است، بررسی و ساخته‌شده‌است[۱۷]. مقاله جوانبخت و همکاران، نوع منحصر به فردی از ربات مار را بررسی می‌کند که از ماژول‌های کروی استفاده و یک روش جدید برای تنظیم رفتار ربات در شیب‌های سطحی مختلف ارائه می‌کند که در بهینه‌سازی حرکت آن در سطوح شیب‌دار مؤثر است[۱۸]. مقاله دهقان و همکاران، طرحی جدید برای ربات توان‌بخشی انگشت و مچ با یک کنترل‌کننده حالت لغزشی فازی و حرکت هر فالانکس به صورت جداگانه با دو محرک در سیستم است[۱۹].

برخی مقالات مورد بررسی علاوه بر ویژگی توان‌بخشی و توان‌افزایی ، امکان انجام کارهای روزمره را برای افراد دچار ضایعه نخاعی یا بازماندگان سکته مغزی فراهم می‌کنند. اسکلت‌های بیرونی سنتی شامل استفاده از سیستم‌های سفت و سخت پیچیده هستند که مانع حرکت طبیعی مفاصل می‌شوند و در نتیجه قابلیت پوشیدن را کاهش می‌دهند و باعث ناراحتی کاربر می‌شوند. بنابراین برای افزایش جنبه کاربردی‌بودن ربات ها و اسکلت های خارجی ساخته‌شده، ساختارهای پیشنهادی به سمت ساختارهای نرم و فابریکی جهت انطباق بیشتر با دست پیش می‌روند. علاوه بر این، ربات های نرم سبک‌تر و طرح‌های ساده‌تری دارند که احتمال قابل‌حمل بودن آنها را افزایش می‌دهد و امکان توان‌بخشی در خانه را ممکن می‌کند. این به بیماران اجازه می‌دهد تا به راحتی در خانه خود آموزش ببینند و هزینه‌های کلی توان‌بخشی را کاهش می‌دهد.

هدف مقاله پیش رو طراحی و ارزیابی یک دستکش رباتیک نرم است که به حرکت باز و بسته‌شدن انگشتان با استفاده از ترکیب روش کابلی و محرک‌های الکتریکی کمک می‌کند و برای افراد پس از سکته مغزی که دچار گرفتگی عضلات انگشتان دست شده‌اند، بعد از چند جلسه فیزیوتراپی و توانایی بازکردن انگشتان مناسب است. در این پروژه سعی‌شده تا حد امکان از به‌کارگیری قطعات و تجهیزات پیچیده پرهیز و رباتی با ساختاری نرم و بیشترین سازگاری با انگشتان دست ساخته‌شده و از نوآوری‌های پژوهش می‌توان الگوریتم کنترلی ساده و کم پارامتر و تنظیم سرعت حرکت انگشتان به کمک مدار مدولاسیون پهنای باند و قابلیت اطمینان و ایمنی بسیار بالا را نام برد که از دو سوئیچ حدی مکانیکی شامل شاسی فلزی و تیغه‌های فنری ومیکروسوئیچ‌های الکتریکی قرارگرفته روی

[9] Hand Extension Robot Orthosis
[10] backstepping

ACCEPTED MANUSCRIPT

قرقره موتور استفاده‌شده‌است و برای کاهش حجم و هزینه‌های پروژه از میکروکنترلر ای وی آر [11]استفاده‌شده‌است و از دیگر امکانات طرح دو حالت دستی و اتوماتیک را می‌توان نام برد که قابلیت تنظیم میزان باز و بسته انگشتان را فراهم می‌کند. تولید این ربات توان‌بخشی از سه مرحله طراحی و شبیه‌سازی در نرم افزار ، نیروسنجی و بررسی تیغه‌های فنری و در نهایت ساخت نمونه اولیه طرح مورد نظر به روش تجربی تشکیل شده‌است. طراحی ربات، با توجه به بررسی آناتومی انگشتان دست صورت‌گرفته‌است.

۲- طراحی و ساخت

۲-۱- ساختار دست انسان

از آنجا که مکانیزم اسکلت خارجی دست بعد از پوشیدن، منطبق با دست و انگشتان خواهدشد، ساخت و کنترل آن به درک آناتومی و بیومکانیک دست نیاز دارد تا از عملکرد ایمن و مؤثر آن اطمینان حاصل شود. مخصوصا، درنظرگرفتن درجات آزادی [12]و محدوده حرکت [13] برای هر مفصل برای طراحی ساختاری ایمن از نظر مکانیکی بسیار مهم است. به علاوه، حرکت دست کاملا به عضلات درونی و بیرونی و همچنین بافت‌های پیوندی بستگی دارد. بدین ترتیب دانش سیستماتیک در این زمینه‌ها به دستیابی به عملکرد مناسب برای توان‌بخشی کمک می‌کند[۲۰] که در مجموع، دست انسان دارای ۱۹ مفصل و ۲۳ درجه آزادی است.

۲-۲- پارامترهای طراحی

برای آنکه طراحی با دقت بیشتری انجام شود، ابتدا نیاز است مدلی نسبتا دقیق مخصوصا منطبق بر انگشتان به دست آید. این مدل ابتدا به صورت دو بعدی در نرم افزار سالیدورکس [14] و سپس به کمک نیروسنجی تیغه‌های فنری مناسب انتخاب و نمونه اولیه ربات با آزمایشات تجربی بررسی و تولید شد و موقعیت اجزای روی آن مشخص شد. در این ربات، عملگر با استفاده از کابل به سر تیغه‌های فنری که روی مفاصل ۴ انگشت منطبق هستند، متصل می‌شود و عمل حرکت کلی انگشت با این مکانیزم که موتور کابل‌ها را می‌کشد و انگشتان جمع می‌شود و با چرخش موتور در جهت مخالف ، انگشتان به کمک تیغه‌های فنری باز می‌شوند، صورت‌می گیرد. بنابراین با توجه به بررسی منابع مربوطه الزامات طراحی ربات مورد نظر در جدول ۱ آمده‌است.

جدول۱: خلاصه محدودیت‌ها و پارامترهای طراحی[۸]

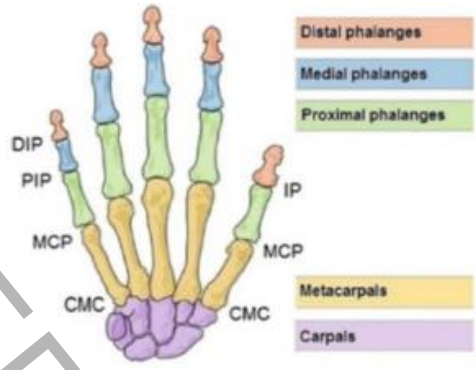
Table1. Summary of limitations and design parameters[8]

الزامات طراحی ربات موردنظر	وزن سبک و طراحی ساده
	هزینه مقرون به صرفه[۲۱]
	کاربری آسان
	ایمنی
	راحتی

[11] AVR
[12] degrees of freedom
[13] range of motion
[14] SolidWorks

ACCEPTED MANUSCRIPT

- **دامنه حرکت :** عناصر مکانیکی باید طوری طراحی شوند که دامنه حرکت طبیعی مفاصل یک دست انسان سالم همانطور که جدول ۲ آمده‌است را فراهم‌کند و اطمینان حاصل شود که دستگاه به طور دقیق سینماتیک مسیرهای فیزیولوژیکی را تقلید کند.



شکل ۱: ساختار دست انسان[۸]

Figure2. Structure of the human hand [8]

جدول ۲: میزان زوایای قابل دسترسی بندهای مختلف انگشتان دست[۲۲]

Table2. The amount of accessible angles of different finger joints[22]

نام مفصل	محدوده چرخشی
متاکارپوفالانکس	۰ تا ۹۰ درجه
پروگزیمال فالانکس	۰ تا ۱۰۰ درجه
دیستال فالانکس	۰ تا ۵۰ درجه

- **تطبیق پذیری :** برای اینکه ربات مورد نظر، قابل تنظیم بدون تلاش برای اندازه‌های مختلف دست و کاملاً سازگار با طول ها و ضخامت‌های مختلف انگشتان دست باشد ، بنابراین پژوهش‌های متعددی که در زمینه اندازه‌گیری و طبقه‌بندی سایزهای متفاوت انگشتان دست صورت‌گرفته‌است ، مورد بررسی‌قرارگرفتند که طول انگشتان دست می‌توانند به میزان مقادیر جدول۳ متغیر باشد[۸].

جدول ۳: سایزهای اندازه گیری شده برای انگشتان دست[۸]

Table3. Sizes measured for fingers[8]

	انگشت اشاره	انگشت میانی	انگشت حلقه	انگشت کوچک
طول بر حسب میلی‌متر	۵-۸۶/۱۰۸	۱۲۱-۱۰۳/۵	۱۱۳-۹۳	۹۱-۷۵

- **نیروی وارد بر انگشتان و مفاصل :** انگشتان دست به دلیل ظرافت در اندازه و تعدد استخوان‌های موجود در فضای کم به شدت در اثر واردآمدن نیروهای غیرمتعارف آسیب‌پذیر است لذا در طراحی مکانیزم میبایست تا حد زیادی از وجود

ACCEPTED MANUSCRIPT

نیروهای بیش از اندازه در سیستم جلوگیری شود. پس از بررسی مقالات حد نهایی نیرو و گشتاور برای اعمال به انگشتان مختلف به صورت جدول ۴ آورده‌شده‌است .

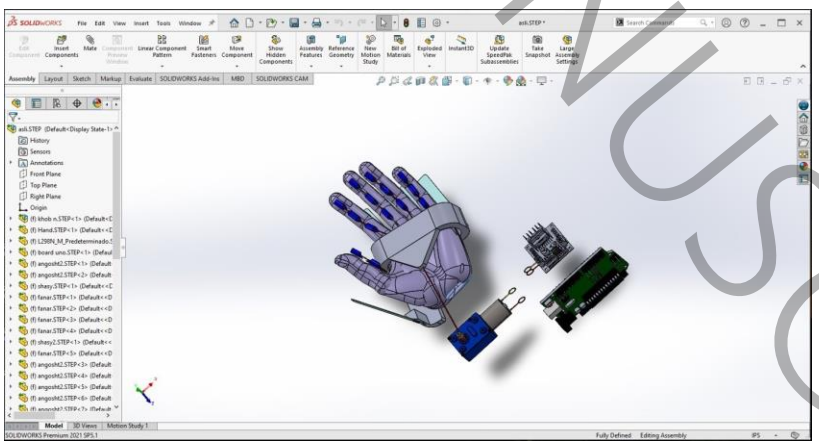
جدول۴: ماکزیمم مقادیر نیروی وارد آمده بر انگشتان دست به صورت عمودی و در راستای طول به صورت ممتد[۲۳]

Table4.The maximum values of the force applied to the fingers vertically and continuously along the length[23]

	انگشت اشاره	انگشت میانی	انگشت حلقه	انگشت کوچک
ماکزیمم نیروی عمود بر انگشت به صورت ممتد بر حسب نیوتن	۱۰	۱۰	۹	۸
ماکزیمم نیرو در راستای طول انگشت به صورت ممتد برحسب نیوتن	۳۲	۳۰	۲۴	۱۸

۳-۲- ساخت مدل و طراحی اولیه در نرم افزار سالیدورکس

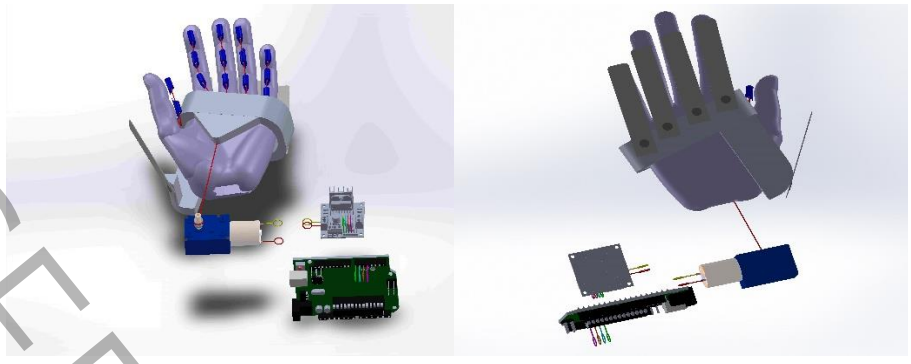
طراحی مکانیکی ربات‌ها به عنوان یک مسئله چند جانبه که شامل بخش‌های متعددی از جمله اتصال موتورها و قطعات الکترونیکی به یک ساختار مکانیکی منطقی است بیش از هرچیزی مبتنی بر تجربه و تسلط کامل فرد بر روی تمامی زوایای طرح است. در این گونه برخورد با طراحی ربات روش جامع و مدونی وجود ندارد و اصول پیوسته‌ای که منجر به طراحی ربات توان‌بخشی شود به چشم نمی‌خورد[۲۴]. مکانیزم موردنظر با شبیه‌سازی قطعات با استفاده از نرم‌افزار طراحی‌شده‌است. این نرم افزار به دلیل سرعت بالا، کاربرپسندبودن، قابلیت انیمیشن‌سازی مدل در هنگام مونتاژکردن و قابلیت ارتباط با تمامی نرم‌افزارها در مقایسه با طراحی نرم‌افزارهای دیگر مورد استفاده قرارگرفته‌است. پس از طراحی، قطعات مورد نیاز برای ساخت و راه‌اندازی طرح پیشنهادی تهیه و مدل واقعی و نمونه اولیه ساخته‌شد. طرح اولیه برای ساختار سیستم به صورتی است که برای بازکردن انگشتان بدون تیغه های فنری، نیازمند است تا کابلی نیز از عقب انگشتان را کشیده و به کمک موتور دیگری کابل‌ها، انگشتان را خم‌کند. بنابراین طرح دیگری جایگزین‌شد که کابل و موتور اضافی برای بازکردن انگشتان را حذف و با استفاده از خاصیت کشسانی تیغه‌ها و بازگشت به حالت اولیه، انگشتان نیز باز شوند.



شکل۲: طراحی نهایی در نرم‌افزار سالیدورکس

Figure2. Final design in Solidworks software

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۳: نمای طراحی از روبرو و قرارگیری فنرها در پشت انگشتان

Figure3. View of the design from the front and placing the springs behind the fingers

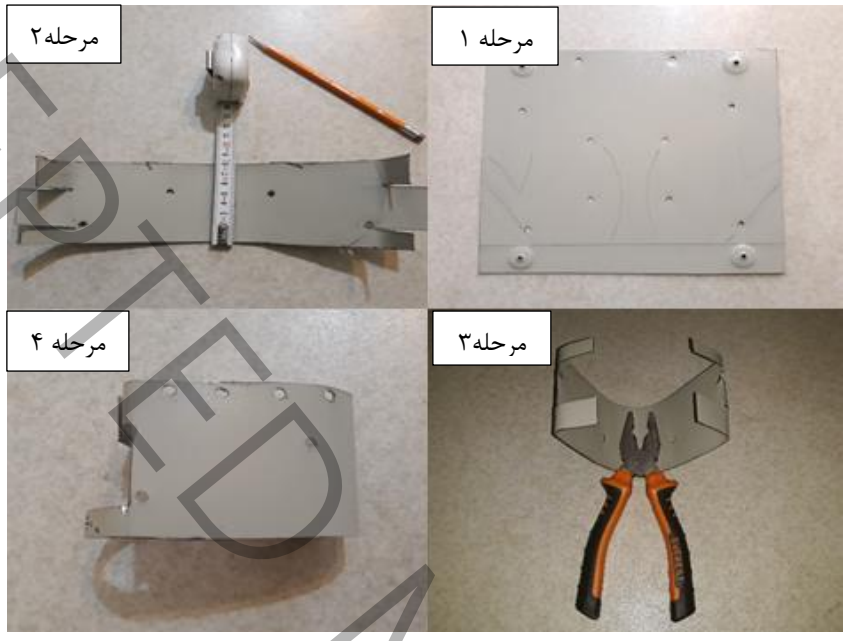
به کمک طراحی در نرم افزار، شماتیک اولیه طرح دوم به دست آمد و محل قرارگیری تقریبی قطعات مشخص شد. پس از شبیه سازی و برای ساخت سیستم اصلی ، طرح اینکه کابل‌ها از روی فنرها عبور و سپس لایه دیگری پارچه روی آن‌ها کشیده‌شود ، به دلیل افزایش اصطکاک کابل و تیغه‌ها و افزایش مسیر طول کابل تا رسیدن به عملگر رد و طرح دیگری جایگزین‌شد. در طرح سوم که همان طرح نهایی است، تنها تیغه‌ها بین دو لایه پارچه قرار گرفت تا علاوه بر حذف عامل اصطکاک انگشتان با تیغه‌ها، اصطکاک بین تیغه‌ها و کابل‌ها نیز ایجادشد، حذف‌گردد. طراحی نهایی با درنظرگرفتن قسمت کنترلی به طور جداگانه و دور از انگشتان از اعمال وزن به انگشتان جلوگیری کرده‌است و به منظور جلوگیری از اعمال وزن اضافی به انگشتان دست، قسمت کنترلی شامل برد اونو و برد کنترلی درایور موتور به طور جداگانه و به کمک صفحه‌کلید و صفحه‌نمایش صورت‌گرفت و قطعاتی چون موتور و صفحه کلید روی تخته نصب و به کمک کابل‌ها، انگشتان را به حرکت درآورند. مکانیزم حرکتی طرح موردنظر به صورتی است که تیغه‌های فنری بر روی شاسی فلزی نصب‌شد و به دستکش پارچه‌ای دوخته‌شد و از آسیب به دست جلوگیری شده‌است و در ادامه موتور گیربکس سیم را می‌کشد که کابل‌ها به رنگ قرمز در طراحی مشخص‌شده‌است و انگشت‌ها را جمع‌می‌کند و بعد از رسیدن به یک نقطه مشخص حرکت بر عکس می‌شود و فنرهای پشت انگشتان به آرامی انگشت‌ها را به حالت ایستاده قرار می‌دهند و محل اتصال موتور و برد و درایور به صورت همرنگ روی هر قطعه مشخص‌شده‌است.

۴-۲- طراحی شاسی و نیرو سنجی تیغه های فنری

برای انتخاب تیغه‌های فنری مناسب از روش تجربی استفاده و به کمک نیروسنجی تیغه‌های فنری مناسب هر انگشت که دارای ویژگی‌هایی از جمله توانایی بازگشت انگشتان به حالت اولیه و انعطاف‌پذیری کافی و عدم انتقال نیروی بیش از حد به موتور برای کشیده‌شدن و جمع‌کردن انگشتان بدون فشار بیش از حد به موتور باشد، مورد بررسی‌قرارگرفتند. طراحی اولیه طرح شاسی بر روی ورقه فلزی فولادی از جنس نورد گرم یا ورق سیاه رنگ‌کاری‌شده که یکی از انواع فلزات پرکاربرد و رایج و دارای انعطاف‌پذیری مناسب با ابعاد ۲۵ در ۸ سانتی‌متر با توجه به ابعاد کف دست و ضخامت مناسب استفاده‌شده‌است به طوری که با تجهیزات در دسترس قابل شکل‌پذیری و فرم‌دهی باشد ، که در این پروژه ورق فلزی با ضخامت ۱/۱۵میلی‌متر به‌کاررفته‌است. پس از طراحی اولیه شاسی، ورق فلزی برش‌داده‌شد و توسط سوهان آهن لبه‌ها بریده‌شد و پرداخت گردید. ورقه فلزی پرداخت‌شده توسط ابزار مناسب، فرم دهی اولیه گردید و برای برش‌کاری‌های ثانویه در راستای هدف و طرح نهایی پروژه آماده‌شد. پس از انجام فرم‌دهی ثانویه، شاسی برای انجام سوراخ کاری‌های مورد نیاز در جهت قرارگیری تیغه‌های فنری علامت‌گذاری شد. تیغه‌های فنری مختلف از جنس استیل با ضخامت،

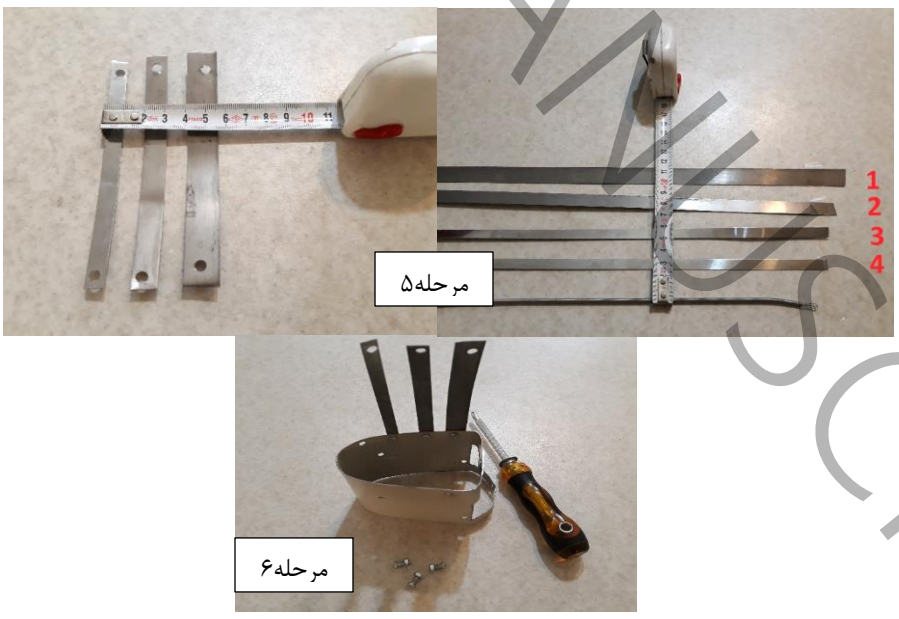
ACCEPTED MANUSCRIPT

عرض و سختی‌های متفاوت مورد آزمایش قرارگرفتند و محل قرارگیری بهینه آنها تعیین گردید. تیغه‌های فنری به صورت موقت بر روی شاسی توسط پیچ و مهره نصب‌شدند تا در مرحله بعدی آزمایش نیروسنجی شوند.



شکل ۴: از طراحی تا ساخت و پرداخت ورقه فلزی

Figure4. From design to manufacturing and finishing of sheet metal



شکل۵: ادامه مراحل طراحی شاسی

Figure5. Continuation of the chassis design process

ACCEPTED MANUSCRIPT

در این آزمایش همانطور که در جدول۵ نشان‌داده‌شده‌است، تیغه فنری شماره ۱ با عرض ۱۵ میلی‌متر ، تیغه فنری شماره ۲ با عرض ۱۱ میلی‌متر و تیغه‌های فنری شماره ۳ و ۴ با عرض ۸ میلی‌متر و سختی‌های متفاوت مورد آزمایش قرارگرفتند. محل و نحوه قرارگیری فنرها و همچنین چگونگی اتصال آنها به یکدیگر و در نهایت اتصال به موتورگیربکس تاثیر بسزایی در میزان نیروی مورد نیاز موتورگیربکس برای به‌حرکت‌درآوردن دست مکانیکی دارد.

جدول۵: عرض تیغه های فنری بر حسب میلی‌متر

Table5. Width of spring blades in millimeters

شماره تیغه	شماره یک	شماره دو	شماره سه و چهار
عرض تیغه	۱۵	۱۱	۸

بدیهی است که تیغه‌های فنری با ضریب سختی بالاتر و طول کمتر برای جابجایی نیازمند نیروی بیشتری هستند و هدف از آزمایش یافتن تیغه مناسب با توجه به موارد مورد نیاز ذیل می‌باشد :

۱) درنظرگرفتن طول تیغه فنری با توجه به طول متوسط هر یک از انگشتان دست
۲) درنظرگرفتن دارا بودن قدرت مناسب تیغه فنری برای بازگرداندن انگشتان دست خم‌شده به حالت اولیه
۳) درنظرگرفتن سختی مناسب تیغه فنری به نحوی که توانایی بازگرداندن انگشتان به حالت اولیه را داشته‌باشد و از طرفی دیگر هم نیرویی اضافه بر حد تعادل مورد نیاز ما به موتور گیربکس برای جابجایی وارد نکند.

در ادامه مراحل پروژه تیغه‌های فنری نصب‌شده بر روی شاسی نیروسنجی شد و اعداد بدست‌آمده، یادداشت گردید. در جهت یافتن تیغه فنری مناسب برای انگشت میانی ، ۴ نمونه تیغه فنری طبق جدول ۶ با طول ۱۲۵ میلی‌متر ، برای انگشت اشاره و انگشتری ، ۴ نمونه تیغه فنری با طول ۱۰۵ میلی‌متر و برای انگشت کوچک ، ۴ نمونه تیغه فنری با طول ۸۵ میلی‌متر بر روی شاسی نصب شدند و مورد نیروسنجی قرار گرفتند. پس از انتخاب نوع تیغه‌های فنری و نصب آنها بر روی شاسی طبق شکل ۶، در داخل شاسی یک دستکش محافظ نصب و تیغه‌های فنری توسط پوششی مناسب با انگشتان در تماس است. بدین صورت نمونه اولیه از پروژه مورد نظر ساخته‌شد که پس از در ارتباط قرارگیری با موتورگیربکس منتخب، آماده ثبت مشکلات احتمالی و حرکت در جهت رفع مشکلات موجود و بهینه‌سازی عملکرد دستگاه گردید.

جدول ۶: طول تیغه های فنری برای هر انگشت بر حسب میلی‌متر

Table6. Length of spring blades for each finger in millimeters

انگشت مورد نظر	انگشت میانی	انگشت اشاره و انگشتری	انگشت کوچک
طول تیغه	**۱۲۵**	**۱۰۵**	**۸۵**

ACCEPTED MANUSCRIPT

شکل ۶:مراحل نیروسنجی: مرحله ۱) نیروسنجی انگشت اشاره و انگشتری ، مرحله ۲) نیروسنجی انگشت میانی ، مرحله ۳)نیروسنجی انگشت کوچک، مرحله۴)قرارگیری تیغه های مناسب روی شاسی

Figure6. Force measurement steps: Step 1) force measurement of index and ring finger, Step 2) force measurement of the middle finger, Step 3) dynamometry of the little finger, Step 4) Placement of suitable blades on the chassis

۵-۲- نتایج حاصل از نیروسنجی

با توجه به اینکه از داخل دست مکانیکی، سیم‌کشی‌های ارتباطی با موتورگیربکس انجام شد، لذا امکان قرارگیری تیغه‌های فنری در داخل دست مکانیکی وجود نداشت و تیغه‌های فنری از روی انگشتان متصل شدند. مقادیر نیروسنجی تیغه‌ها در هر مرحله در جدول ۷ آمده است. برای بدست‌آوردن نیروی مورد نیاز موتورگیربکس مجموع نیروهای مورد نیاز جابجایی تیغه‌های فنری محاسبه‌شد و با در نظر گرفتن درصدی بالاتر از نیروی مورد نیاز در جهت پوشش خطاهای اندازه گیری و هم‌چنین حرکت خود انگشتان تهیه گردید. با در نظر گرفتن تیغه فنری شماره ۲ با طول ۱۲۵ میلی‌متر برای انگشت میانی و تیغه شماره ۱ با طول ۱۰۵ میلی‌متر برای انگشت اشاره و انگشتری و تیغه شماره ۱ به طول ۸۵ میلی‌متر برای انگشت کوچک که مقادیر طول و عرض تیغه‌های مناسب برای هر یک از انگشتان در جدول ۸ نمایش‌داده‌شده‌است، مقدار عددی ۲۰۶۵ گرم معادل حدود ۲۰ نیوتن محاسبه گردید که با در نظر گرفتن ۱۰ درصد حاشیه اطمینان، عدد ۲۲ نیوتن بدست آمد. بدیهی است که موتورگیربکسی با توانایی بالاتر می‌تواند توسط عوامل مکانیکی همچون میکروسوئیچ‌های حدی و عوامل نرم‌افزاری در جهت عدم آسیب‌رسانی، کنترل و به کار گرفته‌شود ، اما افزایش هزینه و مشکلات حمل و نقل و عدم مصرف انرژی بهینه را در پی دارد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۷: مقادیر نیروی اندازه‌گیری شده برای تیغه با طول ثابت و عرض متفاوت در هر مرحله

Table7. The values of measured force for the blade with fixed length and different width at each stage

مقدار نیرو / مرحله نیروسنجی	تیغه شماره ۱	تیغه شماره ۲	تیغه شماره ۳	تیغه شماره ۴
مرحله ۱ : تعیین تیغه انگشت میانی	۰/۲۹۰	۰/۸۹۵	۰/۱۸۰	۰/۱۵۰
مرحله ۲ : تعیین تیغه انگشت اشاره و انگشتری	۰/۳۲۰	۰/۹۳۰	۰/۲۶۰	۰/۲۲۰
مرحله ۳ : تعیین تیغه انگشت کوچک	۰/۳۸۰	۱/۱۱۰	۰/۳۶۵	۰/۳۲۰

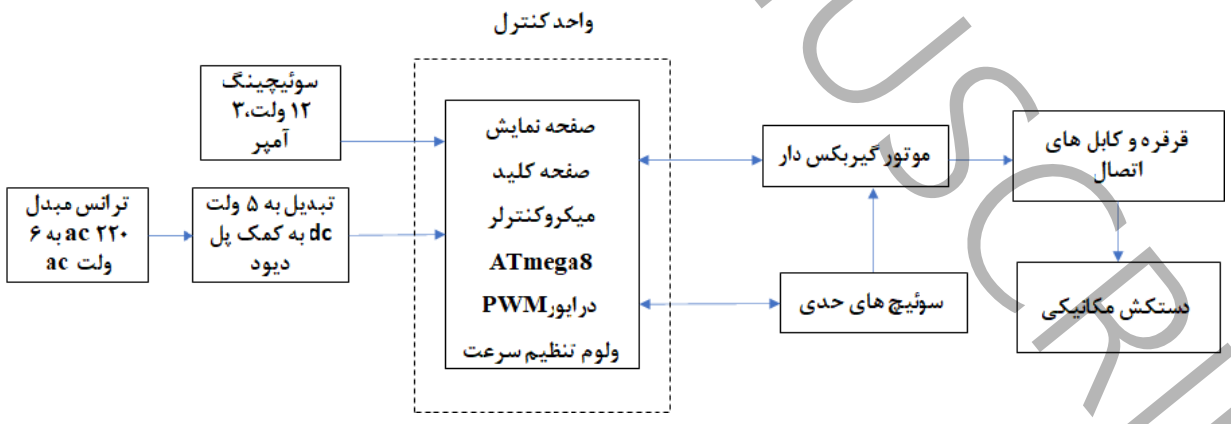
جدول۸: تیغه‌های منتخب برای هر انگشت

Table8. Selected blades for each finger

سایز تیغه فنری هر انگشت	انگشت میانی	انگشت اشاره و انگشتری	انگشت کوچک
طول (میلی‌متر)	۱۲۵	۱۰۵	۸۵
عرض (میلی‌متر)	۱۱	۱۵	۱۵

۶-۲- تجهیزات مکانیکی و الکترونیکی سیستم

دستکش رباتیک نرم مبتنی بر پارچه پوشیدنی بر اساس ابعاد متوسط اندازه دست انسان ساخته‌شده‌است. در این مطالعه، طرح ساخته‌شده بر پایه دستکش پارچه‌ای با روش کابلی و محرکه الکتریکی می‌باشد که ایمنی و راحتی کاربر را تامین و به دلیل ساختار کشسان و پارچه ای قابل تنظیم روی سایزهای مختلف انگشتان بوده و انطباق‌پذیری کافی را ایجاد می‌کند. از جمله قطعات مکانیکی سیم‌های ترمز است که به عنوان کابل‌های مجموعه بسته به محل قرارگیری دارای روکش بوده و سیم‌های روی شاسی بدون روکش کارشده‌اند. از آنجایی که موتور الکتریکی به عنوان عامل اصلی در حرکت یک سیستم مکانیکی به‌شمارمی‌آید ، لازم است تا برای ایجاد یک فضای فرمان دهی و کنترل مناسب و کاربردی بتواند به سیستم متصل گردد و به عنوان محرکه‌ی اصلی به کمک برنامه نویسی مناسب میکروکنترلر، نیروی لازم برای حرکت دستگاه و انجام فرآیند توان‌بخشی را تامین کند. بنابراین با توجه به بلوک دیاگرام سیستم در شکل ۷، قطعات به‌کاررفته، مورد بررسی قرارخواهندگرفت.



شکل۷ : بلوک دیاگرام سیستم دستکش مکانیکی توان‌بخشی انگشتان دست

Figure7. Block diagram of finger rehabilitation mechanical glove system

ACCEPTED MANUSCRIPT

طبق نتایج حاصله از آزمایش‌های انجام‌شده، بیشترین نیروی مورد نیاز با در نظرگرفتن ضریب تقریبی ۱/۲۵ به منظور افزایش توان کارکردی موتورگیربکس و با در نظرگرفتن نیروی لازم برای غلبه بر اصطکاک اجزای مکانیکی و به حرکت درآوردن تسمه‌های فنری ۹۰ نیوتن‌متر می‌باشد. که طبق آن و فرمول محاسبه گشتاور با توجه به انتخاب یک پولی تک یا دو شیار با قطر ۴۰ میلی‌متر گشتاور موتور گیربکس مورد نیاز پروژه را محاسبه شد. برای نیروی ۹۰ نیوتنی مورد نیاز، انتخاب یک موتور گیربکس ۱/۸ نیوتن متر با سرعت ۱تا ۲ دور در دقیقه ، می‌تواند مناسب پروژه باشد. برای بدست‌آوردن گشتاور موتورهای الکتریکی برحسب نیوتن‌متر می‌توان از رابطه (۱) استفاده کرد که در آن t گشتاور بر حسب نیوتن متر و p توان موتور الکتریکی بر حسب کیلو وات و s تعداد دور موتور الکتریکی در یک دقیقه است.

$$t = 9950.\frac{p}{s} \qquad (۱)$$

با جایگزین‌کردن گشتاور مورد نیاز و سرعت ۱ تا ۲ دور در دقیقه می‌توان توان موتور الکتریکی مورد نیاز را محاسبه نمود. به منظور محدودکردن مکانیکی ماکزیمم نیروی وارده از طرف موتور گیربکس الکتریکی و عدم استفاده از سنسور استرین‌گیج می‌توان با استفاده از فرمول قانون هوک، یک فنر با درجه سختی مشخص را بصورت واسط انتقال نیرو از موتورگیربکس به دستکش بکار گرفت تا از انتقال نیروی بیش از اندازه جلوگیری‌شود.

$$f = -kx \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) که f نیرو بر حسب نیوتن و k ضریب سختی فنر بر حسب نیوتن بر متر و x جابجایی فنر بر حسب متر است، با مشخص‌شدن حداکثر نیروی مجاز برای اعمال نیرو و برابر قراردادن مقدار عددی محیط پولی مورد استفاده، از میکرو سویچ حدی مینیمم تا میکرو سویچ حدی ماکزیمم (محیط پولی حد فاصل دومیکروسویچ حدی) با مقدار x ، مقدار k فنر مورد نیاز بدست‌می آید. مشخصات موتور گیربکس سیستم، جریان ۳ آمپر، ولتاژ ۱۲ ولت، توان ۳۶ وات، تعداد دور موتور ۶۰ دور در دقیقه و گشتاور ۲/۱ کیلوگرم در سانتی‌متر است. با توجه به آزمایشات انجام‌شده، نیروی موردنیاز حرکت تیغه‌های فنری معادل نیروی موردنیاز ۲۰۶۵ گرم وزن محاسبه شد و با فرض برابرگرفتن حداقل نیروی موردنیاز حرکت انگشتان با حداقل نیروی موردنیاز حرکت تیغه‌های فنری و در نظرگرفتن ۱۰ درصد نیروی بیشتر برای مقابله با اصطکاک‌های داخلی مقدار نیروی ۴۵۴۳ گرم به دست می‌آید و با توجه به شعاع پولی ۰/۲۶ سانتی‌متر و نیروی معادل ۴/۵۴۳ کیلوگرم ، حداقل گشتاور موردنیاز موتور گیربکس برای به حرکت درآوردن تیغه‌های فنری و انگشتان دست ۱/۱۸ کیلوگرم در سانتی‌متر است. حداقل نیرو و گشتاور موردنیاز ما بر اساس ۴۵۴۳ گرم و شعاع پولی ۰/۲۶ سانتی‌متر، محاسبه شد و با یک موتور گیربکس با گشتاور ۱ کیلوگرم در سانتی‌متر می‌توان وزن ۳/۸ کیلوگرم را حرکت داد.

۷-۲- راه اندازی و عملکرد سیستم

محل قرارگیری قسمت کنترلی سیستم شامل صفحه کلید و صفحه نمایش ابتدا به طور جداگانه روی قطعه‌ای پلاستیکی مشخص شد، سپس روی آن نصب گردید. روی صفحه نمایش حالت‌های کاری دستگاه از جمله حالت دستی و اتوماتیک نمایش داده می‌شود که با انتخاب حالت اتوماتیک ، سیستم وارد مرحله انتخاب تعداد دور باز و بسته‌شدن انگشتان می‌شود و می‌توان با دکمه

ACCEPTED MANUSCRIPT

های بالا و پایین تعداد دفعات تکرار حرکت را مشخص‌نمود و با انتخاب دکمه ورود[15] روی صفحه کلید ، حرکت باز و بسته‌کردن انگشتان آغاز و به تعداد عدد مورد نظر تکرار می‌شود . همچنین در حین حرکت با انتخاب دکمه خروج[16] حرکت انگشتان متوقف می‌شود و با رفتن به حالت دستی یا شروع مجدد دستگاه کالیبره می‌شود و انگشتان را به حالت باز بودن برمی‌گرداند و سپس ادامه روند کار انجام می‌شود. حالت دیگری که در صفحه کلید مشاهده می‌شود ، حالت دستی[17] است که در این حالت فرد می‌تواند به کمک دکمه‌های بالا و پایین میزان حرکت را تعیین کند. با فشار و نگه داشتن دکمه پایین انگشتان شروع به جمع‌شدن می‌کند و به میزانی که دکمه نگه‌داشته‌شود ، انگشتان به همان میزان خم می‌شوند و حد نهایت بسته‌شدن انگشتان تا رسیدن موتور به سوئیچ های حدی است. اگر دکمه بالا فشار و نگه‌داشته‌شود، انگشتان باز می‌شود و فرآیند به همان صورت انجام می‌شود و در همان لحظه اول چون دستگاه کالیبره و انگشتان در حالت باز است، اتفاقی نمی‌افتد اما برای تعیین میزان بازشدن هنگام بسته‌بودن و انجام حرکت عکس ، به کمک دکمه‌ها می‌توان میزان موردنظر را تعیین نمود. در پشت قسمت صفحه کلید، قطعات الکترونیکی مورد نیاز روی برد مربوطه نصب و از میکروکنترلر ای تی مگا ۱۸[18] و به کمک زبان برنامه نویسی بیسیک ،یک زبان برنامه نویسی سطح بالا ، میکروکنترلر برنامه‌ریزی شد. میکروکنترلر موردنظر دارای ۲۸ پایه می‌باشد و با ولتاژ ۲/۷ تا ۵/۵کار می‌کند و دارای ۸ کیلو بایت حافظه قابل پروگرام‌کردن می‌باشد و دارای یک کیلو بایت رم اجرایی و ۵۱۲ بایت ای ای پرام [19]و دارای ۱۰ پایه آنالوگ به دیجیتال می‌باشد. همچنین دارای سه پایه مدار مدولاسیون پهنای باند و ۳ تایمر می‌باشد. موتور دارای گیربکس و کنترل سیستم با مدار مدولاسیون پهنای باند و آی سی ان ای ۵۵۵ و مدار سازگار با موتور طبق ولتاژ و آمپر موردنیاز طراحی‌شده‌است و با توجه به مشخصات موتور مدار موردنظر طراحی‌شده‌است. برای کنترل سیستم از درایور مدار مدولاسیون پهنای باند استفاده‌شده‌است که در حالت اتوماتیک سیستم با تنظیم پیچ پتانسیومتر می‌توان سرعت حرکت را تنظیم نمود. در بلوک دیاگرام مراحل راه اندازی سیستم نشان‌داده‌شده است و منبع تغذیه سیستم برق شهر است، بنابراین برای تبدیل برق متناوب به جریان مستقیم از ترانس مبدل ۲۲۰ولت متناوب به ۶ ولت متناوب و پل دیود برای تبدیل به ۵ ولت دی‌سی استفاده‌شده‌است که در واقع ولتاژ مورد نیاز برای شروع به کار میکروکنترلر، صفحه کلید و صفحه نمایش می‌باشد و برای موتور گیربکس نیز تبدیل ولتاژ ۱۲ ولت انجام می‌شود. تعیین محل حد باز و بسته‌شدن انگشتان به روش تجربی انجام شد و محل سوئیچ‌های حدی مشخص‌گردید که به منظور جلوگیری از آسیب قطعه موردنظر، جلوی هر کدام از آن ها یک عدد فنر قرار گرفت تا از شتابی که موتور به آنها وارد می‌کند کاسته‌شود. سوئیچ‌های حدی روی قرقره که دور آن سیم‌های از جنس سیم ترمز پیچیده‌شده‌است، قرارگرفتند و قرقره روی موتور گیربکس که موتور شیشه بالابر ماشین پژو ۴۰۵ است، قرار گرفت. فرآیند حرکت انگشتان به این صورت است که با چرخش قرقره در جهت ساعتگرد و به کمک بازگشت تیغه‌های فنری به حالت اولیه انگشتان گسترده‌شدند و با حرکت موتور در جهت پاد ساعتگرد کابل‌های مربوطه که در شیار قرقره قرارگرفته‌اند ، کشیده‌شده‌اند و حرکت جمع و خمش انگشتان اتفاق افتاد. قسمت دستکش و لایه‌های زیرین شامل تیغه‌های فنری است. تیغه‌ها برای سازگاری با انگشتان و دستکش، دارای برش گرد و روی یک لایه از دستکش چسبانده‌شده‌است و پس از جداکردن قسمت انگشتان یک دستکش دیگر ، لایه دیگری روی تیغه ها برای جلوگیری از آسیب و کاهش نیروی اعمالی از سمت تیغه‌ها به انگشتان، با چسب به دستکش لایه زیرین متصل شد. تیغه‌های فنری از قسمت کمی بالاتر از سر انگشتان و دستکش به کابل‌ها متصل‌شدند و اندازه تیغه‌ها مقداری بیشتر از سایز انگشتان دست در نظر گرفته‌شده‌است. در این طرح کابل‌های مربوطه به صورت جدا از تیغه‌ها و دستکش روی شاسی قرار گرفته‌اند ، بنابراین از ایجاد اصطکاک ناشی از حرکت کابل‌ها جلوگیری‌شد که یکی از مزایای سیستم

[15] ent
[16] esc
[17] manual
[18] ATmega8
[19] EEPROM

ACCEPTED MANUSCRIPT

موردنظر است و برای زیبایی طرح قسمتی از دستکش روی شاسی چسبانده شد. جهت تکمیل و ساخت بخش کنترلی، به طراحی قسمت مداری و تعیین محل قرارگیری قطعات الکترونیکی نیاز است و لازم است تا نحوه اتصالات به طور دقیق مشخص شود. بنابراین برای تحقق این هدف از نرم افزار پروتئوس کمک گرفته‌شد و پس از طراحی شماتیکی در این نرم افزار، قطعات روی برد الکترونیکی تهیه‌شده قرارگرفت و پس از تست اجزا و کارکرد صحیح قطعات، بخش کنترلی سیستم تکمیل‌شد و به کمک پیچ تنظیم سرعت و کلیدهای روی صفحه کلید با این بخش می‌توان ارتباط برقرار نمود(طراحی مدارات الکترونیکی به صورت سفارشی ساخته شده‌است).

نحوه اتصالات و بخش مکاترونیکی سیستم نیز به صورت زیر می‌باشد:

- صفحه نمایش کاراکتری ۲×۱۶ با ارتباط سریال ۴ بیتی
- اتصال موتور به میکروکنترلر به وسیله دو عدد رله و به صورت دیجیتال
- کنترل سرعت موتور توسط مدار مدولاسیون پهنای باند و به صورت دیجیتال

در این پژوهش برای برنامه‌ریزی میکروکنترلر مورد استفاده ، زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک مورد استفاده قرارگرفته‌است. آنچه که ساخته‌شد، پس از برنامه ریزی میکروکنترلر، ارتباط آن با کامپیوتر قطع‌شد و دیگر نیازی به یک کامپیوتر برای کنترل و راه‌اندازی سیستم نمی‌باشد.

۳- تست و بررسی کارکرد سیستم

بررسی با استفاده از جامعه آماری یکی از روش‌های مرسوم در دست‌یابی به اطلاعات موردنظر در ارتباط با یک موضوع می‌باشد. برای نتیجه‌گیری با استفاده از این روش، مجموعه فعالیت‌هایی که به ترتیب عبارتند از جمع‌آوری اطلاعات اولیه، مرتب و خلاصه کردن اطلاعات، طبقه‌بندی و تجزیه و تحلیل اطلاعات مرتب‌شده و در نهایت تفسیر داده‌ها، صورت‌می‌گیرد. یکی از مزایای قابل توجه استفاده از این روش آن است که می‌توان بدون جمع‌آوری اطلاعات از تمام افراد مجموعه و با بررسی تعداد محدودی از این افراد به نتایج قابل قبولی در حالت کلی دست‌یافت. با این وجود پیش از پرداختن به نحوه بررسی، باید به این نکته اشاره‌گردد که هدف از انجام آزمایش در این مرحله، بررسی قابلیت سیستم در بهبود بیمارانی که انگشت آنان دچار آسیب‌دیدگی بر اثر سکته یا رماتیسم مفصلی، نمی‌باشد چرا که این بررسی نیاز به جامعه آماری گسترده و هم چنین زمان قابل توجه و تمرینات مداوم در دوره‌های بلندمدت و زیر نظر پزشکان متخصص دارد که خود پژوهش کامل دیگری می‌باشد، ولی بررسی این نکته که کارکرد این سیستم مطابق پارامترهای در نظرگرفته‌شده باشد، نیازی به بررسی آن بر روی بیماران ندارد و با تست آن بر روی افراد سالم نیز می‌توان تا حد قابل قبولی به نتایجی صحیح و قابل استناد رسید. با در نظرگرفتن این مطلب در ادامه به بیان اهداف آزمایش، نحوه جمع‌آوری اطلاعات و در نهایت به بیان اطلاعات و نتیجه گیری از آزمایش پرداخته‌خواهدشد.

نحوه ارزیابی پارامترهای ذکرشده در پایین در این آزمایش، استفاده از یک فرم نمره‌دهی به گزاره‌های ارائه شده درنظرگرفته‌شد و تعداد ۳ سوال مربوط به ارزیابی پارامترهای فوق و ۱ سوال نیز مربوط به ارزیابی کلی دستگاه اختصاص پیداکرد. هم‌چنین نحوه نمره‌دهی به سوالات نیز به صورت اختصاص پیداکردن یک عدد صحیح در بازه ۱ تا ۵ می‌باشد که ۱ به معنای کاملا مخالف و ۵ به معنای کاملا موافق با گزاره می‌باشد. در جدول۹ گزاره‌ها به تفکیک پارامترهای موردنظر آورده‌شده‌است. برای یکسان‌سازی شرایط آزمایش تمامی شرکت‌کنندگان تحت یک نوع حرکت یکسان قرار گرفتند و در طول آزمایش ابتدا افراد با یک دست شاسی را نگه‌داشتند و انگشتان را به طور کامل داخل دستکش و برای ایمنی بیشتر روی مکانی ثابت قراردادند، سپس توضیحات اولیه برای

ACCEPTED MANUSCRIPT

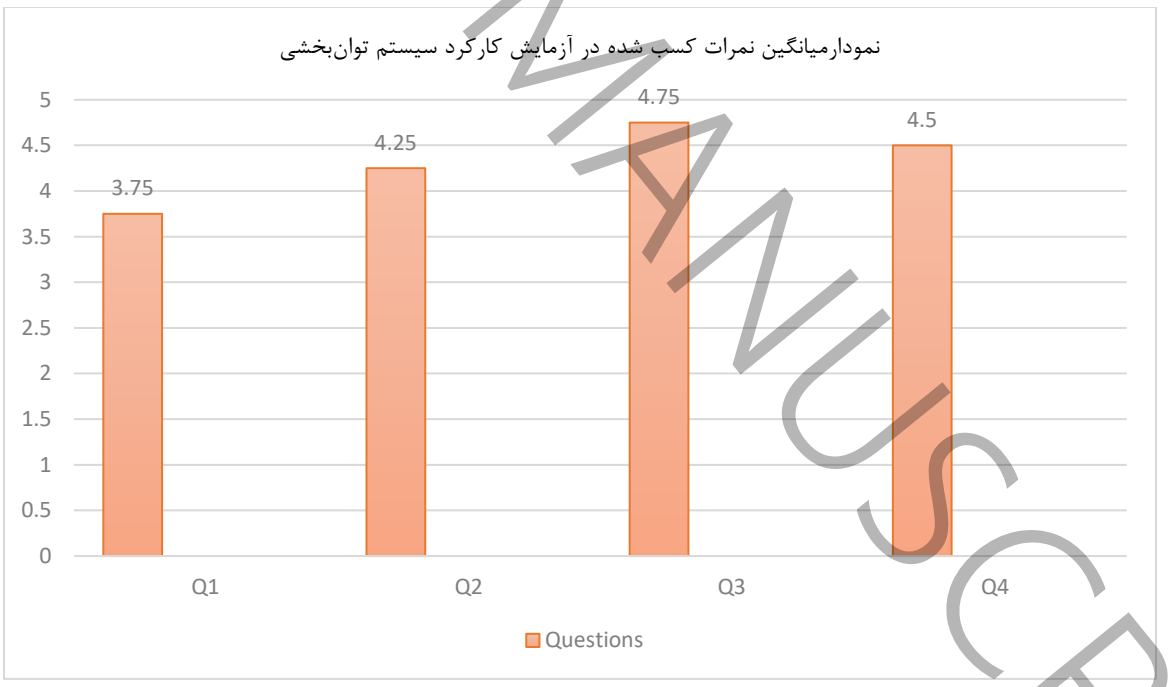
نحوه کار با صفحه کلید و معنای موارد صفحه نمایش توضیح‌داده‌شد و سیستم را برای مدتی در اختیار کاربر قرار دادیم تا با آن آشنا شوند، سپس پس انجام یکبار حرکت باز و بسته شدن انگشتان در هر دو حالت، افراد مورد پرسش قرارگرفتند و سوالات نمره‌دهی شدند و نتایج حالت دستی و اتوماتیک با هم آمده‌است. با توجه به اینکه برخی گزاره‌های مورد استفاده در ارزشیابی نیازمند اطلاعات قبلی می‌باشد، لذا اطلاعات لازم در مورد کلیات مربوط به کار با سیستم و عملکرد آن پیش از شروع هر فرآیند ارزشیابی به فرد مورد آزمایش ارائه گردید و پس از انجام حرکات اشاره شده در بالا، پرسشنامه مربوط به هر فرد بر اساس تجربه استفاده از دستگاه تکمیل گردید.

جدول۹: تفکیک گزاره های مورد استفاده در پرسشنامه ارزیابی سیستم

Table9. Separation of propositions used in the system evaluation questionnaire

پارامتر ارزیابی	گزاره ارزیابی
سهولت در استفاده از سیستم توان‌بخشی	میزان احساس راحتی و رضایت هنگام باز و بسته شدن انگشتان در دستکش مکانیکی
قابلیت اطمینان سیستم توان‌بخشی	میزان اطمینان خاطر از دستگاه یا احساس نگرانی در طول انجام حرکات توسط سیستم
تعامل سیستم توان‌بخشی با انسان	مدت زمان یادگیری کار با دستگاه و برقراری ارتباط با سیستم
نحوه کارکرد و ارزیابی کلی سیستم توان‌بخشی	داشتن توانایی انجام حرکات درنظرگرفته شده و تمایل بیشتر به استفاده در مقایسه با روش های توان‌بخشی سنتی

این ارزیابی بر روی ۱۰ فرد با انگشتان دست سالم آزمایش شد که نتایج آن با استفاده از نمودار میله ای در شکل ۸ آورده‌شده‌است.



شکل۸: میانگین نمرات کسب شده توسط هر سوال

Figure8. average score of each question

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳-۱- نتایج نظرسنجی پس از تست دستگاه

با توجه به نظرسنجی انتهای تست، در فرآیند خمش انگشتان ، سیستم کمی احساس ناراحتی ایجاد می‌کند که به دلیل ساختار متراکم دستکش می‌باشد. دستکش مکانیکی برای ابعاد بزرگتر دست که ساختار انگشتان دارای طول و عرض بیشتری نسبت به سایز درنظرگرفته‌شده دارند ، به دلیل ساختار متراکم که بر اثر دو لایه پارچه و قرارگیری تیغه‌ها بین دو لایه می‌باشد ، هنگام بسته‌شدن انگشتان، کمی ناراحتی برای افراد ایجاد می‌کند که سبب کاهش نمره بخش راحتی سیستم می‌شود. در حالت اتوماتیک در سرعت بالا، هنگام بازشدن انگشتان ترس کمی در افراد ایجاد می‌شد که برای پوشیدن دستکش و احساس راحتی هنگام انجام حرکات، بهتر است دست به طور کامل داخل پوشش قرارگیرد تا حرکت به درستی انجام و فرد در انگشتان احساس ناراحتی نکند و افراد هنگام کار با دستگاه در حالت دستی سیستم رضایت بیشتری داشتند و علاقه و تمایل خود برای کار با طرح را اظهار داشتند. در حالت اتوماتیک گاهی کاربر نیاز به توضیح داشت و ممکن است قادر به تشخیص تعداد دفعات به علت نمایش اعداد به انگلیسی نباشد و نیاز به توضیحات مجدد داشته باشد، بنابراین بهتر است افراد آشنایی کمی با زبان‌انگلیسی برای خواندن حالت‌های مختلف و انتخاب دکمه درست را داشته‌باشند و ممکن است در سالمندان به عنوان ایراد دستگاه یادآوری شود که فرد نیازمند کمک دیگری برای راهنمایی و انتخاب دکمه درست باشد. در حالت دستی که فرد به کمک دکمه‌های بالا و پایین، میزان باز و بسته‌شدن را تعیین می کند، اگر آزمایش روی دست دچار اختلال باشد، میزان باز و بسته‌شدن نیازمند دکتر متخصص برای تعیین حد و عدم آسیب به انگشتان می‌باشد. ایراد دیگر طرح این است اگر فرد بخواهد زودتر دست را بازکند، نمی‌تواند و قصد نوع حرکت بیمار قابل تشخیص نیست و شخص به دلیل عبور کابل‌ها از روی شاسی ، قادر به گرفتن اجسام داخل انگشتان نبوده و قابلیت کمکی بودن را ندارد اما قابلیت اطمینان سیستم که نمره خوبی را هم کسب‌کرده‌است به دلیل وجود دکمه خاصی روی صفحه‌کلید است که در هر مرحله فرد می‌تواند ادامه کار با سیستم را متوقف کند. به دلیل انجام آزمایش روی دست سالم ، انگشتان افراد مقاومت کرد و کمی نگرانی و عدم اطمینان ایجاد شد اما اگر دست فرد مقاومت کند، سیستم نیروی کافی برای بازکردن دارد و می‌تواند برای دست آسیب‌دیده مناسب باشد. از دیگر موارد در فرایند تست سیستم ، برخی سنگینی و وزن اعمالی سیستم به دست که بر اثر شاسی و تیغه‌ها می باشد را بیان کردند که ممکن است برای دست بیمار یا افرادی که عضلات دست ضعیف‌تری دارند، احساس ناراحتی ایجاد کند و نیازمند ثابت‌شدن و قرارگیری روی یک تکیه‌گاه باشد. نکته دیگری که در آزمایش موردتوجه قرارگرفت، عدم قرارگیری انگشتان در حالت راست و قائم است و دست حتی در حالت تماما باز، به کمک قرارگیری فنرها پشت انگشتان، هم چنان در حالت کمی خمیده ماند و ربات در حالت استراحت که حالت بازبودن دست است، کمی انگشتان را به حالت خمیده نگه می‌دارد تا در انگشتان افراد دارای اختلال نیز که قادر به کامل بازکردن انگشتان نیستند، احساس ناراحتی ایجاد نشود. کار ساخته‌شده بهتر است روی دست بیمار و دچار اختلال نیز آزمایش شود، زیرا انگشتان دچار گرفتگی نیاز به نیروی بیشتری دارند و ربات موردنظر توانایی اعمال نیروی بیشتر را به کمک فنرها را دارد و افراد اظهار داشتند که نیروی اعمالی هنگام بازشدن انگشتان ، بیش از حد نیروی لازم برای باز کردن دست سالم که به آسانی بازمی‌شود، است و قدرت بالای موتور امکان بازشدن انگشتان آسیب دیده را نیز فراهم می‌کند و با تنظیم سرعت می‌توان زمان بازشدن انگشتان را کاهش داد. زمان یادگیری کار با دستگاه ممکن است برای افراد کم‌سواد یا سالمندان کمی سخت باشد و نیاز به توضیحات مجدد در حین کار با دستگاه داشته باشد و وجود یک درمانگر برای انجام توان‌بخشی در خانه الزامی باشد. در کل از مزایای ربات می‌توان حالت پویایی و عدم نیاز به ثابت شدن ساعد در طول حرکت را یادآوری کرد و تنها برای آرامش فرد و افزایش ایمنی و اطمینان خاطر نیاز است تا فرد دست خود را در یک مکان ثابت قراردهد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

شکل۹: ساختار نهایی نمونه اولیه سیستم توان‌بخشی انگشتان دست

Figure9. The final structure of the finger rehabilitation system prototype

۳-۲- بررسی تاثیر تغییرات سرعت موتور در طول حرکت

اگر سرعت در کمترین مقدار خود قرار گیرد به دلیل نیروی فنرها موتور قدرت کافی برای بستن دست ندارد و انگشت‌ها کامل بسته نمی‌شوند، بنابراین پیچ تنظیم سرعت در مقداری خاص بین سرعت زیاد و کم باید تنظیم‌شود تا قدرت کافی برای ایجاد حرکت بسته‌شدن انگشتان به درستی را داشته باشد، اما هنگام باز شدن انگشتان، فنرها به قدرت موتور می‌افزایند و حتی در سرعت کم، دست سریعا باز می‌شود و بهتر است پیچ تنظیم سرعت جهت عدم آسیب به میکروسوئیچ ها و کشیدگی سریع انگشتان در بیشترین مقدار نیز قرار نگیرد. در شکل ۹ ساختار نهایی نمونه اولیه سیستم توان‌بخشی انگشتان دست نشان داده شده است.

۴- نتیجه گیری

رباتی با ساختار نرم طراحی‌شد که به کمک یک موتور گیربکس‌دار و مسیری برای تاندون‌ها می‌تواند هر چهار انگشت بیمار (به جز شست) را حرکت دهد. در طراحی این دستکش که برای هدف توان‌بخشی طراحی‌شده‌است، سعی‌شده‌است محدودیت‌هایی مانند هزینه ساخت، حمل و نقل، وزن، ظاهر مناسب، کنترل و ارتباط راحت با بیمار در مسیر طراحی در نظرگرفته‌شود چرا که با نگاهی به ربات‌های توان‌بخشی انگشتان در دهه اخیر، می‌توان دریافت که برطرف‌کردن این محدودیت‌ها از مهمترین نیازهای طراحی است و تاثیر زیادی در تجاری‌سازی چنین محصولی دارند. مکانیزم تاندونی یکی از بهترین انتخاب‌ها از لحاظ قیمت، ظاهر مناسب و قابلیت جابجایی است. دور بودن عملگرها از محل اعمال نیرو علاوه بر مهارت بیشتر، به تمیزتر نگه‌داشتن محصول کمک می‌کند. در زمینه تجاری سازی و هزینه های ساخت پروژه موردنظر می‌توان به قرارگیری موتور در کنار دیگر قطعات در یک ساختار تحت عنوان جعبه کنترل و استفاده از صفحه نمایش لمسی و تکمیل شکل ظاهری سیستم با هدف تجاری‌سازی و استفاده از منبع تغذیه باتری قابل شارژ اشاره نمود.

از جمله موارد مهم در قسمت طراحی مجدد و بهبود نمونه ساخته‌شده در گذشته، می‌توان به استفاده از فنرها برای کنترل بهتر حرکت، استفاده بهینه از نیرو و همچنین، کاهش طول کابل و به تبع، کاهش اصطکاک اشاره کرد. در مرحله شبیه‌سازی نیز با بررسی حرکت طبیعی دست، سختی فنرها طوری انتخاب‌شد که حرکت ربات، دقیقا منطبق بر حرکت طبیعی انگشتان هنگام جمع و باز شدن باشد. در این پژوهش امکان حرکت همزمان انگشتان وجوددارد و مشکل کشیدگی بیش از حد انگشتان از عقب وجودندارد،

ACCEPTED MANUSCRIPT

زیرا در پژوهش‌های پیشین انگشتان از عقب به کمک کابل و عملگرهای مورد استفاده باز می‌شوند اما با نوآوری به‌کاررفته در طرح ساخته‌شده به کمک کابل‌های متصل به سر انگشتان دست ، حرکت بسته‌شدن انگشتان و با حرکت عکس موتور بدون نیاز به عملگرهای خطی و با بازگشت تیغه‌های فنری به حالت اولیه ، انگشتان به عقب کشیده می‌شوند و گسترش می‌یابند. در نمونه ساخته شده همچنین محدودیت درجه آزادی حذف‌شده‌است و انطباق کامل با انگشتان و کاهش وزن ربات با حذف ساختار سخت و بازو های مکانیکی، مکانیسم اسکلت بیرونی دست، قابل حمل، پوشیدنی و قابل تنظیم برای بیمارانی است که در خانه توان‌بخشی انجام می‌دهند. از پیشنهادات مربوط به بهبود این طرح در ساختار و عملکرد به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

- آزمایش ربات روی بیماران و بررسی عملکرد سیستم
- ایجاد حلقه کنترلی برای تشخیص نیروی اعمالی به کمک جریان موتور و تنظیم سرعت و نیروی سیستم
- تعیین میزان نیروی اعمالی دست به سیستم و بررسی تاثیر دستگاه در بهبودی بیمار در حرکت فعال

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

f	نیرو، N
k	ضریب سختی فنر، N/m
p	توان موتور الکتریکی، kw
s	تعداد دور موتور الکتریکی در یک دقیقه، rpm
t	گشتاور، N.m
x	جابجایی فنر، m

منابع

[1] C. Lambelet, D. Temiraliuly, M. Siegenthaler, M. Wirth, D.G. Woolley, O. Lambercy, R. Gassert, N. Wenderoth, Characterization and wearability evaluation of a fully portable wrist exoskeleton for unsupervised training after stroke, Journal of neuroengineering and rehabilitation, 17 (2020) 1-16.
[2] U. Jeong, H.-K. In, K.-J. Cho, Implementation of various control algorithms for hand rehabilitation exercise using wearable robotic hand, Intelligent Service Robotics, 6 (2013) 181-189.
[3] H.K. Yap, J.H. Lim, F. Nasrallah, J. Cho Hong Goh, C.-H. Yeow, Characterisation and evaluation of soft elastomeric actuators for hand assistive and rehabilitation applications, Journal of medical engineering & technology, 40(4) (2016) 199-209.
[4] J.-h. Bae, Y.-M. Kim, I. Moon, Wearable hand rehabilitation robot capable of hand function assistance in stroke survivors, in: 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), IEEE, 2012, pp. 1482-1487.
[5] I. Jo, J. Lee, Y. Park, J. Bae, Design of a wearable hand exoskeleton for exercising flexion/extension of the fingers, in: 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), IEEE, 2017, pp. 1615-1620.
[6] L. Cheng, M. Chen, Z. Li, Design and control of a wearable hand rehabilitation robot, IEEE access, 6 (2018) 74039-74050.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[7] S. Park, M. Fraser, L.M. Weber, C. Meeker, L. Bishop, D. Geller, J. Stein, M. Ciocarlie, User-driven functional movement training with a wearable hand robot after stroke, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 28(10) (2020) 2265-2275.
[8] V. Moreno-SanJuan, A. Cisnal, J.-C. Fraile, J. Pérez-Turiel, E. de-la-Fuente, Design and characterization of a lightweight underactuated RACA hand exoskeleton for neurorehabilitation, Robotics and Autonomous Systems, 143 (2021) 103828.
[9] H.K. Yap, J.H. Lim, F. Nasrallah, C.-H. Yeow, Design and preliminary feasibility study of a soft robotic glove for hand function assistance in stroke survivors, Frontiers in neuroscience, 11 (2017) 547.
[10] H.K. Yap, P.M. Khin, T.H. Koh, Y. Sun, X. Liang, J.H. Lim, C.-H. Yeow, A fully fabric-based bidirectional soft robotic glove for assistance and rehabilitation of hand impaired patients, IEEE Robotics and Automation Letters, 2(3) (2017) 1383-1390.
[11] L. Cappello, J.T. Meyer, K.C. Galloway, J.D. Peisner, R. Granberry, D.A. Wagner, S. Engelhardt, S. Paganoni, C.J. Walsh, Assisting hand function after spinal cord injury with a fabric-based soft robotic glove, Journal of neuroengineering and rehabilitation, 15 (2018) 1-10.
[12] Z.Q. Tang, H.L. Heung, K.Y. Tong, Z. Li, Model-based online learning and adaptive control for a "human-wearable soft robot" integrated system, The International Journal of Robotics Research, 40(1) (2021) 256-276.
[13] A. Yurkewich, D. Hebert, R.H. Wang, A. Mihailidis, Hand extension robot orthosis (HERO) glove: development and testing with stroke survivors with severe hand impairment, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 27(5) (2019) 916-926.
[14] A. Yurkewich, I.J. Kozak, D. Hebert, R.H. Wang, A. Mihailidis, Hand Extension Robot Orthosis (HERO) Grip Glove: enabling independence amongst persons with severe hand impairments after stroke, Journal of neuroengineering and rehabilitation, 17 (2020) 1-17.
[15] S. Adineh, M. Sadedel, M. Moghaddam, Impedance Control of a 6 DoF Robot for Upper-Limb Rehabilitation of Disabled Children Aim to Facilitate Drawing Geometrical Shapes, Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of ISME, 25(4) (2024).
[16] B. Saeedi, M. Alizadeh, M.M. Moghaddam, M. Sadedel, Design of a nonlinear backstepping versus sliding mode controller for a human musculoskeletal arm model in sagittal plane, in: 2022 8th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), IEEE, 2022, pp. 1-6.
[17] A. Ghasemi, M. Sadedel, M.M. Moghaddam, A wearable system to assist impaired-neck patients: Design and evaluation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 238(1) (2024) 63-77.
[18] A. Javanbakht, M. Sadedel, Bevel Pipe Inspection by Snake Robot, Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME, 24(2) (2023) 5-27.
[19] A. Abbasi Moshaii, M. Mohammadi Moghaddam, V. Dehghan Niestanak, Fuzzy sliding mode control of a wearable rehabilitation robot for wrist and finger, Industrial Robot: the international journal of robotics research and application, 46(6) (2019) 839-850.
[20] D. Wang, Y. Wang, B. Zi, Z. Cao, H. Ding, Development of an active and passive finger rehabilitation robot using pneumatic muscle and magnetorheological damper, Mechanism and Machine Theory, 147 (2020) 103762.
[21] J.M. Ochoa, Y. Jia, D. Narasimhan, D.G. Kamper, Development of a portable actuated orthotic glove to facilitate gross extension of the digits for therapeutic training after stroke, in: 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE, 2009, pp. 6918-6921.
[22] G. Mesplié, Hand and wrist rehabilitation: Theoretical aspects and practical consequences, Springer, 2015.
[23] R. Sooraj, N. Akshay, T. Jeevan, R.R. Bhavani, Design and Analysis of a parallel haptic orthosis for upper limb rehabilitation, International Journal of Engineering and Technology, 5(1) (2013) 444-451.

ACCEPTED MANUSCRIPT

ACCEPTED MANUSCRIPT

[24] Y. Zhang, J. Zhao, C. Pan, H. Chang, System design of a novel active wearable finger rehabilitation robot, in: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE, 2017, pp. 2384-2389.

Design, build and control the rehabilitation robot to move fingers

Niloufar Azadi Sohi, Majid Sadedel*, Majid Mohammadi Moghaddam

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT

This research presents design and development of prototype fabric-based wearable soft exoskeleton. The soft glove assists the flexion and extension motion of the user's hand with adjustable speed. The cable method is used to help bending fingers and for extending the fingers, spring blades have been used, the cables are gathered with the help of the gearbox engine and the fingers return to their normal state by reversing the direction of the engine and the force of the springs. With bandwidth modulation circuit and programming in the microcontroller, the movement and speed of the built robot is controlled. In order to determine the appropriate placement of components, including spring blades and cables, robot simulation was performed in SolidWorks software, and with the help of experimental tests, suitable spring blades were selected in terms of strength and force. The resulted soft glove is attached on human healthy hand for assisting the finger flexion and extension. Based on the test result, the proposed system obtained the highest average for the duration of learning to work with it, which indicates the user-friendliness. the parameter related to the feeling of comfort of the fingers in the glove has the lowest average due to the dense structure of the glove.

KEYWORDS

Stroke, Fingers rehabilitation, Wearable robots, Cable power transmission method

* Corresponding Author: Email: majid.sadedel@modares.ac.ir