طراحی مکانیزم پوشیدنی اسکلت خارجی بالاتنه با هدف ارتقا عملکرد حرکتی انسان

فربد فرزاد[۱]، فرزاد چراغ‌پور سموتی[۲*]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پردیس، تهران، ایران.
۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پردیس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول : samavati@pardisiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۹

چکیده

مکانیزم‌ها و ربات‌های پوشیدنی برای ارتقا عملکرد انسان و به فرم بدن طراحی می‌شوند و هدف از طراحی آنها کمک به انسان در تعامل بهتر با محیط در انجام وظایف تعریف شده است. ارتقا عملکرد فرد می‌تواند شامل خستگی کم‌تر در انجام فعالیت، محافظت در مقابل آسیب‌های جسمی حاصل از کارهای سنگین، ظرفیت حمل بار بیشتر توسط فرد و یا سرعت بالاتر در اجرای حرکات باشد. مکانیزم رباتیک اسکلت خارجی بالاتنه اوبر (UBER[1]) به عنوان یک مکانیزم آسان‌پوش، انعطاف‌پذیر و قابل‌تنظیم برای جلوگیری از آسیب‌های معمول، بیماری‌های عضلانی، اسکلتی، نخاعی و مفاصل طراحی شده است. هدف از طراحی این ربات کمک حرکتی برای یک کارگر ماهر، اجرای وظایف تخصصی مانند عملیات مونتاژکاری در یک خط تولید در مدت زمان نسبتا زیاد، با خستگی کمتر می‌باشد و همچنین به راحتی از ابزارهای مورد نیاز خود استفاده کند. تحلیل‌های تنش و کرنش انجام شده با بارگذاری ۵ کیلوگرم، نشان می‌دهد که بازو علاوه بر تحمل وزن دست کاربر، قابلیت جابجایی بار را نیز تا ۳ کیلوگرم دارا می‌باشد. با توجه به گستره حرکتی ربات طراحی شده و تعداد درجات آزادی آن، استفاده از این ربات در دراز مدت موجب حفظ سلامتی اسکلتی کارگر ماهر شده و بدین ترتیب با کاهش هزینه‌های سلامت نیروی کار، بهره‌وری تولید را ارتقا خواهد داد.

کلمات کلیدی: ربات پوشیدنی، اسکلت خارجی، بالاتنه، ربات همیار، طراحی ربات.

مقدمه

در سال‌های اخیر، ربات‌های اسکلت خارجی (اگزواسکلتون[۲]) مورد توجه بخش تولید قرار گرفته است. تلفیق هوش و مهارت انسانی با قابلیت حرکتی و قدرت در این ربات‌ها، باعث بهبود کیفیت کار و ارتقا بهره‌وری در اجرای وظایف کاری شده است[۱]. اسکلت‌های خارجی بالاتنه، سیستم‌هایی الکترومکانیکی هستند که به منظور تعامل با کاربر، برای تقویت نیرو و کمک به حرکت طراحی می‌شوند. عموماً با توجه به ارتباط مکانیکی میان ربات اسکلت خارجی و کاربر، کاربردهای این‌گونه ربات‌ها گسترش یافته است. از این ارتباط مکانیکی مستقیم می‌توان به موارد مختلفی اشاره کرد، بطوری‌که در کاربرد صنعتی و بعضاً نظامی برای بالابردن ظرفیت حمل بار و اعمال نیرو مورد استفاده قرار می‌گیرند و در کاربرد پزشکی به عنوان دستگاه توانبخشی حرکتی، برای جبران اختلال عصب-عضله بیمار استفاده می‌گردند و یا در بازتوانی حرکتی برای بیماران پس از سکته مغزی به کار گرفته می‌شوند. همچنین به عنوان بخش وسیعی از کاربردها، از این ربات‌ها به شکل ربات‌های پوشیدنی و به عنوان پشتیبان حرکتی در فعالیت‌های روزمره، برای افراد دارای معلولیت حرکتی و سالمندان بهره‌گیری می‌شود.

با توجه به کاربرد و تقاضای بالا برای اسکلت‌های خارجی بالاتنه، این فناوری هنوز در زمینه طراحی، کنترل و تعامل انسان و ربات چالش برانگیز است. طراحی مکانیکی و آنالیز حرکتی مهم‌ترین موضوعات در طراحی سیستم اسکلت خارجی است. در این خصوص، ایسلم و همکاران[۲] مطالعاتی را به منظور شناسایی فاصله و شکاف فناوری بین اسکلت‌های خارجی رباتیک موجود در بازار و نمونه‌های اولیه تحقیقاتی مورد استفاده، به ویژه در کاربردهای توانبخشی به انجام رساندند. در زمینه سیستم‌های سخت‌افزاری ربات‌های اسکلت خارجی، و به ویژه توسعه ربات‌های بالاتنه، گوپرا و همکاران[۳] تحقیقاتی با در نظر گرفتن تعامل فیزیکی انسان و ربات انجام دادند.

[1] Upper Body Exoskeleton Robot
[2] Exoskeleton

استوارت و همکاران[۴] موضوع ربات‌های اسکلت‌های خارجی بالاتنه هیبریدی، در ترکیب با تحریک الکتریکی عملکردی[1]، را ارائه دادند. با هدف بهره‌گیری از داده‌های بدن کاربر در کنترل اسکلت خارجی بالاتنه، گوپتا و همکاران[۵] مطالعه‌ای در مورد ربات‌های فعال و منفعل بالاتنه انجام دادند. در این پروژه داده‌های مربوط به حرکت بازوی انسان با استفاده از سنسور کینکت[2] ثبت و سپس برای الگوبرداری کنترل استفاده شد. نکته مهم دیگر در مورد استفاده بلندمدت از این ربات‌ها ایمنی است. بلند کردن بارهای سنگین یکی از بزرگترین عوامل صدمه به کارگر است. آسیب‌های شایع شامل پیچ‌خوردگی عضلات کمر، اسپاسم عضلات، آسیب‌های مچ‌دست، آرنج و ستون فقرات است. پیشگیری از صدمه‌های اسکلتی، نه تنها از آسیب دیدگی افراد جلوگیری می‌کند بلکه باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های پزشکی می‌شود و کارایی کاربران را در محیط‌های مختلف افزایش می‌دهد، در تعامل انسان و ربات، با هدف افزایش ایمنی، گراهام و همکاران[۶] کنترل کننده‌های بهینه و فازی را برای ردیابی و تغییر وضعیت مسیر حرکت اسکلت بالاتنه، به این ربات‌ها اضافه کردند. این مهم با بهره‌برداری از عملگر سازگار در مفصل شانه ربات میسر شد[۷]. کرماونار و همکاران[۸] استفاده از ربات‌های اسکلت خارجی بالاتنه را در کاهش آسیب‌های ناشی از بلندکردن اجسام سنگین روی عضلات و بافت‌های همبند عضلات و استخوان‌ها مورد مطالعه قرار دادند. ویلکو و همکاران[۹] بیش از شصت طرح اسکلت‌های خارجی با پتانسیل‌های صنعتی را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش ایشان هر طرح، بر مبنای منابع اقلیمی، وضعیت و روند توسعه، تعداد افراد جامعه هدف، نوع بکارگیری، منابع انرژی و نیازهای مطرح شده در صنعت فهرست گردید. بررسی ساختار پنج اسکلت خارجی بالاتنه در این تحقیق، در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱: اسکلت‌های خارجی صنعتی مورد ارزیابی دراین تحقیق[۹]

[1] Functional electrical stimulation (FES)
[2] Kinect

با هدف به‌کاربری صنعتی ربات‌های اسکلت خارجی، می‌توان طرح‌ها را به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی نمود:

- دسته اول: کمک به بهبود وضعیت بدن و حرکت اندام‌ها؛
- دسته دوم: حمل و جابجایی بارهای سنگین؛
- دسته سوم: کمک در مونتاژ قطعات.

هدف از مطالعه حاضر، ارائه طرحی از یک ربات اسکلت خارجی بالاتنه برای استفاده یک کارگر ماهر در خط مونتاژ است. به‌طوری‌که ربات با قابلیت تقویت اعمال نیرو به کاربر موجب می‌گردد عملکرد وی در انجام وظایف کاری تعریف شده ارتقاء یابد و این مهم در بازه زمانی طولانی حفظ سلامت اسکلتی کاربر را به همراه خواهد داشت.

طراحی مکانیکی

شاخص‌های اصلی ذیل را می‌توان به عنوان مهم‌ترین عوامل اثربخش طرح‌های ربات‌های اسکلت خارجی از نظر کاربری برشمرد:

- ایمنی: اطمینان از ایمن بودن تعامل ربات با انسان در هنگام استفاده؛
- کنترل: سادگی سازوکار کنترلی ربات؛
- شکل: سازگاری ارگونومیکی شکل ربات با بدن کاربر؛
- وزن: سبک بودن سازه ربات؛
- هزینه: پایین بودن بهای تمام‌شده طرح؛

مسئله اصلی در طراحی این‌گونه ربات‌ها، دستیابی به طرحی است که نسبت به طرح‌های موجود، مجموعه شاخص‌های فوق را به میزان بیشتری محقق سازد. در این پژوهش، اوبر جایگزینی مناسب برای تجهیزات گران قیمت صنعتی به منظور پیشگیری از آسیب‌ها و بیماری‌های ذکر شده است. این ربات بر اساس عملکرد و شکل بدن طراحی شده است و به کاربر توانایی کنترل اندام‌های رباتیک در بلند کردن اجسامی که انجام آن‌ها به طور معمول دشوار است را می‌دهد. نوآوری‌های اوبر شامل استفاده از مواد سبک و قابل جذب در طبیعت[1] به همراه کامپوزیت در ساخت سازه، وجود سه ماژول مجزا در شانه، بازو و کمر با نه درجه آزادی[2]، محرک‌های ترکیبی (فعال و منفعل)، وجود سیستم کابلی به منظور کاهش حجم سازه، عدم قرارگیری موتور در مفاصل و توانایی نصب ابزارها و چنگک‌های[3] مختلف می‌باشد. این ربات به‌گونه ای طراحی می‌گردد که بتواند به سازه قابلیت انعطاف دهد تا برای بلند کردن بارهای سنگین همیار کارگر باشد. این سیستم با انواع فعالیت‌ها تطبیق‌پذیر و سازگار است؛ به گونه‌ای که در حین انجام کار و با توجه به وجود فشار (شدت) فعالیت‌های زیاد بر روی دست‌ها، شانه‌ها، کمر و پاهای کارگر، امکان پوشیدن و استفاده آن را آسان می‌سازد. در نتیجه خطر آسیب را نیز کاهش خواهد داد. ساختار اوبر شامل دو محرک فعال[4]، یک محرک منفعل[5] برای هر دست و یک مفصل ۳۶۰ درجه[6] در قسمت کمر است که به طور کلی می‌تواند با ۹ درجه آزادی عمل کند، که در شکل (۷) نشان داده شده است.

چهار شاخص اساسی در طراحی اوبر:

الف) استفاده از مواد سبک و قابل جذب در طبیعت همراه با کامپوزیت در ساخت سازه.

ب) وجود سه ماژول مجزا بازو، شانه و کمر که به ترتیب دارای سه، دو و چهار درجه آزادی هستند.

ج) استفاده از محرک‌های ترکیبی (فعال و منفعل) با سیستم کابلی.

د) امکان نصب ابزارهای مختلف، چنگک‌ها و غیره.

مواد سازنده ساختار ربات

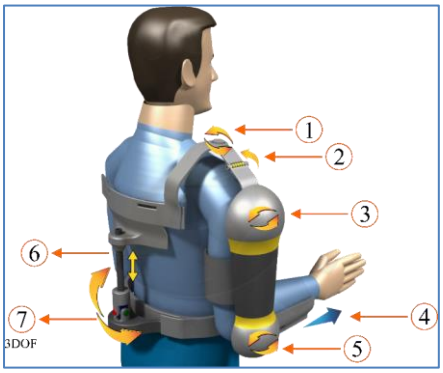
[1] Green Materials
[2] Degree of Freedom; DOF
[3] Rakes
[4] Active
[5] Passive
[6] Universal-Joint

در این ساختار از پلی لاکتیک اسید[1] به عنوان یک ماده سبک و قابل جذب در طبیعت و آلومینیوم به همراه کامپوزیت استفاده شده است. استفاده از این مواد، باعث کاهش وزن سازه، افزایش قدرت و دقت در تعامل انسان و ربات به عنوان یک همیار سازگار خواهد شد. الیاف کربن با ویژگی‌هایی مانند سختی، استحکام کششی، مقاومت شیمیایی، تحمل حرارتی زیاد، وزن و انبساط حرارتی کم، همراه با رزین و سخت‌کننده، به عنوان مواد خام برای ساخت کامپوزیت با قطعات سه بعدی چاپ شده، استفاده می‌شوند. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل خواص منحصر به فرد از جمله مقاومت بالا نسبت به وزن و شکل پذیری عالی، در ساختار سرشانه‌ها استفاده شده است.

درجه‌های آزادی

این طراحی بر اساس ارگونومی و ساختار بدن، با ۹ درجه آزادی به شرح ذیل و شکل (۲) انجام شده است.

(۱) یک درجه آزادی چرخشی مفصل شانه، برای جمع و باز شدن دست[2].
(۲) یک درجه آزادی باز و بسته شدن مفصل دو اتصالی شانه، برای بالا و پایین شدن دست[3].
(۳) یک درجه آزادی چرخشی مفصل شانه، برای بالا و پایین شدن بازو[4].
(۴) یک درجه آزادی خطی اتصال ساعد، برای تنظیم نصب ابزارهای مورد نیاز.
(۵) یک درجه آزادی چرخشی مفصل آرنج، برای بالا و پایین شدن ساعد[5].
(۶) یک درجه آزادی خطی اتصال بین بالا و پایین کمر[6]، برای تنظیم ارتفاع.
(۷) حرکت چرخشی سه محوره توسط اتصال یونیورسال[7] در مفصل کمر به منظور حرکت ۳۶۰ درجه‌ای کاربر.



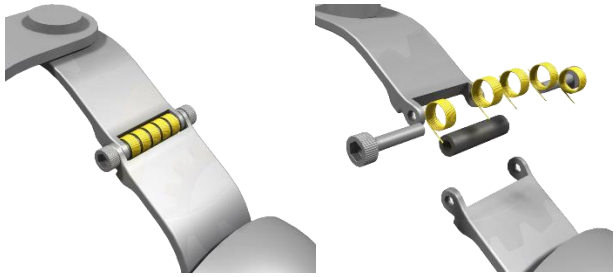
شکل ۲: ساختار کامل اوبر و قرارگیری آن بر روی مدل بدن انسان و عملکرد آن با ۹ درجه آزادی

عملگرها

ترکیب محرک‌های فعال و منفعل در قسمت‌های مختلف سازه در نظر گرفته شده است. استفاده بیش از حد از محرک‌های الکتریکی به منابع تغذیه بیشتری نیاز دارد. برای جلوگیری از افزایش تعداد موتورها (محرک‌های فعال)، کاهش وزن و پیچیدگی بیش از حد سیستم، از یک محرک فنر منفعل در مفصل دو پیوندی [8]سرشانه مطابق شکل (۳) استفاده شده است. اتصال شانه با چند فنر در محور مفصل خود طراحی شده است. این مفصل دو پیوندی در حالت بدون بار مانند یک بال V شکل است و به محض بارگذاری (وزن دست) باز می

[1] Poly Lactic Acid; PLA
[2] Retraction and Protraction
[3] Abduction and Adduction
[4] Arm Flexion and Extension
[5] Forearm Flexion and Extension
[6] Upper and Lower Lumbar connection
[7] Universal Joint
[8] Two Link Joint

شود. این روش به حرکت دست در بالا و پایین شدن کمک می‌کند و منجر به کاهش فشار روی کاربر هنگام انجام کارهای بالاسری[1] می‌شود.



شکل ۳: عملگرهای منفعل در مفصل دو پیوندی شانه

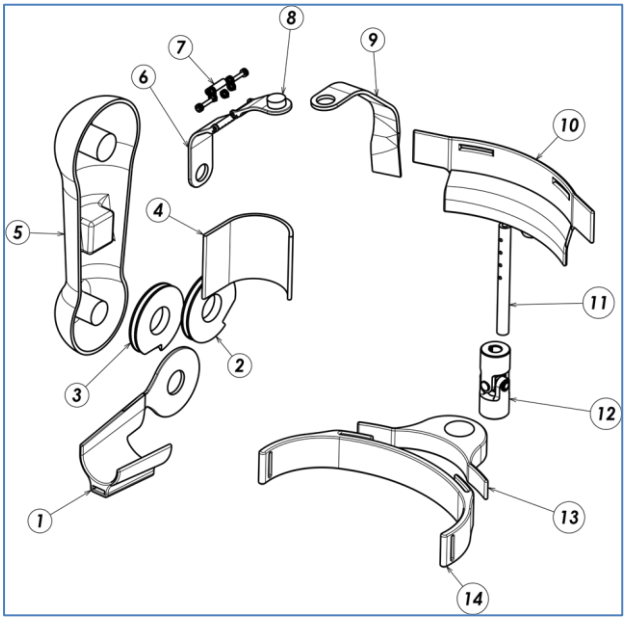
مجموعه محرک‌های فعال شامل الکتروموتور و گیربکس است. این مجموعه برای بالا بردن بارهای سنگین توسط یک سازه، بزرگ و سنگین خواهد بود. علاوه بر اندازه و وزن، بیرون‌زدگی و عدم تعادل مفصل‌ها از دیگر مشکلات این سیستم‌ها می‌باشد. برای حل این مسئله، طراحی به گونه‌ای انجام شد که موتورها از محور مفاصل خارج و بین دو کتف قرار گرفتند. انتقال نیرو توسط سیستم کابل و قرقره به اتصال‌ها منتقل می‌شود که باعث کاهش حجم سازه در مفصل‌ها و اتصال‌های دست و در نهایت عملکرد بهتر و ایمنی بیشتر می‌شود.

اجزا و ابعاد ربات طراحی شده

ربات اوبر شامل ۱۴ قسمت اصلی است که نمای انفجاری آن در شکل (۴) و اجزا آن در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: شماره و نام قطعه‌های اصلی اوبر

شماره	نام قطعه
۱	نگهدارنده ساعد همراه با محل نصب رابط کاربری ابزار
۲	قرقره ساعت‌گرد محور مفصل آرنج
۳	قرقره پاد ساعت‌گرد محور مفصل آرنج
۴	نگهدارنده بازو
۵	رابط و پوشش محورهای آرنج و شانه
۶	قطعه اول مفصل دو پیوندی سرشانه
۷	مجموعه عملگر منفعل مفصل دو پیوندی سرشانه
۸	قطعه دوم مفصل دو پیوندی سرشانه
۹	اتصال سر شانه و کتف
۱۰	نگهدارنده کتف
۱۱	اتصال قابل تنظیم کتف و کمر
۱۲	مجموعه اتصال یونیورسال کمر
۱۳	نگهدارنده اتصال یونیورسال
۱۴	نگهدارنده کمر



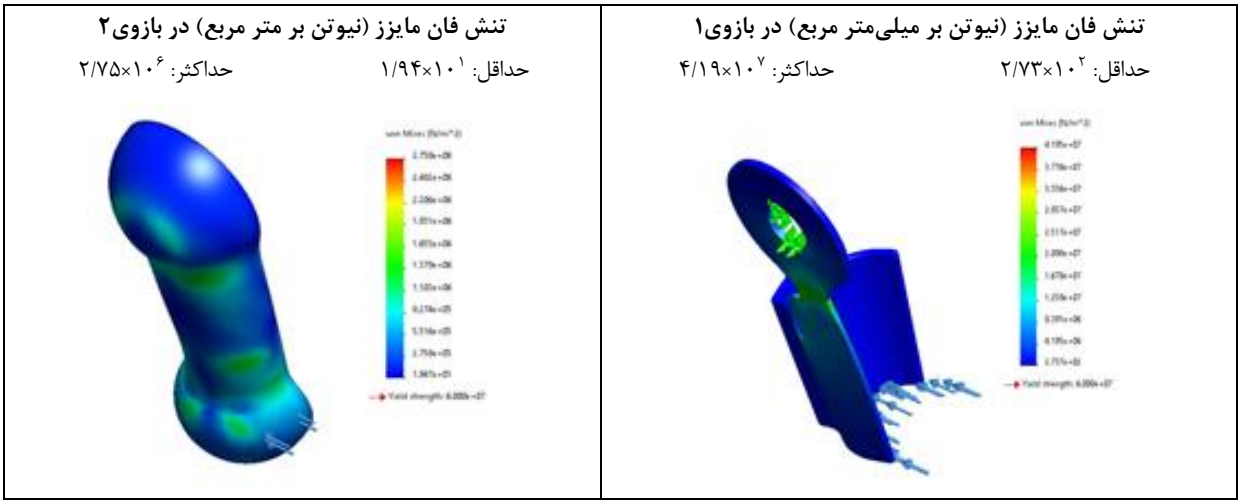
شکل ۴: نمای انفجاری اوبر

[1] Overhead Works

طراحی و ابعاد تعیین شده به کاربر امکان پوشیدن و حرکت آسان را به عنوان یک همیار کاربر پسند می‌دهد. برای استفاده بهینه از ربات در محیط‌های صنعتی و غیرصنعتی، کاهش فشار و خستگی، افزایش ایمنی کاربر، یک رابط کاربری برای دستگاه طراحی شد. این رابط می‌تواند انواع گیره‌ها، آچارها، پیچ‌گوشتی‌ها و غیره را حمل کند تا کاربر در طول فعالیت‌های خود به راحتی با ابزارهای مختلف کار کند. منظور از طراحی بهینه، بکارگیری بهترین حالت قرارگیری ربات روی بدن انسان از لحاظ ارگونونیک و کمترین فشار وارده به بدن می‌باشد تا کاربر به راحتی بتواند فعالیت‌های خود را انجام دهد.

استاتیک مکانیزم

تحلیل تنش و کرنش مکانیزم بازوها در نرم‌افزار سالیدورکز با فرض بارگذاری ۵ کیلوگرم و مواد پلی لاکتیک اسید انجام شده است. انواع بارگذاری مانند محوری، پیچشی، خمشی و عرضی می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های عمودی (عادی)، افقی و برشی شود. شکل (۵) نتایج تحلیل تنش در بازوهای مکانیزم را نشان می‌دهد.



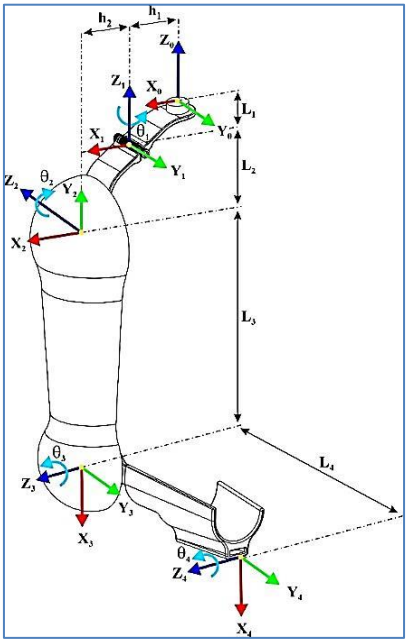
شکل ۵: نتایج تحلیل تنش بازوی‌های ۱ و ۲

ارزیابی عملکرد مکانیزم از نظر شاخص ارگونومیک و کاهش وزن

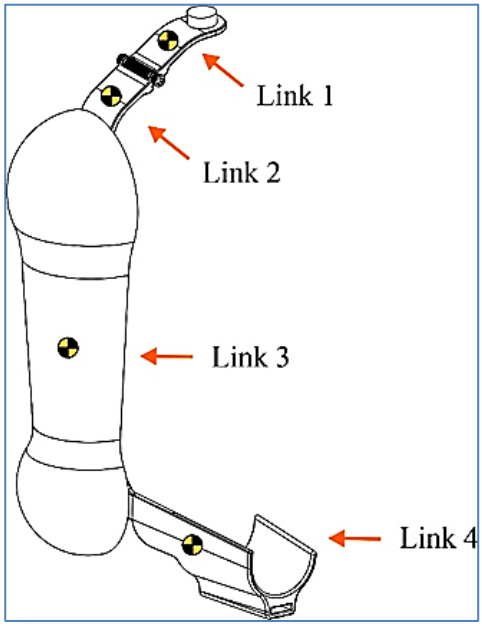
در شاخص‌های ارگونومیک، اوبر دارای جنس کاموزیتی ترکیبی الیاف کربن و پلی لاکتیک اسید می‌باشد که موجب افزایش استحکام و کاهش وزن و حجم سازه می‌شود. از مدل ارگونومیک نرم‌افزار کتیا به‌عنوان استاندارد اندازه‌ای بدن انسان برای طراحی شکل هریک از میله استفاده شد. همچنین ترکیب عملگرهای فعال و منفعل در ساختار دستگاه، دامنه حرکتی ربات را گسترده‌تر و حرکت را برای کاربر آسان‌تر نموده است. با توجه به دارا بودن ۹ درجه آزادی مفاصل در اوبر، آزادی عمل و راحتی بیشتری برای کارگران نسبت به ربات‌های پوشیدنی فوق، به همراه خواهد داشت. ربات مورد مطالعه محدود به فعالیت‌های خاصی مانند کارهای بالاسری یا نشسته نمی‌باشد و در تمام حالت‌های بدن می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. سه عملگرها مستقل در برای حرکت مفصل‌های شانه، بازو و ساعد در نظر گرفته شده تا کارگر توانایی کنترلی بیشتری را در بلند کردن اجسام مختلف داشته باشد. عملگر منفعل دو پیوندی مفصل سرشانه، موجب کمک به حرکت دست در بالا و پایین شدن و کاهش فشار روی کاربر در هنگام انجام کارهای بالاسری می‌شود. عدم استقلال عملگر مفصل‌ها در ربات‌های دیگر موجب کاهش کنترل دقیق اتصال‌ها توسط کارگر می‌شود. این ربات دارای یک مجری نهایی با قابلیت نصب ابزار (انواع کارگیرها و آچارها) می‌باشد که منجر به کاهش فشار و خستگی و افزایش ایمنی کاربر در محیط‌های صنعتی و غیرصنعتی می‌شود. استفاده از رابط کاربری، موجب عملکرد بهینه این ربات نسبت به دیگر ربات‌ها می‌شود.

سینماتیک و پارامترهای اینرسی مکانیزم

برای بررسی سینماتیک مکانیزم از الگوی دناویت-هارتنبرگ[1] مرسوم در رباتیک بهره‌گیری شده است. محورگذاری سینماتیک مکانیزم، با در نظر گرفتن وظایف آن در شکل (۱۲) نشان داده شده است. سینماتیک پیشنهادی با چهار درجه آزادی توالی کامل مراحل کار را نشان می‌دهد. بر اساس طراحی انجام شده توسط نرم افزار کتیا۲، جرم ربات حدود ۵ کیلوگرم محاسبه شده است. با فرض یکنواخت بودن چگالی هر اتصال، شکل هندسی و مرکز جرم‌ها با یکدیگر منطبق می‌شوند. موقعیت مرکز جرم هریک از میله‌های مکانیزم در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۲: پیکربندی سینماتیک و مختصات بازوی ربات چهار درجه آزادی



شکل ۱۳: مرکز جرم اتصال‌های بازوی ربات

پارامترهای دناویت-هارتنبرگ در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: پارامترهای دناویت-هارتنبرگ بازوی ربات

i	α_i	h_i	L_i	θ_i
۱	۰	a_1	d_1	θ_1
۲	۹۰	a_2	d_2	θ_2
۳	۹۰	۰	d_3	θ_3
۴	۰	۰	d_4	θ_4

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مکانیزم اسکلت خارجی بالاتنه پوشیدنی برای تعامل هرچه بهتر انسان با محیط و به‌ویژه انجام وظایف تعامل نیرویی ارائه شده است. با توجه به مطالعه و طراحی انجام شده این‌گونه نتیجه‌گیری می‌گردد که ربات اوبر می‌تواند منجر به موارد زیر شود:

- ✓ جلوگیری از آسیب های شایع در مفاصل، اسکلت، نخاع و بیماری های عضلانی
- ✓ کاهش و ذخیره هزینه های پزشکی.

[1] Denavit-Hartenberg (DH)
[2] Catia Software

- ✓ جایگزینی با دستگاه‌های صنعتی گران قیمت.
- ✓ کاربری آسان به علت انعطاف پذیر بودن ساختار.
- ✓ تسهیل در پوشیدن و راحتی در هنگام کار و فعالیت.
- ✓ تحرک بیشتر کاربر در شرایط فشار و سنگینی بار با چندین درجه آزادی.
- ✓ تنظیم اندازه ساختار.
- ✓ استفاده آسان از ابزارها.

فهرست علایم

X_i	محور X از چهارچوب $\{i\}$
Y_i	محور Y از چهارچوب $\{i\}$
Z_i	محور Z از چهارچوب $\{i\}$
$\boldsymbol{i}$	شماره مفصل
$\boldsymbol{\alpha_i}$	زاویه بین Z_i و Z_{i+1} اندازه‌گیری شده در حول X_i
$\boldsymbol{h_i}$	فاصله بین Z_i و Z_{i+1} اندازه‌گیری شده در راستای X_i
$\boldsymbol{L_i}$	فاصله بین X_{i-1} و X_i اندازه‌گیری شده در راستای Z_i
$\boldsymbol{\theta_i}$	زاویه بین X_{i-1} و X_i اندازه‌گیری شده در حول Z_i

مراجع

[1] Gull, M.A., Bai, S. Bak, T., (2020), A review on design of upper limb exoskeletons, Robotics, 9(1), pp. 16-26.
[2] Islam, M.R., Spiewak, C., Rahman, M.H., Fareh, R. A., (2017), Brief Review on Robotic Exoskeletons for Upper Extremity Rehabilitation to Find the Gap between Research Porotype and Commercial Type, Advanced in Robotics and Autonomous, 6, pp. 408–417.
[3] Gopura, R., Bandara, D., Kiguchi, K., Mann, G.K., (2016), Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review, Robotics and Autonomous Systems, 75, pp. 203–220.
[4] Stewart, A.M., Pretty, C.G., Adams, M., Chen, X., (2017), Review of Upper Limb Hybrid Exoskeletons, IFAC PapersOnLine 2017, 50, pp. 15169–15178.
[5] Gupta, S., Agrawal, A., Singla, E., (2019), Wearable Upper Limb Exoskeletons: Generations, Design Challenges and Task Oriented Synthesis, New Trends in Medical and Service Robotics, pp. 134-142.
[6] Graham, R.B., Agnew, M.J. Stevenson, J.M., (2009), Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: Assessment of EMG response and user acceptability, Applied Ergonomics, 40(5), pp.936-942.
[7] Mauri, A., Lettori, J., Fusi, G., Fausti, D., Mor, M., Braghin, F., Roveda, L. (2019), Mechanical and control design of an industrial exoskeleton for advanced human empowering in heavy parts manipulation tasks, Robotics, 8(3), pp. 65-75.
[8] Kermavnar, T., de Vries, A.W., de Looze, M..P., O'Sullivan, L.W., (2020), Effects of industrial back-support exoskeletons on body loading and user experience: an updated systematic review, Ergonomics, pp.1-48.
[9] Voilque, A., Masood, J., Fauroux, JC., Sabourin, L., Guezet O., (2019), Industrial Exoskeleton Technology: Classification, Structural Analysis, and Structural Complexity Indicator. in Proceedings IEEE, Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon), pp. 13-20.