مقاله

شبیه‌سازی حرکت یک ربات اسکلت‌خارجی پایین‌تنه

حمید مقدم فرد*
کارشناس ارشد مهندسی برق کنترل
پژوهشکدهٔ علوم و فناوری دفاعی شمال غرب
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ارومیه
h_moghadam89@ms.tabrizu.ac.ir

احمد محمودی
کارشناس ارشد مهندسی مواد
پژوهشکدهٔ علوم و فناوری دفاعی شمال غرب
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ارومیه
mahmahmad@gmail.com

مجتبی رضایی
کارشناس ارشد مهندسی هوافضا
پژوهشکدهٔ علوم و فناوری دفاعی شمال غرب
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ارومیه
mm_rezayi@mut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۱۵

چکیده

در این مقاله یک ربات اسکلت‌خارجی پایین‌تنه معرفی و حرکت آن مدلسازی شده است. ربات اسکلت‌خارجی پایین‌تنه به‌عنوان یک دستگاه مکانیکی تعریف می‌شود که اساساً ساختاری مشابه اندام‌های انسان دارد. این ربات توسط یک انسان به‌عنوان اپراتور پوشیده می‌شود و هماهنگ با حرکات اپراتور کار می‌کند و سبب بالارفتن توان او می‌شود. این ربات باید به‌گونه‌ای طراحی و کنترل شود که حرکات انسان را به‌سرعت و دقت تعقیب نماید. در این مقاله علاوه بر معرفی کامل این ربات‌ها و دسته‌بندی انواع آنها، به مدل‌سازی دینامیکی یک نوع خاص از آن پرداخته شده است. این اسکلت خارجی دارای شش درجه آزادی است که توسط عملگرهای هیدرولیکی توانمند شده است. این ربات، با استفاده از نرم‌افزار ورکینگ مدل[1] شبیه‌سازی شده و گشتاورها و زوایای مفاصل اندام پایین‌تنه استخراج و ارائه شده است.

واژگان کلیدی: اسکلت‌خارجی پایین‌تنه، ربات پوششی، عملگر هیدرولیکی، مدل‌سازی دینامیکی، بیومکانیک

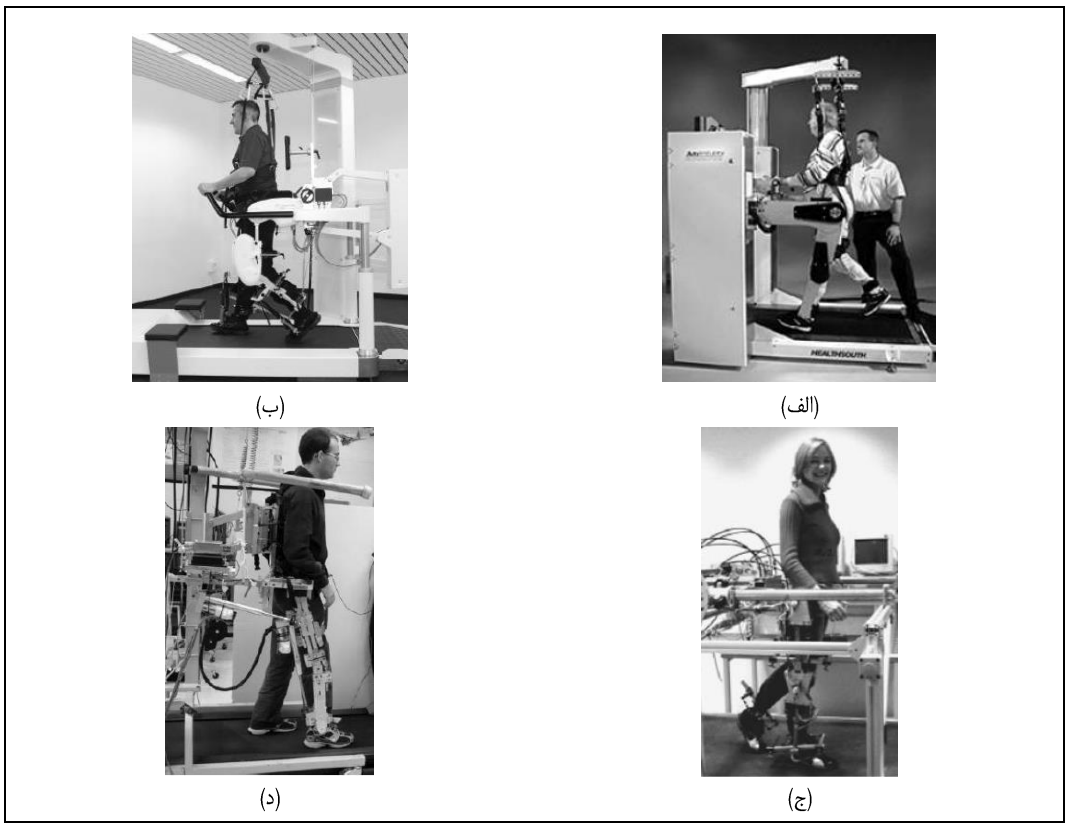
۱. مقدمه

از جمله دستاوردهای نوین بشر، ساخت ماشینی است که حاصل ترکیب حضور انسان و ساختار مکانیکی ربات می‌باشد. به این صورت که کاربر با استفاده از هوشمندی بسیار بالای مغز و سیستم عصبی، برای فعالیت خود تصمیم‌گیری می‌نماید در حالی‌که اطراف بدنش یک ساختار مکانیکی مستحکم دارای درجات آزادی لازم و مجهز به عملگرهای[2] پرقدرت قرار دارد و با پیروی کامل از حرکات فرد، قدرت مضاعفی را به وی می‌بخشد. از این‌رو به چنین رباتی اسکلت‌خارجی یا اگزواسکلتون[3] گفته می‌شود. نخستین پژوهش در زمینه اگزواسکلتون‌ها در اواخر سال ۱۹۶۰ م انجام شد [۱]. در شش دههٔ اخیر، محققان شروع به بررسی تحقیقات در زمینهٔ اگزواسکلتون کردند؛ تا جایی‌که امروزه از یک ایده در داستان‌های علمی تخیلی به محصولی تجاری رسیده‌اند. با این وجود، هنوز هم

چالش‌های بسیاری در ارتباط با طراحی و کنترل اگزواسکلتون‌ها وجود دارد [۲]. این ربات‌ها را از لحاظ کاربرد می‌توان به سه دستهٔ اصلی تقسیم کرد که در ادامه، هر یک به شکل مختصر توصیف و نمونه‌هایی از آنها ارائه می‌شود.

۲. اگزواسکلتون‌های بازیابی توانایی راه‌رفتن

این نوع از اگزواسکلتون‌ها کاربردهای پزشکی (فیزیوتراپی) دارند و به‌منظور کمک به افراد مبتلا به اختلالات گام برداشتن و در جهت بازیابی دوبارهٔ توانایی راه رفتن در آنها طراحی شده‌اند. این اگزواسکلتون‌ها معمولاً روی یک تردمیل[۴] سوار می‌شوند و به‌کمک رابطهایی ثابت نگاه داشته می‌شوند تا از وزن پوشندهٔ آن پشتیبانی کنند. در شکل ۱ چند نمونه از این نوع ربات‌ها نمایش داده شده است. اگزواسکلتون اتوآمبولاتور[۵] ساخت ایالات متحدهٔ امریکا و اگزواسکلتون لوکومات[۶] ساخت سوئیس از مواردی هستند که به‌صورت تجاری به تولید رسیده‌اند و در دسترس می‌باشند. در مورد مدل اتوآمبولاتور اطلاعات چندانی در دسترس نیست؛ اما دستگاه توانبخشی لوکومات شامل یک تردمیل، یک سیستم پشتیبانی وزن بدن و ربات ارتز[۷] متصل به اندام تحتانی بیمار می‌باشد. این دستگاه، هم برای بزرگسالان و هم برای کودکان آزمایش شده است [۳].



شکل ۱. چند نمونه از اگزواسکلتون‌های بازیابی توانایی راه‌رفتن

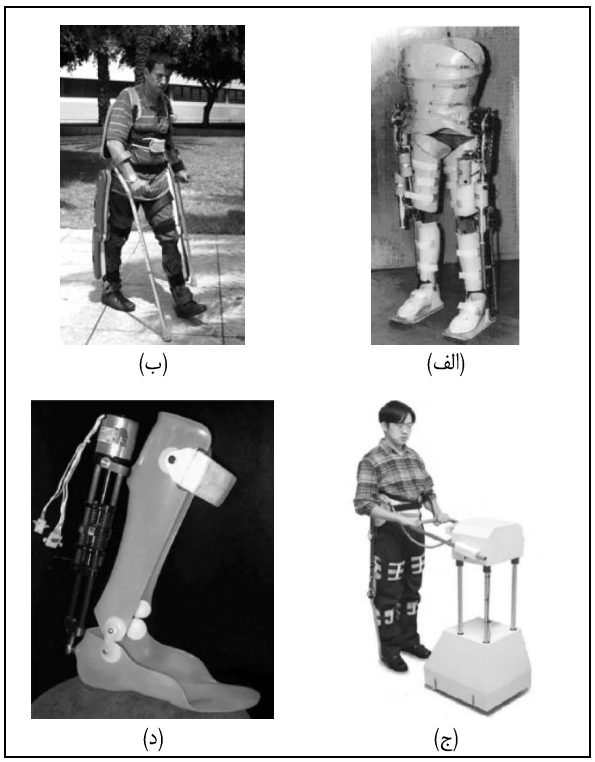
۳. اگزواسکلتون‌های کمکی مخصوص معلولان

اگزواسکلتون‌های کمکی به‌منظور مساعدت معلولان قطع عضو ساخته شده‌اند. این مدل اغلب با واژهٔ ارتز فعال شناخته می‌شوند. همان‌طورکه قبلاً اشاره شد، تحقیقات در زمینهٔ اگزواسکلتون از ۱۹۶۰ م آغاز شده است که در این میان میومیر و همکارانش در بلگراد از محققان پیشگام می‌باشند. در سال ۱۹۹۰ م آنها در نهایت یک پوشش

محافظ خارجی کامل برای کمک به راه‌رفتن افراد فلج ارائه کردند که این مدل در قسمت الف از شکل ۲ نمایش داده شده است. اگزواسکلتون ریوالک[۸] که در قسمت ب از شکل ۲ نمایش داده شده، یک پوشش محافظ خارجی کمکی تجاری است که توسط شرکت فناوری‌های پزشکی آرگو[۹] ساخته شده است. این مدل با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده، حرکات بدن را تجزیه و تحلیل کرده و در حالت‌های مختلف مانند پیاده‌روی، بالارفتن از پله‌ها و یا بلندشدن از زمین، عملکرد مطلوب را اتخاذ می‌کند. ایمنی و پایداری کاربر نیز در حین حرکت، توسط عصاهایی که به ربات متصل است، حفظ می‌شود [۴]. در سال‌های اخیر، اگزواسکلتون اکسپوس[۱۰] (شکل۲ ج)، به‌طور خاص برای کمک به افراد مسن طراحی شده است [۵]. همان‌طور که در شکل مشخص است، این مدل با یک سیستم راه‌رونده (واکر) طراحی شده است که منابع تغذیه را نیز در خود جای می‌دهد و به‌کمک رابط‌هایی، توان به پاهای اگزواسکلتون منتقل می‌شود. این طرح تا حد زیادی وزن ارتز را کاهش می‌دهد، اما اپراتور را محدود به یک فاصلهٔ ثابت از واکر می‌کند. البته همهٔ دستگاه‌های کمکی شامل کل اندام پا نمی‌شوند. در چند دههٔ گذشته چند مدل از اگزواسکلتون‌ها مطرح شده‌اند که تنها شامل یک مفصل فعال می‌باشند. یکی از این مدل‌ها که به‌طور گسترده‌ای شناخته شده است، مدل آفو[۱۱] برای مفصل مچ پا می‌باشد (شکل۲ د). این محصول توسط گروه بیومکاترونیک مؤسسهٔ فناوری مساچوستس[۱۲] طراحی شده است. این دستگاه با کمک عملگر الاستیک خطی به فرد برای خمش مچ پا کمک می‌کند [۶].

۴. اگزواسکلتون‌های افزایش قدرت عملکرد انسان

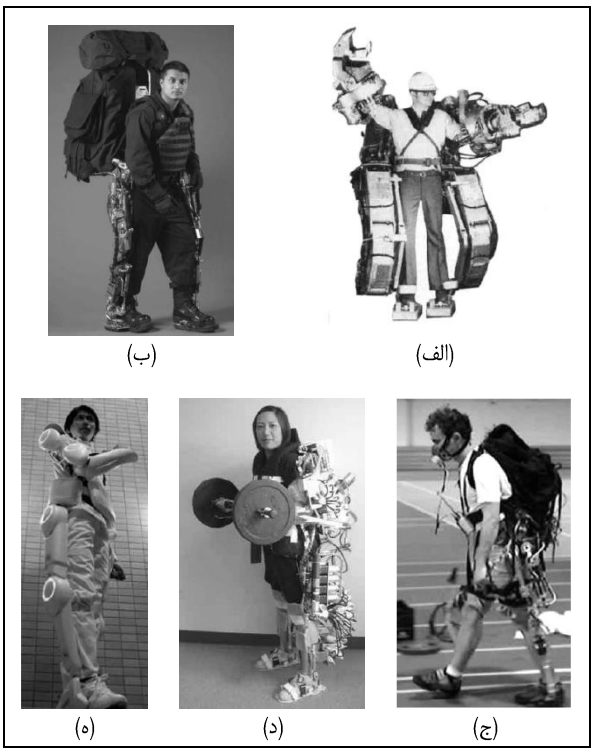
یکی از اولین اگزواسکلتون‌هایی که به‌منظور افزایش عملکرد انسان طراحی شد، مدل هاردیمن[۱۳] می‌باشد که در اواخر سال ۱۹۶۰ م ساخته شد (شکل۳ الف). هاردیمن دستگاه عظیم هیدرولیکی بود که به اجزایی برای تقویت قدرت دست‌ها و پاهای اپراتور مجهز بود. در این نوع از اگزواسکلتون‌ها، به افزایش توان برای حمل بار به‌ویژه برای کاربردهای نظامی توجه شده بود [۲]. سه مدل از مهم‌ترین اگزواسکلتون‌ها (اگزواسکلتون بلیکس[۱۴]، اگزواسکلتون سارکوس[۱۵] و اگزواسکلتون ام. آی. تی.) توسط آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفتهٔ دفاعی[۱۶] وابسته به وزارت دفاع امریکا راه‌اندازی شده‌اند. این مؤسسه برنامه‌ای به نام اگزواسکلتون‌ها برای افزایش عملکرد و قابلیت سربازان نیروی زمینی آغاز کرده است.



شکل ۲. نمونه‌هایی از گزواسکلتون‌های کمکی معلولان

مدل بلیکس که در قسمت ب از شکل ۳ نمایش داده شده است، برای افزایش قابلیت حمل بار طراحی شده است. این مدل دارای هفت درجهٔ آزادی (سه درجه در لگن، یکی در زانو و سه تا در مچ پا) می‌باشد. بنا بر ادعای طراحان آن، این اگزواسکلتون اولین مدل کاربردی برای حمل بار است و کاملاً خودکار می‌باشد [۷]. شرکت پژوهشی سارکوس بر

روی یک ربات کامل برای پوشش کل بدن کار کرده است. بنا به گزارش‌های ارائه شده این اسکلت قادر به حمل ۸۴ کیلوگرم بار می‌باشد و می‌تواند حرکاتی چون چمباتمه‌زدن، زانو زدن و جز این‌ها را انجام دهد. متأسفانه بعد از آنکه این پروژه به پایان رسید، فناوری آن به ارتش منتقل شد و اطلاعات بسیار کمی در مورد طراحی و عملکرد آن در اختیار است [۲]. در قسمت ج از شکل ۳، اگزواسکلتون ام. آی. تی. نمایش داده شده است که یک اگزواسکلتون شبه غیرفعال[۱۷] با مصرف انرژی کمتر نسبت به دو دستگاه فوق‌الذکر است. طراحی براساس ذخیره و آزادسازی کنترل‌شدهٔ انرژی در فنرها می‌باشد [۸].

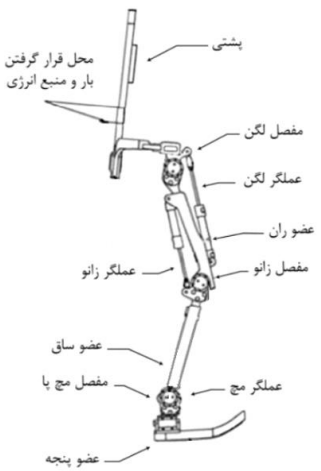


شکل ۳. چند نمونه از اگزواسکلتون‌های افزایش قدرت

ژاپن نیز نقش مهمی در تکامل اگزواسکلتون ایفا کرده است. اگزواسکلتون پرستار (شکل ۳ د) برای پوشش کامل بدن طراحی شده و برای کمک به پرستاران در انتقال بیمار استفاده می‌شود. این ربات به‌طور کامل توسط عملگرهای پنوماتیکی توانمند شده است. یکی از جنبه‌های جالب طراحی مکانیکی این ربات این است که هیچ یک از اجزای مکانیکی در جلوی پوشندهٔ لباس وجود ندارد و اجازه می‌دهد پرستار با شخصی که در حال حمل اوست، تماس مستقیم داشته باشد. نوع دیگری از اگزواسکلتون‌های ژاپنی، اگزواسکلتون هال[۱۸] است که برای هر دو عملکرد افزایش توان و توان‌بخشی بیماران طراحی شده است (شکل ۳ ه). روش کنترل آن نیز به اندازه‌گیری فعالیت‌های ماهیچه‌ها متکی است.

۵. ساختار مکانیکی

پای انسان دارای هشت درجه آزادی است که شامل سه درجه آزادی برای ران، یک درجه برای زانو، سه درجه برای مچ و یک درجه برای پنجه می‌باشد. در این مقاله، اگزواسکلتونی با شش درجه آزادی در نظر گرفته شده است [۹]. برای هر پا سه درجه آزادی اختصاص می‌یابد. مفاصل ران، زانو و مچ هریک به‌صورت یک مفصل یک درجه آزادی مدل می‌شوند (شکل ۴). بدین ترتیب برای مفاصل زانو و ران دو پا، چهار عملگر خطی دوطرفهٔ هیدرولیکی و برای هر مچ، عملگر مولد گشتاور در نظر گرفته شد که می‌تواند مستقیماً روی مفصل قرار بگیرد.



شکل ۴. ساختار ربات اگزواسکلتون [۱۰]

۵-۱. مطالعهٔ چرخهٔ گام‌برداشتن

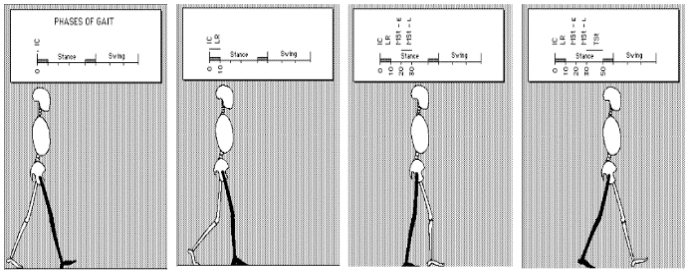
گام نخست در مطالعهٔ اگزواسکلتون‌ها، مدلسازی دینامیکی است. چون تمامی جزئیات مربوط به راه‌رفتن انسان را

به‌دلیل وجود پیچیدگی‌های فراوان نمی‌توان در نظر گرفت و در مدلسازی لحاظ کرد، برای مطالعهٔ حرکت ربات‌ها، شخص باید مدل خود را تا سرحد امکان تا زمانی‌که نیازهای مورد نظر ارضا می‌شود ساده در نظر بگیرد. یک مدل خوب مدلی است که خواص مکانیکی را به‌خوبی نمایش دهد و بنابراین مطابقت خوبی بین عمل و اندازه‌گیری‌ها وجود داشته باشد. اگر به کل چرخهٔ راه‌رفتن دقت کنیم، حرکات پا دستخوش نوسانات بزرگی می‌شود. براساس یک نوع تقسیم‌بندی برای طراحی کنترلر، چرخهٔ راه‌رفتن برای هر پا به دو فاز تقسیم می‌شود: آونگی[19] و ایستا[20] [۱۱].

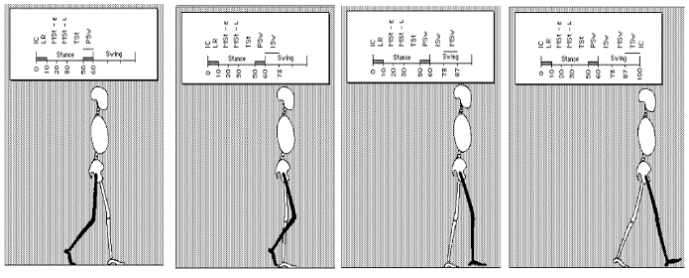
در حالت آونگی، پا هیچ تماسی با زمین ندارد؛ در این حالت، حرکت نوسانی پا زیاد است اما تنها وزن خود را تحمل می‌کند و کلیهٔ بار روی پای دیگر است. پس گشتاور نسبتاًکوچکی اعمال می‌شود. در حالت ایستا، پا حرکت کوچکی دارد اما وزن تمام نیم‌تنه و بارها را تحمل می‌کند؛ پس گشتاور اعمالی بزرگ است. هر یک از این فازها را به چهار زیرفاز تقسیم می‌کنند که در شکل‌های ۵ و ۶ این زیرفازها به‌ترتیب برای حالت‌های ایستا و آونگی ارائه شده است.

۵-۲. نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی ارائه می‌شود. فرض کنید انسانی که ربات را می‌پوشد دارای ۸۰ کیلوگرم جرم و طول پای ۹۵ سانتی‌متر باشد که با سرعت یک متر بر ثانیه حرکت کند و باری در حدود ۲۰ کیلوگرم را حمل نماید. برای شبیه‌سازی مدل دینامیکی، از نرم افزار ورکینگ مدل استفاده شده است. در شکل ۷ ساختار ربات شبیه‌سازی‌شده نمایش شده است. فرض بر این است که کف پای ربات در فاز نوسان به‌صورت موازی با زمین باقی می‌ماند. همچنین فرض شده است که نیم‌تنهٔ بالایی طی چرخهٔ گام‌برداشتن به‌صورت عمودی باقی بماند. با شبیه‌سازی این طرح می‌توان تغییرات زاویه و گشتاور را در هر سه مفصل ران، زانو و مچ پا مشاهده کرد. برای جلوگیری از افزایش حجم مطالب در این مقاله، تنها به ارائهٔ نمودارهای مربوط به مفصل زانو بسنده شده است. توان مفصل زانو دارای تغییرات زیادی است، اما در سراسر چرخهٔ گام‌برداشتن دارای میانگین توان منفی است و به‌همین دلیل کنترل مفصل زانوی ربات دشوارتر از سایر مفاصل است، لذا در این قسمت به مفصل زانو توجه بیشتری شده است.

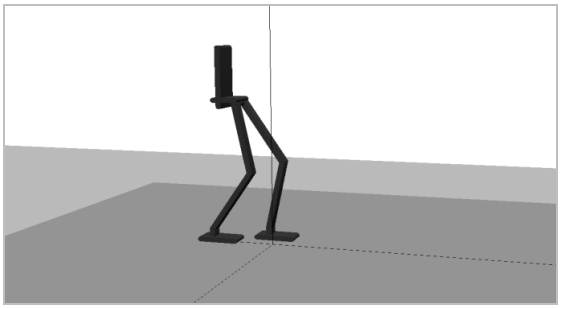


شکل ۵. چهار زیرفاز از فاز ایستا (به‌ترتیب از چپ به راست) [۱۱]

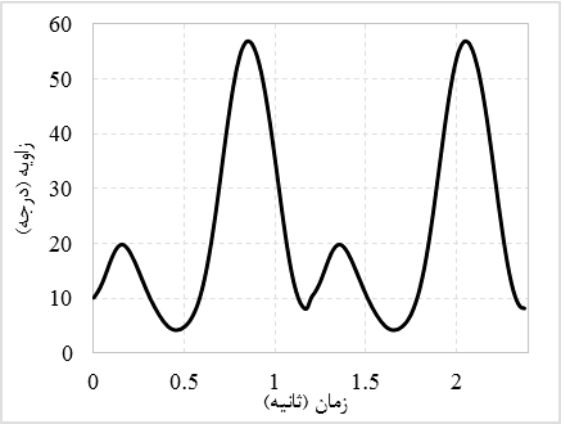


شکل ۶. چهار زیرفاز از فاز آونگی (به‌ترتیب از چپ به راست) [۱۱]

در شکل ۸ تغییرات زاویهٔ مفصل زانو در حین حرکت حاصل از شبیه‌سازی سیستم نمایش داده شده است. این نمودار برای دو چرخهٔ کامل گام‌برداشتن ارائه شده است. در شکل ۹ نیز گشتاور حاصل از حمل بار روی مفصل زانو برای دو چرخهٔ گام برداشتن نمایش داده شده است. از این شکل به‌خوبی می‌توان بر عملکرد مطلوب ربات اگزواسکلتون پی برد که با کمک عملگرهای قدرتمندش، گشتاورهای لازم در مفاصل را ایجاد می‌کند و موجب می‌شود که انسان بدون تحمل وزن بار حرکت کند.

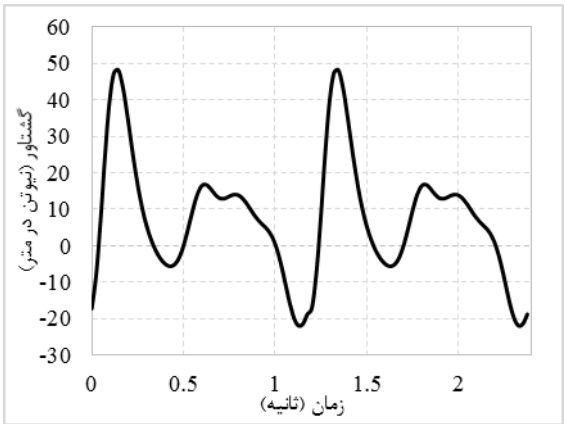


شکل ۷. ربات شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ورکینگ مدل



شکل ۸ تغییرات زاویهٔ مفصل زانو

انسان بدون استفاده از اگزواسکلتون باید کلیهٔ این گشتاورها را در مفاصل خود تحمل کند که در این صورت در حالتی‌که باری در حدود ۲۰ کیلوگرم حمل می‌شود، تغییرات گشتاور مفصل زانو بازهٔ بزرگی در حدود ۷۰ نیوتن در متر را در بر دارد (۲۰- تا ۵۰ نیوتن در متر). اما با استفاده از اگزواسکلتون کلیهٔ وزن بار روی اسکلت خارجی منتقل شده و انسان فقط وزن خود را تحمل می‌کند که در این حالت تغییرات گشتاور مفصل زانو حاصل از وزن خود انسان در حدود ۳۵ نیوتن در متر می‌باشد (۱۰ تا ۲۵ نیوتن در متر)؛ مابقی گشتاور، که حاصل از بار حمل‌شده است، به‌کمک اگزواسکلتون تأمین می‌شود. اهمیت این سیستم زمانی مشخص می‌شود که وزن بار حمل‌شده افزایش یابد. مثلاً اگر باری در حدود ۵۰ کیلوگرم حمل شود که در این‌صورت بیش از ۶۰ درصد گشتاور مورد نیاز توسط اگزواسکلتون مهیا می‌شود.



شکل ۹. تغییرات گشتاور مفصل زانو

٦. نتیجه‌گیری

در این مقاله نوع خاصی از ربات‌ها با نام‌های ربات اسکلت خارجی، ربات پوششی و یا اگزواسکلتون معرفی شدند. اگزواسکلتون پیرامون اندام انسان قرار گرفته و با ساختار قدرتمندش انسان را توانمند می‌سازد. در این مقاله انواع ربات‌های اسکلت خارجی براساس کاربرد به سه دسته تقسیم شدند و برای هریک نمونه‌هایی معرفی شد. به‌منظور مدل‌سازی دینامیکی، نوع خاصی از این ربات‌ها با شش درجه آزادی در نظر گرفته شد و با کمک نرم‌افزار ورکینگ مدل شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی گواه از عملکرد مطلوب این ربات در زمینهٔ کاهش نیرو و گشتاورهای اعمالی بر مفاصل انسان در حین حمل بار می‌باشد. امید است که با توسعهٔ این ربات‌ها در حیطهٔ پزشکی، کمک شایانی به معلولان جسمی - حرکتی داده شود.

۷. مآخذ

[1] Hugh Herr. "Exoskeletons and Orthoses: Classification, Design Challenges and Future Directions." *Journal of Neuro Engineering Rehabilitation6*, no. 21 (2009):1-9.

[2] Dollar, Aaron M. and Hugh Herr. "Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art." *Robotics, IEEE Transactions* on 24, no. 1 (2008):144-158.

[3] Riener, Robert, Lars Lunenburger, Saso Jezernik, Martin Anderschitz, Gery Colombo and Volker Dietz. "Patient-Cooperative Strategies for Robot-Aided Treadmill Training: First Experimental Results." *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions* on 13, no. 3 (2005):380-394.

[4] Argo Medical Technologies Ltd., editor. Rewalk, http://www.argomedtec.com /index.asp.

[5] Kong, Kyoungchul and Doyoung Jeon. "Design and Control of an Exoskeleton for the Elderly and Patients.' *Mechatronics*, IEEE/ASME Transactions on 11, no. 4 (2006): 428-432.

[6] Blaya, Joaquin A., Hugh Herr. "Adaptive Control of a Variable-Impedance Ankle-Foot Orthosis to Assist Drop-Foot Gait." *Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, IEEE Transactions on 12, no. 1 (2004):24-31.

[7] Kazerooni, H., R. Steger. "The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton." *Journal of dynamic systems, measurement, and control* 128, no. 1 (2006): 14-25.

[8] Walsh, Conor James, Ken Endo and Hugh Herr. "A Quasi-Passive Leg Exoskeleton for Load-Carrying Augmentation." *International Journal of Humanoid Robotics* 4, no. 03 (2007): 487-506.

[9] Zoss, Adam B., Hami Kazerooni and Andrew Chu. "Biomechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (Bleex)." *Mechatronics*, IEEE/ASME Transactions on 11, no. 2 (2006):128-138.

[10] Ataei, M.M., H. Salarieh, A. Alasty. "Adaptive Impedance Control of Exoskeleton Robot." *Modares Mechanical Engineering* 13, no. 7 (2013): 111-126.

[11] Grand, William, Hugh M. Herr, Daniel Joseph Paluska, Kenneth Pasch, Andrew Valiente and Conor Walsh. "Exoskeletons for Running and Walking." US. Patents, 2010.

پی‌نوشت

1. Working Model 4D
2. Actuator
3. Exoskeleton
4. Treadmill
5. AutoAmbulator
6. Lokomat
7. Robotic Orthosis
8. Rewalk
9. Argo Medical Technologies
10. EXPOS
11. AAFO
12. MIT
13. HARDIMAN
14. BLEEX
15. Sarcos
16. The Defense Advanced Research Projects Agency
17. Quasi-passive
18. HAL
19. Swing
20. Stance