



طراحی و توسعه یک عملگر الاستیک سری فشرده و ماژولار برای ربات‌های اسکلت خارجی یاری‌گر پایین‌تنه

رحمان اردکانیان^۱ و علیرضا اکبرزاده^۲

^۱ دانشجو کارشناسی ارشد، مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۲/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۲۴

چکیده

این مقاله یک رویه جامع برای طراحی عملگرهای الاستیک سری را جهت استفاده در مفاصل فعال ربات‌های اسکلت خارجی یاری‌گر ارائه می‌کند. در این رویه، پارامتر سفتی فنر بر اساس دو معیار اساسی انتخاب می‌شود تا کلیه نیازهای حرکتی انسان را برآورده کند. اولین معیار، فراهم کردن پاسخ فرکانسی مطلوب برای عملگر متناسب با نیازهای حرکتی انسان است. دومین معیار نیز، عدم آسیب رسیدن به اجزاء عملگر هنگام ضربه و برخورد است. پس از تعیین مقدار مطلوب سفتی فنر، ساختمان فنر به‌گونه‌ای انتخاب شده است که ضمن اشغال کمترین فضا، از استحکام مکانیکی کافی برخوردار بوده و سفتی مورد نظر را در عمل ایجاد کند. فنر طراحی شده، به همراه موتور و گیربکس در مفاصل فعال ربات‌های اسکلت خارجی استفاده می‌شود. ملاحظات صورت گرفته در بهینه‌سازی فنر، یک عملگر الاستیک سری بسیار فشرده را ایجاد کرده که قابلیت استفاده در انواع حرکت انسان مانند، بالا و پایین رفتن از پله، نشست و برخاست و راه رفتن را داراست.

کلمات کلیدی: عملگر الاستیک سری؛ ربات اسکلت خارجی؛ فنر پیچشی فشرده؛ بهینه‌سازی؛ تاگوچی

Design & Development of Modular Compact Series Elastic Actuator for Lower Limb Extremity Assistant Exoskeleton

R. Ardakanian¹, A. Akbarzadeh^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Center of Excellence on Soft Computing and Intelligent Information Processing, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

This paper presents a comprehensive process of designing series elastic actuators to be used in active joints of assistive exoskeleton robots. In this process, the stiffness parameter of torsional spring is selected based on two main criteria to satisfy all the requirements of human motions. The first criterion is an appropriate frequency response for the actuator, according to human motion needs. The second criterion is to provide a sufficient protection of actuator hardware against collision and impact. By determining the desired value for the stiffness parameter, spring architecture is designed to have sufficient mechanical strength and provide the desired stiffness in practice while occupying a minimum space. Along with motor and gearbox, the designed spring is assembled to be used in active joints of exoskeleton robots. The considerations in the optimization of the spring has led to a very compact series elastic actuator which can be used in different human motions such as stair ascend and descend, sit to stand and walking.

Keywords: Series Elastic Actuator; Exoskeleton; Compact Torsional Spring; Optimization; Taguchi.

۱- مقدمه

که این امر پهنای باند کنترل گشتاور را کاهش خواهد داد. از این رو باید سازشی بین ایمنی و دقت کنترل گشتاور از یک سو و پهنای باند عملگر از سوی دیگر ایجاد کرد [۵].

در این مقاله یک فنر پیچشی بهینه برای استفاده در عملگرهای الاستیک سری پیشنهاد داده می‌شود؛ به گونه‌ای که مشخصه‌های عملکردی و ایمنی مورد نیاز برای حرکات راه رفتن، نشست و برخاست و بالا و پایین رفتن از پله را با فرض ۵۰ درصد کمک به کاربر تأمین کند. هندسه فنر به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که ابعاد فنر تا حد امکان کوچک بوده و تنش‌ها از حد مجاز عبور نکنند.

تاکنون مطالعات گوناگونی روی میزان مطلوب سفتی فنر مورد استفاده در عملگرهای الاستیک سری انجام شده است که برای ربات‌های اسکلت‌خارجی پایین‌تنه، سفتی مطلوب در محدوده ۲۰۰-۳۰۰ (N.m/rad) گزارش شده است [۶، ۷]؛ همچنین، طراحی‌های مختلفی از جزء الاستیک برای کاربردهای متنوعی از اوروتزها و اسکلت‌خارجی‌ها پیشنهاد شده است. به طور کلی می‌توان این طرح‌ها را به دو گروه کلی بر اساس نوع فنر استفاده شده، یعنی پیچشی [۸] و کششی/فشاری [۹] دسته‌بندی کرد [۱۰]. در این میان، استفاده از فنرهای پیچشی، ساختار سبک‌تر و کم‌حجم‌تری را برای عملگر ایجاد می‌کند. چند نمونه از هندسه‌های پیشنهاد شده در مراجع مختلف، برای رسیدن به سفتی مورد نظر در فنرهای پیچشی، در شکل ۱ و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

فنرهای شکل ۱- (پ)، ۱- (ث)، ۱- (ج)، ۱- (خ) حاوی رینگ خارجی بوده که منجر به محدودیت در تغییر شکل حلقه‌های انعطاف‌پذیر داخلی می‌شود؛ همچنین به دلیل صلبیت بالا در برابر گشتاور پیچشی، در تغییر شکل و خاصیت فنری، نقشی نداشته و تنها فضای اضافی را اشغال می‌کند. در نهایت رینگ بیرونی در استحکامات مکانیکی فنر نیز نقشی ایفا نمی‌کند. فنرهای نواری از سری شکل ۱- (ح)، دارای سفتی‌های پایینی در کاربرد عملگر الاستیک سری می‌باشند. فنرهای شکل ۱- (الف)، ۱- (ب) و ۱- (ج) متقارن نبوده و در تغییر شکل‌ها، بارهای عرضی بر محور وارد کرده که منجر به کاهش عمر اجزاء یا تاقان بندی می‌شوند. شکل ۱- (ت) هنگام تقارن و حذف رینگ خارجی از گشتاور قابل ملاحظه‌ای هنگام سفتی مطلوب برخوردار است.

ربات اسکلت‌خارجی یاری‌گر به نوعی از ربات‌های اسکلت‌خارجی اطلاق می‌شود که به منظور تأمین قسمتی از توان کاربر طراحی شده‌اند. اسکلت‌خارجی یاری‌گر، می‌تواند در دوشاخه پیشگیری و درمان کاربرد داشته باشد. بحث ایمنی و راحتی کاربر در ربات‌های اسکلت‌خارجی یاری‌گر، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است؛ زیرا این ربات‌ها در تعامل با انسان فعالیت می‌کنند و برخلاف ربات‌های اسکلت‌خارجی طراحی شده برای افراد فلج، کاربران این ربات‌ها در اندام خود دارای حس می‌باشند؛ بنابراین لازم است، در این ربات‌ها بجای کنترل موقعیت، نیرو تعاملی بین ربات و انسان به گونه‌ای کنترل شود که در حین انجام حرکات مختلف توسط کاربر، در صورت نیاز وی به نیروی کمکی، بخشی از این نیرو توسط ربات تأمین شود. این امر سبب پیچیدگی بالا در طراحی الگوریتم‌های کنترلی یاری‌گر شده است.

تاکنون ربات‌های اسکلت‌خارجی یاری‌گر مختلفی طراحی، ساخته و تجاری‌سازی شده‌اند که از جمله معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به ربات هال و سایر ربات‌های حمایتی ساخت شرکت سایبرداین [۱]، ربات‌های بک اکس، لگ اکس و شولدر اکس ساخت شرکت سوییت اکس [۲] و ربات یاری‌گر حرکت ساخت شرکت هوندا [۳] اشاره کرد.

در تمامی ربات‌های فوق از عملگرهای صلب به عنوان محرک ربات استفاده شده است و سعی شده است، ایمنی و راحتی کاربر از طریق الگوریتم‌های نظارتی و کنترلی تأمین شود. عملگرهای الاستیک سری مفهوم نسبتاً جدیدی در زمینه سیستم محرکه ربات‌ها می‌باشند که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند. این محرک‌ها می‌توانند بحث ایمنی و راحتی کاربر را به صورت ذاتی و مکانیکی به سیستم اضافه کرده و سبب تسهیل در طراحی الگوریتم کنترلی ربات شوند [۴].

مشخصه‌های فنر نقشی تعیین‌کننده در ویژگی‌های عملگر الاستیک سری داشته و باید به دقت انتخاب شوند. سفتی کمتر موجب افزایش دقت در اندازه‌گیری گشتاور، افزایش ایمنی در مقابل ضربات و امپدانس ذاتی پایین‌تر می‌شود. این در حالی است که با افزایش نرمی، نیاز به حرکاتی سریع‌تر و با دامنه بیشتر در سمت موتور خواهد بود



شکل ۱- هندسه‌های مختلف برای فنرهای مورد استفاده در عملگرهای الاستیک سری، پیشنهاد شده در: الف) [۵]، ب) [۸]، پ) [۷]، ت) [۱۱]، ث) [۱۲]، ج) [۱۳]، چ) [۱۴]، ح) [۱۵] و خ) [۱۶]

در این مقاله، با الگوبرداری از فنر شکل ۱-ت) یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر تاگوچی و الگوریتم‌های تکاملی پیشنهاد می‌گردد تا با حفظ محدودیت‌های ابعادی، سفتی فنر به مقدار مطلوب برسد. درعین حال تنش‌ها باید تا حد امکان پایین باشند تا امکان استفاده از مواد در دسترس با ضریب ایمنی مناسب وجود داشته باشد. درنهایت، طراحی اجزا یک عملگر الاستیک سری بسیار فشرده با استفاده از فنر طراحی شده ارائه خواهد شد. طراحی عملگر به صورت ماژولار است؛ به گونه‌ای که به راحتی قابل استفاده در کاربردهای مختلف خواهد بود.

نوآوری‌های اصلی این مقاله بشرح ذیل می‌باشد:

- ارائه یک رویه جدید بهینه‌سازی متشکل از الگوریتم ژنتیک و روش تاگوچی

جدول ۱- مشخصه‌های اصلی اجزای الاستیک شکل ۱

| سفتی پیچشی (N.m/rad) | بیشینه گشتاور (N.m) | ضخامت (mm) | قطر (mm) | کد فنر در شکل |
|----------------------------|---------------------------|---------------|-------------|------------------|
| 46 | 15 | 2.75 | 60 | الف |
| 219 | 100 | 15 | 75 | ب |
| 98 | 7.7 | 3 | 85 | پ |
| 500 | 60 | 11 | 90 | ت |
| 110 | 25 | 12 | 80 | ث |
| 84 | 15 | 6 | 125 | ج |
| 645 | 45 | | | چ |
| 9.7 | 7.5 | 10 | 71 | ح |
| 172 | 12 | | | خ |

۳- انتخاب موتور و جعبه‌دنده

عملگر الاستیک سری از یک موتور، جعبه‌دنده و مازول الاستیک تشکیل شده است. یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی ربات‌های اسکلت خارجی، سبکی و اشغال حداقل فضا پیرامون انسان است؛ همچنین ربات باید توانایی تأمین نیازهای نیرویی انواع حرکت‌های انسان را نیز داشته باشد. سری موتورهای تخت بدون جاروبک دی سی از محصولات شرکت مکسون ضمن برخورداری از گشتاور و توان مناسب، دارای یک ساختمان تخت و فشرده بوده و گزینه‌های مناسبی برای نصب در راستای مفصل کاربر می‌باشند [۱۸]. درواقع در صورتی که موتورها مستقیماً در راستای مفاصل کاربر نصب شوند، این موتورها کمترین ضخامت را ایجاد خواهند کرد؛ همچنین برای کاهش هرچه بیشتر ضخامت عملگر نهایی لازم است، ضخامت جعبه‌دنده مورد استفاده نیز تا حد امکان کم باشد. جعبه‌دنده‌های سری اس‌اچ‌دی^۲ از شرکت هارمونیک درایو دارای طراحی ساده و کم‌حجم بوده و از ظرفیت گشتاوری مناسبی برخوردار می‌باشند [۱۹].

هدف از این عملگرها تأمین حداکثر ۵۰ درصد از گشتاور موردنیاز در مفاصل ران و زانو انسان در انواع حرکت‌ها است. با فرض اتصال صلب ربات با بدن کاربر، سرعت دوران خروجی عملگر، برابر با سرعت دوران مفاصل کاربر و گشتاور خروجی عملگر، برابر با ۵۰ درصد از گشتاور موردنیاز هر مفصل در نظر گرفته می‌شود با توجه به نزدیک بودن مقادیر بیشینه گشتاور و سرعت در این مفصل‌ها، موتور و گیربکس مورد استفاده در هر دو مفصل یکسان در نظر گرفته می‌شوند.

با توجه به داده‌ها حرکتی انسان و با در نظر داشتن ۵۰ درصد گشتاور کمکی، توان موردنیاز عملگر در هر کدام از حرکت‌ها در جدول ۲ آورده شده است. به دلیل استفاده از جعبه‌دنده‌های شرکت هارمونیک درایو و با در نظر گرفتن متوسط بازده ۷۰ درصد برای این جعبه‌دنده‌ها (مطابق با اطلاعات شرکت سازنده) [۱۹]، موتور ۱۶۰ وات شرکت مکسون به‌عنوان حدس اولیه مورد نظر قرار می‌گیرد [۱۸].

• ارائه یک ساختمان فشرده، سبک و مستحکم برای فنرهای پیچشی در عملگرهای الاستیک سری همچنین موارد ذیل را می‌توان به‌عنوان نوآوری‌های فرعی برشمرد:

• ایجاد مدل‌های دینامیکی و شبیه‌سازی‌های تحلیلی در به دست آوردن حد بالا و پایین نرمی فنر

• لحاظ کردن مشخصه‌های موتور و جعبه دنده در محاسبات و مدل‌های تحلیلی

در این مقاله ابتدا توضیحی از بیومکانیک حرکتی انسان در بخش (۲) داده شده است تا نیازهای انواع حرکت مشخص گردد. سپس ساختمان کلی عملگر الاستیک سری موردنظر برای استفاده در ربات اسکلت خارجی، در بخش (۳) توضیح داده خواهد شد. رویه انتخاب موتور و گیربکس عملگر نیز، در بخش (۳) شرح داده خواهد شد. معیارهای انتخاب فنر برای تأمین مشخصه‌های حرکتی در بخش (۴) ارائه شده است. در بخش (۵) یک هندسه مناسب برای فنر انتخاب شده و بهینه‌سازی می‌شود. در نهایت بخش (۶)، به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مقاله می‌پردازد.

۲- بیومکانیک حرکت انسان

عملگرهای ربات باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که توانایی تأمین مشخصه‌های حرکتی مورد نیاز مانند سرعت و گشتاور مفاصل را داشته باشند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، هدف از این مقاله، طراحی یک عملگر الاستیک سری برای استفاده در یک ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه است؛ به‌گونه‌ای که توانایی تعقیب حرکات کاربر و درعین‌حال تأمین ۵۰ درصد از گشتاور مورد نیاز کاربر در حرکات گام برداری آهسته، نشست‌وبرخاست و بالا و پایین رفتن از پله را داشته باشد؛ بنابراین لازم است که داده‌های حرکتی انسان، شامل سرعت و گشتاور مفاصل، در حرکات مختلفی مانند، راه رفتن آهسته، نشست‌وبرخاست و بالا و پایین رفتن از پله، به‌عنوان مبنای محاسبات در نظر گرفته شوند. ربات باید بتواند حرکات کاربر را تعقیب کرده و علاوه بر آن گشتاور کمکی را به کاربر اعمال کند [۱۷].

¹ Flat Brushless DC Motors

² SHD

$$G\omega_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i G\dot{\theta}_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (۳)$$

در رابطه $G\tau_{i,2}$ گشتاور وارده بر جعبه‌دنده در لحظه نام است که برابر با گشتاور کمکی موردنظر در لحظه نام، $A\tau_i$ در نظر گرفته می‌شود؛ همچنین، $G\dot{\theta}_i$ سرعت جعبه‌دنده در لحظه نام و t_i مدت‌زمان اعمال این گشتاور است.

به‌منظور واقعی‌تر کردن شرایط کاری، یک سیکل حرکت ترکیبی شامل، یک سیکل نشست‌وبرخاست، ۵ دقیقه گام برداشتن آهسته و بالا و پایین رفتن از ۱۰ پله تعریف شده است. با در نظر گرفتن این سیکل و استفاده از رابطه ۲، گشتاور میانگین جعبه‌دنده برای مفصل زانو و ران به ترتیب برابر $۱۱/۰۵$ و $۱۰/۰۲$ نیوتن متر و سرعت میانگین جعبه‌دنده نیز به ترتیب برابر $۱۵/۲۱$ و $۸/۵۹۸$ دور بر دقیقه به دست می‌آید؛ همچنین با توجه به داده‌های حرکتی انسان و در نظر گرفتن ۵۰ درصد کمک بیشینه گشتاور و سرعت خروجی جعبه‌دنده برای مفاصل ران و زانو به ترتیب برابر $۵۷/۱۴$ و $۶۹/۸۶$ نیوتن متر و $۲۳/۴۹$ و $۴۶/۸۶$ دور بر دقیقه به دست می‌آید. با مقایسه نتایج حاصله با مقادیر متوسط و بیشینه مدل‌های مختلف جعبه‌دنده هارمونیک درایو، مدل SHD-20-50 از سری اس‌اچ‌دی هارمونیک درایو انتخاب می‌شود. مشخصات عملکردی و دینامیکی موتور و جعبه‌دنده انتخاب شده، در جدول ۳ و جدول ۴ آورده شده است.

پس از انتخاب موتور و جعبه‌دنده، باید توانایی سیستم محرکه از نظر تأمین حرکت‌ها و گشتاورهای موردنیاز بررسی شود. مجموعه سیستم محرکه باید علاوه بر تأمین گشتاورهای کمکی، گشتاورهای لازم برای شتاب‌گیری مجموعه اینرسی محور موتور و جعبه‌دنده را نیز داشته باشد.

دیگرام آزاد محور موتور و جعبه‌دنده را می‌توان به‌صورت شکل ۲ نمایش داد که در آن اثر وجود المان الاستیک و نرمی جعبه‌دنده صرف‌نظر شده است.

در شکل ۲، $S\tau$ گشتاور کمکی، $M\tau$ گشتاور موتور و $G\theta = M\theta$ زاویه دوران محور موتور و جعبه‌دنده بوده و MGb و $MG\tau$ به ترتیب ممان اینرسی، ضریب اصطکاک ویسکوز و اصطکاک کلمب مجموعه محور موتور و جعبه‌دنده می‌باشند که طبق رابطه ۴، ۵ و ۶ قابل محاسبه هستند.

جدول ۲- توان موردنیاز ربات اسکلت خارجی یاری‌گر

| نوع حرکت | در هر مفصل | |
|----------------|-----------------------------|----------------------------|
| | بیشینه توان مفصل زانو (وات) | بیشینه توان مفصل ران (وات) |
| راه رفتن آهسته | 19 | 16 |
| پله بالا رفتن | 97 | 31 |
| پله پایین آمدن | 115 | 10 |
| نشست‌وبرخاست | 52 | 73 |

نسبت دنده جعبه‌دنده، R ، با محاسبه نسبت دور نامی موتور، $M\dot{\theta}_{nom}$ ، به بیشینه سرعت دورانی موردنیاز در خروجی جعبه‌دنده، $G\dot{\theta}_{max}$ ، به دست می‌آید. در این مرحله سرعت دورانی خروجی جعبه‌دنده، $G\dot{\theta}$ با سرعت دورانی مفاصل کاربر، $H\dot{\theta}$ ، یکسان در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است، در سرتاسر این مقاله، پارامترهای مربوط به سمت سرعت‌بالا (ورودی جعبه‌دنده) با بالانویس $-$ و مقادیر انتقال‌یافته این پارامترها در سمت سرعت‌پایین (خروجی جعبه‌دنده) بدون این بالانویس نشان داده شده‌اند.

$$\frac{M\dot{\theta}_{nom}}{G\dot{\theta}_{max}} \approx \frac{M\dot{\theta}_{nom}}{H\dot{\theta}_{max}} \geq R \quad (۱)$$

بنابراین، با توجه به اینکه بیشینه سرعت‌های مفاصل در حرکت راه رفتن آهسته روی می‌دهد، بیشینه مقدار نسبت دنده جعبه‌دنده برای مفاصل زانو و ران در حرکت آهسته به ترتیب برابر ۱۱۲ و ۶۰ به دست می‌آید. با توجه به مدل‌های موجود برای سری اس‌اچ‌دی، نسبت دنده جعبه‌دنده عملگرهای مفاصل زانو و ران به‌صورت یکسان و برابر $R = 50$ انتخاب شده‌اند.

از میان تمام گزینه‌های موجود، جعبه‌دنده نهایی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که بیشینه و میانگین سرعت و گشتاور موردنیاز از حد مجاز جعبه‌دنده عبور نکنند. جهت محاسبه مقادیر میانگین سرعت و گشتاور جعبه‌دنده می‌توان از فرمول‌های محاسباتی شرکت هارمونیک درایو [۱۹] استفاده کرد.

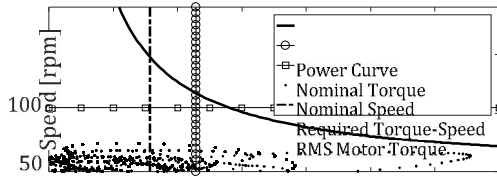
$$G\tau_{ave} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n t_i G\dot{\theta}_i |G\tau_i|^3}{\sum_{i=1}^n t_i G\dot{\theta}_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۲)$$

جدول ۳- مشخصه‌های فنی موتور بدون جاروبک ۱۶۰ وات ساخت شرکت مکسون [۱۸]

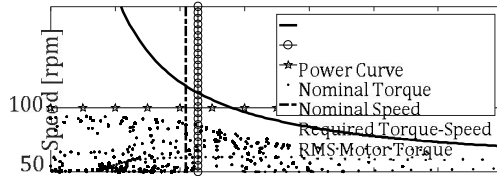
| پارامتر | شرح | واحد | مقدار |
|--------------------------|----------------------------|------------------|---------------------------------|
| M_P | توان | W | 160 |
| $M_{V_{nom}}$ | ولتاژ نامی | V | 24 |
| $M_{\bar{I}}$ | اینرسی محور | $kg.m^2$ | $3170 * 10^{-7}$ |
| $M_{\bar{b}}$ | ضریب اصطکاک ویسکوز | $kg.m^2/(rad.s)$ | 0 |
| $M_{\bar{\tau}_c}$ | اصطکاک کولمب | $N.m$ | $M_{i_{nl}} * M_{k_M} = 0.0468$ |
| $M_{\bar{\tau}_{stall}}$ | گشتاور استال | $N.m$ | 7.91 |
| $M_{\bar{\tau}_{nom}}$ | گشتاور نامی | $N.m$ | 0.457 |
| $M_{\dot{\theta}_{nom}}$ | سرعت نامی | rad/s | $2720 * (2 * \pi/60)$ |
| $M_{\dot{\theta}_{nl}}$ | سرعت بی باری در ولتاژ نامی | rad/s | $3170 * (2 * \pi/60)$ |

جدول ۴- مشخصه‌های فنی جعبه‌دنده SHD-20-50-2SH ساخت شرکت هارمونیک درایو [۱۹]

| پارامتر | شرح | واحد | مقدار |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------|-----------------------|
| R | نسبت دنده | - | 50 |
| $G_{\bar{I}}$ | اینرسی محور | $kg.m^2$ | $0.09 * 10^{-4}$ |
| $G_{\bar{b}}$ | ضریب اصطکاک ویسکوز | $kg.m^2/(rad.s)$ | 0.00032 |
| $G_{\bar{\tau}_c}$ | اصطکاک کولمب | $N.m$ | 0.066 |
| $\lim_{ave}^G \dot{\theta}$ | حد مجاز میانگین سرعت دورانی ورودی | rad/s | $3500 * (2 * \pi/60)$ |
| $\lim_{max}^G \dot{\theta}$ | حد مجاز بیشینه سرعت دورانی ورودی | rad/s | $6500 * (2 * \pi/60)$ |
| $\lim_{max}^{G, \tau} momentary$ | حد مجاز بیشینه گشتاور بار لحظه‌ای | $N.m$ | 69 |
| $\lim_{ave}^G \tau$ | حد مجاز میانگین گشتاور بار | $N.m$ | 24 |



شکل ۳- نمودار گشتاور-سرعت موتور برای مفصل ران



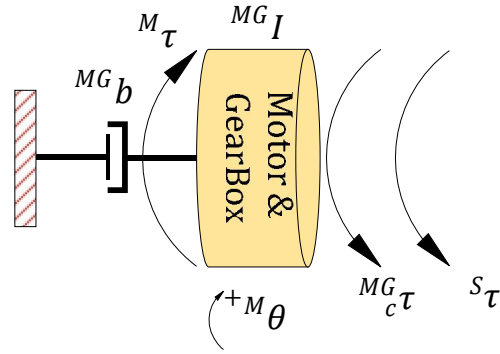
شکل ۴- نمودار گشتاور-سرعت موتور برای مفصل زانو

$$M_{\tau_{rms}} = \frac{\sum_i^n \Delta t_i \cdot \tau_i^2}{\sum_i^n \Delta t_i} \quad (۸)$$

با استفاده از رابطه ۸ و با در نظر گرفتن سیکل حرکت ترکیبی برای مفصل ران و زانو به ترتیب $M_{H\tau_{rms}} = 14.8$ و $M_{K\tau_{rms}} = 20$ ، ۷۱ نیوتن متر است که کمتر از گشتاور نامی موتور است. مقادیر جذر میانگین مربعات گشتاور مفصل نیز در شکل ۳ و شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

مقادیر گشتاور اعمالی به جعبه‌دنده به همراه سرعت دوران آن در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که گشتاور اعمالی به جعبه‌دنده برابر با گشتاور کمکی، یعنی ۵۰ درصد گشتاور موردنیاز مفصل انسان و سرعت دوران آن برابر با سرعت دوران مفصل انسان در نظر گرفته شده است. در واقع بخشی از گشتاور تولیدی موتور صرف غلبه بر اصطکاک‌ها و شتاب‌گیری محور موتور و جعبه‌دنده می‌شود که نباید در محاسبات جعبه‌دنده وارد شوند. مقادیر مجاز برای میانگین و بیشینه گشتاور وارده بر جعبه‌دنده نیز، در جدول ۴ نشان داده شده است.

بیشینه گشتاور عرضی که در مفصل زانو و ران در انواع حرکت انسان اعمال می‌شود، در جدول ۵ آمده است. مدل انتخابی هارمونیک درایو از سری SHD در اسکلت خارجی یاری‌گر سایز ۲۰ بوده که گشتاور عرضی مجاز در این مدل ۹۳ نیوتن متر است. با توجه به اینکه بیشینه گشتاور عرضی مفصل طبق جدول ۵، ۸۲/۴ نیوتن متر بوده، لذا مدل



شکل ۲- دیاگرام آزاد محور موتور و جعبه‌دنده

$$MG_I = (M\bar{I} + G\bar{I}).R^2 \quad (۴)$$

$$MG_b = (M\bar{b} + G\bar{b}).R^2 \quad (۵)$$

$$MG_c\tau = (M\bar{c} + G\bar{c}).R \quad (۶)$$

بنابراین معادله دینامیکی محور موتور و جعبه‌دنده را می‌توان به صورت رابطه ۷ استخراج کرد.

$$M_{\tau} = MG_I \cdot G\ddot{\theta} + MG_b \cdot G\dot{\theta} + MG_c\tau \cdot \text{sign}(M\dot{\theta}) + S_{\tau} \quad (۷)$$

با استفاده از رابطه ۷ و با توجه به مقادیر داده شده در جدول‌های ۳ و ۴ برای پارامترهای موتور و جعبه‌دنده می‌توان گشتاور لازم موتور برای تعقیب حرکات کاربر و اعمال گشتاور کمکی را محاسبه کرد. شکل ۳ و ۴ نمودار سرعت-گشتاور را برای موتور نمایش می‌دهد؛ همچنین مقادیر متوسط و بیشینه گشتاور موردنیاز محرک به همراه مقادیر مجاز موتور در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تمامی سرعت‌ها و گشتاورها در شکل ۳ و ۴ در سمت سرعت پایین محاسبه شده‌اند.

شکل ۳ و ۴ نشان می‌دهد که مجموعه موتور انتخاب شده به خوبی از عهده تأمین سرعت‌های موردنیاز برمی‌آید. با این وجود، گشتاورهای موردنیاز به‌طور لحظه‌ای از گشتاور نامی موتور تجاوز می‌کنند. با توجه به کاتالوگ شرکت سازنده موتور، عبور از گشتاور نامی به صورت لحظه‌ای مشکلی ایجاد نخواهد کرد، مشروط بر آنکه مقدار جذر میانگین مربعات گشتاور موتور، $M_{\tau_{rms}}$ ، از گشتاور نامی موتور تجاوز نکند. جذر میانگین مربعات گشتاور موتور طبق رابطه ۸ قابل محاسبه است که در شکل ۳ و ۴ نیز نشان داده شده است.

۴-۱- حد بالای سفتی بر مبنای ایمنی

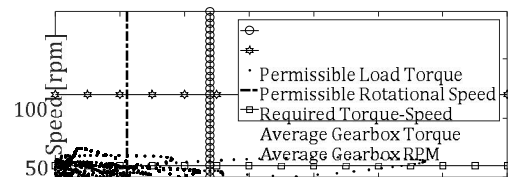
از نقطه‌نظر ایمنی، سفتی فنر باید به اندازه‌ای باشد که در صورت بروز ضربه یا برخورد ربات با محیط صلب، از یک‌طرف به اجزای ربات آسیب نرسد و از طرف دیگر، نیروی بیش از اندازه‌ای به بدن کاربر وارد نشود. هرچه سفتی فنر کمتر باشد، خاصیت فیلتر کنندگی فنر بیشتر شده و در کاهش اثرات ضربه و برخورد مؤثرتر خواهد بود؛ بنابراین، محاسبات مربوط به ایمنی، حد بالای سفتی فنر را تعیین می‌کنند.

حد بالای سفتی فنر به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که نیروی ایجادشده از حد مجاز گشتاور لحظه‌ای جعبه‌دنده بیشتر نشود. بدین منظور فرض می‌شود، ربات در حین راه رفتن و نشستن و برخاستن با یک مانع صلب برخورد کرده و موتور بدون هیچ واکنشی به حرکت خود ادامه می‌دهد. در این حالت مدل دینامیکی عملگر، مطابق شکل ۷ خواهد بود که در شرایط اولیه، تمامی اجزا با یک سرعت مشخص در حال حرکت بوده و فنر به میزان گشتاور کمی تغییر شکل داده است. در لحظه برخورد، خروجی فنر به یک‌باره به زمین متصل شده، ولی موتور واکنشی نشان نداده، همچنان به اعمال یک گشتاور ثابت و برابر با گشتاور اعمالی پیش از لحظه برخورد ادامه می‌دهد. در این حالت سفتی فنر بایستی به اندازه‌ای باشد که پس از برخورد، نیروی فنر از حد گشتاور مجاز جعبه‌دنده عبور نکند. با توجه به این‌که گشتاور و سرعت دوران مفصل زانو تا حدودی از مفصل ران بیشتر هستند، تمامی تحلیل‌های ایمنی فقط روی مفصل زانو انجام شده‌اند.

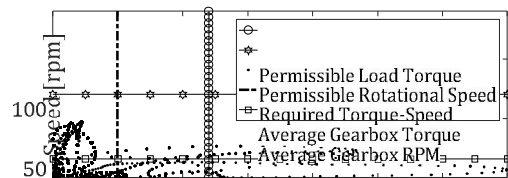
با توجه به اینکه جعبه‌دنده دارای مقداری نرمی ذاتی بوده و خود مجهز به یاتاقان بندی است، ضرایب سفتی k و اصطکاک ویسکوز \bar{b} جعبه‌دنده به همراه گشتاور اصطکاک کولمب \bar{c} آن در مدل دینامیک شکل ۷ در نظر گرفته شده‌اند. برای مدل کردن نرمی جعبه‌دنده، مدل جعبه‌دنده به صورت دو جسم صلب مجزا در نظر گرفته شده است که توسط فنری با نرمی معادل با نرمی جعبه‌دنده به هم متصل شده‌اند. مقادیر اینرسی و اصطکاک جعبه‌دنده به‌طور مساوی بین دو قسمت تقسیم شده است.

از طرفی موتور نیز به خاطر یاتاقان بندی خود دارای اصطکاک خشک و ویسکوز است که به‌صورت ضریب ویسکوز

انتخابی قابلیت تحمل این گشتاور را دارا است. شایان‌ذکر است که قسمتی از این گشتاور عرضی توسط اسکلت بدن کاربر تحمل می‌شود و در عمل گشتاور عرضی وارده بر جعبه‌دنده، کمتر از مقادیر جدول ۵ خواهد بود.



شکل ۵- نمودار گشتاور-سرعت جعبه‌دنده برای مفصل ران



شکل ۶- نمودار گشتاور-سرعت جعبه‌دنده برای مفصل زانو

جدول ۵- میزان گشتاور عرضی روی مفاصل انسان در انواع حرکت

| مفصل | حرکت | | | | |
|------|-----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| | راه رفتن معمولی | راه رفتن آهسته | پله بالا رفتن | پله پایین آمدن | بیشینه گشتاور |
| زانو | ۳۲ | ۳۱/۲ | ۲۸ | ۳۳/۶ | ۳۳/۶ |
| ران | ۶۵/۶ | ۶۷/۲ | ۴۹/۶ | ۸۲/۴ | ۸۲/۴ |

۴- تعیین سفتی فنر

دو معیار ایمنی محرک در شرایط کاری و پهنای باند مطلوب عملگر به‌منظور تعیین مقدار سفتی مناسب برای فنر انتخاب شده‌اند. معیار اول تعیین‌کننده بیشینه سفتی فنر به‌منظور جلوگیری از آسیب‌دیدگی اجزا محرک است. در معیار دوم بررسی می‌شود که با سفتی انتخاب شده در معیار اول، عملگر پاسخگوی پهنای باند موردنیاز در کلیه حرکت‌های انسان باشد.

نقطه، شرایط اولیه مدل به صورت رابطه‌های ۱۱ تا ۱۳ خواهد بود. $s\tau_{SS}$ و $s\omega_{SS}$ به ترتیب گشتاور و سرعت مفصل انسان در حرکت نشست و برخاست است.

$$M\theta = \frac{s\tau_{SS}}{Gk} + G2\theta \quad (11)$$

$$G2\theta = \frac{s\tau_{SS}}{sK} \quad (12)$$

$$M\dot{\theta} = G2\dot{\theta} = \frac{s\omega_{SS}}{R} \quad (13)$$

بیشترین میزان سرعت دوران مفصل در حالت راه رفتن فرد رخ می‌دهد؛ در نتیجه، در نقطه کاری دوم، سرعت و گشتاور موتور متناظر با نقطه بیشینه سرعت در سیکل راه رفتن در نظر گرفته می‌شود. در این نقطه، شرایط اولیه مدل به صورت رابطه‌های ۱۴ تا ۱۶ خواهد بود. $s\tau_{SW}$ و $s\omega_{SW}$ به ترتیب گشتاور و سرعت مفصل انسان در حرکت راه رفتن است.

$$M\theta = \frac{s\tau_{SW}}{Gk} + G2\theta \quad (14)$$

$$G2\theta = \frac{s\tau_{SW}}{sK} \quad (15)$$

$$M\dot{\theta} = G2\dot{\theta} = \frac{s\omega_{SW}}{R} \quad (16)$$

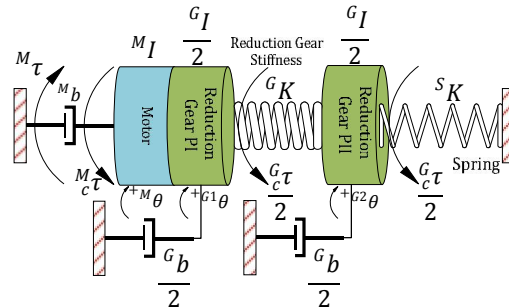
حال به ازای ضریب‌های سفتی مختلف برای فنر و با در نظر گرفتن شرایط اولیه ارائه شده در رابطه ۹ و رابطه ۱۰، بیشینه گشتاور ایجادشده در فنر پس از برخورد با محیط صلب محاسبه می‌شود. نمودار بیشینه گشتاور ایجاد شده در فنر برحسب میزان سفتی فنر، در نقاط کاری اول و دوم، به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است که در آن‌ها مرز بحرانی گشتاور برای جعبه‌دنده نیز با یک خطی افقی نشان داده شده است. محل تقاطع این خط با نمودار، تعیین‌کننده بیشینه میزان مجاز سفتی فنر برای هرکدام از نقاط کاری است.

از شکل ۸ و شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که از نقطه نظر ایمنی در برخورد با محیط صلب، بیشترین مقدار مجاز برای سفتی فنر برابر با ۲۷۵ نیوتن متر بر رادیان است.

۴-۲- حد پایین سفتی فنر بر مبنای پهنای باند

به منظور تعیین پهنای باند از مدل شماتیکی شکل ۱۰ جهت محاسبه استفاده می‌نماییم. پهنای باند سیستم را در حالتی که خروجی محرک قفل شده، بررسی می‌کنیم.

موتور $M\bar{b}$ و گشتاور اصطکاک کولمب $M\bar{c}$ در مدل شبیه‌سازی شده است. در شکل ۱۰، $M\theta = G1\theta$ نشان‌دهنده موقعیت زاویه‌ای محور موتور و قسمت اول جعبه‌دنده است که به طور صلب به هم متصل شده‌اند. $G2\theta$ زاویه قسمت دوم جعبه‌دنده است که به واسطه وجود نرمی در جعبه‌دنده، با زاویه قسمت اول متفاوت خواهد بود.



شکل ۷- مدل دینامیکی عملگر الاستیک سری در شرایط برخورد با مانع

معادلات حرکت سیستم دو درجه آزادی شکل ۷ را می‌توان به راحتی و به صورت روابط ۹ و ۱۰ استخراج کرد.

$$\left(MI + \frac{GI}{2}\right)M\ddot{\theta} = M\tau - M_b M\dot{\theta} - \frac{G_b}{2}M\dot{\theta} - \frac{G_c\tau}{2}\text{sign}(M\dot{\theta}) - M_{\tau_c}\text{sign}(M\dot{\theta}) - G_k(M\theta - G2\theta) \quad (9)$$

$$\frac{GI}{2}G2\ddot{\theta} = G_k(M\theta - G2\theta) - \frac{G_b}{2}G2\dot{\theta} - \frac{G_c\tau}{2}\text{sign}(G2\dot{\theta}) - sKG2\theta \quad (10)$$

با توجه به معادلات ۹ و ۱۰ و شکل ۷، هم سرعت دوران و هم گشتاور اعمالی موتور به طور مستقیم در بیشینه گشتاور ایجادشده در اثر برخورد تأثیرگذار هستند؛ بنابراین، مدل استخراج شده در دونقطه کاری بررسی می‌شود.

بیشترین میزان گشتاور کمکی در حرکت نشست و برخاست فرد رخ می‌دهد؛ در نتیجه، در نقطه کاری اول، سرعت و گشتاور موتور متناظر با نقطه بیشینه گشتاور در سیکل حرکت نشست و برخاست در نظر گرفته می‌شود. در این

با جایگذاری θ_m از معادله دوم در معادله فوق خواهیم داشت:

$$\frac{s\tau}{M\tau R} = \frac{sK}{(M\bar{I} + G\bar{I})R^2s^2 + (G\bar{b} + M\bar{b})R^2s + sK} \quad (20)$$

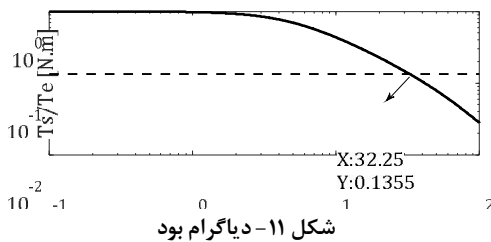
در شرایطی که بخواهیم پهنای باند را به ازای حداکثر گشتاور خروجی تعیین کنیم، لازم است، خاصیت نیروی محرکه الکتریکی به عقب^۱ که نوعی دمپینگ خطی بوده و ناشی از عدم توانایی تقویت‌کننده در تولید گشتاور زیاد است را به مدل فوق اضافه نماییم [۲۰]. τ_{sat} و ω_{sat} به ترتیب گشتاور ایستا، گشتاور و سرعت اشباع موتور است.

$$\frac{s\tau}{\tau_{sat}} = \frac{sK}{I_e s^2 + (b_e + \frac{\tau_{sat}}{\omega_{sat}})s + sK} \quad (21)$$

$$\tau_{sat} = \tau_{stall}R \quad (22)$$

$$\omega_{sat} = \frac{\omega_{no\ load}}{R} \quad (23)$$

با حل معادله فوق به ازای سرعت زاویه‌ای‌های مختلف، دیاگرام بود در شکل ۱۱ به دست می‌آید.



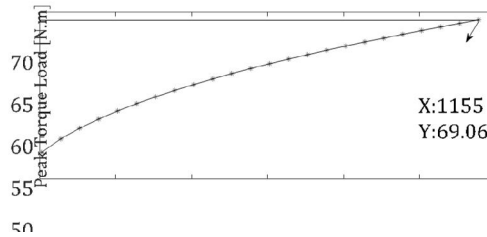
شکل ۱۱- دیاگرام بود

به‌منظور دستیابی به حداکثر گشتاور موردنیاز در خروجی محرک (۵۳ نیوتن متر) بایستی فرکانس محرک به‌اندازه باشد که از نسبت بین گشتاور خروجی و گشتاور اشباع موتور کمتر باشد، لذا خواهیم داشت:

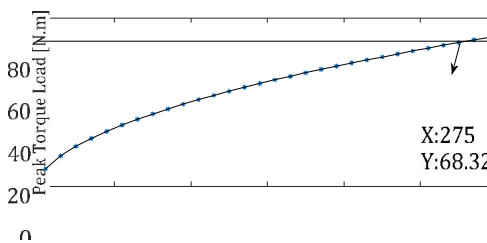
$$\frac{s\tau}{\tau_{sat}} = \frac{53\ N.m}{395.5\ N.m} = 0.1416 \quad (24)$$

که این مقدار به‌صورت خطی افقی در دیاگرام بد نمایش داده شده است. محل تقاطع این خط با نمودار تعیین‌کننده فرکانسی است که محرک می‌تواند خواسته کاربر را در انواع حرکت انسان تأمین کند.

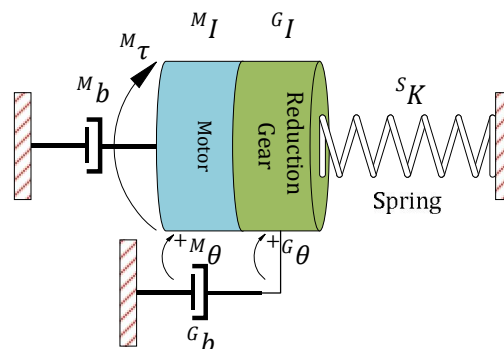
¹ Back Electromotive Force



شکل ۸- نمودار بیشینه گشتاور وارده بر جعبه دنده بر حسب میزان سفتی فنر در بحرانی‌ترین گشتاور حرکت نشست و برخاست انسان



شکل ۹- نمودار بیشینه گشتاور وارده بر جعبه دنده بر حسب میزان سفتی فنر در حرکت راه رفتن آهسته انسان



شکل ۱۰- مدل دینامیکی تعیین پهنای باند گشتاور

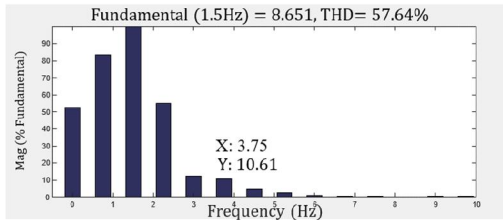
معادلات دینامیکی مدل شماتیکی دو درجه آزادی فوق به شرح ذیل است:

$$(M\bar{I} + G\bar{I})R^2M\ddot{\theta} = M\tau R - (G\bar{b} + M\bar{b})R^2M\dot{\theta} - sKM\theta \quad (17)$$

$$sKM\theta = s\tau \quad (18)$$

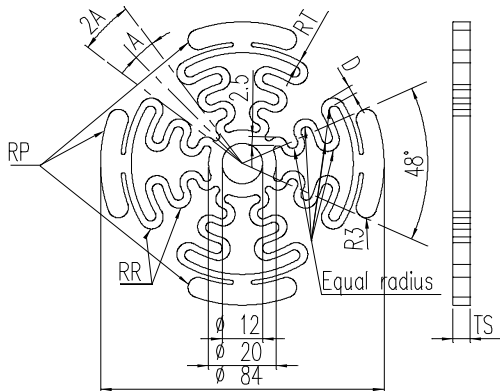
از حل لاپلاس معادله اول خواهیم داشت:

$$(M\bar{I} + G\bar{I})R^2s^2M\theta = M\tau R - (G\bar{b} + M\bar{b})R^2sM\theta - sKM\theta \quad (19)$$



شکل ۱۲- نمودار تبدیل سریع فوریه گشتاور در حرکت آهسته قدم زدن

به منظور ایجاد شکل فنری پیچشی از بهینه سازی شکلی استفاده گردید. در این مرحله مشخصه های قطعه را پارامتر در نظر گرفته و با استفاده از روش بهینه سازی تاگوچی، فضایی که هندسه قطعه بهینه بوده، کشف می شود. پارامترهای بهینه سازی شامل، (D, RT, A, ST, RR, RP) بوده که به ترتیب تعداد حلقه ها در محیط، تعداد حلقه های در شعاع، ضخامت فنر، زاویه بین حلقه ها، ضخامت حلقه ها در محیط و ضخامت حلقه ها در شعاع بوده که در شکل ۱۳ نشان داده شده و سطوح پارامترهای هر یک در جدول ۶ آورده شده است.



شکل ۱۳- پارامترهایی که برای شکل دهی اولیه بهینه سازی استفاده گردید

به منظور پیاده سازی بهینه سازی به روش تاگوچی از طرح آزمایش آرایه های متعامد L25 استفاده گردید.

توابع هدف در بهینه سازی شامل تنش و چرخش فنر است. قبل از شروع فرایند بهینه سازی، به دلیل هم بعد نبودن توابع هدف و اختلاف در توان نماد علمی، داده ها در جدول نرمال گردید. ضمناً با فرض خطی بودن رابطه بین تنش با

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{32.25 \frac{rad}{s}}{2\pi} = 5.13 \text{ Hz} \quad (25)$$

حال بایستی بررسی کنیم که در انواع حرکت انسان، فرکانس گشتاورهای موجود در ترکتوری کمتر از فرکانس به دست آمده از دیاگرام بود باشد. بدین منظور با استفاده از تابع تبدیل سریع فوریه^۱ فرکانس های انواع حرکت را استخراج کرده و بزرگترین فرکانسی که بیش از ده درصد سیکل حرکتی انسان را شامل شده با فرکانس مطلوب به دست آمده برای محرک مقایسه می کنیم. در صورتی که فرکانس حاصله از فرکانس مطلوب محرک پایین تر باشد، محرک قادر به پاسخگویی مناسب در کل سیکل حرکتی مورد نظر بوده و در غیر این صورت، بایستی اجزا سخت افزاری محرک را به منظور برآورده کردن خواسته های حرکتی انسان تعویض کرده و مجدداً بررسی کنیم. شکل ۱۲، نشان دهنده توابع تبدیل فوریه سریع انواع حرکت انسان می باشند که بزرگترین فرکانس کاری انسان که بیش از ۱۰ درصد کلی حرکتی سیکل را شامل شده در آن ها مشخص شده است. مطابق نمودار شکل ۱۲، هرگز بزرگترین فرکانسی بوده که بیش از ۱۰ درصد سیکل حرکتی را شامل شده که کوچکتر از فرکانس حاصله از دیاگرام بد (۵/۱۳ هرتز) است، لذا محرک بخوبی پاسخگو سیکل حرکت راه رفتن انسان هست.

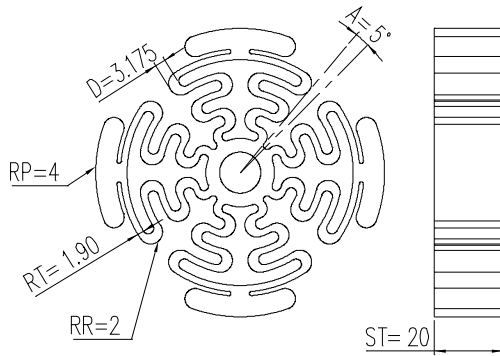
۵- طراحی فنر

شرایط اولیه در عملگر الاستیک سری شامل، سفتی و حداکثر گشتاوری بوده که در بحرانی ترین حرکت انسان بر آن وارد می شود که به ترتیب برابر با $S_K = 275 \frac{N.m}{Rad}$ و $\tau_{max} = 53 \text{ N.m}$ می باشند.

در صورتی که از فنر پیچشی خطی استفاده کنیم، بیشترین دفرمگی در بحرانی ترین وضعیت به صورت ذیل خواهد بود:

$$\theta_{max} = \frac{S \tau_{max}}{S_K} = \frac{53 \text{ N.m}}{275 \frac{N.m}{rad}} = 0.193 \text{ rad} = 11.04^\circ \quad (26)$$

¹ FFT (Fast Fourier Transform)



شکل ۱۴- مدل حاصل از محاسبات تاگوچی

همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده، خطای قابل توجهی بین نتایج مدل و نرم‌افزار تحلیل، وجود داشته که نشان‌دهنده تعامل بین پارامترها است؛ لذا از نمودارهای ANOVA برای بررسی تأثیر تعاملات بین پارامترها استفاده کرده و سطوحی متناسب با نمودارهای ANOVA استخراج می‌شود. نتایج استخراج شده از نمودارهای ANOVA، در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸- نتایج تحلیل ANOVA

| پارامتر | تنش | چرخش فنر |
|---------|-------|----------|
| | MPa | Degree |
| نتیجه | 276.9 | 1.5795 |

همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌گردد، با در نظر گرفتن تعاملات بین پارامترها و ارزیابی نتایج مدل با تحلیل المان محدود، سطوح به‌دست‌آمده از نمودارهای ANOVA، پاسخ مطلوبی دارند.

شکل ۱۵ نتیجه حاصل از انتخاب وزن یکسان به توابع هدف و متعاقباً سطوح بهینه پارامترها را نشان می‌دهد.

پس از نهایی کردن هندسه اولیه فنر، با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، ابعاد هندسه اولیه بهینه‌سازی می‌شود. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک چند هدفه^۱ نرم افزار ANSYS استفاده شده است. توابع هدفی که برای بهینه‌سازی استفاده شده شامل موارد ذیل است:

1 Multi Objective Genetic Algorithm (MOGA)

جدول ۶- سطوح پارامترهای شکل اولیه

| شرح پارامتر | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ | سطح ۴ | سطح ۵ |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| RP | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| RR | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| ST | 5 | 8.75 | 12.5 | 16.25 | 20 |
| A | 2 | 3.5 | 5 | 6.5 | 8 |
| RT | 0.5 | 0.65 | 0.8 | 0.95 | 1.1 |
| D | 1 | 1.725 | 2.45 | 3.175 | 3.9 |

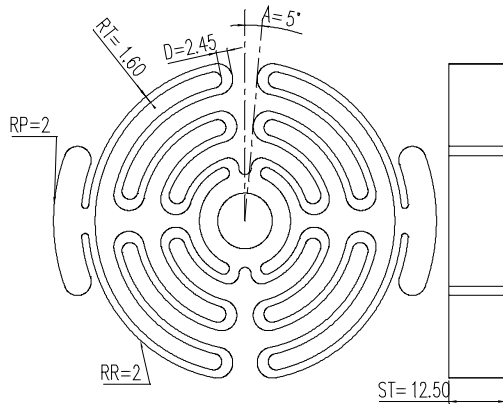
گشتاور اعمالی، تحلیل در نرم‌افزار با یک‌پنجم گشتاور واقعی در این مرحله از بهینه‌سازی انجام شد. این فرض می‌تواند از گسیختگی بین المان‌ها در طرح‌های آزمایش جلوگیری کند؛ لذا با توجه به اینکه هدف رسیدن به سفتی ۲۷۵ نیوتن متر بر رادیان بوده، چرخش به ازای یک‌پنجم گشتاور واقعی یعنی ۱۰ نیوتن متر با استفاده از معادله ۲۶، معادل ۲/۰۸ درجه در نظر گرفته شد. در تابع هزینه بجای چرخش فنر، اختلاف چرخش از زاویه هدف لحاظ گردید. تابع هزینه در بهینه‌سازی به‌صورت مجموع ضریبی از تنش (σ_{in}) و اختلاف چرخش از زاویه هدف ($\theta_T - \theta_i$) مطابق معادله ۲۷ تعریف شد.

$$C_f = 0.5\sigma_{in} + 0.5(\theta_T - \theta_i)_n \quad (27)$$

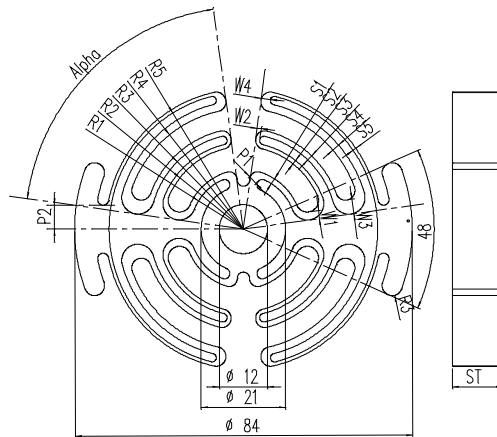
با تخصیص وزن یکسان به هر یک از توابع هدف و تحلیل در نرم‌افزار، بهترین سطوح با توجه به نمودارهای سیگنال به نویز استخراج می‌شود. به‌منظور صحت‌گذاری نتایج بهینه‌سازی، پاسخ سطوح به دست آمده از طریق مدل با نرم‌افزار تحلیل مقایسه گردید. شکل ۱۴ و متعاقباً جدول ۷، نشان‌دهنده سطوح بهینه به‌دست‌آمده از نمودارهای SN ratio و نتایج تحلیل نقاط بهینه است.

جدول ۷- ارزیابی میزان اختلاف بین مدل (بر اساس تحلیل SN Ratio) با نتایج آزمایش

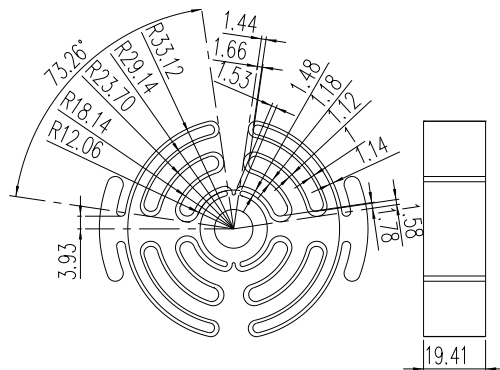
| پارامتر | تنش | چرخش فنر | SN Ratio |
|---------|------|----------|----------|
| | MPa | Degree | پیش‌بینی |
| نتیجه | 60.9 | 0.093 | 29.5677 |
| | | | 22.1562 |



شکل ۱۵- هندسه اولیه فنر حاصل از تحلیل ANOVA



شکل ۱۶- پارامترهای بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک



شکل ۱۷- هندسه نهایی فنر

۱- حداقل کردن تنش

۲- تغییر شکل فنر ۱۱/۰۴ درجه

با توجه به اینکه خواسته، کاهش تنش در فنر و درعین حال داشتن خاصیت فنری است، لذا این دو پارامتر به‌عنوان تابع هدف تعیین گردید.

پارامترهای هندسی که در رسیدن به ابعاد بهینه فنر لحاظ شده، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. بازه تغییرات هر یک از پارامترها نیز، به همراه واحد هر یک در جدول ۹ آمده است.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی در شکل ۱۷ و متعاقباً نتایج تحلیل در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۹- پارامترها به همراه بازه تغییرات در رویه

بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

| NO. | NAME | MIN. | MAX. | UNIT |
|-----|----------|------|------|--------|
| 1 | R1 | 11.8 | 14.4 | mm |
| 2 | R2 | 18 | 21 | mm |
| 3 | R3 | 23 | 25 | mm |
| 4 | R4 | 28 | 30 | mm |
| 5 | R5 | 33 | 34 | mm |
| 6 | S1 | 0.8 | 2 | mm |
| 7 | S2 | 0.8 | 2 | mm |
| 8 | S3 | 0.8 | 2 | mm |
| 9 | S4 | 0.8 | 2 | mm |
| 10 | S5 | 0.8 | 1.6 | mm |
| 11 | W1 | 1 | 6 | mm |
| 12 | W2 | 1 | 6 | mm |
| 13 | W3 | 1 | 6 | mm |
| 14 | W4 | 1 | 6 | mm |
| 15 | P1 | 1.5 | 6 | mm |
| 16 | P2 | 1.5 | 6 | mm |
| 17 | α | 50 | 82 | Degree |
| 18 | ST | 8 | 20 | mm |

- [7] Carpino G, Accoto D, Sergi F, Luigi N, Tagliamonte E, Guglielmelli (2012) A novel compact torsional spring for series elastic actuators for assistive wearable robots. *J Mech Design* 134(12); 121002-121002.
- [8] Lagoda C, Schouten AC, Stienen AHA, Hekman EEG, Kooij HVD (2010) Design of an electric series elastic actuated joint for robotic gait rehabilitation training. 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics 21-26.
- [9] Chen L, Ding H, Fu T, Li J, Shao L (2018) Design and impedance control of the integrated rotary compliant joint. *Adv Mech Eng*, Springer Singapore 1125-1140.
- [10] Byrvan H, Sugar T, Vanderborght B, Hollander K, Lefeber D (2009) Review of actuators with passive adjustable compliance/controllable stiffness for robotic applications. *Ieee Robot Autom Mag* 81-94.
- [11] Accoto D, Carpino G, Sergi F, Tagliamonte NL, Zollo L, Guglielmelli E (2013) Design and characterization of a novel high-power series elastic actuator for a lower limb robotic orthosis. *Int J Adv Robot Syst* 10(10): 359.
- [12] Taherifar A, Vossoughi G, Selk Ghafari A (2017) Identification and torque control of series elastic actuator of lower limb extremity exoskeleton. *Modares Mechanical Engineering* 17(8): 1-8. (in Persian)
- [13] dos Santos WM, Caurin GAP, Siqueira AAG (2017) Design and control of an active knee orthosis driven by a rotary series elastic actuator. *Control Eng Pract* 58: 307-318.
- [14] Paine N, Mehling Joshua S, Holley J, Radford A, Johnson NG, Fok CL, Sentis L (2015) Actuator control for the NASA-JSC valkyrie humanoid robot: A decoupled dynamics approach for torque control of series elastic robots. *J Field Robot* 32(3): 378-396.
- [15] Choi W, Won J, Lee J, Park J (2017) Low stiffness design and hysteresis compensation torque control of SEA for active exercise rehabilitation robots. *Auton Robot* 41(5): 1221-1242.
- [16] Bing C, Xuan Z, Hao M, Ling Q, Wei-Hsin L (2017) Design and characterization of a magneto-rheological series elastic actuator for a lower extremity exoskeleton. *Smart Mater Struct* 26(10): 105008.
- [17] Bovi G, Rabuffetti M, Mazzoleni P, Ferrarin M (2011) A multiple-task gait analysis approach: Kinematic, kinetic and EMG reference data for healthy young and adult subjects. *Gait Posture* 33(1): 6-13.

جدول ۱۰- نتایج تحلیل الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

| سفتی | چرخش فنر | تنش | |
|---------|----------|------|-------|
| N.m/rad | rad | MPa | |
| 275 | 0.193 | 1400 | نتیجه |

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله رویه‌ای برای طراحی و توسعه عملگرهای الاستیک سری با هدف استفاده در انواع ربات‌های پوشیدنی تجاری توسعه داده شد. ابتدا نیازهای سینماتیک و سینتیک انواعی از حرکت‌های انسان شامل، نشست و برخاست، پله بالا و پایین رفتن و راه رفتن آهسته به منظور انتخاب موتور و جعبه‌دنده استخراج گردید. سپس با دو معیار ایمنی اجزاء در حین برخوردها و پهنای باندی که قابلیت دنبال کردن حرکت مفاصل انسان را داشته باشد، سفتی مطلوب فنر انتخاب شد. با استفاده از دو روش بهینه‌سازی توپولوژی و بهینه‌سازی شکل در کنار استفاده از الگوریتم‌های هوشمند و روش تاگوچی، معماری فنر به دست آمد. مجدداً سینماتیک و سینتیک حرکت برای موتور و جعبه‌دنده‌ای که به فنر مجهز شده محاسبه گردید. نتایج نشان داد که اجزا سخت‌افزاری انتخابی قابلیت برآورده کردن نیازهای حرکتی انسان را دارا می‌باشند.

۷- مراجع

- [1] HAL Exoskeleton, Accessed on 22 December 2018; <https://www.cyberdyne.jp/english/>.
- [2] SuitX Exoskeleton, Accessed on 22 December 2018; <https://www.suitx.com/>.
- [3] Honda Exoskeleton, Accessed on 22 December 2018; <https://world.honda.com/Walking-Assist/>.
- [4] Kardan I, Akbarzadeh A (2017) Agility enhancement using an assistive controller for exoskeleton robots. *Modares Mechanical Engineering* 17(9): 119-129. (in Persian)
- [5] Irmscher C, Woschke E, May E, Daniel C (2018) Design, optimisation and testing of a compact, inexpensive elastic element for series elastic actuators. *Med Eng Phys* 52: 84-89.
- [6] Veneman JF, Ekkelenkamp R, Kruidhof R, van der Helm FCT, van der Kooij H (2006) A series elastic- and bowden-cable-based actuation system for use as torque actuator in exoskeleton-type robots. *Int J Robot Res* 25(3): 261-281.

[20] Au S, Berniker M, Herr H (2008) Powered ankle-foot prosthesis to assist level-ground and stair-descent gaits. *Neural Networks* 21(4): 654-666.

[18] Maxonmotor, Accessed on 22 December 2018; <https://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/index>.

[19] HarmonicDrive, Accessed on 22 December 2018; <http://www.harmonicdrive.net/>.