

## بهینه‌سازی ابعاد هندسی یک بازوی رباتیک چهاردرجه آزادی برای جابجا کردن محموله‌های سنگین

در مقاله حاضر طراحی سینماتیکی و بهینه‌سازی ابعادی هندسه یک بازوی رباتیک چهاردرجه آزادی (پالتایزر) انجام شده است. ابتدا هندسه اولیه با قابلیت حمل افقی بار طراحی شده است. سپس روی ابعاد هندسه‌ی سازه ربات بهینه‌سازی صورت گرفته و روش حل با استفاده از روش تحلیلی اعتبارسنجی شده است. بهینه‌سازی به نحوی صورت گرفته است که تغییرات ابعاد هندسی بازوها به عنوان پارامترهای طراحی، منتج به دریافت بهترین نتایج برای تابع هدف یعنی نیروهای مفصلی، تنش و تغییر شکل در بازوها و توزیع مناسب نیروی بار شود. با استفاده از روابط پارامتریک بدست آمده از نتایج بهینه‌سازی می‌توان مسیر کوتاه‌تری را برای طراحی ربات‌های مشابه طی نمود و به تبع آن با در اختیار داشتن هندسه‌ای بهینه، در طراحی‌های آتی می‌توان پارامترهایی همچون عدم افزایش ابعاد مقاطع بازوها برای غلبه بر تنش و تغییر شکل، عدم افزایش وزن کلی سازه و به دنبال آن افزایش دقت، تکرارپذیری، توان حمل بار بیشتر، چالاکی ربات و بزرگ نشدن ابعاد کلی را بهبود بخشید.

احمد رضا خوگر<sup>۱</sup>

دانشیار

ابراهیم ابوالقاسمی<sup>۲</sup>

کارشناسی ارشد

واژه های راهنما: بازوی رباتیک، بهینه‌سازی هندسی، المان محدود، مکانیزم متوازی الاضلاع

### ۱- مقدمه

بازوی‌های مکانیکی ماهر یکی از انواع متنوع ربات‌های طراحی شده در عصر حاضر می‌باشند که بیشتر در زمینه‌های صنعتی کاربرد دارند و از آنها در خطوط تولید کارخانجات جهت کارهای گوناگونی از جمله مونتاژ، جوشکاری، رنگ‌زنی، جابجایی، و غیره استفاده می‌شود. این بازوی‌ها به دو صورت عمده سریال و موازی رواج یافته‌اند. در ربات سریال که موضوع این مقاله نیز پیرامون آن می‌باشد، رابط‌ها به دنبال هم با اتصالات از زمین تا نقطه انتهایی به هم وصل می‌شوند. اینگونه ربات‌ها به خاطر گستردگی فضای کاری، مهارت و چالاکی آن‌ها مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرند. اما در عین حال سختی و تحمل بار بسیار محدودی دارند. لذا همواره محققین درصدد رفع این نقص و بهینه نمودن آن برآمده‌اند. از این رو مطالعات فراوانی در سال‌های اخیر در زمینه بهینه‌سازی و خصوصاً بهینه‌سازی هندسی این ربات‌ها صورت گرفته است. به منظور دریافت جامع‌تر از روش‌های بهینه‌سازی هندسی بکاررفته توسط محققین، موارد ذیل سه دسته‌بندی بررسی می‌گردد.

۱- دسته‌بندی اول شامل مطالعاتی می‌شود که در آن بهینه‌سازی پارامترهای هندسی با رویکرد بهبود خروجی‌های سینماتیکی و عملکردی نظیر مسیر حرکتی ربات، فضای کاری، سرعت، شتاب و غیره صورت گرفته

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، مجتمع مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران khoogar@mut.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، مجتمع مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران Ebrahim\_vv2@mut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

است. در همین راستا Sapietova و همکاران [۱] یک الگوریتم بهینه‌سازی را برای طراحی سیستم‌های رباتیک ارائه داده‌اند که در آن از ترکیب دو نرم‌افزار آدامز و متلب به جهت بهینه‌سازی بهره برده شده است. بهینه‌سازی صورت گرفته روی مسیر حرکتی و کنترل ربات بهبود ایجاد نموده است. در این بهینه‌سازی اگرچه در هندسه ربات تغییراتی ایجاد نموده اما بنای بهینه‌سازی مسیر حرکتی و پارامترهای کنترلی ربات بوده است.

Wei و Zhang [۲] در مقاله خود روی جزییات تحلیل سینماتیکی یک ربات دلتا مطالعه انجام داده‌اند و پس از بدست آوردن معادلات سینماتیکی و تعریف مدل ریاضی هندسه ربات با استفاده از کدنویسی صورت گرفته، مقادیر هندسی بهینه برای بازوهای ربات را بر مبنای چگونگی فضای کاری ربات، بدست آورده‌اند. Ge و همکاران [۳] طراحی بهینه‌ی هندسه‌ی سازه‌ی ربات را در تناسب با تجهیزات حرکتی یک ربات صنعتی از قبیل موتور و گیربکس و بر مبنای فضای کاری و همچنین زمان کاری ربات مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار داده‌اند. در دسته‌بندی دوم مقالاتی می‌باشند که بهینه‌سازی پارامترهای هندسی هر لینک ربات را به صورت جداگانه به همراه تمامی جزییات مکانیکی آن از قبیل خلل و فرج سبک‌سازی، محل نصب تجهیزات حرکتی و غیره با رویکرد بهبود خواص مکانیکی از جمله وزن، سفتی، دقت، تکرارپذیری، تغییر شکل، تنش و غیره بررسی و بهینه‌سازی نموده‌اند. مقاله Luo و همکاران [۴] طراحی بهینه‌ی سازه‌ی یک ربات جوشکار را با استفاده از روش المان محدود انجام داده‌اند. در این مقاله پس از تعریف مدل ریاضی و شرایط نیرویی سیستم، با در نظر گرفتن مشخصه‌های دینامیکی و استاتیکی، بهینه‌سازی صورت گرفته است که ماحصل آن بهبود وزن، بهبود توزیع جرم و افزایش سفتی بازوها می‌باشد. در مقاله Liang, M و همکاران [۵] نیز بهینه‌سازی دینامیکی صورت گرفته به روش المان محدود و بر مبنای استفاده از مکانیزم فنرهای پیچشی در مفاصل ربات صورت گرفته است. Denkena و همکاران [۶] روی طراحی و بهینه‌سازی یک ربات براده برداری مطالعاتی انجام داده‌اند. در این مقاله چالش اصلی ربات سفتی‌های پایین می‌باشد که منجر به عدم دقت در موقعیت‌دهی مجری نهایی خواهد شد. برای بهبود این نقص به بررسی سازه‌ی ربات پرداخته شده است و پس از بدست آوردن معادلات سینماتیکی بر روی سفتی استاتیکی و دینامیکی بهینه‌سازی صورت گرفته است و به دنبال آن بازوی اصلی ربات از نظر هندسی بازطراحی شده است.

در مقاله Wang و همکاران [۷] از روش بهینه‌سازی به وسیله شبکه عصبی برای بهبود دقت در جابجایی بارهای سنگین با استفاده از شاخصه‌های هندسی ربات بهره برده شده است. همچنین می‌توان از مقاله Raza و همکاران [۸] نام برد که مبنای بهینه‌سازی با استفاده از روش المان محدود و بر اساس تحلیل دینامیکی ربات و همچنین پارامترهای هندسی مدل ربات صورت گرفته است. در این مقاله بهینه‌سازی مشخصا بر روی هر لینک به صورت جداگانه و با جزییات هر لینک انجام شده است. He و همکاران [۹] طراحی بهینه جزییات مجری نهایی یک ربات سرعت بالا برای جابجایی‌های سنگین را در مقاله خود دنبال نموده است. در این مقاله فقط مجری نهایی ربات به روش المان محدود تحت بررسی‌های فرکانس، مواد مورد استفاده برای ساخت، تغییر شکل و تنش در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی قرار گرفته است. Hsiao و همکاران [۱۰] مطالعه بسیار خوبی روی بهینه‌سازی شکل و ابعاد هندسی بازوها در تناسب با وزن، اینرسی و تغییر شکل انجام داده‌اند. در این مقاله با مدل‌سازی هر بازو و تعریف پارامتریک هندسه‌ی آن، در ابتدا با استفاده از روش المان محدود این مقادیر را بهینه‌سازی اولیه نموده‌اند سپس با استفاده از یک روش جدید تکاملی کدنویسی، مقادیر بدست آمده

را به روش‌هایی نظیر وزن‌دهی به مقادیر حیاتی بار دیگر بهینه‌سازی نموده و نهایتاً نتایج مراحل بهینه‌سازی را با هم مقایسه نموده و مقدار بهینه‌ی هر پارامتر را انتخاب نموده‌اند.

۳- دسته‌بندی سوم نیز شامل مطالعاتی می‌شود که بهینه‌سازی‌های پارامترهای هندسی بر روی هندسه‌ی یک ربات صنعتی از پیش‌ساخته شده انجام شده و در آن یا از یکی از دو روش بالا به جهت بهینه‌سازی استفاده شده یا برای کاربردی خاص، روی پارامترهای هندسی ربات بهینه‌سازی صورت گرفته است. در این زمینه Liang و همکاران [۱۱] در مطالعات خود یک روش بهینه‌سازی برای سازه‌ی ربات‌هایی که وزن‌های بالا را با سرعت بالا جابجا می‌کنند بر مبنای آنالیز مشخصه‌های دینامیکی ارایه داده‌اند. در این مقاله از روش مدل‌سازی دینامیکی برای بهبود فرکانس طبیعی، سفتی و سرعت استفاده شده است. بهینه‌سازی صورت‌گرفته در این مقاله بر مبنای یک ربات صنعتی از پیش ساخته شده و با ساده‌سازی‌های هندسی انجام شده است. در ادامه می‌توان به مقاله Udameeshi و همکاران [۱۲] اشاره نمود. در این مقاله با استفاده از روش المان محدود، سازه‌ی یک ربات بسته‌بندی که از نوع پیش‌ساخته صنعتی بوده است و فرکانس کاری آن عامل مخرب جهت عملکرد مطلوب ربات بوده است، تحلیل صورت‌گرفته است.

همان‌طور که پیش‌تر مشاهده گردید، اکثر بهینه‌سازی‌های هندسی انجام شده یا به مانند دسته اول با رویکرد خروجی‌های سینماتیکی و عملکردی ربات انجام شده است و یا مانند دسته دوم و سوم بر روی جزئیات بازوهای ربات با نگاه به اهداف مکانیکی بهینه‌سازی صورت‌گرفته است. نکته دوم پیچیدگی و طولانی‌بودن روند بهینه‌سازی و بعضاً عدم امکان تعمیم روش بهینه‌سازی برای سایر کارهای مشابه می‌باشد. به عنوان نکته سوم می‌توان گفت بهینه‌سازی‌های هندسی صورت‌گرفته در اکثر موارد در مرحله‌ای انجام شده است که ساختار کلی هندسه ربات شکل گرفته است. در مقاله حاضر با استفاده از روش المان محدود که در برخی از مقالات نیز از این روش استفاده شده است، پیش از طراحی جزئیات هندسی بازوها و بر روی هندسه کلی و اولیه سازه ربات بهینه‌سازی صورت گرفته است. با این روش می‌توان روابط هندسی بین بازوها و تاثیر هر یک بر روی مشخصات مکانیکی سازه ربات را بهینه‌سازی نمود و از اعمال مناسب شرایط مرزی و نیروهای تکیه‌گاهی و مفصلی در یک مرحله قبل از طراحی جزئیات بازوها، اطمینان حاصل نمود. همچنین با استفاده از روابط پارامتریک بدست آمده از نتایج بهینه‌سازی هندسی، می‌توان هندسه‌ی اولیه سازه ربات‌های مشابه را به سادگی و در مدت زمانی کوتاه در حالتی بهینه طراحی نمود و روند طراحی را برای مراحل بعدی مانند طراحی جزئیات ربات تسهیل نمود.

## ۲- طراحی هندسه ربات

برای شروع طراحی هندسه ربات می‌بایست ورودی‌های مساله تعیین گردد. چرا که این عوامل می‌تواند روی روند طراحی اثرگذار و بعضاً جزء نیازمندی‌های طرح محسوب گردد. به همین منظور در ادامه ورودی‌های مساله بیان شده است.

۱- **حمل افقی بار:** به جهت دست یافتن به ویژگی‌های یک ربات پالتایزر و ایجاد قابلیت جابجا کردن افقی قطعات، می‌بایست درجه آزادی مناسب برای دستیابی به این منظور، چهاردرجه آزادی انتخاب گردد.

۲- **بیشترین میزان دسترسی (a):** هندسه لینک‌های ربات باید طوری طراحی شود که ربات بتواند فضای کاری در نظر گرفته شده را تامین نماید. لازم به ذکر است این پارامتر یک ورودی هندسی بوده و سایر پارامترهای هندسی بر اساس روابطی که با پارامتر  $a$  دارند، بدست خواهند آمد.

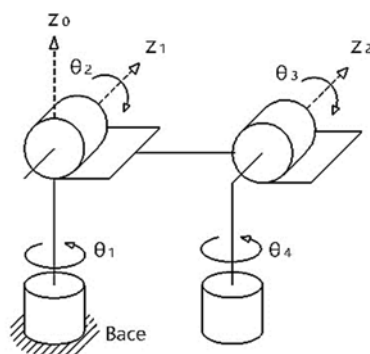
۳- **حداکثر بار مجاز:** بیشترین باری که ربات می‌تواند جابه‌جا کند ۱۸۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. در طراحی هندسه باید علاوه بر تامین ورودی‌های مساله، توان جابجا کردن اجسام سنگین با دقت و سرعت مناسب را نیز در نظر داشت.

ابتدا می‌بایست قسمت سری ربات طراحی شود. یک بازوی مکانیکی ماهر از لینک‌هایی تشکیل شده است که با مفصل به هم وصل می‌شوند تا یک زنجیره سینماتیکی را تشکیل دهند. چیدمان سینماتیکی که برای هندسه قسمت سری، متناسب با کارکرد ربات انتخاب شده است نوع Articulate (RRR) که ربات بندبند، آرنجی و همچنین آنتروپومورفیک نیز نامیده می‌شود، در اینجا در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) ساختار شماتیک یک بازوی مکانیکی چهاردرجه آزادی نشان داده شده است [۱۳].

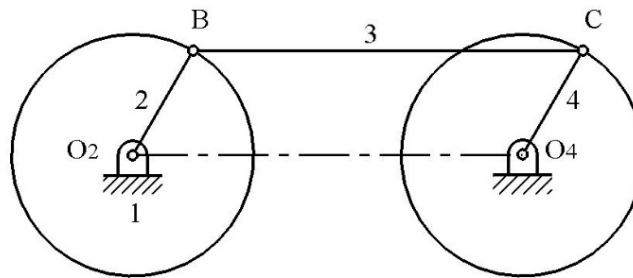
### ۳- ایجاد پیوند متوازی الاضلاع

تا این مرحله ساختار بازوهای اصلی ربات مشخص شده است. در ادامه برای اضافه نمودن بازوهای دیگر و ایجاد ساختار مورد نظر، می‌بایست لینک‌هایی به موازات بازوهای اصلی ربات به سازه‌ی زنجیره سینماتیکی اضافه گردد. نکته مهمی که باید در این ترکیب لحاظ شود، قرارگیری افقی مجری نهایی ربات است تا بتواند بار را به صورت مناسب و صحیح جابجا نماید. این امر به کمک ایجاد لینک‌هایی موازی با بازوهای اصلی صورت می‌پذیرد. این لینک‌های موازی به ربات کمک می‌کنند که بتواند وزن بیشتری را همواره به صورت افقی حمل نماید. این اتفاق به کمک هندسه متوازی الاضلاع (parallelogram) ایجاد می‌شود.

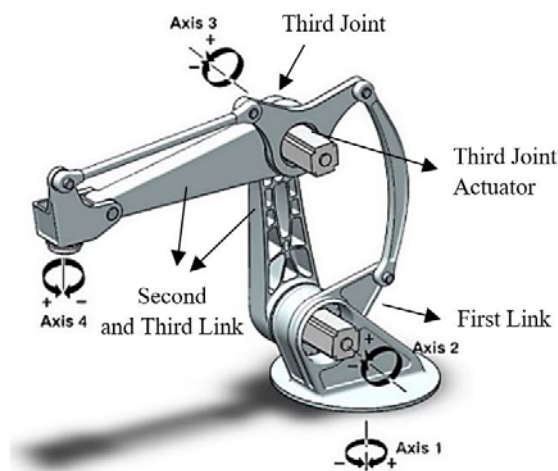
یکی از انواع مکانیزم چهارمیله‌ای نوع متوازی الاضلاع آن می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است. اگر لنگ‌های ۲ و ۴ دارای طول‌های مساوی بود و طول میله رابط ۳ برابر خط‌المركزین  $O_2O_4$  باشد. در این حالت مکانیزم متوازی الاضلاع برقرار است. در این مکانیزم لنگ‌های ۲ و ۴ دارای سرعت‌های زاویه‌ای یکسان می‌باشند.



شکل ۲- شماتیک ساختار ربات



شکل ۳- مکانیزم چهار میله‌ای با لنگ‌های موازی



شکل ۴- ربات با پیوند متوازی الاضلاعی

با اضافه کردن لینک‌های موازی، ربات از یک ربات آرنجی به یک ربات با پیوند متوازی‌الاضلاعی تبدیل خواهد شد. ربات با پیوند متوازی‌الاضلاعی از پیوند آرنجی مهارت کمتری دارد یعنی به هر موقعیتی در فضای نمی‌تواند دست پیدا کند. اما مزیت‌های زیر که برای هدف این پروژه بسیار مطلوب به نظر می‌رسد را به ارمغان خواهد آورد.

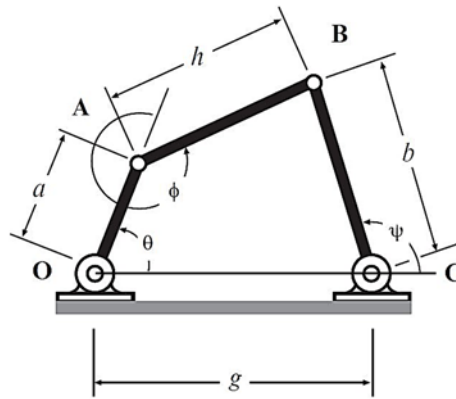
۱- محرک مفصل سه بر روی لینک یک قرار دارد، بنابراین لینک‌های دو و سه را می‌توان سبک‌تر طراحی نمود. در شکل (۴) یک نمونه ربات با پیوند متوازی‌الاضلاعی نشان داده شده است.

۲- به خاطر مزیت قرارگیری محرک مفصل سه بر روی لینک یک، می‌توان موتورها را با قدرت پایین‌تر انتخاب کرد و در نتیجه به وزن سبک‌تری دست یافت.

۳- دینامیک ربات با پیوند متوازی‌الاضلاعی نسبت به پیوند آرنجی ساده‌تر است.

۴- کنترل راحت‌تر در نتیجه دینامیک ساده‌تر خواهد داشت.

از دیگر ویژگی مکانیزم متوازی‌الاضلاع این است که میزان ورودی و خروجی با یکدیگر برابر است. بر اساس شکل (۵) و با استفاده از روابط ۱ الی ۱۴ می‌توان این اصل را اثبات کرد و از آن در طراحی مکانیزم ربات استفاده نمود. روابط زیر بر اساس یک مکانیزم چهارمیله‌ای و به صورت کلی بیان شده است.



شکل ۵- مکانیزم چهار میله‌ای

$$(B - A) \cdot (B - A) - h^2 = 0 \quad (1)$$

$$A = \begin{Bmatrix} a \cos \theta \\ a \sin \theta \end{Bmatrix} \quad B = \begin{Bmatrix} g + b \cos \psi \\ b \sin \psi \end{Bmatrix} \quad (2)$$

با جایگزینی روابط بالا رابطه زیر بدست می‌آید.

$$b^2 + g^2 + 2gb \cos \psi + a^2 - 2(a \cos \theta)(g + b \cos \psi) - 2ab \sin \theta \sin \psi - h^2 = 0 \quad (3)$$

با فاکتورگیری و جمع آوری ضرایب خواهیم داشت

$$C(\theta) \cos \psi + D(\theta) \sin \psi = E(\theta) \quad (4)$$

$$C(\theta) = 2ab \cos \theta - 2gb \quad (5)$$

$$D(\theta) = 2ab \sin \theta \quad (6)$$

$$E(\theta) = g^2 + b^2 + a^2 + h^2 - 2ag \cos \theta \quad (7)$$

با حل معادله بالا خواهیم داشت:

$$\psi(\theta) = \arctan\left(\frac{D}{C}\right) \pm \arccos\left(\frac{E}{\sqrt{C^2 + D^2}}\right) \quad (8)$$

با استفاده از این رابطه می‌توان با دانستن زاویه ورودی و سایر پارامترها زاویه خروجی را بدست آورد. همچنین با استفاده از روابط زیر نیز می‌توان زاویه لینک رابط را نیز بدست آورد.

$$B = \begin{Bmatrix} a \cos \theta + h \cos(\theta + \phi) \\ a \sin \theta + h \sin(\theta + \phi) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$a \cos \theta + h \cos(\theta + \phi) = g + b \cos \psi \quad (10)$$

$$a \sin \theta + h \sin(\theta + \phi) = b \sin \psi \quad (11)$$

$$\cos(\theta + \phi) = \frac{g + b \cos \psi - a \cos \theta}{h} \quad (12)$$

$$\sin(\theta + \phi) = \frac{b \sin \psi - a \sin \theta}{h} \quad (13)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{b \sin \psi - a \sin \theta}{g + b \cos \psi - a \cos \theta}\right) - \theta \quad (14)$$

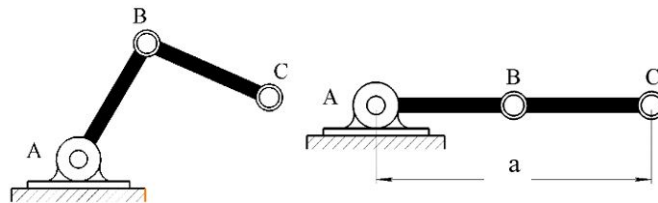
با استفاده از روابط بالا برای مکانیزم متوازی الاضلاع، و جاگذاری یک زاویه دلخواه برای زاویه لینک ورودی، مشاهده می‌شود که زاویه خروجی همواره برابر مقدار زاویه ورودی بدست خواهد آمد و همچنین لینک رابط همواره افقی قرار خواهد گرفت. در ربات‌های دارای مکانیزم متوازی الاضلاع به دلیل آن که بیشتر برای جابه‌جایی قطعات استفاده می‌شوند، مجری نهایی همواره می‌بایست به صورت افقی قرارگیرد. در رباتی که در این پروژه بررسی خواهد گردید این خاصیت را می‌توان با ترکیب دو مکانیزم متوازی الاضلاع برقرار نمود.

#### ۴- طراحی اولیه سازه ربات

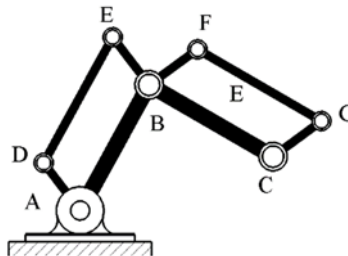
همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن مواردی که به عنوان ورودی مساله بیان شد و همچنین خاصیت‌های مکانیزم متوازی الاضلاع، اقدام به طراحی هندسه اولیه می‌شود. ابتدا بازوهای اصلی ربات ترسیم می‌شود. این بازوها به نحوی ایجاد شده‌اند که طول بازوی AB برابر طول بازوی BC باشد و بتوانند ورودی بیشترین طول بازشوندگی (a) را تامین نمایند.

$$AB = \frac{1}{2}a \quad (۱۵)$$

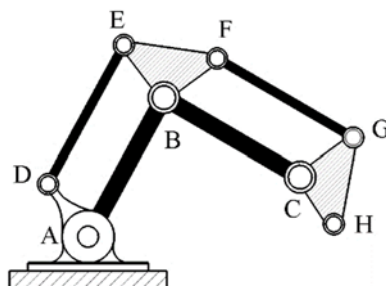
در ادامه بازوهای کمکی به هندسه اضافه می‌شوند. با توجه به مطالبی که پیرامون مکانیزم متوازی الاضلاع گفته شد، این لینک‌ها باید به صورتی قرارگیرند که با بازوهای اصلی موازی باشند تا بتوان مکانیزم متوازی الاضلاع را ایجاد نمود. طول لینک‌های AD, BE, BF, CG به صورت تقریبی در نظر گرفته می‌شود سپس در مرحله بهینه‌سازی، نقطه طراحی و روابط آن با سایر پارامترها بدست خواهد آمد.



شکل ۶- هندسه اولیه ربات



شکل ۷- استفاده از مکانیزم متوازی الاضلاع در هندسه مکانیزم

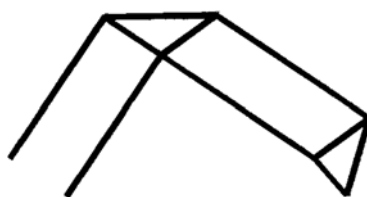


شکل ۸- هندسه تکمیل شده

پس از اضافه کردن لینک‌های موازی می‌بایست با ترکیب دو پیوند متوازی‌الاضلاع ایجاد شده، زنجیره‌ای را تشکیل داد که بتواند شرایطی را مهیا کند که مجری نهایی همواره به صورت افقی قرار گیرد و همچنین بخشی از نیروی وارده به پایه ربات انتقال داده شود. در نتیجه ربات بتواند بار بیشتری را حمل کند. برای این کار دو هندسه متوازی‌الاضلاع ایجاد شده، با اضافه کردن لینک‌های کمکی به یکدیگر متصل می‌شود و همین‌طور یک هندسه جدید به عنوان مجری نهایی اضافه می‌گردد. هندسه‌های مثلثی شکل ایجاد شده به دلیل آنکه همواره دارای زوایای ثابت نسبت به یکدیگر هستند، می‌توان به صورت یک لینک یک تکه در نظر گرفت. به مانند لینک‌های پیوند متوازی‌الاضلاعی که در بالا گفته شد، طول لینک‌های BF و EF که منتج از زوایای BEF, BFE و CGH به صورت تقریبی در نظر گرفته می‌شود سپس در مرحله بهینه‌سازی، زاویه طراحی و روابط آن با سایر پارامترها بدست خواهد آمد. هندسه تکمیل شده در شکل (۸) نشان داده شده است. ابعاد و زوایای هندسه‌های ایجاد شده در کارایی ربات بسیار موثر خواهند بود. بنابراین در قسمت بعد این موضوع به طور دقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا بتوان روابط نقاط طراحی را در یک حالت بهینه بدست آورد.

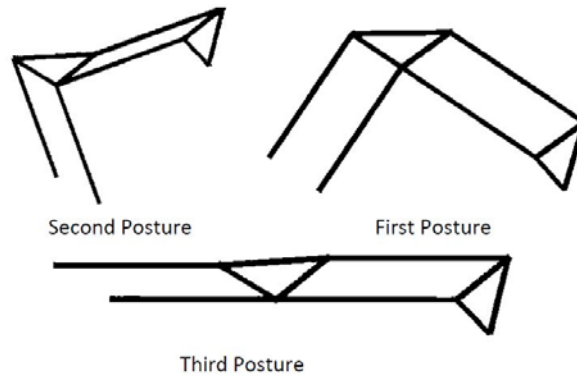
## ۵- سازه خرپایی ربات

در این تحلیل ربات به صورت یک سازه خرپایی در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود مقاطع تمامی بازوها با هم برابر است و یک نیروی ۱۸۰ کیلوگرمی در محل مجری نهایی به ربات وارد می‌شود. با این تحلیل علاوه بر آن که قسمت‌های پرتنش ربات مشخص خواهد شد، می‌توان خیز کلی ربات را به صورت تقریبی بدست آورد. پس از بدست آوردن این مقادیر، می‌توان با بهینه‌سازی، هندسه را به شکلی تغییر داد که مقادیر تنش و تغییر شکل، تا حد اکثر ممکن کاهش یابد. مدل خرپای ربات در شکل (۹) مشاهده می‌شود.



شکل ۹- ساختار ربات بر مبنای خرپا





شکل ۱۰- سه حالت در نظر گرفته شده برای تحلیل خرابای ربات

برای انجام تحلیل استاتیک، با توجه به نحوه عملکرد ربات و قرارگیری در حالات مختلف فشاری و کششی، سه حالت کلی که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، در نظر گرفته می‌شود و بهینه‌سازی هندسی با توجه به این سه حالت انجام می‌شود.

**حالت یک:** حالتی نزدیک به شروع به کار ربات در نظر گرفته می‌شود. در این حالت تعدادی از بازوها فشاری و تعدادی دیگر کششی هستند و مرکز جرم نزدیک تکیه‌گاه قرار می‌گیرد.

**حالت دو:** در این حالت ربات در میانه مسیر قرار دارد. تمامی بازوها تحت کشش قرار دارند و مرکز جرم از تکیه‌گاه دورتر شده است.

**حالت سه:** در حالت سوم ربات در بحرانی‌ترین حالت کاری یعنی در حالت بیشترین طول بازشوندگی خود قرار دارد. مرکز جرم و بار، بیشترین گشتاور را بر مفصل‌ها اعمال می‌کند.

## ۶- تعیین پارامترهای بهینه‌سازی

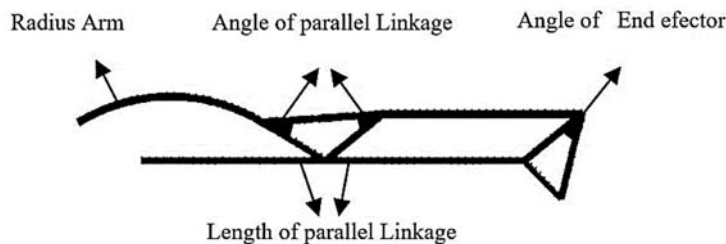
برای انجام بهینه‌سازی می‌بایست سه فاکتور پارامترهای طراحی، تابع هدف و قیود طراحی را مشخص نمود. ابعاد و زاویه‌هایی که تغییرات آنها می‌تواند تنش و تغییر شکل را کنترل کند را به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته می‌شود. چهار پارامتر شکل (۱۱) نیز به عنوان پارامترهای طراحی انتخاب شده‌اند.

۱- شعاع بازوی یک: با توجه به موقعیت قرارگیری پایه ربات و به جهت افزایش فضای کاری، می‌توان بازوی یک را به صورت کمانی در نظر گرفت تا در صورت قرارگیری به صورت افقی و به مانند شکل (۱۱)، بتوان تداخل بازوی یک با پایه ربات را حذف کرد و از کاهش فضای کاری جلوگیری نمود.

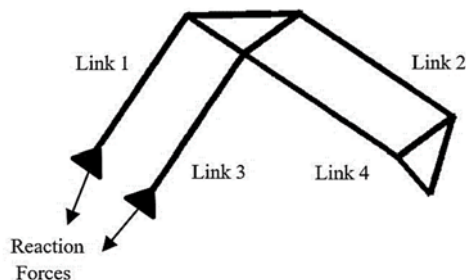
۲- طول ضلع کوچکتر پیوند متوازی الاضلاع

۳- زاویه اضلاع پیوند متوازی الاضلاع

۴- زاویه اضلاع لچکی مجری نهایی



شکل ۱۱- پارامترهای طراحی



شکل ۱۲- نام گذاری بازوهای ربات

تنش و تغییر شکل بازوهای ربات تحت تاثیر پارامترهای طراحی که پیش تر بیان شد دچار تغییر خواهند شد. از آنجا که مقادیر توابع تنش و تغییر شکل بازوها ملاک بهینه سازی مساله خواهند بود، به عنوان تابع هدف انتخاب گردید. کاهش هرچه بیشتر مقادیر بدست آمده از تابع هدف برای پارامترهایی که در ادامه بیان شده است و در شکل (۱۲) نیز مشاهده می شود به عنوان قیود طراحی در نظر گرفته شده است. البته باید توجه داشت این کاهش مقادیر، روی هندسه ربات و ورودی های مساله تاثیر نامطلوب نداشته باشد.

۱- خیز سازه

۲- نیروی محوری بازوهای (۱)، (۲)، (۳)، (۴)

۳- عکس العمل تکیه گاه های (۱)، (۲)

پس از تعیین ورودی و خروجی های بهینه سازی، هر یک از این مقادیر در سه حالت کلی در نظر گرفته شده، تحت افزایش و کاهش مقادیر قرار می گیرند و نتایج خروجی ها ثبت می شود. سپس مقداری که بتواند خواسته های پروژه را در بیشترین حالت ممکن ارضا نماید به عنوان نقطه ی طراحی انتخاب می شود و روابط بین مقادیر بدست آمده با سایر پارامترها به عنوان روابطی کلی برای طراحی در نظر گرفته می شوند. تمامی این مراحل برای ورودی های ذکر شده در سه حالت ممکن در قالب نمودار بیان شده است و نقطه ی طراحی برای هر پارامتر بدست آورده شده است.

## ۷- اعتبارسنجی روش حل مساله

با توجه به آنکه در ادامه از روش المان محدود برای بهینه سازی مساله استفاده شده است، لازم است پیش از شروع حل مساله به این روش از صحت روش مورد استفاده در تعیین شرایط مرزی در مواردی همچون شرایط

نیرویی و تکیه‌گاهی اطمینان حاصل نمود. به همین منظور با استفاده از یک هندسه ساده شده از مساله به صورت یک ربات سریال دو لینکی و تعریف شرایط مرزی مشابه ربات موردنظر، به دو روش تحلیلی و المان محدود، مساله حل شده و در نهایت پاسخ‌های بدست آمده با هم مقایسه شده است. در شکل زیر ربات سریال دو لینکی مورد نظر نشان داده شده است. در این مساله به جهت تقریب شرایط مرزی فرض می‌شود همانند شکل (۱۳) یک نیروی خارجی در انتهای بازوی دوم ربات اعمال شده و هدف تعیین شرایط نیرویی در مفصل اول ربات می‌باشد.

### ۷-۱- معادلات حاکم

برای بررسی نیروهای مفصلی در حالت استاتیکی، می‌بایست همه مفصل‌ها را قفل کرده تا ربات به صورت یک سازه درآید. سپس هر بازو جداگانه بررسی می‌شود و روابط تعادل نیرو و گشتاور را نسبت به چهارچوب‌های بازو، نوشته می‌شود. سرانجام نیروی استاتیکی را که باید حول محور مفصلی وارد شود تا در بازوی مکانیکی ماهر تعادل استاتیکی ایجاد کند، محاسبه خواهد شد. به این ترتیب، نیروهای مفصلی لازم به دست می‌آید. اگر کار را با توصیف نیرو و گشتاور اعمال شده به مجری نهایی شروع شود، می‌توان نیرو و گشتاور ایجاد شده در هر مفصل را از آخرین مفصل به دست آورد.

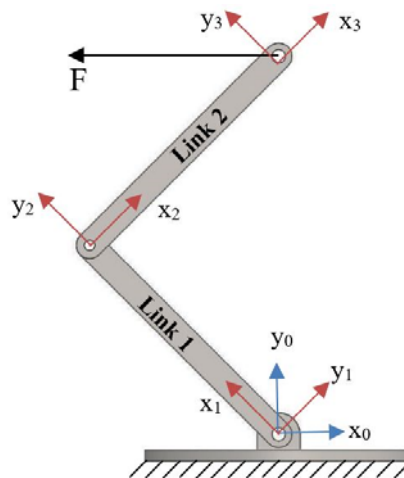
$${}^i f_i - {}^i f_{i+1} = 0 \quad (16)$$

$${}^i n_i = {}^i n_{i+1} - {}^i p_{i+1} \times {}^i f_{i+1} \quad (17)$$

برای نوشتن این معادله‌ها بر حسب فقط نیروها و گشتاورهای تعریف شده در محدوده چهارچوب رابط خودشان، آن‌ها را به وسیله ماتریس دوران توصیف کننده چهارچوب  $\{i+1\}$  نسبت به چهارچوب  $\{i\}$ ، تبدیل می‌شوند. این امر، به مهمترین نتیجه درباره اشاعه نیروهای استاتیکی از یک رابط به رابط دیگر، منتج می‌گردد.

$${}^i f_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} \quad (18)$$

$${}^i n_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} n_{i+1} + {}^i p_{i+1} \times {}^i f_i \quad (19)$$



شکل ۱۳- نمودارهای بهینه‌سازی طول بازوی یک

همه مولفه‌های بردارهای نیرو و گشتاور، بجز گشتاور حول محور مفصلی، به وسیله سازه‌ی خود مکانیزم خنثی می‌شوند. پس برای پیدا کردن گشتاور مفصلی لازم برای ایجاد تعادل استاتیکی، باید ضرب داخلی بردار محور مفصلی در بردار گشتاور وارد بر رابط، را محاسبه کرد.

$$\tau_i = {}^i n_i^T {}^i Z_i \quad (20)$$

معادله‌های بالا محاسبه گشتاورهای مفصلی لازم برای اعمال هرگونه نیرو یا گشتاور به وسیله مجری نهایی روبات در حالت استاتیکی، را امکان پذیر می‌کند. بر اساس آنچه در بالا گفته شد می‌توان نیرو و گشتاور ایجاد شده در مفاصل را با اشاعه از پایه ربات تا مجری نهایی بدست آورد [۱۴].

## ۷-۲- حل تحلیلی

برای ربات نشان داده شده در شکل (۱۳) ابتدا نیروی اعمالی به بازوی دوم ربات تجزیه شده و به دنبال آن گشتاور مفصل دوم بدست آورده می‌شود.

$$\tau_i = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$${}^2 m_2 = l_2 X_2 \times \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_2 f_y \end{bmatrix} \quad (22)$$

برای انتقال نیرو و گشتاور ایجاد شده به بازوی اول، ماتریس انتقال را بدست می‌آوریم.

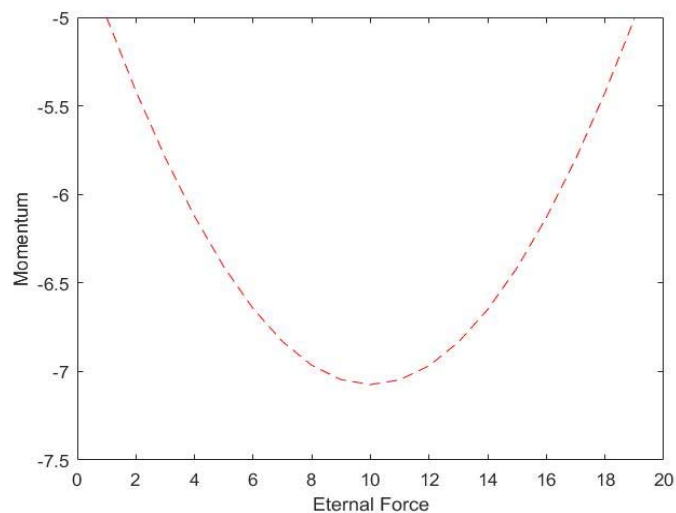
$$A = \begin{bmatrix} \cos_2 & \sin_2 & 0 \\ \sin_2 & \cos_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

حال می‌توان نیروی اعمالی از بازوی دوم به بازوی اول و همچنین گشتاور ایجاد شده در اثر آن را بدست آورد.

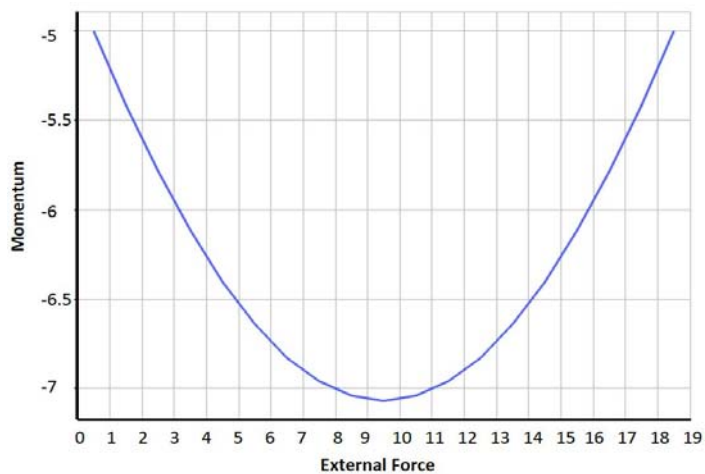
$${}^1 f_1 = \begin{bmatrix} \cos_2 & \sin_2 & 0 \\ \sin_2 & \cos_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos_2 f_x - \sin_2 f_y \\ \sin_2 f_x - \cos_2 f_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$${}^1 m_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_2 f_y \end{bmatrix} + l_1 X_1 \times {}^1 f_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \sin_2 f_x + l_1 \cos_2 f_y - l_2 f_y \end{bmatrix} \quad (25)$$

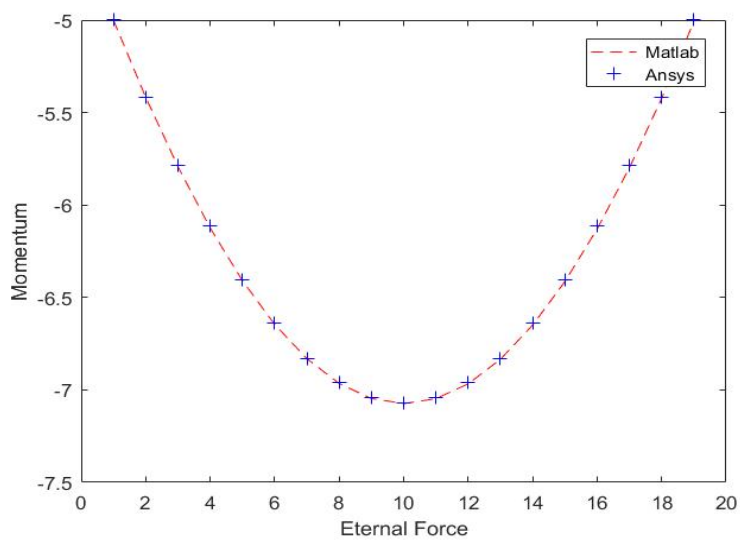
همان طور که مشخص است نیروی مفصلی ایجاد شده به شکل گشتاور و حول محور Z مفصل بدست خواهد آمد. به جهت اعتبارسنجی روش حل، روابط بالا را در نرم افزار متلب کدنویسی نموده و نتایج حاصل را با پاسخ های بدست آمده به روش FEM مقایسه می‌شود. نتایج بدست آمده برای بازوی نشان داده شده در شکل (۱۳) به ترتیبی که طول هر بازو برابر نیم متر در نظر گرفته شده باشد و نیروی خارجی ۱۰ نیوتن متر به انتهای بازوی دوم در راستاهایی از صفر الی ۹۰ درجه وارد شده باشد، مطابق نمودارهای زیر بدست خواهد آمد.



شکل ۱۴- نتایج گشتاورهای مفصل اول ربات به روش تحلیلی



شکل ۱۵- نتایج گشتاورهای مفصل اول به روش المان محدود



شکل ۱۶- مقایسه نتایج حل تحلیلی و حل المان محدود

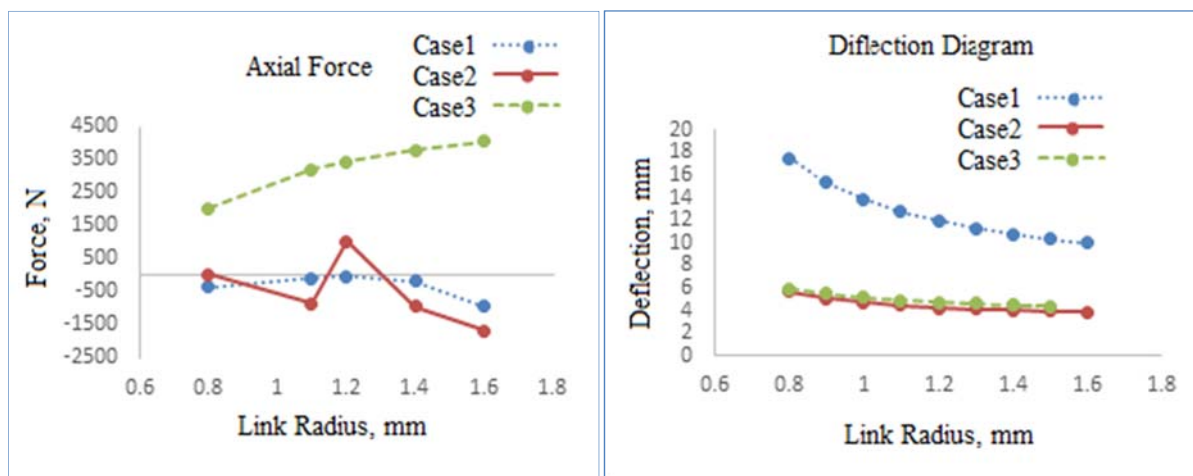
به جهت مقایسه پاسخ های بدست آمده، نتایج حل تحلیلی و المان محدود در قالب نمودار زیر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، نتایج کاملاً بر یکدیگر منطبق می‌باشند.

### ۸- بدست آوردن نقاط طراحی برای شعاع بازوی یک $r_1$

در حین طراحی بازوی یک، در مراحل بعدی دیده خواهد شد که به جهت آنکه بتوان فضای کارکرد ربات را افزایش داد و از تداخل بازوی یک با پایه ربات جلوگیری نمود، بهتر است این بازو به صورت کمّانی طراحی شود. در غیر این صورت باعث بزرگ شدن بی‌فایده بازوهای AD, BE, BF, CG خواهد شد. به همین منظور شعاع این کمان به عنوان یک نقطه طراحی در نظر گرفته شده است، تا بتوان اندازه بهینه آن را بدست آورد. نمودارهای مربوط به نقطه طراحی بازوی یک در شکل (۱۷) نشان داده شده است.

همان‌طور که در نمودار نیروی محوری دیده می‌شود، در حالت‌های یک و دو با کاهش از مقدار پیش‌فرض اولیه، تا شعاع ۱/۲ متر، نیروی محوری دچار کاهش می‌شود و سپس افزایش می‌یابد و در حالت سه همواره افزایش می‌یابد. در نمودار خیز نیز مشاهده می‌شود با افزایش شعاع، خیز ربات در سه حالت کاهش می‌یابد. از مجموع این دو نمودار می‌توان نتیجه گرفت نقطه طراحی برای شعاع بازوی یک ( $r_1$ ) برابر ۱/۲ متر خواهد بود و می‌بایست به طور کلی این طول می‌بایست کوچکتر از ۰/۴ پارامتر  $a$  در نظر گرفته شود.

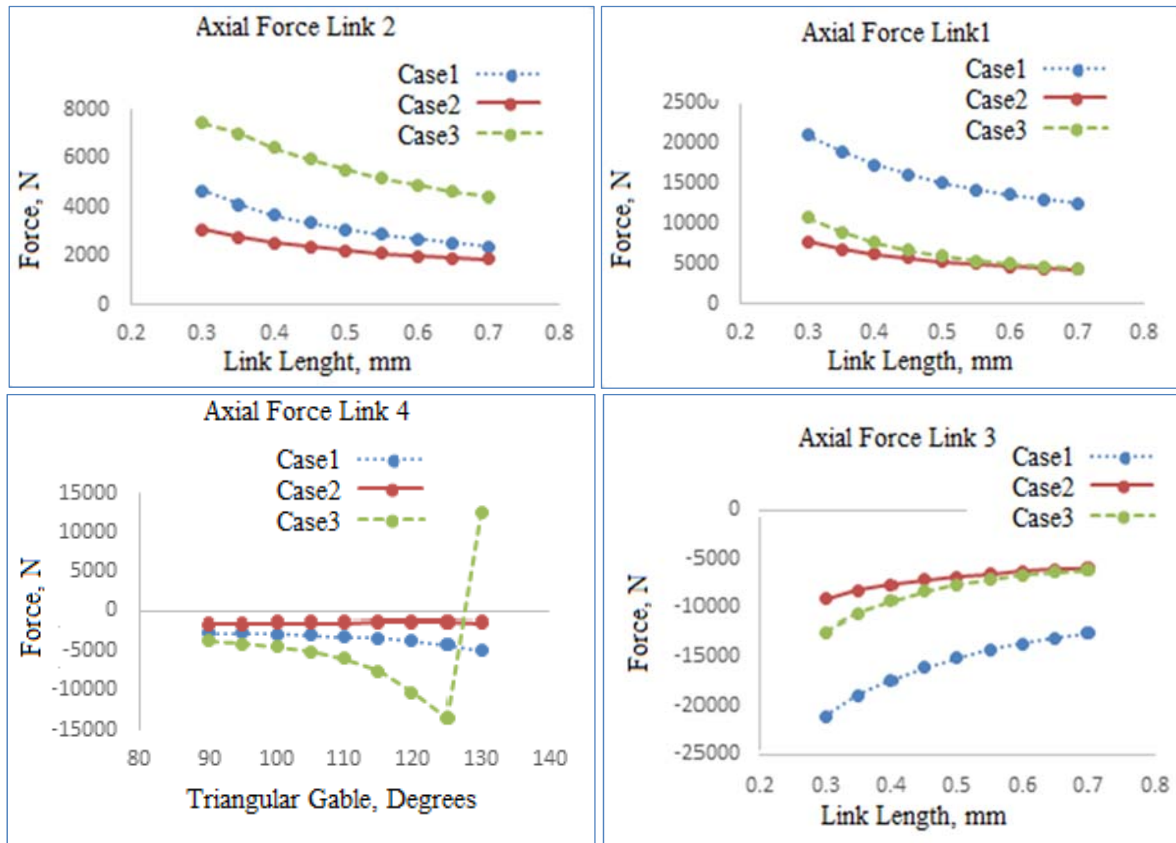
$$r_1 \leq 0,4 a \quad (26)$$



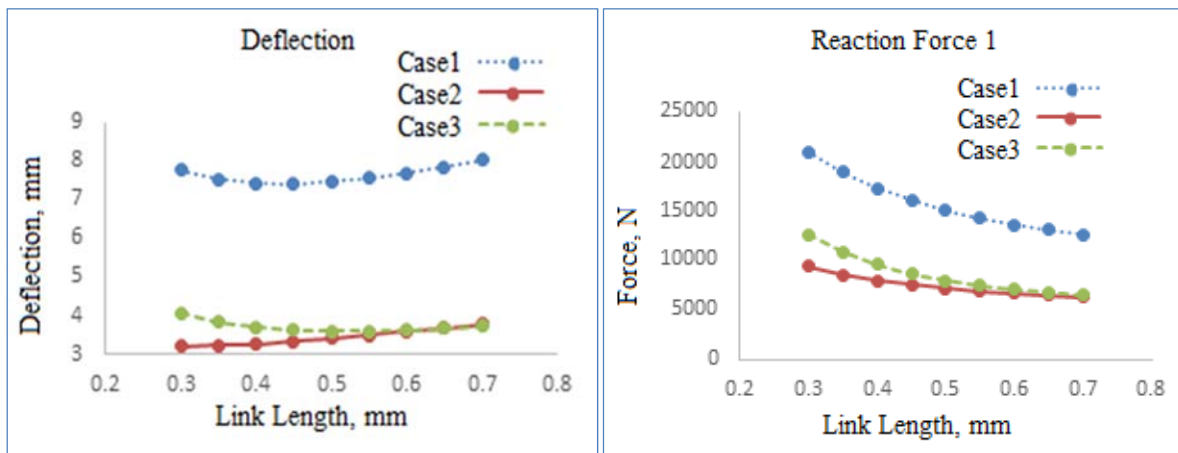
شکل ۱۷- نمودارهای بهینه‌سازی طول بازوی یک

### ۹- طراحی طول ضلع کوچک پیوند متوازی الاضلاعی AD ,BE ,BF ,CG

در نمودارهای شکل (۱۸) و (۱۹) مراحل بدست آوردن طول ضلع کوچک پیوند متوازی الاضلاع مشاهده می‌شود.



شکل ۱۸- نمودار بهینه‌سازی طول ضلع پیوند متوازی الاضلاعی (شکل اول)



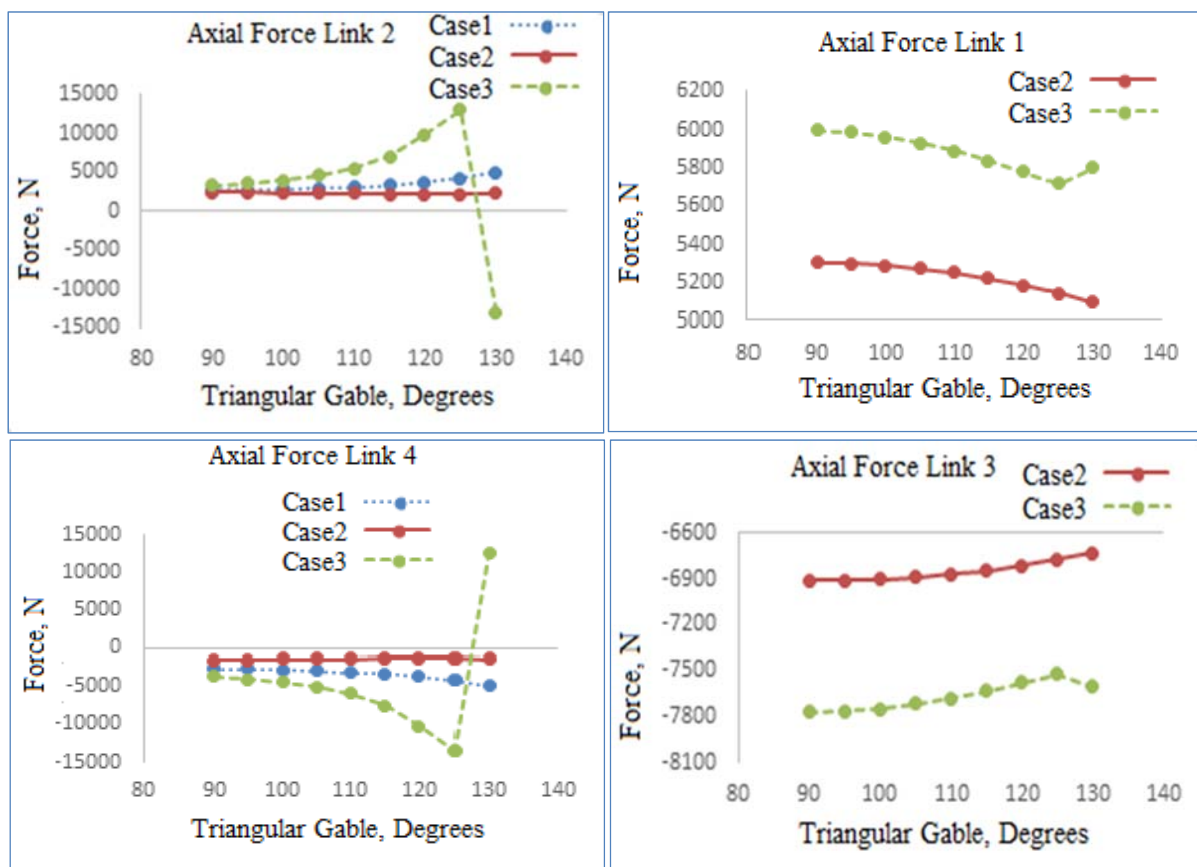
شکل ۱۹- نمودار بهینه‌سازی طول ضلع پیوند متوازی الاضلاعی (شکل دوم)

همان‌طور که در نمودار شکل (۱۸) و (۱۹) مشاهده می‌شود، با افزایش طول بازو، تمامی نیروهای محوری و همچنین نیروهای تکیه‌گاهی کاهش می‌یابند. این امر به علت بزرگ شدن بازوهایی که در ارتباط با این بازو بزرگ خواهند شد، طبیعی به نظر می‌رسد. اما در نمودار خیز در حالت‌های یک و سه، با افزایش از مقدار پیش‌فرض اولیه، تا طول ۰٫۴۵ متر خیز کاهش و سپس افزایش می‌یابد و در حالت سه همواره افزایش می‌یابد. از مجموع این دو نمودار می‌توان نتیجه گرفت نقطه طراحی برای طول بازوهای AD, BE, BF, CG برابر ۰٫۴۵ متر خواهد بود و می‌بایست به طور کلی این طول می‌بایست کوچکتر از ۰٫۱۵ پارامتر  $a$  در نظر گرفته شود.

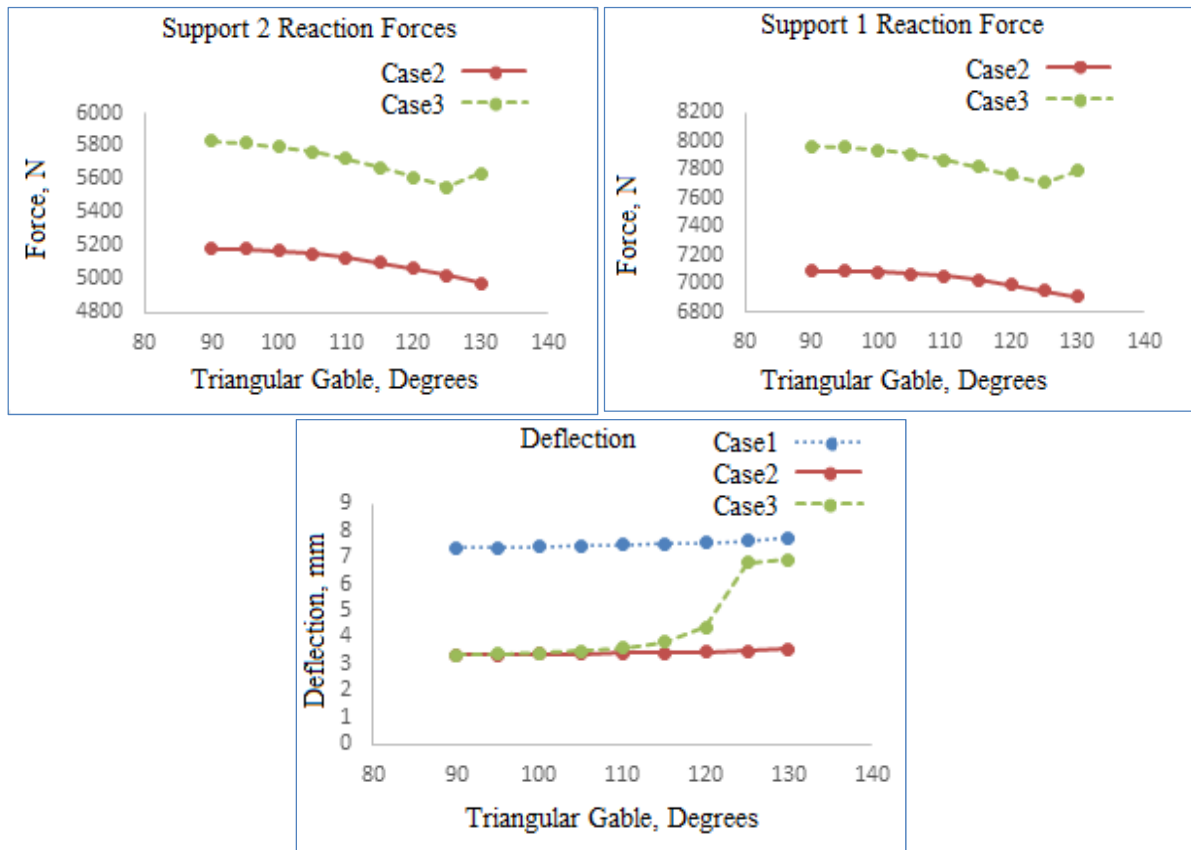
$$AD \cdot BE \cdot BF \cdot CG \leq 0,15 a \quad (27)$$

### ۱۰- نقاط طراحی برای زاویه اضلاع پیوند متوازی‌الاضلعی BEF, BFE

یکی دیگر از پارامترهای بهینه‌سازی، زاویه اضلاع لچکی است که هندسه‌های متوازی‌الاضلاع را به یکدیگر متصل می‌کند. برای این کار نیز زاویه پیش‌فرض اولیه کاهش و افزایش داده خواهد شد تا نقطه طراحی بدست آید. در برخی از نمودارهای شکل (۲۰) به جهت نمایش بهتر، جزئیات یکی از نمودارها حذف شده است.







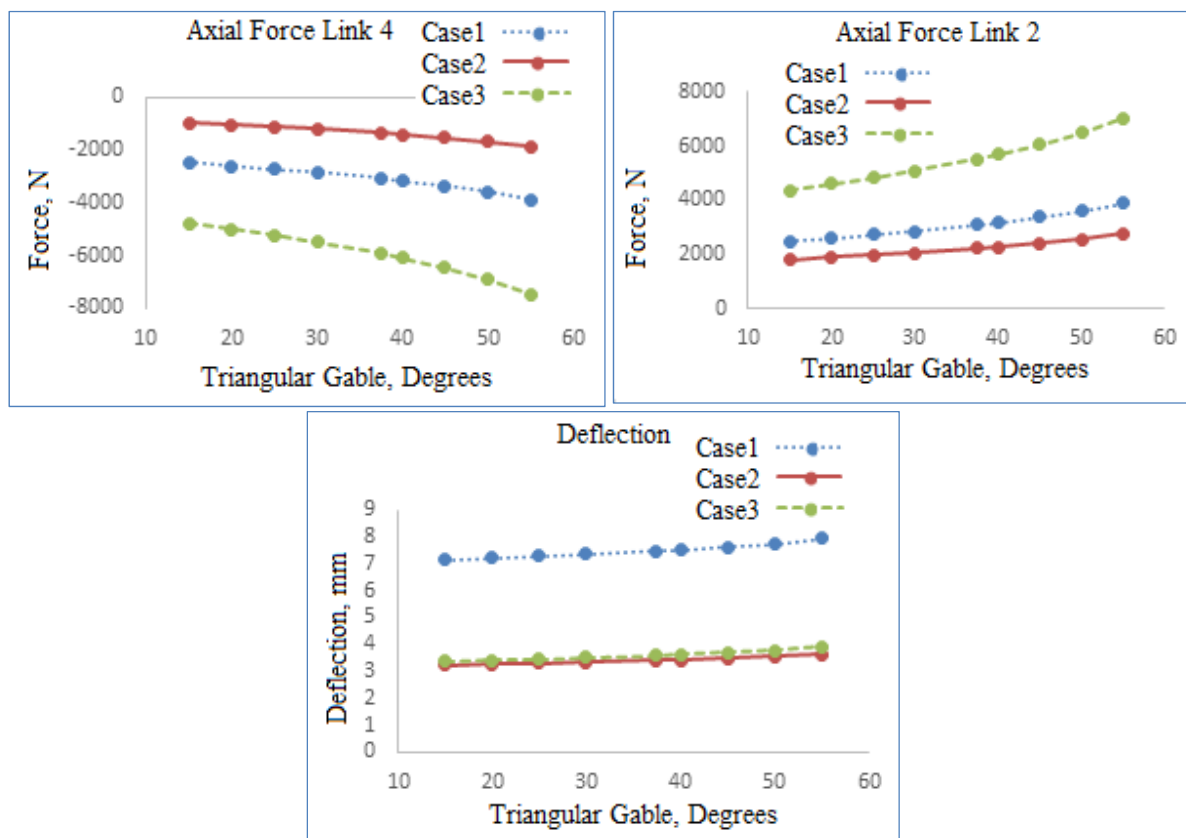
شکل ۲۰- نمودارهای بهینه‌سازی زاویه پیوند متوازی‌الاضاعی

در نمودارهای بالا مشاهده می‌شود عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی یک و دو به همراه نیروی محوری بازوهای یک و سه، با افزایش زاویه تا ۱۲۵ درجه، در حالت سه کاهش و سپس افزایش می‌یابند و در حالت دو نیز همواره کاهش می‌یابند. ولی در سایر نمودارها افزایش کمی مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است علت شکست ناگهانی نمودار بازوهای دو و چهار، قرار گرفتن اضلاع لچکی در یک راستا می‌باشد. نهایتاً از آنجا که طول ضلع EF از لچکی فوق‌الذکر تعیین‌کننده زاویه بدست آمده می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت چون درجه بدست آمده و به تبع آن طول حاصله برای EF، برای تعداد حالات بیشتری اثر مثبت دارد، می‌بایست این طول کوچکتر از ۰٫۲۶ پارامتر a در نظر گرفته شود.

$$EF \leq 0,26 a \quad (28)$$

### ۱۱- نقاط طراحی زاویه لچکی مربوط به مجری‌نهایی CGH

در این مرحله یکی از زوایای لچکی بررسی می‌شود و از دو زاویه دیگر به جهت آنکه تحت تاثیر یکدیگر می‌باشند صرف‌نظر شده است. تغییر این زاویه سبب خواهد شد محل قرارگیری بار به بعد یا قبل از مچ ربات (محل اتصال بازو چهار به مجری‌نهایی) منتقل گردد و این امر قطعاً روی نیروی بازوها و خیز اثر خواهد گذاشت. در نمودارهای شکل (۲۱) نتایج کم‌اهمیت حذف شده است.



شکل ۲۱- نمودارهای بهینه‌سازی زاویه لچکی مجری‌نهایی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر سه پارامتر با افزایش زاویه، افزایش می‌یابند. اما باید به این نکته توجه داشت که بازوی چهار FG یک بازو کمکی و دو نیروی بوده و می‌بایست سبک طراحی گردد. بازوهای دو نیرویی تنها تنش‌های کششی و فشاری را تحمل می‌کنند. اما در این بازو به علت طول بلند آن احتمال آن می‌رود که چنانچه تحت فشار قرارگیرد دچار کمانش شود. بنابراین در انتخاب نقطه طراحی این زاویه با توجه به اینکه به عدد مشخصی دست نیافته‌ایم، باید زاویه‌ای انتخاب گردد که باعث شود نیروی بازوی دو BC همواره کششی باقی بماند و این در صورتی حاصل می‌شود که راس پایینی مثلث همواره بین دو راس دیگر قرارگیرد.

به جهت برقراری این حالت دو ضلع CH و HG می‌بایست به ترتیب در بازه  $0,15 a \geq CH \geq 0,08 a$  و  $0,19 a \geq HG \geq 0,23 a$  قرارگیرند.

$$0,08 a \leq CH \leq 0,15 a \quad (29)$$

$$0,08 a \leq HG \leq 0,15 a \quad (30)$$

## ۱۲- صحت‌سنجی

به جهت صحت‌سنجی روابط پارامتریکی که در بخش‌های قبل برای طول بازوهای ربات بدست آمده است، با تغییر در ورودی‌هایی همچون طول بازشوندگی، شعاع دسترسی و میزان بار قابل حمل، نتایج مجدد بررسی گردید. مشاهده شد می‌توان با استفاده از این روابط، هندسه‌ی ربات‌های متفاوت با ورودی‌های متنوعی را با رعایت برقراری روابط فوق و عدم قرارگیری در حالات خاص، به راحتی طراحی نمود.

### ۱۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله ربات سریال چهار درجه آزادی با مفاصل لولایی، به شکل یک بازوی مکانیکی با محوریت حمل محموله سنگین طراحی شده است. به همین منظور در ابتدا هندسه سازه‌ی ربات با استفاده از پیوند متوازی-الاضلاع با هدف حمل افقی بار طراحی گردیده است. در بیشتر موارد، چالش در این گونه ربات‌ها بر روی افزایش میزان بار قابل جابجایی با حفظ ویژگی‌های مطلوبی نظیر چالاکی، دقت، تکرارپذیری و سبکی بوده است. مسیری که در این مقاله برای میل به این هدف انتخاب شده، بهینه نمودن هندسه سازه کلی ربات از نقطه نظر مکانیکی می‌باشد. چرا که داشتن هندسه‌ی بهینه منجر خواهد شد در ادامه روند طراحی بازوها، تحلیل‌های سینماتیکی و دینامیکی، و رسیدن به چالاکی و دقت مورد نظر مسیر هموارتری در پیش‌رو باشد. برای تحقق این بهینه‌سازی از روش المان محدود بهره برده شده و روش حل مساله توسط حل تحلیلی اعتبارسنجی شده است. در بهینه‌سازی صورت گرفته با تغییر در مقادیر پارامترهای طراحی که ابعاد هندسه سازه ربات شامل آن می‌شود، سعی شده تابع هدف را که شامل تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در بازوها و مفاصل خواهد بود، در بهترین وضعیت نیرویی و در انسجام با اهداف بهینه‌سازی بدست آورد. در نتیجه پس از بهینه‌سازی علاوه بر تامین خواسته‌های اصلی، روابط پارامتریک ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ بدست آورده شده است که با استفاده از این روابط می‌توان هندسه‌ای بهینه را برای انواع ربات‌های پالتایزر مشابه طراحی نمود و این اطمینان را داشت که هندسه طراحی شده در بهینه‌ترین وضعیت از نقطه نظر نیروهای تکیه‌گاهی و مفصلی قرار دارد. به این ترتیب می‌توان گفت با استفاده از این روابط ادامه روند طراحی آتی بازوها از جمله طراحی مقاطع بازو، در وضعیت بهینه صورت خواهد گرفت و با کاهش نیروی بوجود آمده در بازوها و کم کردن خیز در محل مجری نهایی سبب خواهد شد جابجایی‌های ربات با تکرارپذیری و دقت بیشتری انجام گیرد. مزایای دیگری از جمله جلوگیری از افزایش ابعاد مقاطع بازوها برای غلبه بر تنش و تغییر شکل، عدم افزایش وزن کلی سازه و به دنبال آن افزایش توان حمل بار، چالاکی ربات و بزرگ نشدن ابعاد کلی ربات را برای این بهینه‌سازی می‌توان برشمرد.

### مراجع

- [1] Sapietová, A., Saga, M., Kuric, I., and Václav, Š., "Application of Optimization Algorithms for Robot Systems Designing", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 15, pp. 1-10, (2018).
- [2] Zhang, D., and Wei, B., "Modelling and Optimization of a 4-DOF Hybrid Robotic Manipulator", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 30, pp. 1179-1189, (2017).
- [3] Ge, L., Chen, J., Li, R., and Liang, P., "Optimization Design of Drive System for Industrial Robots Based on Dynamic Performance", *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 44, pp. 765-775, (2017).
- [4] Luo, H., Fu, J., Wang, P., Liu, J., and Zhou, W., "Design Optimization of the Ram Structure of Friction Stir Welding Robot", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 27, No. 2, pp. 108-118, (2020).

- [5] Liang, M., Wang, B., and Yan, T., "Dynamic Optimization of Robot Arm Based on Flexible Multi-body Model", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, No. 8, pp. 3747-3754, (2017).
- [6] Denkena, B., Bergmann, B., and Lepper, T., "Design and Optimization of a Machining Robot", *Procedia Manufacturing*, Vol. 14, pp. 89-96, (2017).
- [7] Wang, Y., Chen, Z., Zu, H., Zhang, X., Mao, C., and Wang, Z., "Improvement of Heavy Load Robot Positioning Accuracy by Combining a Model-based Identification for Geometric Parameters and an Optimized Neural Network for the Compensation of Nongeometric Errors", *Complexity*, Vol. 2020, pp. 1-13 (2020).
- [8] Raza, K., Khan, T.A., and Abbas, N., "Kinematic Analysis and Geometrical Improvement of an Industrial Robotic Arm", *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, Vol. 30, pp. 218-223, (2018).
- [9] He, Y., Mei, J., Zang, J., Xie, S., and Zhang, F., "Multicriteria Optimization Design for End Effector Mounting Bracket of a High Speed and Heavy Load Palletizing Robot", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2018, pp. 1-17, (2018).
- [10] Hsiao, J.C., Shivam, K., Chou, C.L., and Kam, T.Y., "Shape Design Optimization of a Robot Arm using a Surrogate-based Evolutionary Approach", *Applied Sciences*, Vol. 10, pp. 2223-2241, (2020).
- [11] Liang, L., Liu, Y., Han, H., Wu, M., and Ma, Q., "A Method of Structure Optimization for High-speed and Heavy-load Robot Based on Dynamic Characteristic Analysis", In 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (aim), Banff, AB, Canada, pp. 1461-1466, (2016).
- [12] Udameeshi, S., Patil, G.S., and Patil, M.V., "Finite Element Analysis of Pick and Place Robotic Structure", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 03, pp. 1497-1500, (2016).
- [13] Spong, M.W., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M., "*Robot Modeling and Control*", Second Edition, John Wiley & Sons, USA, (2020).
- [14] John J. Craig., "*Introduction to Robotics Mechanics and Control*", Third Edition, Addison-Wesley, Pearson, USA, (2005).

## Abstract

The most common types of mechanical arms are robots that are used as palletizing robots to transport light and heavy loads. In robots that are used to move heavy loads, increasing the carrying capacity of the robot while maintaining dexterously, accuracy, repeatability and lightness has always been one of the issues studied by researchers. With this approach, in the present paper, the kinematic design and dimensional optimization of the geometry of a four-degree robotic robotic arm have been performed. The primary geometry is designed using parallel parallelograms to allow horizontal load carrying. After the initial design of the geometry dimensions of the robot, using the finite element method, the geometric optimization of the structure has been done in such a way that changes in the geometric dimensions of the arms as design parameters result in receiving the best results for the objective function. Deformation of the arms and proper distribution of load force among all arms. Using the optimization results of this paper and achieving a set of parametric relationships for the geometry of the robot structure, a shorter path can be taken to design these robots and With optimal geometry, parameters such as not increasing the dimensions of the arm sections to overcome stress and deformation, not increasing the overall weight of the structure, followed by increasing accuracy, repeatability, more load carrying capacity, robot dexterously and not enlarging the overall dimensions of the robot Improve.