



طراحی بهینه دستگاه آهنگری دورانی با سازوکار موازی

سید وحید حسینی^۱، محمدجواد ناطق^{۲*}، محمد مهدی عاقلی^۳، هادی ایمانی^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، nategh@modares.ac.ir

چکیده

در این مقاله طراحی بهینه دستگاه آهنگری دورانی با سازوکار موازی که توسط نویسندگان ابداع شد، ارائه می‌شود. تمایز این دستگاه با دیگر دستگاه‌های مرسوم اعمال هر دو حرکت چرخشی و تغذیه توسط یک مکانیزم موازی است که دستیابی به پروفیل‌های پیچیده را امکان‌پذیر می‌سازد. میز دستگاه، یک هگزاپاد هیدرولیکی است که کلیه حرکات شکل‌دهی را بر عهده دارد؛ از این‌رو طراحی بهینه عمدتاً برای هگزاپاد صورت می‌گیرد. توابع هدف در طراحی بهینه حداقل کردن خطای موقعیت دهی و نیروی موردنیاز محرک‌ها می‌باشد. پارامترهای موردبررسی در طراحی، شعاع میز ثابت (R_0)، شعاع میز متحرک (R_1)، زاویه بین مفاصل کروی (α) و مفاصل یونیورسال (β) است. ابتدا توابع هدف ذکرشده مدل‌سازی شد و سپس به کمک برنامه نوشته شده در نرم‌افزار متلب به ازای بازه‌ای منطقی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این دو تابع نشان داد به ازای مقادیر کمینه α و R_1 بیشینه β مقدار نیرو و خطای موقعیت دهی حداقل می‌شود البته این شرایط تا $R_0 = 400$ میلی‌متر صدق می‌کند و به ازای R_0 های بزرگ‌تر، روند R_1 تغییر کرده و با کاهش R_1 مقدار نیرو و خطا افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از هر دو تابع هدف مقادیر یکسانی را معرفی می‌کند که خود نشان‌دهنده درستی توابع در نظر گرفته‌شده در طراحی بهینه است

کلید واژگان: آهنگری دورانی، هگزاپاد، طراحی بهینه، تابع خطا، تابع نیرو

Optimum design of rotary forging machine with parallel mechanism

Seyed Vahid Hosseini, Mohammad Javad Nategh*, Mohammad Mahdi Agheli, Hadi Imani

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
*P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

ABSTRACT

In this paper the optimum design of a rotary forging machine with parallel mechanism developed by the authors is presented. The difference between this machine and other traditional machines is the application of both the orbital motion and the feeding motion through the parallel mechanism which can easily provide complicated profiles. The table of the machine is hydraulically actuated through the hexapod mechanism and is responsible for all the forming motions so that the optimum performance is achieved. The objective functions in the optimization problem is minimizing the positioning error and the force required for actuators. The investigated parameters in the design optimization are the radius of the fixed platform (R_0), radius of the mobile platform (R_1), the angle between spherical joints (α) and between the universal joints (β). First, the objective functions were modeled by a program written in MATLAB for a specific domain. The results showed that for the minimum values of α and R_1 , and the maximum values of R_0 and β , the values of force and positioning error are the least. However these results are for R_0 up to 400mm. For the larger values of R_0 the trend changed, i. e. by a decrease in R_1 the values of force and error increased. Both objective functions resulted in the same values indicating the reliability of the considered functions to achieve the optimum design.

Keywords: Rotary Forging, Optimum Design, Hexapod, Error Function, Force Function.

که سیستم محرک قالب بالایی الکتریکی و قالب پایین مکانیکی بود. این ماشین قابلیت شکل‌دهی قطعاتی از جنس سرب را داشت آن‌ها همچنین به بررسی تأثیر پارمترهای مختلف ماشین بر کیفیت قطعه آهنگری شده پرداختند. سال ۱۹۹۵ ناطق و مهدی‌نژاد [۴] ماشین آهنگری اوربیتال با تعداد دوران قابل تنظیم و قابلیت تنظیم بار آهنگری برای دستیابی به پروفیل‌های مختلف طراحی و ساختند. جورجین هرلیچ و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۷ فرایند انعطاف‌پذیر جدیدی با بهره‌گیری از یک سیستم موازی برای آهنگری دورانی ارائه دادند. در سال ۲۰۱۰ وارینگ و ژو [۶] آهنگری دورانی با دوکلیگی طراحی‌شده برای قطعاتی که نسبت ارتفاع به قطر آن‌ها زیاد است ارائه دادند. در اغلب ماشین‌های ذکرشده حرکت دورانی و تغذیه محوری توسط دو مکانیزم جدا از هم صورت می‌پذیرد که محدودیت در ایجاد

۱- مقدمه

آهنگری دورانی یکی از روش‌های شکل‌دهی سرد است که به‌صورت مستقیم برای ساخت قطعات صنعتی با جنس‌های مختلف و شکل‌های پیچیده استفاده می‌شود. در این فرایند با زاویه دادن به ابزار شکل‌دهی نیروهای وارد بر قطعه را کاهش داده و سبب شکل‌دهی تدریجی قطعه تا حصول شکل نهایی می‌شوند. کاهش نیرو شکل‌دهی در این فرایند نسبت به آهنگری معمولی تا ۱ گزارش شده است [۱]. اولین ماشین آهنگری دورانی مدرن در سال ۱۹۱۸ توسط ادوین اسلیک [۲] در ایالات‌متحده ساخته شد. ماشین اسلیک توانای شکل‌دهی دورانی چرخ‌های بزرگ در حالت گرم را داشت. بعد از ماشین اسلیک آهنگری دورانی در سراسر دنیا مورد استقبال قرار گرفت. جانسون و اسلاتر [۳] ماشین آهنگری دورانی آزمایشگاهی در دانشگاه منچستر ساختند

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S.V. Hosseini, M. J. Nategh, M.M. Agheli, H. Imani, Optimum design of rotary forging machine with parallel mechanism, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 486-490, 2015 (in Persian)

تأثیر بیشتری بر حداکثر زاویه چرخش میز متحرک دارد. در سال ۲۰۱۳ یانچی ژائو [۱۳] طراحی بهینه دینامیکی ربات دلتا با سه درجه آزادی انتقالی با در نظر گرفتن خواص غیر ایزوتروپیک را انجام داد، توابع هدف آن برای بهینه‌سازی، شاخص‌های گشتاور و نیرو بودند. ژائو نشان داد تفاوت زیادی برای بهینه‌سازی در حالتی که خواص غیر ایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شود وجود دارد و نتایج آن با حالت ایزوتروپیک کاملاً متفاوت است. پارامترهای اساسی در طراحی پیکره هگزاپاد همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، شعاع میز ثابت (R_0)، شعاع میز متحرک (R_i)، زاویه بین مفاصل کروی (α) و زاویه بین مفاصل یونیورسال (β) می‌باشند. لازم به ذکر است ارتفاع اولیه میز با توجه به ملزومات طراحی کلی دستگاه تعیین می‌شود و مقداری ثابت فرض شده است، دیگر پارامترهای طراحی پیکره که در شکل ۲ نیز دیده می‌شوند با در دست داشتن پارامترهای اساسی ذکر شده در بالا قابل محاسبه هستند [۱۰]. در این مقاله مقادیر بهینه زوایای بین مفاصل کروی و یونیورسال، شعاع میز ثابت و شعاع میز متحرک از دو منظر خطا و نیرو مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۱- سینماتیک هگزاپاد

در مکانیزم هگزاپاد دو پارامتر موقعیت میز متحرک و طول پایه‌ها توسط تحلیل سینماتیکی به هم مرتبط می‌شوند بدین صورت که با مشخص بودن هر کدام می‌توان دیگر را به دست آورد. طول پایه‌ها از زنجیره سینماتیکی که در شکل ۳ نشان داده شده است به صورت رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$l_i = o + R s_i + u_i \quad (1)$$

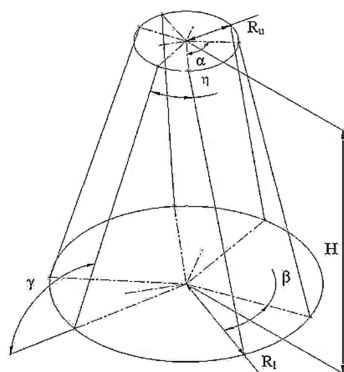
در معادله (۱)، O و U_i به ترتیب بردارهای مکان میز بالایی و مفاصل یونیورسال، در دستگاه مختصات عمومی، S_i بردار مکان مفاصل کروی در دستگاه مختصات محلی، l_i بردار پایه i ام و R ماتریس دوران میز بالا نسبت به میز پایین است.

۲-۲- مدل خطای سینماتیکی

با در دست داشتن رابطه سینماتیک معکوس و دیفرانسیل گرفتن از آن می‌توان معادله خطا را به صورت رابطه (۲) به دست آورد [۱۴]

$$\delta P = J_v^{-1} (\delta(\Delta l) - J_p \delta p) \quad (2)$$

در این معادله δP بردار خطای موقعیت‌دهی (ماتریس 6×1) میز متحرک، J_v^{-1} ماتریس معکوس ژاکوبین خطا (ماتریس 6×6)، $\delta(\Delta l)$ بردار خطای تغییر طول پایه‌ها (ماتریس 6×1)، J_p ماتریس ژاکوبین تشخیص (ماتریس 6×36) و δp بردار خطای پارامترهای سینماتیکی (ماتریس 1×36)، خطای موقعیت قرارگیری مفاصل یونیورسال و کروی، می‌باشند. با بازنویسی

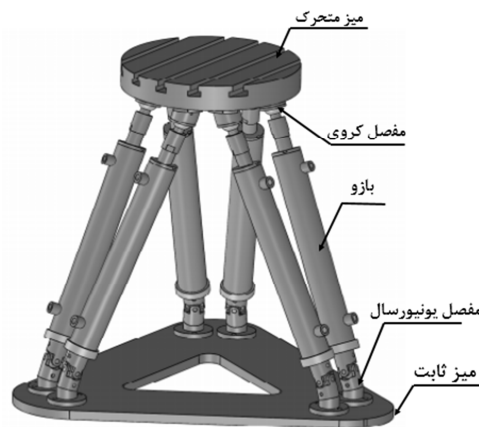


شکل ۲ پیکره هگزاپاد و پارامترهای آن [۱۰]

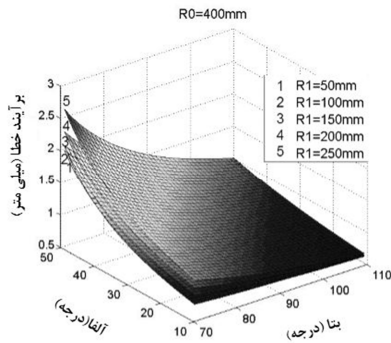
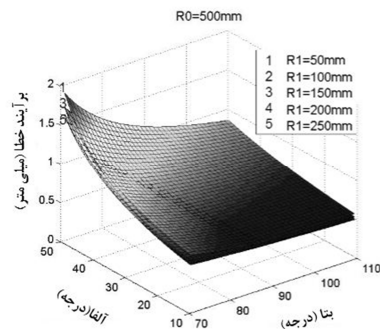
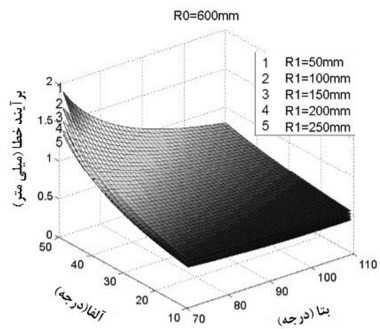
پروفیل‌های پیچیده را به دنبال دارد. هدف از انجام این پژوهش ارائه مکانیزمی است که فاقد این محدودیت‌ها باشد و هر دو حرکت دورانی و تغذیه را با هم و همزمان انجام دهد از این رو یک دستگاه آهنگری ادورانی با سازوکار موازی توسط نویسندگان ابداع شد که مشخصات و طراحی بهینه آن در این مقاله ارائه می‌شود. میز دستگاه آهنگری دورانی، یک هگزاپاد با سازوکار موازی هیدرولیکی است که کلیه حرکات شکل‌دهی را برعهده دارد. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود این هگزاپاد از یک سکوی متحرک، شش محرکه (بازو)، سکوی ثابت و مفاصل یونیورسال و کروی تشکیل شده است. میز متحرک و میز ثابت به ترتیب توسط مفاصل کروی و یونیورسال به محرکه‌های متصل می‌شوند. میز متحرک دارای شش درجه آزادی شامل سه درجه آزادی طولی و سه درجه آزادی زاویه‌ای در فضا است.

۲- طراحی بهینه

بهبود عملکرد دینامیکی، افزایش فضای کاری، کاهش وزن، افزایش توان بارگزاری، کاهش هزینه تولید و افزایش پایداری، لزوم بررسی طراحی بهینه را ایجاب می‌کند. همان‌طور که گفته شد کلیه حرکات شکل‌دهی بر عهده میز هگزاپاد است از این رو طراحی بهینه عمدتاً برای میز هگزاپاد صورت می‌گیرد. در زمینه طراحی بهینه ربات‌های موازی ریچارد استمپر و همکاران در سال ۱۹۹۷ یک ربات موازی با سه درجه آزادی را با دو تابع هدف فضای کاری ماکزیمم و شاخص شرط عمومی، بهینه‌سازی کردند [۷]. گاسلین و آنجلس در سال ۱۹۹۸ چهار تابع هدف تقارن ربات، غیر صفر شدن فضای کاری، ماکزیمم کردن فضای کار و طراحی ایزوتروپیک را برای بهینه کردن یک ربات موازی سه درجه آزادی صفحه‌ای مورد استفاده قرار دادند [۸]. یوزانگ و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۰ یک ربات هشت درجه آزادی باسکوه‌های هشت ضلعی را با بهینه کردن شاخص کیفیت، طراحی کردند. کریمی [۱۰] در سال ۲۰۰۹ پارامترهای سینماتیکی بهینه را با توجه به دو تابع هدف حجم فضای کاری و کیفیت آن تعیین کرد. ژو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۰ طراحی بهینه مبتنی بر ایزوتروپیک دینامیکی برای سکوی استوارت ارائه دادند. آن‌ها برای اندازه‌گیری ایزوتروپیک دینامیکی از آنالیز فرکانس طبیعی سکوی استوارت با ماتریس جرم فضای مفصلی استفاده کردند. میشرا و ماتور [۱۲] در سال ۲۰۱۲ ارتفاع بهینه یک مکانیزم استوارت خاص با در نظر گرفتن بیشترین زاویه چرخش میز بالایی با قابلیت تغییراندازه میز بالایی و میز پایینی انجام دادند این تغییر اندازه به‌واسطه گره‌های متحرک در میز ثابت و متحرک صورت می‌پذیرفت. آن‌ها نشان دادند که تغییر اندازه میز متحرک



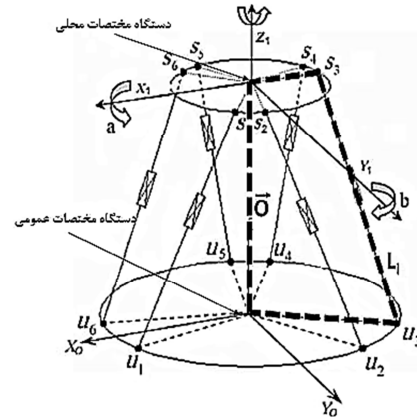
شکل ۱ هگزاپاد طراحی شده برای فرایند آهنگری دورانی

شکل ۶ خطای موقعیت میز متحرک در $R_0=400\text{mm}$ شکل ۷ خطای موقعیت میز متحرک در $R_0=500\text{mm}$ شکل ۸ خطای موقعیت میز متحرک در $R_0=600\text{mm}$

از مقایسه شکل‌های ۴-۸ مشاهده می‌شود که با افزایش R_0 مشخص با افزایش R_1 خطای افزایش می‌یابد البته این افزایش تا R_0 برابر ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد برای R_0 های بزرگتر از ۴۰۰ میلی‌متر این روند معکوس می‌شود و در مقادیر کمینه β اثر افزایش α روی بزرگی خطا بیشتر است. در همه شکل‌ها دیده می‌شود که با افزایش R_0 میزان خطای کاهش پیدا می‌کند. با مقایسه شکل‌های ۴-۸ در محدوده در نظر گرفته شده برای پارامترهای مورد بررسی، مقادیر بهینه از منظر خطا عبارتند از: $\alpha = 10^\circ$ ، $\beta = 110^\circ$ ، $R_1 = 250\text{mm}$ و $R_0 = 600\text{mm}$

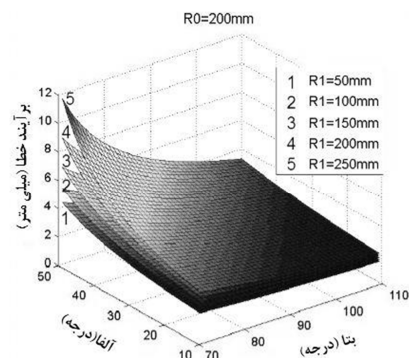
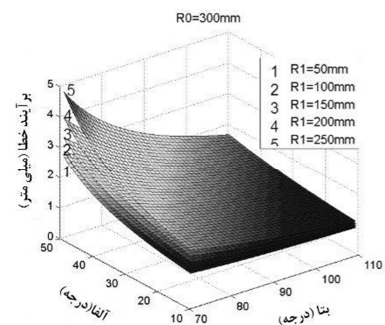
۲-۳- دینامیک معکوس هگزاپاد

در دینامیک معکوس نیرو و شتاب برداری وارد بر پایه‌ها با مشخص بودن نیرو و شتاب وارد بر میز متحرک تعریف می‌شود. از میان روش‌های مختلف تحلیل دینامیک معکوس، روش نیوتون اولی‌متر متداول است لذا برای پیکره نشان داده شده در شکل ۹ رابطه میان نیروهای داخلی و خارجی بر مبنای روش تحلیل نیوتون اولی‌متر مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۵]

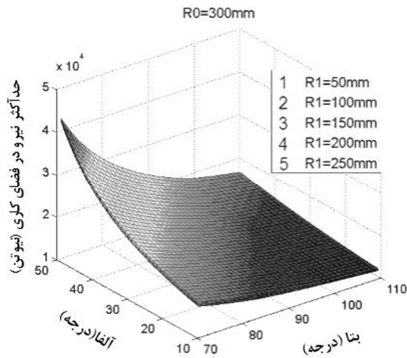


شکل ۳ شماتیک هگزاپاد و زنجیره سینماتیکی

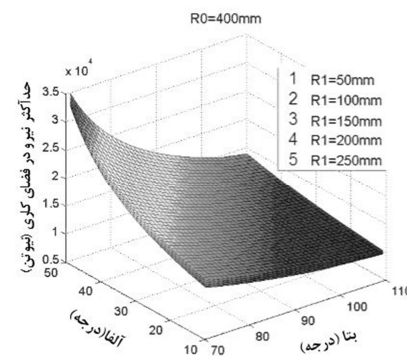
فرمول (۲) برحسب پارامترهای اساسی ذکر شده برای طراحی بهینه و پیدا کردن پیکره‌ای که حداقل خطای موقعیت و جهت را دارا باشد می‌توان مقادیر بهینه این پارامترها را از منظر خطا به دست آورد. برای این منظور برنامه در نرم‌افزار متلب نوشته شده که با مشخص بودن مقادیر اولیه نظیر ارتفاع میز، خطای تغییر طول پایه‌ها و خطای پارامترهای سینماتیکی در یک موقعیت و جهت مشخص برای میز متحرک، پیکره‌ای که کمترین خطا را دارد به عنوان پیکره بهینه از منظر خطا معرفی می‌کند. مقدار خطای کلیه پارامترهای سینماتیکی و همچنین خطای تغییر طول اولیه به صورت رندوم بین دو مقدار ۰ و ۱ میلی‌متر و ارتفاع اولیه میز ماشین با توجه به ملزومات طراحی، ۶۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برنامه نوشته شده در نقاط مختلف داخل فضای کاری تست شد و نتایج آن در شکل‌های ۴-۸ دیده نمایش داده شده است.

شکل ۴ خطای موقعیت میز متحرک در $R_0=200\text{mm}$ شکل ۵ خطای موقعیت میز متحرک در $R_0=300\text{mm}$

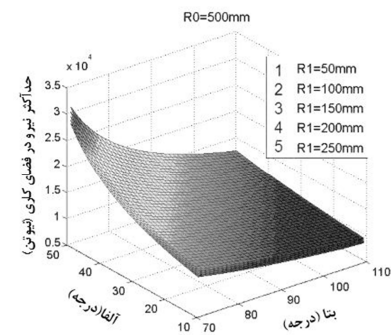
وجود نداشته باشد. شکل‌های ۱۰-۱۴ مقدار نیرو به ازای پارامترهای اساسی طراحی را نشان می‌دهد.



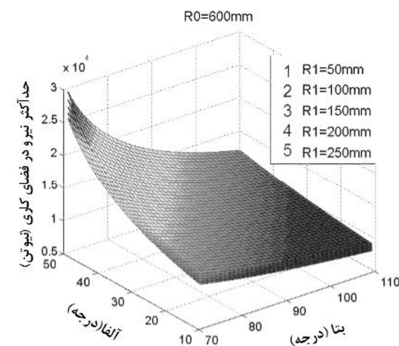
شکل ۱۱ حداکثر نیروی وارد به عملگر در $R_0=300$ mm



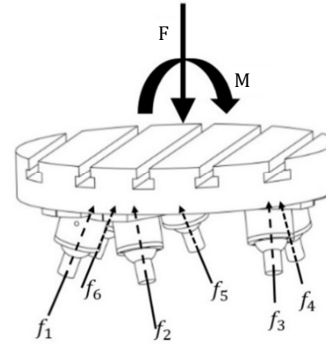
شکل ۱۲ حداکثر نیروی وارد به عملگر در $R_0=400$ mm



شکل ۱۳ حداکثر نیروی وارد به عملگر در $R_0=500$ mm



شکل ۱۴ حداکثر نیروی وارد به عملگر در $R_0=600$ mm



شکل ۹ دیاگرام آزاد نیرویی میز متحرک

$$M \begin{Bmatrix} \ddot{x}_p \\ \alpha_p \end{Bmatrix} + \eta = J^T F + \begin{Bmatrix} F_{ext} \\ M_G \end{Bmatrix} \quad (3)$$

در این رابطه M ماتریس اینرسی، η ترکیب نیرو و گشتاور جاذبه‌ای و کریولیس، α_p شتاب دورانی، x_p شتاب خطی، J^T ترانزپاز ماتریس ژاکوبین، F ماتریس نیروی پاها و F_{ext} مجموع نیروی خارجی و M_G مجموع گشتاورهای خارجی و گشتاور حاصل از نیروی خارجی می‌باشند که به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود

$$M_G = M_{ext} + G_C(F_{ext}) \quad (4)$$

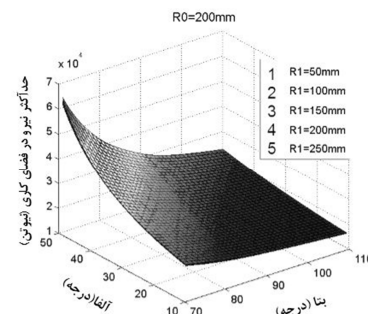
۴-۲- معیار نیرو

در دستگاه طراحی شده برای آهنگری دورانی نیروی حاصل از وزن و اینرسی اجزا هگزایپاد در مقابل نیروی خارجی وارد بر میز یا همان نیروی آهنگری ناچیز و قابل صرف‌نظر است از این‌رو رابطه (۳) به صورت رابطه (۵) ساده می‌شود

$$J^T F = - \begin{Bmatrix} F_{ext} \\ M_G \end{Bmatrix} \quad (5)$$

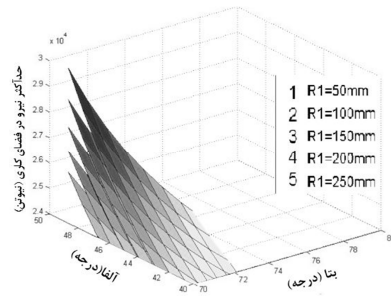
در طراحی بهینه با معیار نیرو روش کار بدین صورت است که با استفاده از برنامه کامپیوتری نوشته شده در نرم‌افزار متلب، دینامیک معکوس (رابطه ۴) به ازای مقادیر مختلف پارامترهای اساسی طراحی پیکره $(\alpha, \beta, R_0, R_1)$ در کل فضای کاری هگزایپاد حل شده و پیکره‌ای که ماکزیمم نیروی نقاط فضای کاری آن، از دیگر پیکره‌ها کمتر باشد به‌عنوان پیکره بهینه از دیدگاه نیرویی معرفی می‌شود

اندازه نیروی خارجی یا همان ماکزیمم نیروی موردنیاز برای شکل‌دهی که در مراحل طراحی ماشین تعیین گردید، 20 KN در نظر گرفته شد. فرض بر این است که نیروی شکل‌دهی بر مرکز میز وارد شود و هیچ گشتاور خارجی نیز



شکل ۱۰ حداکثر نیروی وارد به عملگر در $R_0=200$ mm

- the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 184, No. 1, pp. 577-592, 1969.
- [4] M. J. Nategh, M. MehdiNejad, An Investigation into the Rotary Forging Process Capabilities and Load Estimation, Proc. 9th International Cold Forging Conference., 22-26 May, No. Solihull, ENGLAND, pp. 417-424, 1995.
- [5] J. Hesselbach, B.-A. Behrens, F. Dietrich, S. Rathmann, J. Poelmeyer, Flexible forming with hexapods, *Production Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 429-436, 2007.
- [6] Z. C. Waring, *Twin-roller rotary-forging machine* Chinese patent, CN101823110 B, 2010.
- [7] R. E. Stamper, L.-W. Tsai, G. C. Walsh, Optimization of a three DOF translational platform for well-conditioned workspace, in *Proceeding of IEEE*, pp. 3250-3255.
- [8] C. Gosselin, J. Angeles, The optimum kinematic design of a planar three-degree-of-freedom parallel manipulator, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 110, No. 1, pp. 35-41, 1988.
- [9] Y. Zhang, J. Duffy, C. Crane, The Optimum Quality Index for a Spatial Redundant 4-8 in-Parallel Manipulator, in: *Advances in Robot Kinematics*, Eds., pp. 239-248: Springer, 2000.
- [10] D. Karimi, M. J. Nategh, A study on the quality of hexapod machine tool's workspace, in *Proceeding of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 52, 2009.
- [11] H.-Z. Jiang, J.-F. He, Z.-Z. Tong, Characteristics analysis of joint space inverse mass matrix for the optimal design of a 6-DOF parallel manipulator, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 45, No. 5, pp. 722-739, 2010.
- [12] V. Mishra, R. Mathur, Determination of Height of a Modified Stewart Platform for Various Sizes of Flexible Base, *Procedia Engineering*, Vol. 41, pp. 360-366, 2012.
- [13] Y. Zhao, Dynamic optimum design of a three translational degrees of freedom parallel robot while considering anisotropic property, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29, No. 4, pp. 100-112, 2013.
- [14] M. J. Nategh, M. M. Agheli, A total solution to kinematic calibration of hexapod machine tools with a minimum number of measurement configurations and superior accuracies, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 15, pp. 1155-1164, 2009.
- [15] M. Mahboubkhah, M. J. Nategh, S. Esmailzadeh Khadem, Inverse dynamic analysis of hexapod machine tooltable and comparative analysis of influential forces, *Modares Technical and Engineering No. 37*, pp. 29-38, 2010. (In Persian)



شکل ۱۵ حداکثر نیروی وارد به عملگر در $R_0=600\text{ mm}$ در فاصله نیرویی 24000 نیوتون

تغییرات نیرو به ازای مقادیر مختلف پارامترهای موردبررسی در مقایسه با تغییرات خطا کمتر می‌باشد. همانند معیار خطا با مقایسه نمودارهای $10-14$ دیده می‌شود که در R_0 مشخص حداقل نیرو به ازای کمینه مقدار α و R_1 و بیشینه مقدار β رخ می‌دهد البته این روند تا R_0 برابر 400 میلی‌متر ادامه دارد و بعدازآن حداقل نیرو به ازای کمینه مقدار α و بیشینه مقدار β و R_1 رخ می‌دهد. در شکل ۱۵ تغییرات نیرو به ازای پارامترهای مختلف در یک بازه محدود در R_0 برابر 400 میلی‌متر مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است این نتایج برای بازه در نظر گرفته شده برای R_0 و R_1 معتبر می‌باشد و در بازه در نظر گرفته شده برای پارامترهای موردبررسی مقادیر $\alpha=10^\circ$ ، $\beta=110^\circ$ ، $R_0=600\text{ mm}$ و $R_1=250\text{ mm}$ کمترین نیرو را نتیجه می‌دهند و بیشینه نیرو وارده به عملگرها در کل فضای کاری پیکره به دست آمده در مقایسه با دیگر پیکره‌ها کمتر می‌باشد.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی بهینه دستگاه آهنگری دورانی با سازوکار موازی با توابع هدف حداقل خطای موقعیت دهی و حداقل نیروی وارد به محرک‌ها تشریح شد. درستی توابع هدف ذکر شده برای بهینه کردن پارامترهای طراحی در این دستگاه با توجه به نتایج به دست آمده مورد تأیید است. با توجه به محدودیت‌های فیزیکی اعمال شده در قرارگیری مفاصل این نتایج پیکره‌ای با α کمینه و β بیشینه ($\alpha=10^\circ$ و $\beta=110^\circ$) را معرفی می‌کند که با پیکره معروف ۷-۸ مطابقت دارد. با بررسی نمودارهای به دست آمده دیده شد که علاوه بر α و β ، R_0 و R_1 نیز در تعیین پارامترهای بهینه نقش دارند و با افزایش R_0 و کاهش R_1 میزان خطای موقعیت‌دهی و نیروی وارد بر پاهای کمتر می‌شود، البته روند کاهش خطا و نیرو با کاهش R_1 تا R_0 برابر 400 میلی‌متر صدق می‌کند و به ازای R_0 های بزرگ‌تر با کاهش R_1 خطا و نیرو افزایش می‌یابند لازم به ذکر است که پارامترهای بیان شده بر هم تأثیر بسزایی دارند از این رو برای تعیین درست مقادیر بهینه این پارامترها باید تأثیر همزمان ۴ پارامتر را بر میزان خطا و نیرو مورد بررسی قرار داد که با توجه به همین رویکرد مقادیر بهینه به دست آمده برای دستگاه طراحی شده عبارت‌اند از $\alpha=10^\circ$ ، $\beta=110^\circ$

$$R_0=600\text{ mm} \text{ و } R_1=250\text{ mm}$$

۴- مراجع

- [1] R. Shivpuri, Past developments and future trends in the rotary or orbital forging process, *Journal of Materials Shaping Technology*, Vol. 6, No. 1, pp. 55-71, 1988.
- [2] E. Slick, The Slick wheel mill, *The Iron Age*, Vol. 102, No. 9, pp. 491-498, 1918.
- [3] R. Slater, N. Barooah, E. Appleton, W. Johnson, The rotary forging concept and initial work with an experimental machine, *Proceedings of*