

ابداع و بهینه‌سازی یک مکانیزم جدید محرک سوزن در ماشین‌های دوخت با استفاده از الگوریتم ژنتیک

ایمان حاجی‌زاده^۱، سعید ابراهیمی^{۱*}، پدرام پیوندی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۶/۱۰	مسئله طراحی ماشین دوخت به دلیل وجود مکانیزم‌های پیچیده و جواب‌های طراحی متعدد، جزء مسائل مشکل به شمار می‌رود. بدون شک کیفیت دوخت در این ماشین‌ها تا حد زیادی متأثر از پارامترهای مکانیزم محرک سوزن است. با توجه به تأثیر سرعت سوزن در محدوده نفوذ در پارچه بر نیروی تماس و حرارت ایجاد شده در سوزن، استفاده از یک مکانیزم محرک بهینه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. متأسفانه علی‌رغم اهمیت این موضوع از دید عملی، تحقیقات زیادی در این راستا صورت نگرفته است. لذا در این مقاله، ابتدا به معرفی یک مکانیزم جدید محرک سوزن پرداخته شده، سپس، مراحل بهینه‌سازی آن برای دستیابی به سرعت بهینه سوزن با استفاده از روش تکاملی الگوریتم ژنتیک به تفصیل بیان گردیده است. در ادامه، با اصلاح تابع هدف، تغییرات شتاب سوزن (جرک سوزن) به منظور کاهش لرزش‌های نامطلوب و حرکت یکنواخت سوزن کمینه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق در مقایسه با تحقیقات دیگر، مؤید دستیابی به سرعت و جرک بهینه سوزن با استفاده از این مکانیزم جدید می‌باشد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۸/۵	
واژگان کلیدی:	
سرعت سوزن، ماشین دوخت، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، مکانیزم لنگ و لغزنده.	

۱- مقدمه

اصطکاک بین سوزن و پارچه بواسطه تولید حرارت باعث بوجود آمدن مشکلاتی در فرآیند دوخت می‌شود. یکی از روش‌های کاهش حرارت، کاهش سرعت سوزن در محدوده نفوذ می‌باشد. تغییرات سرعت تابعی از هندسه مکانیزم حرکت سوزن در ماشین دوخت می‌باشد. حرکت سوزن در ماشین دوخت معمولاً توسط مکانیزم لنگ و لغزنده تأمین می‌شود. طراحی بهینه مکانیزم‌های شامل لنگ و لغزنده در کاربردهای صنعتی به طور کلی و در کاربردهای نساجی به طور خاص مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. علی‌رغم گستردگی این موارد، تحقیقات معدودی در راستای ابداع و بهینه‌سازی مکانیزم‌های چند میله‌ای ترکیبی شامل یک عضو لغزنده به عنوان مکانیزم محرک سوزن صورت گرفته است.

مهندسی نساجی و کاربردهای آن در بسیاری از مقوله‌های صنعتی در سال‌های اخیر توجه زیادی پیدا کرده است. امروزه مهندسی نساجی به عنوان یک موضوع چند رشته‌ای است که شامل زمینه‌های مختلف فنی شامل مهندسی مکانیک، شیمی، مدل‌سازی کامپیوتر، رباتیک و مهندسی برق می‌باشد. در این زمینه توسعه ماشین‌آلات دوخت جدید با سطح بالایی از عملکرد مکانیکی از اهمیت زیادی برخوردار است. در نتیجه، پیشرفت‌های کوچک در طراحی و توسعه ماشین‌آلات دوخت منجر به سود اقتصادی قابل توجهی می‌شود [۱]. در صنعت دوخت، اصطلاح مشکلات دوخت مجموع تمام مشکلاتی است که در طول فرآیند دوخت ظاهر می‌شود. در محدوده نفوذ سوزن در پارچه،

^۲ گروه مهندسی نساجی، دانشگاه یزد

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ebrahimi@yazd.ac.ir

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

در [۸] معرفی و روش ترکیب‌بندی ابعادی مطلوب به منظور بهینه‌سازی تمامی پارامترها با عملکرد مکانیکی بسیار عالی ارائه می‌شود. تجزیه و تحلیل حرکتی یک مکانیزم لنگ و لغزنده شامل مفاصلی با لقی غیر قابل اغماض در [۹] ارائه شده است. به منظور بهینه‌سازی پارامترهای طراحی مکانیزم لنگ و لغزنده برای به حداقل رساندن انحرافات الگوریتم تکاملی ژنتیک بکار می‌رود. بر اساس اهداف طراحی مبتنی بر بهینه‌سازی در [۱۰]، متغیرهای طراحی، قیدها و مدل ریاضی بهینه‌سازی مکانیزم لنگ و لغزنده ایجاد شده است. برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی از جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب استفاده شده است. این روش باعث بهبود راندمان، کیفیت طراحی، تجزیه و تحلیل حرکت می‌شود. برای طراحی بهینه و کنترل سیستم مکانیزم لنگ و لغزنده در [۱۱] از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۶ برای شناسایی پارامترهای سیستم استفاده شده است. در نهایت مقایسه شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی ثابت می‌کند که روش ازدحام ذرات برای شناسایی پارامترهای مکانیزم لنگ و لغزنده امکان‌پذیر است. برای بهبود عملکرد مکانیکی در [۱۲] مدل سه بعدی مکانیزم شش میله‌ای توسط نرم‌افزار آدامز^۷ ارائه شده است. هر بخش از مدل در نرم‌افزار آدامز راه‌اندازی شده است و با تجزیه و تحلیل مکانیزم، پارامترهای بهینه مکانیزم تعیین شده‌اند. محققان در [۱۳] به تجزیه و تحلیل استاتیکی و بهینه‌سازی ساختار لغزنده مکانیزم پرداخته‌اند و علاوه بر این، یک تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای از دو نوع ساختار لغزنده بر اساس شرایط کاری واقعی ارائه شده است. اهمیت مکانیزم‌های چند میله‌ای در ارتباط با توسعه دستگاه مکانیکی در [۱۴] با استفاده از یک مکانیزم شش میله‌ای برای جایگزینی مکانیزم اصلی تبیین شده است. بررسی نتایج بهینه‌سازی انجام گرفته با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نشان داد که عملکرد سینماتیکی مکانیزم جایگزین تا حد

در زمینه طراحی بهینه مکانیزم‌های شامل لنگ و لغزنده به طور کلی روش‌های متعددی استفاده می‌شود. روش آزمون آماری در [۲] برای طراحی بهینه مکانیزم چند میله‌ای با تابع هدف سرعت لغزنده بکاررفته است. برنامه‌نویسی هندسی یک روش قدرتمند بهینه‌سازی است که کاربرد آن در ترکیب‌بندی مکانیزم لنگ و لغزنده در [۳] تشریح می‌گردد. تابع هدف این مساله شامل تعداد زیادی از عبارات است در حالی که در فرمول‌بندی الگوریتم بهینه‌سازی تنها دو متغیر طراحی وجود دارد. در تحقیق مذکور، تغییر تابع هدف به صورتی پیشنهاد شده است که درجه سختی^۴ را به صفر کاهش می‌دهد. پارامتر درجه سختی در یک مساله بهینه‌سازی به صورت اختلاف بین تعداد کل عبارتهای موجود در تابع هدف و قیدهای مساله، و تعداد معادلات خطی تعریف می‌شود. با افزایش این پارامتر، یافتن جواب بهینه نیز دشوارتر می‌شود.

مرجع [۴] با استفاده از روش مثلثی بردارها به تجزیه، تحلیل و محاسبه جابجایی برای مکانیزم چند میله‌ای می‌پردازد. برای بهینه‌سازی مکانیزم از روش آزمون آماری می‌شود. روش ترکیب‌بندی ابعادی پارامترهای سینماتیکی مرتبه بالاتر در [۵] برای تحقق بخشیدن به دقت حرکت بیشتر و کنترل مشخصات حرکت مکانیزم چند میله‌ای ترکیبی استفاده شده است. تابع هدف فرآیند بهینه‌سازی، سرعت لغزنده است. پیچیده بودن ترکیب‌بندی بهینه یک مکانیزم با بیش از چهار رابط در [۶] اشاره شده است. برای این منظور یک مکانیزم هشت میله‌ای برای طراحی پیشنهاد و فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب اجرا می‌شود. مکانیزم جدیدی برای جایگزینی مکانیزم لنگ و لغزنده ماشین دوخت در [۷] معرفی و با استفاده از روش SQP^۵ متلب فرآیند بهینه‌سازی آن انجام شده است. به منظور پاسخ‌گویی به نیاز تولید، یک نوع مکانیزم لنگ و لغزنده جدید مبتنی بر دو درجه آزادی

6-Particle Swarm Optimization
7-ADAMS

4-Degree of Difficulty
5-Sequential Quadratic Programming

مکانیزم‌های جدید محرک سوزن که بدون تغییر در سرعت دوخت منجر به دستیابی به سرعت بهینه سوزن شوند بسیار مهم و پرکاربرد می‌باشد. از آن جا که در این راستا کار چندانی انجام نشده است، این مقاله به معرفی و بررسی یک مکانیزم جدید محرک سوزن در ماشین‌های دوخت و بهینه‌سازی آن به منظور بهبود عملکرد فرآیند دوخت می‌پردازد. مکانیزم ارائه شده در این مقاله در مقایسه با مکانیزم مقاله [۱۵] کاملاً متفاوت است.

در ادامه، ابتدا مکانیزم لنگ و لغزنده بررسی می‌شود. پس از معرفی مکانیزم جدید، معادلات سینماتیکی آن استخراج می‌شوند. پس از آن الگوریتم تکاملی ژنتیک، که روش بهینه‌سازی مورد استفاده در این مقاله می‌باشد، به طور مختصر معرفی می‌شود. در قسمت بعد پس از ارائه نتایج بهینه‌سازی سرعت سوزن در محدوده نفوذ، به اصلاح تابع هدف با توجه به تغییرات شتاب سوزن (جرک^۹ سوزن) به منظور کاهش لرزش‌های نامطلوب ماشین دوخت و دستیابی به حرکت یکنواخت سوزن پرداخته می‌شود. این مقاله در نهایت با بحث در مورد نتایج اصلی به پایان می‌رسد.

۲- مکانیزم لنگ و لغزنده

مکانیزم معمول محرک سوزن در ماشین‌های دوخت، مکانیزم لنگ و لغزنده می‌باشد. هندسه و ساختار این مکانیزم در شکل ۱ نشان داده شده است. مکانیزم شامل رابط محرک OA، مسیر لغزنده B (سوزن) و رابط کوپلر AB می‌باشد. با توجه به ساختار ساده و معمول این مکانیزم، برخی اشکالات در رابطه با عملکرد و رفتار سینماتیکی در طول فرآیند دوخت ظاهر می‌شوند. از آنجا که در مکانیزم لنگ و لغزنده پارامترهای طراحی محدود می‌باشند، نمی‌توان تغییرات زیادی در عملکرد آن جهت کاهش مشکلات فرآیند دوخت اعمال کرد.

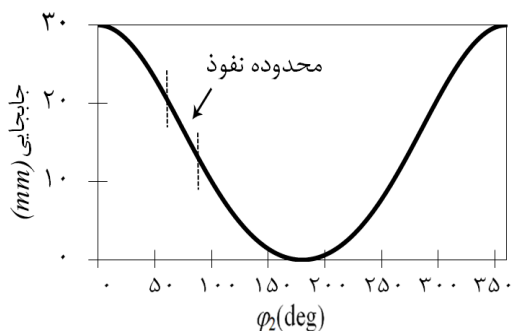
زیادی نسبت به مکانیزم اصلی بهبود یافته است. محققان در [۱۵] به اصلاح نواقص موجود در [۷] برای جایگزینی یک مکانیزم جدید به جای مکانیزم لنگ و لغزنده محرک سوزن در ماشین دوخت پرداخته‌اند. از جمله این موارد می‌توان به اصلاح تابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی اشاره کرد. نتایج بدست‌آمده نسبت به کار قبل بهبود یافته، برای فرآیند بهینه‌سازی از الگوریتم رقابت استعماری^۸ (ICA) استفاده شده است.

در مهندسی نساجی، ماشین‌آلات دوخت اساساً برای کار در سرعت بالا طراحی می‌شوند. یکی از مشکلات مهم در فرآیند دوخت، تولید حرارت بر اثر اصطکاک بین پارچه و سوزن در محدوده نفوذ می‌باشد. این مشکل ضمن آسیب جدی به پارچه و سوزن، کاهش کیفیت دوخت را نتیجه می‌دهد. محققان در [۱۶] به این نتیجه رسیدند که گرم شدن سوزن بر شرایط سوزن دوخت، سرعت دوخت، مواد دوخته شده، کشش نخ و پارچه تأثیر می‌گذارد. از جمله عوامل مؤثر برای کاهش دمای سوزن، کاهش سرعت آن در محدوده نفوذ در پارچه می‌باشد. این مورد با توجه به رابطه بیان شده در [۷] براحتی استنباط می‌شود. افزایش درجه حرارت سوزن به طور مستقیم با استفاده از تئوری تماس لغزشی در [۱۷ و ۱۸] به عنوان یک تابع خطی از شار گرما محاسبه شده است.

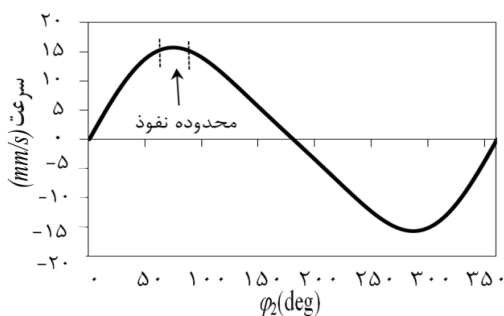
در صورت استفاده از یک مکانیزم محرک سوزن با سرعت نفوذ بهینه، بدون تأثیر بر سرعت دوخت می‌توان افزایش دمای سوزن را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. در مورد مکانیزم لنگ و لغزنده که مکانیزم معمول محرک سوزن در ماشین دوخت می‌باشد، مشکلاتی در رابطه با عملکرد و رفتار سینماتیکی در طول فرآیند دوخت ظاهر می‌شود. از جمله می‌توان به سرعت زیاد سوزن در محدوده نفوذ در پارچه در صورت کارکرد ماشین دوخت در سرعت بالا اشاره کرد. با توجه به ساختار مکانیکی مکانیزم لنگ و لغزنده، کاهش سرعت سوزن در این مدت بدون کاهش سرعت دوخت امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین، ابداع و معرفی

9- Jerk

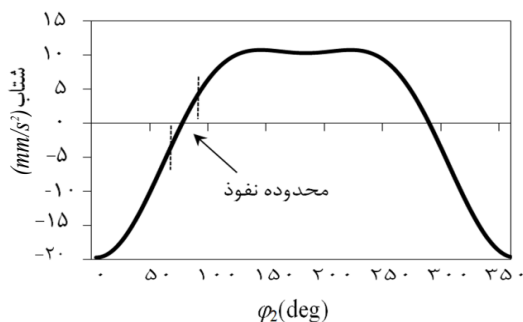
8- Imperialist Competitive Algorithm



شکل ۲- تغییرات جابجایی سوزن

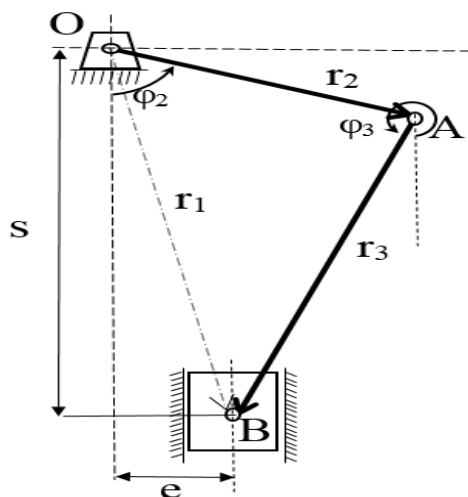


شکل ۳- تغییرات سرعت سوزن



شکل ۴- تغییرات شتاب سوزن

محدوده نفوذ در مکانیزم لنگ و لغزنده که مکانیزم معمول در ماشین دوخت می‌باشد، بین $89^\circ \leq \varphi_2 \leq 67^\circ$ و مجموع سرعت سوزن در محدوده نفوذ برابر $355/86$ میلی متر بر ثانیه می‌باشد. از آنجا که دمای سوزن تابع مجموع سرعت سوزن در محدوده نفوذ است، بنابراین مجموع سرعت سوزن در بازه زمانی دوران رابط ورودی از زاویه 67° درجه تا زاویه 89° درجه محاسبه می‌شود. برای تعیین این کمیت، با داشتن نمودار تغییرات سرعت سوزن بر حسب تغییرات زاویه رابط ورودی (شکل ۳) در بازه زاویه‌ای ذکر شده به صورت عددی انتگرالگیری شده است.



شکل ۱- مکانیزم لنگ و لغزنده

معادلات جابجایی، سرعت و شتاب سوزن در این مکانیزم به ترتیب بصورت زیر می‌باشد.

$$s = r_2 \cos(\varphi_2) + r_3 \cos(\varphi_3) \quad (1)$$

$$\dot{s} = -r_2 \dot{\varphi}_2 \sin(\varphi_2) + r_3 \dot{\varphi}_3 \sin(\varphi_3) \quad (2)$$

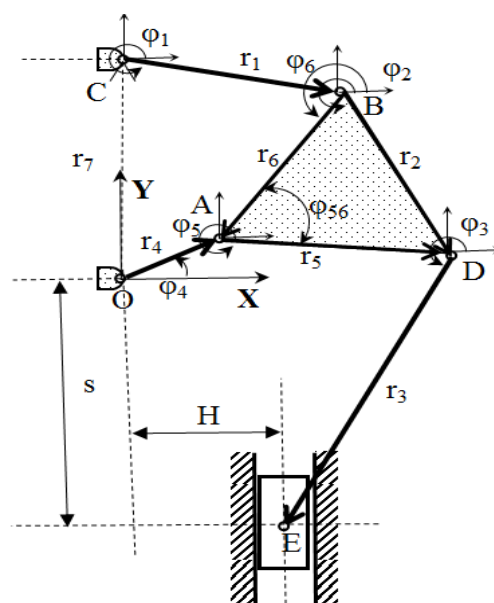
$$\ddot{s} = -r_2 (\ddot{\varphi}_2 \sin(\varphi_2) + \dot{\varphi}_2^2 \cos(\varphi_2)) - r_3 (\ddot{\varphi}_3 \sin(\varphi_3) + \dot{\varphi}_3^2 \cos(\varphi_3)) \quad (3)$$

جزئیات تعیین φ_3 و $\dot{\varphi}_3$ بر حسب پارامترهای معلوم φ_2 ، $\dot{\varphi}_2$ و $\ddot{\varphi}_2$ مربوط به رابط ورودی OA در ضمیمه الف آورده شده است. ابعاد معمول مکانیزم لنگ و لغزنده در یک ماشین دوخت $r_2 = 48 \text{ mm}$ ، $r_3 = 15 \text{ mm}$ و $e = 0$ می‌باشد. این ابعاد با توجه به ابعاد واقعی این مکانیزم در چرخ خیاطی‌های متداول و بر اساس ابعاد گزارش شده در مرجع [۷] انتخاب شده است.

نمودارهای تغییرات جابجایی، سرعت و شتاب نقطه B (سوزن) از مکانیزم لنگ و لغزنده به ترتیب در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ به ازای سرعت زاویه‌ای ثابت $\dot{\varphi}_2 = 1 \text{ rad/s}$ دیده می‌شود.

۳- سینماتیک مکانیزم جدید

اخیراً مکانیزم‌های پیچیده‌تری توسط محققان برای بهبود عملکرد مکانیکی دستگاه دوخت پیشنهاد شده است. این مکانیزم‌ها به طور معمول از برخی مکانیزم‌های اولیه شامل چهار یا پنج میله تشکیل شده‌اند. مکانیزم معرفی شده در این مقاله در شکل ۵ مشاهده می‌شود. اگرچه پارامترهای سینماتیکی این مکانیزم مانند سرعت سوزن در مقایسه با مکانیزم لنگ و لغزنده متفاوت هستند، ولی سرعت دوخت تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. دلیل اصلی این ادعا، این است که فرآیند یک بخیه (کوک) کامل در طول یک چرخش کامل (۳۶۰ درجه) رابط ورودی ماشین دوخت، در این مکانیزم کاملاً شبیه به مکانیزم لنگ و لغزنده است.



شکل ۵- مکانیزم جدید

به منظور بهینه‌سازی، پیدا کردن روابط سینماتیکی بین رابط ورودی OA و لغزنده E (سوزن) الزامی است. توضیحات کامل روابط سینماتیکی در قسمت ضمیمه ب ارائه شده است. در قسمت اول براساس شکل (۵) موقعیت سوزن (s) تابعی از زاویه ϕ لنگ OA بدست می‌آید.

$$s = r_4 \sin(\phi_4) + r_5 \sin(\phi_5) + r_3 \sin(\phi_3) \quad (۴)$$

ϕ° و ϕ° به ترتیب زاویه رابط‌های DE و AD می‌باشند که به صورت تابعی از ϕ بدست می‌آیند. رابطه بین ϕ° و ϕ° بر اساس زاویه ϕ° به صورت $\phi^{\circ} = \phi^{\circ} + \phi^{\circ}$ است، بطوریکه با مشتق گرفتن از رابطه (۴) سرعت سوزن \dot{s} براساس تابعی از سرعت زاویه ای $\dot{\phi}_4$ رابط ورودی بدست می‌آید.

$$\dot{s} = r_4 \dot{\phi}_4 \cos(\phi_4) + r_5 \dot{\phi}_5 \cos(\phi_5) + r_3 \dot{\phi}_3 \cos(\phi_3) \quad (۵)$$

که $\dot{\phi}_5$ و $\dot{\phi}_3$ به ترتیب سرعت‌های زاویه‌ای رابط‌های DE و AD می‌باشند. با توجه به ثابت بودن زاویه ϕ° مشتق آن برابر صفر بوده، در نتیجه $\dot{\phi}_5 = \dot{\phi}_6$ است. با مشتق گرفتن از رابطه (۵)، شتاب سوزن \ddot{s} بر حسب شتاب زاویه‌ای $\ddot{\phi}_4$ رابط ورودی بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \ddot{s} = & r_4 (\ddot{\phi}_4 \cos(\phi_4) - \dot{\phi}_4^2 \sin(\phi_4)) + \\ & r_5 (\ddot{\phi}_5 \cos(\phi_5) - \dot{\phi}_5^2 \sin(\phi_5)) + \\ & r_3 (\ddot{\phi}_3 \cos(\phi_3) - \dot{\phi}_3^2 \sin(\phi_3)) \end{aligned} \quad (۶)$$

که $\ddot{\phi}_5$ و $\ddot{\phi}_3$ به ترتیب شتاب‌های زاویه‌ای رابط‌های DE و AD می‌باشند.

۴- الگوریتم تکاملی ژنتیک

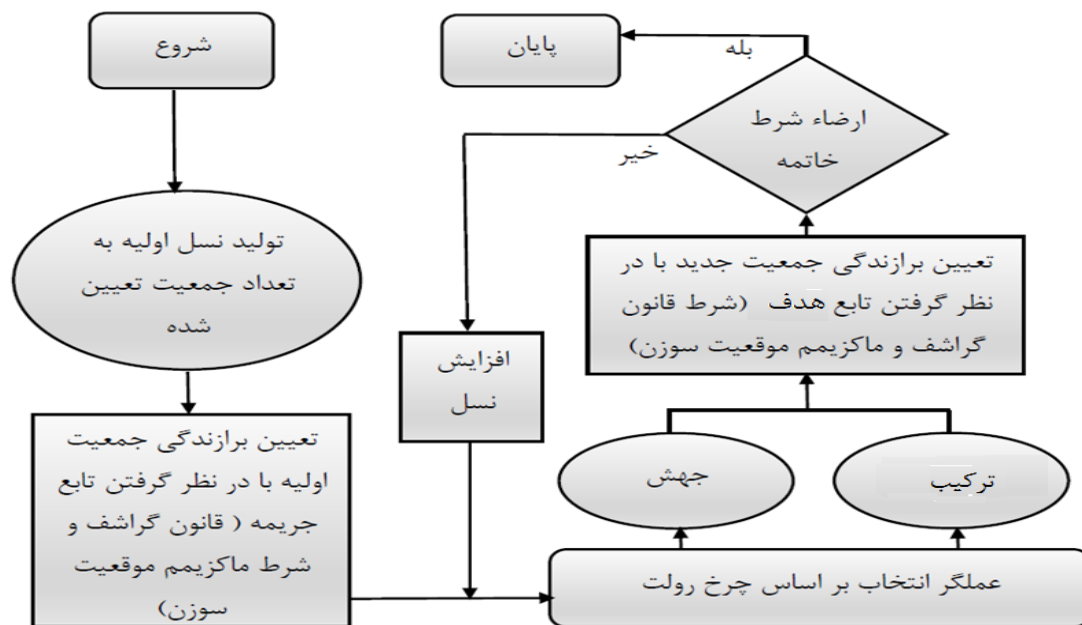
الگوریتم ژنتیک روشی برای جستجوی تصادفی عددی است که از فرآیند ساده شده تکامل طبیعی تقلید می‌کند. الگوریتم بر روی جمعیتی از پاسخ‌ها عمل کرده، با به کار بردن اصل بقای بهترین و تکامل، به ایجاد جواب‌های بهتر و مناسب‌تر می‌پردازد [۱۹ و ۲۰]. در آغاز، نسلی با جمعیت اولیه خاص کروموزوم‌ها (رشته‌ها) به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. سپس به منظور ارزیابی کروموزوم‌ها از تابع هدف

مطابق با شکل ۵، این مکانیزم شامل دو مکانیزم چهار میله-ای OABC و پنج میله‌ای لنگ و لغزنده OADE می‌باشد. رابط کوپلر ABD در هر دو مکانیزم مشترک است. مکانیزم چهار میله‌ای، درجه آزادی ماشین دوخت را به یک محدود می‌کند. رابط OA، رابط ورودی مکانیزم و لغزنده E، رابط خروجی مکانیزم می‌باشد.

را برای ساختن فرزندان ترکیب می‌کند تا این که کروموزوم‌های بهتری ایجاد شوند. به طور معمول عمل‌گر ترکیب روی یک جفت از کروموزوم‌ها عمل می‌کند و دو فرزند برای هر جفت تولید می‌شود.

الگوریتم ژنتیک بر خلاف روش‌های سنتی بهینه‌سازی، جستجوی خود را به طور همزمان در چندین نقطه دنبال می‌کند. مجموعه کروموزوم‌هایی که در هر تکرار الگوریتم بررسی و ارزیابی می‌شوند یک نسل نامیده می‌شود. جزئیات روش الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این مقاله، بصورت فلوجارت در شکل ۶ نشان داده شده است.

استفاده می‌شود. در مسأله بهینه‌سازی مورد نظر در این مقاله، افراد مناسب نسل باید کمترین مقدار را برای این تابع ایجاد کنند. سپس به کروموزوم‌های مختلف، که در واقع نمایشگر طراحی‌های مختلف هستند، اجازه داده می‌شود تا در شرایطی مشخص به ترکیب و تولید مثل بپردازند. شرایط ترکیب طوری در نظر گرفته می‌شود که کروموزوم‌های قوی‌تر امکان بیشتری برای بقا بیابند و کروموزوم‌های ضعیف‌تر به تدریج حذف شوند. در واقع توسط عمل‌گر ترکیب (دورگه شدن) اطلاعات مابین کروموزوم‌ها به اشتراک گذاشته می‌شود. این عمل‌گر خصیصه‌های والدین



شکل ۶- فلوجارت الگوریتم ژنتیک

محدوده نفوذ، محدوده بین اولین تماس نوک سوزن با پارچه تا زمانی که چشم سوزن از پارچه خارج شود، می‌باشد. بنابراین تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f = \int_{\varphi_i}^{\varphi_j} |\dot{s}(\varphi_4)| d\varphi_4 \quad (7)$$

پارامترهای φ_i و φ_j زاویه‌های رابط ورودی OA هستند که به ترتیب نشان دهنده موقعیت سوزن در شروع و پایان محدوده نفوذ می‌باشند. این دو زاویه را می‌توان از روابط

۵- بهینه‌سازی مکانیزم جدید

در این قسمت، فرآیند بهینه‌سازی مکانیزم جدید با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی می‌شود. برای این منظور، طول رابط‌های مکانیزم جدید به صورتی تعیین می‌شوند که سرعت سوزن در محدوده نفوذ مینیمم شود.

۵-۱- تعریف مسأله بهینه‌سازی

علاوه بر این شرایط، در جدول ۱ متغیرهای طراحی و محدوده مجاز تغییرات آنها بیان شده است. فرآیند بهینه-سازی در نرم افزار متلب ۲۰۱۱a انجام شده است.

جدول ۱- متغیرهای طراحی و محدوده مجاز تغییرات (ابعاد به میلیمتر می باشند)

متغیرهای طراحی	محدوده پایین	محدوده بالا
r_1	۱۳	۱۸
r_2	۴۳	۵۰
r_3	۴۰	۴۵
r_4	۷	۱۲
r_5	۳۸	۴۲
r_6	۳۷	۴۳
r_7	۳۶	۴۵
H	۱۰	۱۵

توجه به این نکته حائز اهمیت است که زاویه φ_4 به عنوان ورودی مشخص مکانیزم انتخاب شده است و با دوران کامل عضو لنگ با توجه به سرعت زاویه‌ای ثابت عضو ورودی ($\dot{\varphi}_4 = 1 \text{ rad/s}$) در زمانهای مشخص از صفر تا 360° درجه تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، الگوریتم بهینه‌سازی در یک فرآیند تکراری به ازای تمام مقادیر φ_4 بین صفر تا 360° درجه با گام یک درجه اجرا می‌شود. بنابراین، این زاویه جزء متغیرهای بهینه‌سازی محسوب نمی‌شود. همچنین لازم به ذکر است که حدود بالا و پایین جدول ۱ توسط نویسندگان و بر اساس محدودیت‌های موجود در فرآیند ساخت، فضای مورد نیاز و کاربرد مکانیزم محرک سوزن در دستگاه دوخت پیشنهاد شده است. به عنوان مثال، کوچک انتخاب کردن بیش از حد طولها، در ایجاد اتصال بین رابطها مشکل ساز می‌شود. شاخص‌های طراحی دیگری نظیر عدم برخورد رابطها در حین کارکرد مکانیزم، قرارگیری کل مکانیزم در فضای پیش بینی شده موجود، عدم تغییر دامنه حرکت سوزن و ... از جمله مهمترین مواردی هستند که می‌بایست مد نظر قرار گیرند.

سینماتیکی مکانیزم جدید محاسبه کرد. به همین منظور تغییرات موقعیت سوزن با توجه به تغییرات زاویه رابط ورودی در نظر گرفته شده است. به منظور معرفی تابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی، محدودیت‌های زیر برای هندسه مکانیزم باید در نظر گرفته شود:

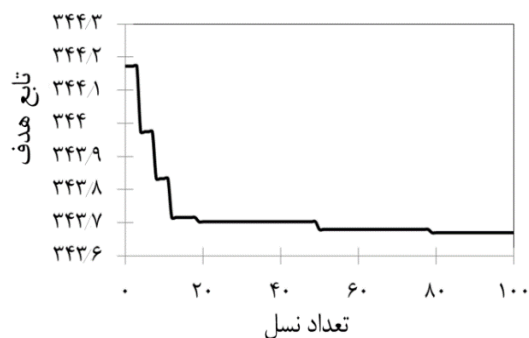
- فاصله بین دو نقطه مرگ بالا و پایین سوزن، با تلرانس کوچک، مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود. این شرط تضمین می‌کند که جابجایی سوزن صرف نظر از تغییرات طول رابطها، ثابت باقی می‌ماند. بدین ترتیب، در هر مرحله از فرآیند بهینه‌سازی، در صورتیکه دامنه حرکت سوزن از محدوده مورد نظر فراتر رود، آن مکانیزم از فرآیند بهینه‌سازی خارج می‌شود.

- قانون گرافش برای مکانیزم OABC باید برقرار باشد. طبق این قانون برای اینکه رابط ورودی (OA) دارای چرخش کامل (360° درجه) باشد، مجموع طول‌های بزرگترین و کوچکترین رابط مکانیزم چهار میله‌ای باید کوچکتر یا مساوی مجموع دو رابط دیگر باشد.

جهت اعمال این قانون در پروسه بهینه‌سازی دو روش وجود دارد. در روش اول، ابتدا چهار طول به صورت تصادفی و رندوم انتخاب می‌شوند. اگر شرط گرافش ارضاء نشود، مجموعه دیگری از طول‌ها در یک فرآیند تکراری و بصورت تصادفی تا ارضاء شرط انتخاب خواهد شد. در روش دوم که کاملاً ابتکاری است و باعث سرعت در فرآیند بهینه‌سازی می‌شود، ابتدا سه طول دلخواه در محدوده مجاز بین مقادیر مینیمم و ماکزیمم جدول ۱ به ترتیب به عنوان طول رابطهای مکانیزم OABC انتخاب می‌شود. بزرگترین و کوچکترین مقدار از میان سه مقدار انتخاب شده، به طول بلندترین و کوتاهترین رابطها اختصاص داده می‌شوند. در مرحله بعد، مقدار چهارم به صورت تصادفی انتخاب می‌شود که علاوه بر اینکه در محدوده مجاز قرار داشته باشد قانون گرافش را نیز ارضاء کند. پس از انتخاب طول چهار رابط، از آنها جهت تعیین طول رابطهای دیگر به منظور کمینه کردن تابع هدف استفاده می‌شود.

ابداع و بهینه‌سازی یک مکانیزم جدید محرک سوزن در ماشین‌های دوخت با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مختلف، به علت طبیعت الگوریتم ژنتیک، کمی متفاوت باشد. در این شکل مقدار تابع هدف بر حسب تعداد تکرار (نسل) بیان شده است و مقدار نهایی آن برابر با $343/67$ mm/s می‌باشد.



شکل ۷- مقدار تابع هدف با توجه به تعداد نسل‌های مختلف

روند کاهش تابع هدف در شکل ۷ از میان جواب‌های بهینه حاصل از حدود ۲۰ بار اجرای الگوریتم بهینه‌سازی با جمعیت اولیه تصادفی بدست آمده است تا دستیابی به بهترین جواب ممکن در هر روش را ضمانت کند. به طور یقین، در هر بار اجرای الگوریتم بهینه‌سازی با جمعیت اولیه تصادفی، امکان عدم دستیابی به مقادیر بهینه یکسان وجود دارد اما برای تضمین همگرایی در هر بار اجرای الگوریتم، تعداد جمعیت مقدار زیادی در نظر گرفته شده است تا فضای جستجو به طور مناسب پوشش داده شود. به همین دلیل، مقدار تابع هدف در اجراهای مختلف به سمت اعداد نزدیک به هم همگرا شده است و لذا تنها یک نمودار به عنوان نمونه آورده شده است.

در ادامه، مقایسه نمودارهای جابجایی، سرعت و شتاب نقطه E (سوزن) از مکانیزم جدید با طول‌های بهینه و نقطه B (سوزن) از مکانیزم لنگ و لغزنده در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. محدوده نفوذ سوزن بین $143^{\circ} \leq \varphi \leq 118^{\circ}$ برای مکانیزم جدید می‌باشد.

در جدول ۲ به پارامترهای الگوریتم ژنتیک مورد استفاده برای مقداردهی اولیه فرآیند بهینه‌سازی اشاره شده است. به دلیل پایین بودن نرخ جهش (میزان تغییرات هر کروموزوم انتخاب شده جهت اعمال جهش) برابر با $0/1$ میزان نهایی درصد جهش اعمال شده در کل جمعیت میزان قابل توجهی نخواهد بود.

جدول ۲- پارامترهای الگوریتم ژنتیک

تعداد تکرار (نسل)	۱۰۰
تعداد جمعیت	۵۰۰۰
درصد ترکیب	۰/۸
درصد جهش	۰/۳
نرخ جهش	۰/۱
تابع هدف	معادله (۷)

۲-۵- نتایج بهینه‌سازی

با اعمال شرایط بهینه‌سازی، بهینه‌سازی مکانیزم جدید توسط نرم‌افزار متلب انجام شد و طول بهینه رابطه‌ها در حالی که تابع هدف مینیمم شده است، بدست آمد. جدول ۳ مقدار بهینه متغیرهای طراحی به ازای مقدار تابع هدف برابر با $343/67$ mm/s را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقدار بهینه متغیرهای طراحی

متغیرهای طراحی	طول بهینه (mm)
I_1	۱۵/۱۸
I_2	۴۵/۸۴
I_3	۴۱/۲۹
I_4	۱۰/۵۵
I_5	۴۰/۸۶
I_6	۳۸/۷۹
I_7	۳۷/۷۸
H	۱۲/۴۷

شکل ۷ نحوه همگرایی الگوریتم ژنتیک را تا رسیدن به حد بهینه پایدار نشان می‌دهد که ممکن است در اجراهای

نقطه خاص در فرآیند دوخت باید مجموع سرعت سوزن در محدوده نفوذ را در نظر گرفت. این مجموع از انتگرال سرعت سوزن در محدوده نفوذ درون پارچه بدست می‌آید. آنها با اصلاح تابع هدف و با روش الگوریتم رقابت استعماری به بهینه‌سازی مکانیزم پیشنهادی پرداختند. محدوده نفوذ سوزن بین $116^{\circ} \leq \varphi \leq 155^{\circ}$ تغییر یافت. ابراهیمی و پیوندی با مقایسه نتایج بهینه خود نسبت به کار گوتلیه و همکاران نشان دادند که مجموع سرعت سوزن در محدوده نفوذ بهبود یافته است.

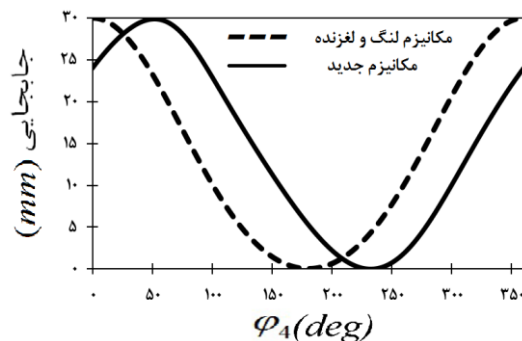
جدول ۴ مقدار مجموع سرعت سوزن را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقدار این پارامتر در مکانیزم پیشنهادی این مقاله از مکانیزم لنگ و لغزنده و مکانیزم پیشنهادی گوتلیه و همکاران کمتر است و خیلی نزدیک به نتیجه بهینه‌سازی همان مکانیزم با روش الگوریتم استعماری [۱۵] می‌باشد.

جدول ۴- مقایسه نتایج بهینه‌سازی سرعت سوزن

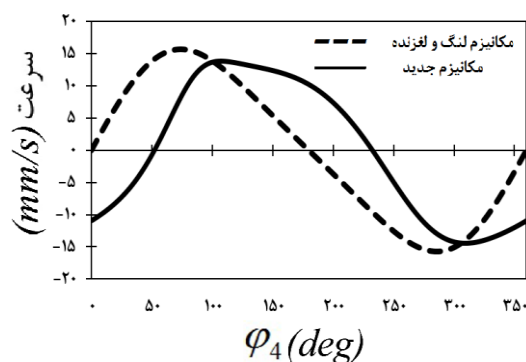
مجموع سرعت سوزن (mm/s)	نوع مکانیزم و روش بهینه‌سازی
۳۵۵/۸۶	مکانیزم لنگ و لغزنده
۳۴۸/۷۱۶	مکانیزم گوتلیه با روش SQP [۷]
۳۴۳/۷۱۶۳	مکانیزم گوتلیه با الگوریتم استعماری [۱۵]
۳۴۳/۶۷	مکانیزم جدید با الگوریتم ژنتیک

۶- بهینه‌سازی همزمان سرعت و جرک سوزن

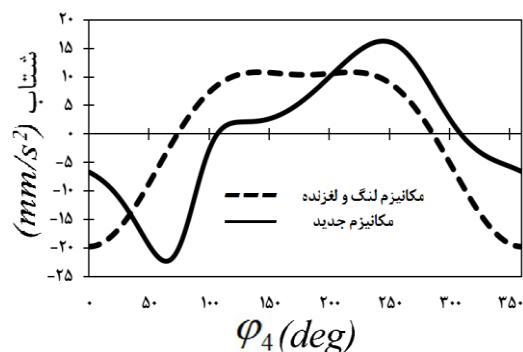
بهبود سرعت سوزن در [۷] باعث تغییرات بیشتر شتاب شده بود که ممکن است منجر به ارتعاشات نامطلوب در ماشین دوخت شود. این نکته به عنوان یک مشکل مهم در آن مقاله ذکر شده است، اما هیچ راه حلی برای برخورد با این مورد پیشنهاد نشده است. برای حل این مشکل باید تابع هدف در بهینه‌سازی اصلاح شود تا تغییرات شتاب



شکل ۸- تغییرات جابجایی سوزن



شکل ۹- تغییرات سرعت سوزن



شکل ۱۰- تغییرات شتاب سوزن

همانطور که قبلاً اشاره شد گوتلیه^{۱۰} و همکاران در [۷] مکانیزم جدیدی به جای مکانیزم لنگ و لغزنده در ماشین دوخت پیشنهاد کردند. آنها در فرآیند بهینه‌سازی، تابع هدف را سرعت یک نقطه خاص در نظر گرفته و سرعت آن نقطه را سرعت نفوذ سوزن در پارچه معرفی کرده‌اند. ابراهیمی و پیوندی در [۱۵] با در نظر گرفتن همان مکانیزم پیشنهادی به این نتیجه رسیدند که به جای سرعت یک

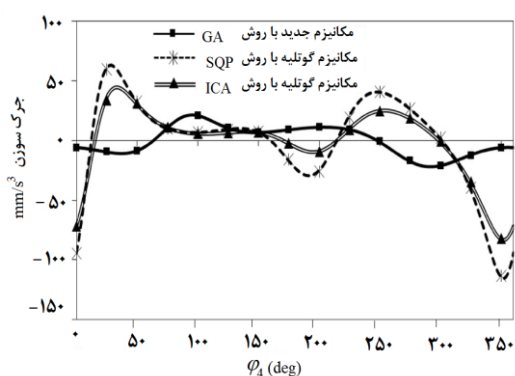
ابداع و بهینه‌سازی یک مکانیزم جدید محرک سوزن در ماشین‌های دوخت با استفاده از الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA)، مکانیزم پیشنهادی گوتلیه و همکاران با روش SQP [۷]، و مکانیزم بهینه شده با استفاده از روش الگوریتم استعماری (ICA) [۱۵] را نشان می‌دهد. نتایج بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای مکانیزم جدید باعث کاهش ۶۵٪ جرک سوزن نسبت به نتایج کار گوتلیه و همکاران، و کاهش ۴۶٪ نسبت به نتایج الگوریتم استعماری شده است.

جدول ۶- مقایسه نتایج سرعت و جرک سوزن

روش بهینه‌سازی	سرعت mm/s	جرک mm/s ³
مکانیزم گوتلیه با روش SQP	۳۴۸/۷۱۶	۱۹۸۰۳۱/۰۵۸۲
[۷]		
مکانیزم گوتلیه با روش ICA	۳۴۳/۸۶۳۷	۱۲۶۵۸۶/۰۹۸۳
[۱۵]		
مکانیزم جدید با روش GA	۳۴۳/۷۴۵	۶۸۱۴۴/۴۱۰۳

شکل ۱۱ تغییرات جرک سوزن حاصل از هر سه روش ذکر شده فوق را در مدت زمان یک دور کامل رابط ورودی نشان می‌دهد. نتایج حاصل کارآیی مکانیزم پیشنهادی را در رسیدن به اهداف مورد نظر به خوبی تبیین می‌کند.



شکل ۱۱- تغییرات جرک سوزن

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، پس از معرفی یک مکانیزم جدید محرک سوزن به جای مکانیزم لنگ و لغزنده کلاسیک در ماشین

سوزن که به عنوان جرک تعریف می‌شود، کمینه شود. بنابراین، تابع هدف جدید شامل مجموع سرعت سوزن (\dot{s}) در محدوده نفوذ و مجموع جرک سوزن (\ddot{s}) در یک چرخش کامل رابط ورودی، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$f = W_1 \int_{\phi_4}^{\phi_4} |\dot{s}(\phi_4)| d\phi_4 + W_2 \int_0^{2\pi} |\ddot{s}(\phi_4)| d\phi_4 \quad (۸)$$

ضرایب وزنی W_1 و W_2 باید به نحوی انتخاب شوند که سهم هر کدام از توابع هدف در رسیدن به مکانیزم بهینه یکسان باشد. در واقع هر کدام از قسمت های تابع هدف باید در یک ضریب وزنی (با واحد مشخص) ضرب شوند تا هم از لحاظ دیمانسیون قابل جمع باشند و هم از لحاظ مقدار هر کدام از قسمتهای تابع هدف به صورتی در مقدار کل تابع هدف تأثیر گذار باشند. بدین ترتیب فرآیند بهینه سازی با سرعت و دقت لازم به جواب بهینه همگرا می‌شود. بر این اساس، در این تحقیق مقادیر W_1 و W_2 به ترتیب برابر با ۱۰ و ۱ انتخاب شده اند.

بهینه‌سازی با همان شرایط قبل انجام شد. طول رابط‌های بهینه مکانیزم با تابع هدف اصلاح شده در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- مقدار بهینه متغیرهای طراحی با تابع هدف اصلاح شده

متغیرهای طراحی	طول بهینه (mm)
r_1	۱۷/۹۷
r_2	۴۹/۷۵
r_3	۴۳/۳۰
r_4	۹/۸۰
r_5	۳۹/۲۱
r_6	۴۰/۰۹
r_7	۴۲/۵۰
H	۱۲/۸۹

جدول ۶ مجموع سرعت سوزن در محدوده نفوذ و مجموع جرک سوزن در یک چرخش کامل رابط ورودی حاصل از بهینه‌سازی مکانیزم پیشنهادی در این مقاله با استفاده از

از بهینه‌سازی مکانیزم گوتلیه و همکاران با استفاده از SQP بهبود قابل توجهی حاصل شده است. همچنین، نسبت به بهینه‌سازی همان مکانیزم با روش الگوریتم استعماری سرعت سوزن اندکی کاهش یافت. در مورد جرک حرکتی سوزن در مکانیزم جدید نسبت به هر دو روش قبل، بهبود قابل توجهی حاصل شد که این مورد به وضوح، کارایی و قابلیت اطمینان مکانیزم پیشنهادی مورد نظر در این مقاله را براساس فرآیند بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک توجیه می‌کند.

دوخت، به بهینه‌سازی سرعت سوزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته شد. پیشنهاد یک مکانیزم جدید و مقایسه نتایج روش مورد نظر این مقاله با کارهای مشابه دیگر از جمله اهداف این مقاله بود. برای این منظور، ابتدا یک تابع هدف برای سرعت سوزن در محدوده نفوذ تعریف شد و سپس برای اطمینان از حرکت یکنواخت سوزن در فرآیند دوخت یک تابع هدف اصلاح شده شامل سرعت سوزن در محدوده نفوذ و جرک حرکتی سوزن در یک چرخش کامل رابط ورودی ارائه شد. مشاهده شد که سرعت سوزن در محدوده نفوذ در مکانیزم جدید، در مقایسه با نتایج حاصل

۸- مراجع

- [1] Mallet, E., Ruxu, D. (1999). "Finite Element Analysis of Sewing Process". International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 11, pp. 19-36.
- [2] Xidong, C., Yingyi, J. (1997). "Drawing Press with Intermittent Mechanism Optimization Design and the Vector Triangle Method". Journal of Tianjin College of Light Industry, pp. 28-33.
- [3] Rao, A. (1980). "Optimum Synthesis of a Slider-Crank Mechanism Using Geometric Programming". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.15, pp. 1595-1602.
- [4] Yupeng, H., Sheng, T., Jun, W. (2004). "Numerical Simulation of Low-speed Stamping-punch Characteristics of Mechanical Press". First Forging Equipment Manufacturing Technology Forum, Eight Session of the Academic Research of the Forging Equipment Committee and Product Information Exchange Conference. Guangzhou, pp. 88-89.
- [5] Lin, J., Huang, M. (2005) "Dimension Synthesis for Higher-Order Kinematic Parameters and Self-Adjustability Design of Planar Linkage Mechanisms". ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, California, USA, September 24-28.
- [6] Kostić, M., Čavić, M., Zlokolica, M. (2007). "About Optimal Synthesis of Complex Planar mechanism". 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June 18-21.
- [7] Gotlih, K. Lojen, D.Z. Vohar, B. (2007). "Optimisation of Needle Penetration Velocity Using the Link Drive Mechanism in a Sewing Machine". Fibres and Textiles in Eastern Europe, Vol. 15, pp. 66.
- [8] Zhao, Y., Qi, R., Zhao, Y. (2009). "Dimensional Synthesis of a Slider-Crank Mechanism Based Heavy-Load Positioner". International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. ICMTMA'09, Zhangjiajie, Hunan, April 11-12.
- [9] Erkaya, S., Uzmay, İ. (2009). "Optimization of Transmission Angle for Slider-Crank Mechanism with Joint Clearances". Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 37, pp. 493-508.
- [10] Qu, E.G., Zhang, H.P. (2012). "Optimization Design and Motion Simulation of Offset Slider-Crank Mechanism". Advanced Materials Research, Vol. 403, pp. 4216-4220.
- [11] Kao, C.C. (2012). "Optimal Design and Control of a Slider-Crank Mechanism System". Advanced Materials Research, Vol. 487, pp. 608-612.
- [12] Wu, Y., Zhou, X. (2012). "Modeling and Optimization Research of a Planar Six Bar Mechanism". Applied Mechanics and Materials, Vol. 215, pp. 921-925.

- [13] Sun, W., Wang, S.m., Ren, T., Qu, W.T. (2013). "Static Analysis and Optimization of the Slide's Structure of Slider-Crank Type Cluster well Pumping Unit (SCTCWPU)". *Advanced Materials Research*, Vol. 694, pp. 284-287.
- [14] Wang, X. (2013). "The Optimization Design of Six-bar Linkage Mechanism". *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 11, pp.4091-4098.
- [15] Ebrahimi, S., Payvandy, P. (2013). "Optimization of the Link Drive Mechanism in a Sewing Machine Using Imperialist Competitive Algorithm". Accepted for publication in the "International Journal of Clothing Science and Technology".
- [16] Hurt, F.N., Tyler, D.J. (1973). "Influence of Fabric Finishing Conditions on Sewing Needle Temperature". *Clothing Research Journal*, Vol. 1, pp. 47-52.
- [17] Qinwen, L., Evangelos, L., Hui-Jun, Z., Du, R. (2001). "A Study on the Needle Heating in Heavy Industrial Sewing - Part 1: Analytical Models". *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 13 pp. 87-105.
- [18] Qinwen, L., Evangelos, L., Dan, S., Du, R. (2001). "A Study on the Needle Heating in Heavy Industrial Sewing - Part 2: Finite Element Analysis and Experiment Verification". *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 13 pp. 351-367.
- [19] Mccell, J. (2005). "Genetic Algorithm for Modeling and Optimization". *Journal of Computational and Optimization*, Vol. 184, pp. 205-222.
- [20] Haupt, R. L., Haupt, S.E. (2004), "Practical Genetic Algorithms". John Wiley & Sons, Second Edition.

۹- ضمیمه

۹-۱- ضمیمه الف (مکانیزم لنگ و لغزنده)

معادلات حلقه بسته در شکل (۱) به صورت زیر می‌باشد:

$$\vec{r}_2 + \vec{r}_3 - \vec{r}_1 = \vec{0}$$

با استفاده از تجزیه بردارها φ_3 بدست می‌آید:

$$r_2 \sin(\varphi_2) + r_3 \sin(\varphi_3) - e = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_3 = \sin^{-1}\left(\frac{e - r_2 \sin(\varphi_2)}{r_3}\right)$$

با مشتق‌گیری از رابطه بالا $\dot{\varphi}_3$ بدست می‌آید:

$$\dot{\varphi}_3 = -\left(\frac{r_2 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2)}{r_3 \cos(\varphi_3)}\right)$$

با ادامه مشتق‌گیری، شتاب زاویه‌ای به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\ddot{\varphi}_3 = \frac{A + B + C}{D} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} A = r_3 \dot{\varphi}_3 \sin(\varphi_3) \\ B = r_2 \dot{\varphi}_2 \sin(\varphi_2) \\ C = -r_2 \dot{\varphi}_2 \cos(\varphi_2) \\ D = r_3 \cos(\varphi_3) \end{cases}$$

۹-۲- ضمیمه ب (مکانیزم جدید)

• محاسبه φ_3 و φ_5

با در نظر گرفتن مکانیزم چهار میله‌ای شکل (۵) و نوشتن معادلات حلقه بسته به صورت زیر

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_6 + \vec{r}_7 - \vec{r}_4 = \vec{0}$$

و با حل این معادله برداری زاویه φ_6 به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\varphi_6 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1} \right) \Rightarrow \begin{cases} K_1 = C - A \\ K_2 = 2B \\ K_3 = C + A \end{cases}$$

که در آن

$$A = -2r_4r_6 \cos(\varphi_4); \quad B = -2r_4r_6 \sin(\varphi_4) + 2r_6r_7$$

$$C = r_4^2 + r_6^2 + r_7^2 - r_1^2 - 2r_4r_7 \sin(\varphi_4)$$

با نوشتن معادلات حلقه بسته مکانیزم لنگ و لغزنده روابط زیر حاصل می‌شود:

$$r_3 \cos(\varphi_3) + r_4 \cos(\varphi_4) + r_5 \cos(\varphi_5) - H = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_3 = \cos^{-1} \left(\frac{H - r_4 \cos(\varphi_4) - r_5 \cos(\varphi_5)}{r_3} \right)$$

سپس با نوشتن معادلات حلقه بسته برای رابط کوپلر ABD رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\varphi_5 = \varphi_6 + \varphi_{56}$$

$$\text{که در آن } \varphi_{56} = \cos^{-1} \left(\frac{r_2^2 - r_5^2 - r_6^2}{2r_5r_6} \right) \text{ می‌باشد.}$$

• محاسبه $\dot{\varphi}_3$ و $\dot{\varphi}_5$

با استفاده از تجزیه و تحلیل سرعت مکانیزم چهار میل‌های، سرعت‌های زاویه‌ای $\dot{\varphi}_5$ و $\dot{\varphi}_6$ به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\dot{\varphi}_5 = \dot{\varphi}_6 = \frac{r_4 \dot{\varphi}_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_1)}{r_6 \sin(\varphi_6 - \varphi_1)}$$

به منظور بدست آوردن سرعت زاویه‌ای $\dot{\varphi}_3$ کافیت از معادله حلقه بسته مکانیزم لنگ و لغزنده مشتق بگیریم:

$$\dot{\varphi}_3 = - \frac{r_4 \dot{\varphi}_4 \sin(\varphi_4) + r_5 \dot{\varphi}_5 \sin(\varphi_5)}{r_3 \sin(\varphi_3)}$$

• محاسبه $\ddot{\varphi}_3$ و $\ddot{\varphi}_5$

با استفاده از تجزیه و تحلیل شتاب مکانیزم چهار میل‌های خواهیم داشت:

$$\ddot{\varphi}_5 = \ddot{\varphi}_6 = \frac{K}{r_6 \sin(\varphi_1 - \varphi_6)} \quad \Rightarrow \quad K = \ddot{\varphi}_4 (A_1 B_1 - C_1 D_1) + E - F$$

که در آن

$$A_1 = r_4 \cos(\varphi_4); \quad B_1 = \sin(\varphi_1); \quad C_1 = r_4 \sin(\varphi_4); \quad D_1 = \cos(\varphi_1)$$

$$E = r_4 \dot{\varphi}_4 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_4) \cos(\varphi_4 - \varphi_1); \quad F = r_6 \dot{\varphi}_6 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_6) \cos(\varphi_1 - \varphi_6)$$

و در نهایت $\ddot{\varphi}_3$ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\ddot{\varphi}_3 = \frac{A_2 - B_2 - C_2}{r_3 \sin(\varphi_3)} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} A_2 = r_4 (\ddot{\varphi}_4 \sin(\varphi_4) + \dot{\varphi}_4^2 \cos(\varphi_4)) \\ B_2 = r_5 (\ddot{\varphi}_5 \sin(\varphi_5) + \dot{\varphi}_5^2 \cos(\varphi_5)) \\ C_2 = r_3 \dot{\varphi}_3^2 \cos(\varphi_3) \end{cases}$$