

## بررسی تجربی تاثیر پارامترهای عملیات تنش زدایی بر کاهش طول آزاد فنرهای آستنییتی در اثر بار گذاری متناوب

ياسر مغانی قهرمانلویی<sup>۱</sup>، مهدی احمدی نجف آبادی<sup>۲</sup> و سیروس آقاجفیی<sup>۳</sup>  
Yaser.moghani@gmail.com

### چکیده

پس از تولید فنرها تنش های پسماند مختلفی در سطح داخلی و خارجی مفتول فنر تولید می شود. بعضی از این تنش های پسماند از جمله تنش های پسماند فشاری مفید و بعضی دیگر مضر می باشند. اثرات این تنش ها باعث می شوند فنرها هنگام بارگذاری متناوب دچار افت طول و افت تنش (spring relaxation) شوند. برای بررسی این موضوع در این تحقیق ابتدا دستگاه تستی با فرکانس ۰/۵ هرتز ساخته شد، در ادامه با ایده گیری از مکانیزم عملکرد دستگاه تقسیم فرز و مکانیزم عملکرد بادامک، فیکسچری جهت تعیین مقدار جابجایی فنر در تست و میزان حداقل فشردگی فنر در طول کلیه مراحل تست فنر طراحی و ساخته شد. در ادامه فنرهای ساخته شده تحت عملیات حرارتی تنش زدایی با نرخ های مختلف دمایی و زمانی قرار گرفتند. فنرهای حاصل از تنش زدایی به وسیله تستر ساخته شده تحت بارگذاری دینامیکی قرار گرفتند و طول آزاد آنها پس از ۱۰۰۰۰ سیکل کاری اندازه گیری شد. با بررسی نتایج حاصل از این تست، تاثیر تغییرات دما و زمان عملیات تنش زدایی بر کاهش طول آزاد فنرها مورد بررسی قرار گرفت. معادله تقریبی درجه یک و دو حاکم بر داده های آزمایش استخراج شد و در نهایت عملیات تنش زدایی بهینه بدست آمد.

### کلیدواژه:

فنر - تنش زدایی - دما - زمان - کارکرد دینامیکی - افت تنش - طول فنر

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

## ۱- مقدمه

فنرها اجزای مکانیکی هستند که برای اعمال نیرو، ایجاد انعطاف پذیری و ذخیره یا جذب انرژی در ماشین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. در طی ساخت فنرهای مارپیچی فشاری (پیچیدن در حالت سرد)، تغییر شکل پلاستیک و تنش زیادی تولید می‌شود. هنگامی که پروسه ساخت فنر به اتمام رسید، این تنش‌های دائمی، تنش‌های پسماندی در فنر تولید می‌کنند که عمر خستگی و کارایی فنر را هنگام عملکرد کاهش می‌دهد. در این حین، تنش پسماند کششی و تنش پسماند فشاری در سطح داخلی و خارجی فنر تولید می‌شوند، که علت آن تغییر شکل پلاستیک یکنواخت در طی ساخت فنرهای پیچیده شده در حالت سرد است [۲]. نتیجه‌ای که از بررسی مقالات و تحقیقات مختلف بدست آمده است، بیان می‌کند که تنش پسماند فنر، یکی از مهمترین پارامترهای فیزیکی در طی مراحل مختلف تولید فنر است. فهم و کنترل وضعیت تنش پسماند در طول پروسه‌های مختلف تولید فنر، معادل کنترل مقاومت در برابر خستگی، مقاومت در برابر افت تنش و مقاومت در برابر تغییر شکل فنر می‌باشد [۳].

از آنجایی که تنش‌های پسماند کششی باعث ایجاد ترک و رشد آن می‌شوند، تاثیرات نامطلوب آنها برای ما شناخته شده می‌باشد [۴] و [۵]. تنش پسماند کششی و پسماند فشاری تحت تاثیر پروسه‌های مختلف از قبیل عملیات حرارتی تنش زدایی یا ساچمه زنی دچار تغییر می‌شود [۶]. هنگامی که عملیات حرارتی بر روی فنر فرم داده شده انجام می‌شود، تنش پسماند بسته به دما و زمان عملیات حرارتی کاهش می‌یابد، اما به طور کلی از بین نمی‌رود. دمای عملیات تنش زدایی، نباید از مقداری بیشتر باشد، افزایش بیش از حد دما و زمان، حتی آثار نامطلوب هم می‌تواند در پی داشته باشد [۲]. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد، این است که، بعضی مواقع نگهداشتن فنر در کوره حرارتی، ممکن است پروسه تنش زدایی را خیلی پر هزینه کند [۷] و [۸].

فنرها هنگام کارکرد ممکن است با عیوب مختلفی مواجه شوند، یکی از این عیوب افت تنش فنر می‌باشد. افت تنش کاهش ثابت فنر یا طول آزاد فنر می‌باشد. افت تنش هنگامی روی می‌دهد که فنر در معرض نیروهای تناوبی یا در معرض یک نیروی ثابت قرار گرفته باشد [۲]. در بعضی از مصارف خاص نیروی حاصل از فشردگی فنر هنگام کارکرد آن از اهمیت فراوانی برخوردار است. لذا لازم است، به طور مختلف کاهش نیروی فنر، کنترل شود [۹]. افت تنش فنرهای کششی در محیط‌های با دماهای مختلف توسط دی‌خوزین و ریپنو [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت، نتایج این تحقیق حاکی از این بود که در دماهای کاری بالا، درصد افت تنش بیشتر است. دلانو ویزکایا و

ریپو گونزالس [۲] نیز افت ثابت فنر را برای چند فنر محدود تنش زدایی شده در دما و زمان‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند، و به این نتیجه رسیدند که دمای تنش زدایی و زمان آن بر روی افت تنش فنر موثر است. آنها همچنین با اندازه‌گیری تنش پسماند فنرها قبل و بعد از تنش زدایی نشان دادند که تغییرات دما و زمان تنش زدایی منجر به نرخ‌های متفاوت تغییر تنش پسماند کششی شده، و نتیجه‌گیری کردند که افت بیشتر تنش پسماند کششی، منجر به کاهش افت ثابت فنر می‌شود. به علت محدود بودن تست‌های انجام گرفته رابطه مشخصی بین دماها حاصل نشد. تغییرات تنش پسماند فنرهای تنش زدایی شده و ساچمه زده شده نیز در مرجع شماره [۷] مورد بررسی قرار گرفت، اما افت تنش در این تحقیق نشان داده نشد و نتیجه حاصل، نشان دهنده کاهش تنش پسماند فشاری طی تنش زدایی و افزایش آن طی ساچمه زنی بود. بیشتر تحقیقاتی که تا به حال در رابطه با فنر انجام شده، راجع به خستگی و شکست فنرها بوده، یا در مورد تغییرات تنش پسماند طی پروسه‌های انجام گرفته بوده است، در این تحقیق با آگاهی از این که دما و زمان عملیات تنش زدایی بر روی تنش پسماند فنر موثر است و تنش پسماند در رابطه با افت تنش می‌باشد، رابطه عملیات حرارتی تنش زدایی با کاهش نیروی فنر یا به بیان دیگر افت تنش فنر، در اثر نیروهای دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت.

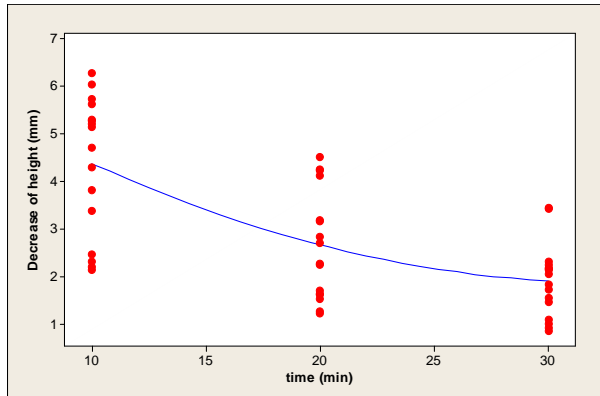
## ۲- کار عملی و تجربی

برای این تحقیق متریال فنر، از جنس فولاد آستنیتی S.S. 304 انتخاب شد. مقاومت این نوع مواد فنی در مقابل خوردگی فوق العاده می‌باشد و از دمای زیر صفر تا دمای ۲۹۰ درجه سانتیگراد قابلیت استفاده دارند [۹]. در مرحله بعد با استفاده از دستگاه CNC مخصوص تولید فنر، ۵۰ عدد فنر چپگرد با قطر مفتول ۴ mm، قطر داخلی ۱۷ mm، طول آزاد ۶۲ mm تعداد حلقه‌های فعال ۷ ساخته شد. دو انتهای فنرهای ساخته شده با استفاده از دستگاه مخصوص سنگ زنی فنرها، سنگ زده شد، به نحوی که دو انتهای فنر سنگ خورده، کاملاً نسبت به هم موازی باشند.

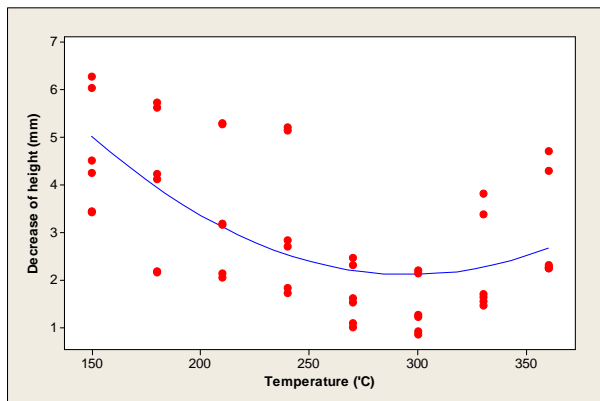
در مرحله بعد، فنرهای ساخته شده، تحت بازرسی قرار گرفت تا اولاً از لحاظ ابعادی کاملاً درست باشند، ثانیاً در اثر سنگ زنی دو انتهای فنر دچار سوختگی نشده باشند و دارای پلیسه نباشند. برای بررسی تاثیر عملیات حرارتی تنش زدایی روی افت طول فنر، به تعداد مورد نیاز از فنرهای ساخته شده، که دارای ابعاد و متریال همسان بودند انتخاب شد. در ادامه برای تست دینامیکی فنرها دستگاه تستی که شامل موتور محرک و گیربکس و سیستمی جهت انتقال چرخش

اندازه‌گیری نرخ کاهش طول فنرهای ۳۰ دقیقه حرارت دیده در شکل (۵) نشان داده شده است.

شکل (۶) نیز نرخ کاهش طول را در طی ۱۰۰۰۰ سیکل برای فنرهای ۳۰ دقیقه حرارت دیده نشان می‌دهد.



شکل (۲): پراکندگی آماری کاهش طول نسبت به مدت زمان تنش زدایی و گراف مربوط به آن



شکل (۳): پراکندگی آماری کاهش طول نسبت به دمای تنش زدایی و گراف مربوط به آن

پس از استخراج نتیجه آزمایش، معادله تقریبی درجه یک حاکم بر این داده‌ها بین پارامترهای دما و زمان عملیات تنش زدایی مطابق معادله (۱)، معادله تقریبی درجه دو حاکم بر این داده‌ها مطابق معادله (۲) می‌باشد.

معادله (۱)

$$\text{Decrease of Height} = 8.2909 - 0.01114(\text{Temp.}) - 0.12344(\text{Time})$$

معادله (۲)

$$\text{Decrease of Height} = 18.09 - 0.08051(\text{Temp.}) - 0.3152(\text{Time}) + 0.000136(\text{Temp.})^2 + 0.004794(\text{Time})^2$$

موتور به گیربکس بود ساخته شد که دارای فرکانس ۰/۵ هرتز برای عملیات تست بود.

مساله بعدی که باید بررسی می‌شد، ساخت و طراحی سیستمی جهت تعیین مقدار جابجایی فنر در تست و میزان حداقل فشردگی فنر در طول کلیه مراحل تست فنر بود. بدین منظور با ایده‌گیری از مکانیزم عملکرد دستگاه تقسیم دستگاه فرز و مکانیزم عملکرد بادامک، فیکسچری طراحی و ساخته شد، در مرحله بعد فیکسچری با دو میله راهنما ساخته شد، که قابلیت سوار شدن ۳ فنر را به طور همزمان داشته باشد. بعد از ساخت تستر فنر، فنرها تحت ۲۴ نوع عملیات تنش زدایی مختلف قرار گرفتند. بدین صورت که فنرها تحت درجه حرارت‌های ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰، ۲۴۰، ۲۷۰، ۳۰۰، ۳۳۰ و ۳۶۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه، تنش زدایی شدند. در این تحقیق تکرار در نظر گرفته شد تا در صد خطا پایین آمده، همچنین تاثیر عوامل جانبی به حداقل برسد.

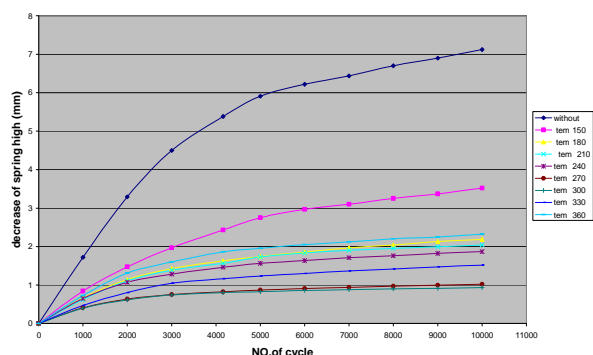
در ادامه فنرهای تنش زدایی شده داخل فیکسچر ساخته شده قرار گرفت و مطابق شکل (۱) زیر میل بادامک دستگاه تستر قرار گرفت. دستگاه تست طوری تنظیم شد که، فنرها دارای کورس حرکت ۱۵ mm و پیش فشردگی برابر ۱۰ mm باشند، در ادامه آزمایش در پایان ۱۰۰۰۰ سیکل کاری مقدار افت طول فنرها برای تحلیل آنها، یادداشت شدند. در این بین برای بررسی نرخ کاهش طول فنرها، فنرهایی که به مدت زمان ۳۰ دقیقه تنش زدایی شده بودند، هر ۱۰۰۰ سیکل از تستر خارج شده و طول آنها یادداشت شد.



شکل (۱): دستگاه تستر فنر و فیکسچر مربوطه

### ۳- بحث و بررسی

پس از اندازه‌گیری‌های انجام گرفته، پراکندگی آماری کاهش طول نسبت به مدت زمان تنش زدایی و گراف مربوط به آن مطابق شکل (۲) و پراکندگی آماری کاهش طول نسبت به دمای تنش زدایی و گراف مربوط به آن مطابق شکل (۳) می‌باشد. نتایج کلی این تحقیق که بیانگر تاثیر دما و مدت زمان تنش زدایی می‌باشد در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین پراکندگی آماری داده‌های



شکل (۶): کاهش طول آزاد فنرهای تنش زدایی شده در درجه حرارت های مختلف نسبت به تعداد سیکل

برای بررسی صحت معادله های بدست آمده از نتایج آزمایش ، فتری به مدت ۳۰ دقیقه و تحت دمای ۲۷۰ درجه تحت عملیات تنش زدایی قرار گرفت . فتر حاصل تحت ۱۰۰۰۰ سیکل کاری قرار گرفت. کاهش صورت گرفته برابر  $1/0.8$  mm بود . اما پیش بینی معادله ۱ برابر  $2/21278$  mm و پیش بینی معادله ۲ برابر  $1/1253$  mm می باشد . این مساله دقت بیشتر معادله (۲) را نشان می دهد، که با تقریب خوبی نتیجه عملیات حرارتی را نشان می دهد.

#### ۴- بررسی نتایج و نتیجه گیری

۱- افزایش درجه حرارت تنش زدایی، منجر به کاهش افت طول آزاد فتر طی سیکل های کاری می شود، اما افزایش بیش از حد دمای تنش زدایی، تاثیر منفی دارد و در نتیجه باعث افزایش افت طول فتر می شود، دمای بهینه تنش زدایی ۳۰۰ درجه سانتیگراد می باشد.

۲- افزایش مدت زمان تنش زدایی، منجر به کاهش افت طول آزاد فتر طی سیکل های کاری می شود. بهترین نتیجه در مدت زمان ۳۰ دقیقه بدست می آید.

۳- تاثیر پارامتر زمان، بیشتر از دما می باشد. که این مساله با توجه به کنترل راحت تر زمان عملیات نسبت به دما، مزیتی برای کنترل فرآیند می باشد.

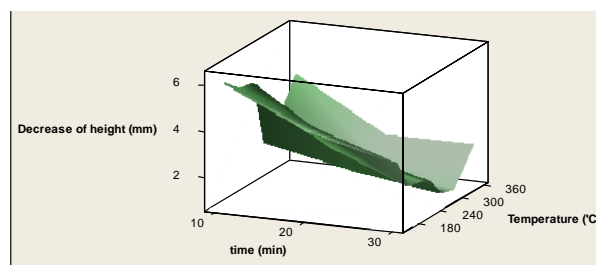
۴- هر چند عملیات حرارتی های مختلف، نتایج متفاوتی از لحاظ کاهش طول آزاد فتر در پی داشته اند، اما این فنرها تحت نرخ تقریباً مشابهی کاهش طول داشته اند.

۵- فنرهای با عملیات های تنش زدایی مختلف، در ساعات اولیه آزمایش، بیشترین افت طول را داشته اند، که این مساله مستقل از نوع عملیات تنش زدایی می باشد.

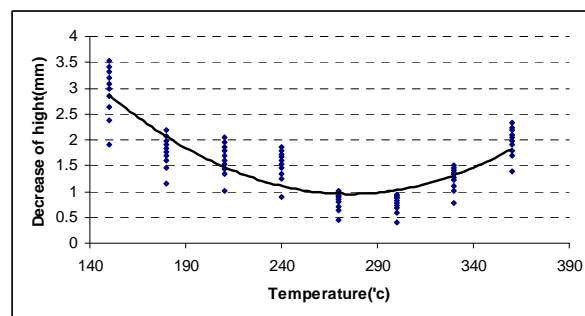
بررسی داده های این آزمایش و معادله های حاکم بر این نتایج (۱ و ۲) بیانگر تاثیر بیشتر پارامتر زمان نسبت به دما می باشد که با توجه به کنترل راحت تر و آسان تر پارامتر زمان، رسیدن به نتیجه مورد نظر، راحت تر می باشد.

بررسی داده های این تحقیق و معادله حاکم بر آن، نشان می دهد که با افزایش مدت زمان عملیات تنش زدایی افت طول فنرها در اثر کارکرد دینامیکی کاهش پیدا کرده است.

همچنین افت طول فنرها در اثر نیروی دینامیکی، با افزایش دمای تنش زدایی تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد کاهش می یابد، اما بعد از آن با افزایش دمای تنش زدایی تا ۳۶۰ درجه سانتیگراد، افت طول فنر، افزایش یافته است.



شکل (۴): تاثیر دما و مدت زمان تنش زدایی بر کاهش طول فنر



شکل (۵): پراکندگی آماری کاهش طول نسبت به دما تنش زدایی و گراف مربوط به آن برای فنرهای ۳۰ دقیقه حرارت دیده

بررسی شکل (۶) مربوط به عملیات های تنش زدایی ۳۰ دقیقه ای نشان می دهد که در عملیات های مختلف تنش زدایی، کاهش طول فتر بیشتر در ساعات اولیه آزمایش روی می دهد و کاهش طول فنرها در ادامه تقریباً حالت میرایی به خود می گیرد. همچنین افت طول فنرها در اثر نیروی دینامیکی، با افزایش دمای تنش زدایی تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد کاهش می یابد، اما بعد از آن با افزایش دمای تنش زدایی تا ۳۶۰ درجه سانتیگراد، افت طول فنر، افزایش می یابد.

## ۵- مراجع

- [6] J. Matejcek, P.C. Brand, A.R. Drews, A. Krause, C. Lowe-Ma, "Residual stresses in cold-coiled helical compression springs for automotive suspensions measured by neutron diffraction", *Materials Science and Engineering*, A 367, pp. 306-311, 2004.
- [7] H. Carlson, *Spring Designer's Handbook*, New York Marcel Dekker, 1978.
- [8] SAE Spring Committee, *Spring Design Manual*, Society of Automotive Engines, UAS 1990.
- [9] Y. Yamada, *Materials for Springs*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [10] R.C. Dykhuizen and C.V. Robino, "Load Relaxation of Helical Extension Springs in Transient Thermal Environments", ASM International, 2004.
- [1] J. E. Shigley, *Mechanical Engineering Design*, New York McGraw-Hill, 1998.
- [2] L. Del Llano-Vizcaya, C. Rubio-Gonzalez, G. Mesmacque and A. Banderas-Hernández, "Stress relief effect on fatigue and relaxation of compression springs", *Materials and Design* Vol, 28, pp. 1130-1134, 2007.
- [3] R. Wang, "Review on the Residual Stress in through the Course of Manufacture Technique for Cold Formed Coil Spring", Institute of Aeronautical Materials, Beijing, China, 2006.
- [4] F. Artaraz, S. Sañchez Beitia, "An unsuitable residual stress state in train springs originated by shot peening", *Int J Fatigue*, Vol. 13(2), pp. 165-8, 1991.
- [5] M. T. Todinov, "Residual, stresses at the surface of automotive suspension springs", *J Mater Sci* 2000;35:3313-20.