



## Investigation of Temperature Variation Effect in $-100^{\circ}\text{C}$ to $100^{\circ}\text{C}$ on the Behavior of Torsion Springs

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Ehsani Z.<sup>1</sup> MSc,  
Jahani K.<sup>2\*</sup> PhD,  
Marzroudi P. A.<sup>3</sup> MSc

#### How to cite this article

Ehsani Z, Jahani K, Marzroudi P A. Investigation of Temperature Variation Effect in  $-100^{\circ}\text{C}$  to  $100^{\circ}\text{C}$  on the Behavior of Torsion Springs. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(5):307-314.

<sup>1</sup> Department of Mechanical engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

<sup>2</sup> Department of Mechanical engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

<sup>3</sup> Space Thrusters Research Institute, Tabriz, Iran.

#### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Phone: -

Fax: -

ka\_jahani@tabrizu.ac.ir

#### Article History

Received: December 13, 2020

Accepted: February 20, 2021

ePublished: April 19, 2021

### ABSTRACT

Nowadays, torsion springs are used widely in aerospace equipment. In most gravity gradient booms and some of the solar panel extruders, torsion springs play an important role in expanding these mechanisms. Since these mechanisms are constantly exposed to severe thermal gradients during orbital circulation and because of the sensitivity of these mechanisms, it is important to identify the behavior of their elements under temperature variations. Therefore, in this study, the effect of temperature and its variation on these springs and their performance are investigated analytically and experimentally. To investigate the torsional behavior of the spring, a specific test setup is designed and constructed. This test train includes power transmission, temperature control chamber, temperature controller, and torque meter. Torsion springs are selected from hard-drawn spring steel. At the temperature range of  $+100^{\circ}\text{C}$  to  $-100^{\circ}\text{C}$ , the effect of temperature variation is investigated on the produced torque due to different forced torsion angles. As well as the spring constant variation with temperature is obtained and compared with analytical data. The obtained results validate the consistency and accuracy of the analytical modeling and the applied experimental test train and procedure.

**Keywords** Torsion Spring, Torque-Torsion Angle, Effect of Hot and Very Cold Temperature Variations, Spring Coefficient Aerospace Mechanisms

### CITATION LINKS

[1] Material properties at low temperature. [2] Spacecraft thermal control handbook: cryogenics. Vol. 2 [3] Experimental, theoretical and numerical investigation of temperature effects on load-deflection behavior of tape spring. [4] Mechanical properties of engineered materials. [5] Failure analysis of aviation torsional springs. [6] Study of a torsion spring fracture. [7] Generalized spiral torsion spring model. Mechanism and Machine Theory. [8] Exact nonlinear theory of tension and torsion of helical springs. [9] Solving geometrically nonlinear problem on deformation of a Helical spring through variational methods. [10] A novel finite element model for helical springs. [11] Shigley's mechanical engineering design, 8th edition. [12] The engineering toolbox. Young modulus of elasticity for metals and alloys <http://www.engineeringtoolbox.com>

## بررسی تاثیر تغییرات درجه حرارت در محدوده دمایی ۱۰۰- تا ۱۰۰+ درجه سانتی‌گراد بر روی عملکرد فنرهای پیچشی

علیرضا احسانی MSc

کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

کمال جهانی PhD\*

دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

عادل پوررتقی مرزورد MSc

کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، تبریز، ایران

### چکیده

امروزه فنرهای پیچشی برای ایجاد گشتاور به طور گسترده در سازوکارهای فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در اغلب سازوکارهای مربوط به بوم‌های گرادیان جاذبه و نیز برخی سازوکارهای بازکننده صفحات خورشیدی، از فنرهای پیچشی استفاده می‌شود. از آنجایی که این سازوکارهای به کار رفته در سازه‌های حساس فضائی بطور مداوم در برابر تغییرات شدید حرارتی در موقع گردش مداری قرار می‌گیرند، بنابراین شناسایی تاثیر تغییرات درجه حرارت بر روی عملکرد فنرهای مورد استفاده در آنها بسیار مهم می‌باشد. در این پژوهش تاثیر دما و تغییرات آن بر روی عملکرد فنرهای پیچشی هم به صورت تحلیلی و هم به صورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت بررسی رفتار گشتاور-زاویه پیچش استاتیکی فنرهای پیچشی، یک زنجیره آزمایش مناسب طراحی و ساخته می‌شود. این زنجیره شامل سیستم انتقال قدرت، محفظه‌های کنترل دمای سرد و گرم، سیستم کنترل دما و سیستم اندازه‌گیری گشتاور می‌باشد. جنس فنر پیچشی از خانواده فولادهای سخت کشیده انتخاب شده و فنر در گستره دمایی ۱۰۰+ تا ۱۰۰- درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفت. تاثیر تغییر دما بر روی گشتاور اعمالی فنر در زاویه‌های پیچش مختلف و نیز تغییر ثابت فنر بر حسب دما به دست آمد. با استخراج روابط الاستیسیته حاکم بر تغییر شکل فنر در اثر گشتاور اعمالی، مقادیر حاصل از آزمایش با روابط تحلیلی مقایسه می‌گردد. تطابق خوبی بخصوص در درجه حرارت‌های پائین بین نتایج آزمایش و تئوری مشاهده می‌شود. نتایج حاصله بیانگر صحت فرایند آزمایش در پیش‌بینی عملکرد فنرهای پیچشی می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** فنر پیچشی، گشتاور پیچشی-زاویه پیچش، ثابت فنر، تاثیر درجه حرارت‌های گرم و بسیار سرد، مکانیزم‌های فضایی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹

\* نویسنده مسئول: ka\_jahani@tabrizu.ac.ir

### ۱- مقدمه

فنرهای مکانیکی به عنوان اجسامی کش‌سان تعریف می‌شوند که تحت بار دچار خیز یا تغییر شکل می‌شوند و پس از برداشتن بار دوباره به شکل و اندازه قبلی خود برمی‌گردند. کاری که روی فنر با اعمال نیرو و جابه‌جایی انجام می‌شود، به صورت انرژی پتانسیل ذخیره شده و در مواقع لازم به صورت انرژی جنبشی آزاد می‌شود. در محدوده الاستیک، تغییر طول متناسب با نیروی کشش است و

با برداشتن نیرو، جسم به طول اولیه خود بازمی‌گردد. در محدوده الاستیک نسبت تناسب بین تنش و کرنش مدول الاستیسیته نامیده می‌شود. مدول الاستیسیته از نیروهای بین اتمی حاصل می‌شود و لذا در حالت کلی به خاطر وجود ناخالصی‌ها در شبکه بلور (مثل اضافه کردن مواد شیمیایی برای ایجاد آلیاژ) زیاد تغییر نمی‌کند، ولی دما نیروهای بین اتمی را تغییر می‌دهد و لذا با تغییر دما، مدول الاستیسیته تغییر می‌کند. با افزایش دما، مدول الاستیسیته کاهش و با کاهش دما افزایش می‌یابد<sup>[1]</sup>.

تغییر دما در فضا و در نزدیکی زمین به موقعیت و زمان بستگی دارد. دماها در سایه و در معرض نور مستقیم خورشید به طور جدی با یکدیگر تفاوت دارند و به طور تدریجی دقیقه به دقیقه با چرخش زمین حول محور خود و با چرخش به دور خورشید عوض می‌شوند. با گذشتن از اولین اتمسفر زمین تعداد مولکول‌های گاز سریعاً افت کرده و تقریباً به صفر می‌رسد و در ادامه، فشار نیز به صفر می‌رسد. بدین ترتیب ماده‌ای برای انتقال گرمای همرفت و رسانش وجود نخواهد داشت. اما در عوض ماده‌ای نیز وجود ندارد که شدت تابش خورشید را کم کند و تابش خورشید دمای اجسام را سریعاً بالا خواهد برد. در مدارهای نزدیک به زمین، ماهواره‌ها و سایر تجهیزات فضایی در معرض تغییر دمای ۶۵+ تا ۷۵- درجه سانتی‌گراد و در مدارهای بالاتر در محدوده دمایی ۵۵+ تا ۱۴۵- درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند<sup>[2]</sup>. در اغلب سازوکارهای به کار رفته در تجهیزات فضایی، از فنرهای مختلفی مثل فنرهای نواری<sup>[3]</sup> و پیچشی جهت اعمال گشتاور پیچشی استفاده می‌شود. در صورتی که این فنرهای نواری و یا پیچشی در ساز و کار طوری جای‌گذاری شده باشد که همواره در پیچش ثابت نگه داشته شده باشد، با افزایش ثابت فنر در اثر کاهش دما، گشتاور اعمالی از فنر به مکانیزم افزایش می‌یابد و اگر وظیفه فنر ایجاد نیروی ثابت باشد، در این صورت زاویه فنر کاهش پیدا خواهد کرد. این تغییرات در زاویه فنر یا گشتاور اعمالی از سوی آن، باعث ایجاد اختلال در عملکرد سازوکارهای حساس در تجهیزات فضایی می‌گردد. در صورتی که کاهش دما شدیدتر شود، ممکن است چقرمگی ماده سازنده فنر آن قدر کاهش پیدا کند که فنر حالت شکننده پیدا کرده و در مقابل خستگی بسیار آسیب پذیر شود. به‌عنوان مثال، فنری که ممکن است در دمای اتاق استحکام بسیار خوبی داشته باشد، ممکن است در دماهای فوق سرد، پس از طی فقط چند سیکل بشکند. خطر مهم دیگری که فنرهای بکار رفته در تجهیزات فضایی را تهدید می‌کند خستگی گرمایی است. اعمال تنش گرمایی دوره‌ای می‌تواند مانند تنش مکانیکی دوره‌ای به خستگی منجر شود. ترک‌های خستگی گرمایی از تکرار گرمایش و سرمایش دوره‌ای که با انبساط و انقباض‌های متوالی نیز همراه است، ناشی می‌شود. اگر یک قطعه فلزی مقید شده و از جابه‌جایی و حرکت آزادانه آن جلوگیری شود، سرد شدن آن باعث انقباض و ایجاد تنش کششی پسماند خواهد شد. ادامه این سرمایش و گرمایش متناوب باعث به وجود آمدن ترک خستگی و انتشار آن در زمان‌های سرد شدن قطعه خواهد شد. این ترک‌ها به ترک‌های گرم-خستگی معروف هستند<sup>[4]</sup>. در زمینه بررسی فنرهای پیچشی

ممکن است گمراه کننده باشد چون سیم مفتول فنرهای فشاری و کششی تحت پیچش قرار می‌گیرند اما سیم فنرهای پیچشی دچار خمش می‌شود. طرح‌واره یک فنر پیچشی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل،  $F$  عبارت است از نیروی برشی انتهایی فنر جهت ایجاد پیچش در فنر،  $\theta_0$  عبارت است از زاویه پیچش اولیه قبل از اعمال نیروی برشی و  $\theta$  عبارت است از زاویه پیچش الاستیک در اثر اعمال نیروی برشی و  $l$  عبارت است از بازوی گشتاور ناشی از نیروی  $F$ .

جهت استخراج ضریب فنریت یک فنر پیچشی با فرض خطی بودن رفتار فنر در تغییر شکل‌های نسبتاً کوچک، می‌توان میزان زاویه پیچش کلی در اثر اعمال گشتاور پیچشی را حاصل جمع زاویه پیچش دو انتهای مستقیم فنر و زاویه پیچش بدنه فنر در نظر گرفت. برای فنر پیچشی رابطه بین گشتاور پیچشی فنر و زاویه پیچش را به صورت رابطه ۱ بیان کرد:

$$k = \frac{\Delta M}{\Delta \theta} \quad (1)$$

برای مفتول‌های مستقیم دو انتهای فنر، گشتاور  $M$  در اثر نیروی برشی  $F$  را می‌توان به صورت  $M = F \cdot l$  نوشت. که در حقیقت باعث خمش در مفتول و در نتیجه پیچش در فنر می‌شود. زاویه ناشی از تغییر مکان انتهای تیر یک سرگیردار به اندازه  $y$ ، وقتی از سر درگیر به آن نگاه شود برابر با است:

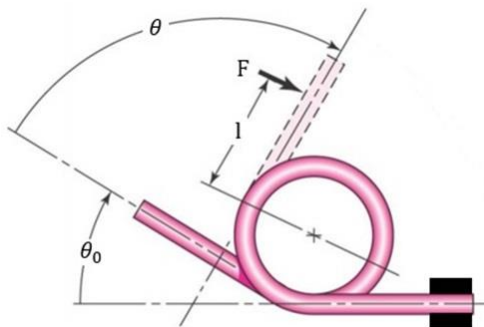
$$\theta = \frac{y}{l} = \frac{Fl^2}{3EI} = \frac{Fl^2}{3E(\pi d^4/64)} = \frac{64Ml}{3\pi d^4 E} \quad (2)$$

برای محاسبه زاویه پیچش در بدنه فنر، می‌توان انرژی کرنشی برای یک المان کوچک با طول  $dx$  از مفتول فنر در تغییر شکل خمشی را نوشته و برای یک حلقه از فنر با استفاده از انتگرال‌گیری در طول کل مفتول حلقه بصورت زیر بیان کرد:

$$U = \int \frac{M^2 dx}{2EI} \quad (3)$$

نقطه اثر نیروی برشی  $F$  هنگام اعمال بار، به اندازه  $y$  جابجا می‌شود که  $\theta$  تغییر شکل زاویه‌ای حلقه فنر است. با استفاده از اصل کار مجازی و در نظر گرفتن انرژی کرنشی برای کل بدنه فنر با تعداد کل  $N_b$  حلقه می‌توان رابطه ۴ را نوشت:

$$l\theta = \frac{\partial U}{\partial F} = \int_0^{\pi D N_b} \frac{\partial}{\partial F} \left( \frac{F^2 l^2 dx}{2EI} \right) = \int_0^{\pi D N_b} \frac{F l^2 dx}{EI} \quad (4)$$



شکل ۱) شماتیک یک فنر پیچشی تحت اثر بارگذاری خمشی سیم مفتول انتهایی فنر

کارهای تحقیقاتی مختلفی انجام شده است. ویگو و همکاران [5] شکست فنرهای پیچشی مورد استفاده در سازه‌های هوا فضایی را بررسی کردند. آنها از روش‌های مختلف تجربی برای آنالیز شکست استفاده کردند و پی بردند که ترک‌ها در حلقه‌های داخلی ایجاد و رشد می‌کنند و نوع شکست فنر به ماده سازنده فنر بستگی ندارد. پیلار و همکاران [6] شکست فنرهای پیچشی را بررسی کردند. آنها از یک فنر مستعمل و یک فنر نو برای انجام آزمایش‌ها استفاده کردند. برای یافتن علت شکست، تحلیل‌های شیمیایی و مکانیکی و تحلیل فراکتوگرافی انجام شد. تحلیل‌های آنها نشان داد که مشکل صافی سطح باعث ایجاد ترک در فنر و رشد آن شده بود. گوئیجوسا و همکاران [7] برای فنرهای پیچشی حلزونی، روابط تحلیلی به دست آوردند که نسبت به روابط قبلی کلی‌تر و تعمیم یافته‌تر است و می‌تواند اثر آشیانه شفت را نیز در محاسبه‌ها دخالت دهد. زوبوف [8] توانست با استفاده از ریاضیات پیشرفته با فرض اعمال هم‌زمان نیروی کششی و گشتاور پیچشی به فنرهای مارپیچ کششی و پیچشی و با فرض سه بعدی و غیرخطی بودن مسئله، روابطی تحلیلی برای این فنرها به دست آورد. باینکو و همکاران [9] با استفاده از روش‌های متغیر معادله تحلیلی بسیار دقیقی را برای فنرهای مارپیچ با هندسه غیرخطی که تحت تغییر شکل‌های بزرگ قرار می‌گیرند به دست آوردند. جیانگ و هنشل [10] روش مدل المان محدود جدیدی برای فنرهای مارپیچ ابداع کردند. این روش در مدل‌سازی فنرهای مارپیچی که تحت بار کششی یا پیچشی قرار گرفته‌اند از دقت بسیار خوبی برخوردار بوده و برای مدل‌سازی، تنها قطعه‌ای از سطح مقطع مفتول فنر مورد نیاز است.

در تحقیقات قبلی در زمینه فنرهای مارپیچ پیچشی با وجود با ارزش بودن، تغییر دما و تاثیر آن بر رفتار فنر پیچشی در آنها بررسی نشده است. در این پژوهش، ابتدا روابط تئوری حاکم بر تغییر شکل الاستیک فنرهای مارپیچ پیچشی استخراج می‌شود. در این روابط تأثیر درجه حرارت به صورت تغییر مدول الاستیسیته در نظر گرفته می‌شود. سپس، با طراحی و ساخت زنجیره آزمایش مناسب هم برای درجه حرارت‌های بالای صفر درجه سانتی‌گراد و هم برای درجه حرارت‌های خیلی سرد، رفتار مکانیکی فنرهای پیچشی در بازه دمایی گسترده  $-100$  تا  $+100$  درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفته و تاثیر دما بر عملکرد آنها بررسی می‌شود. با استفاده از روابط تحلیلی استخراج شده برای ضریب فنر تحت تأثیر تغییرات درجه حرارت، نتایج حاصله از زنجیره آزمایش ایجاد شده مورد راستی‌آزمایی قرار می‌گیرد. ساخت، راه‌اندازی و صحنه‌گذاری زنجیره آزمایش گشتاور-زاویه پیچش فنرهای مارپیچ پیچشی در دماهای بسیار سرد و دماهای گرم متناسب برای سامانه‌های فضائی نوآوری اصلی این تحقیق می‌باشد.

## ۲- تغییر شکل و ضریب فنریت در فنرهای پیچشی

فنرهای پیچشی برای ایجاد گشتاور یا ذخیره انرژی، زمانی که تغییر شکل زاویه‌ای به آنها اعمال می‌شود، استفاده می‌شوند. خیز زاویه‌ای اعمال شده به فنرهای پیچشی باعث کوچکتر شدن نسبی قطر فنر و افزایش تعداد حلقه‌های آن می‌شود. عبارت فنر پیچشی

#### ۴- تاثیر دما بر روی ثابت فنر پیچشی

با توجه به شرایط مرزی فنر پیچشی مورد بررسی که در آن دو انتهای فنر با نیروی اصطکاکی از طرف سطوح درگیر مواجه است و در صورت کوچک فرض کردن این نیروی اصطکاکی، می‌توان از تاثیر کرنش‌های حرارتی چشم‌پوشی کرد. با این فرض، عامل اصلی در تغییر ثابت فنر تغییر مدول الاستیسیته در اثر تغییر درجه حرارت خواهد بود. برای فنر مورد بررسی در این تحقیق، مقادیر مدول الاستیسیته فولاد سخت‌کشیده ASTM A227 در دماهای مختلف به صورت مقادیر ارائه شده در جدول ۲ می‌باشد [12].

در این تحقیق، برای به دست آوردن معادله‌ای که تغییرات مدول الاستیسیته فولاد سخت‌کشیده را در محدوده دمایی +۱۰۰ تا -۱۰۰ بیان کند از برازش منحنی به داده‌های جدول ۲ استفاده می‌شود. با فرض یک برازش چند جمله‌ای مرتبه دو نزولی برای رفتار داده‌های مربوط به مدول الاستیسیته در جدول ۲، می‌توان رابطه ۹ را برای تغییرات مدول الاستیسیته جنس مورد استفاده در ساخت فنر نوشت:

$$E = C_0 - C_1T - C_2T^2 \quad (9)$$

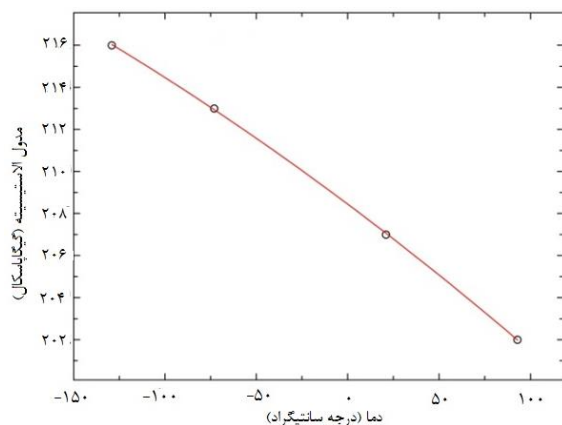
رابطه ۹ برای جنس مورد استفاده در این تحقیق به صورت رابطه ۱۰ درمی‌آید:

$$E = 208.444 - 0.0650357T - 0.0000482T^2 \quad (10)$$

نمودار رابطه ۱۰ در شکل ۳ آورده شده است. برای به دست آوردن رابطه‌ای تحلیلی برای ثابت فنر بر حسب درجه حرارت، می‌توان رابطه ۱۰ برای مدول الاستیسیته و کمیت‌های هندسی فنر در جدول ۱ در رابطه تحلیلی به دست آمده برای ثابت

جدول ۲) مدول الاستیسیته فولاد ASTM A 227 در دماهای مختلف

دما (درجه سانتی‌گراد)	مدول الاستیسیته (GPa)
-۱۲۹	۲۱۶
-۷۳	۲۱۳
۲۱	۲۰۷
۹۳	۲۰۲



شکل ۳) تغییرات مدول الاستیسیته با دما

با جانشانی  $I=(\pi d^4)/64$  برای سیم مفتول با مقطع گرد، رابطه  $\theta$  بصورت زیر حاصل می‌شود:

$$\theta = \frac{64FDN_b}{d^4E} = \frac{64MDN_b}{d^4E} \quad (5)$$

تغییر شکل زاویه‌ای کل بر حسب رادیان از جمع زاویه پیچش به دست آمده از معادله ۲ برای هر یک از دو سر مستقیم فنر با طول‌های  $l_1$  و  $l_2$  و زاویه پیچش بدنه فنر از رابطه ۵ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\theta_t = \frac{64MDN_b}{d^4E} + \frac{64Ml_1}{3\pi d^4E} + \frac{64Ml_2}{3\pi d^4E} = \frac{64MD}{d^4E} \left( N_b + \frac{l_1 + l_2}{3\pi D} \right) \quad (6)$$

عبارت داخل پرانتز در رابطه ۶ که بیانگر تعداد حلقه‌های کامل به علاوه تاثیر دو انتهای مستقیم فنر می‌باشد، معمولاً به صورت تعداد تعداد دورهای معادل فعال  $N_a$  بیان می‌شود [11]:

$$N_a = N_b + \frac{l_1 + l_2}{3\pi D} \quad (7)$$

لذا ضریب فنریت  $k$  با استفاده از روابط ۶ و ۷ به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$k = \frac{M}{\theta_t} = \frac{d^4E}{64DN_a} \quad (8)$$

#### ۳- مشخصات فنر به کار رفته

از فنر پیچشی ساخته شده از فولاد سخت کشیده ASTM A227 برای انجام آزمایش استفاده شد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای اطمینان از صحت نتایج، از سه فنر دقیقاً مشابه برای انجام آزمایش استفاده شد. مشخصات هندسی فنرها در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲) فنر پیچشی مورد آزمایش

جدول ۱) مشخصات هندسی فنرهای به کار رفته

نام	اندازه	واحد
قطر مفتول	۳/۱	میلیمتر
قطر خارجی	۱۷/۲	میلیمتر
تعداد حلقه	۶	دور
طول بازوی اول	۵۴	میلیمتر
طول بازوی دوم	۳۰	میلیمتر

اجزای اصلی زنجیره آزمایش عبارتند از سیستم انتقال قدرت، محفظه آزمون دماهای مثبت، محفظه آزمون دماهای منفی، سیستم اندازه گیری کرنش و سیستم های اندازه گیری و کنترل درجه حرارت مثبت و منفی. در سیستم انتقال قدرت از یک گیربکس با نسبت تبدیل ۶۴:۱ برای انتقال گشتاور پیچشی به فنر استفاده شده است. برای اعمال پیچش از دسته استفاده می شود.

گیربکس مدرج بوده و می توان به مقدار دلخواه فنر را پیچاند. در محفظه کنترل دماهای مثبت، برای نگه داشتن کوره در دمای ثابت، دیواره های آن از داخل توسط پشم سنگ عایق بندی شده است. همچنین محل ورود شفت ها نیز به وسیله کاسه نمد نسوز آب بندی شده تا هوای گرم داخل کوره به بیرون درز نکند. قسمت فوقانی کوره از شیشه دوجداره ساخته شده است تا داخل کوره قابل مشاهده باشد. جهت کنترل دمای داخل کوره، ترموکوپل سیستم کنترل دمای PID مستقیماً به فنر متصل شده است و سیستم کنترل دما با روشن خاموش کردن المنت حرارتی به کار رفته در داخل کوره، دمای فنر را در مقدار تعیین شده ثابت نگه می دارد. تصویری از داخل کوره عایق بندی شده به همراه فنر مورد تست در درون آن در شکل ۶ ارائه شده است.

جهت ایجاد محفظه خیلی سرد، از نیتروژن مایع و جهت کنترل دمای منفی درجه حرارت های معین از اختلاط نسبت های مختلف متانول و نیتروژن مایع در حوضچه کف محفظه آزمون فنر استفاده می شود. دیواره های محفظه به خوبی عایق و کف محفظه آب بندی شده است و مقداری متانول مایع در آن موجود است. این محفظه دارای یک کانال ورودی برای اضافه کردن نیتروژن مایع می باشد که در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶) نمای داخل کوره و عایق بندی آن



شکل ۷) محفظه دماهای منفی و کانال اضافه کردن نیتروژن

فنر در ۸ جاگذاری نمود. با انجام این کار، رابطه ۱۱ برای ثابت فنر به صورت تابعی از درجه حرارت در محدوده دمایی مورد بررسی به دست می آید.

$$k = 56.21 - 0.01754T - 0.000013T^2 \quad (11)$$

از این رابطه برای راستی آزمایی نتایج حاصل از زنجیره آزمون ایجاد شده استفاده خواهد شد.

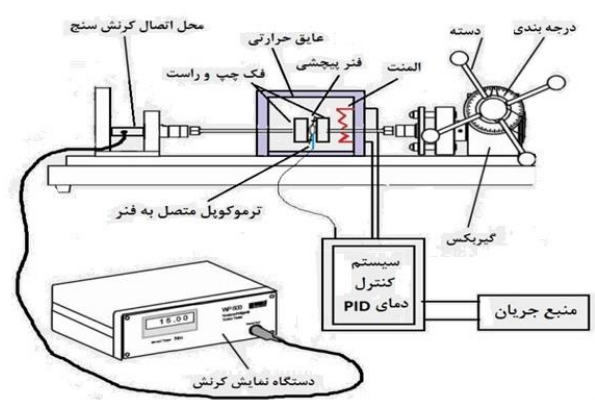
۵- زنجیره آزمون ساخته شده برای آزمایش های تجربی فنر

پیچشی

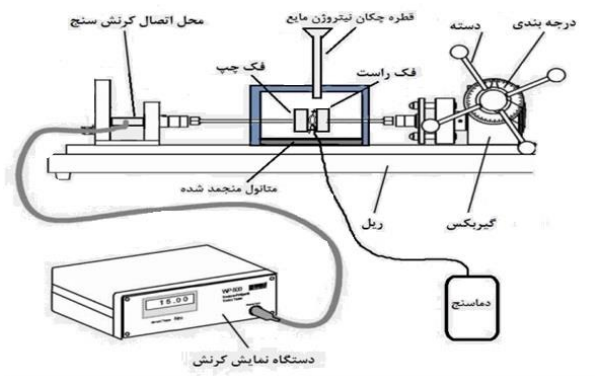
برای بررسی تأثیر درجه حرارت بر روی عملکرد فنرهای پیچشی، ابتدا یک زنجیره تست منحصر به فرد که امکان انجام آزمایش در درجه حرارت های بسیار سرد (تا صد درجه سانتی گراد زیر صفر) و درجه حرارت های گرم (تا صد درجه سانتی گراد بالای صفر) طراحی و ساخته شد. پس از کالیبراسیون سیستم اندازه گیری گشتاور پیچشی آن، تغییر ثابت فنر با درجه حرارت های مختلف مورد آزمایش قرار می گیرد.

زنجیره آزمایش فنر دارای محفظه کنترل دمای جداگانه برای دماهای مثبت و منفی می باشد. طرح واره زنجیره آزمایش برای دماهای مثبت در شکل ۴ نشان داده شده است.

همچنین در شکل ۵ طرح واره زنجیره برای آزمایش فنر در دماهای منفی آورده شده است:

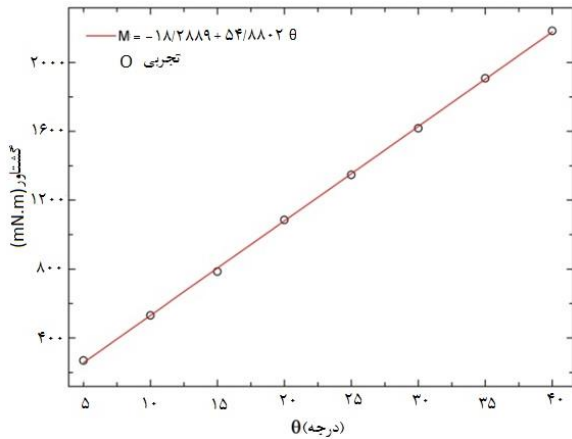


شکل ۴) طرح واره زنجیره آزمایش فنر برای دماهای مثبت



شکل ۵) طرح واره زنجیره آزمایش فنر برای دماهای منفی





شکل ۱۰) نمودار گشتاور اندازه گیری شده بر حسب زاویه برای دمای +۵۰ درجه سانتی‌گراد

در تمامی دماهای آزمایش شده، نمودار گشتاور بر حسب زاویه پیچش در محدوده بررسی شده خطی می‌باشد که نشان دهنده رفتار خطی تغییر شکل پیچش فنر مورد بررسی در زاویه‌های پیچش زیر ۴۰ درجه می‌باشد. البته لازم به ذکر است که زاویه پیچش کلی بوده و اثرات دو انتهای مستقیم فنر و بدنه فنر باهم جمع شده و این مقادیر را شکل داده‌اند. لذا، مقدار زاویه پیچش در هر کدام از این بخش‌ها به مراتب کمتر از مقادیر ارائه شده در منحنی‌ها می‌باشد و شاید به همین دلیل است که فنر در این محدوده رفتار خطی از خودش نشان می‌دهد.

۲-۶- آزمایش فنر در دماهای زیر صفر

یک روش مقرون به صرفه و سهل‌الوصول و کم‌خطر برای ایجاد دماهای بسیار پایین در محیط آزمایشگاهی استفاده از نیتروژن مایع است. با ترکیب نیتروژن مایع و متانول، متانول جامد به دست می‌آید که دمای داخل محفظه و فنر مورد تست را تا ۹۶- پایین می‌برد. سپس با اضافه کردن پیوسته و تدریجی نیتروژن مایع، دمای فنر تا ۱۰۰- رسانده می‌شود. در ادامه، با قطع ورود نیتروژن مایع به داخل محفظه و با گذشت زمان می‌توان در سایر دماهای زیر صفر نیز آزمایش فنر را انجام داد. به عنوان نمونه، نمودار گشتاور بر حسب زاویه برای دمای ۱۰۰- و ۵۰- به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که در درجه حرارت‌های زیر صفر نیز تا حداکثر زاویه پیچش مورد بررسی (کمتر از ۴۰ درجه پیچش کلی فنر) همچنان رفتار تغییر شکل فنر خطی است و هرچه درجه حرارت به سمت مقادیر منفی‌تر می‌رود، ثابت فنر افزایش می‌یابد. برای بررسی بیشتر، با توجه به ابعاد و جنس فنر، تنش خمشی در ریشه قسمت مستقیم سر فنر در محل اتصال به بدنه محاسبه می‌شود تا مشخص شود که آیا تنش در ناحیه الاستیک قرار دارد یا نه؟ به عنوان مثال برای درجه حرارت منفی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد که بیشترین ضریب فنریت برای فنر محاسبه شده است، مقدار گشتاور پیچشی با توجه به شکل ۱۱ برابر ۲۲۰۰ متر-نیوتن متر می‌باشد. لذا،

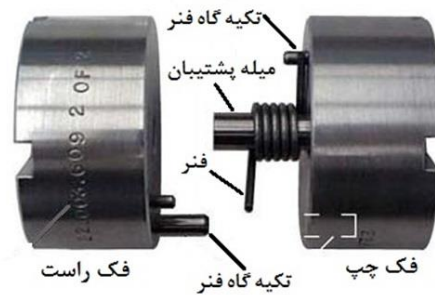
جهت اعمال گشتاور پیچشی به فنر، فنر پیچشی بین دو فک قرار گرفته است که فک چپ ثابت و به کرنش‌سنج متصل است و فک راست توسط سیستم انتقال قدرت به گردش در می‌آید و فنر را به میزان مطلوب می‌پیچاند. شماتیک نحوه قرارگیری فنر بین دو فک و تصویر کامل فک چپ و راست در سیستم در شکل ۸ نشان داده شده است.

۶- نتایج و بحث

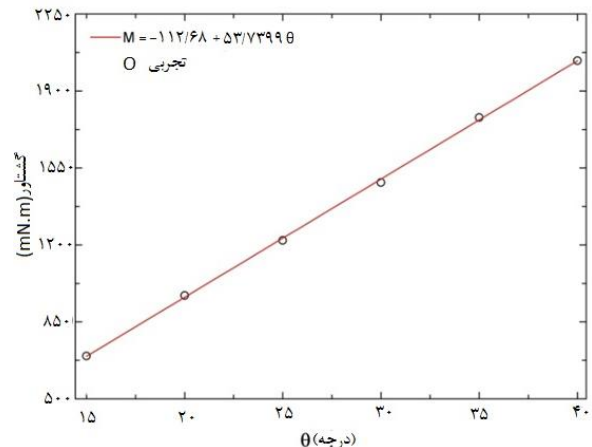
آزمایش فنر در دماهای بالای صفر و زیر صفر به صورت جداگانه و در دو مرحله انجام شده است. آزمایش‌های مربوط به دماهای مثبت در محفظه کنترل دمای مثبت و آزمایش‌های مربوط به دماهای منفی در محفظه کنترل دمای منفی انجام شده است.

۱-۶- آزمایش فنر در دماهای بالای صفر

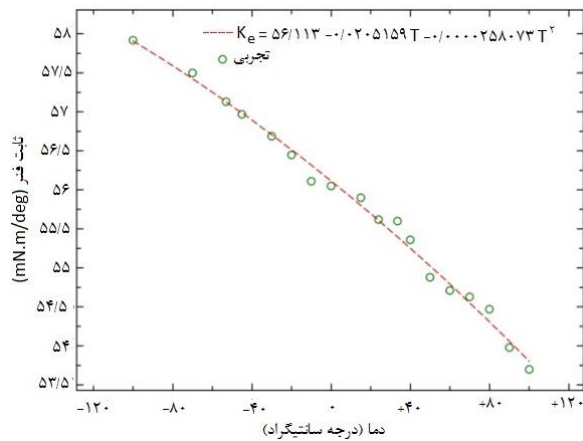
ابتدا سیستم کنترل دما روی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد و بعد از تثبیت دما به ازای هر ۵ درجه چرخش فنر، گشتاور اعمالی قرائت شده و نمودار گشتاور بر حسب زاویه پیچش برای این دما رسم گردید. شیب این نمودار نشان دهنده ثابت فنر در دمای مورد آزمایش می‌باشد. این روند تا انجام آزمایش‌ها در دماهای پایین‌تر تا دمای ۲۰ درجه محیط آزمایشگاه انجام شد. به عنوان نمونه، نمودار گشتاور-زاویه پیچش برای دماهای ۱۰۰+ و ۵۰+ به ترتیب در شکل ۹ و ۱۰ آورده شده است.



شکل ۸) شماتیک نحوه قرارگیری فنر بین دو فک



شکل ۹) نمودار گشتاور اندازه گیری شده بر حسب زاویه برای دمای ۱۰۰- درجه سانتی‌گراد

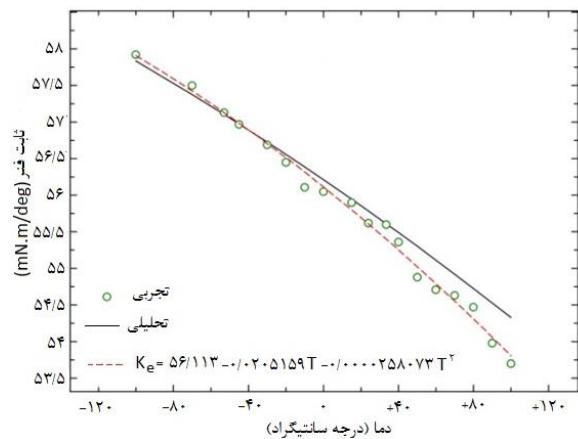


شکل ۱۳ تغییرات ثابت فنر تجربی با دما

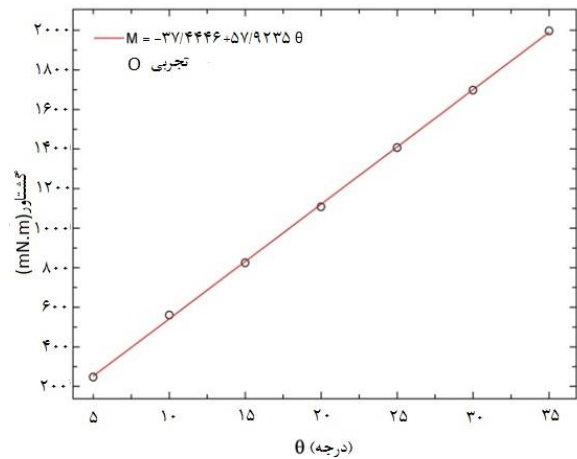
۴-۶- صحه گذاری نتایج

برای راستی آزمایی زنجیره آزمون ساخته شده ، نمودار ثابت فنر به دست آمده از رابطه ۱۱ بخش تحلیلی همراه با داده‌های تجربی در شکل ۱۴ ترسیم و با هم مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که داده‌های تجربی برای نحوه تغییرات ثابت فنرهای پیچشی در درجه حرارت‌های منفی و مثبت در ادبیات فن در دسترس نیست. لذا در این پژوهش، جهت حصول اطمینان از نتایج اخذ شده توسط زنجیره آزمایش، از مقایسه نتایج با مدل سازی تحلیلی استفاده شده است.

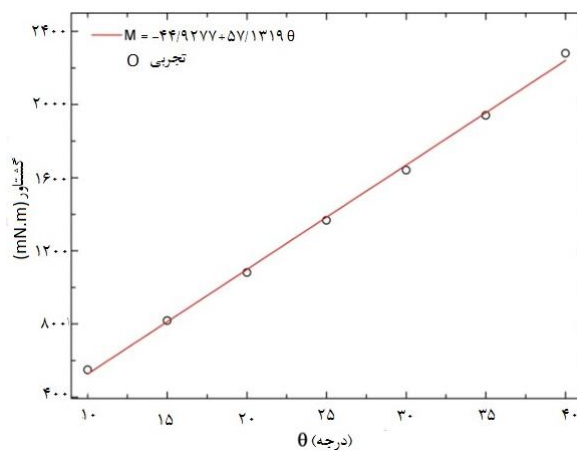
با توجه به نتایج تئوری و تجربی در بازه دمایی ۵۰۰- تا ۴۰+ تطابق خوبی دارند ولی با دور شدن از این محدوده رفته رفته اختلاف بیشتر می‌شود. در دمای ۱۰۰+ ثابت فنر تئوری و تجربی در حدود ۱/۱۶ درصد اختلاف دارند. این اختلاف در دماهای مثبت می‌تواند به علت افزایش قطر مفتول فنر و در نتیجه به هم فشردگی حلقه‌های فنر و ایجاد اصطکاک بین حلقه‌های فنر باشد. در مجموع با کل بازه تغییرات دمائی و همچنین میزان خطای نظری و تجربی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که زنجیره آزمایش ساخته شده و همچنین روند نتایج اخذ شده دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.



شکل ۱۴ تغییرات تئوری و تجربی ثابت فنر با دما



شکل ۱۱ نمودار گشتاور بر حسب زاویه برای دمای ۱۰۰- درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۲ نمودار گشتاور بر حسب زاویه برای دمای ۵۰- درجه سانتی‌گراد

با استفاده از مشخصات فنر از جدول ۱ می‌توان تنش محوری را بصورت زیر محاسبه نمود:

$$\sigma_x = \frac{Mc}{I} = \frac{2200 \times 10^{-3} \times 3.1 \times 10^{-3} / 2}{\pi(3.1 \times 10^{-3})^4 / 64} = 753 \text{ MPa} \quad (۱۲)$$

از آنجایی که تنش تسلیم فولاد فنری ASTM A227 در محدوده ۱۸۵۰-۱۴۳۰ مگاپاسکال می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فنر تحت آزمایش، با فاصله نسبتاً زیادی در محدوده تغییر شکل الاستیک قرار دارد.

۳-۶- تغییرات ثابت فنر با درجه حرارت

نمودار تغییرات ثابت فنر بر حسب دما که از آزمایش‌های انجام یافته در این مطالعه حاصل شده است، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. داده‌های تجربی توسط منحنی چند جمله‌ای درجه دو به خوبی برازش شده‌اند. همان طور که از این نمودار ملاحظه می‌شود، با افزایش درجه حرارت، ثابت فنر پیچشی کاهش می‌یابد.

رابطه ضریب فنر با تغییر درجه حرارت در این حالت به صورت رابطه ۱۳ در می‌آید:

$$k = 56.11 - 0.0252T - 0.000025T^2 \quad (۱۳)$$

## ۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، تاثیر تغییر درجه حرارت از دماهای بسیار سرد زیر صفر تا دماهای گرم بالای صفر بر روی عملکرد فنرهای پیچشی به صورت تجربی و تئوری مورد بررسی قرار گرفت. شرایط دمایی در نظر گرفته شده به نوعی بیانگر شرایط دمایی تجهیزاتی است که در مدارهای کره زمین در گردش می‌باشند. در این راستا، یک زنجیره آزمایش منحصر به فرد برای اندازه‌گیری ثابت فنر پیچشی در دماهای مختلف طراحی و ساخته شد. فنر پیچشی از جنس فولاد سخت‌کشیده ASTM A227 به صورت موفقیت آمیز در بازه دمایی ۱۰۰- تا ۱۰۰+ در آن مورد آزمایش قرار گرفت. برای به دست آوردن ثابت فنر در هر دما، نمودار گشتاور بر حسب زاویه اعمالی به فنر رسم گردیده و شیب نمودار حاصل به عنوان ثابت فنر پیچشی ارائه شد. همچنین روابط تحلیلی حاکم بر تغییر شکل الاستیک فنرهای پیچشی استخراج شد. در این روابط، تاثیرات تغییرات حرارت در آنها با استفاده از داده‌های تجربی موجود در ادبیات فن برای تغییرات مدول الاستیسیته لحاظ گردید. نتایج آزمایش‌ها و روابط تحلیلی نشان داد که در بازه دمایی ۴۰+ تا ۵۰-، روابط تئوری و نتایج تجربی انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند که حاکی از صحت زنجیره تست و روش به کار رفته در بررسی عملکرد فنرهای پیچشی در شرایط مختلف حرارتی در این تحقیق می‌باشد. در محدوده دمائی بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد اختلاف نتایج تئوری و تجربی بیشتر می‌شود ولی این اختلاف در بیشترین مقدار زیر ۲ درصد می‌باشد. هر دو روش تئوری و تجربی نشان داده که اولاً در محدوده پیچش مورد بررسی (زیر ۴۰ درجه پیچش کلی فنر) رابطه گشتاور پیچشی-زاویه پیچش در تمامی درجه حرارت‌ها خطی می‌باشد و ثانیاً ضریب فنر پیچشی با افزایش درجه حرارت به صورت تابع چند جمله‌ای مرتبه دوم کاهش می‌یابد. بنابراین در طراحی سازوکارهای فضایی که از این نوع قطعه استفاده می‌کنند، این امر بایستی مد نظر قرار گیرد.

**تشکر و قدردانی:** این کار تحقیقاتی در آزمایشگاه تحقیقاتی سازه‌های هوشمند و فوق‌پذیر دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز و با حمایت مالی پژوهشکده رانشگرهای فضایی ایران انجام شده است. لذا نهایت تشکر را از مسئولان و مهندسان این پژوهشکده داریم.

**تأییدیه اخلاقی:** تعهد رعایت اخلاق نشر، واگذاری حقوق مادی، افشای تعارض منافع توسط نویسندگان تکمیل شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

**تعارض منافع:** نویسندگان هیچ گونه تعارض منافی نسبت به این کار تحقیقاتی ندارند.

**سهم نویسندگان:** علیرضا احسانی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/ پژوهشگر اصلی / تحلیلگر آماری (۴۰٪)؛ کمال جهانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/نگارنده بحث /پژوهشگر کمکی (۴۰٪) عادل پورتنقی مرزود (نویسنده سوم) پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

**منابع مالی:** منابع مالی این کار تحقیقاتی بر عهده پژوهشکده رانشگرهای فضایی بوده است.

## منابع

- 1- Duthil, P., Material properties at low temperature. arXiv preprint arXiv:1501.07100, 2015.
- 2- Gilmore, D.G. and M. Donabedian, Spacecraft thermal control handbook: cryogenics. Vol. 2. 2003: AIAA.
- 3- Khademi A., Jahani K., Farhang F., Experimental, theoretical and numerical investigation of temperature effects on load-deflection behavior of tape spring, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Sofia, Vol. 51. 2021
- 4- Soboyejo, W., Mechanical properties of engineered materials. Vol. 152. 2002: CRC press.
- 5- Weiguo, H., et al., Failure analysis of aviation torsional springs. Chinese Journal of Aeronautics, 2011. 24(4): p527-532
- 6- Valles González, M.P., M. García-Martínez, and A. Pastor Muro, Study of a torsion spring fracture. Engineering Failure Analysis, 2019. 98: p. 150-155.
- 7- Muñoz-Guijosa, J.M., et al., Generalized spiral torsion spring model. Mechanism and Machine Theory, 2012. 51: p.110-130.
- 8- Zubov, L. Exact nonlinear theory of tension and torsion of helical springs. in Doklady Physics. 2002. Springer.
- 9- Babenko, A., B. Soltannia, and P. Shakeri Mobarakeh, Solving geometrically nonlinear problem on deformation of a Helical spring through variational methods. International journal of Mechanics and applications 2018. 8: p.21-24
- 10- W.G.Jiang, J.L. Henshall, A novel finit element model for helical springs 2000.35: p.363-377
- 11- R. G Budynas, and J. K Nisbett, Shigley's mechanical engineering design, 8th edition, 2008 , McGraw-Hill, Boston.
- 12- The engineering toolbox (2005). Young modulus of elasticity for metals and alloys <http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d773.html>