



Experimental Investigation of Pseudo-elastic Properties of a Ni-rich Nitinol Shape Memory Alloy

Reza Khorasani^{1*}, Seyed Ali Hosseini Kordkheili²

¹ Assistant Professor, Faculty of Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

² Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- It is possible to reduce vibrations of an engineering structure without applying too much weight to it by employing the pseudo-elastic property of shape memory alloys.
- The presented results could be used in numerical analyses and phenomenological models for simulating the pseudo-elastic behavior of shape memory alloys.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 19 August 2024

Received in revised form: 4 October 2024

Accepted: 17 October 2024

Available online: 31 October 2024

*Correspondence:

khorasani@kntu.ac.ir

How to cite this article:

R. Khorasani, S.A.H. Kordkheili. Experimental investigation of pseudo-elastic properties of a Ni-rich Nitinol shape memory alloy. Journal of Aerospace Mechanics. 2025; 20(4):117-125.

Keywords:

Shape memory alloy

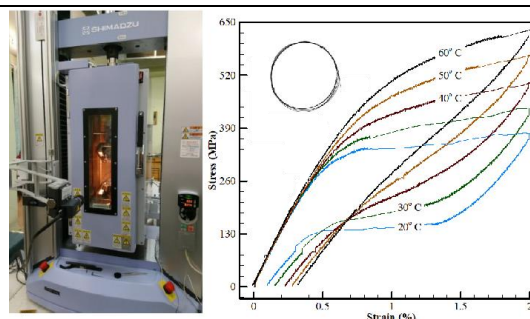
Pseudo-elasticity

Martensite transformation

Calorimetry

Vibration control

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Vibration control of engineering structures and reducing its unpleasant effects such as high cycle fatigue (HCF), structural failure, noise and etc., has been a very active subject of research. Although reducing weight of structures can be counted as a positive achievement, it may lead to increase in vibratory motions. Energy dissipation due to high amount of hysteresis in shape memory alloy (SMA) wires which is vibrating together with the structure, is a potential solution in vibration control field. In this regard, reducing vibration amplitude is obtained along with relatively low increase in weight of structure respect to other dampening methods like viscoelastic materials. In this paper, carried out experimental tests on Ni-rich Nitinol samples are presented and required parameters for simulation of the pseudo-elastic behavior are extracted. These tests involve calorimetry and various tensile tests using environmental chamber. Pseudo-elasticity, pseudo-plasticity, strain recovery and de-twinning phenomena are perceived experimentally. Also, response of a Nitinol wire by considering its pseudo-elastic behavior is presented numerically.

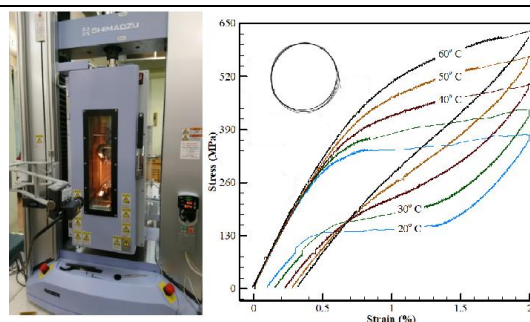
استخراج تجربی خواص شبهالاستیک سیم آلیاژی حافظه‌دار نایتینول غنی از نیکل

رضا خراسانی^{۱*}، سیدعلی حسینی کردخیلی^۲

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- کاهش ارتعاشات در کنار اعمال وزن نسبتاً کم به سازه با به‌کارگیری رفتار شبه الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار ممکن است.
- نتایج ارائه‌شده به‌عنوان ورودی تحلیل‌های عددی و مدل‌های پدیدارشناختی برای شبیه‌سازی رفتار شبهالاستیک آلیاژهای حافظه‌دار قابل استفاده است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۸/۱۰

*نویسنده مسئول:

khorasani@kntu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

آلیاژ حافظه‌دار

رفتار شبهالاستیک

انتقال مارتنزیتی

آزمایش کالری سنجی

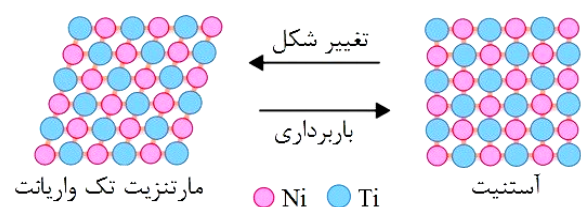
کنترل ارتعاشات

چکیده

کنترل ارتعاشات سازه‌های مهندسی و کاهش اثرات ناخوشایند حاصل از آن شامل خستگی پر چرخه، شکست سازه، نویز و ... همواره یکی از موضوعات موردبررسی پژوهش پژوهش‌گران بوده است. همچنین کاهش وزن سازه‌های یکی از دغدغه‌های اصلی صاحبان صنایع به شمار رفته که خود می‌تواند افزایش حرکات ارتعاشی را به همراه داشته باشد. در این میان هدر دادن انرژی ناشی از هیستریزیس بالا در سیم‌های آلیاژی حافظه‌دار که همراه سازه ارتعاش می‌کنند، راه‌حل بالقوه‌ای برای کنترل ارتعاشات به شمار می‌رود. به‌نحوی که در کنار کاهش ارتعاشات سازه، وزن بسیار کمتری در مقایسه با دیگر میراگرها نظیر مواد ویسکوالاستیک به سازه تحمیل می‌شود. در این مقاله و به‌منظور تعیین پارامترهای موردنیاز برای مدل‌سازی رفتار شبه الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار، به ارائه‌ی آزمایش‌های صورت گرفته بر روی یک نایتینول غنی از نیکل پرداخته شده است. بررسی‌های صورت گرفته شامل آزمایش کالری سنجی و آزمایش‌های کشش در دماهای مختلف است. بعلاوه، پدیده‌هایی چون رفتار شبهالاستیک، رفتار شبهپلاستیک، بازیابی کرنش و تبدیل واریانت‌های مارتنزیتی به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین در انتهای مقاله و با انجام شبیه‌سازی عددی، پاسخ یک سیم آلیاژی نایتینول با در نظر گرفتن خواص شبهالاستیک آن ارائه شده است.

۱- مقدمه

بازخواهد گشت. درواقع در هنگام اعمال بارگذاری ماده از حالت آستنیت به مارتنزیت تغییر ساختار داده و با حذف بارگذاری مجدداً به حالت آستنیت باز خواهد گشت.



شکل (۱): تغییرات ساختار کریستال SMA در اثر رفتار

شبهالاستیک در دمای بالاتر از A_f .

۱-۲- ویژگی‌های حافظه‌شکلی یک‌طرفه و دوطرفه

شکل ۲ ویژگی حافظه‌شکلی ماده را از منظر تغییرات ساختار کریستالی آن نشان می‌دهد. هنگامی که ماده در حالت مارتنزیت یا حالت سرد خود (در دمایی کمتر از M_s) قرار دارد، با اعمال بارگذاری دچار تغییرشکل پلاستیک می‌شود. در این حالت با اعمال حرارت و افزایش دمای SMA تا بالای دمای A_f ماده شکل اولیه خود را بازیابی کرده و با کاهش دما نیز در همان حالت باقی خواهد ماند. به این ویژگی رفتار حافظه‌شکلی یک‌طرفه گفته می‌شود. رفتار حافظه‌شکلی می‌تواند دوطرفه نیز باشد. در حالت حافظه‌شکلی دوطرفه، ماده دارای دو فرم از پیش تعیین شده در حالت سرد و حالت گرم خود می‌باشد. بنابراین در این حالت اگر ماده در حالت سرد خود دچار تغییرشکل شود، با افزایش دما تا بالای دمای انتقال ماده حالت پیش‌فرض گرم خود را بازیابی کرده و سپس با کاهش دما تا زیر دمای انتقال، حالت پیش‌فرض سرد خود را بازیابی خواهد کرد.

در این مقاله، آزمایش‌های موردنیاز برای استخراج پارامترهای شبیه‌سازی رفتار شبه‌الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار ارائه و تحلیل شده است. بررسی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته شامل کالری‌سنجی و آزمایش‌های کشش بر روی آلیاژ نایتینول غنی از نیکل در دماهای مختلف است.

در دهه‌های اخیر مطالعات بر روی آلیاژهای حافظه‌دار در حوزه‌های مختلفی چون هوافضا، دارو و نفت و گاز توجهات روزافزونی پیدا کرده است [۱-۳]. از میان خواص جالب این مواد هوشمند، رفتار شبه‌الاستیک و توانایی اتلاف انرژی این مواد در حلقه‌های هیستریزس تنش- کرنش مورد توجه محققین قرار گرفته و این مواد را دسته‌ی میراگرایی با پتانسیل بالا برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها قرار داده است. این ویژگی ناشی از انتقال فاز رفت و برگشتی بین فازهای آستنیت^۱ و مارتنزیت^۲ تحت بارهای مکانیکی است. برخی از روش‌های مدل‌سازی و مدل‌های ساختاری مربوط به آن‌ها در مراجع [۴] و [۵] گردآوری شده‌اند.

آلیاژهای حافظه‌دار دارای دو فاز پایدار با خواص و ساختار کریستالی متفاوت هستند؛ فاز دما بالا که آستنیت یا مرجع^۳ نامیده شده و دارای ساختار کریستالی مکعب مرکزدار (BCC)^۴ بوده و فاز دما پایین یا مارتنزیت که با تقارن کمتر دارای ساختار کریستالی چهارگوشه^۵، راست لوزی^۶ و یا تک‌شیب^۷ است. بنابراین، می‌تواند در گونه‌های کریستالوگرافی‌های مختلف و معادل ظاهر شده که در جهت‌گیری نسبت به محورهای ماده تفاوت دارند. در حقیقت ساختار مارتنزیت می‌تواند در دو فرم جفت شده^۸ یا دوقلویی و جفت نشده^۹ وجود داشته باشد [۶]. رفتارهای حافظه‌شکلی یا SME^{۱۰} و شبه‌الاستیک یا PE^{۱۱} دو ویژگی اساسی آلیاژهای حافظه‌دار را تشکیل می‌دهند.

۱-۱- ویژگی شبه‌الاستیک

شکل ۱ ویژگی شبه‌الاستیک ماده را از منظر تغییرات ساختار کریستالی آن نشان می‌دهد. هنگامی که SMA در دمای بالاتر از A_f قرار دارد، می‌تواند مقادیر بالای کرنش را در اثر اعمال بار خارجی تحمل کند. به نحوی که پس از حذف بار خارجی تمامی کرنش بازیابی خواهد شد و ماده به حالت اولیه خود

⁷ Monoclinic

⁸ Twinned

⁹ De-twinned

¹⁰ Shape memory effect

¹¹ Pseudo-elasticity

¹ Austenite

² Martensite

³ Parent

⁴ Body centered cubic

⁵ Tetragonal

⁶ Orthorhombic



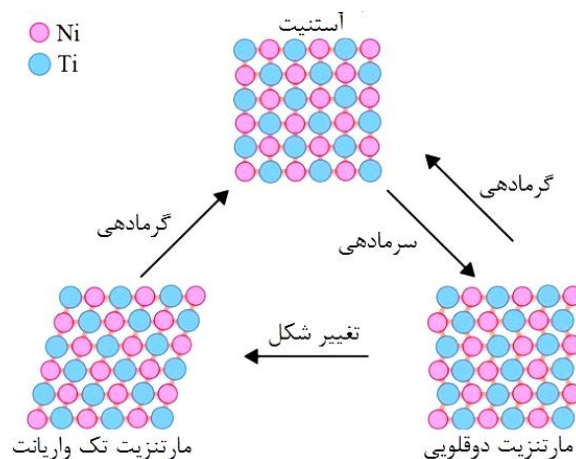
(ب)

(الف)

شکل (۳): (الف) ترازوی دقیق ویرا با دقت 0.1 mg به همراه محافظ پلاستیکی ضد-استاتیک به منظور جلوگیری از تأثیر عوامل محیطی و افزایش دقت؛ (ب) دستگاه کالری‌سنجی روبشی تفاضلی DSC به منظور تحلیل حرارتی مواد.

۲-۲- گام دوم: کالری‌سنجی

در گام بعدی و به منظور اندازه‌گیری خواص حرارتی از قبیل دماهای انتقال مارتنزیت و آستنیت، نمونه‌ی کوچک (که در گام اول جرم آن اندازه‌گیری شد) در دستگاه^۴ DSC قرار گرفت (شکل ۳ ب). نتیجه‌ی آزمایش کالری‌سنجی در شکل ۴ نشان داده شده است. در این آزمایش برای استخراج دماهای انتقال مارتنزیت یعنی M_s و M_f ، نمونه از دمای 60°C تا 100°C و با نرخ $10 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}$ سرد شد. در این حالت مشاهده می‌شود که ساختار کریستالی نمونه ابتدا از B2 به فاز میانی R و بعد از R به B19 تغییر پیدا می‌کند. تلاقی خط مماس بر ابتدا و انتهای پیک دوم نمودار با محور افقی، به ترتیب بیان گر M_s و M_f است. در ادامه به نمونه با نرخ $10 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}$ تا دمای 60°C حرارت داده شد. در این حالت ساختار کریستالی نمونه ابتدا از B19 به R و سپس از R به B2 تغییر پیدا می‌کند. پیک سمت راست در شکل ۴ در واقع حاصل برهم‌نهی انتقال‌های B2 و R است. مشابه روش استخراج دماهای انتقال مارتنزیت، تلاقی خط مماس بر ابتدا و انتهای پیک نمودار با محور افقی، به ترتیب مشخص‌کننده دماهای A_s و A_f است. لازم به ذکر است که



شکل (۴): تغییرات ساختار کریستال SMA در اثر رفتار حافظه‌شکلی.

۲- آزمایش کالری‌سنجی روبشی تفاضلی

کالری‌سنجی روبشی تفاضلی یا DSC^۱، یک روش ترمودینامیکی است که در آن تفاوت گرمای موردنیاز برای افزایش دمای یک نمونه و یک مینا (با ظرفیت گرمایی شناخته شده در بازه‌ی دمایی موردنظر)، به عنوان تابعی از دما اندازه‌گیری می‌گردد. نمونه و مینا در دمای مشابهی بوده و برنامه‌ی دمایی تحلیل DSC به گونه‌ای طرح‌ریزی می‌شود که دمای نگه‌دارنده‌ی نمونه به صورت تابعی خطی از زمان افزایش پیدا کند [۷]. در ادامه گام‌های موردنیاز برای استخراج خواص دمایی نمونه‌ی SMA با استفاده از این روش بیان خواهد شد.

۲-۱- گام اول: اندازه‌گیری دقیق جرم نمونه

به عنوان اولین گام در کالری‌سنجی، یک نمونه از SMA موردنظر (با ابعاد کوچک) تهیه گردید. سپس با استفاده از ترازوی دقیق ویرا^۲ با دقت 0.1 mg، جرم نمونه طی یک فرایند میان‌گیری از حدود 10 مرتبه تکرار برابر 4.9 mg اندازه‌گیری شد. در طول این فرایند و به منظور جلوگیری از تأثیر عوامل محیطی و افزایش دقت، از یک محافظ پلاستیکی ضد‌استاتیک^۳ استفاده گردید (شکل ۳ الف).

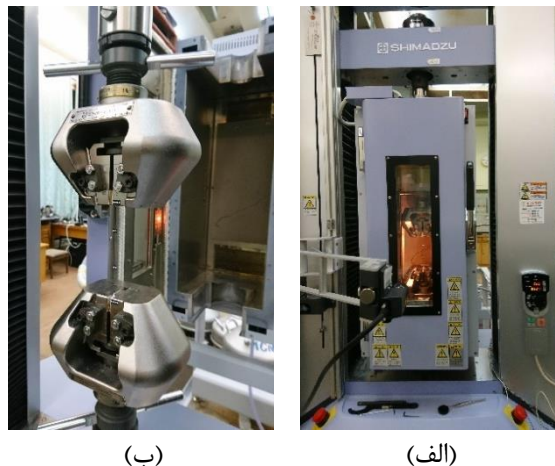
^۴ Mettler Toledo DSC 822 differential scanning calorimeter

^۱ Differential scanning calorimetry

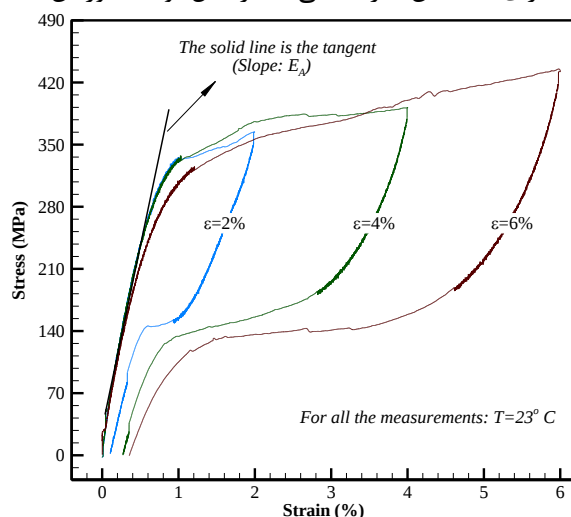
^۲ Vibra

^۳ Anti-static plastic draft shield

قسمت خطی نمودار بوده که مقدار آن در حدود 52.5 GPa به دست می‌آید.



شکل (۵): (الف) ستاپ دستگاه کشش شیمادزو و تجهیزات مورد استفاده (دوربین، محفظه حرارتی و ...) برای انجام آزمون کشش در دماهای مختلف؛ (ب) سیم نایتینول غنی از نیکل در فک‌های دستگاه به همراه مارک‌های روی نمونه برای تشخیص غیر تماسی تغییر شکل توسط دوربین.

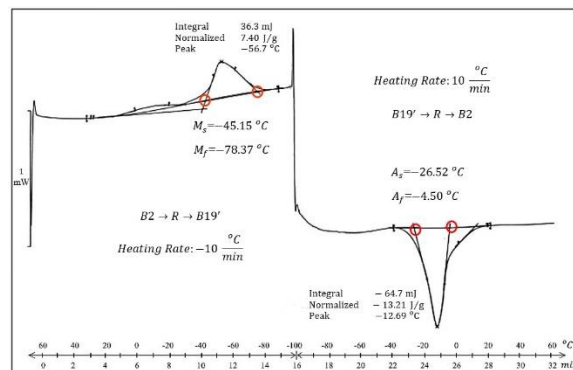


شکل (۶): حلقه‌های هیستریزس سیم نایتینول غنی از نیکل تحت مقادیر مختلف کرنش در دمای آزمایشگاه.

۳-۲- محاسبه ضرایب اثر تنش C_M و C_A

در آزمایش بعدی، سیم SMA در دماهای مختلف از 20°C تا 60°C تحت کرنش 2% قرار می‌گیرد. برای این منظور و برای

گاهی نمودار DSC تنها دارای یک انتقال فاز در هر کدام از حالت‌های افزایش و یا کاهش دمای نمونه است. برای تشخیص نوع انتقال صورت گرفته، می‌بایست دمای آغازین پیک اول (دمای M_s) با دمای پایانی پیک انتهایی (A_f) مقایسه گردد. برای مثال اگر اختلاف دمای مذکور در حدود 10°C باشد، انتقال از نوع R است (R به B2 و بالعکس).



شکل (۴): نمودار تحلیل دمایی شار حرارتی (mW)

برحسب دما (°C) و زمان (دقیقه) با نرخ روبش 10°C/min برای نمونه نایتینول غنی از نیکل. در این فرایند نمونه از دمای 60°C تا 100°C سرد شده و سپس تا دمای 60°C گرم می‌گردد.

۳- آزمایش‌های کشش

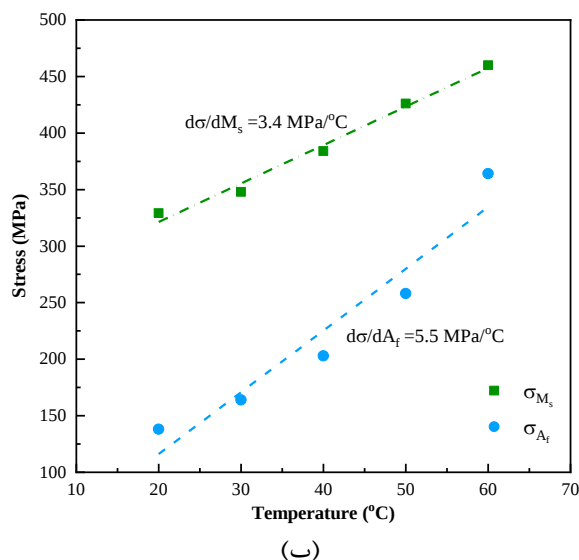
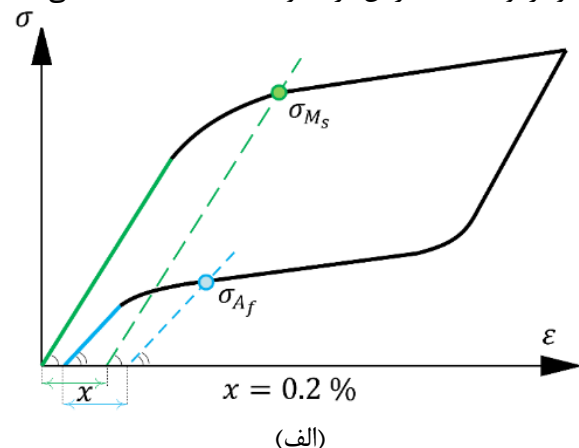
به‌منظور اندازه‌گیری خواص فیزیکی سیم آلیاژی شامل مدول الاستیک در فازهای آستنیت و مارتنزیت و ضرایب اثر تنش، از آزمایش کشش استفاده می‌شود. این آزمایش‌ها با دستگاه کشش شیمادزو^۱ انجام شده است. ستاپ آزمایش به همراه نمونه SMA در شکل ۵ نشان داده شده است.

۳-۱- محاسبه مدول الاستیک فاز آستنیت (E_A)

به‌منظور اندازه‌گیری مدول الاستیک فاز آستنیت (E_A)، آزمایش‌های کشش در سطوح مختلف کرنش (2%، 4% و 6%) در دمای آزمایشگاه (23°C) صورت پذیرفته است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نمونه آلیاژی تا کرنش 6% رفتار شبه‌الاستیک قابل‌توجهی از خود نشان می‌دهد. همچنین مدول الاستیک E_A برابر با شیب مماس بر

¹ Shimadzu tensile testing machine

رفتار شبه پلاستیک SMA مشاهده شده که با افزایش دما از 90°C به 0°C فرایند بازیابی کرنش کامل می‌شود. در ضمن مدول الاستیک E_M برابر با شیب مماس بر قسمت خطی نمودار بوده که مقدار آن در حدود 44.0 GPa به دست می‌آید.

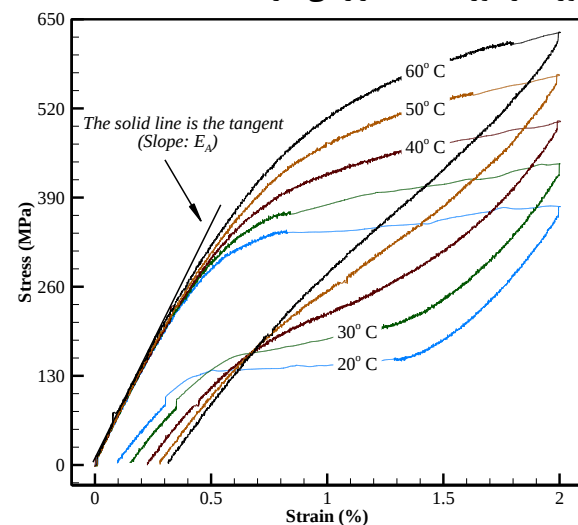


شکل (۸): (الف) روش شماتیک محاسبه σ_{M_s} و σ_{A_f} ؛ (ب) محاسبه ضریب اثر تنش $\frac{d\sigma}{dT}$ با برازش خطی مقادیر تنش‌های انتقال در دماهای 20°C تا 60°C .

۴- به‌کارگیری نتایج تجربی در شبیه‌سازی عددی

در این بخش و به‌منظور تبیین چگونگی استفاده از نتایج به‌دست‌آمده در حل‌های عددی به‌منظور شبیه‌سازی رفتار شبه‌الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار، از نرم‌افزار انسیس و رکبنج استفاده شده است. به این صورت که خواص به‌دست‌آمده در

کنترل دما از محفظه محیطی استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش دما ناحیه هیستریزس کاهش یافته و سطح تنش موردنیاز برای انتقال مارتنزیت افزایش می‌یابد. همچنین همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در دماهای بالاتر حلقه هیستریزس به فرمی برگوی در می‌آید. لازم به ذکر است که شیب مماس بر نمودارهای شکل ۷ نیز برابر با مدول الاستیک E_A است. درواقع E_A یک ویژگی ذاتی برای ماده SMA به شمار می‌رود. همان‌طور که مشخص است، هنگامی که یک SMA تحت تنش قرار می‌گیرد، دماهای انتقال آن تغییر خواهد کرد. شکل ۸ الف روش محاسبه σ_{M_s} و σ_{A_f} در یک دمای نوعی را نشان می‌دهد. با استفاده از این روش و در نظر گرفتن حلقه‌های هیستریزس در شکل ۷، مقادیر $\frac{d\sigma}{dM_s}$ و $\frac{d\sigma}{dA_f}$ مطابق شکل ۸ ب محاسبه گردیده‌اند. این شیب‌ها در واقع همان ضریب‌های اثر تنش بوده که به‌منظور تخمین تنش‌های انتقال در دمای موردنظر مورد استفاده قرار می‌گیرند.



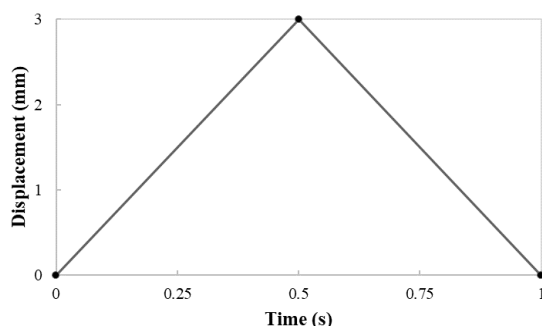
شکل (۷): حلقه‌های هیستریزس سیم نایتینول غنی از نیکل تحت کرنش ۲٪ برای مقادیر دمایی 20°C تا 60°C .

۳-۳- محاسبه مدول الاستیک فاز مارتنزیت (E_M)

به‌منظور محاسبه مدول الاستیک فاز مارتنزیت (E_M)، باید آزمایش کشش سیم SMA در دمایی کمتر از M_f انجام شود. به این منظور، دمای محفظه روی 90°C تنظیم گردید. نتایج آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است. در این آزمایش،

در ارتباط با جزئیات و نکات مربوط به شبیه‌سازی صورت گرفته موارد زیر قابل ذکر است:

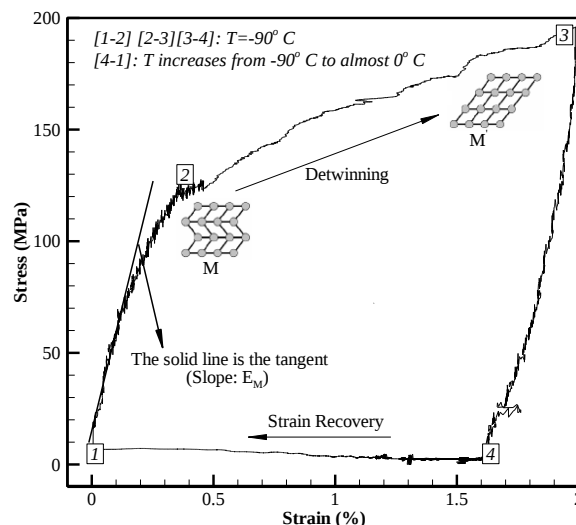
- به منظور شبکه‌بندی سیم آلیاژی نشان داده شده در شکل ۱۰ از حدود ۲۸۰۰ المان آجری ۲۰ گره‌ای (Hex20) با ضریب منطری بین ۱/۸۴۴ و ۲/۲۹ استفاده شده است. برای اطمینان از انتخاب سائز مناسب المان، طبق روال مرسوم حل‌های عددی مطالعه شبکه انجام شده است که از ذکر جزئیات در این خصوص صرف نظر شده است.
- برای اعمال شرط مرزی و بارگذاری بر سیم آلیاژی، مطابق شکل ۱۰ یک سر سیم ثابت شده و سر دیگر آن تحت جابجایی مطابق شکل زیر قرار گرفته است:
- در تعیین مدل مادی سیم آلیاژی حافظه‌دار، خواص الاستیسیته همسانگرد^۱ و فوق کشسان^۲ (بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۱) برای آن در نظر گرفته شده است.



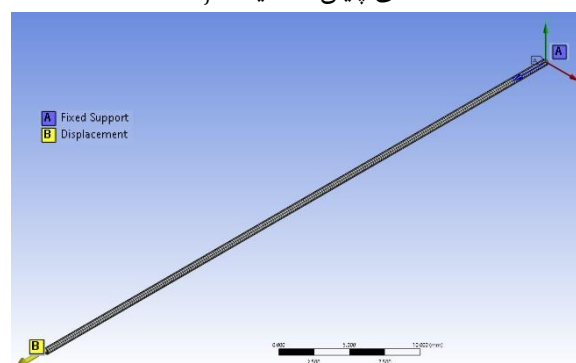
شکل (۱۱): جزئیات بارگذاری اعمال شده بر سیم آلیاژی در نرم‌افزار انسیس و رکبنج.

در شکل ۱۲ مقایسه‌ای بین رفتار تنش-کرنش در حل تجربی (نمودار مشکی با خط پر و نشانه دایره‌ای) و حل عددی (نمودار قرمز با خط چین و نشانه لوزی) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رفتار دو نمودار و به‌ویژه سطح زیر هر دو منحنی به‌صورت بصری تطابق قابل قبولی دارند. به‌این ترتیب می‌توان با به‌کارگیری نرم‌افزارهای تجاری المان محدود و یا کدهای عددی، اثر میرایی و هدررفت انرژی (متناسب با سطح زیر نمودار تنش-کرنش) را در مسائل مهندسی حاوی آلیاژهای حافظه‌دار در نظر گرفت.

بخش‌های قبل (که به‌صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است) به‌عنوان ورودی خواص شبه‌الاستیک ماده به نرم‌افزار مذکور داده شده است. هندسه در نظر گرفته در این شبیه‌سازی، یک سیم آلیاژی نایتینول به قطر ۰.۵ mm و طول ۵۰ mm بوده (شکل ۱۰) که مورد آزمایش کشش قرار گرفته است. در این آزمایش یک سر سیم ثابت شده و سر دیگر آن جابجایی کنترل شده به میزان ۳ mm (معادل کرنش ۶٪) دارد.



شکل (۹): نمودار تنش-کرنش و فرایند غیر دوقلویی یا تک واریانت شدن سیم SMA نایتینول غنی از نیکل در حالت مارتنیزیت کامل (-90°C) به همراه رفتار شبه‌پلاستیک و بازیابی کرنش در نتیجه گرما دادن تا حصول دمایی بالاتر از دمایی پایان آستنیت (A_f).



شکل (۱۰): نمونه سیم آلیاژی نایتینول به شبکه‌بندی شده به قطر ۰.۵ mm و طول ۵۰ mm در نرم‌افزار انسیس و رکبنج.

² Superelasticity

¹ Isotropic elasticity

کالری‌سنجی و آزمایش‌های کشش در دماهای مختلف است. خروجی تحلیل‌های صورت گرفته بر روی نتایج این آزمایش‌ها شامل دماهای انتقال، مدول‌های الاستیک در فازهای آستنیت و مارتنزیت و نیز ضرایب اثر تنش در فازهای آستنیت و مارتنزیت را می‌توان به‌عنوان ورودی حل‌های عددی و مدل‌های پدیدارشناختی برای شبیه‌سازی رفتار شبه‌الاستیک این مواد هوشمند مورد استفاده قرار داد.

۷- تشکر و قدردانی

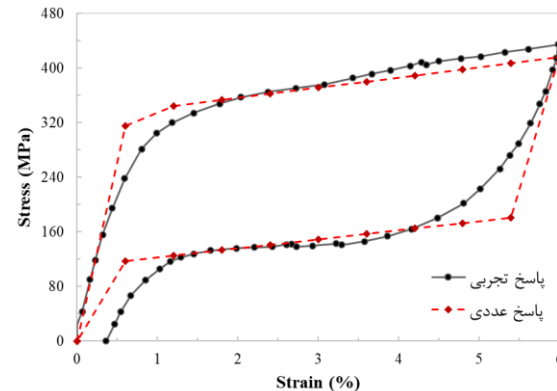
آزمایش‌های ارائه شده در این مقاله، در دانشکده ریاضی و مکانیک دانشگاه دولتی سنت پترزبورگ و تحت راهنمایی اساتید محترم دپارتمان تئوری الاستیسیته، پروفسور الکساندر رازف و پروفسور ناتالیا رسنينا انجام پذیرفته است.

۸- فهرست علائم

A_f	دمای پایین آستنیت
A_s	دمای آغاز آستنیت
C_A	ضریب اثر تنش در حالت آستنیت
C_M	ضریب اثر تنش در حالت مارتنزیت
M_f	دمای پایین مارتنزیت
M_s	دمای آغاز مارتنزیت
Λ	بیشینه کرنش انتقال
SMA	آلیاژ حافظه‌دار
σ_{A_f}	تنش پایانی برای انتقال به آستنیت
σ_{M_s}	تنش آغازین برای انتقال مستقیم به مارتنزیت

۹- مراجع

- [1] Kalita U, Guntu R, Seelam R, Arshiya G. A review on the shape memory alloy, vibration dampers used in UAVs. In AIP Conference Proceedings 2024 (Vol. 2962, No. 1). AIP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0195003>.
- [2] Thiebaud F, Ben Zineb T. Structural analysis of the dynamic response of a shape memory alloy based damper. Journal of Vibration and Control. 2024:10775463241263374. DOI: <https://doi.org/10.1177/10775463241263374>.



شکل (۱۲): مقایسه رفتار تنش و کرنش نمونه سیم آلیاژی نایتینول در پاسخ‌های تجربی و عددی (حل با استفاده از نرم‌افزار انسیس و رکبنچ).

۵- نتایج و بحث

آزمایش‌های تجربی ارائه‌شده در بخش‌های قبل اطلاعات مناسبی برای تحلیل عددی سازه‌های مهندسی حاوی مواد SMA (نظر به رفتار شبه‌الاستیک این مواد) فراهم می‌آورد. به‌منظور جمع‌بندی نتایج تجربی به‌دست‌آمده، جدول زیر خواص نایتینول مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول (۱): خواص فیزیکی آلیاژ نایتینول غنی از نیکل بدست آمده از آزمایش‌های کالری‌سنجی و کشش در دماهای مختلف.

ثوابت	مدول الاستیک	دماهای انتقال
C_A = 3.4 MPa/ °C	E_A = 52.5 GPa	M_f = -78.4 °C
C_M = 5.5 MPa/ °C	E_M = 44.0 GPa	M_s = -45.1 °C
Λ = 0.06		A_s = -26.5 °C
		A_f = -4.5 °C

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به کاربردهای روزافزون آلیاژهای حافظه‌دار و پتانسیل بالای این مواد برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها، در این مقاله تلاش گردید تا فرایند استخراج خواص ترمومکانیکی این مواد به صورت کاربردی و برای استفاده پژوهش‌گران داخلی تدوین گردد. بررسی‌های تجربی صورت گرفته شامل آزمایش

- [3] Saedi S, Acar E, Raji H, Saghaian SE, Mirsayar M. Energy damping in shape memory alloys: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;956:170286. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170286>.
- [4] Cisse C, Zaki W, Zineb TB. A review of constitutive models and modeling techniques for shape memory alloys. *International Journal of Plasticity*. 2016;76:244-84. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.iijplas.2015.08.006>.
- [5] Lobo PS, Almeida J, Guerreiro L. Shape memory alloys behaviour: A review. *Procedia Engineering*. 2015;114:776-83. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.025>.
- [6] Lecce L, editor. *Shape memory alloy engineering: for aerospace, structural and biomedical applications*. Elsevier; 2014.
- [7] Bar-Cohen A, Suhling JC, Tay AA, editors. *Encyclopedia of Packaging Materials, Processes, and Mechanics: Interconnect and Wafer Bonding Technology*. Set 1. World Scientific; 2019.