

Research Paper

Control of shape memory, pseudoelastic and thermal recovery behavior of NiTi/NiTiCu bi-layer composite aided by FEM simulation

Milad Taghizadeh¹, *Mahmoud Nili-Ahmadabadi², Mostafa Baghani³, Mohammad Hassan Malekshoaraie¹, Mohammad Habibi Parsa²

1- M.Sc. student, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- PhD, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Citation: Taghizadeh M, Nili-Ahmadabadi M, Baghani M, Malekshoaraie M.H, Habibi Parsa M. Control of shape memory, pseudoelastic and thermal recovery behavior of NiTi/NiTiCu bi-layer composite aided by FEM simulation. Metallurgical Engineering 2017; 20(3) 148-161
<http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.67767.1141>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.67767.1141>

ABSTRACT

In this paper the effects of thickness ratio on pseudoelastic, shape memory and thermal recovery properties of NiTi/NiTiCu bi-layer composite was investigated by using FEM simulation and experimental results. The NiTi/NiTiCu bi-layer composites with different thickness ratios designed and analyzed in ABAQUS software using SMA constitutive 3D model presented by Lagoudas et al. The pseudoelastic and shape memory strain values for different composites were studied and measured as well as thermal recovery strain and its rate. For validating the results of the FEM study NiTi/NiTiCu bi-layer composites were made and tensile tested. The results indicate a high correlation between two methods that leads to reduce the number of experiments to optimizing the composite behavior, also, considering the results of the FEM method, the NiTi/NiTiCu bi-layer composite shows high potential in adjusting pseudoelastic and shape memory properties and also deformation parameters such as stress and strain plateau with changing the thickness ratio that can be considered in SMA components design.

Keywords: Shape memory alloys, FEM study, Bi-layer composites, Strain thermal recovery

■ ■

* **Corresponding Author:**

Mahmoud Nili-Ahmadabadi, PhD

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 82084163

E-mail: nili@ut.ac.ir

کنترل رفتار سودوالاستیک، حافظه‌داری و بازیابی حرارتی در کامپوزیت دو لایه آستیتی-مارتنزیتی آلیاژ نایتینول به کمک شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی

میلاذ تقی‌زاده^۱، محمود نیلی احمدآبادی^۲، مصطفی باغانی^۳، محمد حسن ملک‌الشعرايي^۱، محمد حبیبی پارسا^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله تاثیر نسبت ضخامت بر کنترل خواص کامپوزیت دو لایه مارتنزیتی-آستیتی ساخته شده از آلیاژ نایتینول توسط دو روش شبیه‌سازی عددی و ساخت نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار از نرم افزار آباکوس با مدل ساختاری ارائه شده توسط لاگوداس و همکاران استفاده شده است. در روش عددی علاوه بر بررسی تغییرات کرنش حافظه‌داری و سوپرالاستیک با پارامتر نسبت ضخامت، تاثیر درصد کرنش و تغییرات نسبت ضخامت بر روی سرعت بازیابی و میزان بازیابی کرنش مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. به منظور بررسی صحت جواب‌های به دست آمده از روش شبیه‌سازی عددی، نتایج روش تجربی ساخت نمونه آورده شده است. نتایج دلالت بر تطبیق بالایی میان داده‌های حاصل از دو روش دارد، همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که کامپوزیت دو لایه با نسبت ضخامت‌های مختلف پتانسیل بالایی را در ارائه کردن دامنه‌ای از رفتار حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته و همچنین پارامترهای تغییر شکل، از خود نشان می‌دهد که می‌تواند مورد توجه طراحان در زمینه‌های ساخت عملگرهای حافظه‌دار و همچنین دیگر اجزای ساخته شده از جنس آلیاژهای حافظه‌دار باشد.

واژه‌های کلیدی: حافظه‌دار، شبیه‌سازی عددی، کامپوزیت دولایه، بازیابی حرارتی کرنش

۱. مقدمه

به عنوان یک تکنیک کاربردی مهم در دستیابی به رفتار مکانیکی کنترل‌پذیر باشد (۱-۴).

به طور معمول، در بارگذاری کششی آلیاژهای حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم، مشاهده می‌شود که در یک دامنه از تغییرات کرنش، تنش تقریباً ثابت می‌ماند. این نوع رفتار تغییر شکل که به تغییر شکل لودرز^۹ معروف است تحت تاثیر بسیاری از پارامترها مانند میزان کارسرد، دما و زمان آنیل، نرخ سرد کردن و همچنین دمای تست کشش است (۵، ۶). علاوه بر این، با تولید کامپوزیت‌های چند لایه ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار، فیلم‌های نازک و آلیاژهای حافظه‌دار تابعی^{۱۰} می‌توان به دامنه وسیعی از خواص مکانیکی دست یافت که در بسیاری از زمینه‌ها کاربرد دارد (۷-۱۱).

امروزه اجزای حافظه‌دار تولید شده به روش لیزر در بسیاری از زمینه‌ها کاربردهای فراوانی یافته‌اند. در تمامی این روش‌ها گرادیان دمایی ایجاد شده توسط پالس‌های

امروزه آلیاژهای حافظه‌دار به عنوان زیرگروهی از مواد هوشمند با دو مشخصه رفتاری شناخته شده سودوالاستیک^۱ و حافظه‌داری^۲، کاربردهای فراوانی در بسیاری از زمینه‌ها از جمله استفاده به عنوان عملگر^۳ دارند. توانایی این گروه از مواد در بازیابی شکل اولیه، ناشی از تغییر حالت مارتنزیتی القا شده توسط تنش^۴ یا درجه حرارت^۵ است. این آلیاژها کنترل‌پذیری پایینی را در هر دو رفتار سودوالاستیک و حافظه‌داری از خود نشان می‌دهند، از این رو کنترل پارامترهای تغییر شکل مانند تنش پلاتو^۶، کرنش پلاتو^۷ و کرنش سودوالاستیک^۸ می‌تواند

1. Pseudo-elastic effect
2. Shape memory effect
3. Actuator
4. Stress-induced martensitic transformation
5. Thermally-induced martensitic transformation
6. Plateau stress
7. Plateau strain
8. Pseudo-elastic strain

* نویسنده مسئول:

دکتر محمود نیلی احمدآبادی

نشانی: تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.

تلفن: ۸۲۰۸۴۱۶۳ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: nili@ut.ac.ir

ترکیب Ti-50.7at.%Ni و آلیاژ مارتنزیتی (نمونه M) با ترکیب Ti-45at.%Ni-5at.%Cu توسط روش ذوب قوسی تحت خلا^{۱۵} تولید شدند. عملیات فورج گرم و نورد گرم و آنیل در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت به منظور شکستن ساختار دندرتیتی و دستیابی به ضخامت در حدود ۲-۳ میلی‌متر انجام شد. عملیات نورد سرد و آنیل بین پاسی در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به صورت مکرر جهت بهبود خواص سودوالاستیک و حافظه‌داری، و همچنین دستیابی به ضخامت در حدود چند دهم میلی‌متر به کار گرفته شدند. در این مرحله ورق‌هایی که برای ساخت نمونه‌های تک‌لایه در نظر گرفته شده بودند تحت آنیل نهایی ۰/۵ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. جهت انجام آنالیز فازی هر یک از ورق‌های نمونه‌های آستنیتی و مارتنزیتی در دمای محیط از دستگاه پراش اشعه ایکس^{۱۶} استفاده شد. در این آزمون از پرتو K α مس در ولتاژ ۵۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر استفاده گردید. دامنه زاویه پراش مورد بررسی ۳۰ تا ۵۰ درجه و شامل دریافت پرتو پراش یافته طی ۹/۶ ثانیه به ازای هر ۰/۰۲ درجه بوده است.

برای بررسی رفتار نمونه‌های تک‌لایه با استفاده از دستگاه وایرکات، نمونه‌های کشش مطابق استاندارد ASTM-E8 و در اندازه کوچکتر^{۱۷} با ابعاد طول گیج ۲۵ میلی‌متر، عرض ۶ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر تهیه شدند. تست کشش توسط دستگاه سنتام^{۱۸} با نرخ کرنش 10^{-4} بر ثانیه توسط کرنش‌سنج^{۱۹} بسته شده روی نمونه انجام شد و نمودارهای تنش-کرنش برای رفتار نمونه‌های تک‌لایه به دست آمد. برای این کار از سلول نیرویی^{۲۰} ۲۰۰۰ کیلوگرم نیرو و همچنین روش دو مرحله‌ای بارگذاری-باربرداری استفاده شد. به منظور بررسی رفتار نمونه‌ها در فشار، نمونه‌های فشار استوانه‌ای شکل با قطر ۵ میلی‌متر و ارتفاع ۶ میلی‌متر، مطابق استاندارد ATSM-E9 (۲۷)، توسط دستگاه وایرکات ساخته شدند. تست فشار توسط دستگاه سنتام با نرخ کرنش 10^{-4} بر ثانیه انجام شد و نمودارهای تنش-کرنش برای رفتار ماده در فشار به دست آمد.

برای شبیه‌سازی رفتار تحت کشش کامپوزیت‌های دولایه با نسبت ضخامت مختلف، از نرم افزار آباکوس و مدل سه بعدی ارائه شده توسط لاگوداس استفاده شد. برای این کار، ابتدا ضرایب مورد نیاز مدل، توسط داده‌های تجربی بدست آمده از نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های تک‌لایه محاسبه شدند، سپس با فراخواندن نسخه کد توسط نرم افزار آباکوس، رفتار هردولایه تعریف شد. بعد از آن طراحی کامپوزیت‌های

لیزر می‌تواند ریزساختار ماده را تحت تاثیر قرار دهد و در ماده خواص گرادیانی ایجاد کند. خواص گرادیانی ایجاد شده می‌تواند شرایط مناسبی را برای کنترل تنش توسط کرنش فراهم کند (۱۲-۱۸). با این وجود، کنترل گرادیان دمایی توسط پالس لیزر دارای دشواری‌ها و ملزومات مربوط به خود می‌باشد (۱۹، ۲۰). اخیراً، یک فیلم نازک دولایه حافظه‌دار تولید شده به روش کندوپاش^{۱۱} بر روی زیرلایه از جنس سیلیسیم، خواص سودوالاستیک و حافظه‌داری را به صورت همزمان نشان داده است (۲۱). روشی دیگر برای کنترل خواص مکانیکی در اجزای ساخته شده از جنس آلیاژ حافظه‌دار تولید کامپوزیت‌های دولایه آستنیتی-مارتنزیتی به روش اتصال نفوذی است (۲۲). بررسی‌های انجام شده در فصل مشترک اتصال دولایه نشان می‌دهد افزایش زمان آنیل اتصال نفوذی، عمق نفوذ را برای عناصر افزایش داده و منجر به تولید آلیاژهای حافظه‌دار تابعی می‌گردد (۲۳). علاوه بر این، با تغییر پارامترهای هندسی مانند نسبت ضخامت هرلایه ماده می‌تواند خواص مکانیکی متفاوتی را نشان دهد. با در نظر گرفتن پتانسیل بالای تولید صنعتی کامپوزیت‌های دولایه توسط روش اتصال نفوذی، می‌توان خواص را نه تنها از طریق آنیل و ایجاد گرادیان دمایی، بلکه با تغییر پارامترهای هندسی نیز کنترل کرد (۲۴).

امروزه مدل‌های ساختاری^{۱۲} مختلفی برای پیش‌بینی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار ارائه شده‌اند (۲۵، ۲۶). به کارگیری این مدل‌ها ابزار قدرتمندی را در اختیار محققین در جهت پیشبرد اهداف و ساخت اجزای جدید از جنس آلیاژهای حافظه‌دار قرار می‌دهد، همچنین با در نظر گرفتن دشواری‌های روش‌های تجربی، گام‌های جدیدی را در جهت بهینه‌سازی زمان و هزینه ساخت برمی‌دارد. این مقاله با تکیه بر روش شبیه‌سازی عددی اجزا محدود غیرخطی توسط نرم‌افزار آباکوس^{۱۳} و استفاده از زیربرنامه توسعه داده شده برای مدل عددی سه بعدی ارائه شده توسط لاگوداس^{۱۴}، اثر تغییر نسبت ضخامت را بر مقادیر کرنش حافظه‌داری و سودوالاستیک، سطح تنش پلاتو و بازیابی حرارتی کامپوزیت دولایه مارتنزیتی-آستنیتی ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده از روش شبیه‌سازی، مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی به دست آمده از ساخت کامپوزیت دولایه با دو نسبت ضخامت مختلف صورت می‌پذیرد.

۲. مواد و روش انجام آزمایش

برای ساخت نمونه‌های تک‌لایه، آلیاژ آستنیتی (نمونه A) با

15. Vacuum arc remelting (VAR)

16. X-ray diffraction

17. Sub size specimen

18. SANTAM

19. Extensometer

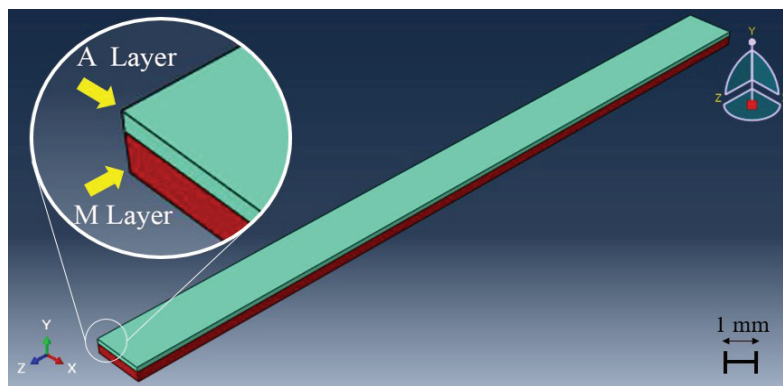
20. Load cell

11. Sputtering

12. Constitutive model

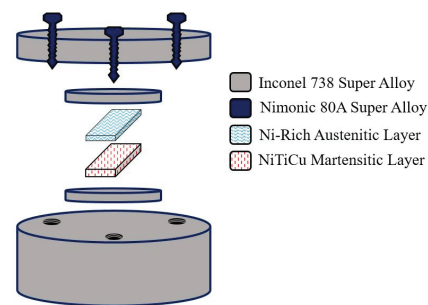
13. ABAQUS

14. Lagoudas



شکل ۱. کامپوزیت دولایه طراحی شده در نرم افزار آباکوس.

عملیات تمیزکاری با قراردهی نمونه‌ها در استون و در دستگاه التراسونیک به مدت ۵ دقیقه انجام شد. نمونه‌های آماده شده از جنس آلیاژ حافظه‌دار با ضخامت معین بر روی یکدیگر قرار گرفته و سپس درون نگهدارنده ساخته شده از سوپرآلیاژ مطابق طرحواره نشان داده شده در شکل ۲ قرار گرفتند. بعد از آن تنش ۱۰ مگاپاسکال بر نمونه‌ها به وسیله تنظیم پیچ‌های نگهدارنده به کمک گشتاور سنج، اعمال شد. نگهدارنده به همراه نمونه قرار گرفته در آن، درون کوره تیوبی با خلا 10^{-4} میلی‌بار قرار داده شد. کوره با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و سپس در این دما ۳ ساعت نگهداری شد و در پایان با سرعت ۲ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا دمای محیط سرد شد. پس از عملیات اتصال نفوذی نورد سرد تا رسیدن به -25 تا 30% کاهش ضخامت انجام شد. آنیل میانی نیز برای از بین بردن اثر عملیات نورد و حصول نرمی مطلوب در کوره تیوبی و در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه تحت خلا 10^{-4} میلی‌بار انجام و سپس نمونه‌ها در مخلوط آب و یخ سریع سرد شدند. بعد از هر مرحله آنیل و قبل از هر مرحله نورد اکسیدهای سطحی نمونه‌ها توسط اسید شویی و سنباده‌زنی از ورق‌ها زدوده می‌شدند. در آخرین مرحله پیش از رسیدن به ضخامت دلخواه، ورق‌های دولایه تحت نورد با کاهش ضخامت 20% قرار گرفتند و به ضخامت نهایی 0.6 میلی‌متر رسیدند. در نهایت نمونه‌های دولایه برای رسیدن به خواص بهینه حافظه‌داری و سوپرلاستیسیته تحت عملیات آنیل در کوره تیوبی و در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه تحت خلا 10^{-4} میلی‌بار قرار گرفتند و سپس در مخلوط آب و یخ سریع سرد شدند. برای بررسی رفتار کششی نمونه‌های دولایه با استفاده از دستگاه وایرکات، نمونه‌های کشش در ابعاد $10 \times 2 \times 0.6$ میلی‌متر مکعب تهیه شدند. تست کشش توسط دستگاه ستام با نرخ کرنش $2/8 \times 10^{-4}$ بر ثانیه انجام شد و نمودارهای تنش-کرنش برای رفتار نمونه‌های دولایه به دست آمد. برای این کار از سلول نیرویی ۲۰۰۰ کیلوگرم نیرو و همچنین روش دو مرحله‌ای بارگذاری-باربرداری استفاده شد.



شکل ۲. طرحواره نگهدارنده ساخته شده از جنس آلیاژ حافظه‌دار همراه با نمونه‌های داخل آن.

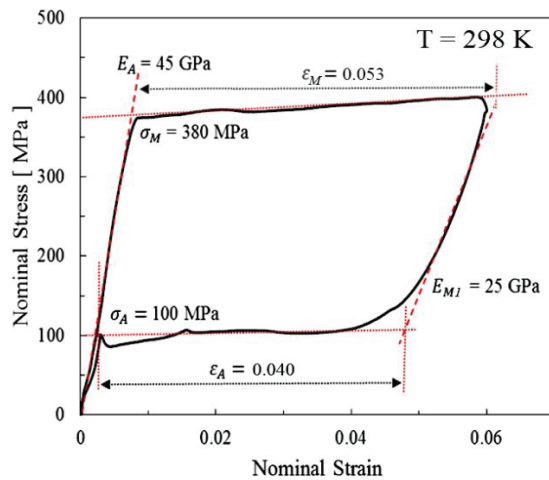
دولایه با نسبت ضخامت مختلف انجام شد. شکل ۱ کامپوزیت دولایه طراحی شده در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد که ابعاد آن $30 \times 2 \times 0.6$ میلی‌متر مکعب است. همچنین در شبیه‌سازی از تعداد ۲۰۰۰ مش از نوع مکعبی با تغییرات خطی^{۲۱} استفاده گردید. ابتدا کالیبراسیون تک‌لایه‌ها در 6% کرنش انجام شد. سپس کامپوزیت‌های دولایه با نسبت ضخامت مختلف تحت بارگذاری و باربرداری قرار گرفتند و نمودار تنش-کرنش آنها به دست آمد. همچنین پارامترهای مختلفی مانند کرنش سوپرلاستیک، کرنش حافظه‌داری و سطوح تنش پلاتو از روی نمودارها محاسبه گردید. به منظور ارزیابی بیشتر، نمودارهای بازیابی کرنش بر حسب زمان رسم شد و اثر کامپوزیتی شدن بر روی سرعت بازیابی کرنش با حرارت در رفتار حافظه‌داری مورد بررسی قرار گرفت.

برای بررسی صحت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی، نمونه دولایه با نسبت ضخامت ۲ به ۱ و ۳ به ۱ (مارتنزیت به آستنیت) ساخته شد. برای این کار نمونه‌های آماده شده برای عملیات اتصال نفوذی، توسط دستگاه وایرکات با ابعاد 20×10 میلی‌متر مربع و ضخامتهای ۴ و ۸ میلی‌متر به ترتیب برای لایه آستنیتی و مارتنزیتی از ورق‌های بدست آمده توسط عملیات نورد سرد، برش داده شدند. دو طرف نمونه، با ورقه‌های سیلکون کاربید ۶۰، ۱۸۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ سنباده‌زنی شدند. در نهایت

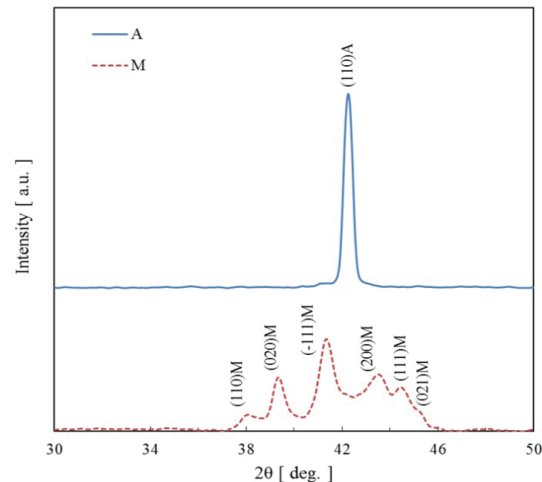
21. C3D8 Linear brick

جدول ۱. زاویه‌ها و صفحات اصلی فاز آستنیت (B2) و مارتنزیت (B19') در آلیاژ نیکل تیتانیوم

فاز آستنیت با ساختار مکعبی		فاز مارتنزیت با ساختار مونوکلینیک	
2θ	(h k l)	2θ	(h k l)
42.20	(1 1 0)	38.40	(0 1 1)
		39.22	(0 2 0)
		41.36	(1 1 -1)
		43.92	(2 0 0)
		44.92	(1 1 1)
		45.27	(1 2 0)



شکل ۴. نمودار تنش-کرنش نمونه تک‌لایه A در کشش و باربرداری در دمای محیط.



شکل ۳. نمودار آنالیز فازی پراش پرتو ایکس در دمای محیط.

سوپر الاستیک همراه با پلاتو تنش نشان می‌دهد. در این نوع رفتار همراه با بارگذاری فاز آستنیت در ابتدا مطابق قانون هوک رفتار خطی از خود نشان می‌دهد. با ادامه بارگذاری در سطح تنش ۳۸۰ مگاپاسکال، آستنیت ناپایدار شده و یک مارتنزیت بازآرایی شده تشکیل می‌گردد. ادامه فرایند بارگذاری تا انتهای پلاتو، سبب رشد مارتنزیت بازآرایی شده می‌شود، که در آن فاز آستنیت کاملاً به مارتنزیت بازآرایی شده تبدیل می‌شود. در باربرداری ابتدا مارتنزیت بازآرایی شده به صورت خطی تا سطح تنش ۱۰۰ مگاپاسکال باربرداری می‌شود، در این سطح تنش فاز مارتنزیت ناپایدار شده و یک بخش آستنیت با ساختار مکعبی تشکیل می‌گردد. در طول باربرداری در سطح تنش ثابت این بخش آستنیتی رشد کرده تا مارتنزیت کاملاً به آستنیت تبدیل گردد. در ادامه باربرداری فاز آستنیت به صورت خطی مطابق قانون هوک باربرداری می‌شود. فرایند توصیف شده در بالا را یک سیکل کامل اثر سوپر الاستیسیته گویند (۲۸).

در شکل ۴ همچنین پارامترهای تغییر شکل ماده مانند مدول یانگ و همچنین تنش و کرنش پلاتو در بارگذاری و باربرداری محاسبه شده‌اند. برای این کار خطوط نقطه‌چین بر منحنی تنش-کرنش رفتار سوپر الاستیک مماس شده‌اند. پس از آن محل‌های تقاطع این خطوط به دقت اندازه‌گیری و

۳. نتایج و بحث

شکل ۳ نمودار به دست آمده از آنالیز فازی را برای نمونه‌های A و M نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، خط ممتد مربوط به نمونه A می‌باشد که دارای ترکیب شیمیایی Ti-50.7 at.% Ni است. همچنین موقعیت پیک و صفحه آن در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود آنالیز نمونه A تنها پیک مربوط به فاز آستنیت (B2) را نشان می‌دهد که در پژوهش‌های قبلی گزارش شده است [۴۱، ۴۲]. بنابراین نمونه A در دمای محیط تک فاز آستنیت است و دارای خاصیت سوپر الاستیسیته می‌باشد. خط متقاطع پیک‌های مربوط به نمونه M را نشان می‌دهد که دارای ترکیب شیمیایی Ti-45 at.% Ni-5at.% Cu است. این پیک‌ها مربوط به فاز مارتنزیت (B19') است و موقعیت پیک‌ها و صفحات آن در جدول ۱ آورده شده است [۴۱، ۴۲]. بنابراین نمونه M در دما محیط تک‌فاز مارتنزیتی است دارای خاصیت حافظه‌داری می‌باشد.

شکل ۴ منحنی تنش-کرنش کشش در دمای محیط را برای نمونه تک‌لایه A تا ۶٪ کرنش نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود لایه A رفتار کاملاً

جدول ۲. پارامترهای استخراج شده از رفتار نمونه A در کشش و باربرداری در دمای محیط

ϵ_A	ϵ_M	σ_A (MPa)	σ_M (MPa)	E_{M1} (GPa)	E_A (GPa)
0.040	0.053	100	380	25	45

جدول ۳. پارامترهای استخراج شده از رفتار نمونه M در کشش و باربرداری در دمای محیط

ϵ_{DT}	ϵ_{DTU}	σ_{DT} (MPa)	E_{M4} (GPa)	E_{M3} (GPa)	E_{M2} (GPa)
0.030	0.015	80	25	9.5	9.5

جدول ۴. ضرایب محاسبه شده برای مدل عددی لاگوداس برای شبیه‌سازی رفتار کامپوزیت دولایه

پارامترها	E_A (GPa)	E_M (GPa)	H	$\rho\Delta s^M$	$\rho\Delta s^A$
A	45	25	0.045	-36432	-116059
M	45	15	0.048	-1577146	-1373077

تنش صفر، این فاز در ماده باقی می‌ماند. حرارت‌دهی بعد از باربرداری در بالای دمای A_f سبب می‌شود با تشکیل فاز آستنیت، ماده شکل اولیه خود را بازیابی کند و پس از سرد شدن ماده و تبدیل مجدد آن به فاز مارتنزیت با واریانتهای خود تطبیق شونده شکل اولیه حفظ می‌شود. فرایند توصیف شده را یک سیکل کامل اثر حافظه‌داری گویند (۲۸).

مشابه با رفتار سوپر الاستیسیته، در شکل ۵ همچنین پارامترهای تغییر شکل ماده مانند مدول یانگ و تنش پلاتو برای رفتار نمونه M محاسبه شده‌اند. برای این کار خطوط نقطه‌چین بر منحنی تنش-کرنش رفتار نمونه M مماس شده‌اند. پارامترهای استخراج شده از رفتار نمونه M در کشش و باربرداری در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

با استفاده از پارامترهای استخراج شده از رفتار کشش نمونه‌های تک‌لایه ارائه شده در جدول‌های ۲ و ۳، ضرایب مدل ساختاری لاگوداس محاسبه شدند. این ضرایب در جدول ۴ آورده شده‌اند. در این جدول H نشان دهنده ماکزیمم کرنش استحاله است. همچنین $\rho\Delta s^M$ و $\rho\Delta s^A$ به ترتیب نشان دهنده ضریب تاثیر تنش مارتنزیت و آستنیت هستند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

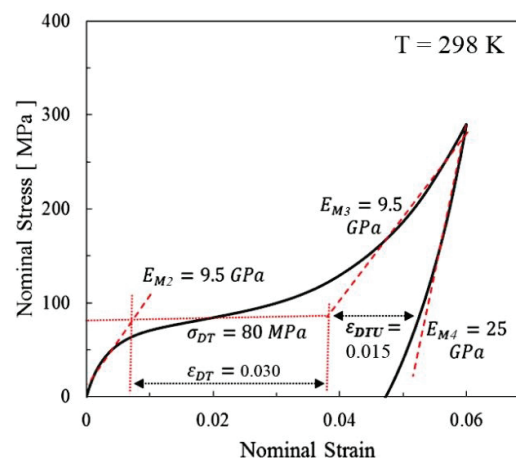
معادله ۱.

$$\rho\Delta s^A = -\frac{\sigma^A}{T_{\text{test}} - A_s} H$$

معادله ۲.

$$\rho\Delta s^M = -\frac{\sigma^M}{T_{\text{test}} - M_s} H$$

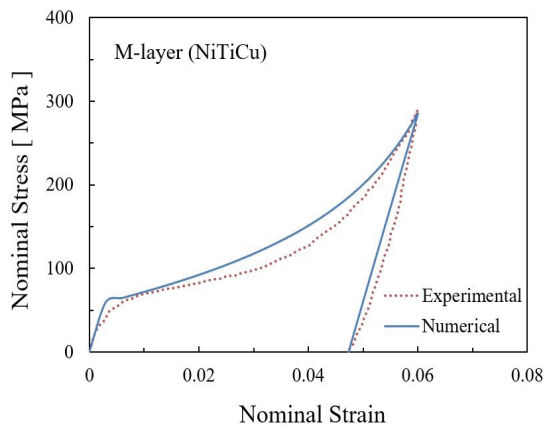
که در آن σ^A تنش پلاتو در باربرداری، σ^M تنش پلاتو در بارگذاری، A_s دمای شروع آستنیت، M_s دمای شروع مارتنزیت و T_{test} دمای آزمون کشش است.



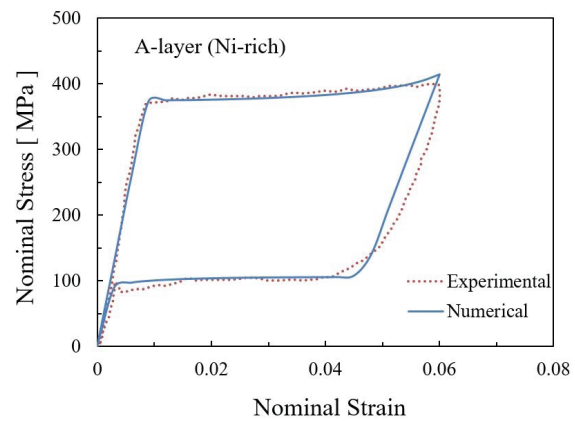
شکل ۵. منحنی تنش-کرنش در کشش و باربرداری در دمای محیط برای تک‌لایه M.

پارامترها محاسبه شده‌اند. پارامترهای استخراج شده از رفتار کاملاً سوپر‌الاستیک نمونه A در کشش و باربرداری تا ۶٪ کرنش در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

شکل ۵ منحنی تنش-کرنش کشش در دمای محیط را برای نمونه تک‌لایه M تا ۶٪ کرنش نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود در ابتدا بارگذاری سبب کرنش خطی فاز مارتنزیت با واریانتهای خود تطبیق شونده، تا سطح معینی از تنش می‌شود (۱۰۰ مگاپاسکال). در این مرحله ادامه بارگذاری سبب غالب شدن یکی از واریانتهای شده و نمودار تنش-کرنش پلاتو تنش نشان می‌دهد. در تنش ثابت واریانتهای غالب ایجاد شده رشد کرده و در انتهای محدوده پلاتو ماده دارای مارتنزیت با واریانتهای واحد است. در این مرحله ادامه بارگذاری سبب کرنش خطی مارتنزیت تک واریانتهای تا قبل از ورود به منطقه کرنش پلاستیک می‌شود. به دلیل پایداری فاز مارتنزیت تک واریانتهای، با باربرداری تا



شکل ۷. کالیبراسیون نمونه تک لایه مارتنزیتی در کشش توسط نرم افزار آباکوس و مدل عددی لاگوداس.



شکل ۶. کالیبراسیون نمونه تک لایه آستنیتی در کشش توسط نرم افزار آباکوس و مدل عددی لاگوداس.

شبیه‌سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس و مدل سه‌بعدی لاگوداس با پارامترهای ماده ارائه شده در جدول ۴ را نشان می‌دهد. همچنین اطلاعات به دست آمده از این نمودار در جدول ۴-۸ نشان داده شده است.

شکل ۹ مقادیر سطح تنش پلاتو را بر حسب نسبت ضخامت‌های مختلف برای کامپوزیت دو لایه مارتنزیتی-آستنیتی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌شود، مشابه با نتایج ارائه شده در بخش تحلیلی، افزایش کسر لایه A در کامپوزیت دو لایه سبب افزایش سطح تنش پلاتو و نزدیک شدن مقدار آن به مقدار سطح تنش پلاتو تک‌لایه آستنیتی نشان داده شده در شکل ۶ می‌گردد. به بیان دیگر، همان‌طور که شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود، افزایش پارامتر A/M برآیند رفتار تنش-کرنش کامپوزیت دو لایه مارتنزیتی-آستنیتی را به سمت رفتار غالب سوپرالاستیسیته و کاهش آن، به سمت رفتار حافظه‌داری می‌برد. برای بررسی بیشتر، مقادیر کرنش سوپرالاستیک و حافظه‌داری برای کامپوزیت دو لایه در کرنش کل ۴/۵٪ محاسبه شد. برای محاسبه کرنش سوپرالاستیک، مطابق طرحواره رسم شده در شکل ۱۰، به موازات شیب ابتدای نمودار، خطی رسم شده است و فاصله خط تا نقطه‌ای که نمودار تنش-کرنش، محور افقی را قطع می‌کند به عنوان کرنش سوپرالاستیک در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل قابل صرف‌نظر بودن کرنش پلاستیک حین بارگذاری تا کرنش کل ۶٪ (۲۹)، باقی‌مانده کرنش موجود در ماده به عنوان کرنش حافظه‌داری در نظر گرفته شده است. این مقادیر در جدول ۵ و همچنین شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند.

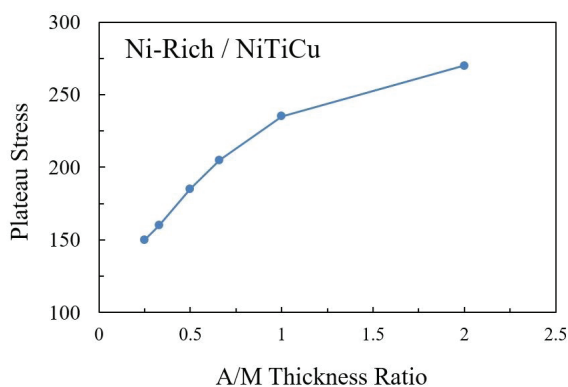
با وارد کردن ضرایب مدل لاگوداس ابتدا رفتار نمونه‌ای تک لایه توسط نرم افزار آباکوس کالیبره شد، سپس شبیه‌سازی رفتار نمونه‌های دو لایه با نسبت ضخامت‌های مختلف در بارگذاری و باربرداری انجام گردید.

شکل ۶ نمودار تنش-کرنش برای نمونه A تا ۶٪ کرنش را نشان می‌دهد که توسط نرم افزار آباکوس و مدل سه‌بعدی لاگوداس به دست آمده است. برای این کار تیر طراحی شده در نرم افزار با خاصیت کامل سوپرالاستیک شبیه‌سازی شده است. به منظور مقایسه، رفتار نمونه کشش آستنیتی نیز در این نمودار آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود کالیبراسیون رفتار نمونه آستنیتی با پارامترهای ارائه شده در جدول ۴ به خوبی صورت پذیرفته است و مدل عددی تطبیق قابل قبولی را برای پیش‌بینی رفتار سوپرالاستیسیته نشان می‌دهد. مشابه با نمونه آستنیتی عملیات کالیبراسیون برای نمونه مارتنزیتی تا ۶٪ کرنش مطابق شکل ۷ انجام شد. برای این کار تیر طراحی شده در نرم افزار با خاصیت کامل حافظه‌داری شبیه‌سازی شده است. همچنین، رفتار نمونه کشش مارتنزیتی جهت مقایسه در این نمودار آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود کالیبراسیون رفتار نمونه مارتنزیتی با پارامترهای ارائه شده در جدول ۴ تطبیق مناسبی داشته و مدل عددی جواب قابل قبولی را برای پیش‌بینی رفتار حافظه‌داری نشان می‌دهد.

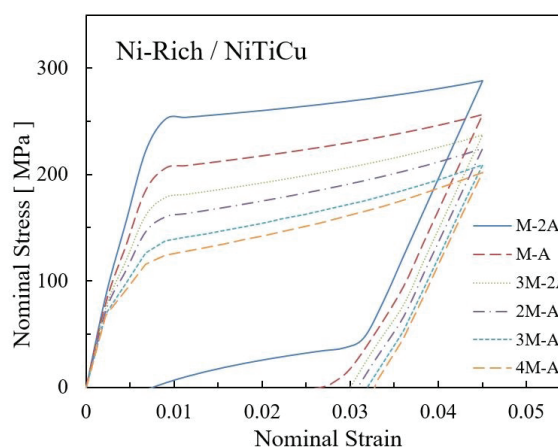
شکل ۸ رفتار نمونه‌های کامپوزیت دو لایه مارتنزیتی-آستنیتی، با نسبت ضخامت‌های مختلف، به دست آمده از

جدول ۵. پارامترهای متغیر کامپوزیت دو لایه بر حسب تغییرات نسبت ضخامت در کرنش کل ۴/۵٪ به دست آمده از شبیه‌سازی عددی

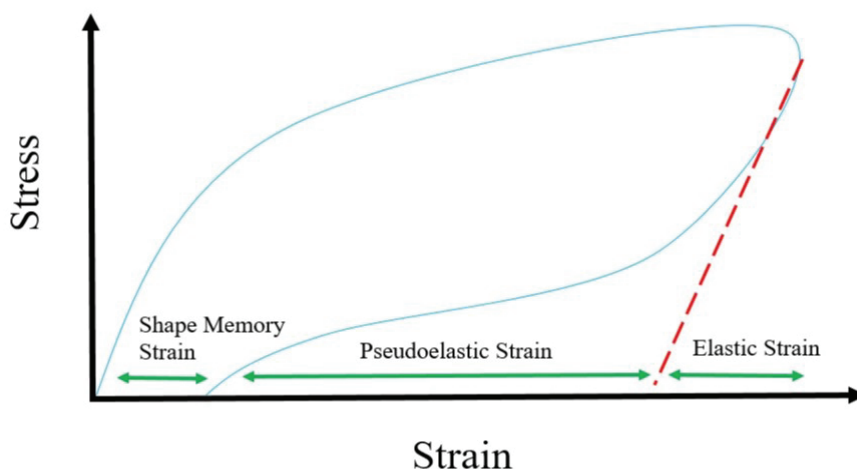
نسبت ضخامت (A/M)	0.25	0.33	0.5	0.66	1	2
سطح تنش پلاتو (MPa)	150	160	185	205	235	270
کرنش سوپرالاستیک	0.001	0.0015	0.0020	0.0025	0.0045	0.0215
کرنش حافظه‌داری	0.033	0.032	0.031	0.030	0.027	0.0075



شکل ۹. نمودار سطح تنش پلاتو بر حسب مقادیر مختلف نسبت ضخامت برای کامپوزیت دولایه به دست آمده از روش عددی.

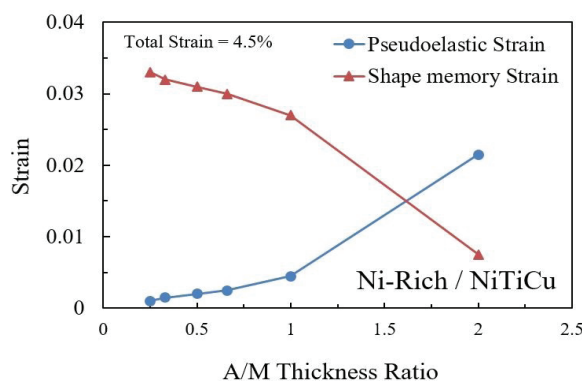


شکل ۸. نمودار تنش- کرنش کامپوزیت‌های دولایه با نسبت ضخامت متغیر به دست آمده از شبیه‌سازی عددی.



شکل ۱۰. طرحواره نحوه محاسبه کرنش سوپر الاستیک و حافظه‌داری از روی نمودار تنش-کرنش برای کامپوزیت‌های دولایه.

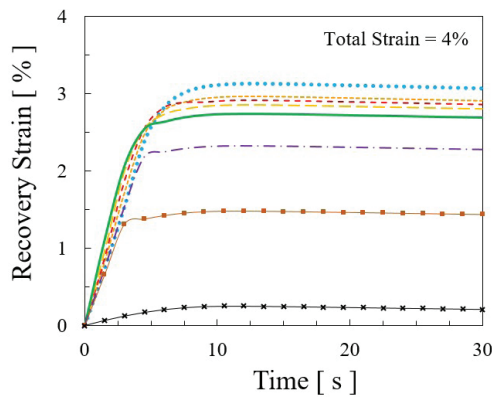
باقی‌مانده در ماده بر اثر رفتار حافظه‌داری شروع به بازیابی کرده و با پایان استحالته مارتنزیت به آستنیت در لایه M، بازیابی کرنش پایان می‌یابد. اطلاعات استخراج شده از شکل



شکل ۱۱. نمودار تغییرات کرنش‌های حافظه‌داری و سوپر الاستیک اندازه‌گیری شده را برای نسبت ضخامت‌های مختلف کامپوزیت دولایه در کرنش کل ۴/۵٪ به دست آمده از شبیه‌سازی عددی.

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، افزایش نسبت ضخامت توسط پارامتر A/M، به ترتیب از چپ به راست کرنش حافظه‌داری را کاهش و کرنش سوپر الاستیک را افزایش می‌دهد. این افزایش به گونه‌ای است که برای مثال با انتخاب نسبت ضخامت ۲ به ۱ (مارتنزیتی به آستنیتی)، کامپوزیت رفتار غالب حافظه‌داری نشان می‌دهد، در حالی که با انتخاب نسبت ضخامت ۱ به ۲ (مارتنزیتی به آستنیتی)، کامپوزیت با نشان دادن مقدار قابل توجهی کرنش سوپر الاستیک، کاندیدای مناسبی برای استفاده در کاربردهای سوپر الاستیک است.

شکل ۱۲ نمودار کرنش بازیابی را بر حسب زمان برای کرنش کل ۴٪ نشان می‌دهد. برای رسم این نمودار، نمونه‌های کامپوزیت دولایه با نسبت‌های ضخامت مختلف طراحی و آنالیز شده در نرم افزار آباکوس، بعد از بارگذاری و باربرداری به مدت زمان ۳۰ ثانیه در معرض افزایش دما از دمای محیط تا ۳۸۰ کلوین (بالتر از A_s) قرار گرفته‌اند. بنابراین کرنش



شکل ۱۲. نمودار کرنش بازیابی بر حسب زمان برای کامپوزیت‌های دو لایه در کرنش کل ۴٪ به دست آمده از شبیه‌سازی عددی.

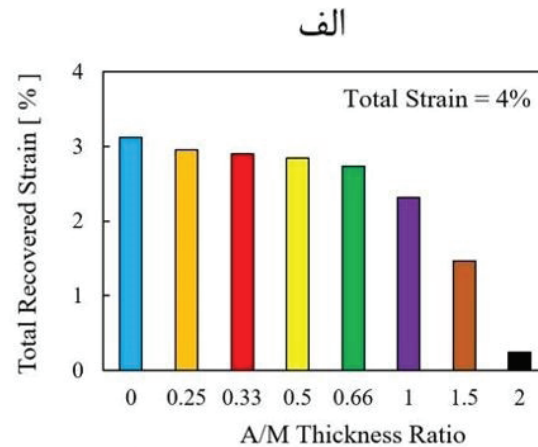
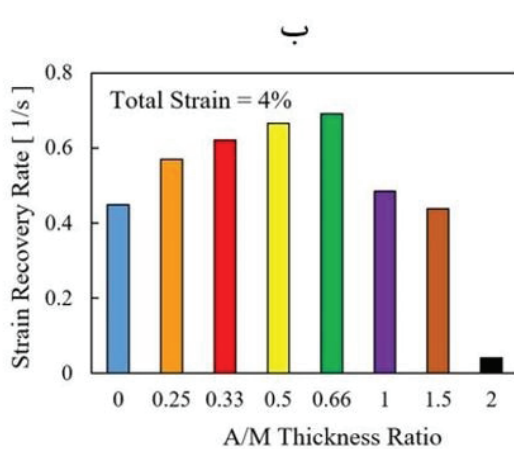
کرنش صفر وجود دارد. از آنجایی که لایه آستنیتی مقید به لایه مارتنزیتی می‌باشد این پتانسیل به صورت تنش فشاری در لایه مارتنزیتی ذخیره می‌شود. مادامی که این تنش فشاری در ناحیه الاستیک باشد به صورت یک نیروی بازگرداننده عمل کرده و باعث می‌شود سرعت بازیابی کرنش لایه مارتنزیتی افزایش یابد، همچنین، تنش فشاری الاستیک به پیشرفت استحاله‌هایی که با کاهش حجم همراه هستند (استحاله مارتنزیت به آستنیت)، کمک می‌کند و باعث می‌شود سرعت پیشرفت استحاله افزایش یابد و همسترزیس آن کم شود (۳۰). اما افزایش نیروی فشاری بر لایه مارتنزیتی اگر از حد الاستیک خطی بیشتر شود، به دلیل اثرات همزمان ورود به پلاتو بازآرایی مارتنزیت در فشار و تولید نابجایی (۳۱)،

۱۲ در جدول ۶ آورده شده است. لازم به ذکر است مقدار A/M مساوی صفر نشان دهنده تک‌لایه مارتنزیتی می‌باشد. شکل ۱۳-الف مقادیر کل کرنش بازیابی شده توسط حرارت را بر حسب نسبت ضخامت‌های مختلف برای کرنش کل ۴٪ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با کامپوزیتی شدن لایه M توسط لایه A، تا نسبت ضخامت معینی (سه به دو مارتنزیت به آستنیت)، کرنش بازیابی شده توسط حرارت کاهش قابل ملاحظه‌ای ندارد، اما افزایش نسبت ضخامت بیشتر از آن مقدار کرنش بازیابی شده توسط حرارت را با شیب زیادی کاهش می‌دهد. دلیل این رفتار غالب شدن رفتار سوپراالاستیسیته بر رفتار حافظه‌داری و کاهش قابل توجه کرنش حافظه‌داری ذخیره شده در ماده است.

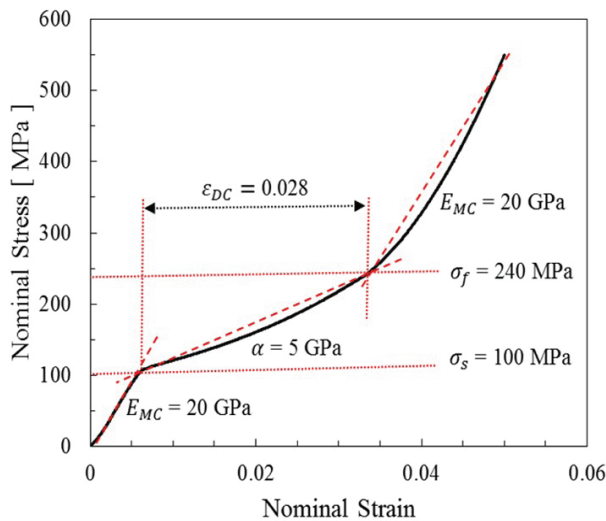
شکل ۱۳-ب نمودار سرعت بازیابی کرنش با حرارت را بر حسب زمان برای نسبت ضخامت‌های مختلف برای کرنش کل ۴٪ نشان می‌دهد. برای رسم این نمودار شیب خطوط بازیابی بر حسب زمان در شکل ۱۲ اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج نشان داده شده در این نمودار دلالت بر افزایش سرعت بازیابی کرنش تا نسبت ضخامت معینی دارند (سه به دو مارتنزیت به آستنیت)، سپس با افزایش نسبت ضخامت سرعت بازیابی کاهش می‌یابد. برای توضیح این رفتار از طرحواره رسم شده در شکل ۱۴ استفاده می‌شود. در این شکل طرحواره رفتار نمونه‌های تک‌لایه و کامپوزیت دو لایه رسم شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود در باربرداری تا تنش صفر، در لایه آستنیتی پتانسیل لازم برای بازیابی تا

جدول ۶. پارامترهای متغیر کامپوزیت دو لایه در بازیابی حرارتی بر حسب نسبت ضخامت در کرنش کل ۴٪ به دست آمده از شبیه‌سازی عددی

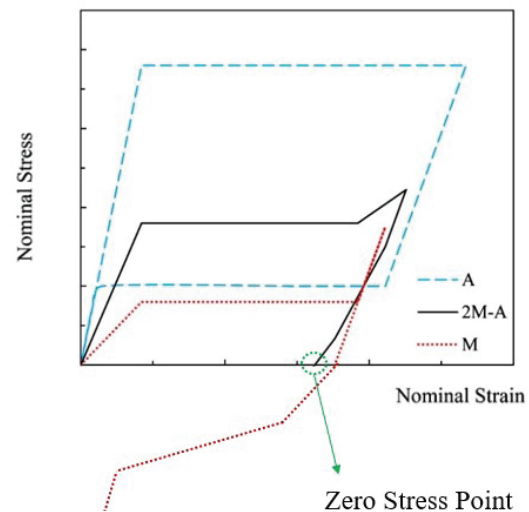
نسبت ضخامت (A/M)	0	0.25	0.33	0.5	0.66	1	1.5	2
کرنش بازیابی شده با حرارت (%)	3.1219	2.9484	2.8980	2.8481	2.7336	2.3156	1.4694	0.2428
سرعت بازیابی کرنش (1/s)	0.4481	0.5694	0.6197	0.6645	0.6912	0.4847	0.4377	0.0413



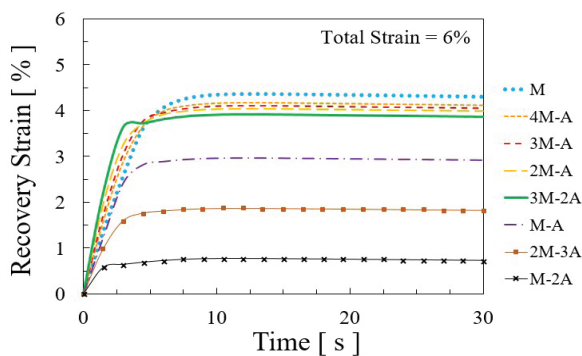
شکل ۱۳. الف) نمودار میزان کرنش بازیابی شده با حرارت بر حسب نسبت ضخامت و ب) نمودار سرعت بازیابی کرنش بر حسب نسبت ضخامت برای کامپوزیت‌های دو لایه در کرنش کل ۴٪ به دست آمده از شبیه‌سازی عددی.



شکل ۱۵. منحنی تنش-کرنش در فشار در دمای محیط برای نمونه M.



شکل ۱۴. طرحواره رفتار تنش-کرنش کامپوزیت دولایه در مقابل رفتار تک‌لایه‌ها.



شکل ۱۶. نمودار کرنش بازیابی بر حسب زمان برای کامپوزیت‌های دولایه در کرنش کل ۶٪ به دست آمده از شبیه‌سازی عددی.

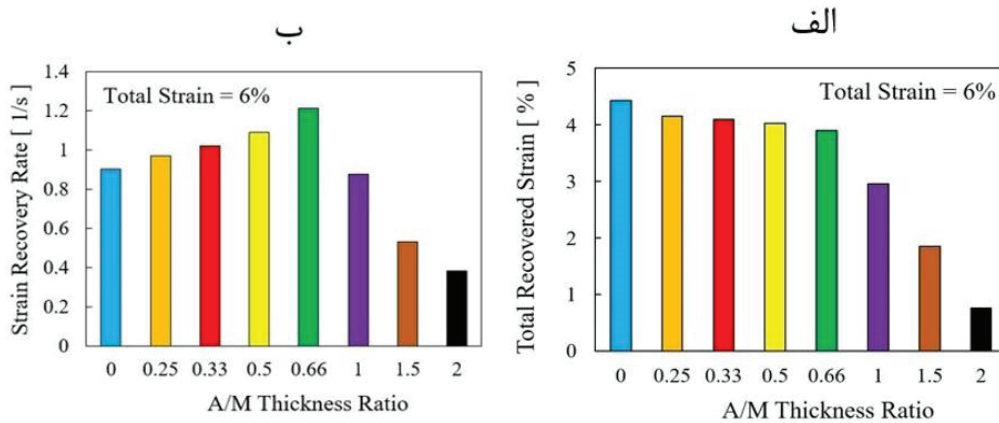
کرنش را توسط حرارت بازیابی می‌کند و هم اینکه دارای بیشترین سرعت بازیابی کرنش با حرارت می‌باشد (شکل ۱۳-ب).

شکل ۱۶ نمودار کرنش بازیابی را بر حسب زمان برای کرنش کل ۶٪ نشان می‌دهد. اطلاعات استخراج شده از شکل ۱۶ در جدول ۷ نشان داده شده است. شکل ۱۷-الف مقادیر کل کرنش بازیابی شده توسط حرارت را بر حسب نسبت ضخامت‌های مختلف برای کرنش کل ۶٪ نشان می‌دهد. مشابه با نتایج ارائه شده در کرنش کل ۴٪، با کامپوزیتی شدن لایه M توسط لایه A، تا نسبت ضخامت معینی (سه به

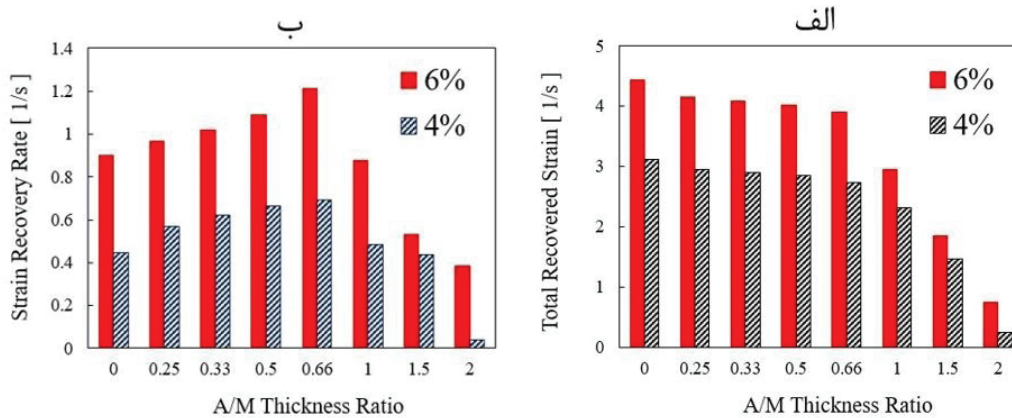
بازیابی لایه مارتنزیتی را دشوار کرده و سبب کاهش سرعت بازیابی کرنش می‌شود. برای اثبات این موضوع پتانسیل تنش باقی‌مانده در لایه آستنیتی را در تنش صفر بر حد الاستیک خطی لایه مارتنزیتی در فشار تقسیم می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، در تنش صفر، پتانسیل تنش باقی‌مانده در لایه آستنیتی برابر تنش پلاتو باربرداری می‌باشد که با مراجعه به شکل ۶ برابر ۱۰۰ مگاپاسکال است. همچنین، با مراجعه به شکل ۱۵ که نمودار تنش-کرنش لایه مارتنزیتی را در فشار نشان می‌دهد، حد الاستیک ورود به پلاتو منفی برای لایه مارتنزیتی برابر ۱۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. با تقسیم این دو مقدار بر هم، عدد نسبت ضخامت برابر یک به دست می‌آید. بنابراین افزایش پارامتر A/M بیشتر از عدد یک، با ورود لایه مارتنزیتی به پلاتو منفی در باربرداری به دلیل تاخیر به وجود آمده در بازیابی حالت فشاری و سپس کششی و همچنین اثرات تولید نابجایی، سرعت بازیابی کرنش کاهش می‌یابد. این روند افزایشی-کاهشی به خوبی در شکل ۱۳-ب توسط نتایج شبیه‌سازی عددی پیش بینی شده است. با در نظر گرفتن نتایج ارائه شده در شکل ۱۳، می‌توان نسبت ضخامت ۳ به ۲ (مارتنزیت به آستنیت) را به عنوان نسبت ضخامت بهینه برای کاربردهای مبتنی بر رفتار حافظه‌داری و بازیابی حرارتی معرفی کرد. این نسبت ضخامت، همان‌طور که در شکل ۱۳-الف مشاهده می‌شود، هم مقدار قابل توجهی

جدول ۷. پارامترهای متغیر کامپوزیت دولایه در بازیابی حرارتی بر حسب نسبت ضخامت در کرنش کل ۶٪ به دست آمده از شبیه‌سازی عددی

نسبت ضخامت (A/M)	0	0.25	0.33	0.5	0.66	1	1.5	2
کل کرنش بازیابی شده با حرارت (%)	4.4348	4.1591	4.0949	4.0263	3.9039	2.9571	1.8532	0.7615
سرعت بازیابی کرنش (1/s)	0.9014	0.9684	1.0212	1.0893	1.2126	0.8766	0.5310	0.3845



شکل ۱۷. الف) نمودار میزان کرنش بازیابی شده با حرارت بر حسب نسبت ضخامت و ب) نمودار سرعت بازیابی کرنش بر حسب نسبت ضخامت برای کامپوزیت‌های دولایه در کرنش کل ۶٪ به دست آمده از شبیه‌سازی عددی.



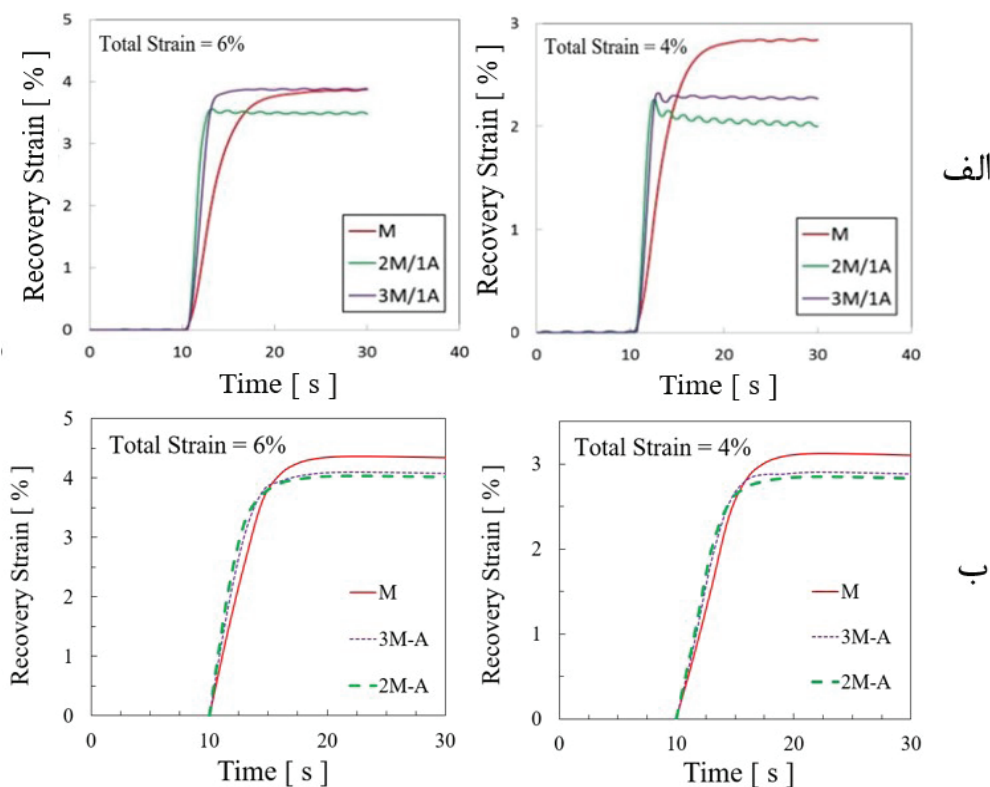
شکل ۱۸. مقایسه کرنش کل بازیابی شده (الف)، و سرعت بازیابی کرنش (ب) بر حسب نسبت ضخامت برای کامپوزیت‌های دولایه در درصدهای کرنش متفاوت به دست آمده از شبیه‌سازی عددی.

پتانسیل برگشت در لایه آستنیتی شده و با افزایش فشار الاستیکی بر لایه مارتنزیتی سبب کاهش بیشتر هیستریزس استحاله نسبت به کرنش کل ۴٪ شده و افزایش سرعت بازیابی قابل توجهی را به دنبال دارد.

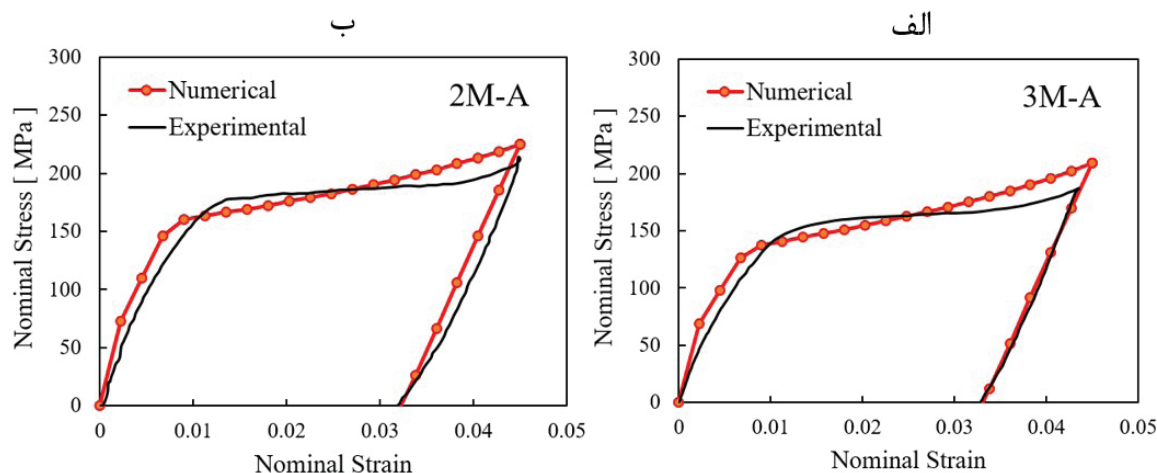
شکل ۱۹ مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی را برای بازیابی حرارتی نمونه‌های تک لایه و دولایه نشان می‌دهد که برای دو مقدار کرنش کل آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود تطبیق قابل قبولی میان نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی وجود دارد. روند افزایش سرعت بازیابی نمونه‌های دولایه نسبت به نمونه تک لایه به خوبی پیش بینی شده است و اثر افزایش پارامتر A/M در روش عددی مشابه روش تجربی است، بنابراین، شبیه‌سازی عددی ابزار مناسبی برای پیش بینی رفتار اجزای ساخته شده از جنس آلیاژهای حافظه‌دار بوده و با در نظر گرفتن هزینه، زمان و دشواری‌های روش تجربی، می‌تواند در بسیاری از موارد جایگزین این روش باشد.

دو مارتنزیت به آستنیت، کرنش بازیابی شده توسط حرارت کاهش قابل ملاحظه‌ای ندارد، اما افزایش نسبت ضخامت بیشتر از آن مقدار کرنش بازیابی شده توسط حرارت را با شیب زیادی کاهش می‌دهد. همچنین، نتایج ارائه شده در شکل ۱۷-ب، روند افزایشی سرعت بازیابی کرنش را تا نسبت ضخامت ۳ به ۲ (مارتنزیت به آستنیت)، و همچنین کاهش سرعت بازیابی را پس از آن به خوبی نشان می‌دهد. مشابه با کرنش کل ۴٪، نسبت ضخامت ۳ به ۲ (مارتنزیت به آستنیت)، مقدار قابل توجهی کرنش بازیابی شده را با بیشترین سرعت بازیابی ارائه می‌کند که می‌تواند در طراحی اجزای حافظه‌دار مورد توجه قرار گیرد.

برای مقایسه اثرات افزایش کرنش کل، مقایسه مقادیر کرنش کل بازیابی و سرعت بازیابی بر حسب نسبت ضخامت در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است افزایش درصد کرنش کل تا میزان ۶٪، کل کرنش بازیابی شده را برای همه نسبت ضخامت‌ها افزایش می‌دهد. همچنین، افزایش کرنش کل به ۶٪ باعث افزایش



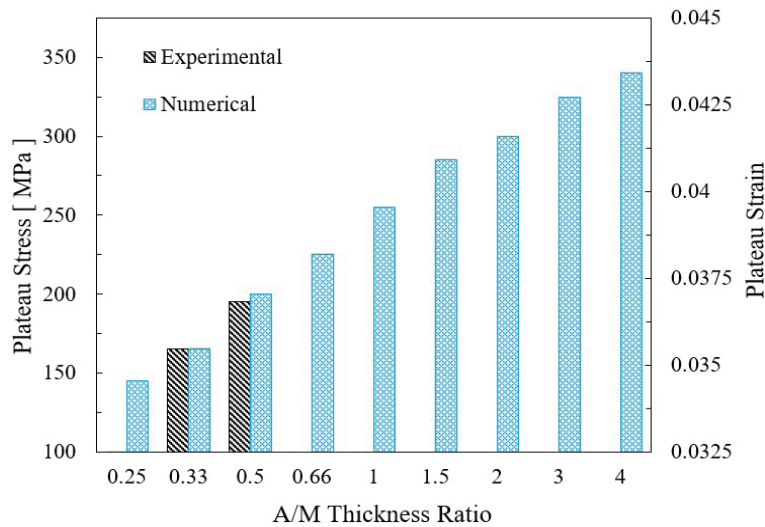
شکل ۱۹. نمودار کرنش بازیابی برحسب زمان برای درصد کرنش‌های کل مختلف به دست آمده از الف) نتایج تجربی، ب) شبیه‌سازی عددی.



شکل ۲۰. مقایسه نتایج حاصل از روش عددی و تجربی برای نسبت ضخامت‌های (مارتنزیت به آستنیت) الف) ۳ به ۱، ب) ۲ به ۱.

وجود دارد. به منظور جمع بندی کلی، مقادیر تنش و کرنش پلاتو برای ۹ نسبت ضخامت مختلف به دست آمده از روش عددی در شکل ۲۱ آورده شده است. همچنین برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، مقادیر تنش و کرنش پلاتو برای دو نسبت ضخامت در این شکل آورده شده است. نتایج نشان داده شده دلالت بر افزایش مقدار تنش و کرنش پلاتو با افزایش پارامتر A/M دارند. علاوه بر آن، تطابق قابل قبول

برای مقایسه کلی دو روش به کار گرفته شده برای مطالعه رفتار کامپوزیت دولایه مارتنزیتی-آستنیتی، نمودار تنش-کرنش به دست آمده از این دو روش در شکل ۲۰ آورده شده است. برای این کار با در نظر گرفتن دو نسبت ضخامت مختلف، شبیه‌سازی عددی و نمونه‌سازی صورت پذیرفته است. همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود تطابق بالایی میان داده‌های به دست آمده از هر سه روش



شکل ۲۱. تغییرات تنش و کرنش پلاتو بر حسب نسبت ضخامت‌های مختلف به دست آمده از روش عددی و تجربی.

تغییر کم در میزان کل کرنش بازیابی تا نسبت ضخامت معینی دارد (۳ به ۲ مارتنزیت به آستنیت). افزایش نسبت ضخامت با پارامتر A/M بیشتر از مقدار ذکر شده میزان بازیابی و سرعت آن را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. بررسی رفتار تک لایه‌ها و محاسبات نسبت ضخامت نشان دادند این کاهش ناشی از ورود به مرحله پلاتو منفی در لایه مارتنزیتی می‌باشد. بنابراین نسبت ضخامت ۳ به ۲ (مارتنزیتی به آستنیتی) می‌تواند در کاربردهای بازیابی حرارتی مناسب‌ترین گزینه باشد. ۴. با در نظر گرفتن پارامتر زمان، هزینه و دشواری‌های ساخت و فراوری سازه‌های آلیاژ حافظه‌دار و تطبیق قابل قبول نتایج به دست آمده از روش عددی و تجربی، این روش می‌تواند به کاهش تعداد آزمایش‌ها برای بهینه کردن و پیش بینی خواص منجر گردد.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی، شبیه‌سازی را به عنوان جایگزین مناسبی برای مطالعه رفتار کامپوزیت‌های دولایه معرفی می‌کند. با توجه به زمان انجام تست‌های تجربی، هزینه و دشواری‌های موجود در ساخت و فراوری ماده، این روش می‌تواند در بسیاری از مسائل در زمینه آلیاژهای حافظه‌دار، راه‌گشا باشد.

۴. نتیجه‌گیری

۱. شبیه‌سازی عددی توسط نرم افزار آباکوس و مدل عددی سه بعدی لاگوداس انجام شد. اثرات تغییر نسبت ضخامت مورد بررسی قرار گرفتند. نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های با نسبت ضخامت‌های مختلف به دست آمد و تنش پلاتو، کرنش حافظه‌داری و کرنش سوپر الاستیک اندازه‌گیری شد. افزایش نسبت ضخامت توسط پارامتر A/M سبب افزایش سطح تنش پلاتو می‌شود، همچنین با افزایش این پارامتر تغییر رفتار کامپوزیت از حافظه‌داری به سمت رفتار غالب سوپرالاستیک کاملاً مشهود است.
۲. مقایسه کلی نتایج حاصل از روش شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی نشان داد، کامپوزیت دولایه مارتنزیتی-آستنیتی پتانسیل بالایی را در ارائه دامنه وسیعی از خواص حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته از خود نشان می‌دهد که می‌تواند توسط پارامتر نسبت ضخامت کنترل شود، ازین رو می‌تواند در بسیاری از کاربردهای مهندسی نظیر ساخت عملگرها و همچنین سازه‌های حافظه‌دار مورد توجه طراحان قرار گیرد.
۳. اثر نسبت ضخامت بر روی میزان بازیابی و سرعت بازیابی حرارتی نمونه‌ها در ۲٪ کرنش مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج دلالت بر افزایش سرعت بازیابی نمونه‌ها با

References

- [1] Van Humbeeck J. Non-medical applications of shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 1999;273:134-48.
- [2] Shaw JA, Kyriakides S. On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a NiTi alloy. *Acta materialia*. 1997;45(2):683-700.
- [3] Lagoudas DC. *Shape memory alloys*. Science and Business Media, LLC. 2008.
- [4] Bellouard Y. Shape memory alloys for microsystems: A review from a material research perspective. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;481:582-9.
- [5] Tan G, Liu Y, Sittner P, Saunders M. Lüders-like deformation associated with stress-induced martensitic transformation in NiTi. *Scripta Materialia*. 2004;50(2):193-8.
- [6] Shaw JA, Kyriakides S. Thermomechanical aspects of NiTi. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1995;43(8):1243-81.
- [7] Mohri M, Nili-Ahmadabadi M. Phase transformation and structure of functionally graded Ni-Ti bi-layer thin films with two-way shape memory effect. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015;228:151-8.
- [8] Mohri M, Nili-Ahmadabadi M, Ivanisenko J. On the Super-Elastic and Phase Transformation of a Novel Ni-Rich/NiTi-Cu Bi-Layer Thin Film. *Advanced Engineering Materials*. 2015;17(6):856-65.
- [9] Mohri M, Nili-Ahmadabadi M, PouryazdanPanah M, Hahn H. Evaluation of structure and mechanical properties of Ni-rich NiTi/Kapton composite film. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;668:13-9.
- [10] Razali MF, Mahmud AS. Gradient deformation behavior of NiTi alloy by ageing treatment. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;618:182-6.
- [11] Wang E, Tian Y, Wang Z, Jiao F, Guo C, Jiang F. A study of shape memory alloy NiTi fiber/plate reinforced (SMAFR/SMAPR) Ti-Al laminated composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016.
- [12] Shelyakov A, Sitnikov N, Borodako K, Menushenkov A, Fominski V. Effect of Laser Treatment on Shape Memory Properties of TiNiCu Alloy. *Physics Procedia*. 2015;73:108-13.
- [13] Wang X, Bellouard Y, Vlassak J. Laser annealing of amorphous NiTi shape memory alloy thin films to locally induce shape memory properties. *Acta Materialia*. 2005;53(18):4955-61.
- [14] Shelyakov A, Sitnikov N, Sheyfer D, Borodako K, Menushenkov A, Fominski VY. The formation of the two-way shape memory effect in rapidly quenched TiNiCu alloy under laser radiation. *Smart materials and structures*. 2015;24(11):115031.
- [15] Pequegnat A, Panton B, Zhou YN, Khan MI. Local composition and microstructure control for multiple pseudoelastic plateau and hybrid self-biasing shape memory alloys. *Materials & Design*. 2016;92:802-13.
- [16] Shiva S, Palani I, Paul C, Singh B. Laser annealing of laser additive-manufactured Ni-Ti structures: An experimental-numerical investigation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016;0954405416661582.
- [17] Birnbaum A, Satoh G, Yao Y. Functionally grading the shape memory response in NiTi films: Laser irradiation. *Journal of Applied Physics*. 2009;106(4):043504.
- [18] Abioye T, Farayibi P, Kinnel P, Clare A. Functionally graded Ni-Ti microstructures synthesised in process by direct laser metal deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;79(5-8):843-50.
- [19] Meng Q, Liu Y, Yang H, Nam T-h. Laser annealing of functionally graded NiTi thin plate. *Scripta Materialia*. 2011;65(12):1109-12.
- [20] Meng Q, Liu Y, Yang H, Shariat BS, Nam T-h. Functionally graded NiTi strips prepared by laser surface anneal. *Acta Materialia*. 2012;60(4):1658-68.
- [21] Mohri M, Nili-Ahmadabadi M, Ivanisenko J, Schwaiger R, Hahn H, Chakravadhanula VSK. Microstructure and mechanical behavior of a shape memory Ni-Ti bi-layer thin film. *Thin Solid Films*. 2015;583:245-54.
- [22] Malekoshoarai MH. *Evaluation of Shape memory and Superelastic Behaviour of NiTi bi-layer Composite*: University of Tehran; 2015.
- [23] Mohri M, Nili-Ahmadabadi M, Flege S. Diffusion evaluation of Cu in NiTi Bi-layer thin film interface. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;594:87-92.
- [24] Malekoshoarai MH, Nili-Ahmadabadi M. Evaluation of shape memory behaviour of NiTi bi-layer composite. *The International Conference of Materials Chain: From Discovery to Production 2016*.
- [25] Auricchio F, Taylor RL, Lubliner J. Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 1997;146(3-4):281-312.
- [26] Lagoudas DC. *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*: Springer Science & Business Media; 2008.
- [27] Standard A. E9-09. *Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature* ASTM International. 2009.
- [28] Otsuka K, Shimizu K. Pseudoelasticity and shape memory effects in alloys. *International Metals Reviews*. 1986;31(1):93-114.
- [۲۹] ملک الشعراعی محمد حسن. بررسی رفتار حافظه داری و سوپرالاستیک کامپوزیت دولایه آلایز نیکل-تیتانیوم. دانشگاه تهران ۱۳۹۴.
- [30] Tadayyon SM, Yoshinari O, Tanaka K. Auger electron spectroscopy and X-ray diffraction study of interdiffusion and solid state amorphization of Ni/Ti multilayers. *Japanese journal of applied physics*. 1992;31(7R):2226.
- [31] Liu Y, Xie Z, Van Humbeeck J, Delaey L. Asymmetry of stress-strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys. *Acta Materialia*. 1998;46(12):4325-38.