



مطالعه تجربی تأثیر تنش آموزش بر عملکرد آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم در تنش‌های بیشتر و کمتر از تنش آموزش

مهدی انصاری^۱، محمد گلزار^{۲*}، امیر حسین بهروش^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲-۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، m.golzar@modares.ac.ir

چکیده- آموزش آلیاژ حافظه‌دار در تنش ثابت سبب پایدار شدن رفتار آلیاژ خواهد شد. با توجه به این‌که در کاربردهای مهندسی تنش آلیاژ در حین عملکرد متغیر است، هدف از این پژوهش، بررسی پاسخ آلیاژهای آموزش دیده در محدوده‌ای از تنش‌های کاربردی می‌باشد. در این پژوهش، شش نمونه سیم آلیاژ حافظه‌دار به صورت جداگانه در تنش‌های ثابت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال آموزش داده شد. در مرحله بعد کرنش بازیابی هر یک از آلیاژها در محدوده تنش صفر تا ۲۵۰ MPa بررسی شد. نتایج نشان داد که آلیاژهای آموزش داده شده در تنش‌های ۳۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال از خود رفتار حافظه‌دار دوره‌ای نشان دادند. همچنین کرنش بازیابی آلیاژ در تنش‌های بالاتر از ۱۰۰ MPa مستقل از تنش آموزش آلیاژ است و برای عملکرد بهتر باید تنش اعمالی به آلیاژ بالاتر از ۱۰۰ MPa باشد. در مورد نمونه‌های آموزش داده شده در تنش‌های ۲۰۰ و ۱۸۰ مگاپاسکال مشاهده شد که آلیاژها رفتار ناپایدار دارند. **کلیدواژگان:** آلیاژ حافظه‌دار، خاصیت حافظه‌داری دوره‌ای، آموزش، رفتار ناپایداری.

Experimental studies of training stress effect on NiTiSMA performance in higher and lower stress than training stress

M. Ansari¹, M. Golzar^{2*}, A.H. Behraves³

1- MSc. Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2,3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran. m.golzar@modares.ac.ir

Abstract- SMA training in constant stress causes stabilized response. Since in engineering applications alloy stress is variant, the aim of this study is to investigate SMAs response in some range of stresses. In this study, six SMA wires were trained in 30, 50, 100, 150, 200 and 250 MPa. At the next step, their recoverable strains were evaluated in 0-250 MPa. It was found that SMA wires that trained in 30, 150 and 200 MPa showed tow-way shape memory effect (TWSME). Also recoverable strains in stresses higher than 100 MPa are independent of training and in order to have better performance, stresses higher than 100 MPa are required. SMA wires trained in 180 and 200 MPa resulted in unstable behavior.

Keywords: Shape Memory Alloy, Tow-Way Shape Memory Effect, Training, Unstable Behavior.

مواد به واسطه این که تداعی کننده رفتار موجودات زنده هستند، هوشمند نامیده شده‌اند. در مورد آلیاژهای حافظه‌دار،

۱- مقدمه

آلیاژهای حافظه‌دار زیر مجموعه‌ای از مواد هوشمند هستند. این

افزایش دما می‌توان تغییر شکل بوجود آمده را جبران کرد، اما پس از سرمایش تغییری در شکل آلیاژ ایجاد نمی‌شود. آلیاژهای حافظه‌دار در تحریک‌های اولیه رفتار منظمی را از خود نشان نمی‌دهند و مقدار کرنش بازیابی آن‌ها منظم نیست [۳]. در صورتی که آلیاژ حافظه‌دار در معرض تعداد زیادی چرخه ترمومکانیکی، تحت بار ثابت قرار بگیرد، پاسخ عملکردی آلیاژ منظم می‌شود. این فرایند آموزش^۷ نامیده می‌شود [۴]. در صورتی که از آلیاژ حافظه‌دار به عنوان عملگر استفاده شود، آلیاژ باید در بار ثابت (بیشینه‌ی بار اعمالی) آموزش ببیند [۴]. لذا قبل از استفاده، آموزش به منظور یکسان سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار حائز اهمیت می‌باشد. دانو و هایر [۵] به منظور تحریک ورق کامپوزیتی از عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار استفاده کردند. آنها آلیاژهای حافظه‌دار را بدون آموزش استفاده کردند. در نتیجه با توجه به نامنظم بودن رفتار آلیاژ، تغییر شکل ورق در چرخه‌های مختلف متفاوت شد. بر اساس پژوهش‌های کانترادو [۶] و میلر [۷] آموزش علاوه بر یکسان سازی رفتار آلیاژ، سبب ایجاد رفتار دوراهه در آلیاژ تک‌راهه شد. این در صورتی است که آموزش در چرخه‌های کنترل‌شده به آلیاژ اعمال شود. رن و اتسوکا [۸] علت وقوع پدیده حافظه‌داری دوراهه را وقوع پدیده پیری حاصل از قرارگیری ماده را در معرض تنش در فاز مارتنزیت عنوان کردند. هوکیم [۹] به منظور دستیابی به خاصیت حافظه‌داری دوراهه یک نوار آلیاژ حافظه‌دار را در معرض تعدادی سیکل‌های ترمومکانیکی در حالت خمش قرار داد. او متوجه شد که حضور فاز بتا نقش مؤثری در بروز پدیده حافظه‌داری دوراهه دارد.

چن و سی [۱۰] به بررسی آموزش آلیاژ حافظه‌دار TiNiCu پرداختند و عنوان کردند که با افزایش تغییر شکل در فرایند آموزش، آهنگ بروز پدیده حافظه‌داری دوراهه در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. همچنین دماهای استحاله^۱ A_s و A_f پس از آموزش کاهش یافت ولی دماهای M_s و M_f تغییر ناچیزی بوجود آمد. بر اساس پژوهش لاگوداس و همکارانش [۴] آموزش سبب تغییر دماهای استحاله آستنیتی و مارتنزیتی در آلیاژ حافظه‌دار شد. اتلی و همکارانش [۱۱] تأثیر آموزش را بر آلیاژ نیکل-تیتانیوم دوتایی و سه تایی مورد بررسی

هوشمندی عبارت است از جبران تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در آلیاژ با استفاده از افزایش دما. به عبارت دیگر در صورتی که آلیاژ حافظه‌دار دچار تغییر شکل پلاستیک بشود می‌توان تغییر شکل ایجاد شده را با افزایش دما جبران کرد و آلیاژ را به شکل اولیه خود بازگرداند.

خاصیت حافظه‌داری^۱ در مورد آلیاژ نیکل-تیتانیوم، اولین بار در سال ۱۹۶۱ در آزمایشگاه مهمات نیروی دریایی ایالات متحده^۲ مشاهده شد و کارهای بعدی بر روی این مواد منجر به ارتقای آلیاژهای حافظه‌دار شد [۱]. این آلیاژ با نام نایتینول^۳ که بر گرفته از عناصر تشکیل دهنده و نهاد کشف کننده این خاصیت می‌باشد به دنیا معرفی گردید. امروزه کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در بخش‌های پزشکی و صنعتی (هوافضا، وسایل الکترونیکی و عمران و غیره) در حال توسعه می‌باشد [۲].

در آلیاژهای فلزی، پدیده حافظه‌داری به دلیل استحاله جامد بدون نفوذ بین فاز دما بالای آستنیت و فاز دما پایین مارتنزیت می‌باشد. استحاله‌های آستنیت و مارتنزیت در آلیاژ حافظه‌دار با چهار مشخصه دمایی شناخته می‌شوند: M_s و M_f به ترتیب دماهای شروع و پایان استحاله مارتنزیتی و A_s و A_f نیز به ترتیب دماهای شروع و پایان استحاله آستنیتی می‌باشد. آلیاژ حافظه‌دار خواص متفاوتی مانند اثر حافظه‌داری یک راهه^۴، دو راهه^۵ و خاصیت فوق کشسان^۶ را در شرایط مختلف از خود نشان می‌دهد که این خواص با توجه به شرایط مختلف ترمومکانیکی قابل کنترل است. منشاء هر دو خاصیت حافظه‌داری و فوق کشسانی در آلیاژهای حافظه‌دار، مشترک می‌باشد و با استحاله مارتنزیتی شناخته می‌شود. در آلیاژهای حافظه‌دار دو راهه، آلیاژ قادر است تا شکل خود را در دو حالت آستنیتی (دما بالا) و مارتنزیتی (دما پایین) به خاطر بسپارد. به عبارت دیگر می‌توان بدون اعمال نیرو به آلیاژ حافظه‌دار و تنها با افزایش و کاهش دما شکل آلیاژ را تغییر داد. این در حالی است که آلیاژهای حافظه‌دار یک راهه تنها قادرند شکل خود را در حالت آستنیتی (دما بالا) به خاطر بسپارند. در حالت حافظه‌داری یک راهه پس از ایجاد تغییر شکل در آلیاژ با

1. Shape Memory Effect
2. US Naval Ordnance Laboratory
3. NiTiInol
4. One-waySME
5. Two-way SME
6. Super elasticity (SE)

7. Training

قرار دادند. آنها بیان کردند که در مورد آلیاژ حافظه‌دار دوتایی $Ni_{49.9}Ti_{50.1}$ ، ارتباط منفی بین افزایش تنش آموزش و مقدار کرنش در حالت حافظه‌داری دوراها وجود دارد؛ این درحالی است که در مورد آلیاژهای $Ni_{24.5}Ti_{50.5}Pd_{25}$ و $Ni_{24.5}Ti_{50}Pd_{25}Sc_{0.5}$ این ارتباط مثبت می‌باشد. لاهوز و پرتلاس [۱۲] رفتار حافظه‌داری دوراها آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم را در سیکل‌های مختلف آموزش بررسی کردند. در پژوهش آنان، بیشینه کرنش حافظه‌داری دوراها در تنش آموزش ۱۱۵ MPa و مستقل از تعداد چرخه آموزش به دست آمد. فرناندز و همکارانش [۱۳] توانستند با اعمال یک سیکل آموزش به آلیاژ حافظه‌دار پایه مس، در آن خاصیت حافظه‌داری دوراها ایجاد نمایند. آنان علت این پدیده را رسوب فاز گاما درون ساختار آستنیت معرفی کردند. زانگ و همکارانش [۱۴] به جمع-بندی و مقایسه روش‌های مختلف آموزش آلیاژ حافظه‌دار به منظور دستیابی به خاصیت حافظه‌داری دوراها پرداختند.

با توجه به اهمیت و تأثیر فرایند آموزش در عملکرد آلیاژ حافظه‌دار، در این پژوهش ابتدا شش نمونه آلیاژ حافظه‌دار در تنش ثابت آموزش داده شد و رابطه کرنش بازیابی و تنش آموزش برای این نمونه‌ها بررسی گردید. در مرحله بعد عملکرد این نمونه‌ها در تنش‌هایی بیشتر و کمتر از تنش آموزش بررسی شده است. اهمیت این موضوع از آن جهت است که در کاربردهای واقعی (مانند تحریک تیر یا بالک هواپیما) معمولاً در حین تحریک آلیاژ حافظه‌دار (افزایش دما)، تنش آلیاژ به تدریج افزایش می‌یابد و پس از قطع عامل محرک (کاهش دما)، تنش آلیاژ کاهش می‌یابد. این در حالی است که آلیاژ قبل از استفاده در یک تنش ثابت آموزش دیده است.

بنابراین بررسی عملکرد آلیاژ حافظه‌دار آموزش داده شده در یک تنش ثابت، در تنش‌هایی بیشتر و کمتر از تنش آموزش اهمیت پیدا می‌کند.

۲- مواد و تجهیزات آزمایش

۲-۱- آلیاژ حافظه‌دار

آلیاژ حافظه‌دار مورد استفاده در این پژوهش از جنس نیکل-تیتانیوم، ساخت شرکت دینالوی^۱ و با نام تجاری فلکسینول^۲ می‌باشد [۱۵]. آلیاژ به شکل سیم و قطر آن

1. Dynalloy
2. Flexinol®

۲-۲- منبع تغذیه

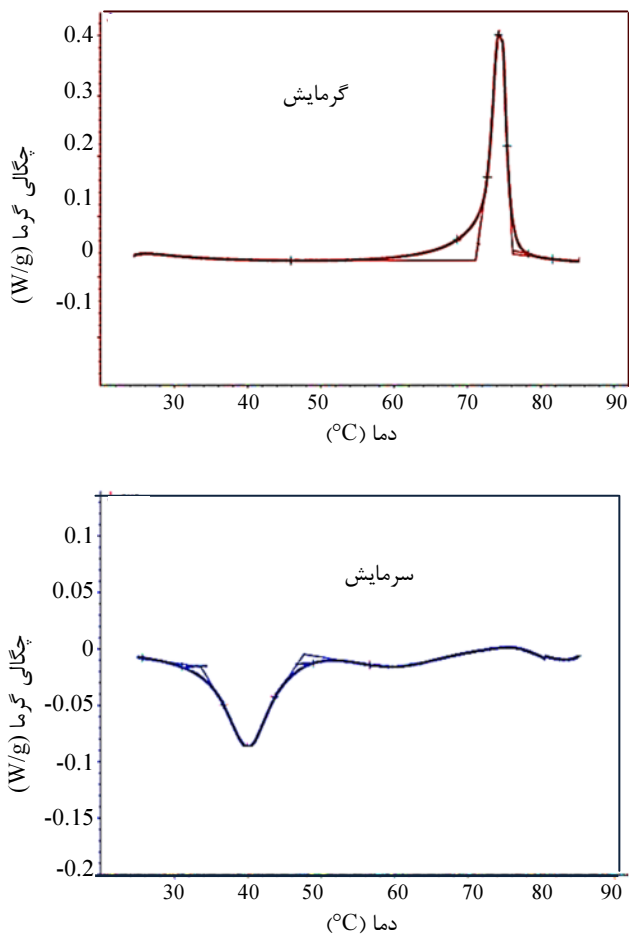
به منظور ایجاد اختلاف پتانسیل (یا جریان الکتریکی) در سیم هوشمند از منبع تغذیه مدل PS305D با ولتاژ کاری (۶۰ Hz) ۳۰۷ / ۲۲۰V / AC و بیشینه جریان / ولتاژ خروجی ۵ A / ۳۰۷ استفاده شده است.

جدول ۱ خواص فیزیکی آلیاژ حافظه‌دار [۱۵]

چگالی	۶/۴۵ g/cm ³
گرمای ویژه	۰/۲ cal/g °C
نقطه ذوب	۱۳۰۰ °C
گرمای نهان استحاله	۵/۷۸ cal/g
ضریب انتقال حرارت	۰/۱۸ W/cm °C
ضریب انبساط حرارتی:	
مارتنزیت	۶/۶ × ۱۰ ^۶ /°C
آستنیت	۱۱ × ۱۰ ^۶ /°C
مقاومت الکتریکی:	
مارتنزیت	۸۰ μΩ × cm
آستنیت	۱۰۰ μΩ × cm

جدول ۲ رابطه کرنش‌های دائمی آلیاژ بر حسب تنش اعمالی [۱۵]

کرنش دائمی (%)	تنش (MPa)
< ۰/۵	< ۱۰۳
~ ۱	۱۳۸
> ۱	> ۱۳۸



شکل ۱ نتایج آزمون DSC آلیاژ حافظه‌دار در چرخه سرمايش و گرمایش

۳-۲- آموزش آلیاژ حافظه‌دار

در این مرحله آلیاژ حافظه‌دار در تنش ثابت در معرض تعداد معینی چرخه سرمايش و گرمایش آموزش داده شده است [۲۱]. پس از برش شش سیم آلیاژ حافظه‌دار به طول ۱۴۰mm، تنش مورد نظر از طریق قرار دادن وزنه‌هایی مشخص به انتهای سیم و به واسطه نیروی گرانشی زمین به سیم هوشمند اعمال گردید. با اعمال جریان الکتریکی به دو انتهای سیم، دما افزایش یافت و استحاله مارتنزیت به آستینیت بوقوع پیوست. در نتیجه این استحاله، آلیاژ تحریک شد و طول سیم مقداری کاهش یافت. با قطع جریان الکتریکی و کاهش دمای سیم، استحاله آستینیت به مارتنزیت مجدداً اتفاق افتاد. در این حالت به واسطه نیروی کششی که وزنه به سیم اعمال می‌کرد، طول سیم افزایش یافت و کرنش قابل قبولی در آن بوجود آمد. شکل ۲ نحوه آموزش آلیاژ حافظه‌دار و وضعیت

۳-۲- سنسور جابجایی

سنسور جابجایی به منظور ثبت جابجایی و محاسبه کرنش استفاده شده است. این سنسور متعلق به شرکت پنی و جیلس^۱ و ساخت کشور انگلیس می‌باشد. مشخصات سنسور جابجایی در جدول ۳ بیان شده است [۱۸].

۳-۱- آزمایش‌های تجربی

۳-۱-۱- آزمایش گرماسنج روبشی تفاضلی

در این پژوهش برای تعیین دماهای استحاله از آزمایش گرماسنج روبشی تفاضلی (DSC) استفاده شد. شرایط آزمایش DSC در جدول ۴ بیان شده است [۱۹،۱۵].

قبل از شروع آزمایش، نمونه سیم حافظه‌دار ابتدا در دمای ۹۵°C به مدت ۲۰ ثانیه نگه داشته شد. سپس دمای نمونه کاهش یافت و به ۲۵°C برده شد [۴]. هدف از این کار از بین بردن اثرات احتمالی مارتنزیت حاصل از تنش در نتیجه بسته‌بندی یا برش سیم می‌باشد. شکل ۱ نتایج آزمون DSC را در چرخه سرمايش و گرمایش نشان می‌دهد.

مقادیر دماهای استحاله با رسم مماس بر نمودار DSC، قبل و بعد از قله و دره بدست آمده است و در جدول ۵ مشخص شده است. آلیاژ حافظه‌دار در این پژوهش در رساله دکتری ذاکرزاده نیز استفاده شده است [۲۰].

جدول ۳ مشخصات سنسور جابجایی [۱۸]

غیرخطی بودن	٪۱۵
محدوده اندازه‌گیری جابجایی	۶۵ mm
مقاومت الکتریکی ٪۱۰ ±	۵ Kohm
محدوده دمای کاری	-۵۵°C ~ ۸۵°C
وزن تقریبی	۱۹۵ g

جدول ۴ شرایط آزمون [۱۹DSC]

آهنگ تغییرات دما	محیط آزمایش	محدوده دمایی
۵min/°C	گاز آرگون	۲۵ ~ ۹۵°C

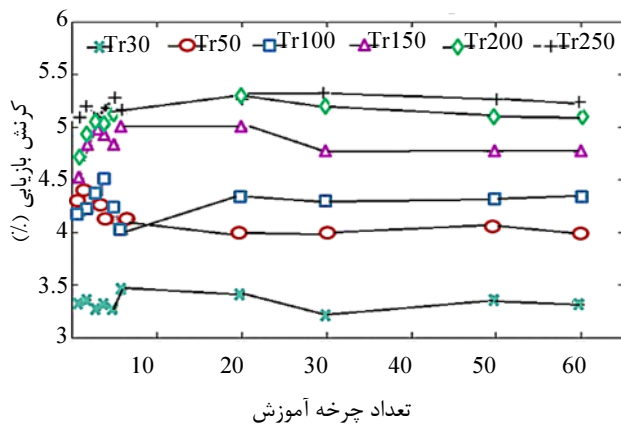
جدول ۵ دماهای استحاله آلیاژ حافظه‌دار به دست آمده از آزمون DSC

M_f (°C)	M_s (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)
۳۳/۶	۴۷/۶	۷۱/۱	۷۶/۲

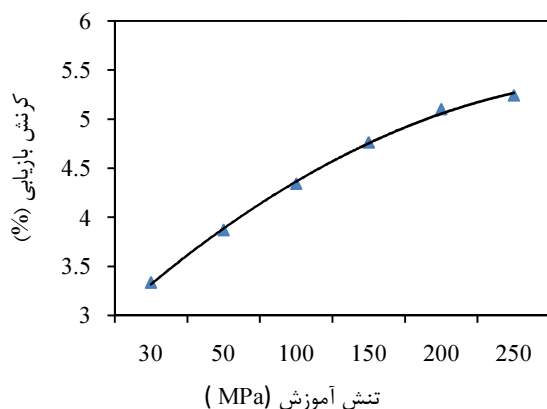
1. Penny and Giles

تنش‌های آموزش بالاتر (۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ مگاپاسکال) مقدار کرنش بازیابی در چرخه‌های پایانی آموزش یکسان شده است؛ بنابراین آموزش به تعداد ۶۰ چرخه برای پایداری رفتار آلیاژ در این موارد کافی بوده است.

با توجه به شکل ۳ با افزایش تنش آموزش، مقدار کرنش بازیابی نیز افزایش یافته است. رابطه تنش آموزش و کرنش بازیابی در پایان چرخه ۶۰ ام در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴ با افزایش تنش آموزش مقدار کرنش بازیابی نیز افزایش یافته است اما باید توجه داشت که افزایش بیش از حد تنش آلیاژ برای رسیدن به کرنش‌های بازیابی بالاتر می‌تواند سبب بروز کرنش‌های پلاستیک پایدار و یا پارگی سیم شود.



شکل ۳ رابطه کرنش بازیابی در چرخه‌های مختلف تحریک برای تنش‌های ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال

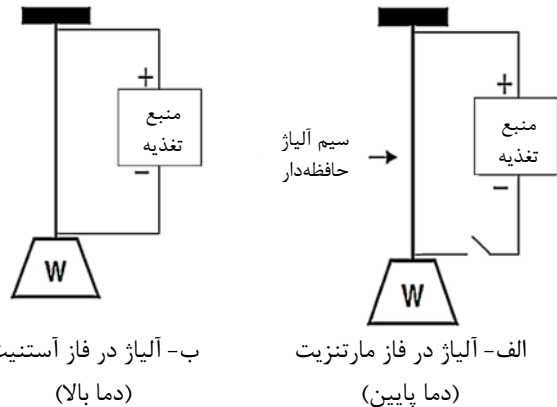


شکل ۴ کرنش بازیابی آلیاژ حافظه‌دار بر حسب تنش آموزش

۳-۳- پاسخ آلیاژهای آموزش داده شده به بارهای کمتر و بیشتر از بار آموزشی

پس از آموزش نمونه‌های آلیاژ حافظه‌دار در تنش ثابت، در این

سیم را در دو فاز آستنیت (دما بالا) و مارتنزیت (دما پایین) به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۲ آموزش آلیاژ حافظه‌دار

پس از اتصال وزنه به انتهای سیم، به تدریج جریان الکتریکی ۰/۵ آمپر به دو انتهای سیم حافظه‌دار اعمال شد و دمای سیم افزایش یافت. با افزایش دمای سیم، استحاله مارتنزیت به آستنیت اتفاق افتاد و طول سیم کاهش یافت. پس از آن که جریان به مقدار ۰/۵ آمپر رسید، نگهداری سیم در مدت زمان ۵ ثانیه سبب پایداری دمای آن شد. در مرحله بعد با کاهش جریان الکتریکی و کاهش دمای سیم، استحاله آستنیت به مارتنزیت به وقوع پیوست. نتیجه استحاله آستنیت به مارتنزیت افزایش طول سیم و بازگشت سیم به طول اولیه خود می‌باشد. تکرار این عمل سبب آموزش آلیاژ حافظه‌دار و پایدار شدن رفتار آن می‌شود.

آموزش آلیاژ در تنش‌های ثابت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال و به تعداد ۶۰ چرخه انجام شده است. با توجه به توصیه شرکت سازنده، بیشینه تنش اعمالی به آلیاژ ۲۵۰ MPa انتخاب شده است [۱۵]. این کار سبب تکرار پذیری بیشتر پاسخ آلیاژ می‌شود.

شکل ۳ نتایج کرنش بازیابی آلیاژ را تا چرخه ۶۰ام برای شش مقدار تنش نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، در چرخه‌های ابتدایی رفتار کرنش بازیابی آلیاژ بسیار متغیر و نوسانی است، ولی در چرخه‌های بالاتر مقدار کرنش بازیابی تقریباً ثابت شده است. مقدار کرنش بازیابی نمونه‌های آموزش دیده در تنش‌های ۳۰ و ۵۰ مگاپاسکال برخلاف سایر نمونه‌ها، در چرخه‌های پایانی به صورت کامل ثابت نشده است. در

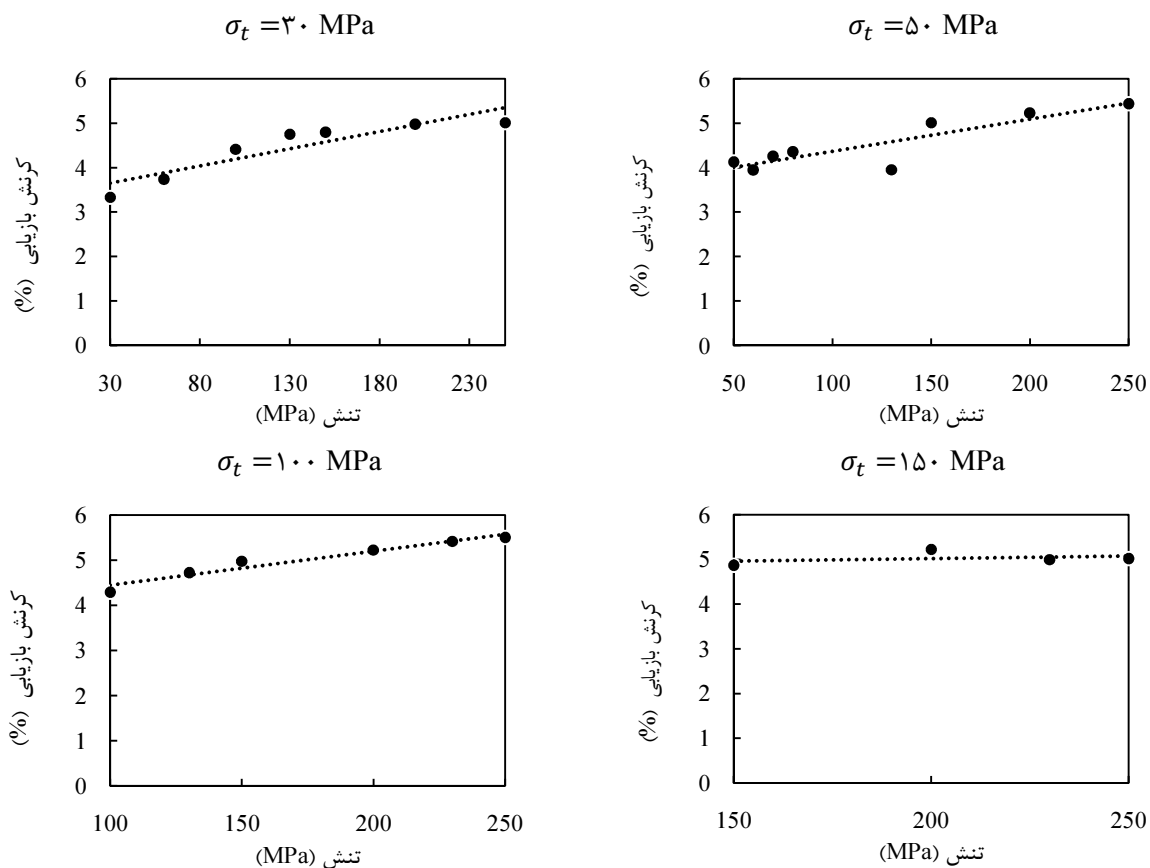
بخش مقدار کرنش بازیابی آلیاژها در تنش‌هایی بیشتر و کمتر از تنش آموزش بررسی شده است. روند آزمایش‌ها به این صورت است که ابتدا کرنش بازیابی آلیاژهای آموزش داده شده در تنش‌هایی کمتر از تنش آموزش و سپس در تنش‌هایی بیشتر از تنش آموزش اندازه‌گیری شده است. شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب مقادیر کرنش بازیابی آلیاژها را در تنش‌هایی بیشتر و کمتر از تنش آموزش (σ_t) نشان می‌دهد. برای کاهش خطاهای اندازه‌گیری، کرنش بازیابی آلیاژ در هر یک از تنش‌ها چندین بار اندازه‌گیری و سپس میانگین کرنش بازیابی در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج و بحث

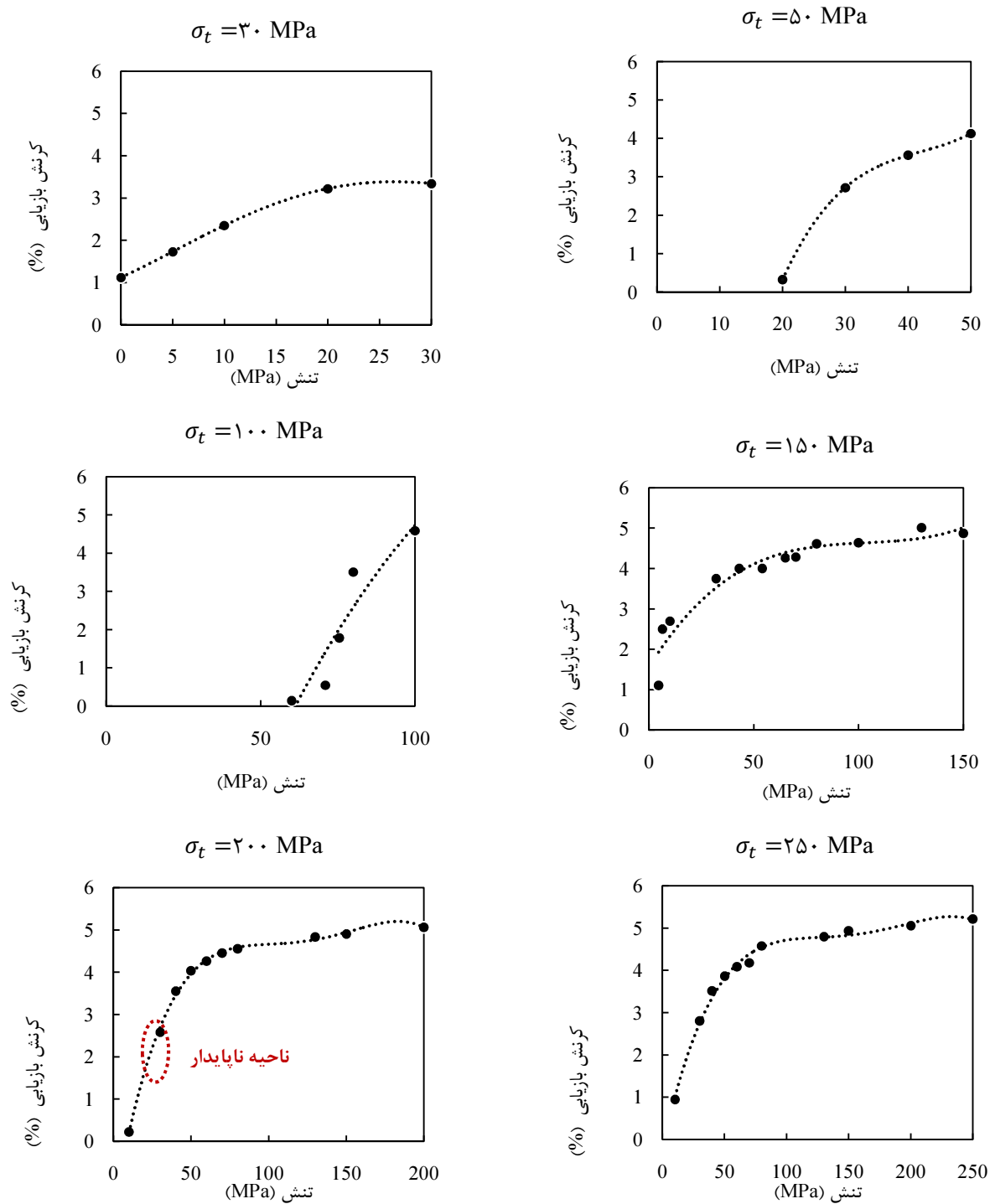
۴-۱- تأثیر آموزش آلیاژ حافظه‌دار در ایجاد خاصیت حافظه‌داری دورا

با مقایسه نمودارهای شکل ۶ مشاهده می‌شود که روند نمودار

کرنش بازیابی-تنش برای آلیاژ آموزش داده شده در تنش $\sigma_t = 50 \text{ MPa}$ و $\sigma_t = 100 \text{ MPa}$ کاملاً متفاوت از سایر نمودارها می‌باشد. با توجه به شکل ۶ در نمودارهای مرتبط با $\sigma_t = 50 \text{ MPa}$ و $\sigma_t = 100 \text{ MPa}$ ، به ترتیب باید حداقل تنش 20 MPa و 60 MPa به آلیاژ اعمال شود تا پس از چرخه‌ی سرمایش آلیاژ دچار کرنش شود. این به آن معنا است که اگر حداکثر تنش اعمالی به آلیاژ کمتر از مقادیر ذکر شده باشد هنگام افزایش دما آلیاژ منقبض شده و پس از سرمایش، مجدداً آلیاژ توانایی بازگشت به حالت اولیه خود را ندارد. به عبارت دیگر رفتار آلیاژ حتی با اعمال تنش، یک‌راجه خواهد بود و لذا عملکرد آن ناقص می‌شود. این در حالی است که در سایر آزمایش‌های شکل ۶، تنش 60 MPa کرنشی در حدود ۴٪ را در آلیاژ ایجاد می‌کند؛ حال آن‌که در نمونه آموزش داده شده در تنش 100 MPa ، تنش 60 MPa تنها توانایی ایجاد کرنشی در حدود ۱۴٪ را در آلیاژ خواهد داشت.



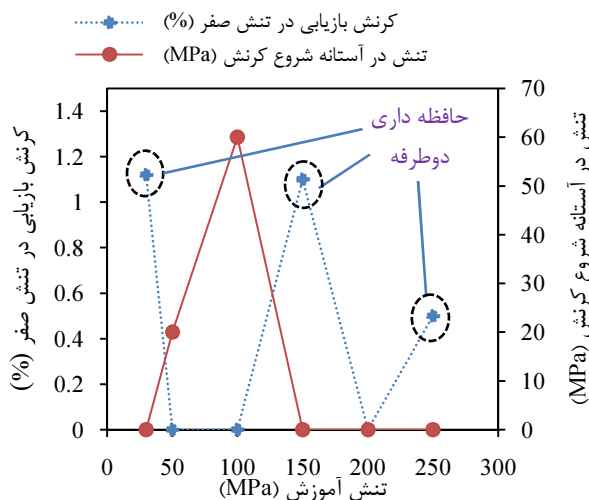
شکل ۵ رابطه کرنش بازیابی- تنش آلیاژ حافظه‌دار آموزش داده شده تحت تنش σ_t به تعداد ۶۰ چرخه در مقادیر بالاتر از تنش آموزش



شکل ۶ رابطه کرنش بازیابی- تنش آلیاژ حافظه‌دار آموزش داده شده در تنش σ_t به تعداد ۶۰ چرخه در مقادیر کمتر از تنش آموزش

همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است، چون رفتار آلیاژ آموزش داده شده در تنش $\sigma_t = 100 \text{ MPa}$ با رفتار آلیاژ در سایر بارهای آموزشی متفاوت است، نمودار کرنش بازیابی- تنش برای این نمونه به صورت جداگانه رسم شده است.

با استفاده از نتایج شکل ۵ و شکل ۶، رابطه کرنش بازیابی و تنش برای تمام نمونه‌های آموزش داده شده در تنش‌های ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال در شکل ۷ نشان داده شده است.



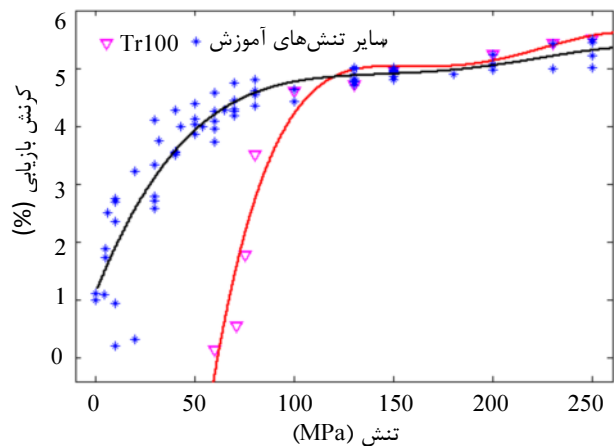
شکل ۸ رابطه تنش آموزش بر حسب کرنش بازیابی و تنش آستانه بروز کرنش در سیم

۴-۲- تأثیر تنش آموزش در عملکرد آلیاژ حافظه‌دار

با توجه به رابطه کرنش بازیابی-تنش شکل ۷، روند تغییرات کرنش بازیابی و تنش برای تمام بارهای آموزشی یکسان است. به گونه‌ای که با افزایش تنش، کرنش بازیابی افزایش یافته است. اما با توجه به شکل ۷، کرنش بازیابی در تنش‌های کمتر از ۱۰۰ MPa با آهنگ بیشتری کاهش یافته و در تنش‌های بالاتر از ۱۰۰ MPa کرنش بازیابی با افزایش تنش تغییر زیادی نکرده است. به عبارت دیگر تنش‌های کمتر از ۱۰۰ MPa قابلیت کمتری در بازیابی کرنش آلیاژ داشته است. بنابراین به منظور عملکرد بهتر آلیاژ، لازم است که همواره تنش آلیاژ در محدوده تنش‌های بالاتر از ۱۰۰ MPa باشد.

۴-۳- تأثیر آموزش در بروز ناپایداری

با توجه به شکل ۶، در مورد آلیاژ آموزش داده شده در تنش $\sigma_t = 200$ MPa مشاهده شد که رفتار آلیاژ در تنش ۳۰ MPa متفاوت از رفتار آلیاژ در سایر مقادیر تنش می‌باشد. مشاهدات تجربی نشان داد که رابطه کرنش بازیابی-تنش در تنش ۳۰ MPa برای نمونه آموزش داده شده در حالت ۳۰ MPa $\sigma_t = 200$ دو تفاوت عمده با سایر آزمایش‌ها دارد: اول آنکه آلیاژ در تحریک‌های پیاپی، همواره یکی از دو مقدار کرنش ۱/۸۱ یا ۲/۵۸ درصد را به صورت تصادفی برای خود اختیار کرده است. به بیان دیگر رفتار آلیاژ در تنش ۳۰ MPa ناپایدار است. دوم آن که در تمامی آزمایش‌ها پس از قطع جریان الکتریکی، حدود ۳ ثانیه طول کشید تا کرنش موجود در آلیاژ



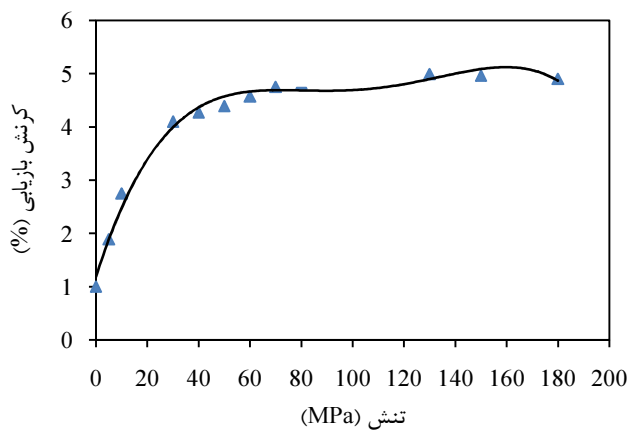
شکل ۷ رابطه کرنش بازیابی و تنش برای تمام نمونه‌های آموزش داده شده

البته رفتار آلیاژ آموزش داده شده در تنش ۱۰۰ MPa در تنش‌های بیشتر از ۱۰۰ MPa مشابه نتایج آموزش آلیاژ در تنش‌های ۳۰، ۵۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال شده است.

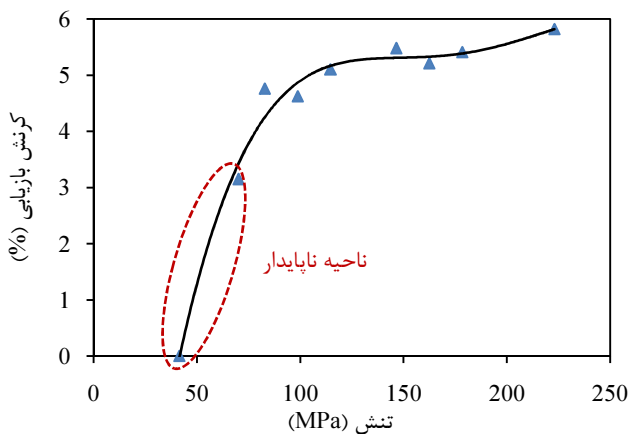
همچنین با توجه به شکل ۷ پراکندگی مقادیر کرنش بازیابی برای نمونه، تنش (MPa) حافظه‌دار در تنش‌های کمتر از ۱۰۰ MPa افزایش یافته است. به عبارت دیگر با کاهش تنش، محدوده تغییرات کرنش بازیابی آلیاژ به ازای تنش‌های آموزش مختلف، افزایش یافته است. به علاوه در تنش‌های بیشتر از ۱۰۰ MPa نتایج کرنش بازیابی-تنش مستقل از تنش آموزش شده و مقادیر کرنش بازیابی در تنش‌های مختلف تقریباً یکسان است.

شکل ۸ رابطه‌ی تنش آموزش را بر حسب کرنش بازیابی در تنش صفر و تنش لازم برای ایجاد کرنش نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۸ آلیاژ آموزش داده شده در تنش‌های ۳۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال از خود رفتار دوره‌ها نشان می‌دهند و آلیاژها در تنش صفر مگاپاسکال، به ترتیب کرنشی را در حدود ۱/۱۲، ۱/۱ و ۰/۵ درصد بازیابی می‌کند. این در حالی است که در مورد آلیاژهای آموزش داده شده در تنش‌های ۵۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال حتی در حضور تنش، آلیاژ توانایی بازیابی کرنش را ندارد؛ که این خاصیت همان خاصیت حافظه‌داری تک راهه می‌باشد. بنابراین آموزش آلیاژ در تنش ۳۰ و ۱۵۰ مگاپاسکال یک نمونه از آموزش‌های مطلوب جهت رسیدن به خاصیت حافظه‌داری دوره‌ها می‌باشد.



شکل ۱۰ رابطه کرنش بازیابی و تنش. آموزش در تنش ۱۸۰ MPa به تعداد ۶۰ چرخه



شکل ۱۱ رابطه کرنش بازیابی و تنش. آموزش در تنش ۱۸۰ MPa به تعداد ۴۰ چرخه

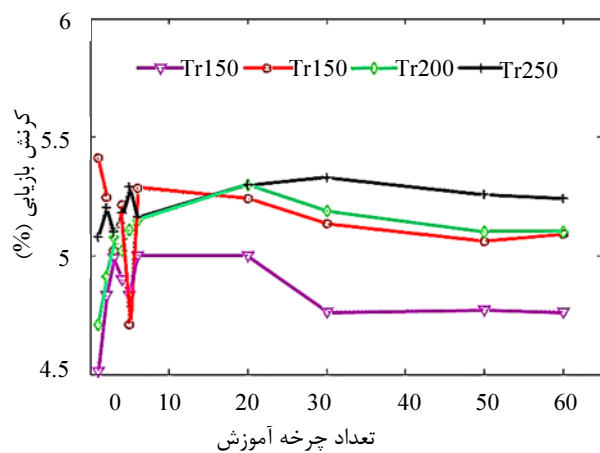
تغییرات کرنش بازیابی- تنش در نمودار شکل ۱۱ مشابه سایر نمودارها می‌باشد، اما با این تفاوت که آلیاژ در تنش ۸۰ MPa حالت ناپایدار از خود نشان داد. آلیاژ در تنش ۸۰ MPa قابلیت بازگردانی کرنشی در حدود ۴/۷۶٪ را داشت. اما هنگامی که تنش ۴۰ MPa به آلیاژ وارد شد کرنشی در آلیاژ بازگردانی نشد. به عبارت دیگر آلیاژ در این حالت رفتار یک‌راهه از خود نشان داد. آلیاژ در تنش ۷۰ MPa که بین دو مقدار تنش ۴۰ و ۸۰ مگاپاسکال است یک حد میانه‌ای را اختیار کرده است. به عبارت دیگر، رفتار آلیاژ در تنش ۷۰ MPa دچار حالت ناپایدار شده و کرنش بازگردانی آلیاژ در تحریک‌های پیاپی یکی از دو مقدار صفر یا ۳/۱۵٪ را اختیار کرده است. به هر حال باید توجه داشت که بروز حالت ناپایدار در سیم

بازگردانی شود (دمای اتاق در حدود ۲۵ °C می‌باشد). این درحالی است که در هنگام بروز رفتار ناپایدار، زمانی در حدود ۳۵ ثانیه لازم بود که کرنش آلیاژ بازگردانی شود. به عبارت دیگر سرعت عملکرد سیم در استحاله آستنیت به مارتنزیت بسیار به کندی انجام پذیرفت.

با توجه به وقوع این رفتار ناپایدار برای آلیاژ، در نگاه اول به نظر رسید که احتمالاً تنش آموزش علت وقوع این پدیده باشد. به منظور بررسی این رفتار ناپایدار، آزمایش دیگری طراحی شد. با توجه به این که این پدیده در تنش آموزش $\sigma_t = 200$ MPa و با تعداد ۶۰ چرخه آموزش به وقوع پیوسته بود، به منظور بررسی وقوع این پدیده، مجدداً آلیاژی در تنش ۱۸۰ MPa و به تعداد ۶۰ چرخه آموزش داده شد. نمودار کرنش بازیابی- تعداد چرخه آموزش برای تنش‌های آموزش ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ در شکل ۹ نشان داده شده است.

پس از آموزش آلیاژ در تنش $\sigma_t = 180$ MPa، رفتار آلیاژ در تنش‌های بیشتر و کمتر از تنش آموزش بررسی شد. نمودار کرنش بازیابی بر حسب تنش برای آلیاژ آموزش دیده در تنش $\sigma_t = 180$ MPa در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

بر اساس مشاهدات تجربی، آلیاژ در این حالت هیچ گونه رفتار ناپایداری از خود نشان نداد. مجدداً تنش ۱۸۰ MPa به منظور آموزش آلیاژ انتخاب شد. علت این انتخاب نزدیکی تنش ۱۸۰ MPa به تنش ۲۰۰ MPa می‌باشد. با این تفاوت که این بار آلیاژ در ۴۰ چرخه مورد آموزش قرار گرفت. رابطه کرنش بازیابی و تنش برای نمونه آموزش دیده در تنش $\sigma_t = 180$ MPa در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۹ کرنش بازیابی آلیاژ حافظه‌دار بر حسب تعداد چرخه آموزش در تنش‌های ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال

آلیاژ در محدوده تنش‌های بالاتر از ۱۰۰ MPa باشد.

۶- مراجع

- [1] Wang Wjb F. E., Pickart S. J., "Crystal structure and a unique martensitic transition of TiNi", *Journal of Applied Physics*, Vol. 36, 1965, pp. 3232-3239.
- [2] Sun L., Huang WM., Ding Z., Zhao Y., Wang CC., Purnawali H., Tang C., "Stimulus-responsive shape memory materials: A review", *Materials & Design*, Vol. 33, 2012, pp. 577-640.
- [3] Brinson LC., Huang MS., Boller C., Brand W., "Analysis of Controlled Beam Deflections Using SMA Wires", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, 1997, pp. 12-2.
- [4] Lagoudas DC., *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Application Springer*, College Station, USA 2008.
- [5] Dano ML., Hyer MW., "SMA-induced snap-through of unsymmetric fiber-reinforced composite laminates", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, 2003, pp. 5949-597.
- [6] Contardo L., "Training and two way memory effect in Cu-Zn-Al alloy", *Acta Metallurgica*, Vol. 38, 1990, pp. 1267-1272.
- [7] Miller DCLD. A., "Thermo-mechanical characterization of NiTiCu and NiTi SMA Actuators: Influence of plastic strains", *Smart Materials and Structures*, Vol. 9, 2000, pp. 640-652.
- [8] Ren X., Otsuka K., "Universal symmetry property of point defects in crystals", *Physical Review Letters*, Vol. 85, No. 5, 2000, pp. 1016-1019.
- [9] Woo Kim H., "A study of the two-way shape memory effect in Cu-Zn-Al alloys by the thermomechanical cycling method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 3, 2004, pp. 326-329.
- [10] Chen L.P., Si N.C., "Influence of thermomechanical training deformations on TWSME in TiNiCu alloy spring", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 448, No. 1-2, 10 2008, pp. 219-222.
- [11] Atli K.C., Karaman I., Noebe R.D., Gaydos D., "The effect of training on two-way shape memory effect of binary NiTi and NiTi based ternary high temperature shape memory alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 560, 2013, pp. 653-666.
- [12] Lahoz R., Puértolas J.A., "Training and two-way shape memory in NiTi alloys: influence on thermal parameters", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 381, No. 1-2, 2004, pp. 130-136.

هوشمند سبب ناپایداری سازه می‌شود. بنابراین آموزش آلیاژ باید به گونه‌ای انجام پذیرد که از بروز حالت ناپایدار در آن جلوگیری شود.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا ۶ نمونه سیم آلیاژ حافظه‌دار به صورت جداگانه در تنش‌های ثابت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال آموزش دیده‌اند و سپس رفتار هر یک از آلیاژها در محدوده تنش صفر تا ۲۵۰ مگاپاسکال بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

۱- در تحریک‌های اولیه، کرنش بازیابی آلیاژ حافظه‌دار دارای نوسان می‌باشد. با تحریک آلیاژ در چرخه‌های بالاتر مقدار کرنش بازیابی پایدارتر شده است.

۲- آموزش در عملکرد آلیاژ حافظه‌دار در تنش‌های کمتر از ۱۰۰ MPa بسیار موثر می‌باشد. به عبارت دیگر در تنش‌های کمتر از ۱۰۰ MPa پراکندگی مقادیر کرنش بازیابی بیشتر شده است. در تنش‌های بیشتر از ۱۰۰ MPa عملکرد آلیاژ حافظه‌دار مستقل از تنش آموزش می‌باشد.

۳- آلیاژ پس از آموزش در تنش‌های ۳۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال رفتار حافظه‌داری دوراهاه از خود بروز داده است. کرنش بازیابی در حالت حافظه‌داری دوراهاه در تنش‌های ۳۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال به ترتیب برابر است با ۱/۱۲، ۱/۱ و ۰/۵ درصد.

۴- در برخی از آزمایش‌ها رفتار آلیاژ حافظه‌دار ناپایدار می‌شود و همچنین پاسخ زمانی آلیاژ برای بازیابی کرنش از ۳ ثانیه به ۳۵ ثانیه افزایش یافته است. رفتار ناپایدار به گونه‌ای است که یک تنش ثابت اعمالی به آلیاژ در برخی موارد توانایی ایجاد کرنش را در آلیاژ دارد و در پاره‌ای از مواقع ندارد. رفتار ناپایدار تابعی از تنش آموزش و نیز تعداد چرخه‌های آموزش می‌باشد.

۵- تأثیر افزایش کرنش بازیابی با افزایش مقدار تنش فقط تا تنش ۱۰۰ MPa محسوس می‌باشد. در محدوده تنش ۱۰۰ تا ۲۵۰ MPa، افزایش تنش سبب افزایشی در حدود ۱٪ در کرنش بازیابی شده است. این در حالی است که با افزایش تنش از مقدار صفر تا ۱۰۰ MPa کرنش بازیابی در حدود ۴/۵٪ افزایش یافته است. بنابراین در محدوده تنش‌های بالاتر از ۱۰۰ MPa تغییرات کرنش بازیابی به ازای تغییرات تنش، کمتر می‌باشد و به منظور عملکرد بهتر آلیاژ لازم است که همواره تنش

- [18] Penny and Giles, 2013, *Position Measurement and Control Hardware*, <http://www.pennyandgiles.com>, [accessed 5 April 2013].
- [19] Shaw CBC J.A., Iadicola M.A., "Tips and Tricks for characterizing Shape Memory Alloy Wire: Part 1-Differential Scanning Calorimetric and Basic Phenomena", *Experimental Characterization of Active Materials Series*, Vol. 32, 2008, pp. 55-62.
- [20] Zakerzadeh M., *Modeling and Position control of a Beam by large Deflection by Active Shape Memory Alloy Wires*, PhD thesis, Tehran, Iran, Sharif University, 2012. (In Persian)
- [21] Ansari M., *Investigation of Corrugated Composite Skin Deformation Using Shape Memory Alloy*, MSc Dissertation, Tehran, Iran, Tarbiat Modaresa University, 2013. (In Persian)
- [13] Fernandez J., Zhang X.M., Guilemany J.M., "A one-cycle training technique for copper-based shape memory alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, No. 1-3, 2003, pp. 117-119.
- [14] Zhang X.M., Fernandez J., Guilemany J.M., "Role of external applied stress on the two-way shape memory effect", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 438-440 2006, pp.431-435.
- [15] Dynalloy Inc. Website, 2009, *Technical Characteristics of Flexinol Actuator Wires*, <http://www.flexidynamic.com>, [Accessed 5 April 2013].
- [16] Hulskamp AW., *Inventory of actuators and first order evaluation of 2 actuators and structural concepts*, Holland, Delft, University of Technology, 2007.
- [17] Ryhanen J., *Biocompatibility evaluation on nickel-titanium shape memory metal alloy*, PhD Thesis, Oulu, Finland, University Hospital of Oulu, 1991.