



بررسی تجربی خواص کششی کامپوزیت زمینه فلزی خودترمیم با سیم نیکل-تیتانیوم سوپرالاستیک با استفاده از روش تاگوچی

سیدمحمد رضا خلیلی^{1,2}، محمدامین پورمیر³، رضا اسلامی فارسانی^{4*}

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- استاد معین، مهندسی مکانیک، موسسه تکنولوژی دهلی، دهلی نو، هندوستان
3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
4- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* صندوق پستی 19991-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخ دریافت: 95/12/12 تاریخ پذیرش: 96/3/13</p> <p style="text-align: center;">کلیدواژگان:</p> <p>کامپوزیت زمینه فلزی سیم نیکل-تیتانیوم خودترمیمی سوپرالاستیک تاگوچی</p>	<p>در پژوهش حاضر خواص کششی کامپوزیت زمینه فلزی خودترمیم با زمینه‌ای از جنس آلیاژ قلع-بیسموت و سیم سوپرالاستیک نیکل-تیتانیوم به صورت تجربی و با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی جهت مطالعه پارامترهای تاثیرگذار در بازده ترمیم شامل کسر حجمی سیم، پیش کرنش و دمای ترمیم، مورد بررسی قرار گرفته است. آلیاژ دوتایی قلع-بیسموت (Sn-13%Bi) در دمای 300 درجه سانتیگراد، ذوب و درون قالبی فلزی که قبلاً پیش گرم شده بود، ریخته شد. سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار پیش از ریخته‌گری، درون قالب و در مقادیر مختلف (1، 2 و 3 سیم) تحت پیش کرنش‌های متفاوت (0، 2 و 4 درصد) قرار گرفتند. با در نظر گرفتن سه دمای 170، 180 و 190 درجه سانتیگراد برای عملیات حرارتی مربوط به ترمیم و استفاده از آرایه‌ی L-9 روش طراحی آزمایش تاگوچی، نمونه‌ها در 9 حالت اصلی جهت بررسی اثرات عوامل دخیل در آزمایش، ساخته شدند. سپس، نمونه‌ها پس از آزمون اولیه کشش و شکست، به مدت 24 ساعت درون کوره و در دمای ترمیم قرار داده شدند. پس از ترمیم، قطعات بار دیگر تحت آزمون کشش قرار گرفته و بر اساس خروجی این دو آزمون، میزان بازیابی خواص مکانیکی نمونه‌ها تعیین شد. نتایج نشان داد که در حالت 2 سیم با پیش کرنش 4 درصد، به ترتیب در دو دمای ترمیم 190 و 180 درجه سانتیگراد، بهترین بازده ترمیم برای استحکام کششی نهایی و چقرمگی حاصل شده است.</p>

An experimental investigation on tensile properties of self-healing metal matrix composite reinforced by superelastic NiTi wires using taguchi method

Seyed Mohammad Reza Khalili^{1,2}, Mohammad Amin Poormir¹, Reza Eslami-Farsani^{3*}

1- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, 110016, India
3- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
*P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Metal matrix composite
Nickel titanium wires
Self-healing
Superelastic
Taguchi

Abstract

In the current study tensile properties of a self-healing metal matrix composite with a matrix made of Sn-13%Bi alloy and Ni-Ti SMA wires as reinforcement have been studied experimentally utilizing taguchi method in order to determine the effect of wires volume fraction, pre-strain and healing temperature on results. Matrix alloy was molten in furnace at 300°C and was casted in a preheated metallic mold. SMA wires was installed inside the mold in different quantities (1, 2, 3 wires) and different pre-strains (0, 2, 4 percent). By considering 3 healing temperature and using L-9 taguchi array, specimens in 9 main state was fabricated and tensile tested until failure. After the first test and fracture, specimens was placed in a furnace at healing temperature for 24 hours and then another tensile test was conducted in order to calculate the amount of recovered mechanical properties and introduce the efficiency level of each parameter on healing effectiveness. Results show that the presence of 2 wires with 4 percent of pre-strain and consecutively 190°C and 180°C healing temperatures create the best circumstances to achieve highest amount of self healing efficiency for ultimate tensile strength and toughness.

Please cite this article using:

Khalili, S. M. R. Poormir, M. A. and Eslami-Farsani, R., "An experimental investigation on tensile properties of self-healing metal matrix composite reinforced by superelastic NiTi wires using taguchi method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 1-8, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

خودترمیمی¹ در مواد مهندسی رویایی الهام گرفته از سیستم‌های بیولوژیکی محسوب می‌شود. امروزه در دسته‌های گوناگون مواد کامپوزیتی شامل پلیمرها، فلزات و مواد سیمانی مکانیزم‌های مختلفی جهت ترمیم ساختاری به کار گرفته شده است. خودترمیمی را می‌توان توانایی ماده جهت ترمیم آسیب‌ها به صورت خودکار تعریف کرد [1].

مفاهیم خودترمیمی به طور عمده بر اساس قابلیت سازگاری سیستم‌های بیولوژیکی با محیطی که در آن ساکن هستند، الهام گرفته شد. محققان از واژه زیستواره² جهت توصیف طراحی‌های مهندسی که از طبیعت تقلید می‌کند استفاده می‌کنند. خواصی که در کامپوزیت‌های خودترمیم دیده می‌شود را الگو برداری شده از رفتارهای سیستم‌های بیولوژیکی مانند ترمیم استخوان و پوست پس از شکستگی و زخم‌های سطحی دانست. در خصوص ترمیم استخوان فرتزل در مقاله‌ای به مدل‌سازی ریاضیاتی برای این پدیده پرداخت [2]. همچنین ورمولن نیز در همین زمینه خودترمیمی خودکار بافت پوست را بررسی نموده و مدلی ریاضی برای این پدیده معرفی نمود [3].

ایجاد این خاصیت در مواد ساخت بشر معمولاً بدون اعمال محرک خارجی امکان‌پذیر نیست. لذا مواد خودترمیم را به دو نوع خودکار (بدون مداخله خارجی) و غیر خودکار (نیازمند مداخله انسان یا محرک خارجی) تقسیم می‌کنند. در حال حاضر خودترمیمی بیشتر به احیای خواص مکانیکی از طریق ترمیم ترک‌ها اطلاق می‌شود. اما نمونه‌های دیگری از خودترمیمی نیز وجود دارد که علاوه بر ترک، سوراخ‌های کوچک و یا شیارها نیز با این مکانیزم پر می‌شوند تا به عملکرد بهتر ماده کمک کنند. توجه به این نکته ضروری است که بدانیم مکانیزم‌های مورد استفاده به منظور ایجاد خاصیت خودترمیمی مستقل از نوع ماده به چند دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود که آزادسازی عامل ترمیم‌کننده، اتصال بازگشت‌پذیر مولکولی عرضی، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار و انتقال نانوذرات از آن دسته‌اند [1].

به صورت سنتی رویکرد برخورد با آسیب ایجاد شده در یک سازه کامپوزیتی طراحی و استفاده از قطعات و مواد جداگانه‌ای جهت مرمت دائمی یا موقت سازه بوده است. این اجزاء ثانویه، بازه گسترده‌ای از انواع وصله‌های خارجی ساده تا اتصال‌های نوک تیز نفوذ کننده یا پله‌دار را شامل می‌شوند که با هدف بازگردانی تمام یا بخشی از استحکام و سفتی کامپوزیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته به دلیل مشکلات و هزینه‌هایی که اعمال پروسه ترمیم اجزاء آسیب‌دیده کامپوزیتی دارد مهندسان شروع به طراحی ساختارهایی کردند که خودترمیمی خودکار آسیب‌های خارجی را داشته باشد [4].

از اولین پژوهش‌ها در این زمینه می‌توان به کار دری [5] و همچنین دری و ساتس [6] اشاره نمود که در آن الیاف توخالی پر شده با رزین اپوکسی را درون زمینه جایگذاری نمودند. این الیاف پس از شکستگی کامپوزیت در اثر ضربه، عامل ترمیم‌کننده را در زمینه رها کرده و کامپوزیت را ترمیم می‌کنند. در زمینه‌ی مواد فلزی نیز مکانیزم‌های مختلف خودترمیمی مورد مطالعه قرار گرفت. فایلز در پایان‌نامه دکترای خود [7] برای اولین بار از آلیاژ حافظه‌دار جهت بستن ترک ناشی از شکست و از ذوب پاره‌ای زمینه به منظور برقراری مجدد اتصال سطوح ترک به یکدیگر و ترمیم نهایی آن بهره جست. پس از فایلز، مانوئل [8] به همین روش خودترمیمی کامپوزیت‌های زمینه فلزی پایه قلع و منیزیم با سیم آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم (نیتینول³) را مورد مطالعه قرار داد. وی نشان داد چنین کامپوزیت‌های زمینه فلزی قابلیت بازبایی 95%

استحکام نهایی خود را دارند [9]. در روشی دیگر برای ایجاد خاصیت خودترمیمی در مواد فلزی، لوسی و رُهاتجی [10,11] با استفاده از میکرولوله‌هایی از جنس آلومینا حاوی آلیاژ لحیم قلع سرب، زمینه‌ای از آلیاژ آلومینیوم را به روشی مشابه روش الیاف توخالی در کامپوزیت‌های پلیمری ترمیم نمودند. شینیا و همکاران [12-16] امکان ایجاد خودترمیمی حفره‌های ناشی از خزش و ریزترک‌ها را بوسیله‌ی اضافه نمودن عناصر آلیاژی و استفاده از رسوب این عناصر به منظور تغییر خواص سطح حفره و جلوگیری از رشد و ترمیم حفره در آلیاژهای فولاد و آلومینیوم بررسی نمودند. در یکی از جدیدترین کارهای انجام شده در این زمینه، ژو و همکاران [17] به مدل‌سازی عددی و ساخت نمونه خمش سه بعدی از آلیاژ زمینه فلزی قلع-بیس‌موت با سیم‌های سوپرالاستیک نیتینول پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سیم‌هایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار اثر بهتری نسبت به سایر انواع سیم‌ها روی ترمیم قطعه دارند. همچنین فرگوسن و همکاران [18] به بررسی خودترمیمی در نمونه کشش کامپوزیت زمینه فلزی از جنس آلیاژ روی تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار نیتینول پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اگر چه استفاده از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار تأثیر مثبتی در بسته شدن ترک دارد، اما اتصال نهایی زمینه حاصل نشده و قطعه ترمیم نشده است.

با توجه به توضیحات فوق و بررسی‌های فراوان انجام شده در زمینه پیشینه‌ی تحقیقاتی کامپوزیت‌های زمینه فلزی خودترمیم، در هیچ یک از پژوهش‌های قبلی اثر عوامل مختلف موثر بر بازده ترمیم مانند کسر حجمی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، دمای ترمیم و پیش‌کرنش سیم‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است و این عوامل در هر یک از مطالعات قبلی مقداری ثابت بوده است. لذا در پژوهش حاضر اثر این عوامل بر میزان بازبایی خواص مکانیکی به صورت آزمایشگاهی و بر پایه‌ی طراحی آزمایش به روش تاگوچی مطالعه شده است که تحقیقی جدید در زمینه مواد فلزی خودترمیم محسوب می‌شود. در مقاله حاضر پارامترهای ذکر شده، هر یک در سه سطح مورد بررسی قرار می‌گیرد. کسر حجمی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار برای تعداد 1، 2 و 3 سیم (به ترتیب 0.4، 0.8 و 1.2 درصد کسر حجمی) در نظر گرفته شد در حالی که پیش‌کرنش 0، 2 و 4 درصد بوده و دمای ترمیم در سطوح 170، 180 و 190 سانتیگراد تغییر می‌کند.

2- طراحی آزمایش

در زبان طراحی آزمایش، ترکیب کلیه‌ی حالات ممکن از سطوح مختلف عوامل موثر بر آزمایش را ترکیب "فاکتوریل کامل" می‌نامند. لذا در صورتی که n عامل موثر در آزمایش وجود داشته باشد و هر عامل در a سطح مختلف قرار بگیرد، تعداد کل حالات ممکن برای انجام آن آزمایش، T، را می‌توان از فرمول (1) بدست آورد [19]:

$$T = a^n \quad (1)$$

حال با توجه به فرمول فوق، برای مطالعه حاضر با سه عامل تأثیرگذار در سه سطح متفاوت، جهت بررسی تمامی حالات ممکن باید 3³، یعنی 27 حالت مجزا نمونه ساخته شود که با تعداد تکرار 3 نمونه برای هر حالت این تعداد به 81 خواهد رسید که عددی بزرگ بوده و نیازمند هزینه و زمان زیادی جهت انجام آزمایش‌ها می‌باشد. لذا با استفاده از آرایه‌ی I-9 در روش طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل داده‌های حاصل از این روش به کمک نرم‌افزار

³ Nitinol

¹ Self-healing

² Biomimetic

3- مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای ساخت آلیاژ قلع-بیسموت به عنوان زمینه فلزی کامپوزیت از ذوب نمودن قلع و بیسموت با خلوص تجاری 99% و به نسبت وزنی 13 درصد بیسموت و 87 درصد قلع در بوته فولادی، در کوره‌ای در دمای 300 درجه سانتیگراد، بهره گرفته شد. قابلیت خوب ریخته‌گری این آلیاژ و همچنین در دسترس بودن و قیمت مناسب آن باعث شد این آلیاژ به عنوان گزینه‌ی مناسبی جهت استفاده به عنوان زمینه کامپوزیت مطرح شود.

مذاب سپس در قالب دو تکه‌ای فولادی مطابق شکل 1، که پیش‌گرم شده است و سیم‌ها به وسیله‌ی تثبیت‌کننده‌هایی درون آن قرار گرفته‌اند، ریخته شد. سیم مورد استفاده در ساخت قطعات از جنس آلیاژ سوپرالاستیک نیتینول به قطر 0.3556 mm بود. این سیم‌ها توسط نگهدارنده‌هایی که درون قالب تعبیه شده‌اند به صورت تک محوره، در راستای قطعات و تحت پیش کشش قرار گرفتند و سپس مذاب درون قالب ریخته شده و سیم‌ها را در بر گرفت.

جدول 1 پارامترهای انتخابی و سطوح هر پارامتر

Table 1 Chosen parameters and their levels

سطح 3	سطح 2	سطح 1	پارامتر
1.2	0.8	0.4	کسر حجمی سیم (vol%)
4	2	0	پیش‌کرنش (%)
190	180	170	دمای ترمیم (°C)

جدول 2 نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها مطابق آرایه‌ی متعامد L-9 روش تاگوچی

Table 2 Procedure of conducting experiments according to L-9 taguchi orthogonal array

شماره آزمایش	کسر حجمی سیم (vol%)	پیش‌کرنش (%)	دمای ترمیم (°C)
1	0.4	0	170
2	0.4	2	180
3	0.4	4	190
4	0.8	0	180
5	0.8	2	190
6	0.8	4	170
7	1.2	0	190
8	1.2	2	170
9	1.2	4	180

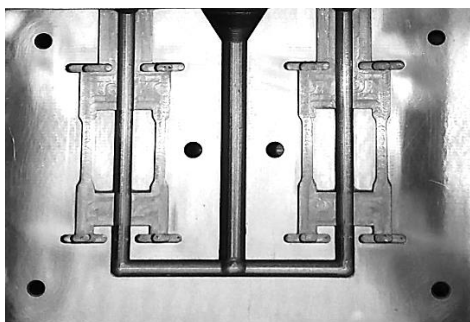


Fig. 1 Casting mold with internal wires fixtures

شکل 1 قالب ریخته‌گری به همراه تثبیت‌کننده‌های داخلی سیم‌ها

جهت بهبود ث کاهش قابلیت ترشوندگی² سطح می‌شود، از سایش مکانیکی بوسیله سنباده قابلیت اتصال سیم به زمینه و زدودن اکسید تیتانیوم در سطح سیم که باغ P400 استفاده شد.

مینی‌تب¹ می‌توان نیاز به بررسی کامل شرایط موثر را تنها با ساخت 9 حالت از ترکیب عوامل، برآورده ساخت [20].

در این پژوهش عوامل اصلی موثر بر خودترمیمی کامپوزیت، سه عامل کسر حجمی، پیش‌کرنش سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و دمایی که ترمیم در آن صورت می‌گیرد، در نظر گرفته شدند. البته عوامل دیگری مانند ترکیب آلیاژ زمینه، طول مدت قرار دهی نمونه در کوره به منظور ترمیم، آرایش قرار گیری سیم‌ها و ... را هم می‌توان به عنوان پارامترهایی تاثیرگذار در نتیجه دانست؛ لیکن دلایل محکمی برای کنار گذاشتن این عوامل وجود دارد. به طور مثال کاملاً واضح است که افزایش زمان گرما دهی به نمونه جهت ترمیم فرصت مناسبی را برای افزایش نرخ نفوذ اتمی و بهبود شرایط ترمیم ایجاد می‌کند؛ اما قرار دادن قطعات در کوره برای طولانی مدت به هیچ وجه به صرفه نبوده و توجیه کاربردی ندارد. لذا به عنوان اولین پارامتر، کسر حجمی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار (0.4, 0.8, 1.2) انتخاب شد. پارامتر دوم، میزان پیش‌کرنش سیم‌ها (0, 2 و 4 درصد) در نظر گرفته شد و در نهایت نیز جهت بررسی اثر دما روی میزان ترمیم خواص مکانیکی، دمای ترمیم در سه سطح (170، 180 و 190 سانتیگراد) به عنوان پارامتر سوم منظور شد. دلیل عدم انتخاب دما در نقطه‌ی یوتکتیک و یا پایین‌تر، آن است که در این دماها زمینه یا دچار ذوب پاره‌ای نمی‌شود یا مقدار مذاب آنقدر کم است که برای ترمیم ترک کافی نیست. در جدول 1 پارامترهای انتخابی و سطوح در نظر گرفته شده برای هر پارامتر آورده شده است.

در این تحقیق، هدف رسیدن به بازده ترمیم بالاتر است، لذا برای n نمونه که بازده ترمیم آن‌ها Y_1 تا Y_n بدست آمده، جهت محاسبه انحراف میانگین مربعات از فرمول (2) استفاده شده است [19]:

$$MSD = \frac{(1/Y_1)^2 + (1/Y_2)^2 + (1/Y_3)^2 + \dots + (1/Y_n)^2}{n} \quad (2)$$

برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز نیز از فرمول (3) استفاده شده است [19]:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (3)$$

با توجه به پارامترها و سطوح انتخاب شده برای هر پارامتر و با استفاده از آرایه‌ی متعامد L-9 طراحی آزمایش به روش تاگوچی بوسیله‌ی نرم‌افزار مینی‌تب مطابق بر جدول 2 انجام شد. بر اساس این جدول به جای انجام 27 آزمایش مختلف برای رسیدن به شرایط بهینه، تنها 9 حالت بررسی شد. این حالات شامل ترکیباتی از تمامی سطوح هر پارامتر است که با انجام آن می‌توان اثر کلی هر پارامتر بر بازده ترمیم را یافت. برای هر پارامتر، سطحی که بیشترین مقدار سیگنال به نویز را داشته باشد، سطح بهینه محسوب می‌شود. با توجه به شرایط فیزیکی مسأله می‌توان مشخصه کیفیت برای هر یک از خروجی‌ها شامل استحکام نهایی، استحکام تسلیم، مدول الاستیسیته، چقرمگی و ... را در حالات کوچکتر-بهتر، نامی-بهتر یا بزرگتر-بهتر در نظر گرفت و هر بار تحلیل نتایج مربوط به همان خواسته را انجام داد. برای هر پارامتر، سطحی که بیشترین مقدار سیگنال به نویز را داشته باشد، سطح بهینه محسوب می‌شود.

¹ minitab

² wettability

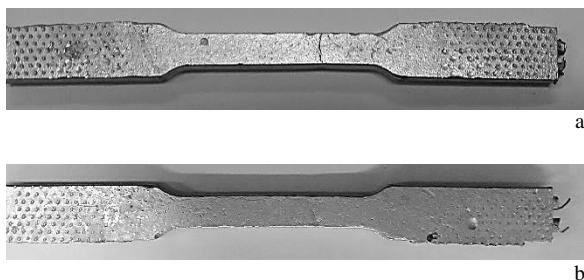


Fig. 3 Standard tensile test specimen a) before heal b) after heal

شکل 3 نمونه استاندارد آزمون کشش، الف) قبل از ترمیم، ب) پس از ترمیم

بازده ترمیم بر حسب درصد از تقسیم مقدار عددی خاصیت مکانیکی مورد نظر پس از ترمیم به مقدار همان خاصیت قبل از ترمیم، ضرب در 100 بدست می‌آید. نحوه‌ی محاسبه‌ی چقرمگی به این صورت است که پس از دریافت نمودارهای نیرو-جابجایی از دستگاه آزمون، نمودار تنش-کرنش با استفاده از مساحت سطح مقطع نمونه و همچنین طول سنجی نمونه ترسیم می‌شود. سپس با استفاده از نقاط روی منحنی و با بهره‌گیری از روش انتگرال‌گیری دوزنقه‌ای، سطح زیر نمودار تنش-کرنش که معرف چقرمگی است، محاسبه می‌شود. لذا بر این اساس، بازده ترمیم استحکام کششی نهایی (η_s) و بازده ترمیم چقرمگی (η_d) به ترتیب با استفاده از روابط (4) و (5) قابل محاسبه است.

$$\eta_s = \frac{S_{ah}}{S_{bh}} \times 100 \quad (4)$$

$$\eta_d = \frac{d_{ah}}{d_{bh}} \times 100 \quad (5)$$

در فرمول‌های (4) و (5)، S_{bh} و S_{ah} به ترتیب نشان دهنده‌ی استحکام کششی نهایی پس از ترمیم و پیش از ترمیم است. d_{bh} و d_{ah} نیز نشان دهنده‌ی چقرمگی پس از ترمیم و پیش از ترمیم می‌باشد.

4- نتایج و بحث

برای هر نمونه، نمودار تنش-کرنش، پیش و پس از ترمیم رسم شده و بر اساس آن و با تعیین مقدار استحکام کششی نهایی و چقرمگی در دو وضعیت ذکر شده و استفاده از روابط 4 و 5، بازه ترمیم محاسبه شد. بر اساس این نتایج، بازده‌ی ترمیم هر یک از خواص استحکام کششی نهایی و چقرمگی بر اساس روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های 3 تا 5 نشان‌دهنده نمودار تنش-کرنش برای 3 نمونه‌ی 2، 5 و 8 در دو حالت پیش از ترمیم و پس از آن می‌باشد.

تمامی نمودارهای تنش-کرنش (شکل‌های 3 تا 5) دارای یک ناحیه خطی اولیه با شیب ثابت هستند که معرف محدوده‌ی الاستیک می‌باشد. پس از آن نمودار وارد ناحیه پلاستیک شده و با افزایش بارگذاری شیب نمودار کاهش می‌یابد تا در نقطه‌ای که به منزله‌ی استحکام کششی نهایی ماده می‌باشد، شیب صفر شده و نمودار مقدار ماکزیمم خود را تجربه می‌کند. پس از این نقطه قطعه دچار شکست شده و تنش به شدت کاهش می‌یابد.

4-1- استحکام کششی نهایی

برای هر آزمون به صورت متوسط، 3 بار آزمایش تکرار شده و میانگین استحکام نهایی این سه نمونه قبل و بعد از ترمیم به عنوان داده‌ی نهایی در جدول 3

سطح قالب نیز به منظور بهبود امکان خروج قطعات و تسهیل جاری شدن مذاب جهت پر کردن موثر حفره‌ها، بوسیله‌ی اسپری گرافیت پوشش داده شد. همچنین ریخته‌گری درون قالب تحت وزن خود مذاب و بدون اعمال فشار خارجی انجام شد. پس از اتمام ریخته‌گری قطعات از قالب خارج شده و از محل اتصال به راهگاه‌ها برش داده شدند. قطعات حاصل، نمونه‌های آزمون کشش هستند که طبق استاندارد ASTM-E08 و به شکل دمبلی با مقطع مستطیلی (4×6 mm) ساخته شدند [21].

این نمونه‌ها ابتدا بوسیله‌ی دستگاه Hounsfield H25KS و با نرخ بارگذاری 2 mm/min تحت آزمون کشش قرار گرفتند. نمودار حاصل از این آزمون نشان دهنده‌ی خواص مکانیکی قطعات در حالت اولیه و پیش از ترمیم است. طی انجام آزمون، در ناحیه‌ی سنجه نمونه‌ها، ترک‌ی رشد و باعث شکست قطعه شد. سطوح این ترک پس از شکست در اثر خاصیت سوپرالاستیک سیم نیتینول و نیروی اعمالی توسط این سیم به یکدیگر نزدیک شده و بسته شدن دهانه ترک اتفاق افتاد.

سپس نمونه‌ها جهت ترمیم به مدت 24 ساعت در کوره با اتمسفر آرگون، جهت کاهش نرخ اکسایش سطوح ترک، و در دمای ترمیم نگهداری شدند. در این زمان، قطعه مطابق شکل 2 در ناحیه دوفازی دی‌اگرم دو جزئی آلیاژ زمینه قرار گرفت و بر اثر نفوذ اتمی به مرور اتصال سطوح ترک به یکدیگر صورت گرفت. مطابق با نمودار شکل 2، ترکیب آلیاژ زمینه به صورتی انتخاب شده است که فاصله‌ی ΔT که تفاضل دمای ذوب کامل¹ و یوتکتیک² است، بیشینه شود. این امر امکان کنترل بهینه کسر مذاب زمینه را به علت تغییرات کمتر درصد ذوب پاره‌ای در اثر تغییرات جزئی در دما را فراهم می‌کند.

پس از ترمیم، نمونه‌ها بار دیگر تحت آزمون کشش قرار گرفتند. در این مرحله نتایج حاصل از آزمون با نتایج قبلی (که از آزمون نمونه‌ها قبل از ترمیم بدست آمده بود)، مقایسه شده و بر این اساس، میزان بازیابی خواص مکانیکی و بازده ترمیم تعیین شد. در شکل 3 تصویری از یک نمونه، پیش و پس از ترمیم آمده است.

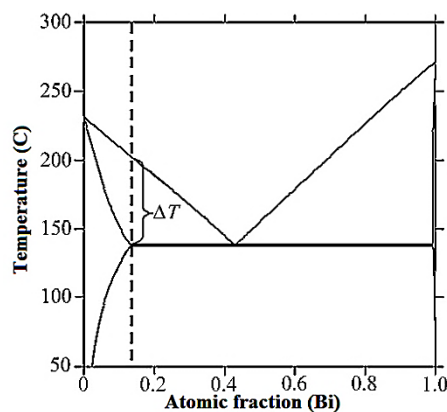


Fig. 2 Phase diagram of Sn-Bi alloy [8]

شکل 2 نمودار فازی آلیاژ قلع-بیس‌موت [8]

² eutectic

¹ liquidus

با وارد نمودن داده‌های حاصل از آزمایش (جدول 3) در نرم‌افزار مینی تب و تحلیل داده‌ها مطابق مدل بزرگتر-بهتر (به دلیل آن که افزایش بازده ترمیم مورد نظر است)، اثرات پارامترهای اصلی و نتایج سیگنال به نویز مطابق شکل 7 و جدول 4 به دست آمد. بر اساس این نتایج موثرترین عامل روی استحکام کششی نهایی، کسر حجمی سیم است و پس از آن و در رتبه‌های بعدی پیش کرنش و دمای ترمیم موثرترین عوامل هستند. با افزایش کسر حجمی سیم از 0.4 به 0.8، افزایش قابل ملاحظه‌ای در بازده ترمیم حاصل شد، اما افزایش کسر حجمی از 0.8 به 1.2 نه تنها باعث بهبود بازده ترمیم نشد، بلکه روی آن اثر عکس داشت. این مساله می‌تواند به دلیل کاهش امکان اتصال مناسب بین قسمت‌های مختلف آلیاژ زمینه در اثر حضور تعداد زیادی سیم در مقطع کوچک نمونه باشد. همچنین عدم اتصال مناسب در مرز میان زمینه و سیم می‌تواند عاملی تاثیر گذار روی بازده ترمیم نمونه‌هایی با تعداد سیم زیاد شود. با این حال همچنان اصلی‌ترین عامل در ترمیم استحکام کششی همان کسر حجمی سیم است.

جدول 3 نتایج استحکام کششی نهایی

Table 3 Ultimate tensile strength results

بازده ترمیم (%)	استحکام کششی نهایی پس از ترمیم (MPa)	استحکام کششی نهایی پیش از ترمیم (MPa)	نمونه
42.72	28.67	67.10	1
49.90	35.21	70.53	2
50.68	36.41	71.84	3
59.87	43.62	72.86	4
63.30	46.47	73.41	5
66.76	49.27	73.80	6
63.87	45.11	70.63	7
61.43	43.90	71.46	8
60.64	45.93	75.74	9

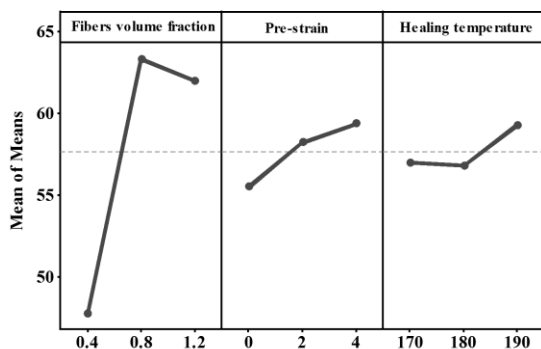


Fig. 7 Main effects of the chosen parameters on ultimate tensile strength healing efficiency

شکل 7 اثرات اصلی عوامل انتخابی بر بازده ترمیم استحکام کششی نهایی

جدول 4 نتایج سیگنال به نویز استحکام کششی نهایی

Table 4 Signal to noise results for ultimate tensile strength

سطح	کسر حجمی سیم (vol%)	پیش کرنش (%)	دمای ترمیم (°C)
1	33.56	34.75	34.96
2	36.02	35.25	35.05
3	35.84	35.41	35.41
اختلاف	2.41	0.66	0.45
رتبه بندی	1	2	3

گزارش شده است. بازده ترمیم برای استحکام کششی نهایی با استفاده از رابطه‌ی (4) قابل محاسبه است.

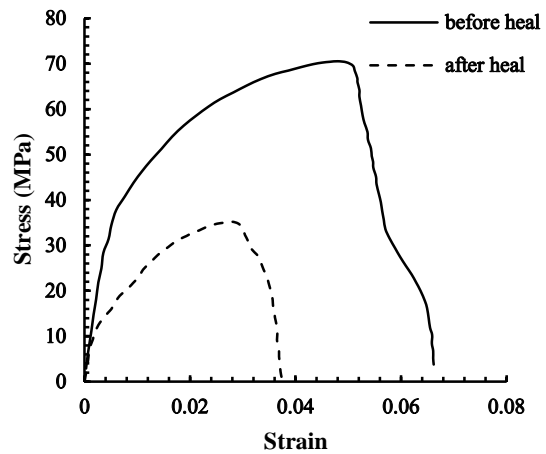


Fig. 4 Stress Strain curve for specimen number 2

شکل 4 منحنی تنش-کرنش پیش و پس از ترمیم برای نمونه شماره 2

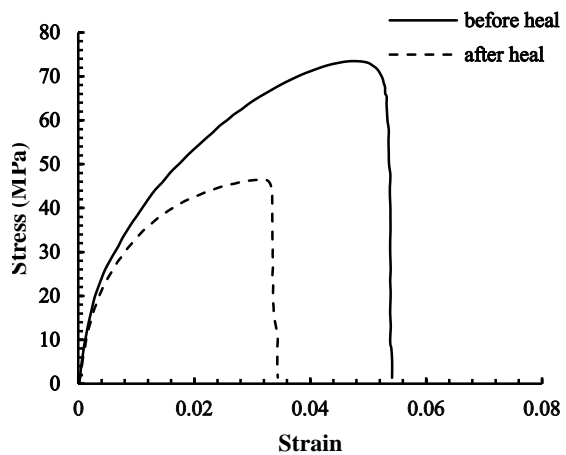


Fig. 5 Stress Strain curve for specimen number 5

شکل 5 منحنی تنش-کرنش پیش و پس از ترمیم برای نمونه شماره 5

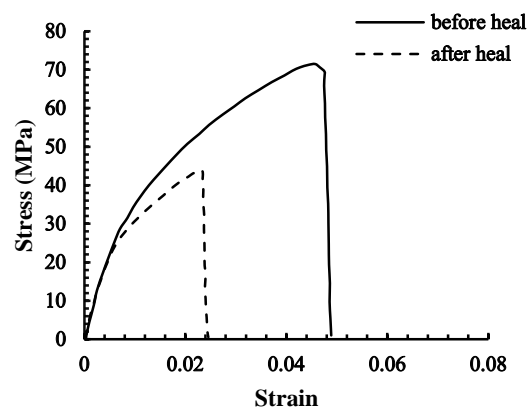


Fig. 6 Stress Strain curve for specimen number 8

شکل 6 منحنی تنش-کرنش پیش و پس از ترمیم برای نمونه شماره 8

جدول 5 مقادیر محاسبه شده چقرمگی و بازده ترمیم

Table 5 Ductility results and self healing efficiency

بازده ترمیم (%)	چقرمگی پس از ترمیم (MJ/m ³)	چقرمگی قبل از ترمیم (MJ/m ³)	نمونه
25.07	0.83	3.31	1
27.94	0.95	3.4	2
38.22	1.25	3.27	3
45.24	1.14	2.52	4
41.08	1.22	2.97	5
48.21	1.48	3.07	6
27.19	0.62	2.28	7
29.75	0.72	2.42	8
35.36	0.93	2.63	9

بر اساس شکل 8 با افزایش کسر حجمی سیم از 0.4 به 0.8، افزایش شدید در مقدار بازده ترمیم چقرمگی حاصل شد، اما افزایش بیشتر کسر حجمی به شدت باعث افت بازده گردید. عدم پیوستگی آلیاژ زمینه در مقاطع عرضی به علت نزدیک قرار گرفتن سیم آلیاژ حافظه‌دار در کنار هم می‌تواند عامل اصلی این افت ناگهانی در بازیابی چقرمگی پس از ترمیم باشد. البته افزایش نرخ اکسید شدن سطوح ترک در مجاورت هوا که در دمای بالای ترمیم در کوره به بیشترین مقدار خود می‌رسد نیز مساله ای است که روی ترمیم موثر قطعات اثر گذاشته و تردی ناحیه شکست را افزایش داد که این خود به معنی کاهش چقرمگی نمونه‌ها بود.

در خصوص پیش کرنش، طبق شکل 8 اعمال پیش کرنش موجب افزایش بازده ترمیم چقرمگی شده و افزایش آن از 2 درصد به 4 درصد به شدت باعث افزایش بازده شده است.

جدول 6 نتایج سیگنال به نویز چقرمگی

Table 6 Signal to noise results for toughness

سطح	کسر حجمی سیم (vol%)	پیش کرنش (%)	دمای ترمیم (°C)
1	29.52	29.93	30.37
2	33.02	30.22	31.00
3	29.71	32.09	30.87
اختلاف	3.50	2.17	0.63
رتبه بندی	1	2	3

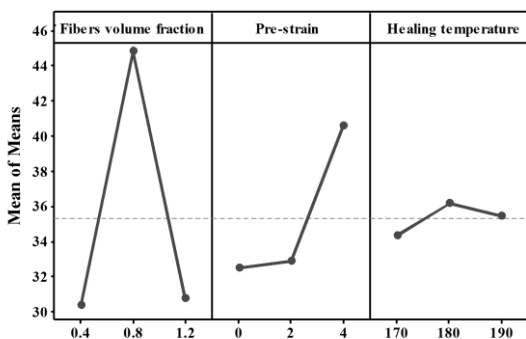


Fig. 8 Main effects of the chosen parameters on toughness healing efficiency

شکل 8 اثرات اصلی عوامل انتخابی بر بازده ترمیم چقرمگی افزایش دمای ترمیم، طبق شکل 8، از 170 به 180 سانتیگراد موجب افزایش بازده ترمیم شد، اما افزایش بیشتر آن تاثیر منفی داشت و کاهش بازده

در خصوص پیش کرنش اعمالی نیز مشاهده می‌شود افزایش پیش کرنش به صورتی نسبتاً یکنواخت باعث افزایش بازده ترمیم می‌شود. این مساله نیز تا حدی قابل پیش‌بینی بود، زیرا با افزایش پیش کرنش مقدار نیرویی که به سطوح ترک حین ترمیم وارد می‌شود بیشتر خواهد شد و شرایط بهتری برای نفوذ اتمی و اتصال بین سطوح ترک ایجاد می‌شود. بین سطوح انتخابی برای پیش کرنش، مقدار 4 درصد به عنوان پیش کرنشی که بیشترین بازده ترمیم را ایجاد می‌کند، انتخاب شد.

در نهایت اثر دمای ترمیم نیز بر اساس آنالیز سیگنال به نویز به این صورت است که دمای ترمیم 170 و 180 درجه سانتیگراد تاثیری نسبتاً مشابه دارند، اما با افزایش دمای ترمیم به 190 درجه سانتیگراد، جهش در بازده ترمیم روی می‌دهد. این امر ناشی از آن است که افزایش دما موجب افزایش کسر مذاب در زمینه می‌شود. افزایش مقدار مذاب در این دما باعث فراهم آمدن مقدار بیشتری عامل ترمیم کننده برای نمونه و همچنین افزایش سرعت نفوذ اتمی شده و لذا اتصال بهتری بین سطوح ترک ایجاد خواهد می‌شود.

اگر چه در میان نمونه‌های ساخته شده، نمونه‌ی 6 بیشترین میزان بازیابی استحکام نهایی کششی را کسب کرده است، اما نمونه‌های ساخته شده ترکیب تمامی حالات از سطوح مختلف پارامترهای اثرگذار را شامل نمی‌شود و دلیل استفاده از روش طراحی آزمایش همین امر است که با ساخت تعداد کمتری نمونه اثر پارامترهای ساخت و ترمیم به صورت کامل بررسی شود. به این منظور در روش تاگوچی با محاسبه میانگین بازده ترمیم از یک سطح خاص پارامتری مشخص و مقایسه آن با میانگین بازده از سطوح دیگر همان پارامتر، مقدار بهینه‌ی آن پارامتر برای ترمیم تعیین می‌گردد. لذا در مورد دمای ترمیم، دمای 180 درجه سانتیگراد با میانگین بازده ترمیم استحکام کششی نهایی 56.80 درصد کمترین میزان میانگین بازده و دمای 190 درجه سانتیگراد با میانگین بازده ترمیم 59.28 درصد بیشترین میزان بازده ترمیم در میان نمونه‌ها را کسب می‌کند.

2-4- چقرمگی

برای چقرمگی نیز مانند استحکام کششی نهایی از نتایج آزمون نمونه‌های قبل و بعد از ترمیم استفاده شده و با محاسبه مساحت سطح هر یک از نمودارهای تنش-کرنش، مقدار بازده ترمیم چقرمگی با استفاده از رابطه (5) بدست آمد. نتایج چقرمگی و بازده ترمیم آن برای نمونه‌های مختلف در جدول 5 آورده شده است.

مشاهده می‌شود در میان نمونه‌های ساخته شده، نمونه‌ی 6 با بازده ترمیم چقرمگی 48.21 درصد بیشترین میزان بازده و نمونه‌ی 1 با 25.07 درصد، کمترین میزان بازده ترمیم چقرمگی را دارا می‌باشد. البته این بدان معنی نیست که دمای ترمیم 170 درجه سانتیگراد، دمای بهینه ترمیم خواهد بود چرا که دمای ترمیم هر دو نمونه 170 درجه سانتیگراد بوده است. طبق روش تاگوچی جهت تعیین سطح بهینه دمای ترمیم باید میانگین بازده نمونه‌هایی که در یک سطح از دمای ترمیم قرار دارند محاسبه و سطحی که بیشترین میانگین را کسب کند، سطح بهینه معرفی شود.

نتایج جدول 5 در نرم افزار مینی تب وارد شده و تحت تحلیل به روش طراحی آزمایش تاگوچی بر اساس مدل بزرگتر-بهتر می‌شود. اثرات پارامترهای اصلی و نتایج سیگنال به نویز مطابق شکل 8 و جدول 6 به دست آمده است. نتایج تحلیل به روش تاگوچی نشان می‌دهد که کسر حجمی سیم بیشترین تاثیر را روی بازده ترمیم دارد.

- [5] Dry, C., "Procedures Developed for Self-Repair of Polymer Matrix Composite Materials", *Composite structures*, Vol. 35, No. 3, pp. 263-269, 1996.
- [6] Dry, C. M. Sottos, N. R., "Passive Smart Self-Repair in Polymer Matrix Composite Materials", in *Proceeding of, International Society for Optics and Photonics*, pp. 438-444.
- [7] Files, B. S., "Design of a Biomimetic Self-Healing Superalloy Composite", 1997.
- [8] Manuel, M. V., "Design of a Biomimetic Self-Healing Alloy Composite", 2007.
- [9] Manuel, M. V. Olson, G. B., "Biomimetic Self-Healing Metals", in *Proceeding of*, 18-20.
- [10] Lucci, J. M. Amano, R. Rohatgi, P. Schultz, B., "Self-Healing in an Aluminum Alloy Reinforced With Microtubes", in *Proceeding of, American Society of Mechanical Engineers*, pp. 79-88.
- [11] Lucci, J. M. Amano, R. Rohatgi, P. Schultz, B., "Experiment and Computational Analysis of Self-Healing in an Aluminum Alloy", in *Proceeding of, American Society of Mechanical Engineers*, pp. 1759-1768.
- [12] Laha, K. Kyono, J. Sasaki, T. Kishimoto, S. Shinya, N., "Improved Creep Strength and Creep Ductility of Type 347 Austenitic Stainless Steel Through the Self-Healing Effect of Boron for Creep Cavitation", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 36, No. 2, pp. 399-409, 2005.
- [13] Laha, K. Kyono, J. Shinya, N., "An Advanced Creep Cavitation Resistance Cu-containing 18Cr-12Ni-Nb Austenitic Stainless Steel", *Scripta materialia*, Vol. 56, No. 10, pp. 915-918, 2007.
- [14] Laha, K. Kyono, J. Shinya, N., "Some Chemical and Microstructural Factors Influencing Creep Cavitation Resistance of Austenitic Stainless Steels", *Philosophical Magazine*, Vol. 87, No. 17, pp. 2483-2505, 2007.
- [15] Shinya, N. Kyono, J. Laha, K., "Improvement of Creep Rupture Properties of Heat Resisting Steels by the Self-Healing of Creep Cavities", in *Proceeding of, Trans Tech Publ*, pp. 1107-1112.
- [16] Shinya, N. Kyono, J. Laha, K., "Self-Healing Effect of Boron Nitride Precipitation on Creep Cavitation in Austenitic Stainless Steel", *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 17, No. 12, pp. 1127-1133, 2006.
- [17] Zhu, P. Cui, Z. Kesler, M. S. Newman, J. A. Manuel, M. V. Wright, M. C. Brinson, L. C., "Characterization and Modeling of Three-Dimensional Self-Healing Shape Memory Alloy-Reinforced Metal-Matrix Composites", *Mechanics of Materials*, Vol. 103, pp. 1-10, 2016.
- [18] Ferguson, J. Schultz, B. Rohatgi, P., "Zinc Alloy ZA-8/Shape Memory Alloy Self-Healing Metal Matrix Composite", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 620, pp. 85-88, 2015.
- [19] Roy, R. K., "Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement", *John Wiley & Sons*, 20.
- [20] Roy, R. K., "A Primer on the Taguchi Method", *Society of Manufacturing Engineers*, 2010.
- [21] ASTM, E., *Standard test methods for tension testing of metallic materials*, Annual book of ASTM standards. ASTM, 2001.

را به همراه داشت. این امر از آن جا ناشی می شود که افزایش دما به نرخ اکسیداسیون سطوح ترک را افزایش می دهد و لذا لایه ای از ماده ای ترد حاوی اکسیدهای قلع و بیسموت سطح ترک را پوشانده و موجب کاهش چقرمگی در نمونه های پس از ترمیم در دمای 190 سانتیگراد می شود. این پدیده در ابتدا موجب عدم ترمیم نمونه ها و تنها بسته شدن پاره ای ترک ها می شد لذا جهت کاهش اثر اکسیداسیون سطوح ترک، نمونه ها درون یک کوره با اتمسفر آرگون تحت ترمیم قرار گرفتند.

با استفاده از کوره با اتمسفر آرگون تا حدی از اکسیداسیون شدید سطوح ترک جلوگیری می شود و ضمناً با در نظر گرفتن این نکته که افزایش دمای ترمیم به معنی افزایش ذوب پاره ای زمینه و در نتیجه افزایش مقدار عامل ترمیم کننده خواهد بود، مشاهده می شود که در دماهای بالاتر وجود مقادیر بیشتری از عامل ترمیم کننده اثر مثبتی روی بازده ترمیم داشته و با افزایش دما بازده ترمیم تا حدی افزایش یابد. بر این اساس کسر حجمی 0.8، بیش کرنش 4 درصد و دمای ترمیم 180 درجه سانتیگراد شرایط ایده آلی را جهت بازیابی چقرمگی ایجاد می کنند.

5- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، با ساخت نمونه های کشش از کامپوزیت زمینه فلزی قلع-بیسموت با سیم آلیاژ حافظه دار و تغییر پارامترهای کسر حجمی سیم، پیش کرنش و دمای ترمیم در سه سطح مختلف اثر هر یک از این پارامترها با به کارگیری روش طراحی آزمایش تاگوچی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. سیم سوپرالاستیک در سه کسر حجمی 0.4، 0.8 و 1.2 درصد در زمینه ای از آلیاژ قلع-بیسموت (شامل 13 درصد وزنی عنصر بیسموت)، جاگذاری شدند. به این سیم ها پیش کرنشی در سطوح 0، 2 و 4 درصد وارد شد و در دماهای ترمیم 170، 180 و 190 درجه سانتیگراد قرار گرفتند. نتایج تحلیل داده ها به روش تاگوچی حاکی از آن است که افزایش کسر حجمی از 0.4 به 0.8 باعث بهبود چشم گیری در بازده ترمیم می شود، اما افزایش بیشتر آن نه تنها اثر مثبتی ندارد، بلکه باعث کاهش بازده ترمیم می شود. افزایش پیش کرنش نیز باعث بهبود بازده می شود، اما سیم به دلیل محدودیت های ساختاری، تا هر میزان دلخواه قابلیت پیش کرنش دهی ندارد و همچنین افزایش بیش از حد پیش کرنش خود باعث ایجاد تنش های درونی در لایه اتصال سیم به زمینه شده و می تواند عامل از بین رفتن اتصال زمینه به سیم خصوصاً در دماهای بالا شود. لذا در اینجا پیش کرنش 4 درصد میزان بهینه پیش کرنش معرفی می شود. در نهایت هم افزایش دمای ترمیم تا جایی که باعث از بین رفتن ثبات ساختاری قطعات نشود، موجب بهبود بازده ترمیم قطعات شد و لذا دمای 190 درجه سانتیگراد بهترین دما در میان سه دمای انتخابی در این آزمایش است. در خصوص چقرمگی نیز کسر حجمی سیم 0.8، بیش کرنش 4 درصد و دمای ترمیم 180 درجه سانتیگراد موجب بازیابی بهینه ی چقرمگی شد.

6- مراجع

- [1] Ghosh, S. K., "Self-Healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications", *John Wiley & Sons*, 2009.
- [2] Fratzl, P. Weinkamer, R., "Hierarchical Structure and Repair of Bone: Deformation, Remodelling, Healing", in: *Self Healing Materials*, Eds., pp. 323-335: Springer, 2007.
- [3] Vermolen, F. van Rossum, M. W. Perez, E. J. Adam, J., "Modeling of Self Healing of Skin Tissue", in: *Self Healing Materials*, Eds., pp. 337-363: Springer, 2007.
- [4] Baker, A. Jones, R. Callinan, R., "Damage Tolerance of Graphite/Epoxy Composites", *Composite Structures*, Vol. 4, No. 1, pp. 15-44, 1985.

