



مطالعه عددی بسته شدن ترک با استفاده از ترکیب میکروکپسول خودترمیم و سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

محسن طاهری بروجنی¹، محمدجواد اشرفی^{2*}

1- دانشجوی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، mj_ashrafi@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان

آلیاژ حافظه‌دار،

ترک،

میکروکپسول،

خودترمیمی،

مواد خودترمیم به‌عنوان یکی از انواع مواد هوشمند در ترمیم و تعمیر وسایل و پیشگیری از خرابی و از کار افتادگی ابزارها، قابلیت استفاده دارند. روش‌های متعددی برای افزایش بازده و تکرارپذیر کردن فرایند خودترمیمی وجود دارد که یکی از آن روش‌ها، ترکیب میکروکپسول‌های خودترمیم با آلیاژهای حافظه‌دار است. هرچند تعدادی پژوهش آزمایشگاهی در این زمینه انجام شده اما به این روش آن چنان که باید توجه نشده است. در این پژوهش تلاش شده است تا با استفاده از روش شبیه‌سازی اجزای محدود، نحوه عملکرد این ترکیب ارزیابی شود. به این منظور از میکروکپسولی شیشه‌ای در زمینه بتن و آلیاژ حافظه‌دار از جنس نیکل-تیتانیوم استفاده شده است. پس از بررسی نتایج تأثیر سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر افزایش حداکثر تنش شکست، کاملاً مشهود بود. با افزودن دو سیم حافظه‌دار تنش شکست از 1.93 مگاپاسکال به 2.08 مگاپاسکال رسیده است. همچنین اثر مهم‌تر، بستن دهانه‌ی ترک می‌باشد، به نحوی که با استفاده از دو سیم حافظه‌دار، بازشدگی دهانه‌ی ترک از 5 میکرومتر به 0.008 میکرومتر رسیده است. سپس تأثیر شعاع سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و نسبت ضخامت و نسبت حجمی میکروکپسول بر تنش نهایی شکست و عملکرد خودترمیمی بررسی گردیده است. در انتها تأثیر استحکام لایه میانی بر شکست میکروکپسول و تنش نهایی شکست ارزیابی شده است.

A numerical study on crack closure using a combination of self-healing microcapsules and shape memory alloy wires

Mohsen Taheri-boroujeni¹, Mohammad Javad Ashrafi^{1*}

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, mj_ashrafi@iust.ac.ir

Keywords

Shape memory alloy
 Crack
 Microcapsule
 Self-healing

Abstract

Self-healing materials can be used as one of the types of smart materials in recovering and repairing equipment and preventing breakdown and fracture of tools. There are several ways to increase the efficiency and repeatability of the self-healing process, one of which is to combine self-healing microcapsules with shape memory alloys. Although several laboratory studies have been performed in this field, this method has not been given the attention it deserves. In this study, an attempt has been made to evaluate the performance of this compound using the finite element simulation method. For this purpose, glass microcapsule and Ni-Ti SMA within the concrete matrix was used. After examining the results, the effect of shape memory alloy wires on increasing the maximum fracture stress was quite obvious. By adding two shape memory wires, the fracture tension has increased from 1.93 MPa to 2.08 MPa. Also, the most important effect is to close the crack opening distance in such a way that using two shape memory wires, the distance of the crack opening has decreased from 5 μm to 0.008 μm . Then, the effect of radius of memory alloy wires and thickness ratio and volume fraction of microcapsules on ultimate fracture stress and self-healing performance was investigated. Finally, the effect of interface strength on microcapsule fracture and ultimate fracture stress is evaluated.

1- مقدمه

افزایش طول عمر و کاهش هزینه و افزایش کارایی آن‌ها مدنظر قرار گرفته است. کامپوزیت‌های تقویت شده با این الیاف در صنایع هوایی، شیمیایی و غیره کاربرد دارند. از این مواد می‌توان در مکان‌هایی که شناسایی تخریب و یا تعویض قطعه‌ی تخریب شده دشوار است، استفاده کرد [1-3].

یکی از مهم‌ترین عوامل خرابی وسایل، شکست آن‌ها است. پیش از این تنها راه حل، جایگزینی قطعه و یا تعمیر دستی آن بود اما چند سالی می‌شود که استفاده از مواد خودترمیم برای کاهش عوارض تخریب و شکست وسایل و همچنین

کیفیت و کارایی آن‌ها به وسیله‌ی ترکیب با سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار طراحی شده است. این پژوهش به صورت اجزای محدود سه بعدی و تحت مد اول خالص در نرم افزار آباکوس⁷ انجام گرفته است. به دلیل این که نمی توان اختلاط میکرو کپسول و کاتالیزور را متوجه شد، برای سادگی تنها از یک میکرو کپسول استفاده شده است. برای شکست قطعات در این پژوهش از ترکیب روش‌های المان محدود توسعه یافته⁸ و روش ناحیه‌ی چسبیده استفاده شده است. در بخش‌های بعدی در مورد مدل آلیاژ حافظه‌دار و میکرو کپسول مورد استفاده صحبت می‌شود و سپس مدل عددی و هندسه شرح داده شده سپس نتایج ارائه شده و در مورد نتایج بحث شده است.

2- معادلات ساختاری

در این بخش ابتدا مدل آلیاژ حافظه‌دار مورد استفاده معرفی می‌شود. سپس به قوانین حاکم بر ماده‌ی خودترمیم پرداخته شده است.

2-1- مدل آلیاژ حافظه‌دار

در این بخش مدل آلیاژ حافظه‌دار سوزا [24, 25] معرفی گردیده است. در این مدل کرنش (ϵ) و دما (T) متغیرهای کنترلی هستند و تانسور مرتبه دوم کرنش تغییر فاز (e^{tr}) به عنوان متغیر داخلی می‌باشد. به منظور به دست آوردن معادلات ساختاری، تابع انرژی آزاد هلمهولتز به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\psi(\epsilon, T, e^{tr}) = \frac{1}{2} K \theta^2 + G \|e - e^{tr}\|^2 + \beta \langle T - T_m \rangle \|e^{tr}\| + \frac{1}{2} h \|e^{tr}\|^2 + \varphi_{el}(e^{tr}) \quad (1)$$

در این رابطه θ کرنش حجمی، e کرنش اوجاجی، K مدول حجمی، G مدول برشی، β ضریب مادی که وابستگی تنش شروع تغییر فاز به دما را نشان می‌دهد، T_m دمای مرجع و h ضریب سخت شوندگی (شیب نمودار تنش-کرنش تغییر فاز در بارگذاری برشی) می‌باشد. همچنین عبارت داخل $\langle \rangle$ اگر مثبت باشد حاصل خود آن و اگر منفی باشد حاصل صفر می‌باشد. جمله اول و دوم در این تابع انرژی مربوط به انرژی الاستیک می‌باشد. همچنین جمله سوم مربوط به انرژی شیمیایی ناشی از تغییر فاز می‌باشد که بایستی با دما به طور صعودی افزایش یابد (تنش ماکسول) که در اینجا به صورت تابعی خطی از دما در نظر گرفته شده است. همچنین φ_{el} تابعی است که برای اشباع تغییر فاز به کار می‌رود و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\varphi_{el}(e^{tr}) = \begin{cases} 0 & \text{if } \|e^{tr}\| \leq \epsilon_l \\ +\infty & \text{if } \|e^{tr}\| > \epsilon_l \end{cases} \quad (2)$$

این قید به این معنی است که سطح انرژی حالت $\|e^{tr}\| > \epsilon_l$ بی‌نهایت بوده و بنابراین رسیدن به آن غیر ممکن است. در این رابطه ϵ_l کرنش تغییر فاز ماکزیمم در بارگذاری برشی خالص می‌باشد. بر اساس روش استاندارد معادلات ساختاری با مشتق گیری از تابع انرژی ψ به دست می‌آیند:

$$P = \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = K \theta \quad (3)$$

$$S = \frac{\partial \psi}{\partial e} = 2G(e - e^{tr}) \quad (4)$$

استفاده از میکرو کپسول‌ها یکی از روش‌های اولیه در این زمینه بود که در سال 2001 توسط وایت ارائه شد [4]. طی سال‌های بعد این روش توسط وایت و دیگر محققان گسترش پیدا کرد. همچنین روش‌های دیگری از جمله روش خودترمیمی با آوندها و روش خودترمیمی ریز عروقی با الهام از ساختار جانداران توسط وایت و دیگر محققین از جمله توهی و براون ارائه و توسعه داده شد. [5-7]

مکانیزم اثر میکرو کپسول‌ها این گونه است که با رشد ترک در طول زمینه و رسیدن ترک به میکرو کپسول، تمرکز تنش در نوک ترک ایجاد می‌شود و میکرو کپسول می‌شکند. سپس مواد ترمیم کننده‌ی داخل کپسول به درون ترک نشت پیدا می‌کنند و ترک را ترمیم می‌کنند. اما اگر ترک به جای شکستن کپسول آن را دور بزند فرایند خودترمیمی به درستی انجام نمی‌گیرد [8].

شکسته شدن میکرو کپسول تا حد زیادی وابسته به خواص لایه‌ی میانی¹ است که بین زمینه و میکرو کپسول قرار دارد. در مدل سازی ضخامت لایه‌ی میانی را صفر در نظر می‌گیرند و برای آن از روش ناحیه‌ی چسبناک² استفاده می‌کنند. اگر لایه‌ی میانی نتواند بارگذاری را به درستی از زمینه به میکرو کپسول منتقل کند، فقط یک ترک در لایه‌ی میانی ایجاد می‌شود و میکرو کپسول از زمینه جدا می‌گردد.³ گیلبرت و همکاران در تعدادی مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیرات وجود میکرو کپسول‌ها در بتن، از جمله تأثیر بر استحکام و همچنین تأثیر تعداد و تمرکز میکرو کپسول‌ها را بررسی کردند [9-12]. همچنین در تعدادی شیشه سازی اجزای محدود نیز تأثیر ضخامت به شعاع میکرو کپسول، نسبت حجمی میکرو کپسول به زمینه و تأثیر خواص لایه‌ی میانی بر شکست یا جدایش میکرو کپسول و نیز بار نهایی شکست زمینه توسط آن‌ها بررسی شده است [8, 13-15]. همچنین گائو و همکاران در یک مدل سازی، شکست زمینه حاوی تعدادی میکرو کپسول با قطر و نسبت حجمی متفاوت را بررسی کردند و میزان اثر گذاری عامل ترمیمی را به دست آوردند [16].

ماده‌ی ترمیم کننده‌ی مورد استفاده در این روش غالباً دی سیکلوپنتادین⁴ است. همچنین جنس پوسته‌ی کپسول‌ها از ماده‌ی اوره فرمالهید⁵ می‌باشد. در اکثر مواقع برای افزایش کارایی و کاهش زمان ترمیم در کنار میکرو کپسول‌ها از کاتالیزور جامد گرابز⁶ به صورت پودر استفاده می‌شود [2].

آلیاژهای حافظه‌دار نیز به علت دارا بودن خواص برگشت پذیری و همچنین به عنوان عاملی برای کنار هم نگاه داشتن اجزاء پس از شکست، می‌توانند در جهت خودترمیمی مؤثر واقع شوند. در برخی مطالعات از آلیاژهای حافظه‌دار به تنهایی برای خودترمیمی مواد به وسیله‌ی جلوگیری از رشد ترک و بستن دهانه‌ی ترک بهره برده شده است از جمله، مدل سازی اجزای محدود توسط بورتون و همکاران [17] که به بررسی اثر وجود سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در یک مدل و تأثیر آن بر تنش و بسته شدن دهانه‌ی ترک می‌پردازد و نیز مدل سازی ژو و همکاران [18] که در مدلی سه بعدی از آلیاژ حافظه‌دار به منظور خودترمیمی بهره برده‌اند [19, 20]. همچنین تحقیقاتی به صورت تجربی در زمینه‌ی ترکیب سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و مواد خودترمیم از جمله مواد خودترمیم ذاتی مانند پلیمرهای خودترمیم و مواد خودترمیم غیر ذاتی مانند میکرو کپسول‌ها انجام گرفته است [21-23].

از آن جایی که در آزمون‌های آزمایشگاهی تشخیص شکسته شدن کپسول و همچنین به موقع بودن شکست و کارایی صحیح عامل ترمیمی ممکن نیست، این پژوهش برای درک بهتر کارکرد و فهم مکانیزم اثر میکرو کپسول‌ها و ارتقای

5 Urea-formaldehyde
6 Grubbs
7 Abaqus
8 XFEM

1 Interface
2 Cohesive Zone Method (CZM)
3 Debonding
4 Dicyclopentadine (DCPD)

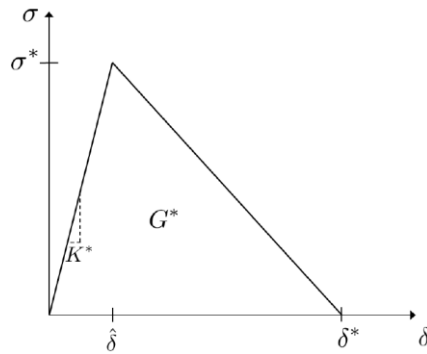


Fig. 1 Traction-Separation Law [10]

شکل 1 قانون کشش-جدایش [10]

3- هندسه مدل و مش بندی

1-1- تحقیقات آزمایشگاهی

برای انتخاب ابعاد و خواص نمونه، ابتدا موارد آزمایشگاهی بررسی گردیده و سپس خواص مرسوم مورد استفاده قرار گرفت. نسبت حجمی میکروکپسول به زمینه در حالت آزمایشگاهی در موارد مختلف از 0.5% تا 27% متغیر است. در حالت عملی برای تغییر این نسبت، تعداد میکروکپسول‌ها تغییر داده می‌شود، اما در حالت شبیه‌سازی این فرایند با افزایش یا کاهش قطر میکروکپسول و نیز با افزایش و کاهش اندازه‌های زمینه صورت می‌پذیرد. قطر میکروکپسول‌ها در موارد آزمایشگاهی بسته به نوع آن‌ها از 25 میکرومتر تا 500 میکرومتر یا در مواردی از 1.1 تا 7.2 میلی‌متر و در موارد دیگر از 1.7 تا 2.3 میلی‌متر متغیر می‌باشد. هر چند شبیه‌سازی یک میکروکپسول منفرد در زمینه با واقعیت تفاوت دارد اما نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی‌ها با نتایج عملی شباهت فراوانی دارد [7, 13, 16, 28].

در تعدادی از آزمایش‌ها، از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار به منظور مقاوم‌سازی و نیز ترمیم ماده استفاده شده است. همچنین آزمایش‌هایی از ترکیب سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار با میکروکپسول‌های خودترمیم برای بهبود عملکرد مواد استفاده شده است. که در بعضی از آن‌ها ماده تحت خمش سه‌نقطه قرار گرفته و در برخی دیگر ماده تحت تنش کششی تک‌محوره می‌باشد. نتایج بیانگر تأثیر مثبت این فرایند بر رفتار ماده هنگام شکست و در زمان بهبود است. نوع آلیاژ استفاده شده نیکل-تیتانیوم، نیکل-تیتانیوم-مس، قطر استفاده شده بازه تغییرات زیادی دارد [20, 21, 23]، برای مثال در مقاله‌ای از حسن و همکاران [19] 5 سیم با قطر 252 میکرومتر برای خودترمیمی مدلی مستطیلی با ابعاد 5 میلی‌متر در 6 میلی‌متر استفاده شده یا در مقاله‌ای کیرکی و همکاران [22] از سیم‌هایی با قطر 150 میکرومتر استفاده کردند در حالی که ژو [18] از سیم‌هایی با قطر 870 میکرومتر استفاده کرد و گابریل و همکاران [29] در مقاله‌ای از سیم با قطر 2 میلی‌متر بهره بردند. نسبت حجمی سیم‌ها نیز از کمتر از 0.1% تا 12% متغیر است. دمای گرم کردن هم بسته به جنس آلیاژ تا 180 °C می‌رسد.

2-3- مدل مورد بررسی

نمونه مورد نظر یک زمینه مکعبی از جنس بتن با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ میلی‌متر می‌باشد. در مرکز این زمینه یک حفره با شعاع 500 میکرومتری وجود دارد که محل قرارگیری میکروکپسول شیشه‌ای به ضخامت 100 میکرومتر است. به منظور افزایش استحکام ماده و همچنین بالا بردن بازه خودترمیمی، تعدادی سیم آلیاژ حافظه‌دار به شعاع 200 میکرومتر و طول 9 میلی‌متر به نمونه افزوده

$$X = -\frac{\partial \Psi}{\partial e^{tr}} = s - \left[(\beta(T - T_m)) + h \|e^{tr}\| + \frac{\partial \varphi_{el}(e^{tr})}{\partial \|e^{tr}\|} \right] \frac{\partial \|e^{tr}\|}{\partial e^{tr}} \quad (5)$$

و با معرفی قانون نمو کرنش تغییر فاز، مدل آلیاژ حافظه‌دار تکمیل می‌گردد.

$$\dot{e}^{tr} = \xi \frac{\partial F(X)}{\partial \sigma} \quad (6)$$

F نقش تابع حد یا تسلیم و ξ نقش ضریب سازگاری تغییر فاز را دارد. در این مدل تابع حد F به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$F(X) = \|X\| - R \quad (7)$$

در این رابطه R شعاع سطح تغییر فاز می‌باشد. این مدل و الگوریتم عددی آن در زیر برنامه یومت¹ در نرم‌افزار آباکوس پیاده سازی شده [26] که می‌توان اثر آلیاژ حافظه‌دار را در سازه‌های متنوع بررسی نمود.

2-2- قوانین حاکم بر مواد خودترمیم

برهم‌کنش بین سطح خارجی کپسول و سطح داخلی زمینه متکی بر نوعی رفتار چسبندگی سطح‌محور است که تابع قانون کشش-جدایش است. شماتیک این قانون در شکل 1 نشان داده شده است. قانونی که بر لایه میانی حاکم است، شامل یک مدل ناحیه چسبناک دو خطی است که بیان تحلیلی آن توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = \begin{cases} K^* \delta & \text{if } 0 \leq \delta \leq \delta \\ \sigma^* \left(\frac{\delta^* - \delta}{\delta^* - \delta} \right) & \text{if } \delta \leq \delta \leq \delta^* \\ 0 & \text{if } \delta \geq \delta^* \end{cases} \quad (8)$$

که σ^* حداکثر استحکام اتصال، δ فاصله‌ی بین سطوح در مقدار اوج کشش و K^* نماد سفتی لایه میانی است. چقرمگی شکست اتصال نیز از سطح زیر نمودار محاسبه می‌شود، که در این حالت برابر است با $G^* = \frac{1}{2} \sigma^* \delta^*$ و نشان دهنده‌ی کل انرژی تلف شده هنگام جدایش کامل دو سطحی است که در ابتدا به هم پیوسته بوده‌اند. σ^* و δ^* و G^* از لحاظ فیزیکی و آزمایشگاهی معنای واضحی دارند اما پارامتر K^* (که به عنوان سفتی پنالته² نیز شناخته می‌شود) برای لایه میانی با ضخامت صفر، تفسیر و مفهوم تجربی ملموسی ندارد. نرم‌افزار آباکوس K^* را به عنوان تابعی از سفتی دو ماده‌ی مجاور محاسبه می‌کند و هم‌زمان از تأثیر سفتی لایه‌ی میانی³ بر سفتی کلی زمینه -کپسول نیز جلوگیری می‌کند.

برای سادگی، یک فرمول غیر زوج انتخاب شده است. این قانون در هر دو جهت عمودی و مماسی تماس، به‌طور مستقل اعمال می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود که هنگام به‌وجود آمدن یک جدایش عمودی خالص بین دو نقطه در حال برهم‌کنش⁴، هیچ نیروی چسبندگی در جهت مماسی رخ ندهد. به همین ترتیب، یک جابجایی مماسی خالص هیچ نیروی چسبندگی در جهت عمودی ایجاد نمی‌کند [15].

با اعمال دما به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، مقداری انتقال گرما به میکروکپسول و زمینه نیز، صورت می‌گیرد، که می‌تواند موجب ایجاد تغییراتی در خواص آن‌ها شود [27]. اما به منظور سادگی و پرهیز از خطاها و عدم قطعیت‌های احتمالی از تأثیر دما بر خواص میکروکپسول و زمینه، مشابه برخی دیگر از تحقیقات از جمله [17] صرف‌نظر شده است.

3 Interface
4 Interaction

1 UMAT
2 Penalty

جدول 2 خواص آلیاژ حافظه‌دار [17]

Table 2 Shape memory alloy properties [17]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
11.2	β (MPa/°C)	67	E (GPa)
0.082	ϵ_l	82	R (MPa)
33	T_m (°C)	0.3	ν (-)
		863	h (MPa)

4- صحت سنجی

4-1- صحت سنجی میکروکپسول

برای صحت سنجی نمونه با نتایج به دست آمده از مقاله‌ی گیلبرت و همکاران [13] که در مورد استفاده از میکروکپسول در پلیمر می‌باشد، مقایسه شده است. در این مدل‌سازی، زمینه یک مکعب توخالی از جنس رزین اپوکسی و میکروکپسول از جنس اوره فرمالدهید می‌باشد. خواص مواد و شماتیک مدل به ترتیب در جدول 3 و شکل 3 آورده شده‌اند. در این مقاله برای شبیه‌سازی رشد ترک و شکست از روش المان محدود توسعه یافته استفاده شده است. همچنین برای اتصال دو سطح میکروکپسول و زمینه از چسبندگی طبق قانون کشش-جدایش استفاده شده است. مدل در قسمت پایینی در جهت X و Y مقید شده است. به سطح بالایی نمونه یک جابجایی عمودی به‌طور شبه استاتیکی و تابع زمان در نقطه مرجع⁵ وارد می‌شود. مقدار این جابجایی 0.1٪ طول ضلع مکعب می‌باشد. در این مدل‌سازی، مش دارای ساختار خطی 8 گره (C3D8) مورد استفاده قرار گرفته است. مدت زمان حل برای یک نمونه با دو سیم 200 میکرومتری و میکروکپسول 500 میکرومتری 335 دقیقه می‌باشد. سیستم مورد استفاده Intel Core i7-5500U CPU، RAM 8 GB است.

نمودارهای تنش-کرنش برای نسبت ضخامت به شعاع 0.055 در دو حالت با استحکام چسبندگی 5 مگاپاسکال در شکل 4 و 2 مگاپاسکال در شکل 5 نشان داده شده است، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج مقاله مقایسه شد و مطابقت خوبی مشاهده گردید.

جدول 3 خواص میکروکپسول و زمینه برای صحت سنجی [13]

Table 3 Microcapsule and matrix properties for verification [13]

G^* (J/m ²)	σ^* (MPa)	ν	E (GPa)	
88	39	0.38	3.4	زمینه
100	55	0.33	3.7	کپسول
1	2,5	-	-	لایه میانی

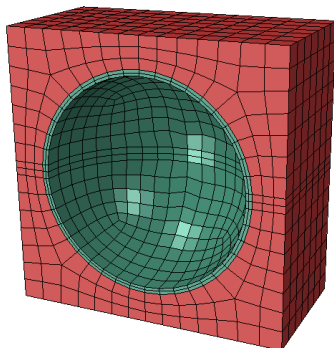


Fig. 3 A validation model based on the finite element method

شکل 3 مدل اجزاء محدود جهت صحت سنجی

شده است. تعداد این سیم‌ها 2 یا 4 می‌باشد. همان‌طور که در شکل 2 قابل مشاهده است به علت وجود تقارن و برای سادگی نصف نمونه مدل‌سازی شده است. نسبت حجمی کپسول در این مدل‌سازی از 0.01٪ تا 1.45٪ است. نسبت حجمی سیم‌ها نیز از 0.13٪ تا 0.7٪ حجم مدل است.

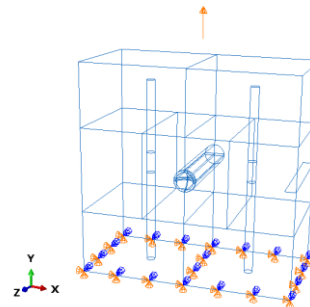


Fig. 2 The schematic of a 4 wire 1/2 symmetric model

شکل 2 شماتیک مدل‌سازی شده 4 سیم برای حالت مدل متقارن 1/2

ابتدا سطح بالایی مکعب تحت جابجایی 5 میکرومتری در جهت Y قرار دارد. سطح پایینی در جهت X و Y مقید شده است. از آنجایی که نصف نمونه مدل‌سازی شده است، یک شرط مرزی متقارن نیز برای سطوح میانی مدل، ایجاد می‌شود. به منظور سادگی در ابتدا یک ترک به اندازه‌ی 500 میکرومتر در وسط زمینه ایجاد شده است. همچنین میدان دمایی که به عنوان شرط مرزی اولیه به سیم‌ها داده شده است در ابتدا 27°C می‌باشد.

از المان سه‌بعدی 8 گره‌ای (C3D8) در مش بندی زمینه، میکروکپسول و سیم‌ها استفاده شده است. اندازه‌ی مش به‌طور متوسط در زمینه 150 میکرومتر، در میکروکپسول 70 میکرومتر و در سیم‌ها 250 میکرومتر است. لایه میانی بین میکروکپسول و زمینه نیز با استفاده از تماس با رفتار چسبناک¹ و خرابی² تعریف می‌گردد و به این دلیل که در شبیه‌سازی هیچ ضخامتی ندارد، مش بندی نمی‌شود. سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار با استفاده از روش ناحیه جاگذاری³ در زمینه مقید می‌شوند. همچنین در فصل مشترک اجزاء با یکدیگر سعی شده با پارتیشن بندی، مش بندی منظم و ریزتری ایجاد شود. بر این اساس تعداد المان‌ها بر اساس تعداد و اندازه سیم‌ها و اندازه و ضخامت میکروکپسول تغییر می‌کند. به عنوان مثال برای نمونه با یک سیم 200 میکرومتری و میکروکپسول 500 میکرومتری، تعداد المان زمینه، 120 المان سیم و 348 المان میکروکپسول ایجاد شده است. خواص مواد مورد استفاده در مقاله در جدول‌های 1 و 2 آورده شده‌اند.

شبیه‌سازی در سه مرحله⁴ 1 ثانیه‌ای انجام می‌گیرد. مرحله‌ی اول اعمال جابجایی، در دمای 27°C تا 5 میکرومتر به سطح بالایی مدل، مرحله‌ی دوم باربرداری و مرحله‌ی سوم دادن گرما تا دمای 90°C به سیم‌ها و شروع فرایند بازگشت پذیری می‌باشد.

جدول 1 خواص میکروکپسول شیشه‌ای و زمینه بتنی [8]

Table 1 Glass microcapsule and concrete matrix properties [8]

G^* (J/m ²)	σ^* (MPa)	ν	E (GPa)	
12	2	0.21	40	زمینه
7	40	0.21	70	کپسول
8,100	1,40	-	-	لایه میانی

⁴ Step

⁵ Reference point

¹ Cohesive behavior

² Damage

³ Embedded region

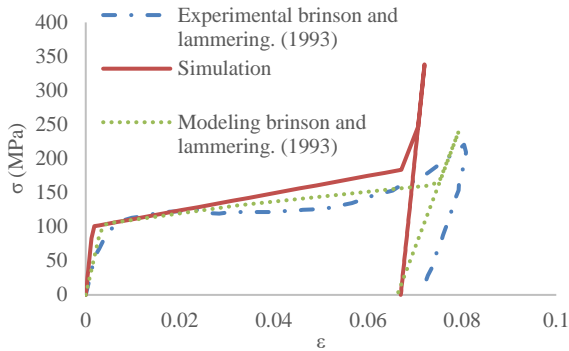


Fig. 6 SMA behavior simulation results in comparison with Brinson and Lammering, (1993) in -10°C temperature

شکل 6 مقایسه شبیه‌سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار با نتایج مقاله برینسون و لامرینگ در دمای -10°C

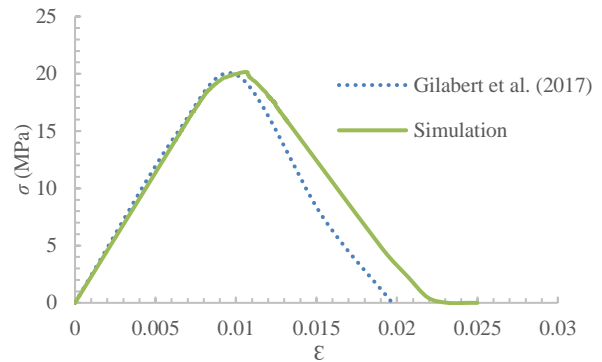


Fig. 4 Simulation results in comparison with Gilabert et al. (2017) using 5 MPa as the interface strength

شکل 4 مقایسه شبیه‌سازی با نتایج مقاله گیلبرت و همکاران در حالت استفاده از چسب با استحکام لایه میانی 5 مگاپاسکال

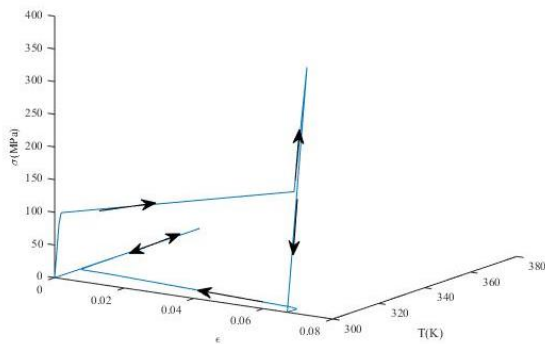


Fig. 7 Stress-strain-temperature curve of SMA under induced of temperature and stress cycle

شکل 7 منحنی تنش-کرنش-دما آلیاژ حافظه‌دار تحت چرخه اعمال دما و تنش

5- نتایج و بحث

1-5- تأثیر وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار

در ابتدا تأثیر وجود و عدم وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار بر تنش نهایی شکست بررسی شده است (شکل 8). در تمام این حالات شعاع میکروکپسول 500 میکرومتر و شعاع سیم 200 میکرومتر است. از نتایج پیداست که افزودن سیم به نمونه تحت کشش باعث بالا رفتن تنش نهایی آن می‌شود. مشخصاً با افزودن یک سیم افزایش 4٪ و با دو سیم افزایش 8٪ تنش نهایی شکست را شاهد هستیم. روهاتگی در مقاله‌ای آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سیم حافظه‌دار را بررسی کرده و تأثیری مشابه نتایج شبیه‌سازی حاضر در شکل 8 دیده است [31]. همچنین بونیل و همکاران نیز با افزودن سیم به نمونه‌ای افزایش 7٪ تنش نهایی شکست را مشاهده کردند.



Fig.8 The effect of SMA on ultimate fracture stress

شکل 8 تأثیر سیم آلیاژ حافظه‌دار بر تنش نهایی شکست مدل

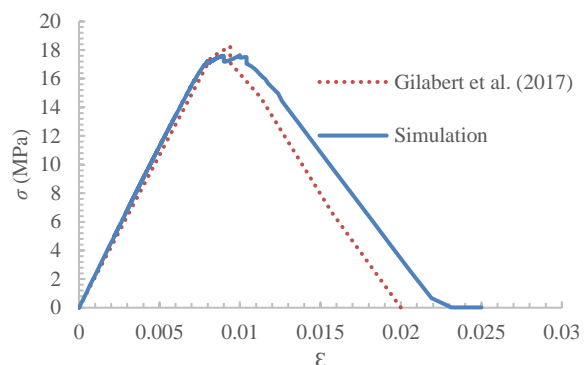


Fig. 5 Simulation results in comparison with Gilabert et al. (2017) using 2 MPa as the interface strength

شکل 5 مقایسه شبیه‌سازی با نتایج مقاله گیلبرت و همکاران در حالت استفاده از چسب با استحکام لایه میانی 2 مگاپاسکال

2-4- صحت سنجی آلیاژ حافظه‌دار

به منظور صحت سنجی رفتار آلیاژ حافظه‌دار، از نتایج مقاله‌ی برینسون و لامرینگ [30] استفاده شد. در این مقاله، رفتار تنش-کرنش آلیاژ حافظه‌دار، با خواص مشابه جدول 2 در دماهای مختلف، به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی بررسی شده است. به این منظور، یک المان حجمی نماینده، به طور مکعبی شبیه‌سازی شد و نتایج به دست آمده با نتایج این مقاله مقایسه گردید. مش بندی مورد استفاده برای المان حجمی نماینده، از نوع C3D8 می‌باشد. همچنین دمای آلیاژ حافظه‌دار، در مرحله بارگذاری و باربرداری ثابت، و برابر با -10°C می‌باشد. پس از بررسی انجام گرفته، مطابقت خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی، با داده‌های مقاله برینسون و لامرینگ مشاهده شد. نمودار این مقایسه در شکل 6 قابل مشاهده است.

در ادامه برای مشاهده‌ی رفتار آلیاژ حافظه‌دار، در چرخه‌ی دمایی مورد بررسی، نمودار تنش-کرنش-دما، برای یک المان حجمی نماینده مکعبی رسم شد. منحنی رسم شده، در شکل 7 آورده شده است. در این چرخه، ابتدا با بارگذاری و افزایش تنش در دمای ثابت، کرنش نمونه افزایش می‌یابد. سپس با باربرداری در دمای ثابت، تنش به مقدار صفر، کاهش پیدا می‌کند. در مرحله‌ی سوم، در تنش ثابت صفر، با افزایش دما، کرنش نیز به مقدار صفر کاهش می‌یابد و در مرحله‌ی آخر، دما در تنش و کرنش ثابت به مقدار اولیه خود کاهش می‌یابد.

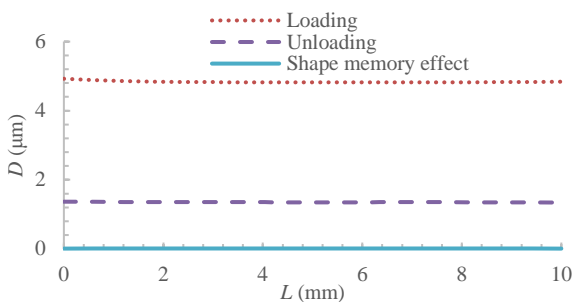


Fig. 10 Crack opening distance at the end of each step for two wires
 شکل 10 بازشدگی ترک در انتهای هر مرحله برای دو سیم

کانتور جابجایی محوری برای حالت یک سیم حین رشد ترک، پس از بارگذاری و پس از اثر حافظه‌داری سیم در شکل‌های 11a تا 11e نشان داده شده است. مطابق شکل 11a واضح است که در ناحیه‌ای که ترک رشد می‌کند، جابجایی محوری بیشتری اتفاق می‌افتد. همچنین مطابق شکل 11b پس از رشد کامل ترک و شکسته شدن زمینه و کپسول در انتهای وضعیت بارگذاری، جابجایی محوری یکنواختی مشاهده می‌شود. در شکل 11c پیوستگی جابجایی در سیم قابل مشاهده است. طبق شکل 11d این جابجایی محوری در نیمه بالایی زمینه، پس از اعمال دما و فعال شدن اثر حافظه‌داری سیم، به طور یکنواختی به سمت صفر میل می‌کند. در شکل 11e نیز می‌توان مقدار جابجایی نهایی سیم و تغییرات پیوسته آن، در قسمت میانی را مشاهده نمود.

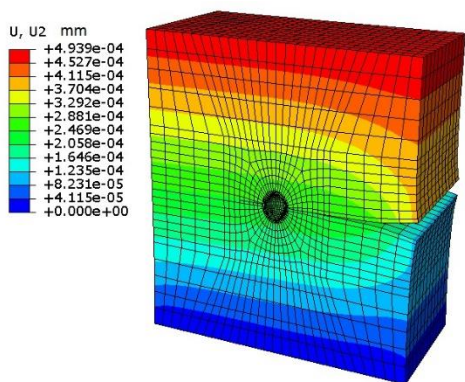


Fig. 11a Axial displacement contour for a model with 1 wire and a radius of 0.5 mm

شکل 11a کانتور جابجایی محوری برای نمونه با یک سیم و شعاع کپسول 0.5 mm حین رشد ترک

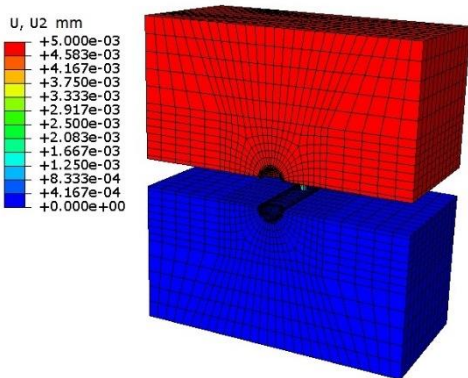


Fig. 11b Axial displacement contour for a model with 1 wire and a radius of 0.5 mm after loading

شکل 11b کانتور جابجایی محوری برای نمونه با یک سیم و شعاع کپسول 0.5 mm پس از بارگذاری

سیم آلیاژ حافظه‌دار در فرایند بازگشت‌پذیری از خود عملکرد بسیار خوبی نشان داد. همانطور که در شکل 9b مشاهده می‌شود، با افزودن تنها یک سیم به نمونه، می‌توان بازشدگی ترک را از 5 میکرومتر به 0.02 میکرومتر رساند. این پارامتر برای دو سیم به 0.008 میکرومتر می‌رسد. تأثیر تعداد سیم‌ها بر بسته شدن ترک پس از باربرداری و پس از فعال شدن اثر حافظه‌داری به ترتیب در شکل‌های 9a و 9b نشان داده شده‌اند.

و نیز مقایسه بین بازشدگی ترک در وضعیت‌های مختلف برای دو سیم حافظه‌دار در شکل 10 نشان داده شده است، اثرگذاری سیم بر بسته شدن ترک در این شکل کاملاً مشهود است، به طوری که دهانه‌ی ترک که در ابتدا 5 میکرومتر باز شده بود پس از باربرداری به نزدیک 1.5 میکرومتر می‌رسد و با فعال شدن خاصیت بازگشت‌پذیری آلیاژ حافظه‌دار، به کمتر از 0.01 میکرومتر می‌رسد. میزان بسته شدن ترک برای یک سیم 99.6% و برای دو سیم 99.8% است در مقاله‌ای آزمایشگاهی از ژو و همکاران [18] نیز با بهره‌گیری از سیم آلیاژ حافظه‌دار و بررسی با حالت بدون سیم دیده شد که بازشدگی ترک 60% کاهش یافته و در مقاله‌ای آزمایشگاهی از بونیلا و همکاران [23] برای حالت بی‌سیم و سیم‌دار بررسی انجام شده و وقتی از سیم استفاده شده، بازشدگی ترک 74% کاهش یافته است. همچنین آقامیرزاده و همکاران نیز در تحقیقی آزمایشگاهی نتیجه همسو ارائه داده است [32]. دلیل اختلافی که بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج این شبیه‌سازی در مقدار بسته شدن ترک وجود دارد این است که در این شبیه‌سازی لایه‌ی چسبی که پس از شکست از کپسول خارج می‌شود در نظر گرفته نشده است. در واقعیت این چسب پس از خروج از کپسول، در شکاف ترک قرار می‌گیرد و بسته شدن ترک را تا حدی محدود می‌کند.

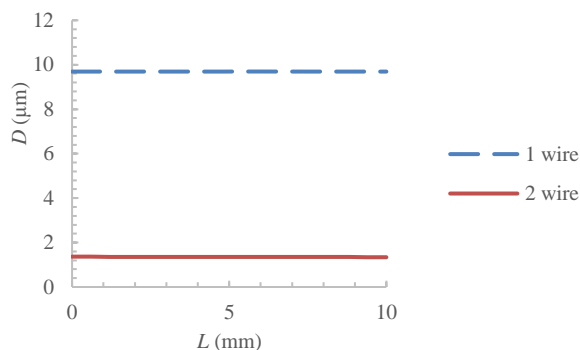


Fig. 9a Crack opening distance after unloading

شکل 9a بازشدگی ترک بعد از باربرداری

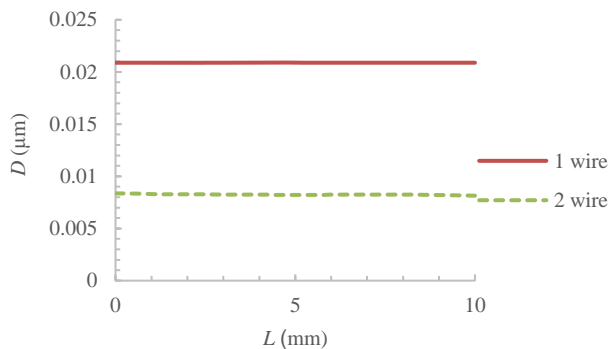


Fig. 9b Crack opening distance at the end of shape memory recovery

شکل 9b بازشدگی ترک در انتهای حالت حافظه‌داری

2-5- تأثیر قطر سیم‌ها

پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است، تأثیر شعاع سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر عملکرد خودترمیمی می‌باشد. در ابتدا تأثیر این پارامتر بر تنش نهایی شکست، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همانطور که در شکل 12 قابل مشاهده است، با افزایش شعاع سیم‌ها، تنش نهایی شکست نیز افزایش می‌یابد.

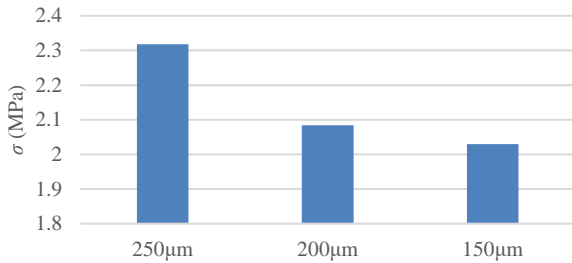


Fig. 12 Ultimate fracture stress in the model with different wire radius
شکل 12 تنش نهایی شکست در نمونه با سیم‌های با شعاع متفاوت

در ادامه تأثیر شعاع سیم‌ها بر روند کلی تنش در جهت اعمال کشش در زمینه و سیم‌ها نیز بررسی شده و نتایج، نشان دهنده آن است که با افزایش این پارامتر، تنش‌ها به‌طور کلی هم در زمینه و هم در سیم‌ها افزایش می‌یابند (شکل 13a و شکل 13b).

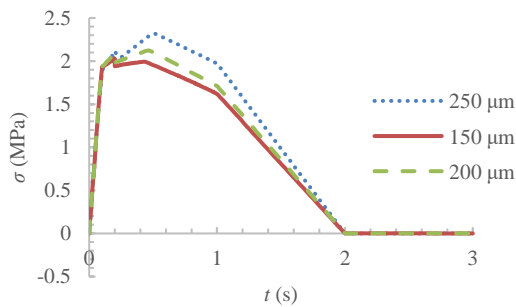


Fig. 13a Stress in the direction of applying tension in the matrix due to the radius of the wires

شکل 13a تنش در راستای اعمال کشش در زمینه تحت اثر شعاع سیم‌ها

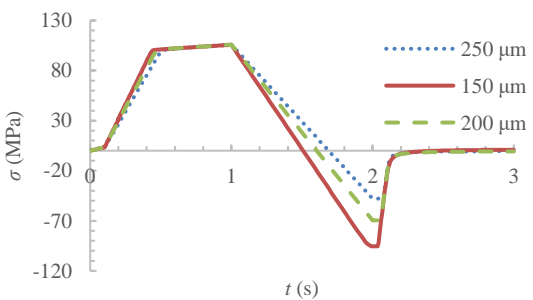


Fig. 13b Stress in the direction of applying tension in the wires under the effect of the radius of the wires

شکل 13b تنش در راستای اعمال کشش در سیم‌ها تحت اثر شعاع سیم‌ها

برای بررسی تأثیر تغییر شعاع سیم‌ها بر بسته شدن ترک، در شکل‌های 14a و 14b بازشدگی ترک به ترتیب در حالت باربرداری و پس از فعال شدن اثر حافظه‌داری نشان داده شده است. از نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که سیم 200 میکرومتری در هر دو حالت عملکرد خوبی دارد اما سیم با شعاع 150 میکرومتر نمی‌تواند به درستی اثر حافظه‌داری را اعمال کند و همچنین

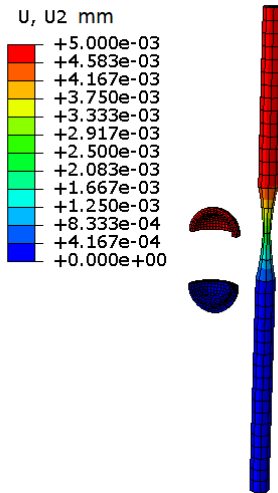


Fig. 11c Axial displacement contour of wire and a 0.5 mm capsule after loading

شکل 11c کانتور جابجایی محوری سیم و کپسول 0.5 mm پس از بارگذاری

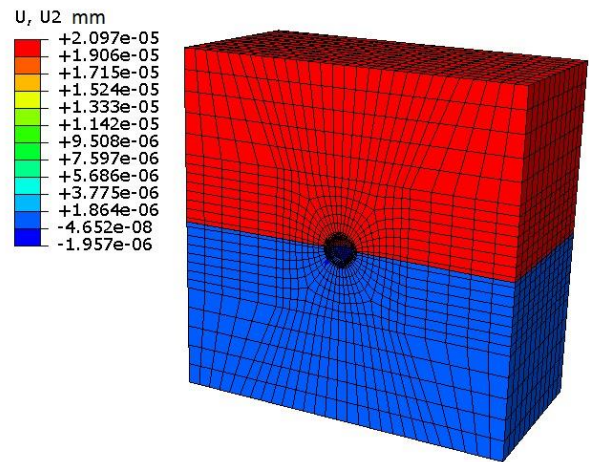


Fig. 11d Axial displacement contour for a model with 1 wire and a radius of 0.5 mm after shape memory effect

شکل 11d کانتور جابجایی محوری برای نمونه با یک سیم و شعاع کپسول 0.5 mm پس از اثر حافظه‌داری

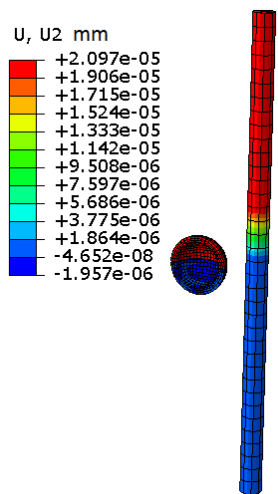


Fig. 11e Axial displacement contour of wire and a 0.5 mm capsule after shape memory effect

شکل 11e کانتور جابجایی محوری سیم و کپسول 0.5 mm پس از اثر حافظه‌داری

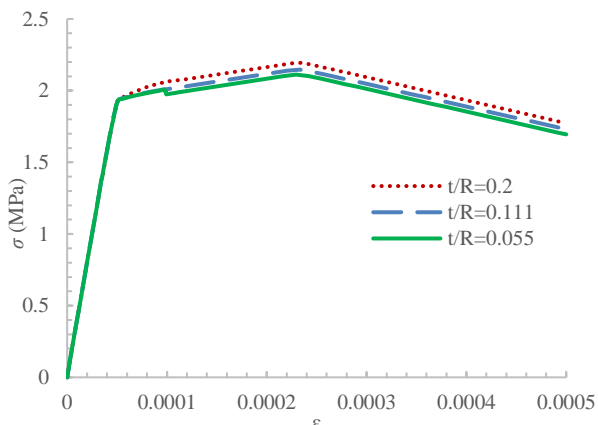


Fig. 15a The effect of capsule thickness ratio on the stress-strain diagram for a two-wire sample

شکل 15a تأثیر نسبت ضخامت کپسول بر نمودار تنش-کرنش در نمونه با دو سیم

همچنین دیگر عاملی که با تغییر نسبت ضخامت مورد ارزیابی قرار گرفت، تنش نهایی شکست زمینه بود. نتایج به دست آمده از این بررسی برای حالت دارای سیم و بدون سیم به ترتیب در شکل‌های 16a و 16b آورده شده‌اند.

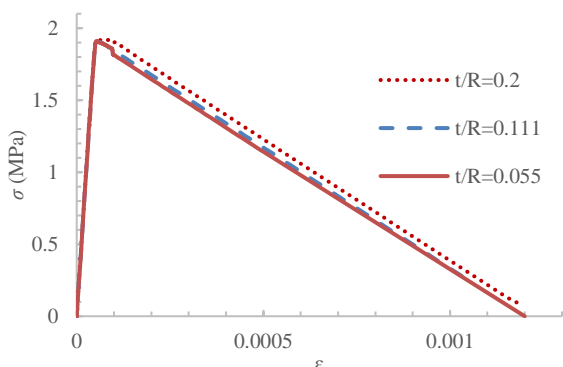


Fig. 15b The effect of capsule thickness ratio on the stress-strain diagram for a wireless sample

شکل 15b تأثیر نسبت ضخامت کپسول بر تنش نهایی شکست در نمونه بدون سیم

در نمونه دارای دو سیم، با افزایش نسبت ضخامت، تنش نهایی شکست نیز افزایش می‌یابد. برای نمونه با دو سیم، با افزایش نسبت ضخامت از 0.055 تا 0.2 شاهد افزایش 9٪ تنش نهایی شکست هستیم. این نتایج با نتایج مقاله‌ی گیلبرت و همکاران [13] همخوانی دارد. این محققان با افزایش نسبت ضخامت از 0.011 تا 0.111 افزایش تنش 30٪ را گزارش کردند.

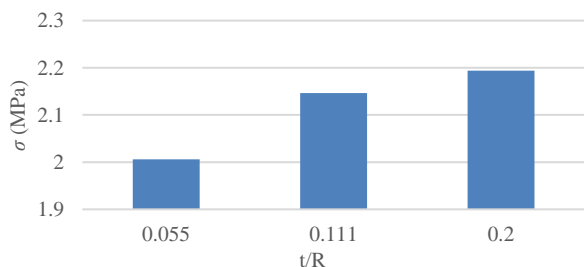


Fig. 16a The effect of capsule thickness ratio on the ultimate fracture stress in a two-wire sample

شکل 16a تأثیر نسبت ضخامت کپسول بر تنش نهایی شکست در نمونه با دو سیم

سیم با شعاع 250 میکرومتری پس از باربرداری از خود مقاومت بیشتری در بازگشت نشان می‌دهد. و به همین علت حتی پس از فعال شدن اثر حافظه‌داری نسبت به سیم 200 میکرومتری عملکرد ضعیف‌تری نشان می‌دهد. همچنین با توجه به مطالعات انجام شده در عمل، هنگامی که قطر سیم آلیاژ حافظه‌دار افزایش می‌یابد، یکنواختی ساختار کامپوزیت کاهش یافته که منجر به کاهش خواص مکانیکی می‌شود. همچنین با افزایش شعاع سیم آلیاژ حافظه‌دار، استحکام چسبندگی در فصل مشترک سیم/زمینه کاهش یافته که در نهایت موجب کاهش خواص نهایی کامپوزیت می‌شود [33-36].

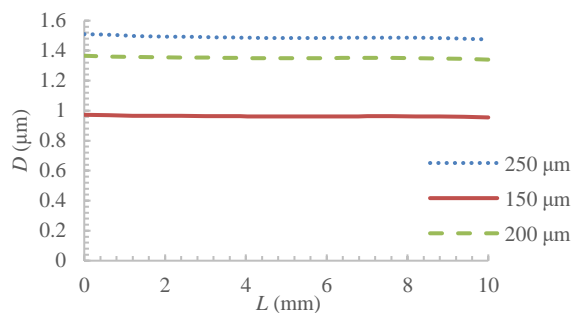


Fig. 14a Crack opening distance after loading with different wire radius

شکل 14a بازشدگی ترک پس از باربرداری در نمونه با شعاع متفاوت سیم‌ها

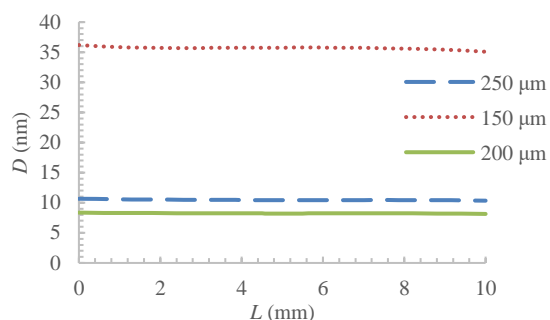


Fig. 14b Crack opening distance after activating the memory effect with different wire radius

شکل 14b بازشدگی ترک پس از فعال شدن اثر حافظه‌داری در نمونه با شعاع متفاوت سیم‌ها

3-5- تأثیر نسبت ضخامت میکرو کپسول

پارامتر دیگری که در ادامه بررسی گردید، تأثیر نسبت ضخامت کپسول (نسبت شعاع پوسته کپسول به شعاع کپسول) است. به این منظور نمونه‌ها در وضعیت بدون سیم و با دو سیم با شعاع 200 میکرومتر، در سه نسبت ضخامت متفاوت ارزیابی شدند و شکسته شدن کپسول و یا جدا شدن کپسول از زمینه سنجیده شد. در تمام حالات استحکام لایه میانی 2 مگاپاسکال می‌باشد. از نتایج شکل‌های 15a و 15b فهمیده شد که اگر کپسول از زمینه جدا گردد، می‌توان با کاهش نسبت ضخامت (درحالی که دیگر پارامترها ثابت نگه داشته شده‌اند) از جدا شدن آن جلوگیری کرد و کاری کرد که کپسول شکسته شود.

طبق شکل‌های 15a و 15b زمانی که کپسول شکسته می‌شود، در نمودار تنش-کرنش یک افت کوچک اتفاق می‌افتد (برای هر دو شکل این افت حوالی کرنش 0.0001 رخ داده است) اما وقتی کپسول جدا می‌شود، نمودار با شیب قبلی ادامه می‌یابد. در نتیجه در سه نسبت ضخامت مورد بررسی در هر دو حالت با سیم و بدون سیم، تنها در نسبت ضخامت 0.055 کپسول شکسته می‌شود.

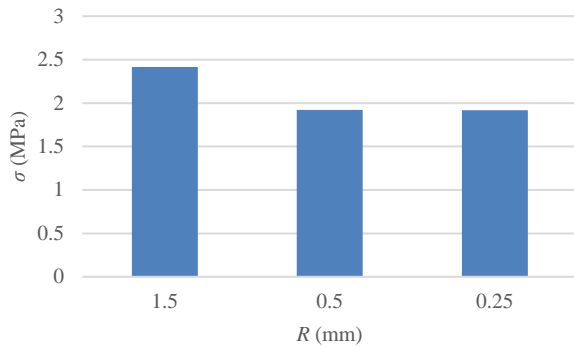


Fig. 17b Effect of microcapsule radius on ultimate fracture stress in wireless sample

شکل 17b تأثیر شعاع میکروکپسول بر تنش نهایی شکست در نمونه بدون سیم

کانتورهای تنش در راستای کشش برای شعاع 1.5 میلی‌متری در شکل 18 نشان داده شده است. در این حالت، ترک، میکروکپسول را دور می‌زند و کپسول، از زمینه جدا می‌گردد. در این حالت، خودترمیمی به‌درستی اتفاق نمی‌افتد. با این حال که میکروکپسول از زمینه جدا شده، تنش در میکروکپسول و اطراف میکروکپسول، در زمینه وجود دارد. علت این تنش به‌دلیل ایده‌آل نبودن نوع مش است. هرچند ممکن است که شکل 18 این تصور را به وجود بیاورد که میکروکپسول به طور کامل از زمینه فاصله گرفته، اما باید در نظر داشت که در شکل 18 تمامی جابجایی‌ها و تغییر شکل‌ها جهت مشاهده بهتر 20000 برابر شده‌اند. همچنین در حالت ایده‌آل، کپسول باید از دو سمت بالا و پایین، همزمان جدا شود که این امر در شبیه‌سازی اتفاق نمی‌افتد.

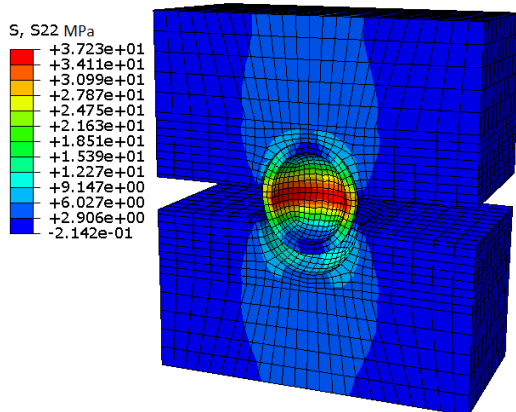


Fig. 18 Stress contour in tension direction for wireless model with 1.5 mm capsule radius

شکل 18 کانتورهای تنش در راستای کشش برای نمونه بدون سیم و شعاع کپسول 1.5 mm

5-5- تأثیر استحکام لایه میانی

پارامتر دیگر مورد ارزیابی، استحکام لایه میانی می‌باشد. همان‌طوری‌که انتظار می‌رود، افزایش استحکام لایه میانی در حالتی که دیگر پارامترها ثابت هستند، موجب افزایش احتمال شکسته شدن میکروکپسول می‌گردد. این نتیجه نیز در هر دو حالت بدون سیم و دو سیم 200 میکرومتری یکسان است. نمونه مورد بررسی در این حالت دارای میکروکپسول با نسبت ضخامت 0.2 و شعاع 500 میکرومتر است. طبق شکل 19a در وضعیت حاوی دو سیم، با افزایش این پارامتر، تنش نهایی شکست نیز افزایش می‌یابد. مشابهاً در حالت بدون سیم در

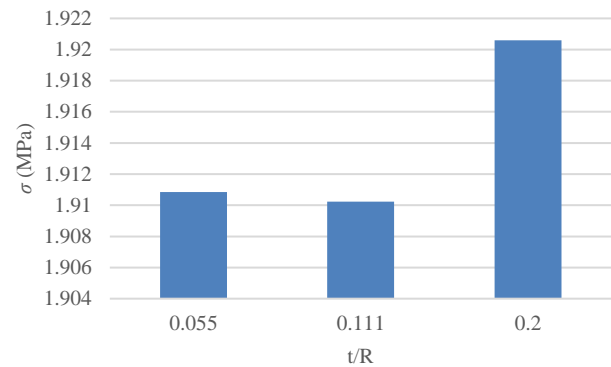


Fig. 16b Effect of capsule thickness ratio on ultimate fracture stress in wireless sample

شکل 16b تأثیر نسبت ضخامت کپسول بر تنش نهایی شکست در نمونه بدون سیم

4-5- تأثیر شعاع میکروکپسول

در بررسی دیگر، تأثیر شعاع میکروکپسول (نسبت حجمی) بر عملکرد شکست میکروکپسول و تنش نهایی شکست بررسی شده است (شکل 17a و 17b). برای این کار، از سه شعاع متفاوت کپسول در حالت بدون سیم و حالت دارای دو سیم با شعاع 200 میکرومتری استفاده شده است. در تمامی حالات استحکام لایه میانی 5 مگاپاسکال می‌باشد و همچنین نسبت ضخامت کپسول 0.2 است. پس از بررسی مشخص گردید که افزایش یا کاهش شعاع میکروکپسول بر شکسته شدن یا جدا شدن آن از زمینه تأثیری ندارد. و در تمامی حالات میکروکپسول از زمینه جدا می‌گردد. نتایج مشابه در مقاله مائولودین و همکاران [28] و گیلبرت و همکاران [13] دیده شد. در مقاله‌ی مائولودین و همکاران، با تغییر نسبت حجمی کپسول به زمینه، از 2% تا 9% و در چهار نسبت ضخامت متفاوت میکروکپسول، تغییری در شکست، یا جدایش میکروکپسول مشاهده نشد. همچنین گیلبرت و همکاران نیز با تغییر نسبت حجمی از 0.05 تا 0.25 تغییری در شکست، یا جدایش میکروکپسول مشاهده نکردند.

از دیگر نتایج این بررسی پارامتری، تأثیر شعاع میکروکپسول (نسبت حجمی) بر تنش نهایی شکست می‌باشد که در هر دو حالت با سیم و بدون سیم، با افزایش شعاع میکروکپسول، تنش نهایی شکست افزایش می‌یابد. مائولودین و همکاران با افزایش 10% نسبت حجمی کپسول، افزایش 15% تنش نهایی را گزارش کرده‌اند.

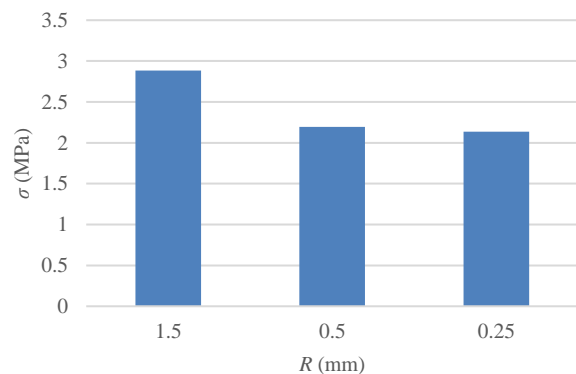


Fig. 17a The effect of microcapsule radius on the ultimate fracture stress in a two-wire sample

شکل 17a تأثیر شعاع میکروکپسول بر تنش نهایی شکست در نمونه با دو سیم

که استحکام لایه میانی به 10 مگاپاسکال برسد، کپسول در تمامی نسبت ضخامت‌ها و تمامی نسبت حجمی‌ها شکسته می‌شود.

7- فهرست علائم

E	مدول یانگ (Nm^{-2})
G	انرژی شکست (Jm^{-2})
h	ضریب سخت شوندگی (Nm^{-2})
R	شعاع سطح تغییر فاز (Nm^{-2})
T	دما (K)
t	زمان (s)
علائم یونانی	
β	پارامتر مادی، $\text{Pa}^\circ\text{C}^{-1}$
ε	کرنش
ε_l	حداکثر کرنش بازگشت‌پذیری
ν	ضریب پواسون
σ	تنش (Nm^{-2})

بالانویس‌ها

*شرایط مرجع

زیرنویس‌ها

f	پایانی
0	مرجع

8- مراجع

- [1] Eskandari, J. J., Khani, F. and Farhadinia, M., "Simulation Reinforced Microcapsules by Carbon Nanotubes Contained in a Self-Healing Capsule-Based Materials" *Journal of Solid Mechanics in Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 493-507, 2016.
- [2] Abdoos, H. and Seyyedi, A., "Self-Healing Polymer Nanocomposites" *Baspareshe*, Vol. 8, No. 4, pp. 4-19, 2019.
- [3] Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "A Review on Healing and Mechanical Behaviors of Self-Healable Polymer Matrix Composites by Extrinsic Healing Methods" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 549-570, 2020.
- [4] White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S., Brown, E. N. and Viswanathan, S., "Autonomic Healing of Polymer Composites" *Nature*, Vol. 409, No. 6822, pp. 794-797, 2001.
- [5] Khalili, S. M. R., Zarei, M. and Eslami-Farsani, R., "Experimental Study of the Mechanical Behavior of Self-Healing Polymer Composite under Heating Cycles" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 2, pp. 183-189, 2019.
- [6] Toohy, K. S., Sottos, N. R., Lewis, J. A., Moore, J. S. and White, S. R., "Self-Healing Materials with Microvascular Networks" *Nature materials*, Vol. 6, No. 8, pp. 581-585, 2007.
- [7] Brown, E. N., White, S. R. and Sottos, N. R., "Microcapsule Induced Toughening in a Self-Healing Polymer Composite" *Journal of Materials Science*, Vol. 39, No. 5, pp. 1703-1710, 2004.
- [8] Gilbert, F., Garoz, D. and Van Paeppegem, W., "The Role of the Bonding Interface in Encapsulated Self-Healing Cementitious Materials," in *Proceeding of* <https://www.researchgate.net/publication/26777376>,
- [9] Gilbert, F., Garoz, D. and Van Paeppegem, W., "Stress Concentrations and Bonding Strength in Encapsulation-Based Self-Healing Materials" *Materials & Design*, Vol. 67, pp. 28-41, 2015.

شکل 19b با افزایش استحکام لایه میانی و افزایش احتمال شکسته شدن کپسول، تنش نهایی شکست زمینه نیز افزایش می‌یابد. این نتیجه با مقاله گیلبرت و همکاران مطابقت دارد [13].

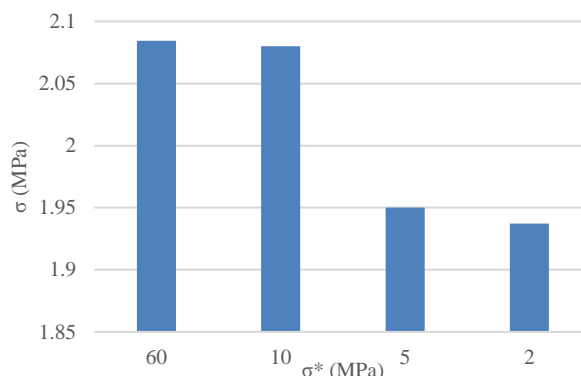


Fig. 19a Effect of interface strength on ultimate fracture stress in two-wire sample

شکل 19a تأثیر استحکام لایه میانی بر تنش نهایی شکست در نمونه با دو سیم

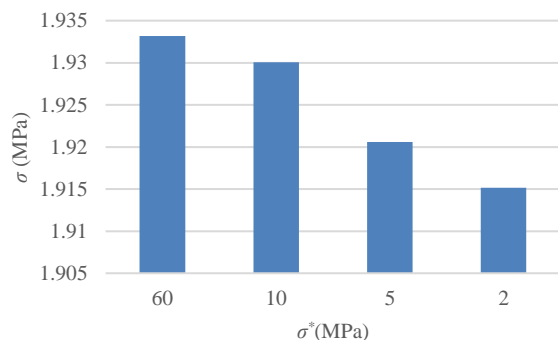


Fig. 19b Effect of interface strength on ultimate fracture stress in wireless sample

شکل 19b تأثیر استحکام لایه میانی بر تنش نهایی شکست در نمونه بدون سیم

6- نتیجه‌گیری

پس از بررسی‌های انجام گرفته در نمونه‌ای با زمینه‌ای از جنس بتن و میکروکپسول با پوسته‌ی شیشه‌ای که با سیم آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم ترکیب شده است، فهمیده شد که سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، در بسته شدن دهانه ترک، تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارند. به طوری که تنها با افزودن یک سیم آلیاژ حافظه‌دار، بازشدگی ترک، از 5 میکرومتر به 0.02 میکرومتر کاهش می‌یابد. این روند، با افزایش تعداد سیم‌ها بهبود می‌یابد. از سوی دیگر، افزودن سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر تنش نهایی شکست نیز تأثیر مثبت دارد. در نتیجه افزودن سیم آلیاژ حافظه‌دار، موجب بهبود استحکام شکست می‌شود. با بررسی شعاع سیم‌ها دیده شد که هرچند افزایش شعاع سیم موجب افزایش تنش نهایی شکست می‌شود، اما بر بسته شدن دهانه ترک، تأثیر مثبتی ندارد. همچنین شعاع کمتر سیم، توانایی کمتری برای بستن دهانه‌ی ترک دارد. با تغییر ضخامت و شعاع میکروکپسول، دریافته شد که کاهش ضخامت، موجب بالا رفتن احتمال شکست میکروکپسول می‌گردد اما تغییرات شعاع میکروکپسول (نسبت حجمی) تأثیری بر احتمال شکست ندارد. در انتها استحکام لایه میانی بررسی شد و مشخص شد که با افزایش استحکام لایه میانی، می‌توان احتمال شکست میکروکپسول را افزایش داد. طبق ارزیابی حاصل از شبیه‌سازی زمانی

- [26] Ashrafi, M. J., "Transformation and Plasticity of Shape Memory Alloy Structures: Constitutive Modeling and Finite Element Implementation" *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 29, No. 8, pp. 5515-5524, 2020.
- [27] Alinejad, Z., Khakzad, F., Shirin-Abadi, A. R., Ghasemi, M. and Mahdavian, A. R., "Preparation of Melamine-Formaldehyde Microcapsules Containing Hexadecane as a Phase Change Material: The Effect of Surfactants Type and Concentration," *Science and Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 33-44, 2013.
- [28] Mauludin, L. M., Zhuang, X. and Rabczuk, T., "Computational Modeling of Fracture in Encapsulation-Based Self-Healing Concrete Using Cohesive Elements," *Composite Structures*, Vol. 196, pp. 63-75, 2018.
- [29] Arce, G. A., Hassan, M. M., Mohammad, L. N. and Rupnow, T., "Self-Healing of Sma and Steel-Reinforced Mortar with Microcapsules," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 04018366, 2019.
- [30] Brinson, L. and Lammering, R., "Finite Element Analysis of the Behavior of Shape Memory Alloys and Their Applications," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 30, No. 23, pp. 3261-3280, 1993.
- [31] Rohatgi, P., "Al-Shape Memory Alloy Self-Healing Metal Matrix Composite," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 619, pp. 73-76, 2014.
- [32] Aghamirzadeh, G. R., Khalili, S., Eslami-Farsani, R. and Saedi, A., "Experimental Investigation on the Smart Self-Healing Composites Based on the Short Hollow Glass Fibers and Shape Memory Alloy Strips," *Polymer Composites*, Vol. 40, No. 5, pp. 1883-1889, 2019.
- [33] Xue, Z., Huang, Y. and Li, M., "Particle Size Effect in Metallic Materials: A Study by the Theory of Mechanism-Based Strain Gradient Plasticity" *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 1, pp. 149-160, 2002.
- [34] Lei, H., Wang, Z., Zhou, B., Tong, L. and Wang, X., "Simulation and Analysis of Shape Memory Alloy Fiber Reinforced Composite Based on Cohesive Zone Model," *Materials & Design*, Vol. 40, pp. 138-147, 2012.
- [35] Fazlollah-Poor, M., Eslami-Farsani, R. and Aghamohammadi, H., "Experimental Investigation of the Effect of Shape Memory Alloy Wire Embedding on the Low-Velocity Impact Behavior of Fiber Metal Laminates Composites at Different Temperatures," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 3, pp. 1057-1063, 2020.
- [36] Ananchaperumal, V. and Vedantam, S., "Formation and Evolution of Microstructure in Shape Memory Alloy Wire Reinforced Composites," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 74, No. 10, pp. 2499-2510, 2021.
- [10] Gilibert, F., Van Tittelboom, K., Tsangouri, E., Van Hemelrijck, D., De Belie, N. and Van Paepegem, W., "Determination of Strength and Debonding Energy of a Glass-Concrete Interface for Encapsulation-Based Self-Healing Concrete" *Cement and Concrete Composites*, Vol. 79, pp. 76-93, 2017.
- [11] Tsangouri, E., Gilibert, F. A., De Belie, N., Van Hemelrijck, D., Zhu, X. and Aggelis, D. G., "Concrete Fracture Toughness Increase by Embedding Self-Healing Capsules Using an Integrated Experimental Approach" *Construction and Building Materials*, Vol. 218, pp. 424-433, 2019.
- [12] Tsangouri, E., Gilibert Villegas, F. A., Aggelis, D., De Belie, N. and Van Hemelrijck, D., "Concrete Fracture Energy Increase by Embedding Capsules with Healing Ability: The Effect of Capsules Nature" in 2nd International RILEM/COST Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement-based Materials and Structures-EAC2, 2017.
- [13] Gilibert, F., Garoz, D. and Van Paepegem, W., "Macro-and Micro-Modeling of Crack Propagation in Encapsulation-Based Self-Healing Materials: Application of Xfem and Cohesive Surface Techniques" *Materials & Design*, Vol. 130, pp. 459-478, 2017.
- [14] Gómez, D. G., Gilibert, F., Allaer, K., Hillewaere, X., Du Prez, F., Tsangouri, E., Van Hemelrijck, D. and Van Paepegem, W., "Crack Propagation in Micro-Encapsulated Polymer for Self-Healing: Numerical Modelling and Experimental Validation" in 16th European Conference on Composite Materials 2014, 2014.
- [15] Gilibert, F., Garoz, D. and Van Paepegem, W., "Numerical Study of Transitional Brittle-to-Ductile Debonding of a Capsule Embedded in a Matrix," *Composite Interfaces*, Vol. 24, No. 1, pp. 69-84, 2017.
- [16] Gao, C., Ruan, H., Yang, C. and Wang, F., "Investigation on Microcapsule Self-Healing Mechanism of Polymer Matrix Composites Based on Numerical Simulation," *Polymer Composites*, pp. 1-13, 2021.
- [17] Burton, D., Gao, X. and Brinson, L., "Finite Element Simulation of a Self-Healing Shape Memory Alloy Composite," *Mechanics of Materials*, Vol. 38, No. 5-6, pp. 525-537, 2006.
- [18] Zhu, P., Cui, Z., Kesler, M. S., Newman, J. A., Manuel, M. V., Wright, M. C. and 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.
- [19] Hassan, M., Mehrpouya, M., Emamian, S. and Sheikholeslam, M., "Review of Self-Healing Effect on Shape Memory Alloy (Sma) Structures," in *Advanced Materials Research*, 2013, pp. 87-92.
- [20] Gao, X., Qiao, R. and Brinson, L. C., "Phase Diagram Kinetics for Shape Memory Alloys: A Robust Finite Element Implementation," *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 6, pp. 2102-2115, 2007.
- [21] Saedi, A. and Shokrieh, M. M., "A Novel Self-Healing Composite Made of Thermally Reversible Polymer and Shape Memory Alloy Reinforcement," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 30, No. 10, pp. 1585-1593, 2019.
- [22] Kirkby, E., Michaud, V., Manson, J.-A., Sottos, N. and White, S., "Performance of Self-Healing Epoxy with Microencapsulated Healing Agent and Shape Memory Alloy Wires," *Polymer*, Vol. 50, No. 23, pp. 5533-5538, 2009.
- [23] Bonilla, L., Hassan, M. M., Noorvand, H., Rupnow, T. and Okeil, A., "Dual Self-Healing Mechanisms with Microcapsules and Shape Memory Alloys in Reinforced Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 04017277, 2018.
- [24] Auricchio, F. and Petrini, L., "A Three-Dimensional Model Describing Stress-Temperature Induced Solid Phase Transformations: Solution Algorithm and Boundary Value Problems," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 61, No. 6, pp. 807-836, 2004.
- [25] Ashrafi, M., Arghavani, J., Naghdabadi, R. and Auricchio, F., "A Three-Dimensional Phenomenological Constitutive Model for Porous Shape Memory Alloys Including Plasticity Effects" *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015.