



## مطالعه المان محدود رفتار چسبندگی الیاف از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با بتن پلیمری

امیر ابراهیم اکبری بقال<sup>1</sup>، احمد ملکی<sup>2\*</sup>، رامین وفاپوری سorkhabi<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه.

2- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه.

3- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

\* مراغه، صندوق پستی 55197-00634، A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

در تحقیق حاضر با استفاده از تست‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود، رفتار بیرون کشیدگی الیاف حافظه‌دار شکلی از بتن پلیمری مطالعه می‌شود. جهت انجام شبیه‌سازی‌ها از روش المان محدود سه‌بعدی استفاده شده و رفتار سوپرلاستیک الیاف حافظه‌دار شکلی توسط سابروتین یومت در نرم‌افزار آباکوس تعریف می‌شود. به منظور در نظر گرفتن فرضیات واقع‌بینانه‌تر، اندرکنش الیاف و بتن با استفاده از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک شبیه‌سازی شده که پارامترهای آن با استفاده از روش المان محدود معکوس و استفاده از نتایج تست تجربی انجام پذیرفته بر روی یک نمونه الیاف به دست آمده است. پس از صحت‌سنجی نتایج با استفاده از تست‌های تجربی، تأثیر قطر و طول مدفون شدگی بر رفتار چسبندگی این نوع الیاف با بتن مطالعه شده است. در نهایت، به منظور بررسی عملکرد الیاف حافظه‌دار شکلی، رفتار بیرون کشیدگی این نوع الیاف با الیاف فولادی متناظر نیز مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد برای الیاف با قطر 0.5mm، با افزایش طول مدفون شدگی از 10mm به 30mm نیروی بیرون کشیدگی برای الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی به ترتیب در حدود 17% و 12% افزایش می‌یابد. بر این اساس، مشاهده می‌شود که استفاده از الیاف حافظه‌دار شکلی پارامترهای مؤثر بیرون کشیدگی الیاف از بتن را تا حد قابل توجهی بهبود می‌بخشد که علت این امر را می‌توان در نیروهای چسبندگی سطحی قوی بین الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن دانست.

دریافت: 1399/03/18

پذیرش: 1399/05/14

## کلیدواژه‌ها:

الیاف حافظه‌دار شکلی،  
رفتار بیرون کشیدگی،  
بتن، المان محدود،  
نیروی چسبندگی

## Finite Element Analysis of the Adhesive behavior of Shape Memory Alloy Fiber and Polymer Concrete

Amir Ebrahim Akbari Baghal<sup>1</sup>, Ahmad Maleki<sup>1\*</sup>, Ramin Vafaeipour Sorkhabi<sup>2</sup>

1- Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

\* P.O.B. 55197-00634, Maragheh, A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir

## Keywords

Shape memory alloy fibers,  
Pullout behavior,  
Concrete,  
Finite element method,  
Adhesive force.

## Abstract

In the present study, the pullout behavior of shape memory alloy fibers and concrete was studied. To perform the simulations, a three-dimensional finite element method was used and the supralastic behavior of shape memory fibers was defined using UMAT subroutine in ABAQUS software. In order to consider more realistic assumptions, the interaction between fibers and concrete has been simulated using the concept of transitional area of the contact surface. The contact surface parameters were obtained using the inverse finite element method and experimental test data performed on a fiber sample. After validating the results using experimental testing, the effect of diameter parameters and embedded length on the adhesive behavior of this type of fiber with concrete has been studied. Finally, in order to evaluate the performance of shape memory fiber fibers, the pullout behavior of this type of fiber has been compared with the corresponding steel fibers. The results show that for fibers with a diameter of 0.5 mm, with increasing the embedded length from 10 mm to 30 mm, the pullout strength for SMA and steel fibers increases by about 17% and 12%, respectively. Based on this, it was observed that the use of shape memory fibers significantly improves the effective pullout parameters of fiber from concrete, which can be attributed to the strong surface adhesion forces between shape memory fibers and concrete.

## 1- مقدمه

تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از الیاف یکی از بهترین روش‌ها به منظور بهبود خواص شکنندگی بتن، استحکام خمشی، استحکام کششی و قابلیت جذب انرژی بتن می‌باشد [6-8]. این بهبود خواص مکانیکی با ایجاد رفتار سخت‌شوندگی کرنش در مخلوط بتن-الیاف حاصل می‌شود و جنس مواد، شکل و ضریب لاغری الیاف مورد استفاده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص

با توجه به اینکه بتن و ملات سیمان عمدتاً دارای رفتاری ترد و شکننده بوده و در مقابل نیروهای کششی بسیار ضعیف هستند، بنابراین در سال‌های اخیر به‌کارگیری روش‌ها و افزودنی‌های مختلف مانند استفاده از نانو مواد، مواد پلیمری و الیاف در بهبود ضعف‌های بتن مورد توجه گرفته است [1-5]. نتایج

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Akbari Baghal, A.E., Maleki, A., Vafaeipour Sorkhabi, R., "Finite Element Analysis of the Adhesive behavior of Shape Memory Alloy Fiber and Polymer Concrete", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1255-1262, 2021.

مکانیکی بتن‌های تقویت شده با الیاف دارد. به عنوان مثال، استفاده از الیاف فولادی حداکثر استحکام فشاری و کششی بتن تقویت شده با الیاف را به مقادیری بیشتر از 292 مگاپاسکال و 37 مگاپاسکال می‌رساند که در حدود 5-10 برابر بیشتر از مشخصات بتن معمولی بدون الیاف فولادی می‌باشد [9]. بنابراین در سال‌های اخیر، تأثیر الیاف بر مشخصات مکانیکی بتن توسط محققان بسیاری مطالعه شده است. عبدالله و همکاران [10] در یک مطالعه مروری به بررسی برخی از مطالعات انجام شده در زمینه رفتار چسبندگی الیاف فولادی با بتن پرداختند و نشان دادند که پارامترهایی مانند نوع الیاف، کسر حجمی، طول مدفون شدگی، هندسه الیاف و جهت الیاف بر خواص چسبندگی الیاف با بتن تأثیرگذار می‌باشد. بر اساس مطالعه آنها عمدتاً دو مکانیزم مختلف چسبندگی بین ماتریس و الیاف شامل رفتار چسبندگی شیمیایی<sup>1</sup> و اثر اصطکاک در سطح تماس در نتیجه مدفون شدگی الیاف در داخل بتن، بیشترین تأثیر را بر تقویت مشخصات مکانیکی بتن دارند. مکانیزم اول عمدتاً توسط خواص ناحیه انتقالی سطح مشترک<sup>2</sup> تعریف می‌شود که به مشخصات سطح الیاف و واکنش شیمیایی الیاف با ماتریس بستگی دارد [11-13] و مکانیزم دوم وابستگی زیادی به شکل هندسی الیاف دارد. عبدالله و ریس [14] به مقایسه رفتار بیرون کشیدگی انواع مختلف الیاف هوک شکل از بتن معمولی پرداختند. الیس و همکاران [15] با استفاده از مدل المان محدود تأثیر شکل هندسی الیاف را بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی مطالعه کردند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که استفاده از الیاف دارای تاب<sup>3</sup> حداکثر نیروی بیرون کشیدگی را 5 برابر و انرژی مورد نیاز را 10 برابر نسبت به استفاده از الیاف مستقیم افزایش می‌دهد. الوان و همکاران [16] با استفاده از مدل تحلیلی به پیش‌بینی رابطه‌ای برای نیروی بیرون کشیدگی برحسب لغزش الیاف فولادی هوک شکل پرداختند. یو و کیم [17] رفتار بیرون کشیدگی انواع مختلف الیاف فولادی با هندسه‌های مستقیم، هوک، پیچشی<sup>4</sup> و خمیده از بتن را مطالعه کرده و نشان دادند که تأثیر هندسه الیاف بر افزایش مقاومت بیرون کشیدگی عبارت است از: هوک، پیچشی، خمیده و مستقیم. کوها و همکاران [18] نشان دادند که الیاف هوک رفتاری متفاوت نسبت به الیاف مستقیم دارند و استفاده از الیاف هوک شکل باعث افزایش 4.5 برابری در حداکثر نیروی بیرون کشیدگی الیاف از بتن می‌شود. با توسعه مواد نوین مهندسی، استفاده از مواد حافظه‌دار شکلی در کاربردهای مهندسی به صورت چشمگیری توسعه پیدا است [19-22]. به عنوان، مثال چانگ و همکاران [23] در یک مطالعه مروری به بررسی استفاده از مواد حافظه‌دار شکلی در کاربردهای عمرانی پرداختند. خلیلی و همکاران [24] به بررسی خواص کششی کامپوزیت زمینه فلزی خودترمیم شونده با زمینه‌ای از جنس آلیاژ قلع-بیسیموت و سیم سوپرالاستیک نیکل-تیتانیوم به صورت تجربی پرداختند و اثر پارامترهای تأثیرگذار در بازده ترمیم شامل کسر حجمی سیم، پیش کرنش و دمای ترمیم، را مورد بررسی قرار دادند. عصفوری و همکاران [21] به بررسی آزمایشگاهی میزان جذب انرژی در چندلایه‌های فلز-الیاف تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار در برابر ضربه سرعت پایین پرداختند. فرد و همکاران [25] به ازای درصد‌های وزنی مختلف، رفتار بتن‌های تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار شکلی را بررسی کردند. الم و همکاران [26] به پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای اعضای بتنی تقویت شده با سیم‌های حافظه‌دار شکلی پرداختند.

## 2- تست تجربی بیرون کشیدگی

در این تحقیق، برای دسترسی به خصوصیات استحکام میان فازی مابین الیاف و ماتریس از جنس بتن پلیمری آزمایش بیرون کشیدگی ترتیب داده شد. تست‌های بیرون کشیدگی الیاف حافظه‌دار شکلی و الیاف فولادی با استفاده از دستگاه تست کشش یونیورسال دارای ظرفیت 2kN و با دقت 0.5N بر روی نمونه‌های بتن پلیمری حاوی تک الیاف انجام شده است. نمونه بتن پلیمری ساخته شده به صورت مکعب مستطیل بوده و ابعاد آن برابر  $25 \times 25 \times 60 \text{ mm}^3$  انتخاب شده است. در شکل 1 نحوه قرارگیری نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی در داخل دستگاه نشان داده شده است. نیروی اعمالی به الیاف به صورت جابجایی کنترل و با سرعت 2.5 mm/min می‌باشد. آزمایش زمانی که الیاف به طور کامل بیرون کشیده می‌شود و یا شکستگی اتفاق می‌افتد، متوقف می‌شود و طول الیاف بعد از بیرون کشیدگی و نیروی شکست اندازه‌گیری می‌شود. در شکل 2 منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از نتایج تست تجربی حاصل از بیرون کشیدگی الیاف از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و الیاف فولادی نشان داده شده است.



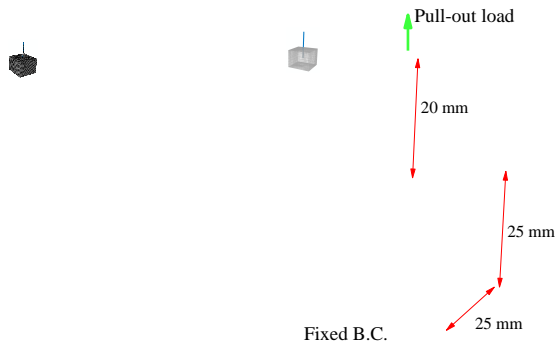
Fig. 1. Experimental test setup for pullout of SMA and steel fiber  
شکل 1 ستاپ آزمایشگاهی برای تست بیرون کشیدگی الیاف فولادی و SMA

<sup>1</sup> Physicochemical Through Adhesion

<sup>2</sup> Interfacial Transition Zone (ITZ)

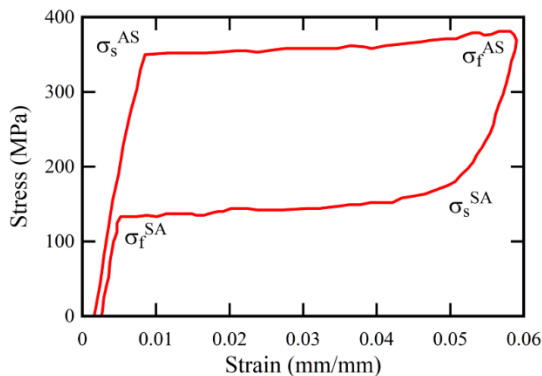
<sup>3</sup> Twisted Fibers

<sup>4</sup> Twisted



**Fig. 3.** Finite element model for SMA fiber pullout from concrete  
**شکل 3** مدل المان محدود تست بیرون کشیدگی یک الیاف حافظه‌دار شکلی از بتن

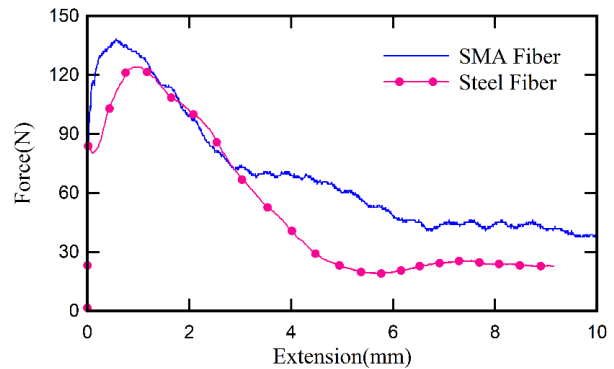
شکل 4 منحنی تنش-کرنش الیاف حافظه‌دار شکلی استفاده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. به منظور بیان رفتار سوپرالاستیک و حافظه‌داری الیاف حافظه‌دار شکلی، مشخصات مکانیکی مصالح بر طبق مدل رفتاری ژو و همکاران [29] می‌باشد. بر اساس این مدل رفتاری، رابطه تنش-کرنش در نرم‌افزار آباکوس و با استفاده از سابروتین یومت تعریف گردیده است. پارامترهای مورد نیاز برای این مصالح عبارتند از: مدول یانگ برای دو فاز آستینیت و مارتنزیت، تنش شروع فاز آستینیت به مارتنزیت ( $\sigma_s^{AS}$ )، تنش پایان فاز آستینیت به مارتنزیت ( $\sigma_f^{AS}$ )، تنش شروع فاز مارتنزیت به آستینیت ( $\sigma_s^{SA}$ )، تنش پایان فاز مارتنزیت به آستینیت ( $\sigma_f^{SA}$ )، و طول کرنش مسطح فوق ارتجاعی ( $\epsilon_L$ ). جدول 1 بیانگر خصوصیات رفتاری مورد نیاز ناینتول جهت مدل‌سازی آن در نرم‌افزار می‌باشد.



**Fig. 4.** Stress-strain curve of the used SMA fiber  
**شکل 4** منحنی تنش-کرنش الیاف حافظه‌دار شکلی ناینتول مورد استفاده در تحقیق حاضر

### 3-3 خواص مکانیکی بتن پلیمری

به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح بتن پلیمری از مدل رفتاری پلاستیسیته تخریب شده بتن<sup>2</sup> استفاده شده است. پارامترهای موجود در این مدل رفتاری عبارتند از: زاویه اتساع<sup>3</sup>  $\lambda$ ، پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک<sup>4</sup>، نسبت مقاومت فشاری دو محوره بتن به مقاومت فشاری تک محوره  $f_{bo}/f_{co}$ ، ضریب بارگذاری  $K_c$  و



**Fig. 2.** Experimental load-displacement curve of the SMA and steel fiber

**شکل 2** منحنی نیرو-جابجایی حاصل از نتایج تست تجربی بیرون کشیدگی از بتن الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی

### 3-3 مدل‌سازی المان محدود

#### 1-3 مشخصات هندسی

در شکل 3 مشخصات هندسی مدل المان محدود به منظور مطالعه بیرون کشیدگی الیاف حافظه‌دار شکلی از بتن نشان داده شده است. شعاع الیاف حافظه‌دار شکلی برابر  $r$  و طول مدفون شدگی آن  $l$  می‌باشد. شعاع بتن باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا اثر شرایط مرزی بر رفتار چسبندگی قابل صرف‌نظر کردن باشد، بنابراین ابعاد آن در حدود 20 برابر شعاع الیاف انتخاب شده است. الیاف تحت بارگذاری تک جهته<sup>1</sup> با اعمال جابجایی به انتهای آزاد الیاف قرار گرفته و نیروی ایجاد شده در آن اندازه‌گیری می‌شود. جهت اعمال شرایط مرزی و مقید کردن ماتریس، انتهای پایین نمونه بتنی کاملاً مقید می‌شود. به منظور در نظر گرفتن فرضیات واقع‌بینانه‌تر، مدل المان محدود، هندسه از سه قسمت مختلف بتن، الیاف حافظه‌دار شکلی و ناحیه انتقالی سطح مشترک بین این دو ماده ایجاد شده است. در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی چسبندگی الیاف با بتن از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک استفاده شده و شبیه‌سازی المان محدود بیرون کشیدگی الیاف به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن با استفاده از المان‌های مکعبی C8D3R و به ترتیب با اندازه متوسط  $90\mu\text{m}$  و  $0.1\text{mm}$  مش‌بندی شده است. سطح مشترک بتن پلیمری و الیاف نیز با استفاده از المان چسب مش‌بندی شده است. لازم به ذکر است که این ابعاد مش پس از بررسی آنالیز حساسیت مش‌بندی انتخاب شده است. با توجه به اینکه هدف اصلی، مطالعه تأثیر قطر و طول مدفون شدگی الیاف بر مشخصه‌های چسبندگی با بتن می‌باشد، بنابراین تحلیل‌ها به ازای قطرهای  $0.5\text{mm}$ ،  $1\text{mm}$  و  $2\text{mm}$  و طول مدفون شدگی  $10\text{mm}$ ،  $20\text{mm}$  و  $30\text{mm}$  برای دو نوع الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی انجام پذیرفته است.

### 2-3 خواص مکانیکی الیاف حافظه‌دار شکلی

آلیاژ حافظه‌دار شکلی استفاده شده در این تحقیق از نوع آلیاژ حافظه‌دار نایتنول با درصد وزنی  $50.8$  درصد نیکل و  $49.2$  درصد تیتانیوم ساخت شرکت دیادو ژاپن می‌باشد.

<sup>1</sup> Uniaxial Tension

<sup>2</sup> Concrete Damage Plasticity (CDP)

<sup>3</sup> Dilation Angle

<sup>4</sup> Plastic Potential Eccentricity

تمامی مکانیزم‌های ساختار میکرو و فرایند شکست را می‌توان به وسیله سه پارامتر مورد توجه قرار داد: تنش ماکزیمم برشی یا استحکام ناحیه چسبنده ( $\tau_{max}$ )، حداکثر کرنش جدایش بحرانی  $S_{max}$ ، که به ازای مقادیر بیشتر از آن سطح چسبنده ظرفیت تحمل تنش خود را از دست داده و ترک رشد می‌کند، (با  $\delta_n$  یعنی جدایش در نقطه تنش ماکزیمم) و پارامتر  $n$  که نشان دهنده تغییرات نمایی بخش ناحیه شکست می‌باشد. علاوه بر این،  $G_c$  که انرژی جدایش می‌باشد نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مدل ناحیه چسبنده می‌باشد. با توجه به اینکه در مسأله حاضر، بارگذاری روی الیاف به صورت مود ترکیبی می‌باشد بنابراین، هر دو مؤلفه تنش‌های مماسی و عمودی تماس در انرژی شکست مشارکت دارند و رابطه توانی انرژی شکست به صورت زیر می‌باشد:

$$\left(\frac{G_n}{G_{cn}}\right)^2 + \left(\frac{G_t}{G_{ct}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

که در آن  $G_t$  و  $G_n$  به ترتیب، انرژی‌های شکست عمودی و مماسی می‌باشند و برابر با مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی هستند که از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$G_n = \int_0^{\delta_c} \sigma_n(\delta) d\delta \quad (2)$$

$$G_t = \int_0^{\delta_c} \tau_t(\delta) d\delta \quad (3)$$

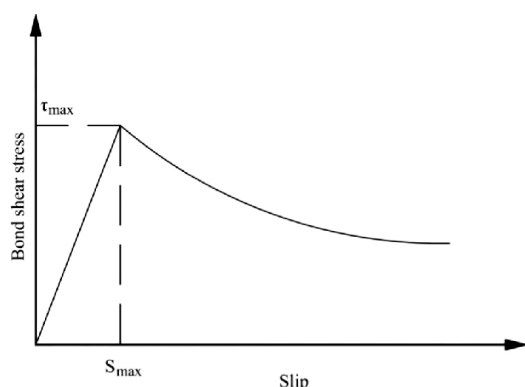


Fig. 5. Cohesive zone bond shear stress via slip

شکل 5 تغییرات تنش برشی ناحیه چسبندگی بر حسب میزان لغزش

در تحقیق حاضر، پارامترهای قانون تنش-جدایش مبتنی بر مدل نمایی مورد استفاده در مدل المان محدود که شامل تنش استحکام ناحیه چسبنده، حداکثر کرنش جدایش بحرانی، پارامتر  $n$  که نشان دهنده تغییرات نمایی بخش ناحیه شکست هستند، از نتایج تست تجربی بیرون کشیدگی انجام پذیرفته بر روی نمونه‌های بتن پلیمری که در بخش 2 جزئیات آن ذکر شده، به دست آمده است. در ادامه به بررسی نتایج مدل المان محدود بر روی نمونه‌های مختلف پرداخته می‌شود. به منظور رعایت اختصار، نامگذاری نمونه‌ها به صورت A- $\phi$ B-LC می‌باشد که در آن A=(SMA, Steel) جنس الیاف، B=(0.5mm, 1mm, 2mm) قطر الیاف و C=(10mm, 20mm, 30mm) نشان دهنده طول مدفون شدگی الیاف می‌باشد.

#### 4- بررسی نتایج

##### 4-1 خواص ناحیه چسبنده و اعتبار سنجی مدل عددی

خواص ناحیه چسبنده بین الیاف و بتن پلیمری مورد استفاده در تحقیق حاضر با استفاده از انجام تست بیرون کشیدگی الیاف تعیین شده و سپس به

پارامتر ویسکوزیته که در جدول 2 مشخصات مکانیکی مورد استفاده برای بتن پلیمری نشان داده شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی تاندون‌های NiTi مورد استفاده در تحقیق حاضر [30]

Table 1. Mechanical properties of the used SMA fiber [30]

پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته فاز آستینیت، $E_a$ (GPa)	67
تنش شروع تبدیل فاز مستقیم، $\sigma_s^{AS}$ (MPa)	340
تنش پایان تبدیل فاز مستقیم، $\sigma_f^{AS}$ (MPa)	342
تنش شروع تبدیل فاز، $\sigma_s^{SA}$ (MPa)	175
تنش پایان تبدیل فاز معکوس، $\sigma_f^{SA}$ (MPa)	120
ماکزیمم کرنش قابل بازگشت، $\epsilon_L$	5.90%

مقاومت فشاری با استفاده از آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه مکعبی شکل 5cm×5cm، مدول یانگ با استفاده از آزمون فشاری بر روی نمونه استوانه‌ای با قطر 7.5cm و ارتفاع 15cm تعیین شده است. همچنین، استحکام کششی با استفاده از انجام آزمایش کشش مستقیم بر روی نمونه‌های بریکت به دست آمده است. برای بقیه پارامترهای مورد نیاز نیز از مقادیر پیش‌فرض آنها در نرم‌افزار استفاده شده است.

جدول 2 مشخصات مکانیکی مورد استفاده برای بتن پلیمری

Table 2. Mechanical properties of the used polymer concrete

پارامتر	مقدار
استحکام فشاری، (MPa)	32.9
مدول یانگ، (GPa)	22.45
استحکام کششی، (MPa)	3.32
انرژی شکست، (MPa)	0.07
زاویه اتساع (درجه)	36
پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک	0.1
ضریب بارگذاری	0.67
نسبت مقاومت فشاری دو محوره بتن به مقاومت فشاری تک محوره	1.16

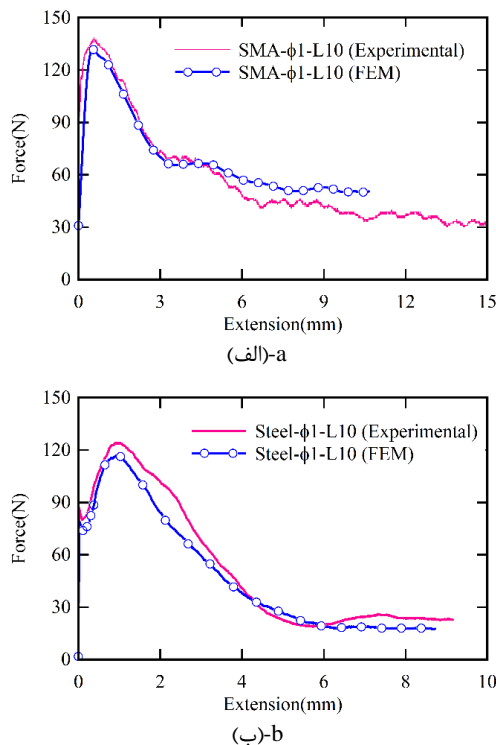
#### 3-4 مدل‌سازی اندرکنش الیاف و بتن پلیمری

برای مدل‌سازی آسیب و پدیده جدایش در ناحیه تماس بین الیاف و بتن پلیمری از تئوری مدل ناحیه چسبنده که بر پایه نمودارهای نیرو-جابجایی هستند، استفاده شده است. در مدل ناحیه چسبنده، رفتار ترک با قانون کشش-جدایش<sup>1</sup> که رابطه بین تنش و جابجایی دو سطح چسبنده را نشان می‌دهد، بیان می‌شود. تعریف خواص مواد در مدل ناحیه چسبنده به دو صورت نمایی و دوخطی انجام می‌پذیرد که هر کدام دارای توابع پتانسیل مربوط به خود هستند. در مقاله حاضر، تحلیل جدایش اتصال الیاف از بتن پلیمری با استفاده از سطوح چسبنده در نرم‌افزار آباکوس انجام می‌شود. رفتار مکانیکی مربوط به سطح تماس با استفاده از قانون تنش-جدایش و مبتنی بر مدل نمایی<sup>2</sup> آن شبیه‌سازی می‌شود. همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، در غیاب هر نوع خرابی رفتار سطح تماس خطی فرض می‌شود که این رفتار خطی با پیدایش خرابی از بین می‌رود. در این مدل فرض می‌شود که

<sup>1</sup> Traction-separation Law

<sup>2</sup> Bilinear cohesive zone model

اصطلاحی که به تدریج توزیع تنش‌ها در طول الیاف بیشتر می‌شود. با افزایش بیشتر نیروی اعمالی، سطح تماس الیاف به صورت کامل از بتن کنده شده و الیاف شروع به جدایش کامل از بتن می‌کند. با توجه به توزیع تنش به وجود آمده در الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی که در شکل 7 نشان داده شده است مشاهده می‌شود که حداکثر تنش ایجاد شده در الیاف SMA- $\phi$ 1-L10 برابر 396MPa و برای الیاف فولادی متناظر برابر 123MPa می‌باشد. این نتایج نیز حاکی از آن است که چسبندگی بین الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن بیشتر از چسبندگی بین الیاف فولادی با بتن می‌باشد. بر این اساس، الیاف حافظه‌دار شکلی باعث بهبود قابل توجهی در تقویت مشخصات بتن تقویت شده با این نوع الیاف خواهد شد.



**Fig. 6.** Finite element and experimental load-slip curve (a) SMA fiber (SMA- $\phi$ 1-L10 sample) and (b) steel fiber (Steel- $\phi$ 1-L10 sample)

شکل 6 منحنی نیرو- لغزش مدل نهایی المان محدود و نتایج حاصل از تست تجربی بیرون کشیدگی (الف) الیاف حافظه‌دار شکلی (نمونه SMA- $\phi$ 1-L10) و (ب) الیاف فولادی (نمونه Steel- $\phi$ 1-L10)

به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر مشخصات هندسی الیاف بر رفتار پیوستگی الیاف و بتن در ادامه منحنی‌های نیرو-لغزش برای نمونه‌های مختلف تحت بررسی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل‌های 8 و 9 منحنی‌های نیرو-لغزش به ترتیب برای نمونه‌های مختلف الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی تحت بررسی، ارائه شده است.

با بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف مشاهده می‌شود که دو پارامتر طول مدفون شدگی و قطر الیاف تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر حداکثر نیروی بیرون کشیدگی و جابجایی متناظر دارد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که حداکثر نیروی بیرون کشیدگی برای نمونه‌های SMA- $\phi$ 1-L10 و Steel- $\phi$ 1-L10 به ترتیب برابر 119N و 107N به دست می‌آید. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الیاف حافظه‌دار شکلی باعث افزایش حداکثر نیروی

عنوان ورودی به مدل المان محدود مورد استفاده قرار گرفته است. در این بخش با استفاده از تست‌های تجربی انجام شده به تعیین پارامترهای قانون تنش- جدایش بین الیاف و بتن پرداخته می‌شود.

اندرکنش بین الیاف و بتن با استفاده از قید تماسی و تعریف المان‌های چسبنده صورت پذیرفت که پارامترهای مدل ناحیه چسبنده به نحوی تعیین شدند که منحنی نیرو- جابجایی به دست آمده از مدل المان محدود بر نتایج تجربی تست بیرون کشیدگی انجام شده بر روی الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی منطبق باشد. پس از کالیبره کردن نتایج مربوط به تست بیرون کشیدگی، مشخصات رفتاری مدل ناحیه چسبنده مورد استفاده مطابق جدول 3 به دست آمده است.

با استفاده از مقادیر ارائه شده در جدول 3، منحنی نیرو- لغزش مدل المان محدود نهایی و نتایج حاصل از تست تجربی برای الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی با قطر 1mm و طول مدفون شدگی 10mm یعنی نمونه‌های Steel- $\phi$ 1-L10 و SMA- $\phi$ 1-L10 در شکل 6 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همپوشانی مطلوبی هم از لحاظ شکل منحنی و هم از لحاظ میزان حداکثر نیروی بیرون کشیدگی نمونه آزمایشگاهی و مدل المان محدود برقرار است و حدود 8٪ خطا در حداکثر نیروی بیرون کشیدگی در نمونه آزمایشگاهی نسبت به نمونه المان محدود وجود دارد. بر این اساس می‌توان بیان نمود که مدل المان محدود با دقت بسیار مناسبی رفتار چسبندگی بین الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن را پیش‌بینی می‌کند و می‌توان با استفاده از آن تأثیر پارامترهای مختلف را مورد مطالعه قرار داد.

بررسی منحنی‌های نیرو-لغزش نشان داده شده در شکل 6 برای الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی نشان می‌دهد که به ازای مشخصات یکسان الیاف، نیروی چسبندگی الیاف حافظه‌دار شکلی بیشتر از الیاف متناظر فولادی می‌باشد. به عنوان نمونه برای الیاف با قطر 1mm و طول مدفون شدگی 10mm، حداکثر نیروی چسبندگی الیاف حافظه‌دار شکلی در حدود 15 درصد بیشتر از الیاف متناظر فولادی است که علت این امر را می‌توان در نیروهای چسبندگی سطحی قوی بین الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن دانست. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که مقدار جابجایی مورد نیاز برای جدایش نیز برای الیاف حافظه‌دار شکلی بیشتر از الیاف متناظر فولادی می‌باشد که مقدار جابجایی جدایش برای الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی با قطر 1mm به ترتیب برابر با 0.85mm و 0.51mm می‌باشد. بنابراین استفاده از الیاف حافظه‌دار شکلی باعث افزایش حدود 40٪ در جابجایی جدایش الیاف می‌شود که مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.

**جدول 3** پارامترهای مدل ناحیه چسبنده به منظور تعریف اندرکنش الیاف حافظه‌دار شکلی و الیاف فولادی با بتن

**Table 3.** Cohesive zone model parameters used for define the interaction between SMA and steel fiber and concrete

$G_c$ (MPa.mm)	$T_{max}$ (MPa)	$\delta_{max}$ (mm)	
0.28	10.85	$3 \times 10^{-3}$	الیاف حافظه‌دار شکلی
0.23	8.23	$2.8 \times 10^{-3}$	الیاف فولادی

#### 2-4 بررسی نتایج المان محدود

در شکل 7 توزیع تنش‌های الیاف در آستانه جدایش آنها از بتن برای نمونه‌های SMA- $\phi$ 1-L10 و Steel- $\phi$ 1-L10 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در آستانه جدایش الیاف از بتن، قسمت انتهایی الیاف تحت تأثیر تنش‌های بیشتر قرار گرفته و سپس با غلبه بر نیروهای چسبندگی

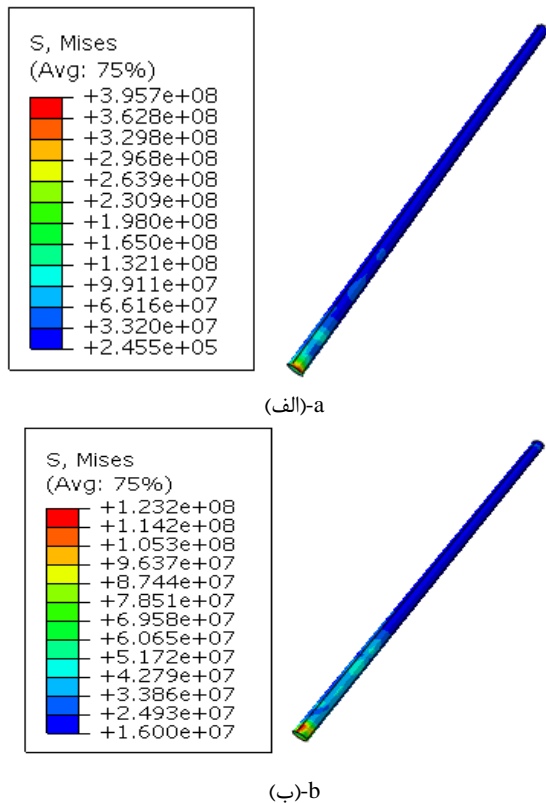


Fig. 7. Pullout stress distribution in fiber (a) SMA fiber (SMA-φ1-L10 sample) and (b) steel fiber (Steel-φ1-L10 sample)

شکل 7 توزیع فون مایسز (پاسکال) تنش در لحظه آستانه جدایش الیاف از بتن (الف) الیاف SMA (نمونه SMA-φ1-L10) و (ب) الیاف فولادی (نمونه Steel-φ1-L10)

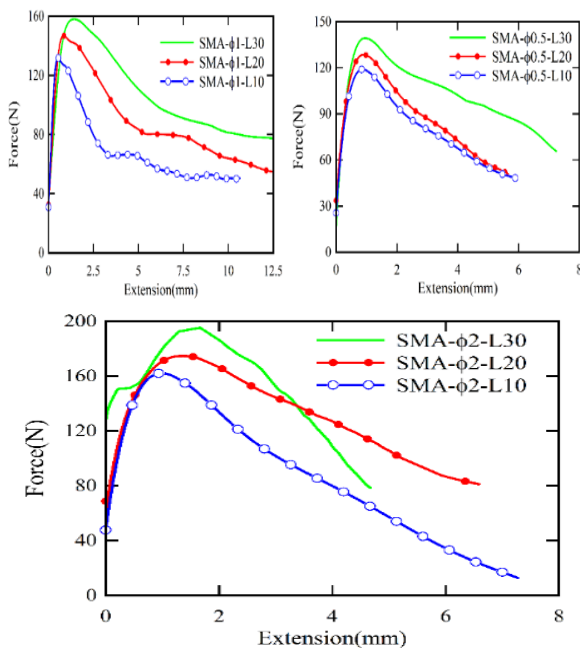


Fig. 8. Load-slip curves for SMA fiber pullout

شکل 8 منحنی نیرو-لغزش برای نمونه‌های مختلف الیاف حافظه‌دار شکلی

بیرون کشیدگی در حدود 10 درصد نسبت به الیاف فولادی متناظر می‌شود که این میزان برحسب قطر و عمق مدفون شدگی الیاف متفاوت می‌باشد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که برای الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی با قطر 0.5mm با افزایش عمق مدفون شدگی از 10mm به 30mm حداکثر نیروی بیرون کشیدگی به ترتیب در حدود 17 درصد و 12 درصد افزایش می‌یابد. همچنین، به ازای طول مدفون شدگی 10mm با افزایش قطر الیاف از 0.5mm به 2mm حداکثر نیروی بیرون کشیدگی برای الیاف حافظه‌دار شکلی و الیاف فولادی به ترتیب در حدود 28 درصد و 15 درصد افزایش می‌یابد. بر این اساس، می‌توان بیان نمود تأثیر افزایش قطر و طول مدفون شدگی بر تقویت چسبندگی الیاف با بتن برای الیاف حافظه‌دار شکلی بیشتر از الیاف متناظر فولادی می‌باشد.

نتیجه قابل توجهی که از منحنی‌های نیرو-لغزش نمونه SMA-φ2-L30 قابل مشاهده است این می‌باشد که ساز و کار بیرون کشیدگی الیاف حافظه‌دار شکلی در این شرایط با سایر حالت‌های تحت بررسی متفاوت می‌باشد و در این حالت دو مکانیزم متفاوت برای جدایش بین سطحی این الیاف دیده می‌شود.

مکانیزم اول، جدایش قبل از تبدیل فاز مارتنزیتی و مکانیزم دیگر مربوط به جدایش بعد از تبدیل فاز مارتنزیتی می‌باشد. با توجه به منحنی نیرو-لغزش نشان داده شده در شکل 8 برای نمونه SMA-φ2-L30 مشاهده می‌شود که تا نقطه A جدایش سطحی اتفاق افتاده ولی بعد از آن به علت تبدیل فاز مارتنزیت الیاف حافظه‌دار شکلی به آستینیت، مجدداً تنش‌های چسبندگی سطحی و همچنین استحکام الیاف افزایش یافته و پس از این نقطه با افزایش بیشتر نیرو، چسبندگی برشی بین الیاف و بتن کاهش و الیاف شروع به جدایش از بتن می‌کنند.

بررسی نتایج نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که در حالت‌هایی که چسبندگی برشی به اندازه کافی بزرگ باشد، این تبدیلات فاز الیاف حافظه‌دار شکلی ایجاد می‌شود. تغییر فاز الیاف حافظه‌دار شکلی از مارتنزیت به آستینیت باعث افزایش حداکثر نیروی جدایش شده و برای نمونه SMA-φ2-L30 مقدار این نیرو برای فاز مارتنزیت و آستینیت به ترتیب برابر 151N و 196N می‌باشد.

در شکل 10 توزیع تنش در بتن برای نمونه‌های SMA-φ2-L30 و Steel-φ2-L30 تحت نیروی بیرون کشیدگی 100N نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در این شرایط حداکثر تنش انتقال داده شده به بتن توسط الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی به ترتیب برابر 2.8MPa و 1.8MPa می‌باشد.

علت بیشتر بودن تنش انتقال داده شده به بتن توسط الیاف حافظه‌دار شکلی، بالا بودن چسبندگی این الیاف با بتن می‌باشد. همچنین، با توجه به اینکه مقادیر تنش کمتر از استحکام کششی بتن (3.2MPa مطابق جدول 2) می‌باشند، بنابراین در این حالت جدایش الیاف از بتن در نتیجه شکست از نوع لغزشی می‌باشد. بر این اساس، می‌توان بیان نمود که در صورت استفاده از الیاف با قطر بزرگتر و یا طول مدفون شدگی بیشتر مکانیزم جدایش الیاف از بتن می‌تواند از جدایش لغزشی به جدایش خرابی تبدیل شود.

به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر پارامترهای مختلف الیاف بر مشخصه‌های چسبندگی الیاف با بتن در جدول 4 اثر طول مدفون شدگی، قطر الیاف و جنس آنها بر پاسخ بیرون کشیدگی از جمله نیروی بیرون کشیدگی و لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو در حالت‌های مختلف تحت بررسی نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که نیروی بیرون کشیدگی با افزایش قطر الیاف و طول مدفون شدگی برای هر دو نوع الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود برای الیاف با قطر 1mm، با افزایش عمق مدفون شدگی از 10mm به 30mm نیروی بیرون کشیدگی برای الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی به ترتیب در حدود 17 درصد و 14 درصد افزایش می‌یابد و در مقابل کاهش قطر الیاف باعث کاهش پارامترهای بیرون کشیدگی الیاف می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الیاف حافظه‌دار شکلی بیرون کشیدگی الیاف از بتن را تا حد قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

### 5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از روش المان محدود به بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف حافظه‌دار شکلی از بتن پلیمری پرداخته شد. اندرکنش بین الیاف با بتن پلیمری با استفاده از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک شبیه‌سازی و پارامترهای آن با استفاده از روش المان محدود معکوس و استفاده از نتایج تست تجربی انجام پذیرفته بر روی یک نمونه الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی به دست آمد. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل المان محدود با نتایج تست تجربی انجام شده، تأثیر جنس الیاف، قطر و عمق مدفون شدگی آنها بر مشخصه‌های چسبندگی الیاف با بتن مطالعه شد. نتایج برای الیاف فولادی و حافظه‌دار شکلی نشان می‌دهد که به ازای مشخصات یکسان الیاف، نیروی چسبندگی الیاف حافظه‌دار شکلی بیشتر از الیاف متناظر فولادی می‌باشد. به عنوان نمونه، برای الیاف با قطر 1mm و طول مدفون شدگی 10mm، حداکثر نیروی چسبندگی الیاف حافظه‌دار شکلی در حدود 15 درصد بیشتر از الیاف متناظر فولادی است که علت این امر را می‌توان در نیروهای چسبندگی سطحی قوی بین الیاف حافظه‌دار شکلی و بتن دانست. علاوه بر این، جابجایی جدایش برای الیاف حافظه‌دار شکلی و فولادی با قطر 1mm به ترتیب برابر با 0.85mm و 0.51mm می‌باشد. بنابراین استفاده از الیاف حافظه‌دار شکلی باعث افزایش حدود 40% در جابجایی جدایش الیاف می‌شود که مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که الیاف حافظه‌دار شکلی دارای مقاومت پیوستگی بهتری نسبت به الیاف متناظر فولادی هستند و عملکرد بتن را به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌دهند.

### 6- مراجع

- [1] Vahidi Pashaki, P., Pouya, M. and Maleki, V. A., "High-Speed Cryogenic Machining of the Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposites: Finite Element Analysis and Simulation" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 232, No. 11, pp. 1927-1936, 2018.
- [2] Ghaderi, M., Maleki, V. A. and Andalibi, K., "Retrofitting of Unreinforced Masonry Walls under Blast Loading by Frp and Spray on Polyurea" Fen Bilimleri Dergisi (CFD), Vol. 36, No. 4, 2015.
- [3] Aghamohammadi, H., Abbandanak, S. N. H. and Siadati, S. M. H., "Effect of Various Surface Treatment Methods on the

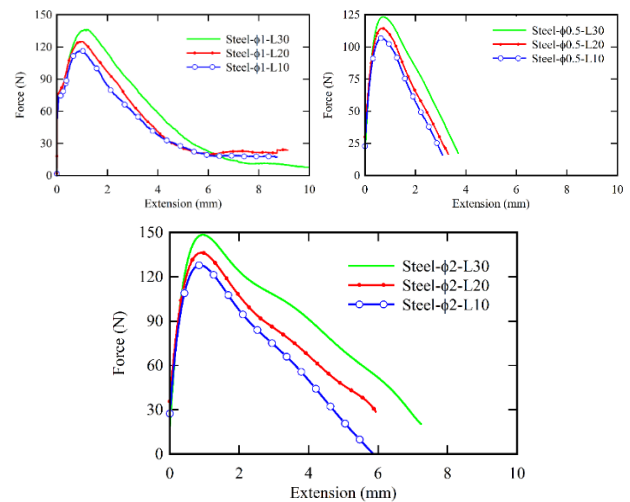


Fig. 9. Load-slip curves for different type of steel fibers

شکل 9 منحنی نیرو-لغزش برای نمونه‌های مختلف الیاف فولادی

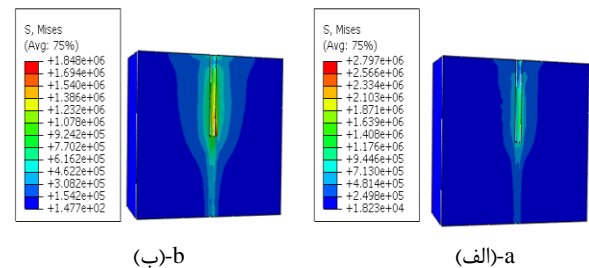


Fig. 10. Stress distribution in concrete for the pullout force of 100N in samples of (a) SMA-φ2-L30 and (b) Steel-φ2-L30

شکل 10 توزیع تنش انتقال شده توسط الیاف به بتن به ازای نیروی بیرون کشیدگی 100N در نمونه‌های (الف) SMA-φ2-L30 و (ب) Steel-φ2-L30

جدول 4 اثر طول مدفون شدگی، قطر الیاف و جنس آنها بر نیروی بیرون کشیدگی و لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو

Table 4. Effect of embedded length, fiber diameter and material type of the fiber on the pullout force and displacement

نوع الیاف	طول مدفون شدگی (mm)	قطر الیاف (mm)	جابجایی لغزش (mm)	نیروی بیرون کشیدگی (N)
حافظه‌دار فولادی	10	0.5	0.87	118.36
حافظه‌دار فولادی	20	0.5	0.65	106.93
حافظه‌دار فولادی	30	0.5	0.91	128.47
حافظه‌دار فولادی	10	1.0	0.68	114.56
حافظه‌دار فولادی	20	1.0	1.03	141.67
حافظه‌دار فولادی	30	1.0	0.72	123.25
حافظه‌دار فولادی	10	2.0	0.73	131.82
حافظه‌دار فولادی	20	2.0	0.66	116.87
حافظه‌دار فولادی	30	2.0	0.83	146.89
حافظه‌دار فولادی	10	2.0	0.91	125.35
حافظه‌دار فولادی	20	2.0	1.43	157.97
حافظه‌دار فولادی	30	2.0	1.18	136.48
حافظه‌دار فولادی	10	2.0	0.98	162.03
حافظه‌دار فولادی	20	2.0	0.84	126.45
حافظه‌دار فولادی	30	2.0	1.35	174.54
حافظه‌دار فولادی	10	2.0	0.91	136.97
حافظه‌دار فولادی	20	2.0	1.67	195.34
حافظه‌دار فولادی	30	2.0	0.94	148.18

- with Shape Memory Alloy Wires“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 363-374, 2018. (In Persian)
- [21] Osfour, M., Rahmani, O. and Zamani, M. R., “An Experimental Investigation on Nitinol Shape Memory Alloy Reinforced Glares against Charpy Low Velocity Impact“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 403-414, 2018. (In Persian)
- [22] Khalili, S. M. R. and Akbari, T., “An Investigation on the Static Buckling Behavior of Laminated Cylindrical Composite Shells with Embedded Sma Wires by Experiment“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 551-564, 2019. (In Persian)
- [23] Chang, W. S. and Araki, Y., “Use of Shape-Memory Alloys in Construction: A Critical Review“ in *Proceeding of ICE Publishing*, pp. 87-95, 2018.
- [24] 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“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-8, 2019. (In Persian)
- [25] Freed, Y., Aboudi, J. and Gilat, R., “Thermomechanically Micromechanical Modeling of Prestressed Concrete Reinforced with Shape Memory Alloy Fibers“ *Smart materials and structures*, Vol. 16, No. 3, pp. 717, 2007.
- [26] Alam, M. S., Youssef, M. A. and Nehdi, M., “Analytical Prediction of the Seismic Behaviour of Superelastic Shape Memory Alloy Reinforced Concrete Elements“ *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 12, pp. 3399-3411.
- [27] Abdulridha, A. and Palermo, D., “Behaviour and Modelling of Hybrid Sma-Steel Reinforced Concrete Slender Shear Wall“ *Engineering Structures*, Vol. 147, pp. 77-89, 2017.
- [28] Moser, K., Bergamini, A., Christen, R. and Czaderski, C., “Feasibility of Concrete Prestressed by Shape Memory Alloy Short Fibers“ *Materials and structures*, Vol. 38, No. 5, pp. 593-600, 2005.
- [29] Zhou, B., Yoon, S.-H. and Leng, J.-S., “A Three-Dimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloy“ *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 9, pp. 32-45, 2009.
- [30] Fugazza, D., “Experimental Investigation on the Cyclic Properties of Superelastic Niti Shape-Memory Alloy Wires and Bars” Individual study, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk ROSE School, Pavia, Italy, 2005.
- Flexural Properties of Fiber Metal Laminates“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 495-502, 2020. (In Persian)
- [4] kamani, R., Kamali Dolatabadi, M., Asghariani Jeddi, A. A. and Nasrollahzadeh, K., “Increasing the Efficiency of Carbon Fiber Bundles in Reinforcing Fine Grained Concrete: An Experimental Study of Flexural Bearing Capacity“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 2, pp. 310-318, 2019. (In Persian)
- [5] A, S. and Kabir, M., Numerical study of the effect of glass fiber sizing reinforcement by randomly distributed CNTs on the glass/epoxy composite transverse mechanical properties', *Journal of Science and Technology of Composites*, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 1, No. 1, pp. 45-52, 2014. (In Persian)
- [6] Sui, L., Luo, M., Yu, K., Xing, F., Li, P., Zhou, Y. and Chen, C., “Effect of Engineered Cementitious Composite on the Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer and Concrete“ *Composite Structures*, Vol. 184, pp. 775-788, 2018.
- [7] Abbass, W., Khan, M. I. and Mourad, S., “Evaluation of Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete with Different Strengths of Concrete“ *Construction and Building Materials*, Vol. 168, pp. 556-569, 2018.
- [8] Leone, M., Centonze, G., Colonna, D., Micelli, F. and Aiello, M., “Fiber-Reinforced Concrete with Low Content of Recycled Steel Fiber: Shear Behaviour“ *Construction and Building Materials*, Vol. 161, pp. 141-155, 2018.
- [9] Wille, K., Naaman, A. E., El-Tawil, S. and Parra-Montesinos, G. J., “Ultra-High Performance Concrete and Fiber Reinforced Concrete: Achieving Strength and Ductility without Heat Curing“ *Materials and structures*, Vol. 45, No. 3, pp. 309-324, 2012.
- [10] Abdallah, S., Fan, M. and Rees, D. W., “Analysis and Modelling of Mechanical Anchorage of 4d/5d Hooked End Steel Fibres“ *Materials & Design*, Vol. 112, pp. 539-552, 2016.
- [11] Abazadeh, B. and Azimpour Shishevan, F., “An Experimental Investigation of the Low Velocity Impact Behavior of Woven Carbon-Fiber-Epoxy Composites“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 571-580, 2020.
- [12] Adli, A., Shelesh-Nezhad, K., Khoshnavan Azar, M. R. and Mohammadi-Aghdam, M., “The Effect of Vascular Self-Healing Orientation on Healing Efficiency of Epoxy/Glass Fiber Composite“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, pp. 32-43, 2020. (In Persian)
- [13] Abdollahi, M., Fallahnejad, M. and Zamani, A., “Investigation the Flexural Behavior of Fiber Metal Laminates Containing Glass and Kevlar Fibers Subjected to Thermal Cycling“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 1, pp. 54-67, 2020. (In Persian)
- [14] Abdallah, S. and Rees, D. W., “Comparisons between Pull-out Behaviour of Various Hooked-End Fibres in Normal-High Strength Concretes“ *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 13, No. 1, pp. 27, 2019.
- [15] Ellis, B., McDowell, D. and Zhou, M., “Simulation of Single Fiber Pullout Response with Account of Fiber Morphology“ *Cement and Concrete Composites*, Vol. 48, pp. 42-52, 2014.
- [16] Alwan, J. M., Naaman, A. E. and Guerrero, P., “Effect of Mechanical Clamping on the Pull-out Response of Hooked Steel Fibers Embedded in Cementitious Matrices“ *Concrete Science and Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 15-25, 1999.
- [17] Yoo, D.-Y. and Kim, S., “Comparative Pullout Behavior of Half-Hooked and Commercial Steel Fibers Embedded in Uhpcc under Static and Impact Loads“ *Cement and Concrete Composites*, Vol. 97, pp. 89-106, 2019.
- [18] Cunha, V. M., Barros, J. A. and Sena-Cruz, J. M., “Pullout Behavior of Steel Fibers in Self-Compacting Concrete“ *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-9, 2009.
- [19] Khalili, S. M. and Saeedi, A., “Micromechanics Modeling and Experimental Characterization of Shape Memory Alloy Short Wires Reinforced Composites“ *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-6, 2015. (In Persian)
- [20] Mojabi, S. S. and Kheirikhah, M. M., “Modeling and Intelligent Control of Vibration of Cantilever Composite Plate Embedded