

بررسی اثر پارامترهای طراحی بر رفتار تیرهای بتنی مقاوم سازی شده توسط آلیاژهای حافظه دار شکلی

حسام الدین درویش^۱، مسلم شاهوردی^۲، مهدی قاسمیه^{۳*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

*m.ghassemieh@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳

چکیده

گسیختگی برشی در تیرهای بتن مسلح، به صورت ناگهانی و ترد رخ می‌دهد. به همین دلیل تلاش می‌شود تا با مقاوم‌سازی برشی سازه‌های آسیب دیده، سازه‌های ساخته شده با اشتباهات مهندسی و اجرایی و یا با افزایش ظرفیت برشی مقاطع از اینگونه خرابی‌ها اجتناب شود. مطالعات زیادی روی مقاوم‌سازی اعضای بتنی با استفاده از الیاف پلیمر کامپوزیت و همچنین استفاده از نوارهای فولادی انجام گرفته است. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) مصالحی نوین و هوشمند می‌باشند که به دلیل رفتارهای منحصر به فرد خود برای مقاصد مقاوم‌سازی در مهندسی عمران مورد توجه قرار گرفته است. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن (Fe-SMA) به دلیل خاصیت حافظه شکلی و قیمت مناسب در فعالیت‌های عمرانی مورد توجه قرار گرفته‌اند و در سال‌های اخیر نظر پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. مزیت آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نسبت به مصالح مقاوم‌سازی شده با الیاف پلیمر کامپوزیت، سهولت در اعمال پیش‌تنیدگی می‌باشد. علت این موضوع آن است که پیش‌تنیدگی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی از طریق حرارت دادن آن‌ها صورت می‌گیرد و نیازی به استفاده از ابزار مکانیکی و هیدرولیکی نمی‌باشد. هدف انجام این پژوهش، بررسی کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن و خاصیت پیش‌تنیدگی آن‌ها برای مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح می‌باشد. برای این منظور و بر مبنای آزمایش‌های انجام شده در ادبیات فنی، به مدل‌سازی عددی و تحلیل تیرهای تی-شکل ۵،۲ متری که با میله‌هایی از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن مقاوم‌سازی برشی شده‌اند پرداخته می‌شود. برای بررسی عددی رفتار برشی تیرها از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار، هماهنگی خوبی با نتایج حاصل شده از آزمایش را نشان می‌دهند. نتایج حاصل شده از تحلیل‌های این روش نوین مقاوم‌سازی که برای اولین بار انجام شده است بیانگر افزایش چشمگیر در مقاومت برشی و همچنین کاهش تنش در خاموت‌ها می‌باشد. استفاده از قابلیت پیش‌تنیدگی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی سبب می‌شود تا تسلیم خاموت‌ها و تشکیل ترک‌های برشی با تاخیر همراه باشد و همچنین ضخامت ترک‌ها نیز کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: مقاوم‌سازی برشی، مدل‌سازی عددی تیرهای بتن مسلح، آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن، پیش‌تنیدگی

سن قابل توجه تعداد بسیار زیادی از سازه‌ها به عنوان نمونه پل‌ها، هم‌زمان با افزایش میزان ترافیک به طور مداوم و تغییر در فلسفه طراحی (به عنوان نمونه مهندسی زلزله) باعث شده است که تعمیر و نگهداری آن‌ها مورد نیاز باشد و به همین علت مقاوم سازی در طول سال‌ها بیشتر و بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [1]. در تیرهای بتن مسلح، ترک‌های برشی به ویژه در نواحی تکیه‌گاه تیر که دارای بیشینه نیروی برشی ناشی از بارگذاری و نیروی حاصل از زلزله می‌باشند، شکستگی و خرابی ترد دارند. به همین دلیل تلاش می‌شود تا با مقاوم‌سازی برشی از این‌گونه خرابی‌ها اجتناب شود و ظرفیت برشی مقاطع افزایش یابد. امروزه مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح توسط الیاف پلیمرکامپوزیت^۱ (FRP) و یا الیاف کربن پلیمر کامپوزیت^۲ (CFRP) روشی مرسوم محسوب می‌شود. اما به دلیل آن‌که پیش‌تنیده کردن آن‌ها امر دشواری است، پیشنهاد می‌شود که مقاوم‌سازی توسط آلیاژهای حافظه‌دار شکلی^۳ (SMAs) صورت گیرد. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی مصالحی نوین و هوشمند^۴ هستند که به دلیل رفتارهای منحصر به فردی مثل قابلیت تغییر فاز بازگشت‌پذیر که سبب می‌شود بتوانند تغییر شکل‌های زیادی را متحمل شوند و با بارگذاری یا باربرداری به همراه اعمال گرما به شکل اولیه خود بازگردند، برای مقاصد مقاوم‌سازی در مهندسی عمران مورد توجه قرار گرفته‌اند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر مبنای نوع آلیاژ، پدیده‌های مختلفی مانند اثر حافظه‌ی شکلی^۵، ابر کشسان^۶ و قابلیت استهلاک انرژی بالا را از خود نشان می‌دهند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن^۷ (Fe-SMA) به دلیل خاصیت حافظه شکلی و قیمت مناسب در فعالیت‌های عمرانی مورد توجه قرار گرفته‌اند و در سالیان اخیر نظر پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. مایر^۸ و همکاران در اواسط دهه ۱۹۸۰ تحقیقات خود در زمینه‌ی مقاوم‌سازی سازه‌ها با استفاده از نصب خارجی CFRP شروع کردند که این اولین کار تحقیقاتی در زمینه مقاوم‌سازی با استفاده از FRP در سطح جهانی بود [2]. پیش‌تنیده کردن بتن با استفاده از کابل‌های فولادی از اوایل دهه ۱۹۰۰ شروع شده است [2]. از سال ۱۹۴۵ تعداد پیشرفت‌ها و کاربردهای بتن پیش‌تنیده به طور چشمگیری

افزایش یافته است [2]. در دهه اخیر، پژوهش‌هایی در رابطه با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سازه‌ها برای مقاصد مقاوم‌سازی انجام شده است. شاهرودی و همکاران [3] در سال ۲۰۱۶، تیر بتنی را با روش NSM با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن مقاوم‌سازی کردند. این بررسی نشان داد که استفاده از نوارهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن نصب شده در نزدیک سطح به عنوان عناصر پیش‌تنیدگی در تیرهای بتنی به خوبی کار می‌کند. بار ترک‌خوردگی تیرهایی که با نوارهای پیش‌تنیده شده آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن تقویت شده بودند به طور متوسط ۸۰٪ بیشتر از بار ترک خوردگی تیرهایی بود که با همان آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن بدون پیش‌تنیدگی تقویت شده بود. در سال ۲۰۱۶ شاهرودی و همکاران [4] تیر بتنی را با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن به روش جاسازی شده در لایه شاتکریت را آزمایش کردند. رفتار تیر در مرحله قابلیت سرویس توسط میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن پیش‌تنیده به طور قابل توجهی بهبود یافته است و بار ترک‌خوردگی با این روش افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که استفاده از میله‌های آجدار آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن جاسازی شده در لایه شاتکریت موفقیت آمیز است و این روش مقاوم‌سازی به خوبی عمل می‌کند. ابوعلی و همکاران [5] مقاوم‌سازی خمشی با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نصب شده در نزدیک سطح را به وسیله مدل‌سازی غیرخطی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه آن افزایش ظرفیت خمشی، افزایش بار ترک‌خوردگی و کاهش خیز تیر بود. دولت آبادی و همکاران [6] اقدام به مدل‌سازی غیرخطی تیر بتنی مقاوم‌سازی شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن جاسازی شده در لایه‌ای از شاتکریت کرد. نتایج تجزیه و تحلیل در مقایسه با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که مدل‌های اجزای محدود با موفقیت بار در مقابل پاسخ جابه‌جایی وسط دهانه را پیش‌بینی می‌کنند. در سال ۲۰۱۹ ریوس^۹ و همکاران [7] با استفاده از آلیاژ نیتینول (Ni-Ti) یک نمونه کوچک از تیر بتن مسلح را مقاوم‌سازی برشی کردند. نتایج

6. Super elasticity
7. Iron-based Shape Memory Alloy
8. Meier
9. Rius

1. Fiber Reinforced Polymer
2. Carbon-Fiber Reinforced Polymer
3. Shape Memory Alloys
4. Smart materials
5. Shape memory effect

تجربی، افزایش مقاومت برشی در حدود ۹۰٪ و ۱۱۵٪ (بسته به پیکربندی تقویت کننده‌ها) تیرهای مقاوم سازی شده و همچنین شکست برشی شکل پذیرتر را نشان می‌دهند. این نتایج عملکرد امیدوار کننده این سیستم را نشان می‌دهد. به شکلی که در تیرهای مقاوم سازی شده هم مقاومت برشی افزایش یافته و هم خیز تیرها کمتر شده است. همچنین این تست‌ها نشان می‌دهد که در تیرهای از قبل ترک خورده، مقدار بار برشی قابل تحمل تیر به میزان ۹۸٪ توسط این سیستم مقاوم سازی فعال افزایش یافته است و به طور کلی نتیجه استفاده از نیتینول به عنوان مقاوم سازی برشی امیدوار کننده است. لوئیس^۱ و همکاران [8] در سال ۲۰۱۹ یک مطالعه تجربی روی تیر بتن مسلح مقاوم سازی شده با نوارهایی از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی بر پایه آهن انجام دادند. این نوارها به لطف اثر حافظه شکلی آلیاژهای حافظه دار بر پایه آهن، می‌توانند سطح مقطع تیرها را به صورت عرضی پیش تنیده یا محصور کنند بدون این که نیروی پیش تنیدگی را اعمال کنند. ده آزمایشی که در تیرهای مقیاس کوچک انجام شده است، افزایش واضح مقاومت برشی تیرهای مقاوم سازی شده را نشان می‌دهند. تیرهای مرجع در برش از کار افتادند، اما تیرهایی که با نوارهایی به عرض ۲۵ میلی‌متر تقویت شدند، ۸۳٪ بار بیشتری را تحمل کردند و با تغییر حالت خرابی و نشان دادن شکل پذیری بالا از کار افتادند. تیرهای تقویت شده با نوارهای عرض ۱۲٫۵ میلی‌متر به طور متوسط با افزایش ۶۵٪ مقاومت برشی در مقایسه با تیرهای مرجع از کار افتادند. برای تیرهایی که با نوارهای فعال شده مقاوم سازی می‌شوند، ظهور ترک‌های برشی به تأخیر می‌افتد، ترک‌های برشی کمتری به وجود می‌آید و خیز تیرها به طور قابل توجهی پایین تر است که این‌ها مزایای روش فعال را نشان می‌دهد. در سال ۲۰۲۰ کلادرا^۲ [9] و همکاران یک تیر تی-شکل بتن مسلح را با

نوارهای آلیاژ حافظه دار شکلی مقاوم سازی کردند. نتایج آزمایش افزایش تقریباً ۳۰٪ مقاومت برشی تیرها را نشان می‌دهد. رویز پینلا^۳ و همکاران [10] در سال ۲۰۲۰ با استفاده از اجزا محدود، تیر بتن مسلح مقاوم سازی شده توسط نوارهای آلیاژ حافظه دار شکلی بر پایه آهن را مدل سازی کردند که با این مدل سازی، افزایش مقاومت برشی تیر بتن مسلح مقاوم سازی شده را مشاهده کردند. در سال ۲۰۲۱ سوارز^۴ و همکاران دیوارهای برشی بتنی متوسطی را که با استفاده از آلیاژ نیکل-تیتانیوم تقویت شده بودند مدل سازی عددی کردند. نتایج نشان می‌دهد که دیوارهای تقویت شده با آلیاژ حافظه دار، انرژی قابل توجهی را تلف می‌کند اما کمتر از دیوارهای تقویت شده با فولاد. همچنین نسبت به دیوارهای تقویت شده با فولاد، سختی مؤثر کاهش یافته است [11]. بایکیو^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۲ تیرهای بتنی مقاوم سازی شده در خمش توسط آلیاژ Ni-Ti را مدل سازی اجزا محدود کردند. نتایج این مدل سازی نشان می‌دهد که تحت خمش در تیر تقویت شده توسط آلیاژ حافظه دار شکلی، خیز باقیمانده در مقایسه با روش‌های تقویت سنتی کاهش می‌یابد [12]. این مقاله برای اولین بار رفتار تیرهای بتنی مقاوم سازی شده در برش توسط خاموت‌هایی از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی بر پایه آهن را مدل سازی می‌کند و به بررسی رفتار آن‌ها می‌پردازد.

۲- آلیاژهای حافظه دار شکلی

آلیاژهای حافظه دار شکلی مانند سایر آلیاژها و فلزات، بیش از یک ساختار کریستالی دارند. به این خاصیت چند شکلی^۶ گفته می‌شود. در اینگونه آلیاژها و فلزات، فاز یا ساختار غالب به درجه حرارت و تنش وارد بر آن‌ها بستگی دارد [13]. آلیاژهای حافظه دار شکلی دارای دو حالت کریستالی به نام‌های مارتنزیت^۷ و آستنیت^۸ هستند. حالت آستنیت حالت اصلی با تقارن بالا است

5. Bykiv
6. Polymorphism
7. Martensite
8. Austenite

1. Luis
2. Cladera
3. Ruis-Pinilla
4. Soares

قدیمی‌تر پیش‌تندگی، استفاده از خاصیت حافظه شکلی این آلیاژها مزایایی مانند عدم کاهش نیروی پیش‌تندگی به علت توزیع یکنواخت نیروی کششی در طول تاندون پیش‌تندگی از طریق مهار شدن در بتن، وجود ندارد و روش مناسبی برای پیش‌تند کردن اعضای بتنی قوسی شکل می‌باشند [15].

۳- مدل اجزا محدود

برای مدل‌سازی اجزا محدود تیرهای بتنی مقاوم‌سازی شده در برش، از تیرهای آزمایش شده توسط چادرسی^۲ و همکاران به عنوان مبنا استفاده شده است [1]. در این آزمایش‌ها پنج تیر بتنی تی-شکل مشابه تحت بارگذاری استاتیکی در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار می‌گیرند. تیر شماره ۱ به عنوان تیر مبنا در نظر گرفته شده است و دارای هیچ مقاوم‌سازی نیست. تیرهای شماره ۲ و ۳ دارای سه میله یو-شکل^۳ از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن هستند به صورتی که در تیر شماره ۲ آلیاژها فعال شده است. تیرهای شماره ۵ و ۶ هرکدام دارای پنج میله یو-شکل از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن هستند و در تیر شماره ۵ آلیاژها فعال شده‌اند (شکل‌های ۲ و ۳).

شکل ۲. مقطع عرضی تیرهای مقاوم‌سازی شده [1]

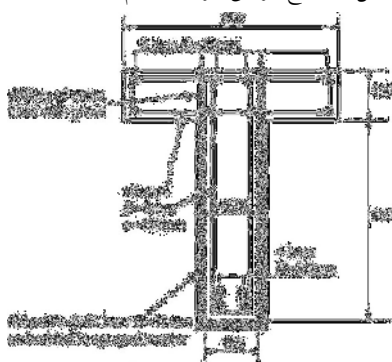


Fig. 2. Cross-section of the test beams including the strengthening method [1]

که در دماهای بالا و تنش‌های کم پایدار است. در حالی که حالت مارتنزیت حالت محصول و با تقارن کم است که در دماهای پایین و تنش‌های زیاد پایدار است. با اعمال حرارت و یا تنش می‌توان این دو فاز را به یکدیگر تبدیل کرد. به این تبدیل برگشت‌پذیر فازها، تبدیل مارتنزیتی^۱ می‌گویند [14]. به دلیل پایدار بودن مارتنزیت در دماهای پایین، زمانی که آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در دمایی کمتر از A_s تحت بارگذاری قرار بگیرد، پس از باربرداری تغییر حالت صورت نمی‌گیرد. همچنین کرنش خمیری ایجاد شده در مارتنزیت به هنگام باربرداری قابل بازگشت نیست. با این حال، کرنش پسماند تولید شده می‌تواند با اعمال دمایی بالاتر از A_f کاملاً حذف شود. به این دلیل که این مواد شکل اولیه خود را به یاد دارند و می‌توانند پس از اعمال دما به شکل اولیه خود بازگردند، به این رفتار، رفتار حافظه شکلی یا شبه‌خمیری می‌گویند (شکل ۱) [13].

شکل ۱. رفتار حافظه شکلی در حالت تنش صفر [13]

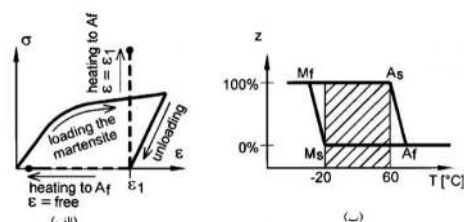


Fig. 1. Shape memory effect in the cases of free recovery and constrained recovery [13]

آلیاژهای فراوانی وجود دارند که خاصیت حافظه شکلی را از خود نشان می‌دهند. امروزه آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن و به ویژه آلیاژهای از نوع Fe-Mn-Si به دلیل دارا بودن پتانسیل‌های زیادی مثل هزینه کمتر، هیستریزیس گرمایی بزرگتر و سختی بیشتر به نسبت Ni-Ti، در زمینه ساخت و ساز بیشتر مورد اقبال قرار گرفته‌اند. همچنین این آلیاژها دارای مقاومت خوردگی مناسب، قابلیت کارپذیری کافی و ویژگی‌های جوش‌پذیری خوب می‌باشند. این آلیاژها برای اعمال پیش‌تندگی در سازه‌ها بسیار مفید هستند. در مقایسه با روش‌های

برای تعریف رفتار فشاری تک‌محوره بتن در نرم‌افزار آباکوس، از روش هوگنستاد اصلاح شده استفاده شده است (رابطه ۱).

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_c^{(1)} &= E_{c0} \varepsilon_c && \text{for } \sigma_c < 0.4 f'_c \\ \sigma_c^{(2)} &= f'_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c'} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c'} \right)^2 \right] && \\ \sigma_c^{(3)} &= f'_c - \frac{f'_c (\varepsilon_c - \varepsilon_c')^2}{(\varepsilon_{c, \max} - \varepsilon_c')^2} && \text{for } \varepsilon_c \leq \varepsilon_c' \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\varepsilon_c' = \frac{2 f'_c}{E_{c0}}$$

در این روابط σ_c تنش فشاری در هر نقطه، ε_c کرنش فشاری در هر نقطه، E_{c0} ضریب کشسانی، $\varepsilon_{c, \max}$ کرنش بیشینه و ε_c' کرنش در تنش بیشینه می‌باشند. برای تعریف داده‌های آسیب فشاری در نرم‌افزار از رابطه ارائه شده توسط بیرتل^۲ و مارک^۳ [16] استفاده شد که به شکل رابطه ۳ است.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad \varepsilon_c^{pl} = b_c \varepsilon_c^{in}$$

در این رابطه d_c پارامتر آسیب فشاری، σ_c تنش فشاری، E_c ضریب کشسانی بتن، ε_c^{pl} کرنش خمیری فشاری، ε_c^{in} کرنش خمیری و b_c برابر با ۰٫۷ است. همچنین برای تعریف رفتار کششی از روش انرژی شکست و رابطه ی کورنلیسن^۴ و همکاران [17] که یک تابع نمایی است استفاده می‌شود. رابطه‌های ۵ تا ۷ این تابع را نشان می‌دهند.

$$\frac{\sigma}{f_t} = f(\omega) - \frac{\omega}{\omega_c} f(\omega_c) \quad (5)$$

$$f(\omega) = \left[1 + \left(\frac{c_1 \omega}{\omega_c} \right)^3 \right] \exp \left(-\frac{c_2 \omega}{\omega_c} \right) \quad (6)$$

$$\omega_c = 5.14 \frac{G_f}{f_t} \quad (7)$$

در این روابط ω بازشدگی ترک، ω_c بازشدگی نهایی ترک که در آن تنش انتقال نمی‌یابد، G_f انرژی شکست بتن، c_1 و

شکل ۳. هندسه ی تیرها [1]

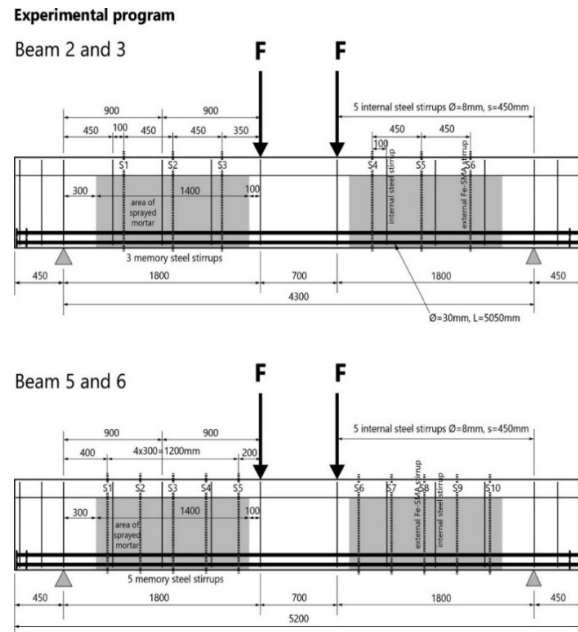


Fig. 3. Geometry of the beams [1]

۳-۱- مدل سازی رفتار مصالح

۳-۱-۱- بتن و شاتکریت

در این پژوهش از روش بتن پلاستیک تخریب شونده^۱ (CDP) برای مدل‌سازی رفتار بتن و شاتکریت استفاده شده است. زیرا این روش توانایی مدل‌سازی بتن و سایر مواد شبه ترد در انواع سازه‌ها را فراهم می‌کند و نمایانگر رفتار غیر کشسان مواد است. جدول (۱) پارامترهای مورد استفاده در این روش را نمایش می‌دهد. مقادیر پارامترهای پلاستیسته در مدل CDP بر اساس مقادیر پیشنهادی در نرم‌افزار تخمین زده می‌شود و سپس با استفاده از حساسیت سنجی مقادیر مناسب لحاظ می‌شود تا از بهترین هماهنگی با نتایج تجربی اطمینان حاصل شود.

جدول ۱. پارامترهای خمیری اعمال‌شده در مدل‌سازی

45	زاویه اتساع (ψ)
0.001	پارامتر ویسکوزیته (μ)
0.1	خروج از مرکزیت (ε)
1.16	نسبت تنش (σ_{b0}/σ_{c0})
0.667	شکل سطح تسلیم (K_c)

Table 1. Plasticity parameters used in the modeling

3. Mark
4. Cornelissen

1. Concrete Damaged Plasticity
2. Birtel

برابر با 300 MPa در آن‌ها ایجاد می‌شود. نمودار تنش-کرنش آلیاژهای حافظه‌دار شکلی فعال شده در قبل از ناحیه دارای سختی کم، به صورت منحنی می‌باشد اما در این‌جا برای ساده سازی به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. همچنین شیب این نمودار برابر با 41.5 GPa اعمال می‌شود.

شکل ۴. نمودار تنش-کرنش آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن

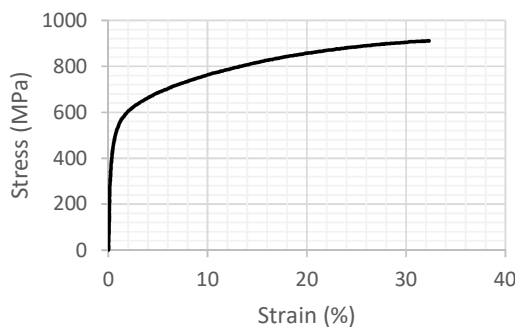


Fig. 4. Stress-strain curve of Fe-SMA

۳-۲- اندرکنش بین مصالح

برای اعمال اندرکنش بین بتن و میلگردها، بتن و آلیاژهای حافظه‌دار و همچنین شاتکریت و آلیاژهای حافظه‌دار از روش المان مدفون^۳ استفاده شده است. در این روش درجات آزادی المان مدفون به مقدار حاصل از درونیابی مقادیر المان میزبان مقید می‌شوند. برای اندرکنش بین بتن و شاتکریت، از آن‌جایی که لغزشی بین آن‌ها در آزمایش مشاهده نشده و کاملاً به هم چسبیده‌اند از تماس مقید^۴ استفاده شده است. برای اعمال این اندرکنش معمولاً اعضای که دارای ضریب کشسانی بیشتری هستند به عنوان Master و اعضای که ضریب کشسانی کمتری دارند به عنوان Slave معرفی می‌شوند.

۳-۳- شرایط بارگذاری و تکیه‌گاهی

برای مدل‌سازی تیرها در نرم افزار آباکوس به علت وجود دو صفحه تقارن و صرفه‌جویی در زمان و هزینه محاسبات، تنها یک چهارم تیر مدل می‌شود. در هر کدام از این صفحه‌های تقارن، جابه‌جایی عمود بر صفحه و دوران‌های داخل صفحه برابر با صفر قرار داده می‌شوند. همچنین در محل تکیه‌گاه غلظتی درجه آزادی انتقالی در جهت قائم نیز برابر با صفر قرار داده می‌شود. بارگذاری را می‌توان به دو صورت نیرو-کنترل و یا جابه‌جایی-کنترل اعمال کرد که برای این مدل‌سازی،

c_2 ثابت‌های ماده که برای بتن با وزن مخصوص معمولی به ترتیب برابر با ۳ و ۶,۹۳ هستند. برای تعیین انرژی شکست از رابطه‌ی fib bulletin 42 استفاده شده است (رابطه ۸).

$$G_F = G_{Fo} (1 - 0.77 \frac{f_{cmo}}{f_{cm}}) \quad (8)$$

در این رابطه G_{Fo} برابر با 0.18 N/mm و f_{cmo} برابر با 10MPa می‌باشد و f_{cm} مقاومت فشاری متوسط بتن است. برای تعریف داده‌های آسیب کششی در آباکوس، از رابطه پاولویک^۱ و همکاران (18) استفاده شده است. رابطه ۹ این رابطه را نشان می‌دهد.

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (9)$$

در این رابطه d_t پارامتر آسیب کششی، σ_t تنش کششی و f_t مقاومت کششی بیشینه هستند.

۲-۱-۳- فولاد

برای مدل‌سازی رفتار فولاد از مدل سخت‌شدگی همسان‌گرد^۲ استفاده شده است. مشخصات مکانیکی فولادها مانند جدول (۲) است.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی فولادها

فولاد	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ضریب کشسانی (GPa)	ضریب پواسون
میلگردهای خمش	843	945	205	0.3
سایر میلگردها	504	560	205	0.3

Table 2. Steel material property

۳-۱-۳- آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

برای مدل‌سازی آلیاژهای حافظه‌دار نیز همانند فولاد از مدل سخت‌شدگی همسان‌گرد استفاده شده است. نمودار تنش-کرنش آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن به صورت شکل 4 است. ضریب کشسانی آلیاژ حافظه‌دار غیرفعال برابر با 165 GPa قرار داده شده است. آلیاژهای حافظه‌دار در این آزمایش با دادن حرارت فعال شده و تنشی

است. برای میلگردها و آلیاژهای حافظه‌دار از المان خرابایی دونقطه‌ای با مرتبه خطی (T3D2) که فقط قابلیت انتقال نیروی محوری دارد استفاده شده است. جدول (۳) تعداد المان‌ها در سه ابعاد مختلف از المان‌های C3D8R را نمایش می‌دهد.

جدول ۳. حساسیت سنجی ابعاد المان‌ها

مدل	اندازه شبکه‌بندی (mm)	تعداد المانهای C3D8R
MS1	40	4810
MS2	25	17680
MS3	20	38280

Table 3. Mesh sensitivity analyses

۴- نتایج تحلیل عددی

در این قسمت نتایج تحلیل اجزا محدود غیرخطی ارائه می‌شود و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. اختلاف‌هایی که بین نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی وجود دارند می‌توانند ناشی از عدم قطعیت‌های موجود در آزمایش، پیچیدگی رفتاری مصالح به ویژه بتن و کاهش سختی تیرهای مورد آزمایش به علت وجود ترک‌های کوچک و یا بازشدن آن‌ها در طول بارگذاری باشد (جدول ۴).

همان‌گونه که از نسبت بیشینه نیروی آزمایش و بیشینه نیروی تحلیل عددی مشخص است، اختلاف کمی بین نتایج وجود دارد و این نشان از درستی مدل‌های عددی است.

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی

نام تیر	مقاومت فشاری سیلندری (MPa)	بیشینه نیروی آزمایش (kN)	بیشینه نیروی تحلیل عددی (kN)	نسبت بیشینه نیروی آزمایش به بیشینه نیروی تحلیل عددی
B1	40.89	313.4	341.9	0.92
B2	39.53	535.5	542.5	0.99
B3	36.98	532.7	551.5	0.97
B5	49.90	583.6	652.9	0.89
B6	35.79	583.0	600.2	0.97

Table 4. Comparison of numerical and laboratory analysis results

شکل ۵. نمودارهای بار-تغییر مکان تیرهای مدل شده

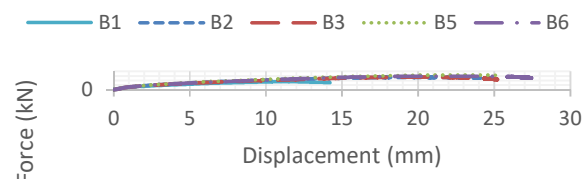


Fig. 5. Force-displacement diagram of beams

۵- درستی آزمایشی نتایج

شکل های (۵-۳۱) نمودارهای نیرو-تغییر مکان حاصل شده از مدل سازی عددی تیرها و مقایسه آن ها با نمودارهای حاصل شده از آزمایش را نمایش می دهند.

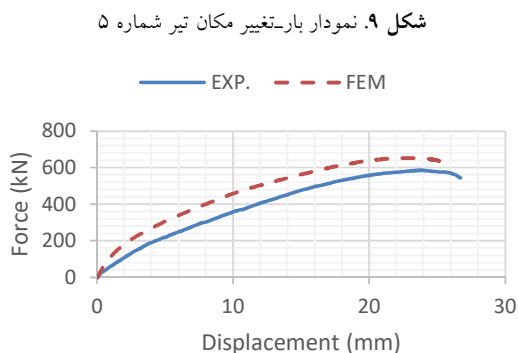


Fig. 9. Force-displacement diagram of beam No. 5

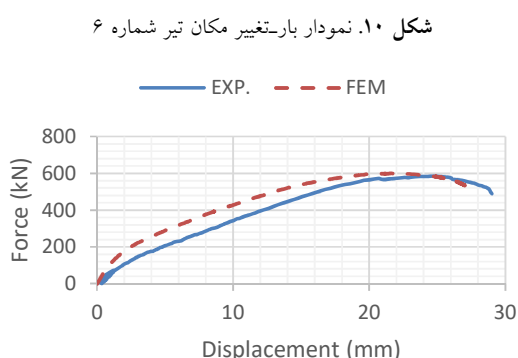


Fig. 10. Force-displacement diagram of beam No. 6

همان گونه که در شکل ها مشاهده می شود با شروع ترک خوردگی در مقاطع و کاهش سختی تیر، شیب نمودار کاهش می یابد و این تا جایی ادامه می یابد که تیر گسیخته شود. گسیختگی تیر در تمامی تیرها به علت گسیختگی برشی می باشد و در هیچ کدام از تیرها گسیختگی خمشی مشاهده نمی شود. همچنین در تمامی تیرها خاموت ها گسیخته می شوند ولی آلیاژهای حافظه دار گسیخته نمی شوند. همچنین مشاهده می شود که سختی تیرهای مدل شده از سختی تیرهای آزمایش بیشتر می باشد که علت آن می تواند وجود ترک های ریز در بتن تیرهای آزمایش شده و پیچیدگی های رفتاری بتن باشد. همچنین مانند تیرهای آزمایش شده، نقطه شکست تیرهای مدل شده که با افت در نمودارها مشخص است، با آغاز خرابی خاموت تیرها می باشد.

۶- مطالعات پارامتری

برای بررسی عملکرد عناصر سازه ای و ارزیابی آن ها نیاز به انجام آزمایش است. به دلیل آن که اجرای آزمایش های متعدد نیاز به گذشت زمان، امکانات و هزینه ی زیادی دارد، بررسی های عددی و تحلیلی

شکل ۶. نمودار بار-تغییر مکان تیر شماره ۱

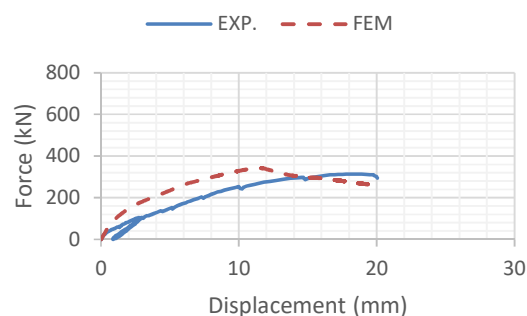


Fig. 6. Force-displacement diagram of beam No. 1

شکل ۷. نمودار بار-تغییر مکان تیر شماره ۲

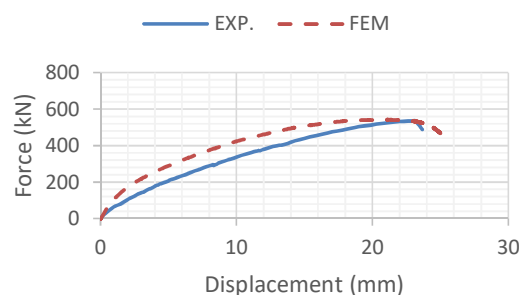


Fig. 7. Force-displacement diagram of beam No. 2

شکل ۸. نمودار بار-تغییر مکان تیر شماره ۳

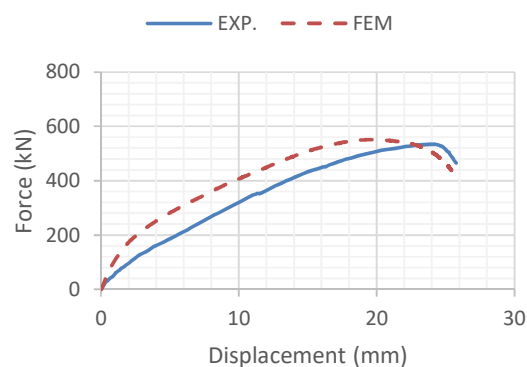


Fig. 8. Force-displacement diagram of beam No. 3

شکل ۱۳. نمودار نیرو-جابجایی در قطرهای مختلف آلیاژهای حافظه‌دار برای تیر شماره ۵

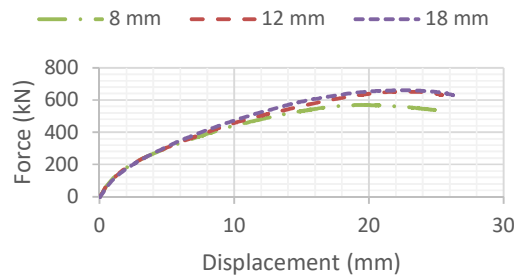


Fig. 13. Force-displacement diagram in different diameters of Fe-SMA for beam No. 5

شکل ۱۴. نمودار نیرو-جابجایی در قطرهای مختلف آلیاژهای حافظه‌دار برای تیر شماره ۶

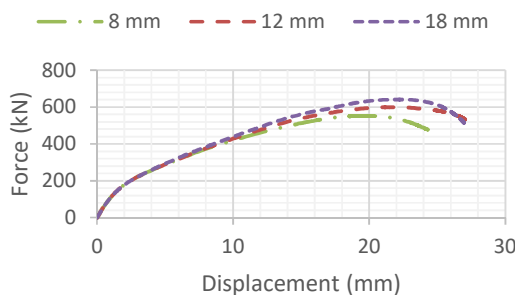


Fig. 14. Force-displacement diagram in different diameters of Fe-SMA for beam No. 6

۲-۶- اثر نیروی پیش‌تندگی

برای بررسی اثر نیروی پیش‌تندگی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی روی رفتار برشی تیرهای مقاوم‌سازی شده، در این قسمت علاوه بر مقدار ۳۰۰ مگاپاسکال، سه مقدار ۲۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شدند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش تنش بازگردانی در آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، تغییر محسوسی در ظرفیت نهایی تیرها به وجود نمی‌آید و تیرها در نیروهای اعمالی مشابهی گسیخته می‌شوند.

شکل ۱۵. نمودار نیرو-جابجایی در پیش‌تندگی‌های مختلف آلیاژهای حافظه‌دار برای تیر شماره ۲

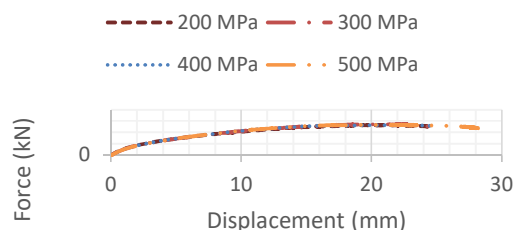


Fig. 15. Force-displacement diagram in different prestressing of Fe-SMA for beam No. 2

دارای اهمیت ویژه‌ای هستند. در قسمت قبل با استفاده از مدل‌سازی عددی تیرهای آزمایش شده و درستی‌آزمایی و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده، بهترین و بهینه‌ترین پارامترها و فرضیات برای مدل‌سازی عددی تیرهای مشابه در نرم‌افزار آباکوس مشخص شدند. در این بخش با استفاده از این پارامترها و فرضیات صورت گرفته به بررسی اثر قطرهای متفاوت آلیاژهای حافظه‌دار، بررسی اثر نیروی پیش‌تندگی در آلیاژهای حافظه‌دار و همچنین بررسی اثر ضخامت شاتکریت روی رفتار برشی تیرهای مشابه پرداخته می‌شود.

۶-۱- اثر قطر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

در این قسمت به منظور بررسی اثر قطر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی روی رفتار برشی تیرهای مقاوم‌سازی شده از تیرهایی با مشخصات هندسی مشابه با تیرهای فصل قبل استفاده می‌شود. برای این مدل‌سازی علاوه بر قطر ۱۲ میلی‌متر، از قطرهای ۸ و ۱۸ میلی‌متر برای آلیاژهای حافظه‌دار استفاده می‌شود. افزایش قطر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی تا مقداری مشخص، باعث افزایش ظرفیت تیر و همچنین کاهش نیروی وارد شده به خاموت‌ها می‌شود اما از مقداری به بعد تاثیری در مقاومت نهایی تیر ندارد و تیر در نیروهای مشابهی گسیخته می‌شود. همچنین شکل‌پذیری تیر با افزایش قطر آلیاژهای حافظه‌دار کاهش می‌یابد.

شکل ۱۱. نمودار نیرو-جابجایی در قطرهای مختلف آلیاژهای حافظه‌دار برای تیر شماره ۲

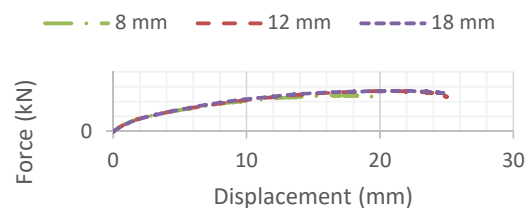


Fig. 11. Force-displacement diagram in different diameters of Fe-SMA for beam No. 2

شکل ۱۲. نمودار نیرو-جابجایی در قطرهای مختلف آلیاژهای حافظه‌دار برای تیر شماره ۳

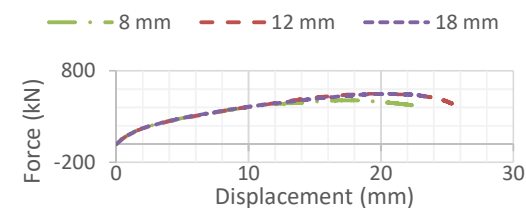


Fig. 12. Force-displacement diagram in different diameters of Fe-SMA for beam No. 3

شکل ۱۸. نمودار نیرو-جابجایی در ضخامت‌های مختلف شاتکریت برای تیر شماره ۳

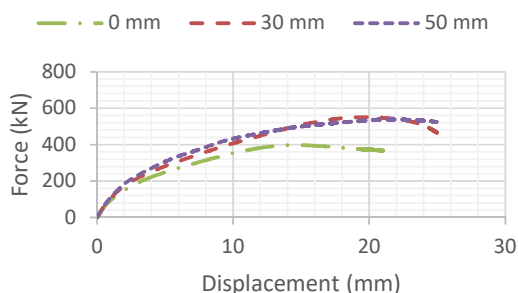


Fig. 18. Force-displacement diagram in different shotcrete thickness for beam No. 3

شکل ۱۹. نمودار نیرو-جابجایی در ضخامت‌های مختلف شاتکریت برای تیر شماره ۵

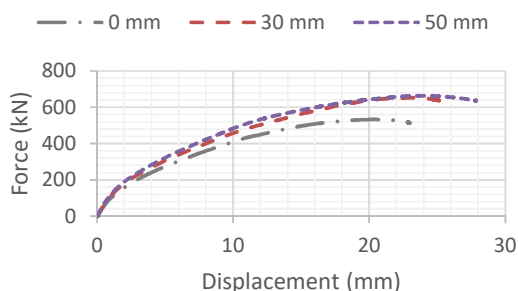


Fig. 19 Force-displacement diagram in different shotcrete thickness for beam No. 5

شکل ۲۰. نمودار نیرو-جابجایی در ضخامت‌های مختلف شاتکریت برای تیر شماره ۶

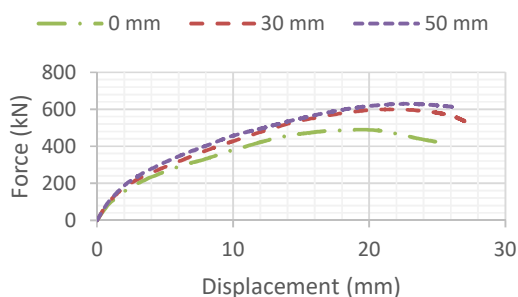


Fig. 20. Force-displacement diagram in different shotcrete thickness for beam No. 6

۷- نتیجه گیری

از مقایسه‌ی نتایج و نمودارهای نیرو-جابجایی مدل‌های عددی و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که رفتار تیرهای

شکل ۱۶. نمودار نیرو-جابجایی در پیش‌تنیدگی‌های مختلف آلیاژهای حافظه‌دار برای تیر شماره ۵

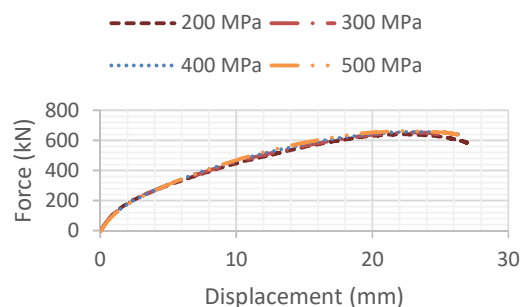


Fig. 16. Force-displacement diagram in different prestressing of Fe-SMA for beam No. 2

۳-۶- اثر ضخامت لایه‌ی شاتکریت

در این بخش برای بررسی اثر ضخامت شاتکریت روی رفتار برشی تیرهای مقاوم‌سازی شده، ضخامت‌های صفر و ۵۰ میلی‌متر علاوه بر مقدار ۳۰ میلی‌متر اولیه در نظر گرفته شدند. برای مدل‌سازی از تیرهای مشابه فصل قبل استفاده شده است. ضخامت شاتکریت تأثیر بسیاری روی رفتار تیرها به جای می‌گذارد. با افزایش ضخامت شاتکریت، خاموت‌ها دیرتر گسیخته می‌شوند و همچنین مقاومت نهایی افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه مقاومت نهایی تیرهای با ضخامت شاتکریت صفر (مقاوم‌سازی شده با آلیاژهای حافظه‌دار ولی بدون استفاده از شاتکریت) و تیر شماره ۱ (تیر مرجع)، افزایش حدودی ۲۵٪ برای تیرهای سری B2 و B3 و ۴۰٪ در تیرهای سری B5 و B6 مشاهده می‌شود.

شکل ۱۷. نمودار نیرو-جابجایی در ضخامت‌های مختلف شاتکریت برای تیر شماره ۲

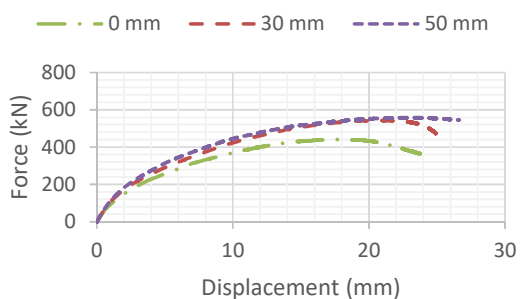


Fig. 17. Force-displacement diagram in different shotcrete thickness for beam No. 2

- shape memory alloy bars embedded in a shotcrete layer. *Eng Struct.* 2016;117:263–73.
- [5] Abouali S, Shahverdi M, Ghassemieh M, Motavalli M. Nonlinear simulation of reinforced concrete beams retrofitted by near-surface mounted iron-based shape memory alloys. *Eng Struct.* 2019;187(July 2018):133–48.
- [6] Dolatabadi N, Shahverdi M, Ghassemieh M, Motavalli M. Rc structures strengthened by an iron-based shape memory alloy embedded in a shotcrete layer—nonlinear finite element modeling. *Materials (Basel).* 2020;13(23):1–25.
- [7] Rius JM, Cladera A, Ribas C, Mas B. Shear strengthening of reinforced concrete beams using shape memory alloys. *Constr Build Mater.* 2019;200(April):420–35.
- [8] Montoya-Coronado LA, Ruiz-Pinilla JG, Ribas C, Cladera A. Experimental study on shear strengthening of shear critical RC beams using iron-based shape memory alloy strips. *Eng Struct.* 2019;200(December 2018):109680.
- [9] Cladera A, Montoya-Coronado LA, Ruiz-Pinilla JG, Ribas C. Shear strengthening of slender reinforced concrete T-shaped beams using iron-based shape memory alloy strips. *Eng Struct.* 2020;221:111018.
- [10] Ruiz-Pinilla JG, Montoya-Coronado LA, Ribas C, Cladera A. Finite element modeling of RC beams externally strengthened with iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) strips, including analytical stress-strain curves for Fe-SMA. *Eng Struct.* 2020;223(January):111152.
- [11] Soares MM, Palermo D, Cortés-Puentes WL. Modelling of mid-rise concrete shear walls reinforced with superelastic shape memory alloys: Nonlinear analysis. *Eng Struct.* 2021 Nov 15;247:113049.
- [12] Bykiv N, Yasniy P, Lapusta Y, Iasnii V. Finite element analysis of reinforced-concrete beam with shape memory alloy under the bending. *Procedia Struct Integr.* 2022 Jan 1;36:386–93.
- [13] Janke L, Czaderski C, Motavalli M, Ruth J. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas. *Mater Struct Constr.* 2005;38(279):578–92.
- [14] Motahari SA, Ghassemieh M. Multilinear one-dimensional shape memory material model for use in structural engineering applications. *Eng Struct.* 2007;29(6):904–13.
- [15] Cladera A, Weber B, Leinenbach C, Czaderski C, Shahverdi M, Motavalli M. Iron-based مدل‌شده با دقت میانگین ۹۵ درصد مشابه آزمایش‌ها تخمین زده شده است. در نتیجه درستی مدل‌های عددی تایید می‌شود. رویکرد مدل‌سازی، المان‌های انتخاب شده و مدل‌های رفتاری اختصاص داده شده به مصالح می‌توانند برای انجام مطالعات پارامتریک و ساخت مدل‌های عددی مشابه استفاده شوند. با استفاده از مدل‌های عددی درستی آزمایشی شده می‌توان پیش‌بینی کاملی از رفتار برشی تیرها اعم از توزیع تنش و کرنش میلگردها و آلیاژهای حافظه‌دار، توزیع تنش در بتن و شاتکریت، خیز تیر، توزیع ترک و خسارات کششی و فشاری داشت. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که مقاوم‌سازی برشی در تیرهای بتن مسلح فارغ از پیش‌تنیده بودن یا نبودن آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، سبب می‌شود ظرفیت نهایی تیر به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. مقاوم‌سازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از سه و پنج آلیاژ حافظه‌دار باعث افزایش حدودا ۷۰ و ۸۰ درصدی در ظرفیت برشی تیر می‌شود. استفاده از قابلیت پیش‌تنیدگی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن سبب کاهش نیرو در خاموت‌ها و به تاخیر افتادن ترک‌خوردگی در تیر می‌شود اما در ظرفیت نهایی تیرهای مقاوم‌سازی شده تغییر محسوسی ایجاد نمی‌شود. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که ضخامت ترک‌های به وجود آمده در تیرهایی که در آن‌ها آلیاژهای حافظه‌دار شکلی فعال شده هستند، کمتر است. به صورت خلاصه می‌توان گفت اعمال پیش‌تنیدگی در آلیاژهای حافظه‌دار شکلی سبب می‌شود تا خاموت‌ها دیرتر تسلیم شوند، ترک‌های برشی با تاخیر پدید آیند، ضخامت ترک‌ها کاهش می‌یابد و مقاومت تیر تحت بارهای سرویس افزایش می‌یابد.
- ### ۸- مراجع
- [1] Czaderski C, Shahverdi M, Michels J. Iron based shape memory alloys as shear reinforcement for bridge girders. *Constr Build Mater.* 2020 Dec 6;(xxxx):121793.
- [2] Motavalli M, Czaderski C, Pfyl-Lang K. Prestressed CFRP for Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Recent Developments at Empa, Switzerland. *J Compos Constr.* 2010;15(2):194–205.
- [3] Shahverdi M, Czaderski C, Motavalli M. Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams. *Constr Build Mater.* 2016;112:28–38.
- [4] Shahverdi M, Czaderski C, Annen P, Motavalli M. Strengthening of RC beams by iron-based

- lightweight concrete. Delft University of Technology. 1986.
- [18] Pavlović M, Marković Z, Veljković M, Bucrossed D Signevac D. Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. J Constr Steel Res. 2013 Sep 1;88:134–49.
- shape memory alloys for civil engineering structures: An overview. Constr Build Mater. 2014;63:281–93.
- [16] Birtel V, Mark P. Parameterised Finite Element Modelling of RC Beam Shear Failure. Abaqus User's Conf. 2006;95–108.
- [17] Cornelissen HAW, Hordijk DA, Reinhardt HW. Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and

Investigation of the effect of design parameters on the behavior of RC beams reinforced with shape memory alloys

Hesameddin Darvish¹, Moslem Shahverdi², Mehdi Ghassemieh^{3*}

1- M.Sc. Earthquake Engineering, School of civil engineering, University of Tehran

2- Assistant professor, School of civil engineering, University of Tehran

3- Professor, School of civil engineering, University of Tehran

*m.ghassemieh@ut.ac.ir

Abstract

The considerable age of numerous concrete structures and some reasons like changes in design philosophy, increase in applied loads, etc., have made strengthening and maintenance compulsory. Shear failure in reinforced concrete beams is frequently sudden and brittle. For this reason, efforts are made to avoid this type of failure by strengthening them, especially in structures that were made with engineering mistakes and damaged structures. Steel, fiber-reinforced polymers, and carbon fiber-reinforced polymers are used as conventional solutions, but these methods have some drawbacks. For instance, prestressing them is hardly applicable, and the prestressing force decreases over time. Therefore, nowadays, as an alternative, shape memory alloys (SMAs) are investigated as new strengthening methods owing to their unique features. Shape memory alloys are novel and smart material groups that have been considered in civil engineering for many purposes, including active and passive control of structures, dampers, and strengthening of structures like reinforced concrete structures and bridges, etc., due to unique features such as pseudo-elasticity and shape memory effect. They have the particular property of returning to their initial shape by heating which is called the shape memory effect. If the SMAs prevented from returning to their initial shape by using mechanical fixation, a prestress force develops owing to the shape memory effect property. NiTi or Nitinol has been used for damping applications in civil engineering, and it has been investigated in the literature. Iron-based shape memory alloys (Fe-SMAs) have attracted much attention in civil engineering applications due to their shape memory effect. Particularly for strengthening applications, iron-based shape memory alloys have some benefits such as wide transformation hysteresis, high elastic modulus, and lower cost compared to conventional NiTi alloys. The advantage of shape memory alloys over fiber-reinforced polymer is that they can be prestressed more easily than FRP, and the prestressing force will not reduce over time. In addition, it does not require any mechanical and hydraulic jacks. Prestressing these materials has some advantages in strengthening. For example, cracks and deformations can be reduced or at least prevented from further growing, and the stresses in internal stirrups are reduced. The usage of prestressing for shear strengthening is rare because it is very complex from a practical standpoint. This study aims to assess the behavior of RC beams strengthened in shear with iron-based shape memory alloys. For this purpose, based on experiments in the literature, T-beams with 5.2-meter long are investigated numerically by using finite-element analysis software, ABAQUS. Three-dimensional finite element models were developed using the concrete damage plasticity and were verified with experimental results. Comparisons between the results from the FE models and experimental test results confirmed the accuracy of the proposed models. Furthermore, the effects of parameters such as shape memory alloy diameters, prestressing force, and shotcrete thickness on beams' shear behavior are also investigated. The results of the analysis indicate a notable increase in the final shear strength of the strengthened beams and a reduction in stirrups' stresses. The prestressing ability of shape memory alloys delays the yielding of stirrups and the appearance of shear cracks and reduces the thickness of the cracks.

Keywords: Shear strengthening, Numerical modeling of RC beams, Iron-based shape memory alloys, Prestressing