يادداشت تحقيقاتي

مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره بیست و دوم، شماره۵ سال۱۴۰۱



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

حسام الدین درویش'، مسلم شاهوردی'، مهدی قاسمیه **

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

تاريخ دريافت: ١٤٠٠/١٢/٢٣ تاريخ پذيرش: ١٤٠٠/١٢/٢٥

چکیدہ

گسیختگی برشی در تیرهای بتن مسلح، به صورت ناگهانی و ترد رخ می دهد. به همین دلیل تلاش می شود تا با مقاومسازی برشی سازههای آدیدی دیده، سازههای ساخته شده با اشتباهات مهندسی و اجرایی و یا با افزایش ظرفیت برشی مقاطع از اینگونه خرابی ها اجتناب شود. مطالعات زیادی روی مقاومسازی اعضای بتنی با استفاده از الیاف پلیمر کامپوزیت و همچنین استفاده از نوارهای فولادی انجام گرفته است. آلیاژهای حافظه دار شکلی (SMA) مصالحی نوین و هوشمند می باشند که به دلیل رفتارهای منحصر به فرد خود برای مقاصد مقاومسازی در مهندسی عمران مورد توجه قرار گرفته است. آلیاژهای حافظه دار شکلی بر پایه آهن (Fe-SMA) به دلیل خاصیت حافظه شکلی و قیمت مناسب در فعالیت های عمرانی مورد توجه قرار گرفته است. آلیاژهای حافظه دار شکلی بر پایه آهن (Fe-SMA) به دلیل خاصیت حافظه شکلی و قیمت مناسب در فعالیت های عمرانی مورد توجه قرار گرفته اند و در سال های اخیر نظر پژوه شگران را به خود جلب کرده اند. مزیت آلیاژهای حافظه دار شکلی نسبت به مصالح مقاوم سازی شده با قرار گرفته اند و در سال های اخیر نظر پژوه شگران را به خود جلب کرده اند. مزیت آلیاژهای حافظه دار شکلی نسبت به مصالح مقاوم سازی شده با الیاف پلیمرکامپوزیت، سهولت در اعمال پیش تنیدگی می باشد. علت این موضوع آن است که پیش تنیدگی آلیاژهای حافظه دار شکلی از طریق حرارت حافظه دار شکلی بر پایه ی آهن و خاصیت پیش تنیدگی می باشد. علت این موضوع آن است که پیش تنیدگی آلیاژهای حافظه دار شکلی از طریق حرارت آزمایش های انجام شده در ادبیات فنی، به مدل سازی عددی و تحلیل تیرهای تی شکل ۵٫۲ متری که با میله هایی از آلیاژهای حافظه دار شکلی بر پایه ی مقاوم سازی برشی شده اند پرداخته می شود. برای بررسی عددی رفتار برشی تیرهای بتن مسلح می باشد. برای این منظور و بر مبنای پایه مقاوم سازی برشی شده اند پرداخته می شود. برای بررسی عددی رفتار برشی تیرها از نرمافزار اجزاء محدود آبکرهای است. نیایچ مقاوم سازی که برای اولین بار انجام شده است بیانگر افزایش چشمگیر در مقاومت برشی و همچنین کاهش تنش در خاموت ها می باشد. نیوین مقاوم مازی که برای اولین بار انجام شده است بیانگر افزایش چشمگیر در مقاومت برشی و همچنین کاهش تنش در خاموت ها می باشد. نیوین مقاوم مازی که برای اولین بار انجام شده است بیانگر افزایش چشگی ردر مقاومت برشی و همچنین کاهش تنش در خاموت ها منوین می میرها ب

واژگان کلیدی: مقاومسازی برشی، مدلسازی عددی تیرهای بتنمسلح، آلیاژ حافظهدار شکلی بر پایه آهن، پیش تنیدگی

۱- مقدمه

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 می شود تا با مقاومسازی برشی از این گونه خرابیها اجتناب شود و ظرفیت برشی مقاطع افزایش يابد. امروزه مقاومسازی برشی تيرهای بتنمسلح توسط الياف يليمركاميوزيت ((FRP) و يا الياف كربن يليمر كاميوزيت ((CFRP) روشی مرسوم محسوب می شود. اما به دلیل آن که پیش تنیده کردن آن ها امر دشواری است، پیشنهاد میشود که مقاومسازی توسط آلیاژهای حافظهدار شکلی" (SMAs) صورت گیرد. آلیاژهای حافظهدار شکلی مصالحی نوین و هوشمند^۴ هستند که به دلیل رفتارهای منحصر به فردی مثل قابلیت تغییر فاز بازگشتیذیر که سبب می شود بتوانند تغییرشکل های 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 حافظهدارشکلی بر مبنای نوع آلیاژ، پدیدههای مختلفی مانند اثر حافظهي شكلي⁶، ابر كشسان⁹و قابليت استهلاك انرژي 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[^] 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] . پیش تنیده کردن بتن با استفاده از کابل های 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، یژوهشهایی در رابطه

با استفاده از آلیاژهای حافظهدار شکلی در سازهها برای مقاصد

مقاوم سازی انجام شده است. شاهوردی 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 می کند. 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

شاهوردی و همکاران [4] تیربتنی 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

ميله هاي آلياژ حافظهدار شكلي بر پايه آهن پيش تنيده به طور

قابل توجهي بهبود يافته است و بار تركخوردگي با اين روش

افزایش می یابد. نتایج نشان داد که استفاده از میله های آجدار

آلیاژ حافظهدار شکلی بر پایه آهن جاسازی شده در لایه

شاتکریت موفقیت آمیز است و این روش مقاومسازی به

خوبی عمل می کند. 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 می کنند. **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

- 2. Carbon-Fiber Reinforced Polymer
- 3. Shape Memory Alloys
- 4. Smart materials

^{6.} Super elasticity

^{7.} Iron-based Shape Memory Alloy

^{8.} Meier

^{9.} Rius

^{1.} Fiber Reinforced Polymer

^{5.} Shape memory effect

مجله علمی 🗕 پژوهشی مهندسی عمران مدرس

نوارهای آلیاژ حافظهدار شکلی مقاومسازی کردند. نتایج آزمایش افزایش تقریبا ۳۰٪ مقاومت برشی تیرها را نشان می دهد. رویز پینیلا^۳و همکاران [10] در سال ۲۰۲۰ با استفاده از اجزا محدود، تیر بتن مسلح مقاومسازی شده توسط نوارهای آلیاژ حافظه دار شکلی بر پایه آهن را مدلسازی کردند که با این مدلسازی، افزایش مقاومت برشی تیر بتن مسلح مقاومسازی 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 مدلسازی عددی کردند. نتایج نشان میدهد که دیوارهای تقویت شده با آلیاژ حافظهدار، انرژی قابل توجهی را تلف میکند اما کمتر از دیوارهای تقویت شده با فولاد. همچنین نسبت به دیوارهای تقويت شده با فولاد، سختى مؤثر كاهش يافته است [11]. بایکیو^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۲ تیرهای بتنی مقاوم سازی شده در خمش توسط آلیاژ Ni-Ti را مدلسازی اجزا محدود کردند. نتایج این مدلسازی نشان میدهد که تحت خمش در تير تقويت شده توسط آلياژ حافظهدار شكلي، خيز باقيمانده در مقایسه با روش های تقویت سنتی کاهش می یابد [12]. این مقاله برای اولین بار رفتار تیرهای بتنی مقاومسازی شده در برش توسط خاموتهایی از جنس آلیاژهای حافظهدار شکلی بر پایه آهن را مدلسازی میکند و به بررسی رفتار آنها مى پر داز د.

۲- آلیاژهای حافظهدار شکلی

آلیاژهای حافظهدار 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 حافظهدار شکلی دارای دوحالت کریستالی به نامهای مارتنزیت^۷ و آستنیت^۸ هستند. حالت آستنیت حالت اصلی با تقارن بالا است

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 مقاومسازی شده هم مقاومت برشی افزایش یافته و هم خیز تیرها کمتر شده است. همچنین این تست ها نشان می دهد که در تیرهای از قبل ترک خور ده، مقدار بار برشی قابل تحمل تیر به میزان ۹۸٪ توسط این سیستم مقاومسازی فعال افزایش یافته است و به طور کلی نتیجه استفاده از نیتینول به عنوان مقاومسازی برشی امیدوار کننده است. لوئیس و همکاران [8] در سال ۲۰۱۹ یک مطالعه تجربی روی تیر بتن مسلح مقاومسازی شده با نوارهایی از جنس آلیاژ حافظهدار شکلی بر پایه آهن انجام دادند. این نوارها به لطف اثر حافظه شکلی آلیاژهای حافظهدار بر پایه آهن، می توانند 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 مقاومسازی شده را نشان میدهند. تیرهای مرجع در برش از کار افتادند، اما تیرهایی که با نوارهایی به عرض ۲۵ میلی متر 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 بهطور متوسط با افزایش ۶۵٪ مقاومت برشی در مقایسه با تیرهای مرجع از کار افتادند. برای تیرهایی که با نوارهای فعال شده مقاومسازی می شوند، ظهور ترکهای برشی به تأخیر می افتد، ترکهای برشی کمتری به وجود میآید و خیز تیرها به طور قابل توجهی پایینتر 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

^{5.} Bykiv

^{6.} Polymorphism

^{7.} Martensite

^{8.} Austenite

^{1.} Luis

^{2.} Cladera

^{3.} Ruis-Pinilla

^{4 .}Soares

که در دماهای بالا و تنشرهای کم پایدار است. در حالی که حالت مارتنزیت حالت محصول و با تقارن کم است که در دماهای پایین و تنشرهای 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 As تحت بارگذاری قرار بگیرد، پس از باربرداری تغییر حالت صورت نمیگیرد. همچنین کرنش خمیری ایجاد شده در مارتنزیت به هنگام باربرداری قابل با اعمال دمایی بالاتر از Af کاملاً حذف شود. به این دلیل که با اعمال دمایی بالاتر از Af 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 شبه خمیری می گویند (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 می دهند. 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، هیسترزیس 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 جوش پذیری خوب می باشند. این آلیاژها برای اعمال پیش تنیدگی در سازهها بسیار مفید هستند. در مقایسه با روشهای

قدیمی تر پیش تنیدگی، استفاده از خاصیت حافظه شکلی این آلیاژها مزایایی مانند عدم کاهش نیروی پیش تنیدگی به علت توزیع یکنواخت نیروی کششی در طول تاندون پیش تنیدگی از طریق مهار شدن در بتن، وجود ندارد و روش مناسبی برای پیش تنیده کردن اعضای بتنی قوسی شکل می باشند [15].

۳- مدل اجزا محدود

برای مدلسازی اجزا محدود تیرهای بتنی مقاوم سازی شده در برش، از تیرهای آزمایش شده توسط چادر سکی^۲ و همکاران به عنوان مبنا استفاده شده است [1]. در این آزمایش ها پنج تیر بتنی تی_شکل مشابه تحت بارگذاری استاتیکی در آزمایش خمش چهار نقطهای قرار می گیرند. تیر شماره ۱ به عنوان تیر مبنا در نظر گرفته شده است و دارای هیچ مقاوم سازی نیست. تیرهای شماره ی ۲ و ۳ دارای سه میله یو شکل^۳ از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی بر پایه آهن هستند به صورتی که در تیر شماره ی ۲ آلیاژها فعال شده است. تیرهای شماره ۵ و ۶ هرکدام دارای پنج میله یو شکل از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی بر پایه آهن هستند و در یو شماره ۵ آلیاژها فعال شده اند (شکلهای ۲ و ۳).



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

1. Martensitic transformation

116

3. U-shaped

^{2.} Czaderski

3. Mark

4. Cornelissen

دوره بیست و دوم / شماره ۵/ سال ۱۴۰۱

ſ

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

$$\begin{cases} \sigma_{c}^{(1)} = E_{c0}\varepsilon_{c} & \text{for } \sigma_{c} < 0.4f_{c}^{'} \\ \sigma_{c}^{(2)} = f_{c}^{'} \left[2\left(\frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{c}}\right) - \left(\frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{c}}\right)^{2} \right] \\ \sigma_{c}^{(3)} = f_{c}^{'} - \frac{f_{c}^{'}(\varepsilon_{c} - \varepsilon_{c}^{'})^{2}}{(\varepsilon_{c,\max} - \varepsilon_{c}^{'})^{2}} & \text{for } \varepsilon_{c} \le \varepsilon_{c}^{'} \end{cases}$$

$$(1)$$

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

$$d_{c} = 1 - \frac{\sigma_{c} E_{c}^{-1}}{\varepsilon_{c}^{pl} (1/b_{c} - 1) + \sigma_{c} E_{c}^{-1}}$$
$$\varepsilon_{c}^{pl} = b_{c} \varepsilon_{c}^{in}$$

 E_c ،در این رابطه σ_c یارامتر آسیب فشاری، σ_c تنش فشاری d_c ضريب كشسانى بتن، \mathcal{E}^{pl}_{c} كرنش خميرى فشارى، \mathcal{E}^{c}_{c} كرنش خمیری و b_{c} برابر با v است.

همچنین برای تعریف رفتار کششی از روش انرژی شکست و رابطهی كورنليسن ً و همكاران [17] كه يك تابع نمايي است استفاده مي شود. رابطههای ۵ تا ۷ این تابع را نشان میدهند.

$$\frac{\sigma}{f_t} = f(\omega) - \frac{\omega}{\omega_c} f(\omega_c) \tag{(a)}$$

$$f(\omega) = \left[1 + \left(\frac{c_1\omega}{\omega_c}\right)^3\right] \exp\left(-\frac{c_2\omega}{\omega_c}\right) \tag{9}$$

$$\omega_c = 5.14 \frac{G_f}{f_t} \tag{V}$$

در این روابط
$$arDelta$$
بازشدگی ترک، $arDelta_c$ بازشدگی نهایی ترک که در آن تنش انتقال نمی یابد، G_f انرژی شکست بتن، c_1 و

Ex



Fig. 3. Geometry of the beams [1]

1-۳- مدلسازی رفتار مصالح 1-1-۳- بتن و شاتكريت

در این یژوهش از روش بتن پلاستیک تخریب شونده' (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 می کند و نمایانگر رفتار غیر کشسان مواد است. جدول (۱) پارامترهای مورد استفاده در این روش را نمایش میدهد. مقادیر پارامترهای پلاستیسیته در مدل CDP بر اساس مقادیر پیشنهادی در نرمافزار تخمین زده می شود و سپس با استفاده از حساسیت سنجی مقادیر مناسب لحاظ می شود تا از بهترین هماهنگی با نتایج تجربی اطمینان حاصل شود.

جدول ۱. پارامترهای خمیری اعمال شده در مدل سازی

45	زاويه اتساع ($oldsymbol{\psi}$)
0.001	(μ) پارامتر ويسكوزيته (
0.1	خروج از مرکزیت (ع)
1.16	$(\sigma_{_{b0}}/\sigma_{_{c0}})$ نسبت تنش
0.667	$(K_c$) شکل سطح تسلیم
Table 1 Plasticity	parameters used in the modeling

lasticity parameters used in the modeling

1. Concrete Damaged Plasticity

2. Birtel

١٧٧



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

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

۲-۳-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 کاملا به هم چسبیدهاند از تماس مقید^۴ استفاده شده است. برای اعمال این اندرکنش معمولا اعضایی که دارای ضریب کشسانی بیشتری هستند به عنوان Master و اعضایی که ضریب کشسانی کمتری دارند به عنوان عده Slave معرفی می شوند.

۳-۳- شرایط بارگذاری و تکیه گاهی

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 می شود. در هر کدام از این صفحههای تقارن، جابهجایی عمود بر صفحه و دورانهای داخل صفحه برابر با صفر قرار داده می شوند. همچنین در محل تکیه گاه غلتکی درجه آزادی انتقالی در جهت قائم نیز برابر با صفر قرار داده می شود. بارگذاری را می توان به دو صورت نیرو-کنترل و یا جابهجایی-کنترل اعمال کرد که برای این مدل سازی، C2 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).

$$G_F = G_{Fo} \left(1 - 0.77 \frac{f_{cmo}}{f_{cm}} \right) \tag{A}$$

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

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \tag{9}$$

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

۲-۱-۳ فولاد

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

ضريب بوليدون	ضريب كشساني	تنش نهایی)MPa(تنش تسليم)MPa(فولاد	
μ. μ)GPa() -	,		
0.3	205	945	843	میلگردهای	
0.5	205			خمشى	
0.2	205	560	504	ساير	
0.5	.3 203	500	504	ميلگردها	

جدول ۲. مشخصات مكانيكي فولادها

 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

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15

^{3.} Embedded region

^{4.} Tie contact

^{2.10}

مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس

بارگذاری به صورت جابهجایی کنترل اعمال می شود. برای بارگذاری مدل، جابهجایی ها در چند گام اعمال می شوند تا دقت محاسبات بالا رود. ۲-۴- اعمال پیش تنید کی آلیاژهای حافظه دار

برای اعمال پیش تنیدگی در آلیاژهای حافظهدار در نرمافزار از گزینه تعریف میدان از پیش تعریفشده' موجود در آباکوس استفاده شده است و تنش ۳۰۰ مگاپاسکال مشابه مقدار پیش تنیدگی موجود در آزمایش، در راستای محوری میلههای آلیاژ حافظهدار اعمال شده است. برای اعمال کامل پیش تنیدگی نیاز است تا یک گام اضافهتر در تحلیل در نظر گرفته شود تا در آن گام پیش تنیدگی به صورت کامل انجام شود و بعد بارگذاری روی سازه اعمال شود.

-۵-۳ شبکهبندی و اختصاص المان به اعضای مدل

برای شبکهبندی و اختصاص المان به بتن و شاتکریت، از المان پیوسته سهبعدی مکعبی هشت نقطه ی با مرتبه هندسی خطی و انتگرال کاهشیافته (C3D8R) استفاده شده است. هر گرهی این المان فقط شامل سه درجه آزادی انتقالی در جهتهای X، Y و Z است و درجه آزادی دورانی ندارد. در این المان به دلیل استفاده از انتگرال کاهشیافته، از وقوع قفل شدگی برشی جلوگیری می شود. همچنین با تقسیم بندی بتن و شاتکریت سعی شده است تا شکل المانها منظم باشد تا دقت حل بهبود یابد. با حساسیت سنجی انجام شده و مقایسه نتایج، اندازه این المانها ۲۵ میلی متر اعمال شده است. ابعاد شبکهبندی میلگردها و آلیاژهای حافظه دار به اندازهی کافی کوچک اعمال شده

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

جدول ٣. حساسيت سنجي ابعاد المانها					
تعداد المانهاي	اندازه شبكهبندي	مدل			
C3D8R	(mm)				
4810	40	MS1			
17680	25	MS2			
38280	20	MS3			

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.

نسبت بیشینه نیروی آزمایش به بیشینه	بیشینه نیروی تحلیل عددی	بیشینه نیروی	مقاومت فشارى	نام تہ
نيروى تحليل عددى	(kN)	أزمايش (kN)	سیلندری (MPa)	2. 1
0.92	341.9	313.4	40.89	B1
0.99	542.5	535.5	39.53	B2
0.97	551.5	532.7	36.98	B3
0.89	652.9	583.6	49.90	B5
0.97	600.2	583.0	35.79	B6

جدول ۴. مقایسهی نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی

شکل ۵. نمودارهای بار_تغییر مکان تیرهای مدل شده



Fig. 5. Force-displacement diagram of beams



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



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

همانگونه که در شکلها 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 خاموتها 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 ترکهای ریز در بتن تیرهای آزمایش شده و پیچیدگی های رفتاری بتن باشد. همچنین مانند تیرهای آزمایش شده و نیچیدگی های رفتاری بتن باشد. همچنین مانند تیرهای

۶- مطالعات پارامتری

برای بررسی عملکرد عناصر سازهای و ارزیابی آنها نیاز به انجام آزمایش است. به دلیل آنکه اجرای آزمایشهای معتدد نیاز به گذشت زمان، امکانات و هزینهی زیادی دارد، بررسیهای عددی و تحلیلی



شکلهای (۵-۲۷ تا ۵-۳۱) نمودارهای نیرو_تغییر مکان حاصل شده از مدلسازی عددی تیرها و مقایسه آنها با نمودارهای حاصل شده از آزمایش را نمایش میدهند.

شکل ۶. نمودار بار_تغییر مکان تیر شماره ۱



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



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

دارای اهمیت ویژهای هستند. در قسمت قبل با استفاده از مدل سازی عددی تیرهای آزمایش شده و درستی آزمایی و مقایسه ینتایج به دست آمده، بهترین و بهینهترین پارامترها و فرضیات برای مدل سازی 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 پیش تنیدگی در آلیاژهای حافظهدار و همچنین بررسی اثر ضخامت شاتکریت روی رفتار برشی تیرهای مشابه پرداخته می شود.

۶-۱-۱ 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 می شود. برای این مدلسازی علاوه بر قطر ۱۲ میلی متر، از قطرهای ۸ و ۱۸ میلی متر برای آلیاژهای حافظهدار استفاده می شود. افزایش قطر آلیاژهای حافظهدار شکلی تا مقداری مشخص، باعث افزایش ظرفیت تیر و همچنین کاهش نیروی وارد شده به خاموتها می شود اما از مقداری به بعد تأثیری در مقاومت نهایی تیر ندارد و تیر در نیروهای مشابهی گسیخته می شود. همچنین شکل پذیری تیر با افزایش قطر آلیاژهای حافظهدار کاهش می یابد. شکل ۱۱. نمودار نیرو حبابه حایی در قطرهای مختلف آلیاژهای حافظهدار برای تیر شماره ۲





شکل ۱۲. نمودار نیرو_جابهجایی 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 ۱۳. نمودار نیرو-جابه جایی در قطرهای مختلف آلیاژهای حافظه دار برای تیر شماره ۵ ۱8 mm - - - 12 mm - - - - 8 mm 18 mm 18 mm 18 mm 18 mm 18 mm



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

شکل ۱۴. نمودار نیرو_جابهجایی در قطرهای مختلف آلیاژهای حافظهدار برای تیر شماره ۶



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

۶-۲- اثر نیروی پیش تنیدگی آلیاژهای حافظهدار شکلی روی برای بررسی اثر نیروی پیش تنیدگی آلیاژهای حافظهدار شکلی روی رفتار برشی تیرهای مقاومسازی شده، در این قسمت علاوه بر مقدار شدنا. 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 نمی آید و تیرها در نیروهای اعمالی مشابهی گسیخته می شوند. حافظهدار برای تیر شماره ۲



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

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15

بررسی اثر پارامترهای طراحی بر رفتار تیرهای بتنی مقاوم...

حسام الدين درويش و همكاران

شکل ۱۶. نمودار نیرو_جابهجایی در پیش*تنیدگی*های مختلف آلیاژهای

حافظهدار برای تیر شماره ۵



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

8-3- اثر ضخامت لایهی شاتکریت

در این بخش برای بررسی اثر ضخامت شاتکریت روی رفتار برشی تیرهای مقاوم سازی شده، ضخامت های صفر و ۵۰ میلی متر علاوه بر مقدار ۳۰ میلی متر اولیه در نظر گرفته شدند. برای مدل سازی از تیرهای مشابه فصل قبل استفاده شده است. ضخامت شاتکریت تاثیر بسیاری روی رفتار تیرها به جای می گذارد. با افزایش ضخامت شاتکریت، خاموت ها دیرتر گسیخته می شوند و همچنین مقاومت نهایی افزایش می یابد. همچنین با مقایسه مقاومت نهایی تیرهای با ضخامت شاتکریت صفر (مقاوم سازی شده با آلیاژهای حافظه دار ولی بدون استفاده از شاتکریت) و تیر شماره ۱ (تیر مرجع)، افزایش حدودی B6 مشاهده می شود.

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



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

شکل ۱۸. نمودار نیرو_جابهجایی در ضخامتهای مختلف شاتکریت برای

تير شماره ۳

تير شماره ۵



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

شکل ۱۹. نمودار نیرو-جابهجایی در ضخامتهای مختلف شاتکریت برای



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

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



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

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

DOI: 10.22034/22.5.173

۷- نتیجه گیری

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 nearsurface 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] 1Ruiz-Pinilla JG, Montoya-Coronado LA, Ribas C, Cladera A. Finite element modeling of RC beams externally strengthened with ironbased 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 onedimensional 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 آزمایش ها تخمین زده شده است. در نتیجه درستی مدلهای عددی تایید می شود. رویکرد مدلسازی، المانهای انتخاب شده و مدلهای رفتاری اختصاص داده شده به مصالح می توانند برای انجام مطالعات پارامتریک و ساخت مدلهای عددی مشابه استفاده شوند. با استفاده از مدلهای عددی درستی آزمایی شده می توان پیش بینی 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 تيرهاي بتن مسلح فارغ از پيش تنيده بودن يا نبودن آلياژهاي 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 می شود. استفاده از قابلیت پیش تنیدگی آلیاژهای حافظهدار شکلی بر پایه آهن سبب کاهش نیرو در خاموتها و به تاخیر افتادن ترکخوردگی در تیر می شود اما در ظرفیت نهایی تیرهای مقاومسازی شده تغییر محسوسی ایجاد نمی شود. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان میدهند که ضخامت ترکهای به وجود آمده در تیرهایی که در آنها آلباژهای حافظهدار شکلی فعال شده هستند، کمتر است. به صورت خلاصه می توان گفت اعمال پیش تنیدگی در آلیاژهای حافظهدار شکلی سبب میشود تا خاموتها دیرتر تسلیم شوند، ترکهای برشی با تاخیر یدید آیند، ضخامت ترکها کاهش می یابد و مقاومت تیر تحت بارهای سرويس افزايش مي يابد.

۸- مراجع

- 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. Ironbased 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. بررسی اثر پارامترهای طراحی بر رفتار تیرهای بتنی مقاوم...

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. Ababqus 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 owning 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. Threedimensional 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