



مدل سازی اجزا محدود و مقایسه آزمایشگاهی تیرهای بتن مسلح دارای آلیاژهای حافظه دار شکلی تحت بار سیکلی

علی اکبر مقصودی^{*}، محمد مقصودی، هما حقیقی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۴ دی ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۰ آذر ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۶ دی ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۷ دی ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:
آلیاژهای حافظه دار شکلی
رفتار فوق ارتجاعی
تیر بتن مسلح
سیم نایتینول
تغییر مکان پسماند

چکیده: آلیاژهای حافظه دار شکلی، نوعی از مصالح هوشمند فلزی می باشند که عملکرد مکانیکی و حرارتی منحصر به فرد آن ها، همچون قابلیت بازگشت به شکل اولیه (رفتار حافظه داری شکلی) و توانایی بازیابی کرنش های بزرگ (رفتار فوق ارتجاعی)، سبب شده است تا اخیراً کاربردهای وسیعی در صنایع گوناگون از جمله در مهندسی عمران، پیدا کنند. عملکرد فوق ارتجاعی این آلیاژها سبب می شود که آن ها با قرار گرفتن تحت سیکل های بارگذاری و باربرداری و حتی پس از عبور از حد تسلیم، کرنش پسماند ناچیزی از خود برجای بگذارند. این ویژگی در واقع سبب ایجاد نیروهای بازسازی کننده ای در سازه می شود، به طوریکه در اعضای بتن مسلح، امکان بسته شدن ترک های به وقوع پیوسته در بتن نواحی کششی نیز فراهم می گردد، چنین ویژگی برای اعضای نواحی زلزله خیز بسیار با اهمیت است. در این مقاله به مدلسازی اجزا محدود و صحت سنجی رفتار تیرهای بتن مسلح دارای آلیاژهای حافظه دار شکلی، پرداخته شده است. به این منظور ابتدا مدل المان محدود سه تیر بتن مسلح با اضافه کردن سیم های نایتینول در ناحیه کششی تیر، در نرم افزار انسیس ساخته شد، سپس تیرها تحت اثر بارگذاری سیکلی قرار گرفته و نمودار هیستریزس آن ها با تیرهای مشابه آزمایشگاهی موجود مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی نتایج حاصل از آنالیز عددی نشان می دهد که، افزودن سیم های نایتینول در ناحیه کششی تیر، سبب افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری و کاهش قابل ملاحظه تغییر مکان پسماند عضو می گردد.

۱- مقدمه

نامیده می شود. این دو فاز با اعمال دما و یا تنش، قابل تبدیل به یکدیگر می باشند. همین فرآیند تبدیل، تمامی خصوصیات مکانیکی، الکتریکی و حرارتی آلیاژها را تحت تاثیر قرار می دهد و آن ها را به عنوان یک ماده هوشمند مطرح می کند [۲].

قابلیت بازگشت به شکل اولیه و توانایی بازیابی تغییر شکل های بزرگ، دو ویژگی منحصر به فرد این آلیاژهاست که مهندسی عمران می تواند از آن ها جهت ساخت سازه های هوشمند بهره گیرند. قابلیت بازگشت به شکل اولیه و یا همان رفتار حافظه داری شکلی^۲ یکی از ویژگی های منحصر به فرد این آلیاژهاست، که به موجب آن پس از اعمال بارگذاری و باربرداری بر نمونه ها، کرنش پس ماند قابل توجهی در آن ها باقی می ماند. این کرنش با اعمال دما و ایجاد تغییر فاز در آلیاژ به طور کامل قابل جبران می باشد. این بازیابی کرنش و بازگشت به شکل اولیه، نیرویی را تولید می کند که می توان از آن در سازه استفاده کرد. در شکل ۱ عملکرد حافظه داری شکلی این آلیاژها و به بیان دیگر، نمودار تنش-کرنش آن ها در فاز مارتنزیت نشان داده شده است [۳].

در سال های اخیر، ایده طراحی و ساخت سازه های هوشمند به واقعیت نزدیک تر شده است. اخیراً مهندسی عمران با استفاده از علم متالورژی به مصالح سازه ای نوینی دست یافته اند که در شرایط مختلف از خود ویژگی های از پیش تعیین شده ای را بروز می دهند. مواد سازه ای مورد استفاده در این مقاله، دسته ای از مواد هوشمند^۱ با نام آلیاژهای حافظه دار شکلی^۲ و از نوع نایتینول^۳ هستند. نایتینول نخستین بار در سال ۱۹۶۳ توسط بوهرلر و همکاران در آزمایشگاه تسلیحات نیروی دریایی آمریکا کشف شد [۱].

آلیاژهای حافظه دار شکلی، همانند بسیاری از آلیاژها و فلزات دیگر دارای بیش از یک نوع ساختار یا فاز کریستالی، با یک نوع ترکیب شیمیایی می باشند. به این مواد، مواد چند شکلی یا چندریختی^۴ گفته می شود. در این آلیاژها، فاز پایدار در دمای بالا آستنیت^۵ و فاز پایدار در دمای پایین مارتنزیت^۶

*نویسنده عهده دار مکاتبات: maghsoudi.a.a@uk.ac.ir

- 1 Smart Materials
- 2 Shape Memory Alloys (SMAs)
- 3 Nitinol = Ni and Ti are the atomic symbols for Nickel and Titanium. The "NOL" stands for the Naval Ordnance Laboratory where it was discovered.
- 4 Polymorphism
- 5 Austenite
- 6 Martensite

به دنبال ارائه روشی نوین جهت مقاوم‌سازی تیرهای بتن مسلح بودند. نتایج تحقیقات آن‌ها حاکی از آن است، که استفاده همزمان از سیم‌های نایتینول و ورق‌های پلیمری تقویت شده با فیبر کربنی، علاوه بر کاهش جابه جایی پسماند در نمونه‌های تحت تاثیر بارگذاری سیکلی، سبب افزایش ظرفیت بارگذاری آن‌ها نیز می‌گردد [۵].

پالرمو و همکاران در سال ۲۰۱۳ تعدادی تیر بتن مسلح را که در ناحیه بحرانی توسط میلگردهای نایتینول مسلح شده بود را تحت بارگذاری سیکلی قرار دادند. نتایج حاکی از کاهش جابه جایی پسماند، کاهش عرض ترک و افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های مسلح شده با نایتینول نسبت به نمونه‌های مسلح شده با میلگرد فولادی بود [۶].

در این مقاله به آنالیز المان محدود و صحت سنجی تیرهای بتن مسلح که در ناحیه کششی آن‌ها سیم‌هایی از جنس نایتینول به میلگردهای فولادی اضافه شده است، پرداخته شده است. مقایسه نتایج مدل‌سازی با مطالعات آزمایشگاهی موجود نیز بررسی شده است. به این منظور ابتدا به معرفی ویژگی‌های مصالح و مدل المان محدود پرداخته شده و سپس نتایج حاصل از آنالیز عددی توسط نرم‌افزار انسیس ارائه شده است.

۲- ویژگی‌های مصالح

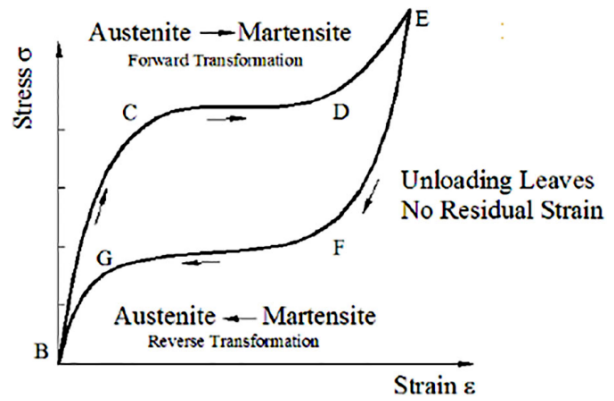
۲-۱- بتن

براساس مطالعه آزمایشگاهی انجام گرفته توسط لی [۵]، مشخصات بتن استفاده شده جهت ساخت نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱: مشخصات مکانیکی بتن مصرفی [۵]
Table 1. Mechanical properties of concrete

۳۱/۵	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۴/۵	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۲۶۳۰۰	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
۰/۲	ضریب پواسون

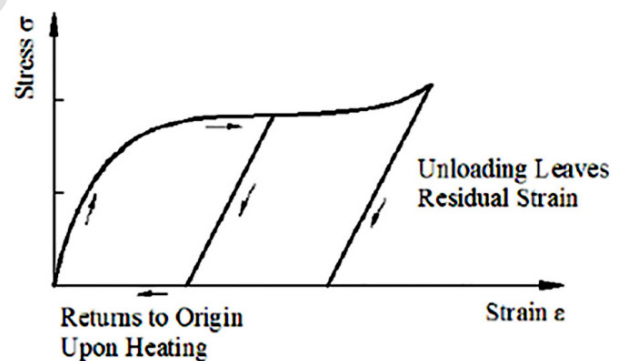
به منظور مدل‌سازی بتن در نرم افزار، ابتدای رفتار ایزوتروپیک خطی^۳ که شامل مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بتن می‌باشد، تعریف شده است. سپس جهت مدل‌سازی ترک خوردگی و خوردشدگی بتن، از پارامترهای نشان داده شده در جدول ۲، استفاده گردید [۷].



شکل ۱: عملکرد حافظه‌داری شکلی آلیاژها [۳]

Fig. 1. Shape memory functions of alloys

دیگر ویژگی منحصر به فرد این آلیاژها، توانایی بازیابی تغییر شکل‌های بزرگ یا رفتار فوق ارتجاعی^۱ می‌باشد. این ویژگی سبب می‌شود که نمونه‌ها، توانایی تحمل تغییر شکل‌های بزرگ را داشته باشند. اعمال تنش به نمونه‌ها موجب تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت می‌شود. سپس با انجام باربرداری فاز مارتنزیت ناپایدار شده و تبدیل معکوس اتفاق می‌افتد، که در نتیجه این تبدیل، ماده به حالت اولیه خود بازگشته و هیچ کرنش پسماندی در آن بر جای نمی‌ماند (چنین ویژگی در مناطق زلزله خیز، مزیت قابل توجهی در سازه‌های بتنی تلقی می‌گردد). این تغییر فاز آلیاژ در شرایط کاملاً هم‌دما اتفاق می‌افتد. شکل ۲ عملکرد فوق ارتجاعی آلیاژها را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۲: عملکرد فوق ارتجاعی آلیاژها [۴]

Fig. 2. Super elastic functions of alloys

تحقیقات پیرامون کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در بتن مسلح، عموماً از سال ۲۰۰۳ میلادی به بعد انجام گرفته است. جدیدترین تحقیقات انجام گرفته در این زمینه به شرح زیر است:

لی و همکاران در سال ۲۰۰۸ به کمک رفتار حافظه‌داری شکلی نایتینول و همچنین استفاده از ورق‌های پلیمری تقویت شده با فیبر کربنی^۲

1 Superelasticity

2 CFRP = Carbon Fiber Reinforced Polymer

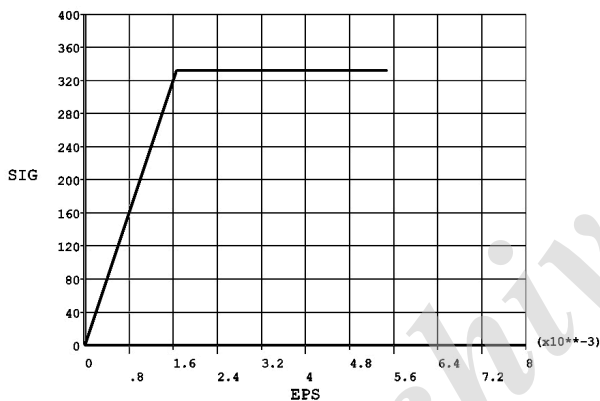
3 Linear Isotropic

جدول ۳: مشخصات میلگردهای فولادی طولی و عرضی مصرفی در تیرها [۵]

Table 3. Mechanical properties of longitudinal and transvers rebar utilized for the beams

موقعیت میلگرد	طولی	عرضی
تنش جاری شدن (مگاپاسکال)	۳۳۲	۳۸۵
تنش نهایی (مگاپاسکال)	۴۶۴	۵۱۷
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	۲۱۰ ^۵	۲۱۰ ^۵
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۳
قطر میلگرد (میلی متر)	۴	۳

ویژگی‌های فولاد در نرم افزار توسط دو رفتار ایزوتروپیک خطی و ایزوتروپیک دو خطی^۱ که شامل تنش جاری شدن و مدول الاستیسیته ثانویه می‌باشد، معرفی گردید. منحنی رفتار فولاد در نرم افزار مطابق با شکل ۴ می‌باشد.



شکل ۴: منحنی رفتار فولاد در نرم افزار

Fig. 4 Steel rebar stress-strain relationship in the software

۲-۳- آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

آلیاژ حافظه‌دار شکلی استفاده شده در این مطالعه آزمایشگاهی [۵] از نوع نایتینول با درصد وزنی ۵۰/۸ درصد نیکل و ۴۹/۲ درصد تیتانیوم می‌باشد. شکل ۵ نمودار تنش- کرنش سیم‌های نایتینول استفاده شده در مطالعه آزمایشگاهی را تا رسیدن به حد گسیختگی نشان می‌دهد.

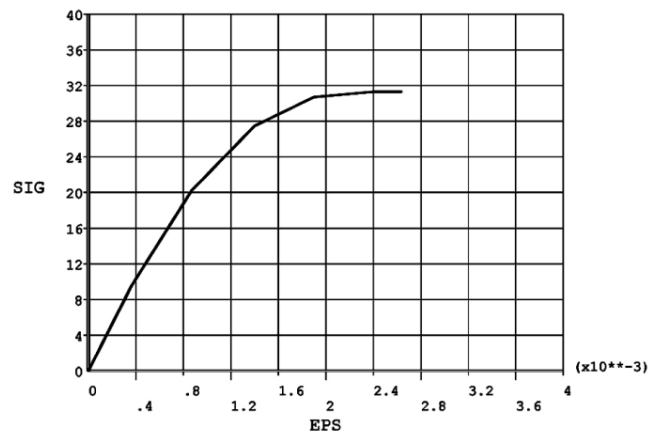
ویژگی‌های نایتینول در نرم‌افزار توسط دو رفتار ایزوتروپیک خطی و رفتاری تحت عنوان آلیاژهای حافظه‌دار شکلی که بر طبق مدل رفتاری اورچیو میباشد [۸]، تعریف شد. جدول ۴ بیانگر خصوصیات رفتاری مورد نیاز نایتینول جهت مدلسازی آن در نرم افزار می‌باشد (این اعداد از نمودار شکل ۵ برداشت شده‌اند).

جدول ۲: پارامترهای مورد استفاده جهت تعریف رفتار مصالح بتن در نرم‌افزار

Table 2. Parameters used to define the behavior of concrete material in the software

رفتار بتن	
ضریب انتقال برش در ترک باز	۰/۳۳
ضریب انتقال برش در ترک بسته	۰/۹۸
مقاومت کششی تک محوره	۴/۵
مقاومت فشاری یا خردشدگی تک محوری	-۱
مقاومت خردشدگی دو محوری	۰
فشار هیدرواستاتیک	۰
مقاومت خردشدگی دو محوری هیدرو استاتیک	۰
مقاومت خردشدگی تک محوری هیدرو استاتیک	۰
ضریب کشش آزاد شده	۰

منحنی رفتار بتن در نرم افزار مطابق با شکل ۳ می‌باشد.



شکل ۳: منحنی رفتار بتن در نرم افزار

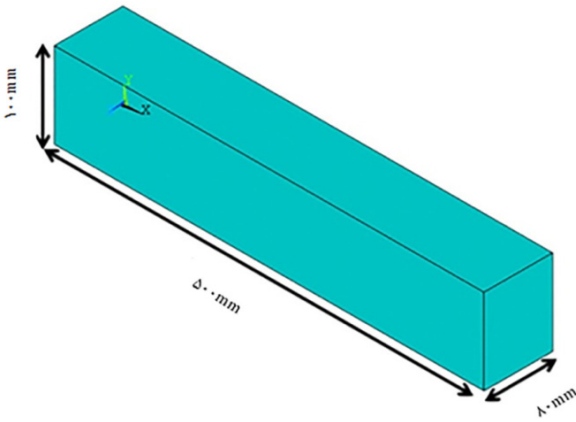
Fig. 3. Concrete stress-strain relationship in the software

۲-۲- فولاد

بر طبق مطالعه آزمایشگاهی انجام گرفته توسط لی [۵]، مشخصات میلگردهای فولادی طولی و عرضی استفاده شده جهت ساخت تیرهای بتن مسلح مطابق با جدول ۳ است.

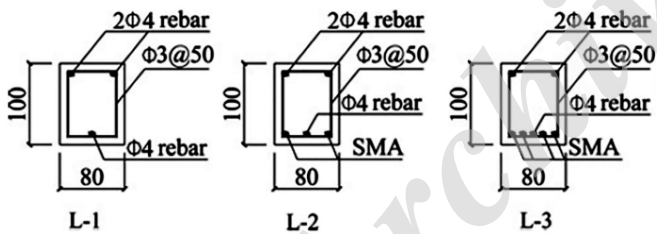
۳-۲- هندسه مدل

بر اساس تحقیق آزمایشگاهی [۵]، سه عدد تیر بتن مسلح با ابعاد ۸۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی‌متر در نرم افزار مدل‌سازی شده است (شکل ۶).



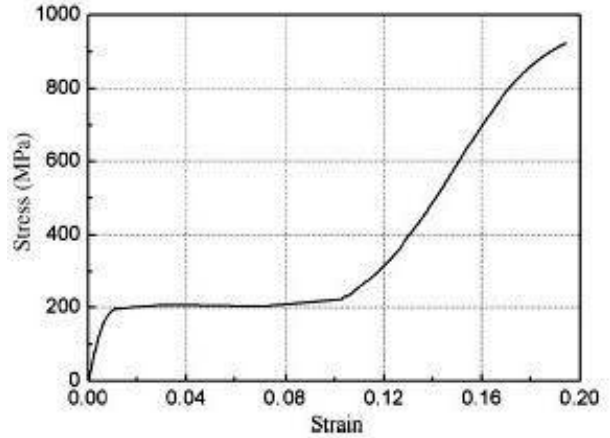
شکل ۶: نمونه ای از تیرهای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار انسیس
Fig. 6. An example of a modeling beam in the ANSYS software

۳-۳- شبکه بندی مدل و آرایش میلگردهای فولادی و سیم‌های نایتینول در تحقیق حاضر، آرایش میلگردهای فولادی و سیم‌های نایتینول، در تیرهای مدل‌سازی شده همانند مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته است [۵] که جزئیات آن در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: جزئیات تیرهای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار [۵]
Fig. 7. Details of the modeling beams in the software

به دلیل پیچیدگی مدل‌های ساخته شده، شبکه بندی به صورت دستی قابل انجام است و از آنجا که جنس، المان اختصاص یافته و نحوه مدل‌سازی میلگردهای طولی فولادی و سیم‌های نایتینول با یکدیگر متفاوت می‌باشد، در نتیجه مش بندی در هر یک از تیرها منحصر به فرد است. در ادامه تصاویر مش بندی هر یک از تیرها نشان داده شده است (شکل ۸ تا شکل ۱۰).



شکل ۵: نمودار تنش- کرنش سیم‌های نایتینول [۵]
Fig. 5. Nitinol wire stress-strain relationship

جدول ۴: خصوصیات رفتاری نایتینول

Table 4. Mechanical properties Nitinol wires

مدول الاستیسته فاز آستنیت (مگاپاسکال)	۲۰۰۰۰
تنش شروع تبدیل فاز مستقیم* (مگاپاسکال)	$\sigma_s^{AS} = 200$
تنش پایان تبدیل فاز مستقیم (مگاپاسکال)	$\sigma_f^{AS} = 200$
تنش شروع تبدیل فاز معکوس** (مگاپاسکال)	$\sigma_s^{SA} = 25$
تنش پایان تبدیل فاز معکوس (مگاپاسکال)	$\sigma_f^{SA} = 25$
ماکزیمم کرنش قابل بازگشت	$\epsilon_L = 0.08$
*: تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت **: تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت	

۳- مشخصات مدل المان محدود

۳-۱- انتخاب نوع المان

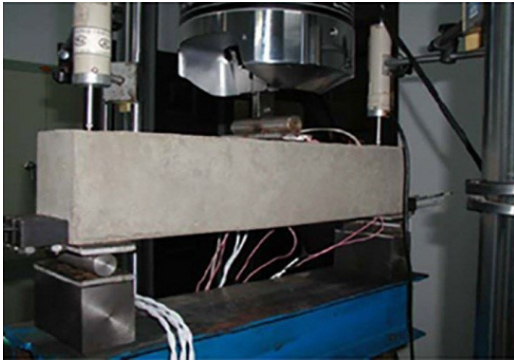
در این مقاله، از المان جامد ۶۵ که قابلیت مدل‌سازی ترک خوردگی و خردشدگی را داراست [۷]، جهت مدل‌سازی بتن، المان تیر ۱۸۸ جهت مدل‌سازی میلگردهای فولادی طولی و خاموت‌ها و از المان جامد ۱۸۵ نیز به منظور مدل‌سازی یا سیم‌های نایتینول استفاده شده است.

- 1 SOLID65
- 2 BEAM188
- 3 SOLID185

۳-۴- بارگذاری و اعمال شرایط مرزی

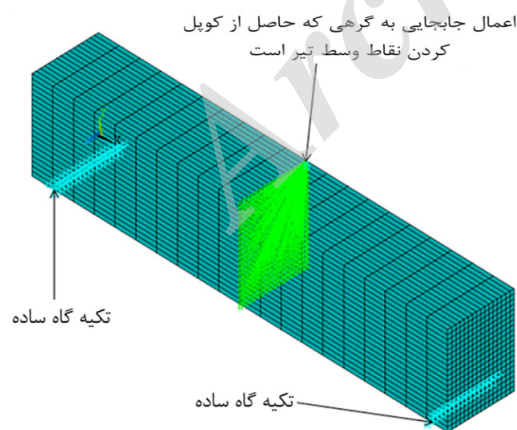
تمامی تیرهای مورد بررسی در این مقاله، مطابق با مطالعه آزمایشگاهی مورد نظر [۵] دارای تکیه‌گاه‌های ساده می‌باشد.

بارگذاری تیرها، به صورت اعمال بار در وسط تیر تا رسیدن به خیز ۵/۵ میلی‌متر بوده و سپس باربرداری صورت گرفته است، به همین دلیل در نرم‌افزار بارگذاری به صورت جابه‌جایی کنترل بر تیرها اعمال گردیده است. در ادامه ابتدا نحوه بارگذاری و شرایط تکیه‌گاه‌های نمونه‌ها در مطالعه آزمایشگاهی (شکل ۱۱) و سپس در مدل المان محدود (شکل ۱۲) نشان داده شده است. از آنجا که طول نمونه‌های مدل‌سازی شده کوچک (۵۰ سانتیمتر) می‌باشد و مقدار بار و جابجایی هدف در نمونه‌ها بسیار کوچکتر از نمونه‌های با مقیاس واقعی است، بنابراین بنظر می‌رسد، صرف نظر کردن از مدل‌سازی صفحات فلزی صلب در محل تکیه‌گاه‌ها و بار، خطای قابل توجهی در نتایج ایجاد نکند.



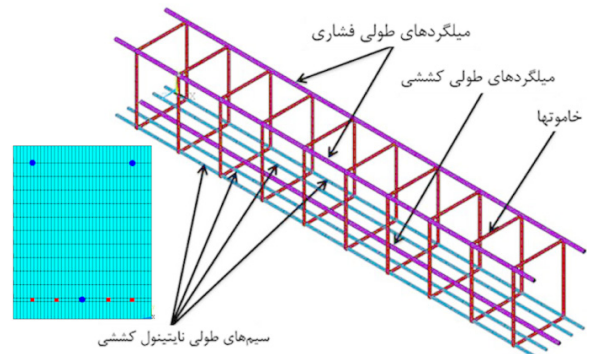
شکل ۱۱: نحوه بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌ها در مطالعه آزمایشگاهی [۵]

Fig. 11. Loading method and support condition of specimens in the experimental study



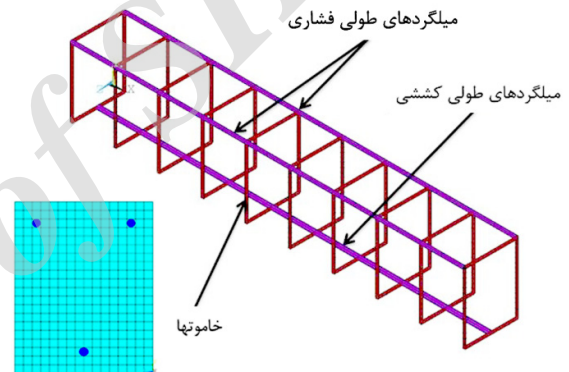
شکل ۱۲: نحوه بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌ها در مطالعه مدل‌سازی

Fig. 12 Loading method and support condition of specimens in the numerical study



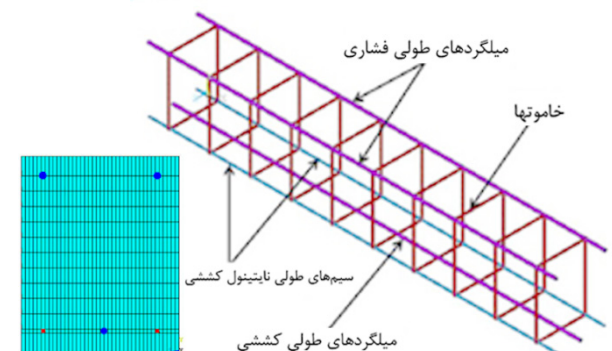
شکل ۸: مش‌بندی و نحوه قرارگیری میلگردها در نرم افزار برای تیر L1

Fig. 8. Meshing and layout of the rebar for beam L1



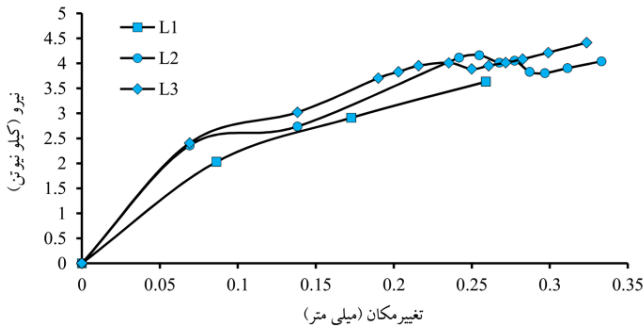
شکل ۹: مش‌بندی و نحوه قرارگیری میلگردها در نرم افزار برای تیر L2

Fig. 9. Meshing and layout of the rebar for beam L2



شکل ۱۰: مش‌بندی و نحوه قرارگیری میلگردها در نرم افزار برای تیر L3

Fig. 10. Meshing and layout of the rebar for beam L3



شکل ۱۴: نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرها تا رسیدن به بار تسلیم

Fig. 14 Mid-span load vs. deflection diagram of the test beams rising the mid-span yield load

همانطور که از نمودارها مشخص است، افزودن سیم‌های نایتینول در ناحیه کششی، سبب افزایش ظرفیت نمونه‌ها شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر و اینکه در هر مرحله از بارگذاری چه میزان ظرفیت نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است، ظرفیت تیرها در چندین مرحله بارگذاری به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

مرحله اول: تا رسیدن به بار ترک خوردگی.
 مرحله دوم: تا رسیدن به باری برابر با ۰/۶ بار تسلیم.
 مرحله سوم: تا رسیدن به باری برابر با بار تسلیم.
 مرحله چهارم: رسیدن به ظرفیت نهایی در خیز ۵/۵ میلی‌متر.
 جدول ۶ خیز، ظرفیت و میزان افزایش ظرفیت هر یک از نمونه‌ها را در ۴ مرحله بارگذاری یاد شده، نشان می‌دهد.

جدول ۶: خیز، ظرفیت و میزان افزایش ظرفیت تیرها در ۴ مرحله

Table 6. Deflection, capacity and increase in the capacity of test beams in all four steps of loading

تیر	L3	L2	L1
خیز (میلیمتر)	۰/۰۶۹	۰/۰۶۹	۰/۰۸۶
مرحله اول			
ظرفیت (کیلو نیوتن)	۲/۴۰۶	۲/۳۵۸	۲/۲۲۹
افزایش ظرفیت (%)	۷/۹۴	۵/۸۰	۰
خیز (میلیمتر)	۰/۰۹۶	۰/۰۸۱	۰/۱۰۲
مرحله دوم			
ظرفیت (کیلو نیوتن)	۲/۶۴۸	۲/۴۲۴	۲/۳۱۱
افزایش ظرفیت (%)	۱۴/۵۸	۴/۹۰	۰
خیز (میلیمتر)	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۲۱۶
مرحله سوم			
ظرفیت (کیلو نیوتن)	۴/۴۱۳	۴/۰۴۱	۳/۸۵۲
افزایش ظرفیت (%)	۱۴/۵۶	۴/۹۰	۰
خیز (میلیمتر)	۵/۵	۵/۵	۵/۵
مرحله چهارم			
ظرفیت (کیلو نیوتن)	۱۱/۸۱۰	۹/۰۹۱	۶/۳۷۴
افزایش ظرفیت (%)	۸۵/۲۸۴	۴۲/۶۲	۰

۳-۵- آنالیز مدل

به منظور آنالیز مدل‌های ساخته شده، از آنالیز غیرخطی استاتیکی با اثر جابه‌جایی‌های کوچک^۱ و معیار همگرایی جابه‌جایی استفاده شده است. با توجه به اینکه تعداد میلگردهای فولادی، سیم‌های نایتینول و المان‌ها و در نتیجه پیچیدگی مدل‌های ساخته شده با یکدیگر متفاوت می‌باشد، مقدار نرم همگرایی^۲ و اندازه گام زمانی^۳ انتخاب شده جهت آنالیز هر یک از مدل‌های تیر منحصر به فرد و مطابق جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مقادیر نرم همگرایی و اندازه گام زمانی انتخاب شده

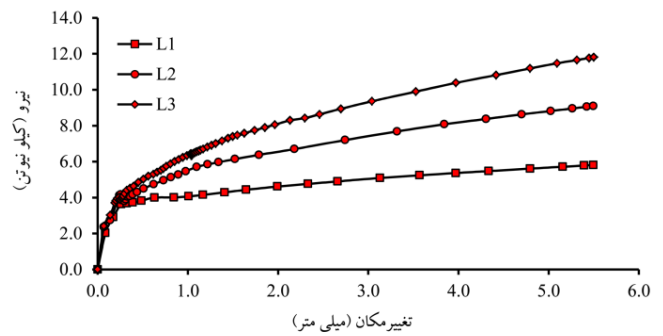
Table 5. Norm of convergence values and selected step size in ANSYS

تیر	معیار همگرایی	اندازه گام زمانی
L1	$U = 0.05$	۰/۱
L2	$U = 0.06$	۰/۰۸
L3	$U = 0.08$	۰/۰۸

۴- نتایج آنالیز عددی

در این بخش نتایج آنالیز المان محدود تیرهای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ارائه شده است.

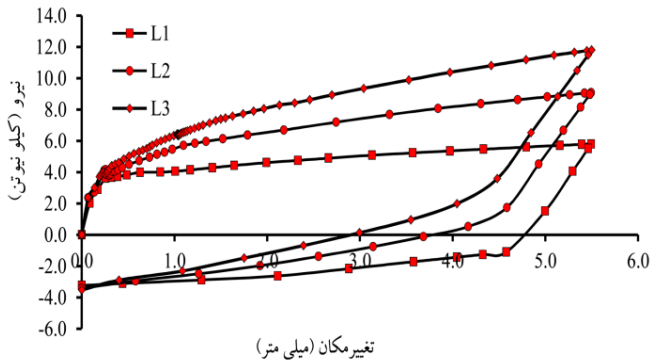
۴-۱- نمودارهای بار-تغییر مکان تیرهای مدل‌سازی شده در شکل ۱۳، نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرها تا رسیدن به خیز ۵/۵ میلی‌متر و همچنین، به منظور بررسی دقیق‌تر، نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه تا رسیدن به بار تسلیم، در شکل ۱۴ ارائه شده است.



شکل ۱۳: نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرها تا رسیدن به خیز ۵/۵ میلی‌متر

Fig. 13. Mid-span load vs. deflection diagram of the test beams rising the mid-span deflection of 5.5 mm

- 1 Small Displacement
- 2 Convergence Criteria
- 3 Time Step size



شکل ۱۶: نمودار هیستریزیس وسط دهانه تیرها

Fig. 16. The mid-span hysteresis diagram of the beams

جدول ۸: تغییر مکان پسماند نمونه‌های مدل‌سازی شده

Table 8. The residual deformation of the modelling beams

تیر	تغییر مکان پسماند (میلی‌متر)	کاهش تغییر مکان پسماند (%)
L1	۴/۷۵	۰
L2	۳/۷۸	۲۰/۴۲
L3	۲/۸۹	۳۹/۱۶

افزودن سیم‌های نایتینول در ناحیه کششی تیر، سبب کاهش تغییر مکان پسماند آن‌ها شده است. همانگونه که مشهود است، مقادیر تغییر مکان پسماند تیرهای دارای سیم‌های نایتینول نسبت به تیرهای فاقد سیم نایتینول کمتر است. با افزایش تعداد سیم‌های نایتینول در منطقه کششی تیر، میزان کاهش تغییر مکان پسماند تیر، افزایش یافته است. در پایان بارگذاری، سیم‌های نایتینول تمایل به بازگشت به کرنش صفر را دارند. این موضوع سبب تولید نیروهای برگشت پذیری می‌شود که موجب بسته شدن ترک‌های موجود و کاهش تغییر مکان پسماند می‌گردد، که چنین ویژگی خصوصاً در مناطق زلزله خیز یک مزیت قابل توجه تلقی می‌گردد. به بیان دیگر با خرابی عضو و تمایل سیم‌های نایتینول به بازگشت به کرنش صفر و در نتیجه امکان بسته شدن ترک‌های در بار خرابی که اغلب از عرضی چند برابر نسبت به بار خدمت برخوردارند، امکان مقاوم سازی چنین اعضایی مثلاً با کامپوزیت‌های FRP وجود دارد. هرچند این موضوع نیاز به بررسی‌های آزمایشگاهی بیشتر دارد.

۳-۴- توسعه ترک‌ها

در ادامه، توسعه ترک‌ها در نمونه‌های مدل‌سازی شده پس از مرحله بارگذاری و باربرداری در شکل ۱۷ تا ۱۹ نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، توسعه ترک‌ها در حین مرحله بارگذاری، در نمونه‌های

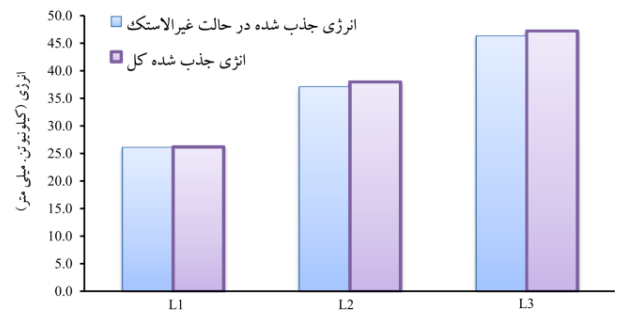
همانطور که از نتایج جدول ۶ نیز مشخص است، با افزودن سیم‌های نایتینول در ناحیه کششی نمونه‌ها، می‌توان ظرفیت آن‌ها را حداکثر تا حدود ۱۴٪ تا رسیدن به بار تسلیم و در حدود ۸۵ درصد تا رسیدن به بار نهایی افزایش داد.

افزایش ظرفیت نمونه‌ها، سبب افزایش جذب انرژی توسط آن‌ها و در نتیجه سبب افزایش شکل‌پذیری و بهبود عملکرد لرزه‌ای آن‌ها می‌گردد. در جدول ۷ انرژی جذب شده در هریک از نمونه‌ها در حالت غیرالاستیک و انرژی جذب شده کل ارائه شده است و در نهایت در شکل ۱۵ مقایسه‌ای بین انرژی جذب شده در حالت غیرالاستیک و انرژی جذب شده کل نمونه‌ها انجام شده است.

جدول ۷: انرژی جذب شده و درصد افزایش آن در نمونه‌ها

Table 7. Absorbed energy and its percentage increase for the specimens

تیر	L3	L2	L1
انرژی جذب شده در حالت غیرالاستیک (کیلو نیوتن. میلی‌متر)	۴۶/۳۵۰	۳۷/۱۰۹	۲۸/۶۱۷
افزایش انرژی (%)	۶۱/۹۷	۲۹/۶۷	۰
انرژی جذب شده کل (کیلو نیوتن. میلی‌متر)	۴۷/۲۲۸	۳۷/۹۹۸	۲۸/۹۳۸
افزایش انرژی (%)	۶۳/۲۰	۳۱/۳۱	۰



شکل ۱۵: مقایسه انرژی جذب شده در حالت غیرالاستیک و انرژی جذب شده کل در نمونه‌ها

Fig. 15. Comparison of elastic absorbed energy and total absorbed energy of the beams

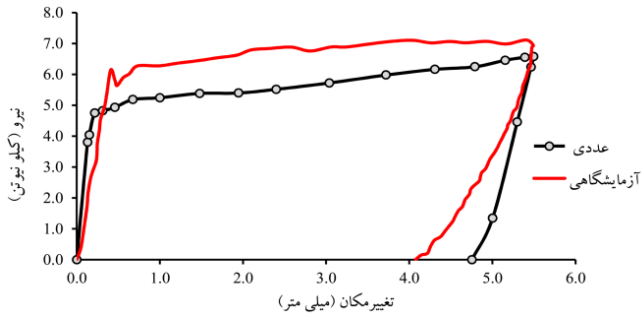
نتایج حاکی از آن است که با افزودن سیم‌های نایتینول در ناحیه کششی انرژی جذب شده کل در نمونه‌ها تا حداکثر ۶۳٪ افزایش می‌یابد.

۲-۴- تغییر مکان پسماند

در این بخش ابتدا نمودار هیستریزیس نمونه‌های مدل‌سازی شده تحت بارگذاری و باربرداری (شکل ۱۶) و سپس مقدار جابه‌جایی پسماند (جدول ۸) در هریک از آن‌ها ارائه شده است.

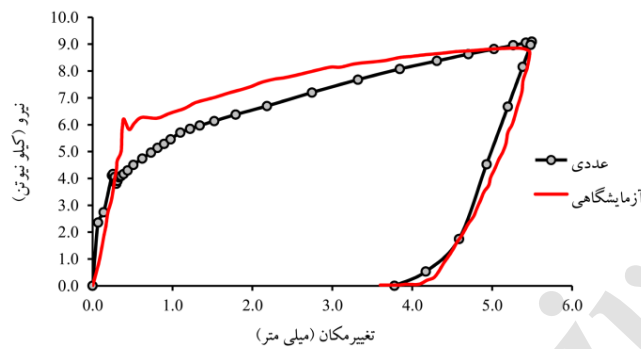
۵- صحت سنجی

در این بخش به مقایسه نتایج حاصل از آنالیز عددی با نتایج بررسی آزمایشگاهی موجود [۵] پرداخته شده است (شکل ۲۰ تا شکل ۲۲).



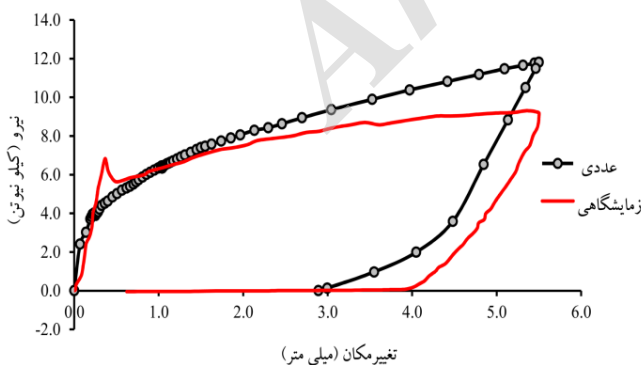
شکل ۲۰: مقایسه نیرو-تغییر مکان نمونه مدل سازی شده (انسیس) و نمونه آزمایشگاهی تیر L1

Fig. 20. The numerical and experimental comparison of load vs. mid-span deflection of beam L1



شکل ۲۱: مقایسه نیرو-تغییر مکان نمونه مدل سازی شده (انسیس) و نمونه آزمایشگاهی تیر L2

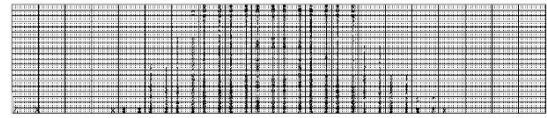
Fig. 21. The numerical and experimental comparison of load vs. mid-span deflection of beam L2



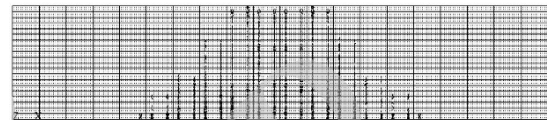
شکل ۲۲: مقایسه نیرو-تغییر مکان نمونه مدل سازی شده (انسیس) و نمونه آزمایشگاهی تیر L3

Fig. 22. The numerical and experimental comparison of load vs. mid-span deflection of beam L3

شامل سیم‌های نایتینول نسبت به نمونه فاقد سیم نایتینول، بیشتر است. اما پس از باربرداری، به علت تمایل سیم‌های نایتینول برای بازگشت به کرنش صفر، نیروهای برگشت پذیری تولیدی می‌شود که سبب بسته شدن ترک‌ها در ناحیه بحرانی تیر شده است. چنین خاصیتی برای اعضای نواحی زلزله خیز یک مزیت ویژه تلقی می‌گردد.



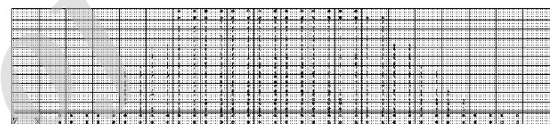
پس از بارگذاری



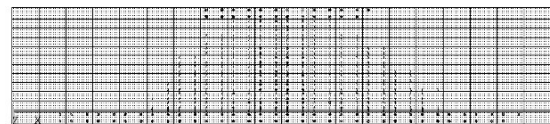
پس از باربرداری

شکل ۱۷: توسعه ترک‌ها در تیر L1

Fig. 17. Crack patters of the beam L1 in ANSYS



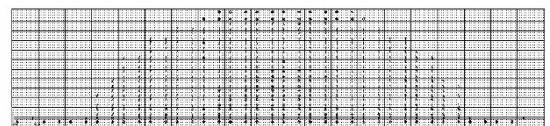
پس از بارگذاری



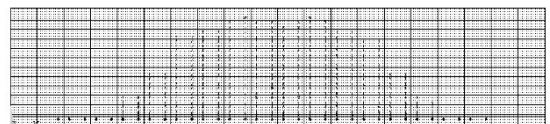
پس از باربرداری

شکل ۱۸: توسعه ترک‌ها در تیر L2

Fig. 18. Crack patters of the beam L2 in ANSYS



پس از بارگذاری



پس از باربرداری

شکل ۱۹: توسعه ترک‌ها در تیر L3

Fig. 19. Crack patters of the beam L3 in ANSYS

۳. هر چند که با اضافه کردن، سیم‌های نایتینول در ناحیه کششی تیر، در حین بارگذاری، گسترش ترک‌ها بیشتر می‌گردد لیکن، پس از مرحله باربرداری، بسته شدن ترک‌ها در ناحیه بحرانی به وقوع پیوسته است. چنین ویژگی، در تیرهای مناطق زلزله خیز، از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا احتمال مقاوم‌سازی چنین اعضایی (بدون تخریب عضو)، فراهم می‌گردد.

مراجع

- [1] G. Songa, N. Maa, and H.N. Lib, Applications of shape memory alloys in civil structures, *Engineering Structures*, 28 (2006) 1266–1274.
- [2] A. Motahari, Applications of shape memory alloys in different modes for the control of inactive structures, Phd thesis, Tehran University, 2007 (In Persian).
- [3] L. Janke, C. Czaderski, and M. Motavalli, Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas, *Materials and Structures*, 38 (2005) 578-592.
- [4] R. Desroches, and B. Smith, Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: a critical review of their potential and limitations, *Journal of Earthquake Engineering*, 17 (2003) 1-15.
- [5] H. Li, Z.q. Liub, and J.p. Ou, Experimental study of a simple reinforced concrete beam temporarily strengthened by SMA wires followed by permanent strengthening with CFRP plates, *Engineering Structures*, 30 (2008) 716–723.
- [6] A. Abdulridha, D. Palermo, S. Foo, Behavior and modeling of superelastic shape memory alloy reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 49 (2013) 893-904.
- [7] ANSYS, ANSYS User's Manual, V15.0, 2015.
- [8] D. Fugazza, Shape memory alloy diveces in earthquake engineering: mechanical properties, constitutive modeling and numerical simulations, Master thesis, Istituto University, ROSE School, 2003.

همانطور که از نمودارها نیز مشخص است، روند افزایش و کاهش بار و تغییرمکان پسماند در هر دو حالت بررسی آزمایشگاهی و المان محدود یکی می‌باشد، اما در حداکثر بار قابل تحمل و میزان تغییرمکان پسماند نمونه‌ها، تفاوت‌هایی در بین بررسی آزمایشگاهی و المان محدود وجود دارد. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی و درصد خطاها برای بار تسلیم فولاد کششی معمولی و بار نهایی نیز در جدول ۹ نشان داده شده است. جدول ۹ حاکی از تطابق مناسب نتایج عددی و آزمایشگاهی دارد.

جدول ۹: مقایسه ظرفیت نهایی در نمونه‌ها

Table 9. The comparison of ultimate capacity of the specimens

تیر	بار نهایی (kN)	
	عددی	خطا (%)
L1	۶/۳۷	۷/۷
L2	۸/۹	۲/۱
L3	۹/۳	۲۶/۹

۶- نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج حاصل از این بررسی عبارتست از:

- افزودن سیم‌های نایتینول در ناحیه کششی تیر، سبب افزایش ظرفیت باربری (۱۴٪ تا رسیدن به بار تسلیم و ۸۵٪ بار نهایی) و شکل‌پذیری عضو به طور همزمان شده است. این موضوع سبب شده است که تیرهای دارای سیم نایتینول عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به تیرهای فاقد سیم نایتینول داشته باشند. با افزودن سیم‌های نایتینول در ناحیه کششی انرژی جذب شده کل در نمونه‌ها تا حداکثر ۸۰٪ افزایش یافته است.
- با اضافه کردن سیم‌های نایتینول در ناحیه کششی تیر و اعمال بارگذاری سیکلی، از میزان تغییرمکان پسماند عضو به طور قابل ملاحظه‌ای کاسته شده است.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

A. A. Maghsoudi, M. Maghsoudi, H. Haghghi, F.E. Modeling and Experimental Comparison of RC Beams Consisting Shape Memory Alloys under Cyclic Loading. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(4) (2018) 745-754.
DOI: 10.22060/ceej.2017.11300.5001

Archive of SID