

## بهبود رفتار لرزه‌ای قاب خمشی بتنی با استفاده از SMA و ECC

غلامرضا قدرتی امیری

استاد دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
Ghodrati@iust.ac.ir

رسول نوربخش

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
r\_noorbakhsh@civileng.iust.ac.ir

احسان درویشان

دانشجوی دکترای مهندسی زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
darvishan@iust.ac.ir

کلید واژه‌ها: آلیاژ حافظه‌دار شکلی، کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، فوق کشسان، قاب خمشی بتنی، تحلیل غیر خطی

### چکیده

در این مطالعه، رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتنی با استفاده از دو ماده جدید مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور سه قاب بتنی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به صورت دو بعدی با استفاده از نرم‌افزار OpenSees مدل شد. برای هر یک از این قاب‌ها، سه حالت مختلف در نظر گرفته شد: (۱) در تمام المان‌های سازه‌ای از بتن و فولاد متداول ساختمانی استفاده شد (Steel) (۲) در ناحیه مفاصل پلاستیک تیرها از آرماتورهای از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA) استفاده شد (SMA) (۳) ناحیه مفاصل پلاستیک تیرها به طور کامل با آرماتورهای از جنس SMA و کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC) مدل شدند (ECC). تحلیل استاتیکی غیرخطی، به منظور تعیین پارامترهای اضافه مقاومت و شکل‌پذیری قاب‌های بتنی انجام شد. همچنین تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت ۲۲ زلزله مختلف، برای هر یک از ۹ حالت مختلف قاب‌های بتنی، صورت پذیرفت و جابجایی طبقات و کرنش‌های پسماند آن‌ها مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله، بهبود عملکرد لرزه‌ای و کاهش تغییر شکل‌های ماندگار قاب‌ها را در حالت‌های استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی و کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، نسبت به آرماتور فولادی و بتن معمولی نشان می‌دهد.

### مقدمه

در اثر زلزله‌های شدید، اعضای سازه‌ای قاب‌های خمشی بتنی، تغییر شکل‌های بزرگی را تجربه می‌کنند. به گونه‌ای که در اثر این تغییر شکل‌ها، آرماتورها به حد تسلیم می‌رسند و بتن می‌شکند. در طراحی مرسوم سازه‌های بتن مسلح، انتظار می‌رود که آرماتورها به حد تسلیم برسند تا با تغییر شکل‌های دائمی آرماتورهای فولادی پس از تسلیم و خرابی بتن غیر محصور، انرژی مستهلک گردد. متعاقباً در طی زمین لرزه‌های شدید، خرابی سازه‌ها و پل‌ها، بسته شدن جاده‌ها و اختلال در امداد رسانی، آسیب‌های جدی اقتصادی را نتیجه می‌دهد، در حالی که اگر سازه‌ها بعد از چنین زمین لرزه‌هایی قابل سرویس‌دهی باشند و تغییر شکل‌های ماندگار در آن‌ها ناچیز باشد، از بسیاری از این فجایع جلوگیری می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده انتظار می‌رود که اعضای سازه‌ای قاب‌های خمشی بتنی، بتوانند تغییر شکل‌های بزرگتری بدون باقی گذاشتن کرنش‌های پسماند زیاد را از خود نشان دهند. لذا استفاده از آرماتور و بتن با ظرفیت‌های شکل‌پذیری و استهلاک انرژی بالا می‌تواند در بهبود عملکرد لرزه‌ای این نوع از سازه‌ها مفید باشد. با توجه به این که تغییر شکل‌های پلاستیک عمده، در ناحیه مفاصل پلاستیک اتفاق می‌افتد، استفاده از این مصالح در این نواحی می‌تواند راه حل بهینه و مفیدی باشد.

### آلیاژ حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) دسته‌ای از مواد هوشمند هستند که نسبت به تغییر ویژگی‌های محیط اطرافشان واکنش نشان می‌دهند. این آلیاژها نسبت به سیستم‌های متداول مستهلک کننده انرژی دارای مزایا و ویژگی‌های منحصر به فردی هستند. عدم نیاز به تعویض



پس از زلزله، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت بازگشت به حالت اولیه به وسیله اعمال دما، قابلیت استهلاک انرژی زیاد و تحمل کرنش تا حدود ۸ درصد بدون باقی گذاشتن کرنش پسماند، از جمله مزایا و ویژگی‌های این مواد است. معروف‌ترین و پرکاربردترین آلیاژ حافظه‌دار شکلی، نیتینول است که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم می‌باشد (McCormick and Delemont, 2004).

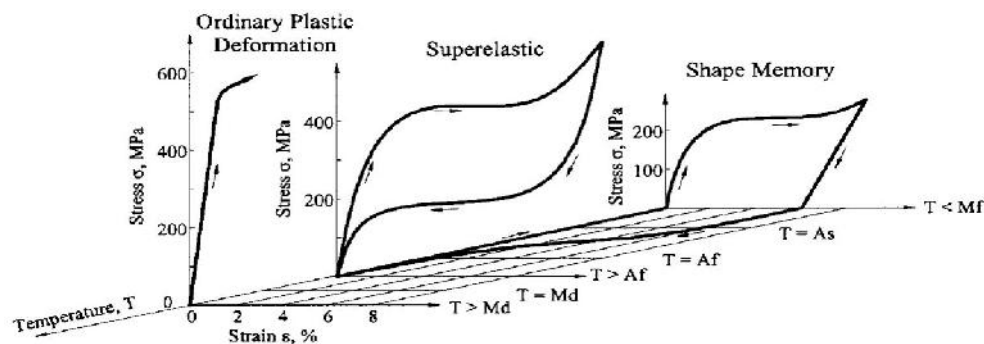
ظرفیت استهلاک انرژی مناسب و قابلیت بازگرداندگی مواد حافظه‌دار شکلی، دو خاصیت مهم این مواد برای استفاده در سازه‌ها می‌باشد. قابلیت استهلاک انرژی این مواد، تقاضا را بر روی اعضای اصلی سازه کاهش می‌دهد و از آن جایی که این مواد دارای مقاومت بسیار بالایی در مقابل خستگی هستند، می‌توانند پس از زلزله نیز مورد استفاده قرار گیرند و نیازی به تعویض آن‌ها نمی‌باشد. همچنین قابلیت بازگرداندگی در این مواد موجب می‌شود که سازه در طول زلزله به دفعات به وضعیت اولیه خود باز گردد؛ که این امر مانع از تجمع کرنش‌ها در سازه شده و در نتیجه سازه پس از زلزله بدون به جای گذاشتن تغییر شکل‌های ماندگار، به وضعیت اولیه باز می‌گردد.

این پدیده با نام اثر حافظه‌داری (SME) و آلیاژهایی که دارای این خواص هستند به عنوان آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMAs) معروف هستند. بعدها دیده شد که این مواد، دارای خاصیت دیگری با نام سوپر الاستیسیته می‌باشند که بیان کننده توانایی بازگشت به شکل اولیه خود پس از ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ و طی سیکل‌های بارگذاری و باربرداری مکانیکی در دمای ثابت هستند (Fugazza, 2005).

## ریزساختار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار معمولاً به صورت یکی از دو فاز مارتنزیت و آستنیت، پایدار می‌باشند. به طور کلی، فاز مارتنزیت در دماهای پایین و تنش‌های بالا، پایدار است؛ در حالی که فاز آستنیت، در دماهای بالا و تنش‌های پایین، پایدار می‌باشد. آستنیت، ساختار بلوری مکعبی و متقارن دارد، و همین تقارن موجب مقاوم‌تر بودن آن شده؛ در حالی که مارتنزیت ساختاری متوازی الاضلاع گونه و نامتقارن دارد و به همین جهت پایداری کمتری دارد.

قابلیت منحصر به فرد برگشت‌پذیری شکل در مواد حافظه‌دار تا حدی به ساختار کریستالی منظم شده بین دو فاز مربوط می‌شود. در تبدیل فاز مارتنزیت، فقط تغییر شکل رخ می‌دهد و تغییر حجم نداریم، رخ ندادن لغزش دائمی باعث قابلیت بازگشت شکل اولیه در مواد حافظه‌دار می‌شود. بدین ترتیب مواد حافظه‌دار، در تغییر شکل‌های بزرگ هم قابلیت بازافتن شکل اولیه خود را دارند (Wayman and Duerig, 1990).



شکل ۱: تغییر فاز آلیاژ حافظه‌دار شکلی با تغییر دما (DesRoches et al., 2004)

## کاربردهای آلیاژ حافظه‌دار

کاربردهای اولیه مواد حافظه‌دار شکلی در ابتدا محدود به کاربردهای پزشکی بوده، اما امروزه این مواد به واسطه عملکرد ترمومکانیکی منحصر به فردی که دارند، در دسته بزرگی از صنایع کاربرد دارند. از این آلیاژها در بال‌های وقتی هواپیما و بال‌های هوشمند بالگردها، در قاب عینک، آنتن گوشی موبایل، فعالگرها، دمپرها، استنت شریانی، مهاربندهای اورتودنسی و پروتزهای اورتوپدی و ... به طور گسترده‌ای استفاده شده است.

در زمینه‌های مختلف عمرانی نیز تحقیقات گسترده‌ای بر روی نیتینول صورت گرفته است. عمده این مطالعات در زمینه‌های پل، میراگر، اتصالات، مهاربند، بهسازی و مقاوم سازی و ... بوده است. به طور کلی می‌توان گفت در همه این موارد، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی توانسته‌اند بدون کاهش مقاومت سازه، ظرفیت استهلاک انرژی را افزایش دهند و موجب کاهش خرابی و تغییر شکل‌های ماندگار سازه شوند.

البته همواره یک عامل که مانع گسترش استفاده کاربردی از این آلیاژ شده است، هزینه تولید آن می‌باشد. چرا که به دلیل فرآیند سخت تولید و فرآوری این آلیاژ و سختی بالای آن که موجب نیاز به کار سرد بیشتر جهت تولید و شکل‌دهی می‌گردد، قیمت تمام شده بالایی دارد (به عنوان مثال برای برش یک قطعه از جنس نیتینول، بیش از ده برابر نمونه مشابه فولادی زمان لازم است). البته این در حالی است که در سال‌های اخیر قیمت نیتینول کاهش چشمگیری داشته است، به گونه‌ای که در طی ده سال از ۱۰۰۰ دلار برای هر کیلوگرم به کمتر از ۱۰۰ دلار برای هر کیلوگرم در سال ۲۰۱۱ رسیده است. و پیش‌بینی می‌شود، با پیشرفت صنایع و به وجود آمدن روش‌های جدید تولید و شکل‌دهی و همچنین

افزایش استفاده از آن، قیمت این آلیاژ به کمتر از مقدار فعلی برسد (Shahria Alam et al, 2012). هرچند باز هم نسبت به سایر مصالح متداول ساختمانی قیمت بسیار بالایی دارد اما این عامل نباید مانع کارهای تحقیقاتی گردد. ضمن این که استفاده از این آلیاژ می‌تواند هزینه‌های نگهداری و تعمیر بعد از زلزله را کاهش دهد.

### کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC)

امروزه مزایای استفاده از الیاف به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌های سیمانی به خوبی مشخص شده است. بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی است. مقاومت‌های کششی و خمشی بتن به ترتیب ۱۰ و ۱۵ درصد مقاومت فشاری آن است و بتن ذاتاً ماده‌ای ترد و شکننده می‌باشد. این امر به ایجاد ترک در بتن منجر می‌گردد. به دلیل بالا بودن مقاومت کششی فولاد، با استفاده از میلگردهای فولادی می‌توان بتن را تقویت کرد. اما بتن مسلح با میلگردهای فولادی علی‌رغم برخی بهبودها، نقاط ضعفی نیز دارد. این مشکلات موجب ورود الیاف و سایر منسوجات به دنیای بتن گردید که با نتایج مطلوب و قابل قبولی از نظر کاهش ترک خوردگی، افزایش طاقت، بهبود شکل پذیری، جذب انرژی بهتر و نیز افزایش مقاومت کششی بتن همراه بود (مهتا پ ک و همکاران، ۱۳۸۳).

توسعه و گسترش بتن تقویت شده با الیاف، دستخوش شرایط و تحولات بسیاری بوده است. از الیاف مختلف با جنس‌های متفاوت و ابعاد و درصدهای متنوع استفاده شد اما تنها مقاومت خمشی بتن افزایش یافت و تغییر در شکل پذیری آن حاصل نشد. این امر محققان را به سمت تولید نوع جدیدی از بتن تقویت شده با الیاف، که دارای خاصیت شکل‌پذیری کششی باشد، سوق داد.

کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC<sup>۱</sup>) که نخستین بار در سال ۱۹۹۳ میلادی توسط پروفیسور "لی" ارائه گردید، دارای دو خصوصیت منحصر به فرد می‌باشد: (۱) ایجاد ریزترک‌های متعدد و (۲) بروز رفتار سخت‌شوندگی کرنشی (یعنی توانایی تحمل تنش بیش‌تر با افزایش کرنش، پس از نقطه بیشینه) (Li V C, 2008). ECC را می‌توان به عنوان خانواده‌ای از مصالح با محدوده‌ای از مقاومت کششی و انعطاف‌پذیری به حساب آورد که بسته به نیازهای یک سازه خاص می‌تواند تنظیم شود. ECC که از مصالح محلی استفاده می‌کند، به طور موفقیت آمیزی در کشورهای مختلف، شامل ژاپن، اروپا و آفریقای جنوبی علاوه بر ایالات متحده، تولید شد. خلاصه‌ای از مشخصات فیزیکی ECC در جدول ۱ آمده است. باید تأکید شود که مشخصات ECC با به کار بردن ابزار ریزمکانیک (میکرومکانیک) قابل بررسی است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی عمده ECC (Li V C, 2008)

چگالی (g/cc)	مقاومت خمشی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	کرنش کششی نهایی (%)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مقاومت اولین ترک (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
۰/۹۵ - ۲/۳	۱۰ - ۳۰	۱۸ - ۳۴	۱ - ۸	۴ - ۱۲	۳ - ۷	۲۰ - ۹۵

اصول طراحی ECC، به الیاف خاصی بستگی ندارد. اما حجم زیادی از ادبیات در مورد ECC بر پایه الیاف PVA<sup>۲</sup> توسعه داده شده است.

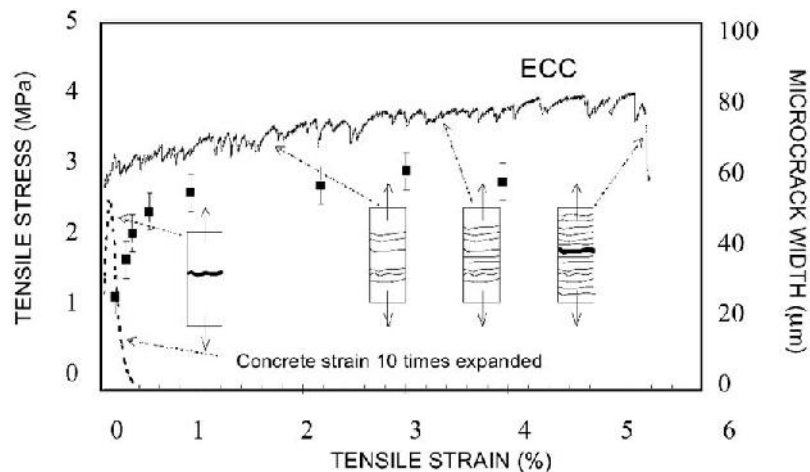
### مشخصات کامپوزیت سیمانی مهندسی شده

مهمترین مشخصه ECC انعطاف‌پذیری کششی زیاد است که به وسیله منحنی تنش کششی غیرمحوری-کرنش، با ظرفیت کرنش به اندازه ۰/۵٪ بیان می‌شود (شکل ۲). این رفتار مشابه فلز، مشخصه‌ای با عنوان نقطه تسلیم را در انتهای مرحله الاستیک، زمانی که اولین ریزترک در نمونه ظاهر می‌شود را نشان می‌دهد. تشکیل ریزترک‌های متعدد برای دستیابی به انعطاف‌پذیری کششی زیاد کامپوزیت ضروری است. بین اولین کرنش ترک‌خوردگی (حدود 0.01%) و کرنش 1%، بازشدگی ریزترک از صفر تا حدود 60 μm افزایش می‌یابد. بارگذاری بیشتر از 1% باعث ایجاد ریزترک‌های متعدد بیشتری می‌شود، اما مقدار بازشدگی بیشتر از مقدار حالت پایدار 60 μm نمی‌شود.

مشخصات فشاری ECC به طور قابل توجهی متفاوت از بتن معمولی تا بتن پرمقاوم نیست. مقاومت فشاری ECC از 30MPa تا 90MPa تغییر می‌کند. معمولاً مدول الاستیک (حدود 20-25 GPa) به دلیل عدم وجود درشت‌دانه‌ها، کمتر از بتن می‌باشد. ظرفیت کرنش فشاری ECC به میزان کمی، بیشتر است (حدود 0/45-0/65%). پاسخ خمشی ECC، انعطاف‌پذیری کششی آن را بیان می‌کند. تحت خمش، چندین ریزترک در سطح عضو شکل می‌گیرد. مقاومت خمشی (مدول شکست یا MOR) 10-15MPa به راحتی به دست می‌آید.

1 . Engineered Cementitious Composite

2 . Polyvinyl alcohol



شکل ۲: منحنی تنش کششی- کرنش ECC. همچنین توسعه عرض ترک را به عنوان تابعی از کرنش کششی نشان می‌دهد. (Li V C, 2008)

ECC پیشرفت مهمی در پاسخ خستگی نسبت به بتن معمولی و FRC<sup>۳</sup> داشته است. آزمایش خستگی خمشی انجام شده بر روی ECC نشان داده ECC در مقایسه با ملات‌های پلیمری سیمانی که معمولاً در تعمیر استفاده می‌شود، انعطاف‌پذیری و عمر خستگی بیشتری دارد. جدول ۲، طرح اختلاط مناسب برای ECC (ECC-M45) را نشان می‌دهد.

جدول ۲: نسبت‌های وزنی طرح اختلاط برای ECC-M45 (Li V C, 2008)

الیاف (درصد حجمی)	HRWR <sup>۴</sup>	آب	ماسه	خاکستر بادی	سیمان	طرح اختلاط
۲	۰/۰۱۲	۰/۵۶	۰/۸	۱/۲	۱/۰	M45

در حالی که انواع مختلف الیاف در تولید ECC استفاده شده‌اند، در ECC M45، موردی که بزرگ‌ترین مجموعه داده در مورد آن وجود دارد، از الیاف پلی وینیل الکل (PVA) با طول 12mm و قطر 39µm استفاده شده است. مقاومت کششی اسمی، سختی و چگالی الیاف به ترتیب 1600MPa، 40GPa و 1300kg/m<sup>3</sup> است. سطح الیاف PVA به وسیله روغنی مخصوص (۱/۲٪ وزنی) پوشش داده شده است تا چسبندگی سطح مشترک الیاف/مخلوط کاهش یابد. به طور معمول درصد الیاف برابر ۲٪ حجمی در طرح اختلاط استفاده می‌شود.

## رفتار اعضای سازه‌ای ECC

### اعضای خمشی

Fischer and Li (2002) مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی رفتار اعضای خمشی R/ECC تحت بارگذاری سیکلی معکوس انجام دادند. شکل نمونه‌ها در شکل ۳ آمده است. شکل ۳ تفاوت قابل توجهی در پاسخ هیستریزیس R/ECC و نمونه‌های کنترلی ستون R/C را نشان می‌دهد. با وجود این واقعیت که خاموت‌های برشی در پایه اعضای خمشی استفاده نشده است، یک حلقه هیستریزیس کامل‌تر با استهلاک انرژی بیشتر با استفاده از تیر R/ECC به دست آمد. آسیب متحمل شده در این اعضا در 10% جابجایی نسبی بین طبقات در شکل ۳ مقایسه شده است. حتی در این سطح جابجایی زیاد، هیچ گونه خردشدگی ECC مشاهده نشد. در عوض، ستون R/C تمام پوشش بتنی خود را در نزدیکی انتهای گیردار از دست داد و منجر به شکافته شدن خمیر (چسبندگی) و خردشدگی شد. به طور واضح عضو R/ECC تحمل آسیب‌پذیری قابل توجهی تحت بار بهره‌برداری از خود نشان داد.

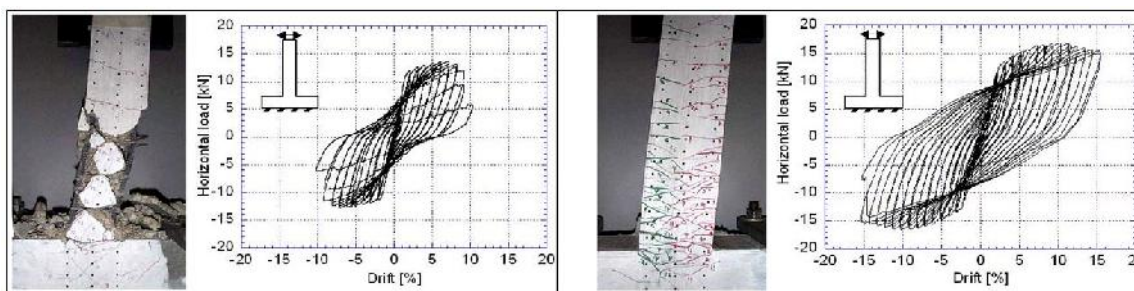
### پاسخ خستگی

Kim et al (2004) پاسخ خستگی سیکلی زیاد اعضای خمشی R/ECC را در رابطه با کاربرد دال متصل به عرشه یک پل مورد مطالعه قرار دادند. در ۱۰۰،۰۰۰ سیکل، کاهش سختی در R/ECC یا در تیر کنترلی R/C مشاهده نشد. اما ترک‌هایی در تیر کنترلی R/C به اندازه ۰/۶ میلیمتر در انتهای آزمایش باقی ماند در حالی که ریزترک‌ها در تیر R/ECC، تقریباً به اندازه 50µm باقی ماندند.

3 . Fiber-reinforced concrete

4 . High Range Water Reducer (کاهنده آب با دامنه زیاد)





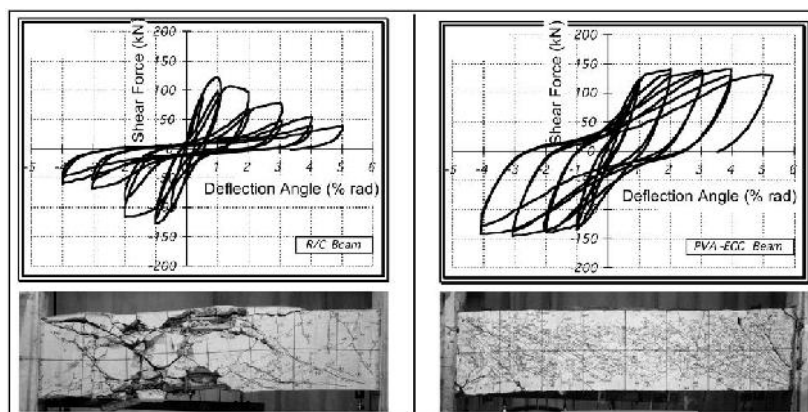
(ب)

(الف)

شکل ۳: رفتار هیستریزیس و آسیب اعضای خمشی تحت بارگذاری سیکلی کامل معکوس (الف) R/ECC بدون خاموت (ب) R/C با خاموت (Fischer and Li, 2002)

### عضو برشی

Fukuyama et al (2000) رفتار اعضای برشی R/ECC تحت بارگذاری سیکلی معکوس را مورد مطالعه قرار دادند. حلقه‌های هیستریزیس برای R/ECC پایداری و توانایی استهلاک انرژی بسیار بیشتری نشان داد. نمونه R/C با ایجاد ترک‌های قطری بزرگ به طرز شدیدی متحمل از بین رفتن چسبندگی و از دست دادن پوشش شد. در عوض، آسیب وارد شده به عضو برشی R/ECC بسیار کمتر بود (شکل ۴). هیچ از بین رفتن چسبندگی و از دست دادن پوششی مشاهده نشد و ریزترک‌ها تا زاویه تغییرشکل 5 رادیان بار را تحمل کردند.



(ب)

(الف)

شکل ۴: حلقه‌های هیستریزیس و الگوی آسیب برای تیرهای برشی Ohno تحت بارگذاری سیکلی کامل معکوس برای (الف) R/ECC (ب) R/C (Fukuyama et al, 2000)

### عضو ستون

پاسخ ستون‌های R/ECC و R/C تحت بارگذاری کامل سیکلی معکوس توسط Fukuyama et al (2000) مورد مطالعه قرار گرفت. رفتار هیستریزیس و استهلاک انرژی در ستون R/ECC نسبت به R/C مشابه حالت اعضای خمشی و برشی، بهبود یافته است. ترک‌های بزرگ ناشی از نابودی چسبندگی در ستون R/C مشاهده شد و بتن بدون تسلیم مسلح‌کننده‌های طولی گسیخته شد. در نتیجه نیروی مقاوم برشی در منحنی پوش رابطه نیروی برشی - زاویه تغییر شکل، با افزایش زاویه تغییر شکل، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، بتن ستون R/ECC با برش یا از بین رفتن چسبندگی گسیخته نشد. به جای آن توانست یک پاسخ منعطف تا پایان آزمایش داشته باشد و ترک‌های ریزی بر روی سطح نمونه ایجاد شد.

### عضو پانل دیواری

اعضای پانل دیواری توسط Kesner and Billington (2005) تحت بارگذاری کامل سیکلی معکوس، مورد مطالعه قرار گرفتند. این آزمایش‌ها تأیید کردند که دیوارهای پانلی R/ECC عملکرد بهتری نسبت به پانل دیواری R/C در پایداری حلقه هیستریزیس، اوج بار و استهلاک انرژی دارند.

### دوام ECC

صرف این که یک مصالح جدید، عملکرد مکانیکی عالی در مقایسه با مصالح سنتی داشته باشد، کافی نیست. مهم است که دوام مصالح در



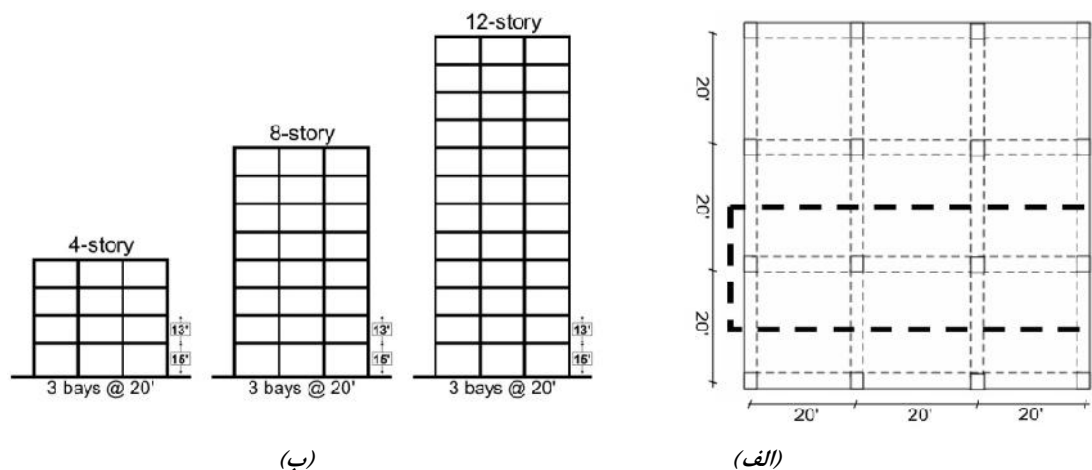
محیط‌های مختلف معمول که مصالح در آن‌جا مورد استفاده قرار می‌گیرند، بررسی شود. همچنین، علاوه بر آن تأثیر این مصالح بر روی دوام سازه-ای R/ECC باید تأیید شود. لذا ECC تحت آزمایش‌های مختلف ظرفیت کششی بلند مدت، دوام ذوب و یخ، شرایط آب و هوای گرم، مقاومت در برابر خوردگی و ... قرار گرفت و در تمام موارد واکنش قابل قبول و بهتر از بتن معمولی را از خود نشان داد (Li V C, 2008).

## مقاومت در برابر خوردگی

با توجه به اینکه سازه‌های بتنی طوری طراحی می‌شوند که اجازه بعضی از ترک‌خوردگی‌های کششی را داشته باشند و اینکه این ترک‌ها در بتن مسلح به طور معمول منشأ خوردگی به دلیل افزایش انتقال آب و عوامل خورنده هستند، ECC به دلیل عرض ترک کم، ظرفیت قابل توجهی برای بهبود دوام سازه‌های R/C با عمل کردن به عنوان یک پوشش با کیفیت در جایی که به شدت از تمام مکانیزم‌های انتقال ممانعت می‌کند، دارد. در یک بررسی آزمایشگاهی، ظرفیت خمشی تیرهای R/ECC و R/C که توسط روش الکتروشیمیایی در معرض خوردگی سریع بودند، مورد بررسی قرار گرفتند. در نتیجه این بررسی مشخص گردید، خوردگی مسلح کننده در نمونه‌های ملات باعث شد تا کاهش قابل توجهی در سختی و ظرفیت بار خمشی ایجاد شود. بعد از ۲۵ ساعت در معرض خوردگی سریع بودن، مقاومت خمشی تیر R/C کاهش در حدود 34% ظرفیت خمشی اولیه را از خود نشان داد. در عوض، نمونه‌های ECC بعد از ۵۰ ساعت در معرض خوردگی سریع بودن، تقریباً 100% ظرفیت خمشی اولیه را داشتند.

## جزئیات مدل‌سازی

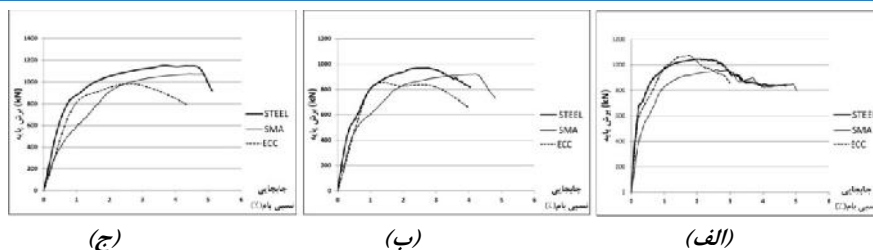
به منظور بررسی اثر مواد مورد مطالعه بر رفتار سازه‌های قاب خمشی بتنی، سه قاب ۴، ۸ و ۱۲ طبقه بتنی مورد مطالعه قرار گرفت. این قاب‌ها در واقع قاب میان‌بندی سازه‌های بتنی هستند، اما به علت پیچیدگی مدل‌سازی سه بعدی و زمان‌بر بودن تحلیل آن، برای هدف مورد نظر انتخاب شده‌اند. پلان سازه‌های بتنی مربوطه در شکل ۵ نشان داده شده است. سازه‌های بتنی مورد مطالعه، دارای سیستم لرزه‌ای قاب خمشی بتنی ویژه می‌باشند که در منطقه کالیفرنیا آمریکا واقع شده‌اند. این سازه‌ها براساس آیین‌نامه‌های ASCE و UBC طراحی شده‌اند. هر کدام از این قاب‌ها در سه حالت مختلف مورد تحلیل قرار گرفتند. حالت اول: سازه به طور کامل از فولاد و بتن سازه‌ای معمولی که در طراحی اولیه استفاده شده است، تشکیل می‌شود. حالت دوم: آرماتور به کار رفته در دو انتهای تیرها که محل تشکیل مفصل پلاستیک می‌باشد، از جنس آلیاژ حافظه‌دار می‌باشد و در سایر بخش‌ها از فولاد ساختمانی استفاده گردیده است. بتن مصرفی نیز به طور کامل از بتن معمولی سازه‌ای تشکیل می‌شود. حالت سوم: در دو انتهای تیرها که محل تشکیل مفصل پلاستیک می‌باشد، علاوه بر آرماتورهای از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی، از کامپوزیت سیمانی مهندسی شده به جای بتن معمولی استفاده شده است. قسمت‌های دیگر قاب نیز، از فولاد و بتن معمولی تشکیل می‌شود. طول مفصل پلاستیک بر اساس رابطه پیشنهادی (Paulay and Priestley (1992) برابر با نصف ارتفاع مقطع تیر در نظر گرفته شده است. طول دهانه‌های قاب‌ها برابر 20ft (۶/۱m)، ارتفاع طبقه اول 15ft (۴/۵۷m) و ارتفاع سایر طبقات 13ft (۳/۹۶m) می‌باشد. سازه‌ها برای فولاد و بتن معمولی طراحی شده‌اند و در دو حالت SMA و ECC نیز از ابعاد و مشخصات آرماتورگذاری مشابه استفاده شده است.



شکل ۵: جزئیات ابعادی سازه‌های مورد بررسی (الف) پلان (ب) نمای روبرو

## تحلیل استاتیکی غیر خطی

تحلیل پوش‌آور، برای هر ۹ حالت مختلف در حالت دوبعدی، با استفاده از نرم افزار OpenSees برای محاسبه  $R_0$  و  $\mu$  صورت گرفت. منحنی‌های پوش حاصل در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶: منحنی پوش (الف) قاب ۴ طبقه (ب) قاب ۸ طبقه (ج) قاب ۱۲ طبقه

برای هر سه قاب ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مورد بررسی، حالت Steel بیشترین سختی را از خود نشان داد به طوری که میانگین زمان تناوب اصلی قاب‌ها با تعداد طبقات مختلف، در حالت SMA، ۱۲ درصد و در حالت ECC، ۲۶ درصد نسبت به حالت Steel افزایش یافت. سایر نتایج به دست آمده از تحلیل و منحنی‌های پوش اور در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳: پارامترهای محاسبه شده از منحنی دوخطی به دست آمده از تحلیل پوش اور

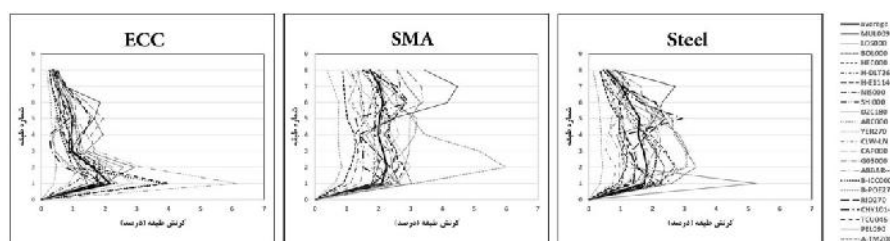
طبقه ۱۲			طبقه ۸			طبقه ۴			تعداد طبقات
ECC	SMA	Steel	ECC	SMA	Steel	ECC	SMA	Steel	پارامتر محاسبه شده
۲/۲۷	۲/۱۴	۲/۱۰	۲/۴۷	۲/۴۰	۲/۳۲	۳/۵۲	۲/۹۳	۲/۷۴	ضریب اضافه مقاومت ( $R_0$ )
۲/۱۰	۱/۹۳	۲/۰۳	۲/۳۶	۲/۲۶	۲/۱۲	۱/۸۰	۱/۵۵	۱/۵۶	ضریب شکل پذیری ( $\mu$ )

## تحلیل دینامیکی غیر خطی

به منظور بررسی عملکرد قاب‌های مورد نظر تحت آنالیز دینامیکی غیر خطی، ۲۲ شتابنگاشت از زلزله‌های واقعی، با شرایط مشابه محل احداث سازه، انتخاب گردید. برای مقیاس کردن شتاب نگاشت‌های انتخاب شده، ابتدا طیف پاسخ شتاب با میرایی ۵ درصد، برای تک تک شتاب‌نگاشت‌ها تهیه گردید. سپس با توجه به زمان تناوب اصلی هر یک از ۹ قاب بتنی مورد بررسی و بر اساس روش پیشنهادی آیین‌نامه ASCE، ضریب مقیاس مربوط به همان قاب محاسبه شد.

بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات و جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت زلزله‌های مورد نظر محاسبه گردید. مقادیر بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات قاب‌های ۸ طبقه برای شتاب‌نگاشت‌های انتخابی، به تفکیک و به صورت میانگین در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود جابه‌جایی نسبی طبقات در حالت SMA نسبت به حالت Steel برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به طور میانگین به ترتیب ۴۰، ۴۵ و ۵۵ درصد افزایش یافته است. در حالی که جابه‌جایی نسبی طبقات در حالت ECC نسبت به حالت Steel برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به طور میانگین به ترتیب ۲۷، ۲۶ و ۱۳ درصد کاهش یافته است. علت افزایش جابه‌جایی در حالت SMA نسبت به Steel، کوچک‌تر بودن مدول الاستیسیته آلیاژ حافظه‌دار در مقایسه با فولاد می‌باشد. همچنین کاهش جابه‌جایی در حالت ECC نسبت به Steel، به دلیل کاهش بسیار زیاد جابه‌جایی در طبقات بالا می‌باشد که منجر به کاهش میانگین جابه‌جایی نسبی طبقات شده است.

اما کرنش پسماند طبقات در هر دو حالت SMA و ECC نسبت به حالت Steel کاهش یافته است. به طوری که میانگین کرنش پسماند طبقات در حالت SMA نسبت به Steel برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب ۶۴، ۷۴ و ۶۹ درصد کاهش نشان می‌دهد. همچنین میانگین کرنش پسماند طبقات در حالت ECC نسبت به Steel برای قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب ۳۶، ۵۶ و ۴۸ درصد کاهش یافته است.



شکل ۷: بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات قاب‌های ۸ طبقه

## نتیجه‌گیری

این مقاله تلاش دارد تا مصالح جدید با ویژگی‌های منحصر به فرد و مناسب برای کاربردهای لرزه‌ای را معرفی کند. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل‌های انجام شده نیز به طور کلی می‌توان گفت که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) به عنوان آرماتور و کامپوزیت

سیمانی مهندسی شده (ECC) به جای بتن معمولی در دو انتهای تیرها در قاب خمشی بتنی، که محل تشکیل مفاصل پلاستیک هستند، می‌تواند رفتار لرزه‌ای سازه را بهبود بخشد و خرابی (تغییر شکل‌های ماندگار) ناشی از زلزله را کاهش دهد.

## مراجع

- مهتا پ ک، مونته‌ئرو پ ج م (۱۳۸۳) ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)، ترجمه رضانیانپور ع ا، قدوسی پ، گنجیان ا، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر

DesRoches R, McCormick J and Delemont M (2004) Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars, *Journal of Structural Engineering*, vol. ۱۳۰, pp. 38-46

Fischer G and Li V C (2002) Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions. *ACI Structural J*. 99 (6):781-790

Fugazza D (2005) Use of Shape-Memory Alloy Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Advanced Constitutive Modelling and Structural Applications, ROSE School

Fukuyama H, Matzuzaki Y, Sato Y, Iso M and Suwada H (2000) Structural performance of engineered cementitious composite elements. *Composite and Hybrid Structures, 6<sup>th</sup> ASCCS Int'l Conf. on Steel-Concrete Composite Structures*, pp. 969-976

Kesner KE and Billington SL (2005) Investigation of infill panels made from engineered cementitious composites for seismic strengthening and retrofit. *ASCE J. Structural Engineering* 131(11): 712-1720

Kim YY, Fischer G and Li V C (2004) Performance of bridge deck link slabs designed with ductile ECC. *ACI Structural J*. 101(6):792-801

Li V C (2008) Engineered Cementitious Composites (ECC) Material, Structural, and Durability Performance, Concrete Construction Engineering Handbook, Chapter 24

McCormick J and Delemont M (2004) Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars. *Journal of Structural Engineering* © ASCE

Paulay T and Priestley MJN (1992) *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, ISBN-10

Shahria Alam M, Moni M, Tesfamariam S (2012) Seismic overstrength and ductility of concrete buildings reinforced with superelastic shape memory alloy rebar. *Engineering Structures*, 34 (2012) 8–20

Wayman C and Duerig T (1990) *An introduction to martensite and shape memory*, Butterworth-Heinemann, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys(UK)

