

Advanced Retrofitting Technologies for Unconfined Reinforced Concrete Columns: A Comprehensive Review

Mohamad Reza Shokrzadeh *

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Mahdi Sharifi

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom,
Qom, Iran

Amir Reza Jafari

Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch,
Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mohamad Eisa Mohamaddost

Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch,
Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mohammad Hesham Tahery

Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch,
Islamic Azad University, Tehran, Iran

mr.shokrzadeh@srbiau.ac.ir

Keywords

Active confinement,
Passive confinement,
Fiber-reinforced polymer,
Shape memory alloy

Abstract

This paper provides a comprehensive review of advanced retrofitting technologies for reinforced concrete columns lacking lateral confinement. The primary goal is to review and analyze novel retrofitting methods presented in technical literature, evaluating their performance and outlining the advantages, limitations, and practical applications of each method. Initially, the fundamental principles and characteristics of the two main confinement approaches—active and passive—are discussed. Subsequently, conventional strengthening methods, including Fiber-Reinforced Polymer (FRP), Near-Surface Mounted (NSM) techniques, and the use of Shape Memory Alloys (SMA), are described in detail. By emphasizing hybrid approaches and presenting a comparative analysis from the perspectives of seismic performance, ductility, load-bearing capacity, and durability, this paper provides a practical framework for selecting the most suitable retrofitting strategy. The findings of this review could serve as a foundation for structural engineers' decision-making processes in retrofitting projects.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

* Corresponding Author

مروری جامع بر فناوری‌های پیشرفته مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح فاقد محصورشدگی جانبی

محمدرضا شکرزاده*

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

مهدی شریفی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

امیررضا جعفری

گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمد عیسی محمد دوست

گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمد حسام طاهری

گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mr.shokrzadeh@srbiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۰۵ دی ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: ۱۰ شهریور ۱۴۰۳

چکیده

این مقاله به مروری جامع بر فناوری‌های پیشرفته مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح فاقد محصورشدگی جانبی می‌پردازد. هدف اصلی، بررسی و تحلیل روش‌های نوین مقاوم‌سازی مطرح‌شده در ادبیات فنی، ارزیابی عملکرد آن‌ها و تبیین مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای هریک از روش‌ها است. در ابتدا، اصول و ویژگی‌های دو رویکرد اصلی محصورشدگی فعال و غیرفعال مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه، روش‌های مرسوم تقویت با الیاف پلیمری تقویت‌شده (FRP)، روش نزدیک به سطح (NSM) و همچنین استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار (SMA) تشریح شده‌اند. مقاله با تمرکز بر روش‌های ترکیبی و ارائه تحلیل تطبیقی از منظر عملکرد لرزه‌ای، شکل‌پذیری، ظرفیت باربری و دوام، چارچوبی کاربردی برای انتخاب مناسب‌ترین راهکار مقاوم‌سازی ارائه می‌دهد. یافته‌های این مرور می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری مهندسان سازه در پروژه‌های مقاوم‌سازی باشد.

کلید واژگان: محصورشدگی فعال، محصورشدگی غیرفعال، الیاف پلیمری تقویت‌شده، آلیاژهای حافظه‌دار

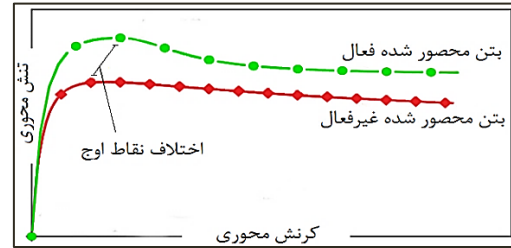
۱- مقدمه

در صورتی که در فرایند طراحی، تامین و یا اجرای ستون‌های بتنی نکات لازم آئین نامه‌ای رعایت نگردند و یا اینکه اشتباهات اجرایی رخ دهد، سازه در مقایسه با نیروهای طراحی به ویژه نیروهای جانبی از ظرفیت کمتری نسبت به طراحی خود برخوردار خواهد بود [۱]. این شرایط زمانی رخ می‌دهد که بتن کیفیت لازم را نداشته باشد، ابعاد عضو باربر، کوچکتر از استاندارد مورد نیاز اجرا شده باشد و یا در اثر تغییر کاربری و نیروهای جانبی، ستون بتنی دچار تغییر شکل و یا دچار جابه‌جایی‌هایی نسبت به محور اصلی شده باشد [۲]. لذا در موارد اشاره شده، لازم است تغییراتی به منظور افزایش ظرفیت ستون‌های بتنی در ساختمان انجام شود [۴]. نوع شکست و ظرفیت باربری پایین در ستون‌های بتن مسلح، جزء نگرانی‌های کلیدی در طراحی سازه و یا روش‌های ارزیابی عملکرد هستند [۴ و ۳]. همچنین روش‌های تقویت برای سازه‌ها با انواع خرابی کاملاً متفاوت خواهد بود [۵ و ۶]. مکانیزم‌ها و انواع خرابی در ستون‌های بتنی می‌تواند به دلیل ایجاد ترک و خردشدگی، خوردگی میلگردهای فولادی، کمبود مقدار و موقعیت آرماتورها، کمبود مقاومت فشاری بتن، طول ناکافی وصله، کماتش میلگردهای طولی، شکست‌های برشی، شکست‌های خمشی و شکست‌های ناشی از اندرکنش برش و خمش در ستون‌های کوتاه باشد [۷ و ۱۰]. همچنین عملکرد ضعیف لرزه‌ای اتصالات با جزئیات ناکافی می‌تواند منجر به فروریختن کلی یا جزئی سازه‌های بتن مسلح شود [۹ و ۱۱]. استفاده از بتن با مقاومت کم، میلگردهای تقویت‌کننده ساده، جزئیات مهاری مشکل‌دار و تسلیح عرضی نامناسب در اتصالات تیر و ستون، از عوامل افزایش خطر شکست سازه‌ها در هنگام زلزله‌های شدید می‌باشند [۱۱ و ۱۳]. در صورت ناکافی بودن مقاومت و استحکام ستون‌ها در یک سازه و یا ساختمان، مشکلات اساسی در رفتار سازه‌ای نظیر کاهش مقاومت ستون‌ها، ترک خوردگی ستون‌ها (به‌خصوص ستون‌های کوتاه)، خوردگی میلگردهای فولادی و کماتش آن‌ها ایجاد می‌گردد [۱۴ و ۱۵]. در ادبیات فنی، تقویت ستون بتنی با اهداف مختلفی از جمله افزایش مقاومت محوری، خمشی و برشی و همچنین برای افزایش ظرفیت شکل‌پذیری ستون در نزدیکی محل اتصال به تیر و مقاوم نمودن محل وصله‌های ضعیف نیز صورت می‌پذیرد [۱۵]. باتوجه به نقش مهم ستون‌ها، بررسی اثر شکست آن‌ها بر سیستم‌های سازه‌ای به‌عنوان یکی از مفیدترین ابزار برای بررسی و ارزیابی مقاومت سازه مطرح شده است [۱۶ و ۱۸]. مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح در واقع به دو روش (با مهار جانبی و بدون مهار جانبی) قابل تقسیم هستند و به این منظور در این تحقیق، فناوری‌های مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح فاقد مهار جانبی در ادبیات فنی و مقالات مورد بررسی و تحقیق و مقایسه قرار گرفته است.

۲- ضرورت انجام تحقیق:

محصورشدگی در ستون‌ها به دو روش فعال و غیر فعال تقسیم می‌گردد. محصورشدن فعال (اعمال محصورشدگی با نیروهای جانبی) از ایجاد ترک در داخل ستون‌های بتنی جلوگیری می‌کند و از این رو مقاومت و شکل‌پذیری ستون را بهبود می‌بخشد [۱۷]. همچنین اعمال محصورشدگی فعال می‌تواند آسیب دیدگی‌های اصلی در ستون‌های بتنی را کاهش دهد و میزان عملکرد مصالح موجود را بهبود بخشد و سطح مقاومت مصالح محصورشده را به‌طور کامل بازیابی کند [۱۹ و ۲۲]. شایان ذکر است، در غالب ستون‌های سازه‌هایی که قبلاً تغییر شکل جانبی را تجربه داشته‌اند، اعمال محصورشدگی غیرفعال قابلیت کاهش اثرات این تغییر شکل‌ها را ندارند [۲۳]. لذا می‌توان گفت محصورشدگی فعال به‌ویژه در اجزایی که آسیب‌دیدگی را تجربه کرده‌اند، با نیازهای مهندسی سازگارتر می‌باشد. در مقایسه با محصورشدگی غیرفعال، محصورشدگی فعال زودتر وارد عمل شده و اثرات محصورشدگی بهتری دارد. آزمایشات نشان می‌دهند که منحنی تنش-کرنش بتن محصورشده فعال، شیب بیشتری را در مراحل اولیه خود نشان می‌دهد. در حالت کلی، بتن محصورشده فعال در بارگذاری یک مرحله‌ای، رفتار غیر خطی صعودی طولانی‌تری نسبت به بتن محصورشده غیرفعال نشان می‌دهد. محصورشدگی فعال آثار بهتری نسبت به محصورشدگی غیرفعال دارد که می‌تواند از زوال تنش‌های چرخه‌ای مواد محصورشده جلوگیری کند و عملکرد رفتار مکانیکی مواد را به‌طور کامل بروز دهد. باتوجه به وجود تنش‌های چرخه‌ای، محصورشدگی غیرفعال برای تقویت ستون‌های آسیب دیده مناسب نمی‌باشند [۲۴ و ۲۶]. در شکل (۱) رفتار تنش-کرنش دو محصورشدگی فعال و غیرفعال مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. ملاک شبیه‌سازی دقیق منحنی تنش - کرنش مصالح محصورشدگی فعال، در بخش نزولی منحنی آن است. طبق تحقیقات صورت‌گرفته، بتن‌های محصور شده با نوارهای فولادی پیش‌تنیده، نه‌تنها در مقاومت فشاری محوری و خارج از مرکز ستون‌های بتنی محصور شده افزایش داشته است، بلکه شکل‌پذیری و عملکرد لرزه‌ای آن‌ها نیز بهبود یافته است [۱۷]. سازماندهی مقاله به شرح زیر است: ابتدا ویژگی‌های اصلی این فناوری‌های معرفی شده، شامل روش‌های مبتنی بر روش محصورشدگی فعال و محصورشدگی غیرفعال ارائه گردیده‌است و در ادامه، روش‌های مرسوم به‌کارگیری الیاف پلیمری بیان می‌گردد. روش تحقیق به‌صورت جمع‌آوری، مرور و تحلیلی جامع از مقالات بروز و معتبر این موضوع است. همچنین در این نوشتار به بررسی نحوه ترکیب کردن این روش‌ها و فناوری‌ها پرداخته شده و اجماعی از نقاط قوت این فناوری‌های ترکیبی ارائه گردیده است. در نهایت، در قالب دو جدول این نتایج و تحلیل‌ها جمع‌بندی گردیده.

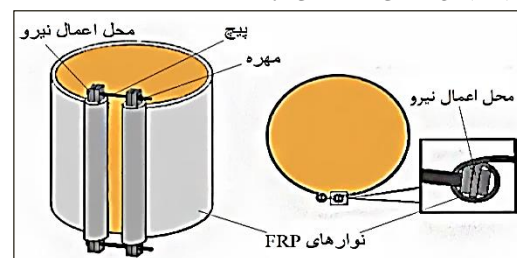
شرایط خوردگی می‌باشد [۳۱ و ۳۴]. بسیاری از محققان، FRP را با مواد دیگر جهت تقویت در راستا افزایش باربری، شکل‌پذیری و مقاومت لرزه‌ای ترکیب کرده‌اند. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، تنها ۲۰ تا ۳۰ درصد از مقاومت مصالح FRP می‌تواند برای ستون‌های محصورشده غیر فعال جوابگو باشد [۱۷]. در سال ۲۰۱۹، رفتار فشاری آزمایشگاهی استوانه‌های بتنی در مقیاس بزرگ مورد مطالعه قرار گرفت. این آزمایش نشان داد که ستون‌های بتنی چه محصورشده و چه محصور نشده، مکانیزم شکست برشی یکسانی را نشان می‌دهند اما تحت محصورشدگی فعال ظرفیت باربری و شکل‌پذیری بهبود بیشتری داشته است [۳۵]. هنگامی که سطح پیش‌تنیدگی بالایی وجود داشته باشد، شکل‌پذیری ستون‌ها افزایش بیشتری می‌یابد. همچنین ظاهر و گسترش ترک‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. افزون بر این، در استفاده از نوارهای FRP پیش‌تنیده برای محصور کردن ستون‌های بتنی، عملکرد لرزه‌ای آن‌ها نیز بهبود می‌یابد. با افزایش سطح پیش‌تنیدگی و تعداد لایه‌های الیاف پلیمری تقویت شده بر پایه کربن ($CFRP^2$)، بار تسلیم به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد ولی سختی اولیه افزایش کمی دارد. همانطور که در شکل (۳ الف) نشان داده شده است، افزایش سطح پیش‌تنیدگی و یا تعداد لایه‌های $CFRP$ ، تأثیر ناچیزی بر سختی اولیه نمونه‌ها دارد و از طرفی دیگر بار تسلیم آن‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این نشان دهنده این است که افزایش سطح پیش‌تنیدگی و تعداد لایه‌های $CFRP$ ، ظرفیت باربری افقی و شکل‌پذیری را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد (شکل ۳ ب)). از این تکنیک می‌توان در محیط‌های دریایی و محیط‌هایی که در معرض خوردگی هستند نیز استفاده نمود. در این تحقیق نمونه‌ها شامل ۹ ستون مربعی شکل با سطح مقطع 300×300 میلیمتری و ارتفاعی نظیر ۱,۲۷۵ متر می‌باشد. همه‌ی ستون‌ها دارای پایه بتنی مسلح به ابعاد $400 \times 700 \times 100$ متر (طول $\times$ عرض $\times$ عمق) هستند. گوشه ستون‌ها به شعاع ۲۰ میلیمتر گرد شده‌اند تا تمرکز تنش در $CFRP$ حذف شود [۳۶].



شکل ۱- مقایسه محصورشدگی فعال و غیرفعال در نمودار تنش - کرنش محوری [۱۷].

۳- محصورشدگی با مصالح FRP و توسعه‌های آن:

الیاف و مصالح پلیمری (FRP^1) به دلیل مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت بالا نسبت به وزن خود، سرعت و سهولت نصب آن و پایین بودن هزینه‌های نگهداری، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. این کامپوزیت‌ها، ابتدا در صنایع خودروسازی و هوافضا مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به‌عنوان مصالح ساختمانی با دوام نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حال حاضر در تکنیک‌های مقاوم‌سازی مرسوم، روش افزایش سطح مقطع ستون‌ها استفاده از صفحات فولادی دورپیچ شده یا روش FRP می‌باشد. این روش‌ها به شکل قابل توجهی قابلیت باربری را افزایش می‌دهند اما نیازمند تامین فضای ساخت مناسب و شرایط ارتفاعی می‌باشند. روش‌های زیادی برای محصورکردن ستون‌های بتنی به‌طور فعال با FRP ‌های پیش‌تنیده وجود دارد، مانند تزریق ملات انبساطی به شکاف بین بتن و لوله FRP ، انبساط لوله FRP با افزودن یک عامل انبساط دهنده به هسته بتن و نصب مصالح FRP پیش‌تنیده می‌باشد [۲۷ و ۲۹]. در دو روش اول، نمی‌توان پیش‌تنیدگی حلقه را به‌طور دقیق کنترل نمود و همچنین روش اول باعث افزایش سطح مقطع خواهد شد. در سال ۲۰۱۳، یک روش برای تقویت خواص مکانیکی ستون‌های کوتاه (همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است) ارائه گردید. در این روش، نوارهای FRP دور ستون‌ها پیچیده شده و با اعمال نیرو در انتهای آن ثابت می‌شوند (شکل ۲). در نهایت با سفت شدن مهره‌ها توسط آچار، پیش‌تنیدگی اعمال می‌شود [۳۰].

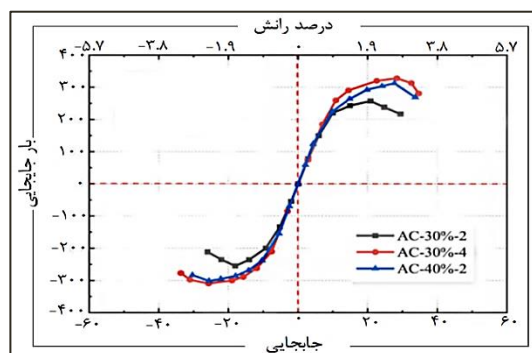


شکل ۲- پیش‌تنیدگی حلقه‌ای در FRP ‌های پیش‌تنیده [۳۰].

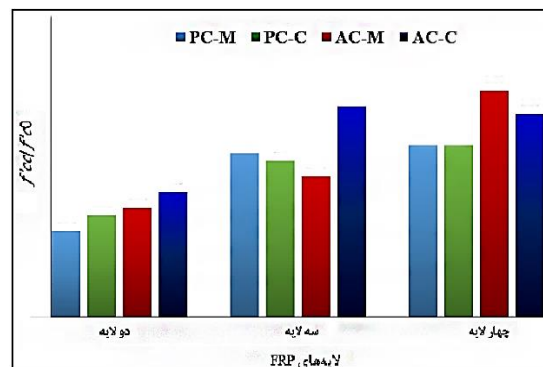
در میان این روش‌ها، تقویت با ورق فولادی از لحاظ هزینه و آسانی کار مزایایی را برخوردار است اما چون نیاز به بستن پیچ و مهره به سازه اصلی می‌باشد و از طرفی سازه اصلی ممکن است از قبل آسیب دیده باشد، ایده خوبی به‌نظر نمی‌آید زیرا بسیار وابسته به

² Carbon Fiber Reinforced Polymer

¹ Fiber Reinforced Polymer



(ب)



(الف)

شکل ۳- (الف): مقایسه نسبت افزایش مقاومت حالت های مختلف بار [۳۵] (ب): مقایسه منحنی های رفتاری تحت سطوح مختلف پیش تنیدگی یا تعداد لایه های CFRP [۲۶].

خارج از مرکز چندان موثر نیست و در راستای افزایش مقاومت خمشی ستون های RC موثر نمی باشند. از این رو، روش های جایگزین دیگری برای افزایش مقاومت خمشی این اعضا مورد استفاده خواهد بود. روش NSM نسبتاً جدیدی برای تقویت خمشی ستون های RC می باشد. این روش شامل ایجاد یک سری شیار در پوشش بتن و قرار دادن میلگردها یا نوارهای تقویت کننده در داخل آن به منظور ارتقا مقاومت خمشی ستون می باشد. این روش نیازی به آماده سازی سطح ندارد و سریع تر از روش های دیگر اجرا می شود [۳۷]. در تحقیقاتی که در سال ۲۰۱۶ انجام شد [۳۸]، پنج ستون RC تقویت شده با روش NSM و سیستم محصورشدگی CFRP، آزمایش شد و تأثیر اندازه پوشش بتنی را بر نتایج مقدار بار قابل اعمال و اتلاف انرژی مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج این مطالعه با افزایش اندازه پوشش بتن از ۲۰ به ۴۰ میلیمتر، ظرفیت باربری و ظرفیت اتلاف انرژی نمونه های تقویت شده با روش NSM به ترتیب ۱۰٪ و ۱۸٪ کاهش یافته است همچنین، در نمونه های تقویت شده با هر دو روش ذکر شده، به ترتیب ۲۵٪ و ۳۳٪ کاهش یافته است. در ادامه تحقیق، تقویت سه نمونه ستون RC با طول اتصال ناکافی با استفاده از میلگردهای پلیمری تقویت شده با الیاف بازالت (BFRP^۵) و ژاکت BFRP در نظر گرفته شد. باتوجه به نتایج حاصل شده در این مطالعه، بافت میلگردهای FRP تأثیر قابل توجهی بر عملکرد ستون های RC تقویت شده دارد [۴۳].

در سال ۲۰۲۴، مطالعه عددی گسترده ای بر روی آرایش های مختلف ورق های FRP در تقویت اتصالات تیر به ستون بتنی انجام شد [۱۱]. نتایج نشان داد که استفاده از آرایش های نواری بصورت ضربدری با مهار مناسب در دورپیچ های اطراف اتصال در تیر و ستون می تواند روش مناسب در تقویت اتصالات با FRP بوده و می تواند جایگزین همپوشانی تقویت اتصال با همپوشانی کامل با FRP باشد. افزایش ضخامت نوارها از نظر اقتصادی و مقرون به صرفه تر نسبت به افزایش عرض نوارها می باشد مشروط به آنکه کیفیت و مقاومت سطحی بتن مناسب بوده و نوارها بخوبی در دورپیچ تیرها و ستون ها مهار شوند. افزایش عرض ورق FRP روی شکل کلی نمودار بار - تغییر مکان نمونه ها تأثیر چندانی نمی گذارد. افزایش ضخامت ورق FRP باعث افزایش سختی محوری ورق FRP و مقاومت اتصال می گردد. این افزایش بدون تغییر در مقدار زیر سازی لازم برای چسباندن FRP که خود از عوامل مهم در غیر اقتصادی شدن استفاده از FRP می باشد، صورت می گیرد [۱۱].

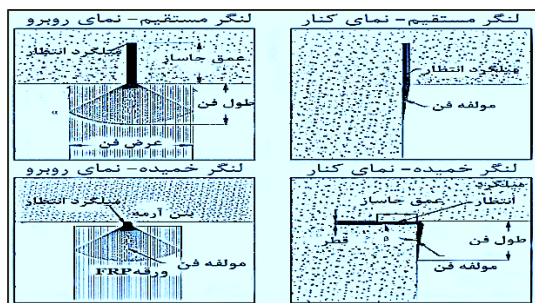
ستون های بتن مسلح (RC^۳) تقویت شده با الیاف FRP در ، روشی موثر برای بهبود مقاومت برشی و شکل پذیری آن ها و جلوگیری از کمایش در آرماتورهای طولی آن ها می باشد. روش تقویت دیگری که در ارتقا مقاومت خمشی ستون های RC موثر می باشد، روش تقویت نزدیک به سطح (NSM^۴) است. نمونه های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف FRP در ستون های RC شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی اجزا را ارتفاع می بخشد و از کمایش در آرماتورهای طولی آن ها جلوگیری کند. با این حال روش FRP در برابر بارهای

³ Reinforced Concrete

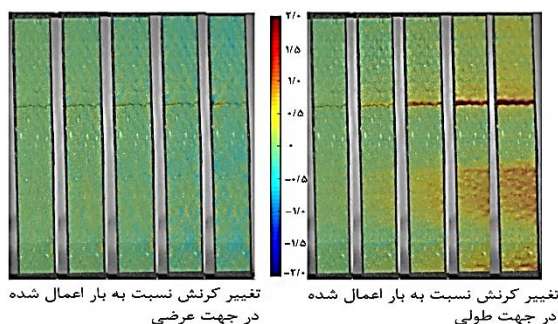
⁴ Near Surface Mounted

⁵ Basalt Fiber Reinforced Polymer

شده با الیاف FRP با اعمال نیروی پیش تنیدگی، روشی مؤثر برای افزایش مقاومت در محل پیوستگی لایه‌های کامپوزیت و بتن و یا اطمینان از تداوم مسیر بار بین مواد FRP و بستر بتنی می‌باشد. سیستم‌های الیاف پلیمری تقویت شده با تقویت باند خارجی (FRP-EBR) با وسعت زیادی به‌عنوان روشی مؤثر برای تقویت سازه‌های موجود استفاده می‌گردد [۴۰]. ورقه‌ها با رزین‌های اپوکسی اشباع می‌شوند تا یک ماتریس کامپوزیتی ایجاد کنند و سپس به سطح خارجی سازه می‌چسبند (شکل ۴). اما در این روش جدا شدن زود هنگام ورقه‌های FRP از بستر، یکی از مشکلات اصلی سیستم‌های FRP-EBR می‌باشد. مهارها (انکرهای) FRP معمولاً دارای سطوح بالایی از تنش در محدوده‌هایی هستند که به روش افشان (Fan) مهار می‌گردند و معمولاً به عنوان بخش کلیدی انکر شناخته می‌شود (شکل ۴) [۴۰]. در شکل (۵) مناطق با کرنش‌های کششی زیاد با رنگ قرمز نشان داده شده و کرنش‌های فشاری زیاد با رنگ آبی نشان داده شده‌است. سطح کرنش‌های کششی در جهت طولی الیاف FRP در انتهای ناحیه هم‌پوشانی مشاهده می‌شود [۴۱].



شکل ۴- ویژگی انکرهای FRP مهار شده به روش افشان (Fan) از نما روبرو و نما کنار [۴۶].



شکل ۵- تغییرات کرنش در کوپن‌های FRP آزمایش شده طبق ASTM D5868 [۴۱].

یکی دیگر از مصالحی که محققان آن را با FRP ترکیب و مورد تحقیق قرار داده‌اند، پلی‌وینیل کلراید (PVC) می‌باشد. در چنین

در سال ۲۰۲۲، مطالعه عددی گسترده‌ای بر روی روش‌های بهسازی پایه‌های پل با ترکیب روش میلگرد NSM-CFRP و ورق‌های فولادی انجام شد [۱]. نه پایه پل بتنی با هندسه‌های مختلف با در نظر گرفتن مدل خسارت بتن (CDP) شبیه سازی شد. نتایج نشان داد که تکنیک های مقاوم سازی ترکیبی پایه پل با ورق های CFRP و میله های NSM-CFRP ظرفیت باربری را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده است. ظرفیت بار جانبی پایه پل پس از تقویت بیش از ۶۰ درصد افزایش یافت [۱].

به‌عنوان نمونه، آزمایش‌های انجام شده بر روی چهار ستون پل با مقطع دایره‌ای شکل که توسط زلزله آسیب دیده بودند، با ژاکت BFRP و میل‌گردهای NSM (BRBF) تقویت شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که محصورشدگی ستون‌ها توسط ژاکت BFRP، کماتش میلگردهای NSM را محدود می‌کند و شکل‌پذیری آن‌ها را افزایش می‌دهد. باتوجه‌به وجود ژاکت FRP در مدل‌های عددی، مدل رفتاری‌ای که برای بتن استفاده می‌شود باید بتواند تأثیر فشار محدودکننده ژاکت FRP بر منحنی تنش - کرنش خود را ارائه نماید. مدل رفتاری ارائه شده در سال (۱۹۷۱) نیز برای تعیین رابطه تنش کرنش بخش صعودی آن با استفاده از رابطه زیر در نظر گرفته شد [۳۷ و ۳۹].

رابطه شماره ۱:

$$\sigma_c = f_c' \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c'} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c'} \right)^2 \right]$$

به‌طور کلی در خصوص روش NSM می‌توان گفت، استفاده از میلگردهای NSM به‌تنهایی به‌عنوان یک رویکرد برای افزایش ظرفیت ستون‌ها مناسب نمی‌باشد. به‌ویژه در شرایط بارهای محوری توصیه می‌شود. برای بهبود شکل‌پذیری ستون‌ها، هم‌زمان از ژاکت FRP نیز استفاده گردد. در مقایسه با ستون‌های محصورشده، ستون‌های محصورشده با ژاکت نیز با افزایش بارمحوری، کاهش شکل‌پذیری کمتری را از خود نشان دادند؛ بنابراین، با در نظر گرفتن جنبه اقتصادی، پیشنهاد شده است که به‌جای استفاده از ژاکت در کل ستون، ژاکت در دو انتهای ستون اجرا شود. شایان‌ذکر است که افزایش تعداد لایه‌های ژاکت باعث افزایش شکل‌پذیری ستون‌ها می‌شود، اما در تعداد معینی از لایه‌ها، تأثیر آن‌ها بر شکل‌پذیری ناچیز شد. به عبارتی دیگر، در ارتقا رفتار، تعداد لایه‌های بهینه‌ای وجود دارد که به‌وسیله آن می‌توان با هزینه معقولی سطح مناسبی از محصور شدن بتن را فراهم آورد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با از این رویکرد می‌توان شکل‌پذیری مناسبی را در بتن‌هایی با مقاومت فشاری کمتر از ۳۰ مگاپاسکال به دست آورد [۳۷]. نمونه‌های پلیمری تقویت

⁶ Externally Bonded Reinforcement

⁷ Polyvinyl Chloride

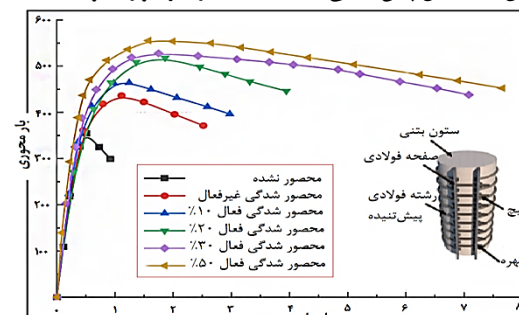
سیستم کامپوزیتی‌ای، لوله PVC به عنوان قالب عمل می‌کند. این در حالی است که FRP به عنوان تقویت کننده در جهت حلقه عمل می‌کند. ورقه‌های FRP به طور کامل یا جزئی روی لوله‌های PVC پیچیده می‌شوند. لوله‌های PVC دارای نفوذناپذیری طولانی مدت و مقاومت شیمیایی با سختی و مقاومت بالا است. لوله پلاستیکی یک لایه محافظ برای تأمین آب‌بند بودن بتن به ویژه در برابر آب باران و شرایط جوی می‌باشد. شرایط جوی ذکر شده عامل خراب شدن بتن و خوردگی آرماتورهای فولادی است [۴۱].

۴- حلقه‌های فولادی (نوارهای فولادی):

در سال ۲۰۱۵، یک روش مقاوم سازی اقتصادی تر و ساده تر بر اساس نوارهای فولادی پیش تنیده ارائه گردید. فشار حلقه به ستون‌های بتنی با استفاده از محکم کردن پیچ‌ها بر روی نوارهای فولادی اعمال می‌شود. این روش برای کارهای تقویتی با پیش تنیدگی کم مناسب است (شکل ۶). همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، منحنی‌های نیرو - جابه جایی نمونه‌های محصور شده فعال، یک پله بالاتر و یک صعود غیرخطی طولانی تر را نشان می‌دهد و همچنین سختی مرحله خطی آن نیز افزایش یافته است. در صورتی که فاصله رشته‌ها ثابت باشد، با افزایش پیش تنیدگی حلقه می‌توان ظرفیت باربری و کرنش نهایی را نیز تا ۸ برابر بهبود بخشید. همچنین با این روش می‌توان عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتنی را بهبود داد. ظرفیت جذب انرژی، ظرفیت تغییر شکل پلاستیک و ظرفیت باربری نیروی برشی به وسیله کاهش فاصله رشته‌ها و افزایش پیش تنیدگی حلقه افزایش می‌یابد [۱۶].



شکل ۶ - اعمال پیش تنیدگی حلقه با استفاده از گیره نواری فولادی [۱۶].



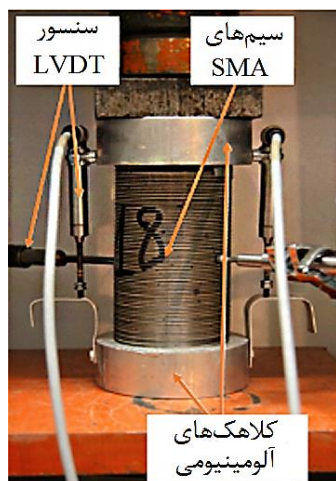
شکل ۷ - منحنی‌های بار-جابجایی با سطوح مختلف پیش تنیدگی [۴۲].

پس از زلزله استفاده می‌شود. در این روش به دلیل سطح تماس کوچک بین رشته‌های پیش تنیدگی و بتن، اعمال فشار بیش از حد ممکن است منجر به فرورفتن رشته‌های فولادی در بتن شود. همچنین به دلیل قرارگرفتن طولانی مدت در معرض هوا در حین محصورشدگی، این رشته‌ها مستعد خوردگی می‌باشند، لذا هنگام استفاده، باید پوشش‌های محافظ بر روی رشته‌های فولادی پیش تنیده قرار گیرد. از دست دادن اصطکاک پیش تنیدگی که هنگام استفاده از رشته‌های پیش تنیده برای تقویت ستون‌های بتنی رخ می‌دهد نیز باید مورد توجه قرار گیرد [۱۶].

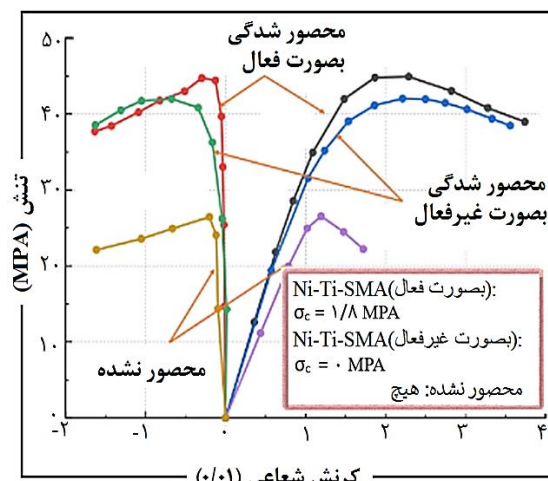
۴-۱- مفتول‌های SMA:

آلیاژهای حافظه دار دسته ای منحصر به فرد از آلیاژها هستند که توانایی حفظ کردن شکل خود را دارند. در دماهای پایین، این آلیاژها می‌توانند ظاهراً تغییر شکل پلاستیکی داشته باشند اما کرنش پلاستیک را می‌توان با افزایش دما بازیابی کرد. محصورشدگی فعال با استفاده از مفتول‌های آلیاژهای حافظه دار (SMA^۸) به صورت قابل توجهی میزان سختی، ظرفیت باربری و شکل پذیری ستون‌ها را در مقایسه با ستون‌های محصور نشده بهبود بخشد. همان طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، ظرفیت کرنش محوری و کرنش شعاعی استوانه بتنی افزایش یافته است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده محصورشدگی فعال با مفتول‌های SMA، بسیار در کاهش آسیب لرزه‌ای و بهبود عملکرد لرزه‌ای ستون‌های RC مؤثر می‌باشند. در مقایسه با روش‌های FRP، ستون‌های RC محصور شده توسط مفتول‌های SMA ظرفیت جذب انرژی و شکل پذیری بیشتری دارند. علاوه بر این، مفتول‌های SMA نیز می‌توانند برای تقویت سریع و اضطراری ستون‌های بتنی به شدت آسیب دیده استفاده شوند [۱۶]. برخی از محققان اشکال مختلف مفتول‌های SMA را مورد مطالعه قرار داده‌اند که ستون‌های RC متصل به لبه را با استفاده از مفتول‌های آلیاژهای نیکل و تیتانیوم در SMA (Ni-Ti SMA) و مفتول‌های نیکل، تیتانیوم و نیوبیم در SMA (Ni-Ti-Nb SMA) به طور جداگانه تقویت کرد [۴۳]. این مطالعه نشان می‌دهد که مفتول‌های SMA، شکل پذیری را بدون کاهش مقاومت بهبود می‌بخشند و در نتیجه Ni-Ti-Nb SMA برای مقاوم سازی ستون‌های RC مناسب تر از Ni-Ti SMA است. همچنین از نوارهای آهنی در مفتول‌های SMA (Fe-SMA) برای محصور کردن ستون‌های بتنی نیز استفاده شد و نتایج آن‌ها نشان داد که شکل پذیری و ظرفیت باربری ستون‌های بتنی محدود نیز بهبود یافته است. مفتول‌های Fe-SMA اقتصادی تر از Ni-Ti-Nb SMA می‌باشند و امکان اجرای وسیع مهندسی عمران در مقیاس‌های بزرگ را فراهم می‌کنند [۲۴].

⁸ Shape Memory Alloy



(ب)



(الف)

شکل ۸- (الف): استوانه بتنی مجهز شده به سیم SMA [۱۶] (ب): منحنی (کرنش شعاعی / کرنش محوری) استوانه بتنی [۱۶].

فولادی در بلند مدت مستعد خوردگی هستند. بنابراین، بحث دوام موضوعی است که باید مورد توجه قرار گیرد. همچنین از جنبه تئوری، ترکیب رشته‌های فولادی و صفحات فولادی باید افزایش قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت باربری ستون‌ها داشته باشد [۱۶].

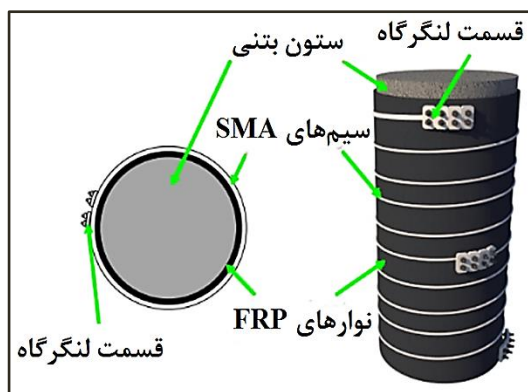
۳-۴- برخی از روش‌های محصورشدگی ترکیبی فعال:

نمونه‌ای از روش تقویت ترکیبی با نوارهای فولادی پیش‌تنیده به همراه با نوارهای FRP در شکل (۹) نشان داده شده است. این روش ابتدا از نوارهای فولادی پیش‌تنیده برای محدود کردن ستون‌های بتنی به‌طور فعال استفاده می‌کند که می‌تواند مسائل مربوط به تنش‌های چرخه‌ای و استفاده کم از مصالح را برطرف کند. سپس نوارهای FRP پیچیده شده روی نوارهای فولادی پیش‌تنیده اتصال می‌یابند. این نوارها نه تنها فشار جانبی را فراهم می‌کنند بلکه از نوارهای فولادی پیش‌تنیده داخلی در برابر خوردگی نیز محافظت می‌کنند [۲۱]. ترکیبات جدیدی از SMA و FRP را می‌توان برای به حداکثر رساندن مزایای هر دو مصالح، بدون به خطر انداختن عملکرد مصالح ایجاد کرد.

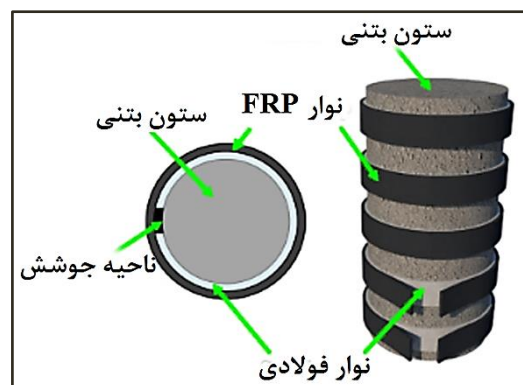
تحقیقات نسبتاً کمی در زمینه روشهای مهار کردن، روش‌های فعال‌سازی و اثربخشی محصور کردن ستون‌های بتنی محصور شده با Fe-SMA انجام شده‌است که نیازمند انجام تحقیقات بیشتری در این موضوع می‌باشد [۴۳]. دیگر روش‌های ترکیبی در شکل (۹) بصورت شماتیک نمایش داده شده‌اند. در قسمت‌های پیشین، انواع روشهای مختلف تقویت ستون با ایجاد مهار جانبی شرح داده شد. با توجه به مطالب ارائه شده، جهت مقایسه این روش‌ها، در جدول (۱) مقایسه‌ای با نمره‌دهی کیفی بین روش‌های مختلف محصورشدگی فعال ترکیبی ارائه شده است.

۲-۴- محصورشدگی با روش‌های ترکیبی:

در روش تقویت ترکیبی می‌توان بر معایب روش تک مصالح غلبه نمود. زیرا می‌توان مزایا استفاده از هر دو مصالح را به‌طور کامل توسعه داد و همچنین از اثرات هم‌افزایی مصالح استفاده نمود. به عنوان مثال، ترکیب فولاد زاویه‌دار با ورق فولادی و رشته‌های فولادی پیش‌تنیده، می‌تواند به‌طور موثری مسئله تمرکز تنش را برطرف کند و همچنین استفاده از FRP در ترکیب آن با مصالح سستی می‌تواند به‌طور قابل توجهی دوام را افزایش دهد. مصالح محصور شده فعال و غیرفعال را می‌توان به گونه‌های مختلف و انعطاف‌پذیری با توجه به محیط‌های کاری مختلف ترکیب نمود [۱۶]. یکی از این روش‌ها، روش ژاکت هیبریدی است که رشته‌های فولادی پیش‌تنیده یا ورق فولادی نازک را با FRP و ورق‌های فولادی ضخیم معمولی نیز مورد استفاده و مطالعه قرار داد. ژاکت هیبریدی می‌تواند در برابر باز شدن ترک‌های برشی هم به‌صورت عمودی و هم به‌صورت افقی مقاومت کند. این درحالی است که این مصالح به‌صورت مجزا می‌توانند در برابر باز شدن ترک‌های برشی فقط در جهت عرضی مقاومت کنند. در مقایسه با ورق‌های فولادی ضخیم و ژاکت‌های هیبریدی، ژاکت CFRP استحکام و سختی کمتری برای ستون‌ها ایجاد می‌کند. اگرچه این تکنیک‌ها نمی‌توانند پیک مقاومت و سختی الاستیک اولیه ستون را با نرخ و شدت بالا بازگردانند، اما در اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای قابل قبول هستند. این روش بر شدت تنشی که ممکن است توسط مواد رشته فولادی ایجاد شود غلبه کرده و شدت تنش داخلی را یکنواخت‌تر می‌کند. در نتیجه ظرفیت باربری ستون‌های بتنی که توسط ورق‌های فولادی کاملاً پیچیده شده‌اند، بهبود می‌یابد [۴۴]. از طرفی دیگر، ورق و رشته‌های

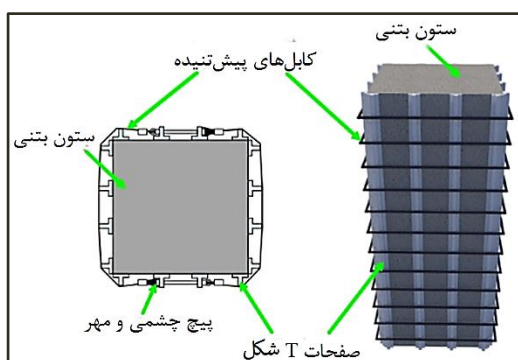


بتن محصور شده با روش ترکیبی FRP + SMA

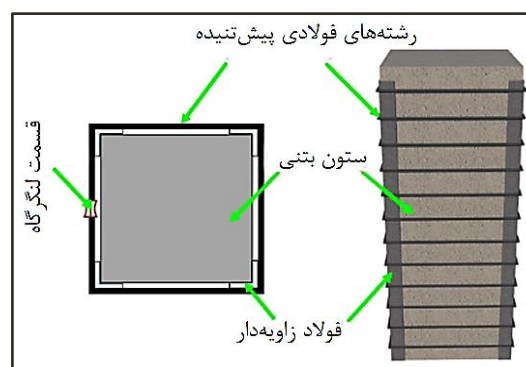


بتن محصور شده با روش ترکیبی

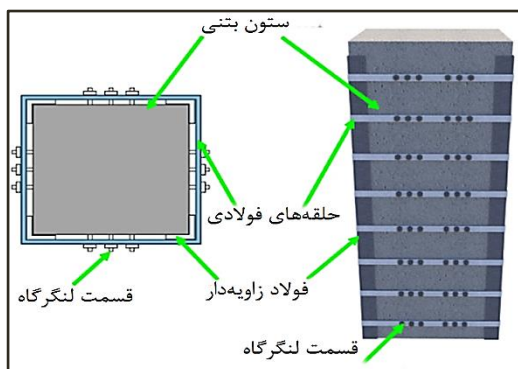
FRP + Steel strips



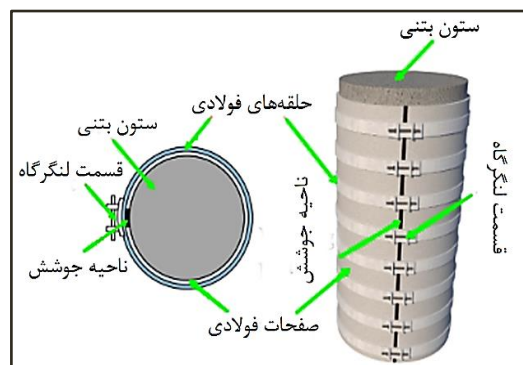
بتن محصور شده با روش ترکیبی، رشته‌های فولادی + صفحات فولادی.



بتن محصور شده با روش ترکیبی، فولاد زاویه دار + رشته‌های فولادی.



بتن محصور شده با روش ترکیبی، حلقه‌های فولادی + فولاد زاویه دار



بتن محصور شده با روش ترکیبی، حلقه‌های فولادی + صفحات فولادی

شکل ۹- روش‌های مختلف محصور سازی به روش ترکیبی [۲۱].

جدول ۱- عملکرد روش‌های ترکیبی [۱۶]

عملکردها	رشته‌های پیش‌تنیده	نوارهای فولادی پیش‌تنیده	(SMA) پیش‌تنیده
	رشته‌های فولادی + ورق فولادی	رشته‌های فولادی + زاویه فولادی	حلقه‌های فولادی + ورق فولادی
	FRP	حلقه‌های فولادی + ورق فولادی	نوارهای فولادی + زاویه فولادی
عملکرد مهار	****	***	****
سهولت اجرا	****	****	***
زمان‌بری عملیات اجرایی	****	****	***
میزان بکارگیری مصالح	****	****	****
افت پیش‌تنیدگی	***	****	****
اقتصادی بودن	****	****	****
سناریوهای کاربردی	***	*	****
ظرفیت باربری	****	**	****
شکل‌پذیری	***	**	****
عملکرد لرزه‌ای	****	****	****
دوام	**	**	****
بهره‌وری جامع	****	***	****
امتیاز کلی (برتری)	سه مورد	پنج مورد	شش مورد

* درجه کمیت در هر یک از موارد فوق

۵- نتیجه‌گیری:

باتوجه به مطالعات انجام شده و مقایسه بین روش‌های مقاوم‌سازی ستون‌های فاقد مهار جانبی (محصورشدگی فعال) نتایج زیر حاصل می‌گردد:

۱- از آنجایی که محصورشدگی فعال باعث افزایش مقاومت ستون‌های بتنی، بهبود میزان استفاده از مصالح، سازگاری بیشتر آن‌ها با نیازهای مهندسی و جلوگیری بهتر آن‌ها از کاهش زوال تنش چرخه‌ای بتن شده است، نسبت به محصورشدگی غیرفعال توصیه می‌گردد.

۲- روش NSM به‌تنهایی برای مقاوم‌سازی ستون‌ها کافی نیست و پیشنهاد می‌شود با موادی مثل FRP استفاده گردد. با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی بهتر است از ژاکت‌های BFRP در دو سر ستون‌ها استفاده شود.

۳- در خصوص مقول‌های SMA می‌توان گفت که (Ni-Ti-Nb SMA) نسبت به (Ni-Ti SMA) نتایج بهتری دارد اما از لحاظ جنبه‌های اقتصادی، (Fe-SMA) توصیه می‌شود و عملکرد مهاری خوبی نیز از خود نشان می‌دهد.

۴- روش‌های ترکیبی نسبت به روش‌های تک مصالح برتری دارند؛ زیرا هر یک از روش‌های تک مصالح مزایا و معایبی نسبت به یکدیگر دارند. این مصالح هنگامی که به شیوه درست ترکیب شوند، می‌توانند مزایا بیشتر و معایب کمتری را دارا باشند تا به یک محصول با عملکرد مهاری بهتری تبدیل شوند.

۵- روش‌های FRP و SMA از لحاظ معیارهای اجرایی مثل سهولت ساخت‌وساز و صرفه‌جویی در زمان اجرا و سناریوهای کاربردی و همچنین از لحاظ معیارهای مقاومتی مثل عملکرد مهار، افت پیش‌تنیدگی، ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، عملکرد لرزه‌ای، دوام و بهره‌وری جامع، نسبت به روش‌های نوار فولادی و سیم‌های فولادی برتری دارند. از طرفی روش‌های نوار فولادی و سیم‌های فولادی از لحاظ معیارهای اقتصادی مثل میزان استفاده از مصالح و اقتصادی بودن آن‌ها نسبت به روش‌های FRP و SMA بهتر هستند.



۶- منابع :

- Mansoori MR, Javadi P. The improvement of the threaded-based mechanical splice by modifying the threaded system: Study of techniques cold rolling and rotating friction welding. *Journal of Building Engineering*. 2023;80:107964.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107964>
- [9] Shokrzadeh MR, Nateghi-Alahi F. Experimental study of seismic behavior and modification of the failure region of mechanical bar splices. *Sharif Journal of Civil Engineering*. 2025;41(1):15–30.
<https://doi.org/10.24200/J30.2024.63880.3292>
- [10] Shokrzadeh MR. Cold rolling versus rotating friction welding techniques in mechanical splices: Study of the inelastic cyclic behavior of reinforced concrete columns. *Structural Concrete*. 2024;25(3):e70065.
<https://doi.org/10.1002/suco.70065>
- [11] Shokrzadeh MR, Aziminejad A, Moghaddam AS. Evaluation of various FRP strengthening configurations for RC beam-column joints. *Bridge Structures*. 2024;50(2):1–21.
<https://doi.org/10.3233/BRS-240223>
- [12] Makoond N, Shahnazi G, Buitrago M, Adam JM. Corner-column failure scenarios in building structures: Current knowledge and future prospects. *Structures*. 2023;50:123–135.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.015>
- [13] Omrani Z, Amirabadi R, Sharifi M. Effect of uncertainty on the seismic behaviour of fixed pile-founded offshore platforms. *Ships and Offshore Structures*. 2023;18(8):789–800.
<https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2109353>
- [14] Han T, Dong Z, Zhu H, Wu G, Zhao X. Compression behavior of concrete columns combinedly confined by FRP externally wrapped Fe-SMA strips. *Engineering Structures*. 2023;294:116754.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116754>
- [15] Apandi NM, Ma CK, Chin CL, Awang AZ, Omar W, Rashid ASA, Zailani WWA. Preliminary pre-damaged level assessment for concrete structures: A review. *Structures*. 2023;54:1381–1390.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.130>
- [16] Cosgun C, Turk AM, Mangir A, Cosgun T, Shokrzadeh MR, Nateghi-Alahi F. Evaluation of hybrid NSM-CFRP technical bars and FRP sheets for seismic rehabilitation of a concrete bridge pier. *Bridge Structures*. 2022;18:75–88.
<https://doi.org/10.3233/BRS-290180>
- [2] Sharifi M, Kamali M. Evaluating the concrete tensions softening model in flexural behavior. *International Journal of Civil Engineering*. 2017;15(5):791–807.
<https://doi.org/10.1007/s40999-017-0181-z>
- [3] Yoo SW, Choo JF. Evaluation of the flexural behavior of composite beam with inverted-T steel girder and steel fiber reinforced ultra high performance concrete slab. *Engineering Structures*. 2016;118:1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.052>
- [4] Shokrzadeh MR, Sharifi M, Nateghi-Alahe F. Seismic retrofitting of concrete beam-column connections: Numerical study FRP strip and NSM technique. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*. 2024;26(2):105–116.
<https://doi.org/10.48303/JSEE.2024.2031006.1099>
- [5] Feng DC, Liu ZT, Wang XD, Jiang ZM, Liang SX. Failure mode classification and bearing capacity prediction for reinforced concrete columns based on ensemble machine learning algorithm. *Advanced Engineering Informatics*. 2020;45:101126.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101126>
- [6] Cantarelli CC, Flyvbjerg B, Molin EJE, van Wee B. Cost overruns in large-scale transportation infrastructure projects: Explanations and their theoretical embeddedness. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2010;10(1):5–18.
<https://doi.org/10.18757/ejtir.2010.10.1.2864>
- [7] Shokrzadeh MR, Nateghi-Alahe F, Sadeghian T. Cold rolling techniques in mechanical splices: Experimental investigations. *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2024;5(1):1–10.
<https://doi.org/10.30495/IJASE.2024.2005050.1087>
- [8] Shokrzadeh MR, Nateghi-Alahi F,

- alloys. *Journal of Bridge Engineering*. 2010;15(1):81–89.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000038](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000038)
- [24] Zerbe L, Vieira D, Belarbi A, Senouci A. Uniaxial compressive behavior of circular concrete columns actively confined with Fe-SMA strips. *Engineering Structures*. 2022;254:113878.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113878>
- [25] Janke L, Czaderski C, Ruth J, Motavalli M. Experiments on the residual load-bearing capacity of prestressed confined concrete columns. *Engineering Structures*. 2009;31(10):2247–2256.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.04.006>
- [26] Zhou C, Li J, Lu X. Experimental research on pre-stress loss of concrete circular columns confined with post-tensioned FRP. *Journal of Tongji University*. 2012;40(12):1755–1760.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-374x.2012.12.003>
- [27] Mortazavi AA, Pilakoutas K, Son KS. RC column strengthening by lateral pre-tensioning of FRP. *Construction and Building Materials*. 2003;17(6–7):491–497.
[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00046-1ASCE Library](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00046-1ASCE Library)
- [28] Garzón-Roca J, Ruiz-Pinilla J, Adam JM, Calderón PA. An experimental study on steel-caged RC columns subjected to axial force and bending moment. *Engineering Structures*. 2011;33(10):2891–2901.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.016>
- [29] Yan Z, Pantelides CP, Reaveley LD. Posttensioned FRP composite shells for concrete confinement. *Journal of Composites for Construction*. 2007;11(1):81–90.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:1\(81\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:1(81))
- [30] Zhou C, Lu X, Li H, Tian T. Experimental study on seismic behavior of circular RC columns strengthened with pre-stressed FRP strips. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2013;12(4):625–642.
<https://doi.org/10.1007/s11803-013-0202-0>
- Kiymaz G. Experimental behaviour and failure of beam-column joints with plain bars, low-strength concrete and different anchorage details. *Engineering Failure Analysis*. 2020;110:104247.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104247>
- [17] Ji J, Han T, Dong Z, Zhu H, Wu G, Wei Y, Soh CK. Performance of concrete columns actively strengthened with hoop confinement: A state-of-the-art review. *Structures*. 2023;51:1100–1115.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.038>
- [18] Saeed YM, Aules WA, Rad FN. Post-strengthening rapid repair of damaged RC columns using CFRP sheets for confinement and NSM-CFRP ropes for flexural strengthening. *Structures*. 2022;39:1225–1236.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.073>
- [19] Si JH, Chen JB, Feng SY, Qiu SX. Experimental research on eccentric compression of reinforced concrete columns strengthened by prestressed PET straps and angle steel. *Structures*. 2021;30:456–467.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.052>
- [20] Wang Q, Lv J, Lu CL, Zhu WX. Experimental study on seismic performance of square RC columns strengthened with multi-layer prestressed CFRP fabric. *Journal of Building Engineering*. 2022;45:103589.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103589>
- [21] Huang QX, Guo ZX, Chen ZC. Experimental study on axial compression performance of RC pier column strengthened by PSJ and CFRP. *China Journal of Highway and Transport*. 2022;35(2):1–10.
<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.02.012>
- [22] Zhang D, Li N, Li ZX, Xie L. Experimental investigation and confinement model of composite confined concrete using steel jacket and prestressed steel hoop. *Construction and Building Materials*. 2020;256:119399.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119399>
- [23] Andrawes B, Shin M, Wierschem N. Active confinement of reinforced concrete bridge columns using shape memory

- confinement. *Journal of Composites for Construction*. 2016;20(4):04016001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000652](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000652)
- [39] Kent DC, Park R. Flexural members with confined concrete. *Journal of the Structural Division*. 1971;97(7):1969–1990. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002957CORE+2CoLab+2BibSonomy+2>
- [40] Singh A, del Rey Castillo E, Ingham J. FRP-to-FRP bond characterization and force-based bond length model. *Composite Structures*. 2019;210:724–734. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.005>
- [41] Abdulla NA. A state-of-art review of materials, methods, and applications of PVC-FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*. 2023;369:129719. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129719>
- [42] Choi E, Choi DH, Chung YS, DesRoches R. Seismic protection of lap-spliced RC columns using SMA wire jackets. *Magazine of Concrete Research*. 2012;64(8):673–685. <https://doi.org/10.1680/macr.10.00181>
- [43] Micelli F, Angiuli R, Corvaglia P, Aiello MA. Passive and SMA-activated confinement of circular masonry columns with basalt and glass fibers composites. *Composites Part B: Engineering*. 2014;67:593–604. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.06.034>
- [44] Fakharifar M, Chen G, Sneed L, Dalvand A. Seismic performance of post-mainshock FRP/steel repaired RC bridge columns subjected to aftershocks. *Composites Part B: Engineering*. 2015;78:248–260. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.010>
- [31] Hawileh RA, Nawaz W, Abdalla JA, Saqan EI. Effect of flexural CFRP sheets on shear resistance of reinforced concrete beams. *Composite Structures*. 2015;122:131–138. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.010>
- [32] Wang W, Martin PR, Sheikh MN, Hadi MNS. Eccentrically loaded FRP confined concrete with different wrapping schemes. *Journal of Composites for Construction*. 2018;22(6):04018069. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000898](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000898)
- [33] Wang W, Sheikh MN, Hadi MNS, Gao D, Chen G. Behaviour of concrete-encased concrete-filled FRP tube (CCFT) columns under axial compression. *Engineering Structures*. 2017;150:672–685. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.061>
- [34] Wang W, Sheikh MN, Hadi MNS. Experimental study on FRP tube reinforced concrete columns under different loading conditions. *Journal of Composites for Construction*. 2016;20(5):04016034. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000690](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000690)
- [35] Zhou C, A S, Qiu Y, Pan Q. Experimental investigation of axial compressive behavior of large-scale circular concrete columns confined by prestressed CFRP strips. *Journal of Structural Engineering*. 2019;145(4):04019015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002351](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002351)
- [36] Cao Q, Lv X, Wang Y, Wu Z, Lin Z. Performance and analysis of unidirectional GFRP actively confined high-strength concrete under monotonic and cyclic axial compression. *Construction and Building Materials*. 2021;271:121593. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121593>
- [37] Noroozieh E, Mansouri A. Lateral strength and ductility of reinforced concrete columns strengthened with NSM FRP rebars and FRP jacket. *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2019;11(2):195–206. <https://doi.org/10.1007/s40091-019-0225-5>
- [38] Yao LZ, Wu G. Fiber-element modeling for seismic performance of square RC bridge columns retrofitted with NSM BFRP bars and/or BFRP sheet