

Enhancing ultimate capacity: Experimental study on confinement effects of cylindrical concrete specimens using GFRP sheets and SMA helical wraps

Saeed Eilbeigi¹, Mohammadreza Tavakkolizadeh² and Amir R. Masoodi^{2*}

1- PhD candidate, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT

Unreinforced concrete under uniaxial compressive stresses is recognized as a brittle material. To delay concrete spalling and improve its ductility, lateral confinement is commonly employed. Confinement pressure can be applied to concrete in both passive and active forms. Passive confinement is achieved through internal transverse reinforcements (such as stirrups, hoops, closed ties), external steel helical wraps, steel jackets, or FRP jackets. Active confinement pre-stresses the reinforced concrete member in the transverse directions prior to loading. Recently, researchers have explored the use of smart materials, specifically Shape Memory Alloys (SMAs), to exploit the effects of active confinement. Hybrid confinement, combining passive confinement (imposed by FRP sheets) and active confinement (imposed by SMA helical wraps), has also been investigated. In this experimental study, the influence of different confinement methods (passive confinement with GFRP, active confinement with SMA, and hybrid confinement) on the behavior of confined concrete is examined. Four cylindrical specimens with dimensions of 305*152 mm were constructed in the laboratory of the Ferdowsi University of Mashhad. These specimens were subjected to uniaxial one-sided compressive loading without axial restraint. The results indicate that the use of SMA helical wraps in active confinement and hybrid confinement not only enhances the maximum resistance developed in the specimens but also has a significant effect on improving the ultimate strain in specimens with active and hybrid confinement compared to those without confinement and those confined passively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 March 2024

Revise Date: 02 May 2024

Accept Date: 16 May 2024

Keywords:

Shape Memory Alloy

GFRP Sheet

Hybrid Confinement, Concrete

Cylindrical Specimen

Axial Loading

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.444114.3362](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.444114.3362)

*Corresponding author: Amir R. Masoodi.

Email address: ar.masoodi@um.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی اثر محصورشدگی ترکیبی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی با استفاده از ورق‌های GFRP و دورپیچ SMA روی ظرفیت نهایی

سعید ایل‌بیگی¹، محمدرضا توکلی‌زاده²، امیررضا مسعودی^{2*}

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

بتن غیرمسلح تحت اثر تنش‌های فشاری تک‌محوری به عنوان یک ماده‌ی ترد شناخته می‌شود. برای به تأخیر انداختن گسیختگی بتن و بهبود شکل‌پذیری آن، از محصورشدگی جانبی استفاده می‌شود. فشار محصورشدگی می‌تواند به صورت غیرفعال و فعال به بتن اعمال شود. محصورشدگی غیرفعال توسط میلگردهای عرضی داخلی (مانند دورپیچ‌ها، خاموت‌ها، تنگ‌های بسته)، دورپیچ فولادی خارجی، ژاکت‌های فولادی یا ژاکت‌های FRP به سازه‌های بتنی اعمال می‌شود. محصورشدگی فعال، عضو بتن مسلح را قبل از اعمال بارگذاری در جهات عرضی پیش‌تنیده می‌کند. اخیراً برخی محققان به منظور استفاده از تأثیرگذاری محصورشدگی فعال، استفاده از مصالح هوشمند به نام آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) را آغاز کرده‌اند. محصورشدگی هیبریدی نیز به عنوان ترکیبی از محصورشدگی غیرفعال (اعمال شده توسط ورق‌های FRP) و محصورشدگی فعال (اعمال شده توسط دورپیچ SMA) مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش آزمایشگاهی، تاثیر روش اعمال فشار محصورشدگی (محصورشده‌ی غیرفعال با GFRP، محصورشدگی فعال با SMA و محصورشدگی هیبریدی)، بر رفتار بتن محصورشده مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی تاثیر این پارامتر بر رفتار استوانه‌های بتنی محصورشده، چهار نمونه‌ی استوانه‌ای با ابعاد 300*150 میلی‌متر ساخته شده و تحت اثر بارگذاری محوری فشاری تک‌محوری فاقد خروج از مرکزیت قرار می‌گیرد. بررسی نتایج نشان می‌دهد استفاده از دورپیچ SMA در محصورشدگی فعال و هیبریدی مقاومت حداکثر نمونه‌های محصورشده را نسبت به نمونه‌ی فاقد محصورشدگی به ترتیب 27 و 19 درصد بهبود می‌بخشد. همچنین استفاده از محصورشدگی فعال و هیبریدی کرنش نهایی نمونه‌های محصورشده را نسبت به نمونه‌ی محصورنشده به ترتیب 17 و 19/5 برابر افزایش می‌دهد، بنابراین محصورشدگی فعال و هیبریدی تاثیر چشم‌گیری در بهبود کرنش نهایی نمونه‌های محصورشده دارند.

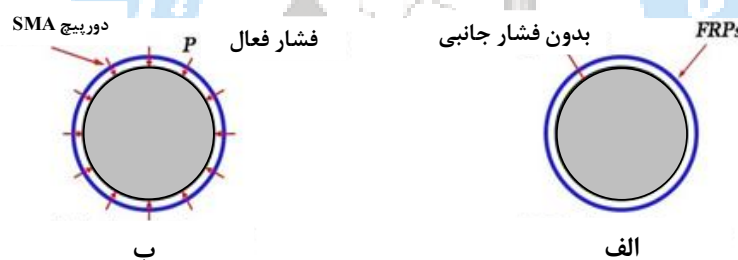
کلمات کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار شکلی، ورق GFRP، محصورشدگی هیبریدی، نمونه استوانه‌ای بتنی، بارگذاری محوری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.444114.3362	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.444114.3362	/11/30 1403	/11/30 1403	/02/27 1403	/02/13 1403	1402/12/12
*نویسنده مسئول: ar.masoodi@um.ac.ir					پست الکترونیکی:	

1- مقدمه

بتن غیر مسلح تحت اثر تنش‌های فشاری تک‌محوری به عنوان یک ماده‌ی ترد شناخته می‌شود. برای به تأخیر انداختن گسیختگی بتن و بهبود شکل‌پذیری آن، از محصورشدگی جانبی بتن استفاده می‌شود. این ویژگی‌ها برای سازه‌هایی که ممکن است در معرض بارهای شدید مثل زلزله قرار بگیرند، بحرانی و مهم هستند. گسیختگی بسیاری از پل‌ها که در زلزله‌های گذشته رخ داده، به علت گسیختگی یک یا چند ستون بتن مسلح از آن‌ها بوده است. این گسیختگی در بسیاری از موارد به دلیل عدم محصورشدگی کافی برای بتن رخ داده است [1]. نخستین تحقیقات بر روی محصورشدگی بتن توسط ریچارد و همکاران [2] انجام شد. آن‌ها در تحقیقات خود، رفتار بتن را تحت اثر تنش‌های چندمحوری بررسی کردند و نتایج تحقیقات، مؤثر بودن محصورشدگی جانبی بر رفتار بتن را نشان داد. نتایج این پژوهش باعث شد محققان زیادی رفتار بتن تحت اثر محصورشدگی جانبی و روش‌های مختلف اعمال فشار محصورشدگی جانبی را مورد بررسی قرار دهند.

دو نوع تکنیک محصورشدگی وجود دارد: محصورشدگی فعال و محصورشدگی غیرفعال. تفاوت عمده‌ی بین روش‌های محصورشدگی فعال و غیرفعال در این است که در روش محصورشدگی فعال، فشار محصورکننده‌ی جانبی قبل از اعمال بارگذاری محوری به نمونه وارد می‌گردد، اما در روش محصورشدگی غیرفعال، فشار محصورکننده در نتیجه ایجاد اتساع جانبی بتن پس از اعمال بارگذاری وارد می‌شود. در شکل 1، رفتار یک مقطع دایروی که تحت اثر فشار محصورشدگی غیرفعال، فشار محصورکننده در نتیجه ایجاد اتساع جانبی بتن پس از اعمال بارگذاری وارد می‌گردد، اما در روش محصورشدگی غیرفعال، فشار محصورکننده در نتیجه ایجاد اتساع جانبی بتن پس از اعمال بارگذاری وارد می‌شود [3].



شکل 1 مقطع دایروی تحت اثر فشار محصورشدگی قبل از اعمال بارگذاری (الف) محصورشدگی غیرفعال توسط ژاکت FRP (ب) محصورشدگی فعال توسط دورپیچ SMA [3]

محصورشده‌ی غیرفعال که تکنیک رایج‌تری است، توسط میلگردهای عرضی فولادی داخلی، ژاکت‌های فولادی خارجی یا ژاکت‌های FRP خارجی به سازه‌های بتنی اعمال می‌شود [1]. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی برای بررسی رفتار بتن محصورشده با روش‌های مختلف انجام شده است. بسیاری از محققان، رفتار بتن محصورشده توسط ورق‌های FRP را مورد بررسی قرار داده‌اند. کامپوزیت‌های FPR به دلیل نسبت مقاومت به وزن بالا و مقاومت بالا در برابر خوردگی به طور گسترده در کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند [4]. با این وجود، FRP‌های رایج به دلیل کرنش‌های کششی نهایی پایین، رفتار تردی دارند [5]. بنابراین به عنوان یک نتیجه می‌توان بیان کرد که FRP‌های رایج توانایی کمی در استهلاک انرژی از خود نشان می‌دهند. به علاوه FRP‌ها در مقایسه با برخی مصالح مانند فولاد، مقاومت خزش و خستگی کمی از خود نشان می‌دهند [6, 7]. تحقیقات زیادی پیرامون بررسی رفتار بتن محصورشده توسط میلگردهای عرضی فولادی [8-11] و یا توسط ژاکت‌های فولادی [12, 13] تمرکز کرده‌اند. هم‌چنین محققان زیادی رفتار بتن محصورشده توسط ژاکت‌های FRP [14-17] و یا استفاده از میلگردهای داخلی FRP به عنوان یکی دیگر از روش‌های محصورشدگی غیرفعال [8, 9, 18, 19] را مورد بررسی قرار داده‌اند. استفاده از سیم‌های FRP نیز به عنوان یکی از روش‌های محصورکنندگی غیرفعال توسط برخی محققان مورد بررسی قرار گرفته است [20-22].

محصورشدگی فعال، عضو بتن مسلح را قبل از اعمال بارگذاری در جهات عرضی پیش‌تنیده کرده و در افزایش مقاومت نهایی و شکل‌پذیری المان‌های بتنی مؤثرتر است [1]. بیش‌تر مطالعاتی که بر روی محصورشدگی فعال انجام شده است، رفتار بتن را با استفاده از آزمایش سه‌محوری بررسی کرده است. برخی مطالعات انجام شده پیرامون محصورشدگی فعال، رفتار بتن را با استفاده از ابزار آزمایش سه‌محوری، مانند لوله‌های فشار سه‌محوری مورد بررسی قرار داده‌اند [2, 23]. هم‌چنین روش‌های دیگری برای اعمال فشار محصورشدگی فعال به بتن وجود دارد، مانند استفاده از المان‌های فولادی پیش‌تنیده [24-27] و هم‌چنین استفاده از ورق‌های FRP پیش‌تنیده [28, 29]. در اکثر مطالعات بیان شده، از روش‌های مکانیکی برای ایجاد پیش‌تنیدگی در مصالح مورد استفاده جهت اعمال فشار محصورشدگی فعال استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد اعمال فشار محصورشدگی فعال با ایجاد پیش‌تنیدگی در مصالح، به کار، زمان و هزینه‌ی خیلی زیادی نیاز دارد. بنابراین علیرغم برتری آن نسبت به محصورشدگی غیرفعال، کاربرد آن در سازه‌ها با مشکلات زیادی همراه است. نخستین بار آندراس و شین [30-32] به منظور استفاده از تأثیر محصورشدگی فعال، استفاده از مصالح هوشمندی به نام آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) را آغاز کردند. پس از آن محققان زیادی تأثیر استفاده از دورپیچ‌ها و ژاکت‌های SMA را بر رفتار بتن محصورشده مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین آندراس و شین [33, 34] استفاده از ترکیب محصورشدگی غیرفعال توسط FRP و محصورشدگی فعال توسط دورپیچ SMA را مورد بررسی قرار داده و عملکرد مناسب آن‌ها در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری را اثبات کردند.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد مطالعات محدودی برای مقایسه‌ی تأثیر محصورشدگی غیرفعال با FRP و محصورشدگی فعال با SMA بر رفتار بتن انجام شده است، مانند پژوهش‌های آندراس و شین [30-32] و ال‌حاجا و همکاران [35, 36]. بررسی نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد علاوه بر اینکه گسیختگی نمونه‌ی محصورشده با FRP ترد و گسیختگی نمونه‌ی محصورشده با SMA شکل‌پذیر است، تأثیر محصورشدگی با SMA در افزایش مقاومت از محصورشدگی با FRP بیشتر است. با مشخص شدن تأثیر مطلوب محصورشدگی با SMA بر رفتار بتن، پژوهش‌های زیادی برای بررسی عوامل مؤثر بر محصورشدگی با SMA توسط محققان مختلف انجام شد، مانند تأثیر پروتکل بارگذاری (چرخه‌ای و یک‌طرفه)، فشار محصورشدگی، مقاومت فشاری بتن محصورنشده، گام دورپیچ، درصد حجمی دورپیچ، مقدار نیروی محوری ستون، نسبت لاغری ستون، درصد حجمی میلگرد طولی ستون، تأثیر مقدار کرنش اولیه‌ی ایجاد شده در دورپیچ SMA و مقدار خروج از مرکزیت بار محوری وارد بر ستون [1, 37-50]. نخستین بار شین و آندراس [3, 34, 51-53] استفاده از محصورشدگی هیبریدی را پیشنهاد دادند. پس از آن محققان دیگری محصورشدگی هیبریدی را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات دئوگکار و همکاران [54] و جونگ و همکاران [55] نشان داد در بتن‌های پر مقاومت، وجود مولفه‌ی فشار محصورشدگی فعال، تأثیر قابل توجهی بر افزایش شکل‌پذیری در مقایسه با نمونه‌ای که به صورت غیرفعال محصور شده است دارد. طهماسبی [56] در یک مطالعه‌ی عددی، تأثیر نوع آلیاژ حافظه‌دار شکلی (FeMnSiCr و NiTi) و نوع FRP (AFRP, CFRP, GFRP) را بر رفتار بتن محصورشده به صورت هیبریدی بررسی کرد و نشان داد استفاده از محصورشدگی هیبریدی باعث کاهش قابل توجه دررفت و افزایش قابل توجه مقاومت نمونه‌ی مورد بررسی می‌شود. در این پژوهش استوانه‌های بتنی با استفاده از روش‌های مختلف (غیرفعال، فعال و هیبریدی) و با فشار محصورشدگی یکسان (1/46 مگاپاسکال) محصور شده و تحت آزمایش فشاری تک‌محوری قرار گرفته‌اند. با ترسیم منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های مورد بررسی، تأثیر استفاده از هر یک از انواع مختلف روش‌های محصورشدگی بر مقاومت حداکثر، مقاومت نهایی و کرنش نهایی نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- انواع محصورشدگی

2-1) محصورشدگی غیرفعال با استفاده از ژاکت FRP

در ستون بتنی با مقطع دایروی شکل، فشار محصورشدگی در محیط دایره ثابت است. البته با این توضیح که امکان نادیده گرفتن اختلاف جزئی در مشخصات، مانند غیریکنواختی بتن وجود دارد. زمانی که دورپیچ FRP گسیخته می‌شود، فشار محصورشوندگی به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. حداکثر فشار محصورشدگی جانبی اعمال شده توسط دورپیچ FRP با استفاده از رابطه‌ی 1 محاسبه می‌شود [57]:

$$f_i = \frac{2(f_{FRP})(t)}{D} = \frac{2(E_{FRP})(\epsilon_{FRP})(t)}{D} \quad (1)$$

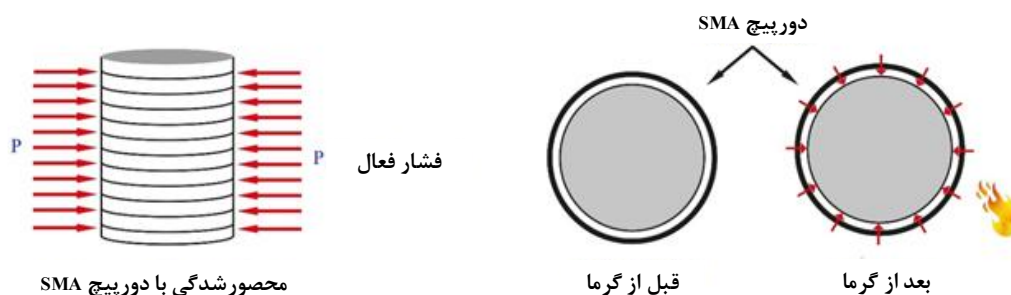
در این رابطه، f_i ماکزیمم تنش فشاری محصورکننده‌ای است که توسط دورپیچ FRP به هسته دایره‌ای شکل ستون بتنی در لحظه‌ی گسیختگی وارد می‌گردد. f_{FRP} مقاومت کششی دورپیچ FRP در جهت الیاف، t ضخامت دورپیچ FRP، D قطر هسته‌ی بتن محصورشده، E_{FRP} مدول الاستیسیته FRP و ϵ_{FRP} کرنش نهایی FRP تحت اثر کشش است.

2-2) محصورشدگی فعال با استفاده از دورپیچ SMA

الیازهای حافظه‌دار شکلی یک گروه از آلیازهای فلزی هستند که می‌توانند مقادیر بزرگی از کرنش‌ها را در هنگام باربرداری، بازیابی کنند. SMAها در برابر خوردگی مقاومت بالایی دارند، در برابر خستگی رفتار مناسبی از خود نشان می‌دهند و قابلیت استهلاک انرژی خوبی دارند [58]. آلیازهای حافظه‌دار شکلی دو خصوصیت منحصر به فرد دارند: خاصیت حافظه‌ی شکلی (SME) و خاصیت فوق‌الاستیک (SE). در خاصیت حافظه‌ی شکلی، بازیابی کرنش‌های ایجاد شده پس از باربرداری به صورت حرارتی و در خاصیت فوق‌الاستیک، بازیابی کرنش‌های ایجاد شده پس از باربرداری به صورت مکانیکی است. هر دوی این خصوصیات به درجه‌ی حرارت ماده بستگی دارد. در دماهای نسبتاً بالا، آلیاز در حالت آستنیت قرار داشته و در نتیجه رفتار فوق‌الاستیک دارد، در حالی که در دماهای نسبتاً پایین، آلیاز در حالت مارتنزیت قرار دارد. هنگامی که SMA در حالت مارتنزیت قرار دارد، هنگامی که SMA در حالت مارتنزیت قرار دارد، یعنی در صورت ایجاد تغییرشکل، مصالح قادر هستند از طریق اعمال حرارت به شکل اصلی (حالت تغییرشکل نیافته) خود برگردند [4, 59]. آلیازهای حافظه‌دار شکلی، در زمینه‌های مختلف مثل پزشکی، هوافضا، خودرو و سازه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [60, 61]. در سازه‌های عمرانی از شکل‌های مختلف آلیازهای حافظه‌دار شکلی برای بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌ها استفاده می‌شود، مانند استفاده از آلیازهای حافظه‌دار شکلی در مقاوم‌سازی و بهسازی ستون‌های بتن مسلح [36, 48-50, 54, 55, 62].

همانطور که بیان شد نخستین بار آندراس و شین [30-32] به منظور استفاده از تأثیرگذاری محصورشدگی فعال، استفاده از مصالح هوشمندی به نام آلیازهای حافظه‌دار شکلی را آغاز کرده‌اند. در محصورشدگی بتن با استفاده از سیم‌های آلیاز حافظه‌دار شکلی، می‌توان از سیم‌ها در فاز آستنیت یا مارتنزیت استفاده کرد. اگر سیم‌هایی که جهت محصورشدگی استفاده می‌شود دارای خاصیت سوپرالاستیک باشند، محصورشدگی غیرفعال است، اما اگر سیم‌های استفاده شده جهت اعمال محصورشدگی دارای خاصیت حافظه‌ی شکلی همراه با اعمال کرنش اولیه باشند، محصورشدگی که توسط سیم‌های SMA به ستون‌های بتنی اعمال می‌گردد، محصورشدگی فعال است [37, 38]. پژوهش‌های متعددی برای مقایسه‌ی رفتار محصورشدگی فعال و غیرفعال توسط دورپیچ‌های SMA صورت گرفته است. بررسی نتایج نشان می‌دهد استفاده از سیم‌ها در فاز مارتنزیت، مقاومت، سختی و شکل‌پذیری نمونه‌ی استوانه‌ای را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد، در حالیکه استفاده از سیم‌ها در فاز آستنیت، تنها در افزایش شکل‌پذیری تأثیر قابل توجهی دارد [37, 38, 51].

اگر سیم‌های SMA مارتنزیت در دو طرف مهار نشده و تحت اثر بارهای مکانیکی وارد تغییرشکل پیدا کنند، هنگامی که سیم‌ها تا دمای بیش از A_f حرارت داده شوند می‌توانند شکل اولیه خود را بازیابند، اما در صورتی که سیم‌های SMA مهار شوند، قادر نخواهند بود طول اولیه‌ی خود را بازیابند و یک تنش بازیافتی در سیم ایجاد خواهد شد. به منظور استفاده کردن از این پدیده در محصورشدگی ستون‌های بتنی، سیم‌های SMA در فاز مارتنزیت که کرنش اولیه در آن‌ها ایجاد شده است، ابتدا دور ستون بتنی پیچیده شده و مهار می‌شوند. سپس برای بازیابی شکل، تا دمایی بیش از A_f حرارت داده می‌شوند. به دلیل محدودیت ایجاد شده توسط بتن و هم‌چنین مهار دو انتهای سیم دورپیچ شده، دورپیچ قادر نیست شکل اولیه خود را بازیابد، بنابراین یک تنش بازیافتی در دورپیچ ایجاد می‌شود. این تنش، به صورت فشار محصورشدگی فعال به بتن اعمال می‌گردد [1]. شکل 2 مفهوم مورد استفاده در این پژوهش برای اعمال فشار محصورشدگی فعال بر روی بتن با استفاده از دورپیچ‌های SMA را نشان می‌دهد.



شکل 2 تصویر شماتیک ستون بتنی محصورشده توسط دورپیچ SMA در فاز مارتنزیت (محصورشدگی فعال)

برای به دست آوردن فشار محصورشدگی فعال که توسط دورپیچ‌های SMA به ستون بتنی با مقطع دایروی اعمال می‌گردد، از رابطه‌ی 2 استفاده می‌شود. این رابطه با نوشتن معادلات تعادل نیروهای محصورشدگی در ستون بتن مسلح محصورشده توسط دورپیچ‌های SMA به دست می‌آید [3, 63, 64]:

$$f_l = \frac{2(A_{SMA})(f_{SMA})}{(S)(D)} \quad (2)$$

در این رابطه f_l فشار محصورشدگی، A_{SMA} سطح مقطع سیم‌های SMA استفاده شده جهت محصورشدگی، f_{SMA} تنش بازیافتی ایجاد شده در سیم SMA، S گام دورپیچ (فاصله مرکز تا مرکز دورپیچ‌های SMA) و D قطر مقطع ستون بتنی محصور شده است.

2-3) محصورشدگی هیبریدی

در ادامه‌ی پژوهش‌هایی که بر محصورشدگی بتن توسط دورپیچ‌های SMA انجام شد، آندراس و شین [33, 34] استفاده از ترکیب محصورشدگی غیرفعال توسط FRP‌ها و محصورشدگی فعال توسط دورپیچ‌های SMA را مورد بررسی قرار داده و عملکرد مناسب آن‌ها در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری اثبات شد. برای اعمال فشار محصورشدگی هیبریدی به نمونه‌های مورد بررسی، ابتدا ورق‌های FRP به رزین آغشته شده و به دور ستون‌های بتنی پیچانده می‌شوند. پس از گذشت 24 ساعت و عمل‌آوری رزین، ورق‌های FRP به طور کامل به ستون بتنی می‌چسبند. سپس سیم‌های SMA در فاز مارتنزیت و دارای کرنش اولیه، بر روی ستون بتنی محصورشده توسط ورق‌های FRP پیچانده شده و دو انتهای آن‌ها در بالا و پایین نمونه مهار می‌گردد. سپس سیم‌های SMA تا دمایی بیش از دمای A_f حرارت داده می‌شود. مهار دورپیچ‌های SMA در دو انتهای خود و هم‌چنین وجود ستون بتنی، از بازگشت سیم SMA به شکل اولیه خود جلوگیری کرده و باعث ایجاد تنش‌های بازیافتی و اعمال فشار محصورشدگی فعال به ستون می‌گردد [54].

در محصورشدگی هیبریدی، برای محاسبه فشار محصورشدگی از رابطه‌ی 3 استفاده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌گردد، برای محاسبه فشار محصورشدگی هیبریدی، باید فشار محصورشدگی غیرفعال موثر ناشی از دورپیچ FRP (رابطه‌ی 1) و فشار محصورشدگی فعال موثر ناشی از دورپیچ SMA (رابطه‌ی 2) با یکدیگر جمع شود:

$$f_{l,hybrid} = f_{l,passive} + f_{l,active} \quad (3)$$

در این رابطه، $f_{l,hybrid}$ فشار محصورشدگی هیبریدی، $f_{l,passive}$ فشار محصورشدگی غیرفعال ناشی از دورپیچ FRP و $f_{l,active}$ فشار محصورشدگی فعال ناشی از دورپیچ SMA است.

3- برنامه پژوهش

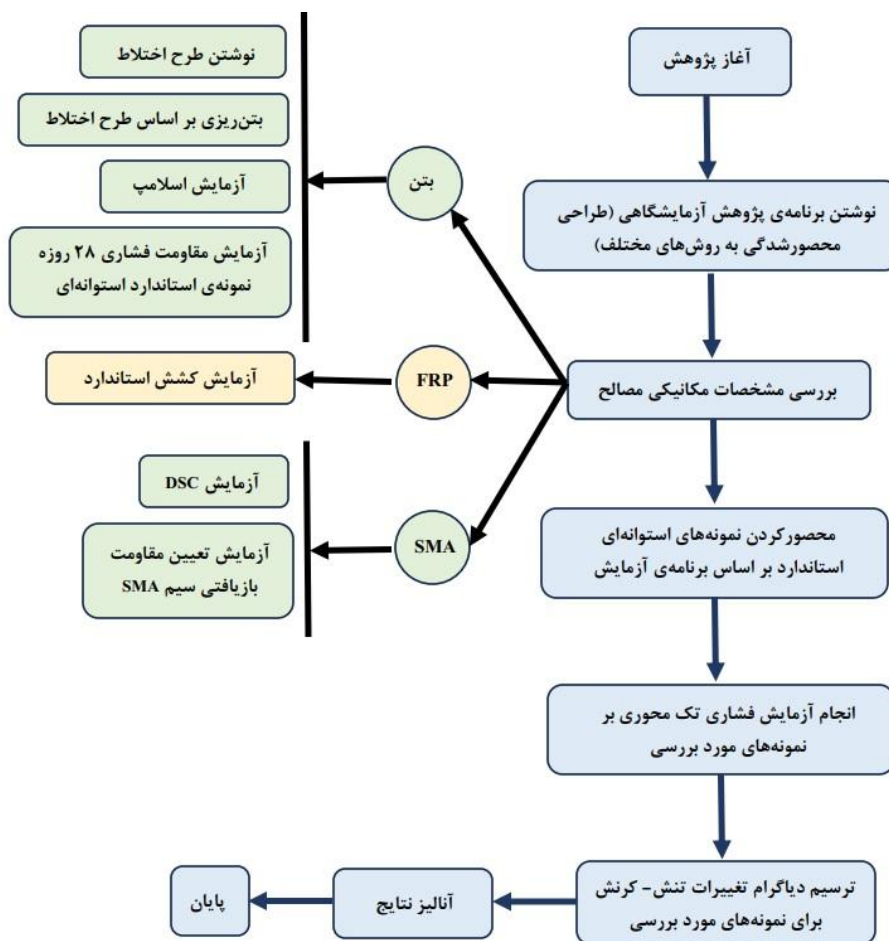
در این پژوهش آزمایشگاهی، تاثیر روش اعمال فشار محصورشدگی (محصورشدگی غیرفعال با FRP، محصورشدگی فعال با SMA) و محصورشدگی هیبریدی) بر رفتار بتن محصورشده مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی تاثیر این پارامترها بر رفتار ستون بتنی محصورشده، چهار نمونه‌ی استوانه‌ای به ابعاد 300*150 میلی‌متر در آزمایشگاه سازه‌ی دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شده و تحت اثر بار محوری فشاری تک‌محوری فاقد خروج از مرکزیت قرار می‌گیرد. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش شامل تنش محوری و کرنش طولی ایجاد شده در نمونه‌های مورد بررسی است. نمونه‌های مورد بررسی در پژوهش در جدول 1 معرفی شده‌اند. در این جدول:

- نمونه‌ی محصور نشده با B1-UN نشان داده شده است.
- نمونه‌ای که تنها با استفاده از دولایه GFRP محصور شده است به صورت B1-GF-NL2 نام‌گذاری شده است.
- نمونه‌ای که تنها با استفاده از دورپیچ SMA با گام 11/3 میلی‌متر محصور شده به صورت B1-SMA نام‌گذاری شده است.
- نمونه‌ای که به صورت هیبریدی و با استفاده از یک لایه دورپیچ GFRP و سپس دورپیچ SMA با گام 21/8 میلی‌متر محصور شده است، به صورت B1-GFSM نام‌گذاری شده است.

جدول 1 مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در پژوهش آزمایشگاهی

نام نمونه	مقاومت فشاری بتن محصور نشده (مگاپاسکال)	تعداد لایه‌های GFRP	گام دورپیچ SMA (میلی‌متر)	نوع محصورشدگی	فشار محصورشدگی (مگاپاسکال)
B1-UN	32/85	---	---	---	1/46
B1-GF-NL2	32/85	2	---	غیرفعال	1/46
B1-SMA	32/85	---	11/30	فعال	1/46
B1-GFSM	32/85	1	21/80	ترکیبی	1/46

شکل 3 فلوچارتی را که نشان‌دهنده‌ی روند انجام پژوهش است نشان می‌دهد.



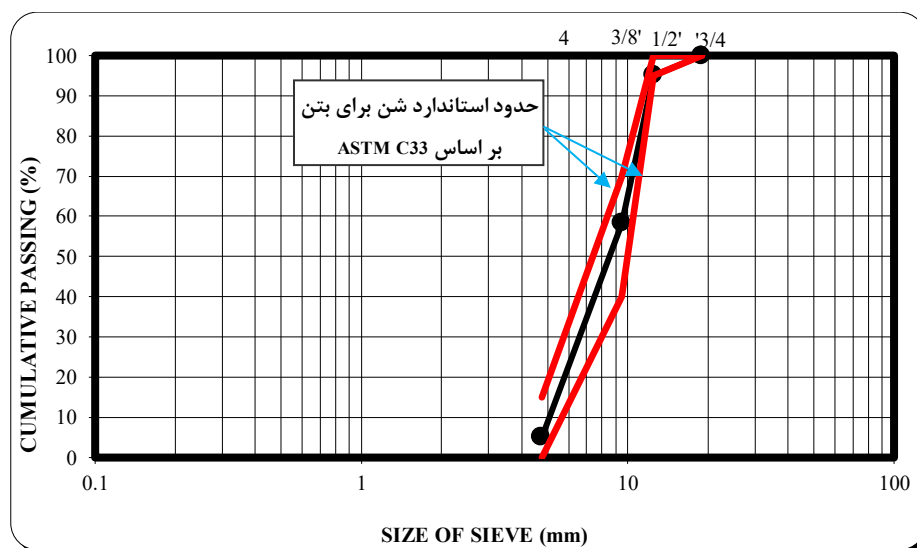
شکل 3 فلوجارت نشان‌دهنده‌ی روند انجام پژوهش

4- بررسی خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده

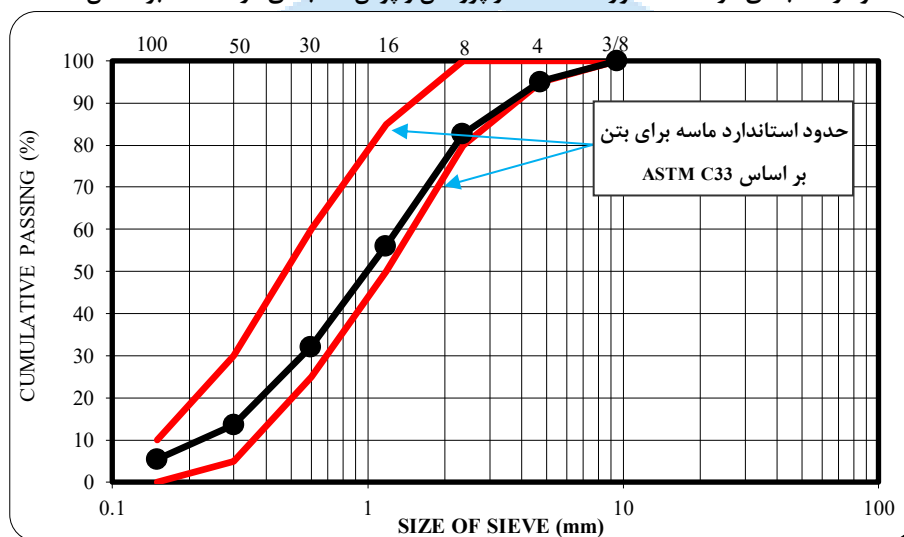
در این پژوهش آزمایشگاهی از بتن، ژاکت GFRP، دورپیچ SMA (آلیاژ نیتینول) و رزین استفاده شده است. در ادامه خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده مورد بررسی شده است.

4-1) خصوصیات مکانیکی بتن

در تهیه بتن مورد استفاده در این پژوهش، سیمان، سنگدانه (ریزدانه و درشت دانه) و آب مورد استفاده قرار گرفته است. شن مورد استفاده، از نوع سنگ‌دانه‌های شکسته می‌باشد. آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش بر اساس آیین‌نامه‌ی ASTM C33 [65] انجام شده است. منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه‌های استفاده شده و منحنی پوش دانه‌بندی درشت‌دانه‌ها در شکل 4 و هم‌چنین منحنی دانه‌بندی ریزدانه‌های مورد استفاده و منحنی پوش دانه‌بندی ریزدانه‌ها در شکل 5 آورده شده است.

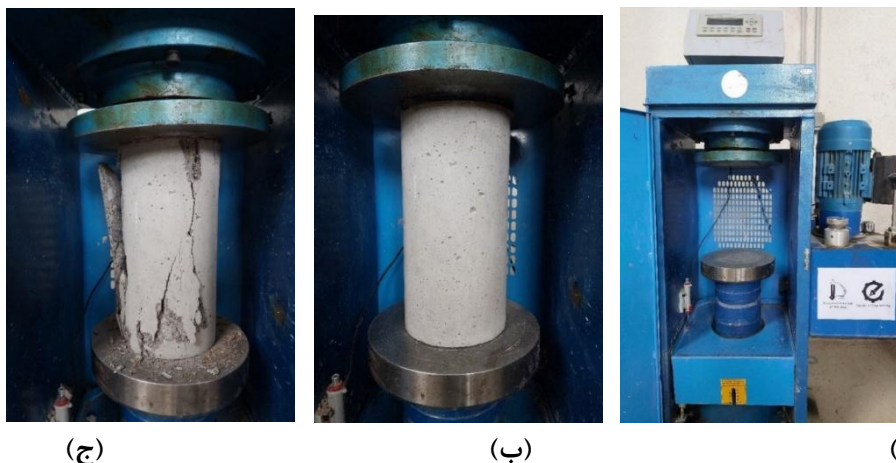


شکل 4 نمودار دانه‌بندی درشت‌دانه مورد استفاده در پژوهش و پوش دانه‌بندی درشت‌دانه بر اساس ASTM C33



شکل 5 نمودار دانه‌بندی ریزدانه مورد استفاده در پژوهش و پوش دانه‌بندی ریزدانه بر اساس ASTM C33

مقاومت فشاری یکی از اصلی‌ترین خصوصیات مکانیکی بتن سخت‌شده است که در سنین مختلف از جمله 1، 3، 7، 14 و 28 روز مورد توجه قرار می‌گیرد، ولی معمولاً مقاومت فشاری 28 روزه‌ی بتن، اصلی‌ترین مشخصه‌ی مکانیکی بتن است. در این تحقیق، به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر 150 و ارتفاع 300 میلی‌متر استفاده شده است. آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C109/C109M [66] انجام می‌شود. به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای، از جک هیدرولیکی اعمال فشار با ظرفیت 200 کیلو نیوتون استفاده شده است. در شکل 6 تصویر جک مورد استفاده و تصویر انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی یکی از نمونه‌ها (قبل و بعد انجام آزمایش) نشان داده شده است. بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری 28 روزه بر پنج نمونه‌ی استوانه‌ای تهیه شده با استفاده از طرح اختلاط بیان شده در جدول 2 (که با استفاده از آیین‌نامه‌ی ACI-211 [67] حاصل شده است) نشان می‌دهد مقاومت فشاری 28 روزه نمونه‌ی استوانه‌ای معادل 32/16 مگاپاسکال است.



(ج)

(ب)

(الف)

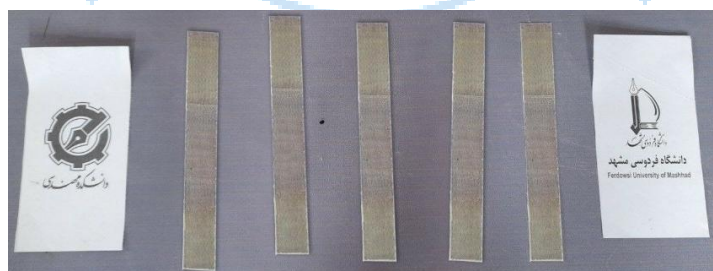
شکل 6 (الف) تصویر جک مورد استفاده جهت آزمایش مقاومت فشاری (ب) تصویر نمونه‌ی استوانه‌ای قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری (ج) تصویر نمونه‌ی استوانه‌ای بعد از انجام آزمایش مقاومت فشاری

جدول 2 طرح اختلاط استفاده شده برای ساخت بتن

نسبت آب به سیمان	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)
0/46	210	450	1010	730

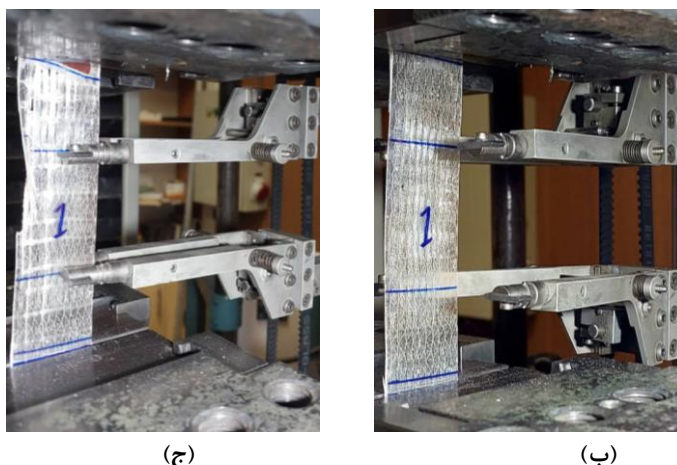
2-4) بررسی خصوصیات مکانیکی کوپن FRP

در این پژوهش، الیاف یک جهته‌ی شیشه، محصول شرکت کوانتوم با نام تجاری Quantum Wrap 230G جهت ساخت کامپوزیت GFRP مورد استفاده قرار گرفته است. برای تعیین خصوصیات مکانیکی مصالح مرکب (GFRP)، پنج نمونه براساس استاندارد ASTM D3039 تهیه شده است [68]. هنگام ساخت نمونه‌ها، جهت خروج حباب‌های احتمالی موجود در کوپن‌های GFRP، کوپن‌های ساخته شده به مدت 24 ساعت تحت فشار یک کیلوپاسکال قرار گرفتند [69]. تصویر این نمونه‌ها در شکل 7 نشان داده شده است.



شکل 7 تصویر نمونه‌های مورد بررسی جهت تعیین خصوصیات مکانیکی کوپن‌های GFRP

پس از اتمام مراحل ساخت و عمل‌آوری، نمونه‌ها تحت آزمایش کشش در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد قرار گرفتند. در این آزمایش‌ها، نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D3039 بارگذاری شدند [68]. در شکل 8 تصویر انجام آزمایش کشش بر نمونه‌های GFRP نشان داده شده است. با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر نمونه‌های GFRP مشاهده می‌شود تنش حداکثر و کرنش گسیختگی کامپوزیت‌های GFRP به طور متوسط و به ترتیب برابر 341/50 مگاپاسکال و 1/65 درصد است.



شکل 8 تصویر انجام آزمایش کشش بر آزمون‌های GFRP (الف) آزمون‌های GFRP (ب) شکست نهایی آزمون‌های GFRP (ج)

3-4) بررسی خصوصیات مکانیکی سیم SMA

در این پژوهش، از سیم‌های NiTi به قطر 2 میلی‌متر که در فاز مارتنزیت و دارای کرنش اولیه 6 درصد هستند، استفاده شده است.

برای تعیین دماهای انتقال فاز سیم‌های SMA از آزمایش DSC استفاده شده است [60]. بر اساس نتایج حاصل از انجام آزمایش DSC، دماهای انتقال فاز سیم‌های SMA استفاده شده مطابق جدول 3 است.

جدول 3 دماهای انتقال فاز سیم‌های SMA مورد استفاده در پژوهش

دمای پایان فاز مارتنزیت (M_f)	دمای آغاز فاز مارتنزیت (M_s)	دمای آغاز فاز آستونیت (A_s)	دمای پایان فاز آستونیت (A_f)
-68	-23	+61	+80

برای تعیین تنش بازیافتی سیم‌های NiTi، دو انتهای سیم در فک‌های جک مهار شده است. سپس با عبور دادن جریان برق از درون سیم، دمای سیم تا 200 درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرده و پس از رسیدن دمای سیم به 200 درجه سانتی‌گراد، جریان برق قطع شده و به سیم اجازه داده می‌شود تا به دمای محیط برسد. همانطور که بیان شد سیم‌ها در فاز مارتنزیت بوده و دارای کرنش اولیه 6 درصد هستند. اعمال حرارت به سیم‌ها باعث می‌شود سیم‌ها تمایل به بازگشت به طول اولیه را داشته باشند، اما از آنجا که درون فک‌های جک مهار شده‌اند، به آن‌ها اجازه بازگشت به طول اولیه داده نمی‌شود. بنابراین درون آن‌ها تنش بازیافتی ایجاد می‌شود [3]. تنش بازیافتی سیم‌های مورد استفاده معادل 407 مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. تصویر آزمایش انجام شده برای تعیین تنش بازیافتی در شکل 9 نشان داده شده است.



شکل 9 آزمایش انجام شده برای تعیین تنش باز یافتی

5- مطالعات آزمایشگاهی

در این پژوهش آزمایشگاهی، تاثیر روش اعمال فشار محصورشدگی بر رفتار بتن محصورشده با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی تاثیر این پارامترها بر رفتار بتن محصورشده، 4 نمونه استوانه‌ای با ابعاد 152×305 میلی‌متر ساخته شده و تحت اثر بار محوری فشاری یک‌طرفه فاقد خروج از مرکزیت قرار می‌گیرد. نمونه‌هایی که در این پژوهش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته‌اند در جدول 1 معرفی شده‌اند.

قبل از شروع آزمایش بر نمونه‌های محصورشده، ابتدا مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتنی محصورنشده در روز آزمایش تعیین می‌شود. همانطور که بیان شد به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای، از جک هیدرولیکی اعمال فشار با ظرفیت 200 کیلو نیوتون در آزمایشگاه سازه‌ی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شده است. بررسی نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری بتن بر روی پنج نمونه‌ی استوانه‌ای در روز آزمایش نشان می‌دهد مقاومت فشاری بتن در روز آزمایش معادل $32/85$ مگاپاسکال است.

جابجایی‌های محوری و جانبی به وسیله دو حسگر DTH در دو راستای طولی و عرضی نمونه‌ها، اندازه‌گیری می‌شود. حسگرهای DTH مورد استفاده باید توسط حلقه‌های آلومینیومی که بر اساس استاندارد ASTM C469 [70] ساخته شده است، به نمونه‌ی استوانه‌ای مورد بررسی متصل گردد. دقت حسگرهای مورد استفاده برابر با $0/001$ میلی‌متر است. در شکل 10 تصویر حسگر DTH و پایه‌های قرارگیری این حسگرها در راستاهای طولی و عرضی نمونه‌های مورد بررسی نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل 10 (الف) تصویر حسگر DTH (ب) پایه‌های قرارگیری حسگرها در راستاهای طولی و عرضی نمونه

برای انجام آزمایش‌ها، پس از انجام بتن‌ریزی و عمل‌آوری نمونه‌ها، عملیات کپ کردن بر روی نمونه‌ها انجام شده و سپس نمونه‌های مورد بررسی با روش‌های مختلف بیان شده در جدول 1 محصور می‌شوند. در مرحله بعد حلقه‌های آلومینیومی بر روی نمونه‌ها قرار گرفته و سپس کلیه حسگرها بر روی نمونه نصب می‌شوند. نمونه‌ها به گونه‌ای در دستگاه پرس قرار می‌گیرند که بار محوری وارد فاقد خروج از مرکزیت باشد. در شکل 11 تصویر نمونه‌های بتنی مورد بررسی قبل و بعد از انجام آزمایش نشان داده شده است.



B1-UN (الف)



B1-GF-NL2 (ب)

شکل 11 تصویر نمونه های بتنی مورد بررسی قبل و بعد از انجام آزمایش



BI-SM (ج)

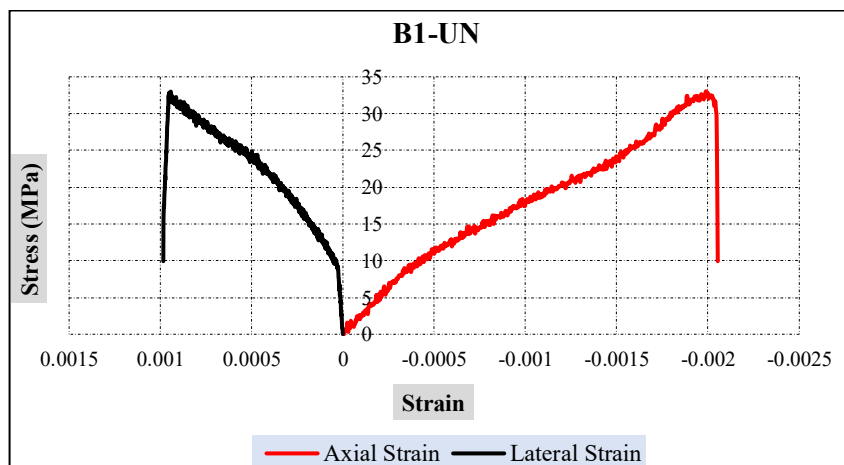


BI-GFSM (د)

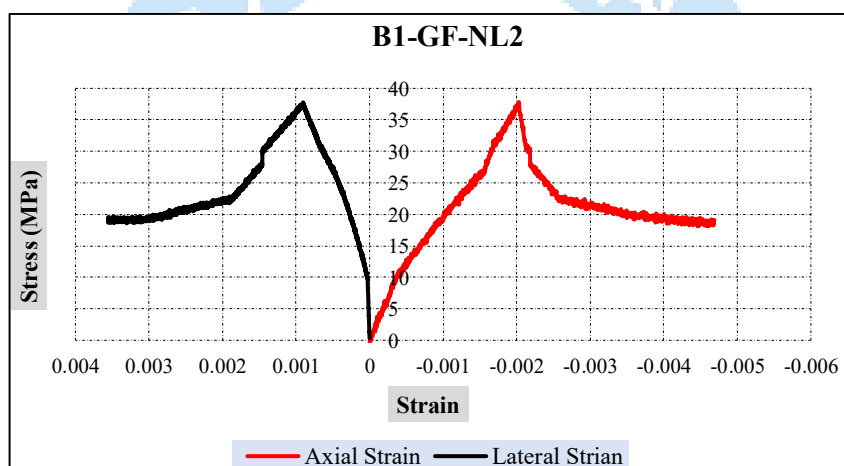
شکل 11، ادامه

1-5) بررسی نتایج مطالعات آزمایشگاهی

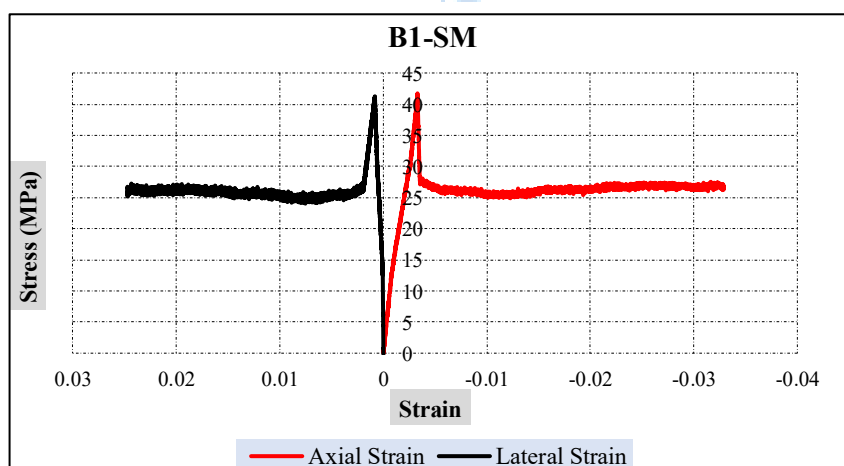
در این بخش، نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌ها، بررسی شده است. در شکل 12 منحنی‌های تنش محوری - کرنش محوری و تنش محوری - کرنش جانبی نمونه‌های مورد بررسی نشان داده شده است. هم چنین در شکل 13 منحنی‌های تنش محوری - کرنش محوری و در شکل 14 منحنی‌های تنش محوری - کرنش جانبی نمونه‌های مورد بررسی مقایسه شده است.



B1-UN (الف)

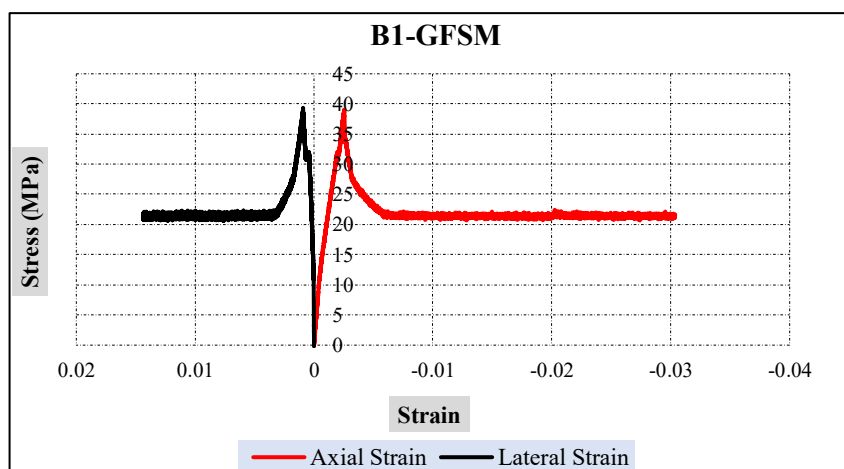


B1-GF-NL2 (ب)



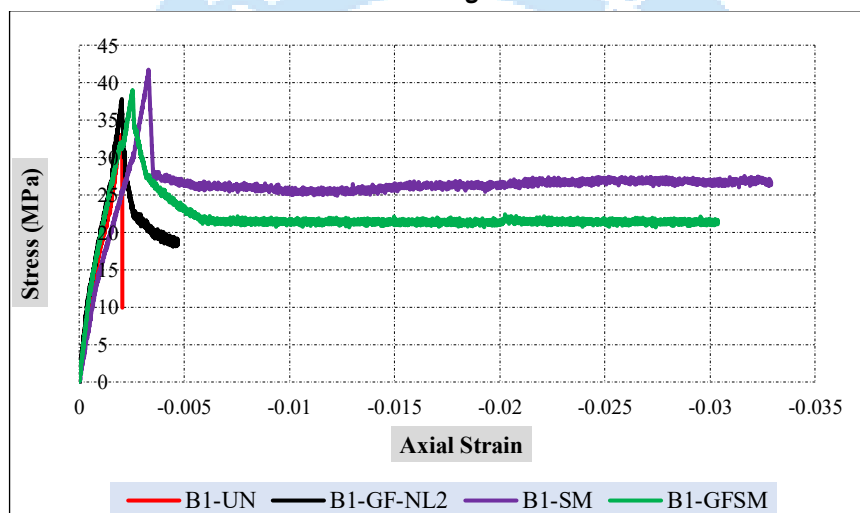
B1-SM (ج)

شکل 12 منحنی تنش محوری - کرنش محوری و تنش محوری - کرنش جانبی نمونه‌های مورد بررسی

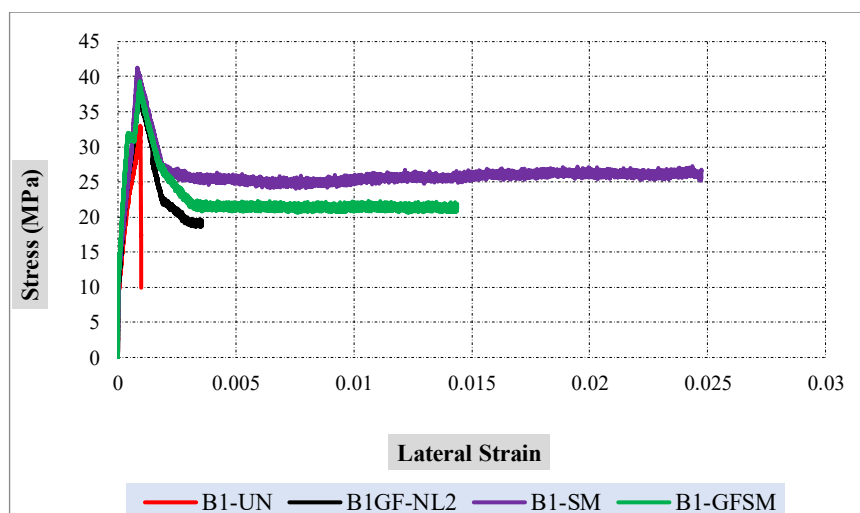


B1-GFSM (د)

شکل 12، ادامه



شکل 13 مقایسه‌ی منحنی‌های تنش محوری - کرنش محوری نمونه‌های مورد بررسی



شکل 14 مقایسه‌ی منحنی‌های تنش محوری - کرنش جانبی نمونه‌های مورد بررسی

به منظور بررسی و مقایسه‌ی رفتار استوانه‌ی بتنی محصورشده با استفاده از GFRP با رفتار استوانه‌ی بتنی فاقد محصورشدگی، یک استوانه‌ی بتنی توسط دو لایه GFRP محصورشده و مورد آزمایش قرار گرفته است. فشار محصورکننده ایجاد شده توسط دورپیچ GFRP با استفاده از خصوصیات مکانیکی GFRP (کرنش گسیختگی و تنش گسیختگی) که با استفاده از آزمایش کشش مستقیم کوپن GFRP بدست آمده است و با اعمال ضریب کارایی 0/5 [71]، محاسبه شده است.

شکل 11-ب نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ GFRP را قبل و بعد از آزمایش نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در نمونه‌ی محصورشده پس از انجام آزمایش، دورپیچ GFRP دچار پارگی شده و همچنین شکست قطری در نمونه ایجاد شده است، اما شدت آسیب دیدگی ایجاد شده در این نمونه در مقایسه با نمونه‌ی فاقد محصورشدگی (شکل 11-الف) به مراتب کمتر است. همچنین بررسی نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌ی فاقد محصورشدگی (شکل 12-الف) و نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ GFRP (شکل 12-ب) نشان می‌دهد، اعمال فشار محصورشدگی غیرفعال با استفاده از دورپیچ GFRP، مقاومت حداکثر نمونه، مقاومت نهایی و همچنین کرنش نهایی نمونه را افزایش می‌دهد. با تحلیل الگوی شکست نمونه‌های مورد بررسی و نمودار تنش-کرنش آن‌ها مشاهده می‌شود هنگامی که یک نمونه‌ی استوانه‌ای بتنی تحت اثر بارگذاری محوری فشاری قرار می‌گیرد، دچار اتساع جانبی می‌شود و این موضوع می‌تواند منجر به شکست زودرس نمونه شود. استفاده از دورپیچ GFRP، عملکرد کلی نمونه‌ی استوانه‌ای را با افزایش مقاومت آن در برابر ترک خوردگی و پوسته شدن بهبود بخشیده و انبساط جانبی بتن را محدود می‌کند. این اثر محصورشدگی، مقاومت فشاری حداکثر، کرنش نهایی و توانایی نمونه را در تحمل سطوح بالاتر تنش محوری قبل از وقوع شکست، افزایش می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد مقاومت بتن محصورشده با استفاده از GFRP نسبت به نمونه‌ی فاقد محصورشدگی، حدود 13 درصد افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود اعمال فشار محصورشدگی غیرفعال با استفاده از دورپیچ GFRP توانایی نمونه در حفظ مقاومت نهایی را در مقایسه با نمونه‌ی فاقد محصورشدگی افزایش می‌دهد، به طوری که نمونه B1-GF-NL2 توانسته است حدود 48/5 درصد از مقاومت حداکثر بتن را تا لحظه‌ی شکست نمونه حفظ کند. کرنش نهایی محصورشده نیز نسبت به نمونه‌ی فاقد محصورشدگی تقریباً 2/2 برابر شده است.

در ادامه، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از آزمایش نمونه‌ی محصورنشده و نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ SMA ارائه می‌شود. شکل‌های 11-الف و 11-ج نمونه‌های محصورنشده و محصورشده با استفاده از دورپیچ SMA را قبل و بعد از آزمایش نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌ی محصورنشده پس از انجام آزمایش دچار شکست قطری شده و کاملاً آسیب دیده است، اما نمونه‌ی محصورشده توسط دورپیچ SMA با وجود اینکه دچار ترک خوردگی قطری شده است، اما به علت اعمال فشار محصورشدگی فعال توسط دورپیچ SMA دچار گسیختگی کامل نشده است. همچنین شکل‌های 12-الف و 12-ج منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش نمونه‌ی محصورنشده و نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ SMA را نشان می‌دهند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در بتن

محصورشده با دورپیچ SMA مقاومت حداکثر، مقاومت نهایی و کرنش نهایی به طور قابل توجهی نسبت به نمونه‌ی محصورنشده بهبود یافته است. مقاومت حداکثر نمونه‌ی محصورشده نسبت به نمونه‌ی محصورنشده افزایشی تقریباً معادل 27 درصد از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، کرنش نهایی بتن محصورشده توسط SMA تقریباً 17 برابر کرنش نهایی بتن محصورنشده می‌باشد. بررسی شکل 11-ج و منحنی تنش-کرنش 12-ج نشان می‌دهد فشار محصورکننده اعمال شده توسط دورپیچ SMA قادر به کنترل موثر انتشار ترک‌های ایجاد شده در استوانه‌ی بتنی تا لحظه‌ی گسیختگی نمونه‌ی مورد بررسی است. این رفتار توسط بخش افقی ایجاد شده در نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی مورد نظر نشان داده شده است. پس از آسیب شدیدی که در نمونه ایجاد شده است، دورپیچ SMA توانسته است حدود 64 درصد از مقاومت حداکثر بتن را تا لحظه‌ی شکست نمونه حفظ کند. بررسی شکل‌های 11-ج و 12-ج نشان می‌دهد فشار محصورکننده‌ی اعمال شده توسط دورپیچ SMA قادر به کنترل موثر انتشار ترک‌های ایجاد شده در استوانه‌ی بتنی تا لحظه‌ی گسیختگی نمونه است. این رفتار توسط بخش افقی ایجاد شده در نمودار تنش-کرنش نمونه‌ی مورد نظر نشان داده شده است. از جمله دلایل آن می‌توان به اعمال فشار اولیه (قبل از اعمال بارگذاری) به نمونه‌ی استوانه‌ای محصورشده توسط سیم SMA دارای کرنش اولیه اشاره کرد. اعمال فشار اولیه، فشار محصورشدگی بیش‌تری را در نمونه ایجاد کرده و به جلوگیری از شکست زودرس نمونه کمک می‌کند.

برای بررسی تأثیر اعمال فشار محصورشدگی هیبریدی که با استفاده از دورپیچ SMA (اعمال فشار محصورشدگی فعال) و لایه‌ی GFRP (اعمال فشار محصورشدگی غیرفعال) انجام شده است، شکل‌های 11-د و 12-د مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 11-د نمونه‌ی محصورشده به صورت هیبریدی را قبل و بعد از انجام آزمایش نشان می‌دهند. هم‌چنین شکل 12-د نمودار تنش-کرنش نمونه را نشان می‌دهد. بررسی نتایج حاصل نشان می‌دهد مقاومت حداکثر نمونه‌ی محصورشده با استفاده از محصورشدگی هیبریدی در مقایسه با نمونه‌ی محصورنشده حدود 19 درصد افزایش یافته است. هم‌چنین اعمال فشار محصورشدگی هیبریدی تأثیر بسیار قابل توجهی در افزایش کرنش نهایی نمونه دارد، به گونه‌ای که کرنش نهایی نمونه‌ی محصورشده در مقایسه با نمونه‌ی محصورنشده افزایش 19/5 برابری نشان می‌دهد. مشاهدی نمونه در طول آزمایش نشان می‌دهد که لایه‌های GFRP خیلی زودتر از دورپیچ‌های SMA پاره می‌شود. پس از پارگی لایه‌های GFRP، به دلیل وجود دورپیچ‌های SMA نمونه مقداری از مقاومت خود را تا لحظه رسیدن به نقطه‌ی شکست حفظ می‌کند. همانطور که در شکل 12-د مشاهده می‌شود، پس از آسیب ایجاد شده در نمونه و پارگی دورپیچ GFRP، دورپیچ SMA توانسته است حدود 61 درصد از مقاومت حداکثر بتن را تا لحظه‌ی شکست نمونه حفظ کند. استفاده از محصورشدگی هیبریدی باعث می‌شود که بتوان از مزایای هر دو روش محصورشدگی بهره‌مند شد.

2-5) مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مختلف محصورشدگی

در این بخش، مقایسه‌ای بین نتایج سه روش محصورشدگی مورد مطالعه انجام شده است. مقدار فشار محصورشدگی در هر سه روش فعال، غیرفعال و هیبریدی معادل 1/46 مگاپاسکال است. منحنی تنش محوری-کرنش محوری نمونه‌های مورد بررسی در شکل 12 و منحنی‌های تنش محوری-کرنش جانبی در شکل 13 مقایسه شده‌اند.

همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود اعمال فشار محصورشدگی فعال با استفاده از دورپیچ SMA در مقایسه با اعمال فشار محصورشدگی غیرفعال با استفاده از دورپیچ GFRP تأثیر بسیار چشم‌گیرتری در بهبود عملکرد نمونه‌ی بتنی دارد، به طوری که مقاومت حداکثر نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ SMA نسبت به نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ GFRP افزایشی حدود 12 درصد نشان می‌دهد. کرنش نهایی نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ SMA در مقایسه با نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ GFRP افزایش 7/5 برابری نشان می‌دهد. هم‌چنین نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ GFRP تنها 48 درصد از مقاومت حداکثر خود را تا لحظه‌ی شکست حفظ کرده است، در حالی که نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ SMA حدود 64 درصد از مقاومت حداکثر خود را تا لحظه‌ی شکست حفظ کرده است. علت رفتار بهتر نمونه‌ی محصورشده به صورت فعال نسبت به نمونه‌ی محصورشده به صورت غیرفعال، اعمال فشار اولیه توسط دورپیچ SMA است (قبل اعمال بارگذاری) که موجب اعمال فشار محصورشدگی بیش‌تری در نمونه شده و به جلوگیری از شکست زودرس نمونه کمک می‌کند.

در نمونه‌ی محصورشده به صورت هیبریدی، فشار محصورشدگی وارد بر نمونه معادل $1/46$ مگاپاسکال است که شامل $0/73$ مگاپاسکال فشار محصورشدگی فعال اعمال شده توسط دورپیچ SMA و $0/73$ مگاپاسکال فشار محصورشدگی غیرفعال اعمال شده توسط دورپیچ GFRP است. مقایسه نمونه‌ی محصورشده به صورت هیبریدی و نمونه‌ی محصورشده به صورت غیرفعال نشان می‌دهد حداکثر مقاومت ایجاد شده در دو نمونه تقریباً با یکدیگر برابر بوده و در نمونه‌ی محصورشده به صورت هیبریدی تنها 5 درصد از نمونه‌ی محصورشده به صورت غیرفعال بیشتر است. مزیت بسیار مهم و چشم‌گیر نمونه‌ی محصورشده به صورت هیبریدی در مقایسه با نمونه‌ی محصورشده به صورت غیرفعال افزایش قابل توجه کرنش نهایی نمونه است، به طوری که کرنش نهایی نمونه‌ی محصورشده به صورت هیبریدی حدود $8/5$ برابر کرنش نهایی نمونه‌ی محصورشده به صورت غیرفعال است. همچنین رفتار ترد دورپیچ‌های GFRP باعث می‌شود نمونه‌ی محصورشده به صورت غیرفعال توانایی کافی برای حفظ مقاومت نمونه‌ی مورد نظر را نداشته باشد، در حالی که در نمونه‌ی محصورشده به صورت هیبریدی، فشار محصورشدگی فعال اعمال شده توسط دورپیچ SMA نقش موثری در حفظ مقاومت نمونه‌ی مورد بررسی تا لحظه شکست نهایی دارد، به طوری که نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ GFRP تنها $48/5$ درصد از مقاومت حداکثر خود را تا لحظه‌ی شکست حفظ کرده است، در حالی که نمونه‌ی محصورشده به صورت هیبریدی حدود 61 درصد از مقاومت حداکثر خود را تا لحظه‌ی شکست نمونه حفظ کرده است.

هر دو نمونه‌ی B1-SM (محصورشده‌گی فعال) و B1-GFSM (محصورشده‌گی هیبریدی) دارای فشار محصورشدگی $1/46$ مگاپاسکال هستند. بررسی و مقایسه‌ی نتایج حاصل از بررسی این دو نمونه نشان می‌دهد حداکثر مقاومت ایجاد شده در نمونه‌ای که به صورت فعال محصور شده است در مقایسه با نمونه‌ی محصورشده به صورت هیبریدی حدود 7 درصد بیشتر است، اما کرنش نهایی ایجاد شده در نمونه‌ی محصورشده هیبریدی در مقایسه با نمونه‌ی محصورشده به صورت فعال 15 درصد افزایش نشان می‌دهد. هم‌چنین بررسی‌ها نشان می‌دهد نمونه‌ی محصورشده به صورت فعال در حفظ مقاومت نمونه تا لحظه‌ی شکست نمونه، توانایی بیشتری در مقایسه با نمونه‌ی هیبریدی دارد، به طوری که نمونه محصورشده با استفاده از دورپیچ SMA توانسته است 64 درصد از مقاومت حداکثر خود را تا لحظه‌ی شکست حفظ کرده است، در حالی که نمونه محصورشده به صورت هیبریدی حدود 61 درصد از مقاومت حداکثر خود را تا لحظه‌ی شکست حفظ کرده است. با توجه به توضیحات بیان شده در بخش‌های پیشین، علت نتایج حاصل، اعمال فشار محصورشدگی بیشتر توسط SMA در نمونه‌ی محصورشده به صورت فعال ($1/46$ مگاپاسکال) در مقایسه با نمونه‌ی محصورشده به صورت هیبریدی ($0/73$ مگاپاسکال) است.

6- نتیجه گیری

در این پژوهش امکان اعمال سه نوع فشار محصورشدگی به نمونه‌های استوانه‌ای بتنی مورد بررسی قرار گرفت: فشار محصورشدگی غیرفعال با استفاده از دورپیچ GFRP، فشار محصورشدگی فعال با استفاده از دورپیچ SMA و فشار محصورشدگی هیبریدی با استفاده از ترکیب دورپیچ GFRP و دورپیچ SMA. برای انجام پژوهش، ابتدا خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده در پژوهش (بتن، GFRP و SMA) بررسی شد. سپس نمونه‌های مورد مطالعه با فشار $1/46$ مگاپاسکال و با روش‌های مختلف، محصور شده و بار محوری فشاری فاقد خروج از مرکزیت به آن‌ها اعمال شد. با ترسیم نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌ها، رفتار آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج زیر به دست آمده است:

- 1) استفاده از هر سه روش محصورشدگی، مقاومت حداکثر، مقاومت نهایی و کرنش نهایی نمونه‌های مورد بررسی را در مقایسه با نمونه‌ی محصورنشده افزایش می‌دهد، اما تاثیر هر یک از روش‌ها بر میزان مقاومت حداکثر، مقاومت نهایی و کرنش نهایی با یکدیگر متفاوت است.
- 2) اعمال فشار محصورشدگی فعال با استفاده از دورپیچ SMA در مقایسه با فشار محصورشدگی غیرفعال با استفاده از دورپیچ GFRP تاثیر چشم‌گیرتری در بهبود عملکرد نمونه بتنی دارد، به طوری که مقاومت حداکثر نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ SMA نسبت به نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ GFRP افزایشی حدود 12 درصد نشان می‌دهد. هم‌چنین کرنش نهایی نمونه‌ی

محصور شده با استفاده از دورپیچ SMA در مقایسه با نمونه‌ی محصور شده با دورپیچ GFRP افزایش 7/5 برابری نشان می‌دهد. به علاوه نمونه‌ی محصور شده با استفاده از SMA در مقایسه با نمونه‌ی محصور شده با دورپیچ GFRP توانایی بیشتری در حفظ مقاومت نهایی نمونه تا لحظه‌ی شکست دارد.

(3) مقایسه نمونه‌های محصور شده به صورت هیبریدی و غیرفعال نشان می‌دهد در نمونه‌ی محصور شده به صورت هیبریدی، مقاومت حداکثر تنها 5 درصد از نمونه‌ی محصور شده به صورت غیرفعال بیشتر است. مزیت چشم‌گیر نمونه‌ی محصور شده به صورت هیبریدی در مقایسه با نمونه‌ی محصور شده به صورت غیرفعال، افزایش کرنش نهایی نمونه است، به طوری که کرنش نهایی نمونه‌ی محصور شده به صورت هیبریدی حدود 8/5 برابر کرنش نهایی نمونه‌ی محصور شده به صورت غیرفعال است. همچنین نمونه‌ی محصور شده به صورت غیرفعال توانایی کافی برای حفظ مقاومت نمونه‌ی مورد نظر را ندارد، در حالی که در نمونه‌ی محصور شده به صورت هیبریدی، فشار محصورشدگی فعال اعمال شده توسط دورپیچ SMA نقش موثری در حفظ مقاومت نمونه تا لحظه‌ی شکست نهایی دارد.

(4) مقایسه‌ی نتایج حاصل از بررسی نمونه‌های محصور شده به صورت فعال و هیبریدی نشان می‌دهد حداکثر مقاومت ایجاد شده در نمونه‌ی محصور شده به صورت فعال در مقایسه با نمونه‌ی محصور شده به صورت هیبریدی حدود 7 درصد بیشتر است، اما کرنش نهایی ایجاد شده در نمونه‌ی محصور شده به صورت هیبریدی در مقایسه با نمونه‌ی محصور شده به صورت فعال 15 درصد افزایش نشان می‌دهد. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد نمونه‌ی محصور شده به صورت فعال در حفظ مقاومت نمونه تا لحظه‌ی شکست نمونه، توانایی بیشتری در مقایسه با نمونه‌ی هیبریدی دارد.

(5) نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که دورپیچ‌های SMA می‌توانند به تنهایی یا به همراه کامپوزیت‌های FRP برای محصور کردن بتن استفاده شوند. استفاده از دورپیچ SMA می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در مقدار کامپوزیت FRP مورد نیاز برای دستیابی به سطح خاصی از مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌های مورد بررسی شود.

7- منابع

1. Chen, Q., *Experimental testing and constitutive modeling of concrete confined with shape memory alloys*. 2015: University of Illinois at Urbana-Champaign.
2. Richart, F.E. (1928.) Study of the failure of concrete under combined compressive stresses. University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin, **185**: 104.
3. Shin, M. and Andrawes, B. (2010.) Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys. *Engineering Structures*, **32**(3): 656-664.
4. Zafar, A., *Application of SMA fiber composite as seismic reinforcement for concrete moment resisting frames*. 2013: University of Illinois at Urbana-Champaign.
5. Jang, B.-K., Koo, J.-H., Toyama, N., Akimune, Y., and Kishi, T. *Influence of lamination direction on fracture behavior and mechanical properties of TiNi SMA wire-embedded CFRP smart composites*. in *Smart Structures and Materials 2001: Modeling, Signal Processing, and Control in Smart Structures*. 2001. SPIE.
6. *ACI COMMITTEE 440.2R-08, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded*
7. Daghsh, S.M. and Ozbulut, O.E. (2016.) Characterization of superelastic shape memory alloy fiber-reinforced polymer composites under tensile cyclic loading. *Materials & Design*, **111**: 504-512.
8. Hassan, A., Khairallah, F., Mamdouh, H., and Kamal, M. *Evaluation of self-compacting concrete columns reinforced with steel and FRP bars with different strengthening techniques*. in *Structures*. 201. Elsevier.
9. Hassan, A., Khairallah, F., Mamdouh, H., and Kamal, M. (2019.) Structural behaviour of self-compacting concrete columns reinforced by steel and glass fibre-reinforced polymer rebars under eccentric loads. *Engineering Structures*, **188**: 717-728
10. Chin, C.-L., Ma, C.-K., Tan, J.-Y., Ong, C.-B., Awang, A.Z., and Omar, W. (2019.) Review on development of external steel-confined concrete. *Construction and Building Materials*, **211**: 919-931.

- .11 Hou, C., Zheng, W., and Chang, W. (2020.) Behaviour of high-strength concrete circular columns confined by high-strength spirals under concentric compression. *Journal of Civil Engineering and Management*, **26**(6): 564-578.
- .12 Pachideh, G., Gholhaki, M., and Moshtagh, A. (2021.) An experimental study on cyclic performance of the geometrically prismatic concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **45**: 629-638.
- .13 Pachideh, G., Gholhaki, M., and Moshtagh, A. (2021.) Impact of temperature rise on the seismic performance of concrete-filled double skin steel columns with prismatic geometry. *Journal of Testing and Evaluation*, **49**(4): 2800-2815.
- .14 Khaloo, A., Tabatabaiean, M., and Khaloo, H. *The axial and lateral behavior of low strength concrete confined by GFRP wraps: an experimental investigation*. in *Structures*. 2020. Elsevier.
- .15 Suon, S., Saleem, S., and Pimanmas, A. (2019.) Compressive behavior of basalt FRP-confined circular and non-circular concrete specimens. *Construction and Building Materials*, **195**: 85-103.
- .16 Nematzadeh, M., Mousavimehr, M., Shayanfar, J., and Omidalizadeh, M. (2021.) Eccentric compressive behavior of steel fiber-reinforced RC columns strengthened with CFRP wraps: Experimental investigation and analytical modeling. *Engineering Structures*, **226**: 111389.
- .17 Pachideh, G. and Gholhaki, M. (2020.) Evaluation of concrete filled steel tube column confined with FRP. *Journal of Testing and Evaluation*, **48**(6): 4343-4354.
- .18 ElMessalami, N., Abed, F., and El Refai, A. (2021.) Response of concrete columns reinforced with longitudinal and transverse BFRP bars under concentric and eccentric loading. *Composite Structures*, **255**: 113057.
- .19 Zhang, P., Chen, B., Liu, Y., Tu, Y., Gao, D., Zhao, J., and Sheikh, S.A. (2021.) Experimental study on the axial compression behavior of columns confined by BFRP ties. *Composite Structures*, **258**: 113302.
- .20 Nguyen, H.D., Choi, E., and Park, K. (2018.) Dilation behavior of normal strength concrete confined by FRP wire jackets. *Construction and Building Materials*, **190**: 728-739.
- .21 Nguyen, H.D. and Choi, E. (2019.) Evaluation of ultimate conditions of concrete confined by GFRP wire jackets. *Composites Part B: Engineering*, **161**: 314-319.
- .22 Choi, E., Jeon, J.-S., Lee, J.-H., Park, S.H., and Ha, S. (2018.) Assessment of probabilistic seismic performance of RC columns jacketed by FRP winding wires using analytical models. *Engineering Structures*, **171**: 629-646.
- .23 Candappa, D., Sanjayan, J., and Setunge, S. (2001.) Complete triaxial stress-strain curves of high-strength concrete. *Journal of materials in civil engineering*, **13**(3): 209-215.
- .24 Miyagi, T., Yamakawa, T., Li, W., and Rahman, M. *A study of emergency retrofit using prestressing bars and steel plates for damaged columns*. in *Proceedings of Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering*. 2004.
- .25 Janke, L., Czaderski, C., Ruth, J., and Motavalli, M. (2009.) Experiments on the residual load-bearing capacity of prestressed confined concrete columns. *Engineering Structures*, **31**(10): 2247-2256.
- .26 Moghaddam, H., Samadi, M., Pilakoutas, K., and Mohebbi, S. (2010.) Axial compressive behavior of concrete actively confined by metal strips; part A: experimental study. *Materials and Structures*, **43**: 1369-1381.
- .27 Saatcioglu, M. and Yalcin, C. (2003.) External prestressing concrete columns for improved seismic shear resistance. *Journal of Structural Engineering*, **129**(8): 1057-1070.
- .28 Yamakawa, T., Banazadeh, M., and Fujikawa, S. *Emergency retrofit of damaged RC columns right after seismic attack using pre-tensioned aramid fiber belts*. in *Proc., 1st Conf. on Applications of FRP Composites in Construction and Rehabilitation of Structures*. 2004.
- .29 Nakada, K. and Yamakawa, T. *Axial compression tests of RC columns confined by aramid fiber belt prestressing*. in *Proc. Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. 2008.
- .30 Andrawes, B. and Shin, M. *Seismic retrofitting of bridge columns using shape memory alloys*. in *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2008*. 2008. SPIE.
- .31 Andrawes, B. and Shin, M. *Seismic retrofit of bridge columns using innovative wrapping technique*. in *Structures Congress 2008: Crossing Borders*. 2008.

- .32 Shin, M. and Andrawes, B. *Application of shape memory alloys in the seismic retrofitting of bridge columns*. in *Proceedings of the the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*. 2008.
- .33 Shin, M. and Andrawes, B. *Uniaxial compression behavior of actively confined concrete using shape memory alloys*. in *Structures Congress 2009: Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role*. 2009.
- .34 Andrawes, B. and Shin, M., *Experimental investigation of concrete columns wrapped with shape memory alloy spirals*, in *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*. 2010. 835-840.
- .35 El-Hacha, R. and Abdelrahman, K. (2015.) Confining RC columns subjected to concentric axial loading using Shape Memory Alloy wires. *SMAR15*, **8**.
- .36 El-Hacha, R. and Abdelrahman, K. (2020) .Behaviour of circular SMA-confined reinforced concrete columns subjected to eccentric loading. *Engineering Structures*, **215**: 110443.
- .37 Choi, E., Chung, Y.-S., Cho, B.-S., and Nam, T.-H. (2008.) Confining concrete cylinders using shape memory alloy wires .*The European Physical Journal Special Topics*, **158**: 255-259.
- .38 Choi, E., Nam, T.-h., Cho, S.-C., Chung, Y.-S., and Park, T. (2008.) The behavior of concrete cylinders confined by shape memory alloy wires. *Smart Materials and Structures*, **17**(6): 065032.
- .39 Choi, E., Kim, Y.-W., Chung, Y.-S., Kim, H.-T., and Cho, B.-S. *Cyclic behavior of concrete confined by active and passive jackets*. in *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. 2010.
- .40 Chen, Q. and Andrawes, B. (2017.) Cyclic stress-strain behavior of concrete confined with NiTiNb-shape memory alloy spirals. *Journal of Structural Engineering*, **143**(5): 04017008.
- .41 Chen, Q. and Andrawes, B. (2014.) Finite element analysis of actively confined concrete using shape memory alloys. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **12**(12): 520-534.
- .42 Chen, Q. and Andrawes, B. (2014.) Experimentally validated modeling of concrete actively confined using SMA reinforcement. *Proceedings of the NCEE*.
- .43 Chen, Q. and Andrawes, B. *Plasticity modeling of concrete confined with NiTiNb shape memory alloy spirals*. in *Structures*. 2017. Elsevier.
- .44 Tran, H., Balandraud, X., and Destrebecq, J. (2015.) Improvement of the mechanical performances of concrete cylinders confined actively or passively by means of SMA wires. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **15**(1): 292-299.
- .45 Chen, Q. and Andrawes, B. *Monotonic and cyclic experimental testing of concrete confined with shape memory alloy spirals*. in *Proceedings of 10th US National Conference on Earthquake Engineering*. 2014.
- .46 Shin, M. and Andrawes, B. (2014.) Parametric study of RC bridge columns actively confined with shape memory alloy spirals under lateral cyclic loading. *Journal of Bridge Engineering*, **19**(10): 04014040.
- .47 Jung, D., Wilcoski ,J., and Andrawes, B. (2018.) Bidirectional shake table testing of RC columns retrofitted and repaired with shape memory alloy spirals. *Engineering structures*, **160**: 171-185.
- .48 Gholampour, A. and Ozbakkaloglu, T. *Confinement of normal-and high-strength concrete by Shape Memory Alloy (SMA) Spirals*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.
- .49 Gholampour, A. and Ozbakkaloglu, T. (2018.) Understanding the compressive behavior of shape memory alloy (SMA)-confined normal-and high-strength concrete. *Composite Structures*, **202**: 943-953.
- .50 Pan, S., Yue, R., Hui, H., and Fan, S. (2022.) Lateral cyclic behavior of bridge columns confined with pre-stressed shape memory alloy wires. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, **21**(1): 66-79.
- .51 Andrawes, B., Shin, M., and Wierschem, N. (2010.) Active confinement of reinforced concrete bridge columns using shape memory alloys. *Journal of Bridge Engineering*, **15**(1): 81-89.
- .52 Shin, M. and Andrawes, B. *Cyclic behavior of concrete bridge columns retrofitted with innovative spirals*. in *Structures Congress 2010*. 2010.
- .53 Shin, M. and Andrawes, B. (2011.) Lateral cyclic behavior of reinforced concrete columns retrofitted with shape memory spirals and FRP wraps. *Journal of Structural Engineering*, **137**(11): 1282-1290.

- .54 Deogekar, P.S. and Andrawes, B. (2018.) Hybrid confinement of high strength concrete using shape memory alloys and fiber-reinforced polymers. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, **3**(1): 22-32.
- .55 Jung, D., Deogekar, P., and Andrawes, B. (2019.) Seismic performance of bridges with high strength concrete columns reinforced with SMA-FRP jackets. *Smart Materials and Structures*, **28**(3): 035008.
- .56 Tahmasebi, M., *Evaluating different methods in order to retrofit concrete bridge piers under earthquake force by using Shape Memory Alloy*. 2021, Ferdowsi Univesity, Mashhd, Iran.
- .57 Fanaradelli, T., Rousakis, T., and Karabinis, A. (2019.) Reinforced concrete columns of square and rectangular section, confined with FRP–Prediction of stress and strain at failure. *Composites Part B: Engineering*, **174**: 107046.
- .58 Ozbulut, O.E., Hurlebaus, S., and DesRoches, R. (2011.) Seismic response control using shape memory alloys: a review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **22**(14): 1531-1549.
- .59 Zafar, A. and Andrawes, B. (2014.) Fabrication and cyclic behavior of highly ductile superelastic shape memory composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**(4): 622-632.
- .60 Lecce, L., *Shape memory alloy engineering: for aerospace, structural and biomedical applications*. 2014: Elsevier.
- .61 Khosravikhor, A., Gholhaki, M., Rezaifar, O., and Pachideh, G. (2023.) Effect of Ni-Ti shape memory alloy on ductility and response modification factor of SPSW systems. *Steel and Composite Structures*, **48**(3): 353.
- .62 Hong, C., Qian, H., and Song, G. (2020.) Uniaxial compressive behavior of concrete columns confined with superelastic shape memory alloy wires. *Materials*, **13**(5): 1227.
- .63 Mander, J.B., Priestley, M.J., and Park, R. (1988.) Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, **114**(8): 1804-1826.
- .64 Abdelrahman, K. and El-Hacha, R. (2020.) Analytical prediction model for circular SMA-confined reinforced concrete columns. *Engineering Structures*, **213**: 110547.
- .65 ASTM, C. (2003.) Standard specification for concrete aggregates. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- .66 ASTM, A. (2016.) C109/C109M: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
- .67 *ACI 211.1-91; Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009)*.
- .68 ASTM, A., *ASTM D3039/D3039M, "Tensile properties of polymer matrix composite materials"*, . 2000.
- .69 Saadatmanesh, H., Tavakkolizadeh, M., and Mostofinejad, D. (2010.) Environmental effects on mechanical properties of wet lay-up fiber-reinforced polymer. *ACI materials journal*, **107**(3): 267.
- .70 Standard, A. (2010.) Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. *ASTM Stand. C*, **469**.
- .71 De Lorenzis, L. and Tepfers, R. (2003) .Comparative study of models on confinement of concrete cylinders with fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Composites for Construction*, **7**(3): 219-237.