



## ارزیابی و مقایسه ظرفیت و گسیختگی ستون های بیضی شکل با و بدون غلاف و کاربرد یک لایه و دو لایه دورپیچ تحت فشار محوری خالص

محمد مراد راغ پور<sup>۱</sup>، سیدفتح اله ساجدی<sup>۱\*</sup>، احمد دالوند<sup>۲</sup>

۱-دانشکده عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲-دانشکده عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۹  
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۰۸  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۰۱

### کلمات کلیدی:

ستون بتن مسلح بیضی  
ظرفیت  
بتن پرمقاومت  
غلاف GRP  
دورپیچ CFRP

**خلاصه:** در این تحقیق تاثیر فشار محوری خالص بر ستون های بتن آرمه با مقطع بیضی ساخته شده از بتن های معمولی و پرمقاومت که توسط غلاف پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه و هم چنین دورپیچ الیاف پلیمری تقویتی، محصور شدند، بررسی گردید. منظور از ظرفیت، ظرفیت فشاری ستون ها است. تاثیر نوع بتن، غلاف، دورپیچ و تعداد لایه های آن بررسی شدند. جمعا ۱۲ ستون به قطرهای ۲۰۰ در ۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی متر ساخته شدند. ستون ها به دو گروه شش-تایی به ترتیب ساخته شده از بتن های معمولی و پرمقاومت، و هر گروه نیز به دو بخش سه تایی تقسیم شدند. بخش اول دارای غلاف و بخش دوم فاقد آن بودند. از هر بخش یک ستون فاقد لایه تقویتی بود، یک ستون با یک لایه و ستون دیگر با دو لایه دورپیچ شدند. دورپیچ و غلاف هر دو باعث بهبود رفتار ستون ها گردیدند. افزودن یک لایه و دو لایه دورپیچ به طور میانگین سبب افزایش ۱۹/۷٪ و ۲۸/۷٪ در ظرفیت فشاری در گروه اول و ۱۱٪ و ۲۸/۷٪ در گروه دوم شدند؛ کاربرد غلاف میانگین افزایش ظرفیت ستون ها در گروه اول به میزان ۳۱۵٪ و در گروه دوم ۲۵۱٪ را نتیجه داد. هر چند که دورپیچ و غلاف هر دو محصوریت ایجاد می کنند، اما غلاف به خاطر محصوریت بیش تر، تاثیر بسیار زیادتری بر بهبود رفتار ستون ها دارد، هم چنین تاثیر محصوریت بر رفتار ستون-های گروه اول بیش تر است.

### ۱- مقدمه

طبق بررسی ها در حالی که به طور میانگین، سازه ها و محصولات بتنی باید حداقل ۱۰۰ سال عمر مفید داشته باشند، اما به رغم حجم بالای سرمایه گذاری در این صنعت، به دلیل زیر پا گذاشته شدن قوانین و مقررات در تولید و اجراء، سازه ها و محصولات بتنی در ایران به طور متوسط ۳۰ سال پایایی دارند. هم چنین مقاومت بتن های مصرفی در احداث ساختمان ها در کشور، حداکثر ۲۵ مگاپاسکال است و در بیش از ۷۰٪ ساختمان ها به حداکثر ۲۰ مگاپاسکال محدود می شود. در کشورهای پیشرفته، به طور فزاینده ای، تولید و مصرف بتن های با مقاومت ۵۰ الی ۷۰ مگاپاسکال متداول شده است. بنابراین مشخص است که جهت رشد ارتقای کیفی بتن مصرفی در کشور نیاز به یک عزم جدی در سطوح خرد و کلان وجود دارد. لذا مطابق با سند جامع چشم انداز بتن ۱۴۰۴ کشور، رعایت حداقل مقاومت ۵۰ مگاپاسکال در طراحی سازه های بتنی و استفاده از بتن های پرمقاومت در اجراء اعضا و انواع سازه های بتنی که در این سند مشخص خواهند

شد، تحقق می یابد [۱]. امروزه استفاده از بتن پرمقاومت<sup>۱</sup> در ساخت سازه های مختلف به ویژه ساختمان های بلند، در کشورهای پیشرفته دنیا رواج یافته است. از جمله مزایای این بتن ها می توان به مقاومت های فشاری و کششی بالا، ضریب ارتجاعی بیش تر و نفوذپذیری کم تر آن ها اشاره کرد. از عوامل موثر در رسیدن به مقاومت های بالا در بتن، استفاده از شن و ماسه مقاوم و با شکل مناسب، افزایش عیار سیمان مصرفی، محدودیت در اندازه بزرگ ترین سنگدانه، استفاده از ماسه با مدول نرمی مناسب و نسبت آب به سیمان مناسب برای همگنی بیش تر آن می باشد. هم چنین با استفاده از مواد بسیار ریزدانه و با اندازه هایی کم تر از دهم میکرون مانند میکروسیلیس می توان بتن متراکم تر و با تخلخل بسیار کم را تهیه نمود. در بتن های پرمقاومت بایستی تا حد امکان نسبت آب به سیمان را کاهش و چگالی را افزایش داده تا مقاومت بیش تری به دست آید. برای تامین روانی و کارایی کافی در چنین مخلوط هایی که با آب بسیار کم تهیه می شوند، لازم است از فوق روان کننده ها استفاده شود [۲].

1 High Strength Concrete (HSC)

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: sajedi@iauhvaz.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



لایه‌ها زیاد می‌شوند، اما این افزایش متناسب با افزایش تعداد لایه‌ها نیست؛ لایه اول دورپیچ تاثیر فراوانی بر ظرفیت نهایی خواهد داشت، اما افزودن لایه‌های بعدی تاثیر کم‌تری دارند و امتداد قرارگیری الیاف یکی از پارامترهای مؤثر بر مقاومت و شکل‌پذیری استوانه‌های بتنی محصور شده با CFRP می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. همچنین تحقیقات انجام شده در مورد شکل مقطع ستون‌های مقاوم‌سازی شده نشان داده است که مقاطع مربعی و مستطیلی به اندازه مقاطع دایره‌ای تحت تاثیر محصور شدگی قرار نمی‌گیرند، زیرا در این مقاطع برخلاف مقاطع دایره‌ای فشار محصور کننده یکنواخت نیست و ستون‌های مربعی نسبت به ستون‌های دایره‌ای در نقطه کرنش حداکثر، تنش نهایی کم‌تری را تحمل می‌نمایند به طوری که تاثیر الیاف GFRP بر ظرفیت فشاری مقاطع دایره‌ای حدود ۴/۵ برابر مقاطع مربعی بود، زیرا که در مقاطع دایره‌ای فشار محصور کننده یکنواخت است، ولی در مقاطع مربعی این فشار از بیش‌ترین مقدار در گوشه به کم‌ترین مقدار در میانه اضلاع تغییر می‌کند. همچنین آن‌ها به بررسی شکل‌پذیری ستون‌های تحت مطالعه پرداختند و نتیجه گرفتند که ستون‌های با مقطع دایره‌ای افزایش شکل‌پذیری بیش‌تری نسبت به ستون‌های مربعی دارند؛ به طوری که تاثیر الیاف GFRP بر شکل‌پذیری مقاطع دایره‌ای حدود ۳ برابر مقاطع مربعی بود. علت این امر را می‌توان در توزیع یکنواخت فشار محصور کننده مقاطع دایره‌ای دانست [۱۵-۱۲]. به علاوه بررسی ستون‌های بتن مسلح توخالی محصور شده با دورپیچ CFRP نشان می‌دهد که این ستون‌ها عملکرد بهتری در تحمل بارهای محوری دارند، و ستون‌های توخالی بتن مسلح که دارای حفره‌های دایره‌ای بودند، بار نهایی بیش‌تری در مقایسه با ستون‌هایی که حفره‌های مربعی داشتند، تحمل می‌کنند همچنین نتایج نشان داد که ستون‌ها علاوه بر دوام بسیار عالی، مقاومت و شکل‌پذیری بالایی نیز داشتند [۱۶ و ۱۷]. از سوی دیگر تحقیقات نشان داده که درصد مقاوم‌سازی ایجاد شده با ورق‌های CFRP برای ستون‌های ساخته شده از بتن‌های کم‌مقاومت و متوسط در مقایسه با بتن‌های پر‌مقاومت، بیش‌تر است، دلیل احتمالی این امر را می‌توان کم‌تر بودن مقاومت ایجاد شده از سوی لایه محصور کننده نسبت به مقاومت فشاری بتن دانست [۱۹ و ۱۸]. روش محصور‌سازی ستون‌های بتن مسلح با CFRP برای ستون‌های با مقطع دایره‌ای بسیار مؤثر می‌باشد، اما اثربخشی آن برای ستون‌های مستطیلی بسیار کاهش می‌یابد؛ یک امکان برای افزایش این اثربخشی تبدیل مقطع مستطیل به بیضی می‌باشد. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که ظرفیت فشاری قابل‌توجهی برای مقاطع کاملاً بیضی به دست می‌آید. ظرفیت فشاری محوری بتن محصور شده با CFRP در

تاکنون تحقیقات زیادی بر عملکرد پایداری ستون‌های بتنی ساخته شده از بتن پر‌مقاومت با دورپیچی ورق‌های کربنی پلیمری تقویتی<sup>۱</sup> انجام شده است. قریب به اتفاق مطالعات انجام شده بر این امر اجماع نظر دارند که ظرفیت فشاری و شکل‌پذیری ستون‌های بتنی ساخته شده از بتن پر‌مقاومت با دورپیچ ورق‌های مذکور به طور قابل‌توجهی بهبود داشته است علاوه بر این هنگام آسیب‌دیدگی جزئی در ستون‌های بتنی تقویت شده با الیاف و ساخته شده از بتن پر‌مقاومت، پیوستگی زیادی در هسته آن‌ها مشاهده گردید و همچنین استفاده از ورقه‌های CFRP باعث بهبود شکل‌پذیری جانبی ستون‌ها گردید [۵-۳]. چندین سال است از CFRP به منظور تقویت و بهسازی سازه‌های موجود و همچنین ساخت سازه‌های جدید در مهندسی عمران استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای تقویت ستون‌های بتنی با استفاده از نوارهای CFRP ابداع شده است که از این میان، دورپیچ ستون‌ها با این نوارها به عنوان متداول‌ترین روش تقویت ستون‌های بتنی شناخته می‌شود. محصور‌سازی اجزاء سازه با CFRP باعث افزایش ظرفیت باربری و همچنین فزونی شکل‌پذیری سازه می‌گردد. وقتی بتن با استفاده از این نوع پوشش محصور می‌شود، رفتار آن تغییر کرده و منحنی تنش-کرنش آن متفاوت خواهد بود، که تا به حال مودهای مختلفی در این زمینه ارائه شده است. تاکنون تحقیقات زیادی بر رفتار فشاری محوری بتن محصور شده با CFRP انجام شده است. قریب به اتفاق مطالعات انجام شده بر این امر اجماع نظر دارند که استفاده از دورپیچ CFRP باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری محوری ستون‌ها می‌شود پلیمرهای تقویت شده با الیاف CFRP به علت دارا بودن ویژگی‌های مکانیکی مناسب، نصبی آسان و نسبت مقاومت به وزن بالا، معمول‌ترین گونه از کامپوزیت‌ها هستند که برای تقویت و بهسازی سازه‌ای استفاده می‌شوند. در کنار این برتری‌ها، مقاومت کم در برابر آتش، ناتوانی در اعمال بر روی سطوح مرطوب و در دماهای پایین را می‌توان از کاستی‌های کامپوزیت‌های CFRP دانست. از این رو کامپوزیت‌های نوین پایه سیمانی تقویت شده با الیاف<sup>۲</sup> با ویژگی‌ها و برتری‌های خود نسبت به کامپوزیت‌های CFRP، در سال‌های اخیر جایگزینی مناسب برای آن‌ها به حساب می‌آیند و تحقیقاتی در راستای شناخت بیش‌تر رفتار این کامپوزیت‌ها، انجام گرفت و روابطی برای محاسبه کرنش الیاف پیشنهاد گردید [۶-۹]. همچنین تحقیقات انجام شده در مورد افزایش تعداد لایه‌های دورپیچ نشان داده است که ظرفیت فشاری محوری و شکل‌پذیری ستون‌های محصور شده با دورپیچ CFRP با افزایش تعداد

1 Carbon-fibers reinforced polymers (CFRP)

2 Fiber reinforced cementitious matrix

دارند، استفاده از لوله‌های GRP جهت محصوریت ستون‌ها باعث افزایش ظرفیت فشاری، کاهش لاغری و افزایش مقاومت در برابر کماتش می‌شود [۳۰ و ۳۱]؛ همچنین استفاده از این نوع غلاف در ستون‌ها، تحت اثر ضربه بررسی شده و مشاهده گردید که محصوریت ایجاد شده ناشی از کاربرد غلاف GRP اثر مطلوبی در افزایش ظرفیت این ستون‌ها تحت بارهای ضربه‌ای محوری دارد و الگوی شکست این ساختار ترکیبی به شدت وابسته به سطح انرژی ضربه است. به علاوه افزایش ضخامت لوله و نسبت حجمی فولاد تقویتی به بتن، توانایی مقاومت در برابر ضربه را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد، و با توجه به اینکه از دورپیچ GFRP برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح استفاده می‌شود، به دست آمد که افزایش مقدار مواد FRP بر شاخص قابلیت اطمینان مقاوم‌سازی تأثیر ندارد [۳۲ و ۳۳].

در این تحقیق هدف بررسی آزمایشگاهی تأثیر جداگانه و همزمان کاربرد غلاف GRP و دورپیچ CFRP بر رفتار ستون‌های بتن مسلح با مقطع بیضی و ساخته شده از بتن‌های معمولی و پرمقاومت می‌باشد، که با ساخت ۱۲ نمونه ستون بتن مسلح بیضی شکل با قطرهای ۱۲۰ و ۲۰۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر با و بدون حضور CFRP و غلاف لوله‌ای GRP، و تعیین ظرفیت فشاری و تغییر شکل محوری آن‌ها، این هدف دنبال شده است.

## ۲- مشخصات دورپیچ CFRP و غلاف GRP مصرفی

ورقه‌های کامپوزیتی CFRP استفاده شده در تحقیق به صورت یک جهته و ساخت شرکت TORAY ژاپن می‌باشند. خواص مکانیکی دورپیچ CFRP بر اساس اطلاعات کارخانه تولید کننده، از آزمایش‌های انجام شده به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D7565 [۳۴] و ASTM D2996 [۳۵] در جدول ۱ ارائه شده‌اند. چسب اپوکسی مصرفی ساخت شرکت پایا و به صورت دو جزئی متشکل از رزین و سخت کننده می‌باشد که به ترتیب با نسبت ۱:۳ ترکیب و به مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط می‌شوند. مدت زمان لازم برای گیرش رزین و مراقبت از آن متأثر از دمای محیط بوده و در حالت متعارف و با توجه به توصیه‌های شرکت سازنده بین ۵ تا ۷ روز متغیر است. تنش کششی قابل تحمل چسب ۳۰ مگاپاسکال و کرنش گسیختگی کششی آن ۳/۶٪ می‌باشد. مشخصات ترکیب چسب مذکور بر اساس گزارش کارخانه سازنده و از آزمایش‌های انجام شده طبق استاندارد ASTM D638 [۳۶] به دست آمده‌اند.

لوله‌های کامپوزیتی GRP بیضی شکل ساخت کارخانه فرابرد شیراز می‌باشند که با الیاف شیشه آغشته به رزین تولید می‌شوند. این لوله‌ها برحسب

ستون‌های بیضوی را می‌توان با استفاده از شکل معمول مدل‌های مقاومت برای بتن محصور شده با CFRP در ستون‌های دایره‌ای با جایگزینی فشار محصور کننده با فشار محصور کننده موثر پیش‌بینی کرد، که آن را می‌توان با یک ضریب تأثیر شکل مقطع در یک ستون دایروی معادل با همان نسبت حجمی CFRP بیان کرد. همچنین یک مدل تنش-کرنش برای ارزیابی رفتار فشاری ستون‌های بتن مسلح با مقطع بیضی و دایره‌ای بر اساس معیار موهر-کلمب<sup>۱</sup> ارائه گردید [۲۰ و ۲۱]. یکی دیگر از روش‌های تقویت ستون‌ها استفاده از لوله به شکل غلاف می‌باشد. تا به حال تحقیقات مختلفی در استفاده از لوله‌های پلاستیکی<sup>۲</sup> و لوله‌های فولادی به عنوان غلاف برای اعضای بتنی انجام شده است، که نتایج مثبتی داشته‌اند، ولی تاکنون استفاده از لوله‌های GRP کم‌تر مورد بررسی واقع است. استفاده از لوله‌های GRP جهت محصوریت ستون‌ها باعث افزایش مقاومت فشاری، کاهش لاغری و افزایش مقاومت در برابر کماتش می‌شود [۲۲]. همچنین از مواردی که به ندرت بررسی شده است، استفاده از لوله‌های GRP بیضی شکل می‌باشد، که نتایج و محاسبات گویای آن است که مقطع بیضی شکل بهترین مقطع در کاهش تنش برشی و در نتیجه کاهش آب شستگی اطراف پایه‌های پل‌ها می‌باشد [۲۳]. تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص رفتار ستون‌های فولادی بیضوی پر شده با بتن تحت نیروی فشاری انجام شده است. در اکثر مطالعات انجام شده مودهای شکست به صورت کماتش موضعی در لوله‌های فلزی و گسیختگی برشی در بتن پر کننده مشاهده گردید، و با کاهش نسبت قطر به ضخامت شکل‌پذیری خمشی افزایش، و با افزایش نسبت قطر به ضخامت شکل‌پذیری کم شد. شکست تمام ستون‌های لاغر با کماتش خمشی کلی اتفاق افتاد، اما در اکثر موارد تسلیم موضعی فولاد قبل از کماتش نهایی رخ داده است و ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی منجر به شکست بسیار شکل‌پذیرتر نسبت به ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت شدند، که این امر به دلیل شکنندگی بتن با پرمقاومت است [۲۴-۲۷]. علاوه بر این تحقیقات انجام شده بر روی تیرستون‌های لاغر با مقطع بیضی شکل توخالی پر شده از بتن نشان داده است که ظرفیت باربری نهایی با افزایش لاغری کاهش می‌یابد و با افزایش درصد فولاد تقویتی، ظرفیت باربری اضافی ایجاد شده است، که منجر به افزایش ظرفیت باربری نهایی گردید. افزایش نسبت ابعاد بیضی باعث کاهش ظرفیت فشاری محوری و خمشی می‌شود [۲۸] و [۲۹]. تحقیقات انجام شده بر ستون‌های بتنی با غلاف GRP نشان داده که این ستون‌ها از حیث ظرفیت فشاری، سختی و شکل‌پذیری عملکرد مناسبی

1 Mohr-Coulomb

2 Poly Vinyl Chloride (PVC)

جدول ۱. خواص مکانیکی دورپیچ CFRP و غلاف لوله های GRP [۳۴ و ۳۵]\*

Table 1. Mechanical properties of CFRP wrapping and GRP casing

مشخصات کامپوزیت	دورپیچ CFRP	غلاف لوله GRP
ضخامت (mm)	۰/۱۶۶	۸
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	-	۱۸۰۰
وزن در واحد سطح (g/m <sup>2</sup> )	۳۰۰	-
تنش کششی (MPa)	۴۹۰۰	۷۵
ضریب ارتجاعی استاتیکی (GPa)	۲۳۰	۱۲۰
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۴
کرنش نهایی (%)	۲/۵	۱/۳

\*: توجه شود که ارجاع به ASTM در عنوان جدول به این معنی است که شرکت سازنده مصالح، در تعیین و ارائه مشخصات مکانیکی مصالح طبق این استاندارد آزمایش های لازم را انجام داده است.

شده است. نتایج آزمایش های مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در جدول ۳ داده شده است. میانگین مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای بتن معمولی ۳۲/۳ و بتن پرمقاومت ۶۵/۸ مگاپاسکال به دست آمد.

۳-۲- مشخصات نمونه ها

نمونه های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل ۱۲ عدد ستون بتنی با مقطع بیضی با قطرهای ۲۰۰ و ۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی متر هستند، که آزمایش فشار محوری خالص بر روی آن ها انجام شده است. تمام ستون ها از بتن آرمه ساخته شدند. ستون ها به دو گروه ۶ تایی از بتن معمولی و بتن پرمقاومت تقسیم شدند و در هر گروه سه ستون دارای غلاف و سه ستون دیگر فاقد غلاف بودند؛ از هر بخش ۳ تایی یک ستون فاقد دورپیچ، یک ستون با یک لایه و دیگری با دو لایه دورپیچ شدند. ستون ها بر اساس اجزای سازنده آن ها نام گذاری شدند. برای ستون های ساخته شده از بتن معمولی و فاقد غلاف و دورپیچ حرف N، برای ستون های ساخته شده از بتن پرمقاومت حرف H، ستون های دارای غلاف حرف G و ستون های دارای دورپیچ حرف F منظور گردیدند. عددی که پس از حرف F آمده نشانگر تعداد لایه های دورپیچ می باشد. در جدول ۴ مشخصات نمونه های آزمایشگاهی تحقیق ارائه گردیده است.

فشار داخلی که تحمل می کنند، دسته بندی می شوند. در این پژوهش از لوله های GRP بیضی شکل با تحمل فشار داخلی ۱۰ بار استفاده شده است. مشخصات لوله های GRP بیضی شکل بر اساس اطلاعات کارخانه تولید کننده از آزمایش های انجام شده طبق استاندارد ASTM D2996 [۳۵] در جدول ۱ ارائه شده اند. جهت انجام آزمایش های این تحقیق از لوله های GRP بیضی شکل به طول ۶۰۰، قطرهای داخلی ۱۲۰ و ۲۰۰ و ضخامت ۸ میلی متر استفاده شده است.

۳-۳ برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش های اولیه

برای تعیین مقاومت فشاری بتن مصرفی در ساخت ستون ها، نمونه های استوانه ای به ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی متر طبق توصیه ACI211 [۳۷] تهیه و پس از عمل آوری در حوضچه آب در سنین ۷ و ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری روی آن ها به عمل آمد. برای تهیه بتن پرمقاومت جهت ساخت بتن متراکم و کم تخلخل از ژل میکروسیلیس استفاده شد. هم چنین برای افزایش مقاومت فشاری بتن نسبت آب به مواد چسباننده تا مقدار ۰/۲ کاهش یافت و برای حفظ کارایی بتن به مقدار لازم از فوق روان کننده همراه با آب اختلاط استفاده شد. اسلامپ در بتن معمولی ۸۰ و در بتن های مقاومت بالا ۱۹۰ میلی متر بود. جزئیات طرح اختلاط بتن های معمولی و پرمقاومت مصرفی در ساخت نمونه ها در جدول ۲ ارائه

جدول ۲. جزئیات طرح اختلاط بتن های معمولی و پرمقاومت مصرفی در ساخت ستون های تحقیق (kg/m<sup>3</sup>)

Table 2. Details of the mixing design of ordinary and high-strength concrete in the construction of research columns (kg/m<sup>3</sup>)

نوع بتن	سیمان نوع ۲	آب	شن	ماسه	ژل میکروسیلیس	فوق روان کننده	w/b
معمولی	۴۰۰	۱۶۰	۹۰۴	۹۰۶	-	-	۰/۴
پرمقاومت	۵۵۰	۱۲۳	۹۳۰	۷۲۰	۵۵	۳	۰/۲

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های استاندارد ای استاندارد در سن ۲۸ روزه (MPa)

Table 3. Compressive strength test results of standard cylindrical specimens at 28 days of age (MPa)

نوع بتن	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین
معمولی	۳۱/۹	۳۳/۰	۳۱/۹	۳۲/۳
پرمقاومت	۶۳/۷	۶۷/۷	۶۶/۱	۶۵/۸

جدول ۴. مشخصات نمونه های آزمایشگاهی تحقیق

Table 4. Specifications of research laboratory samples

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
نام نمونه	N	NF1	NF2	GN	GNF1	GNF2	H	HF1	HF2	GH	GHF1	GHF2
لوله غلاف	ندارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد	دارد
دورپیچ CFRP	ندارد	دارد	دارد	ندارد	دارد	دارد	ندارد	دارد	دارد	ندارد	دارد	دارد
تعداد لایه های دورپیچ	-	۱	۲	-	۱	۲	-	۱	۲	-	۱	۲

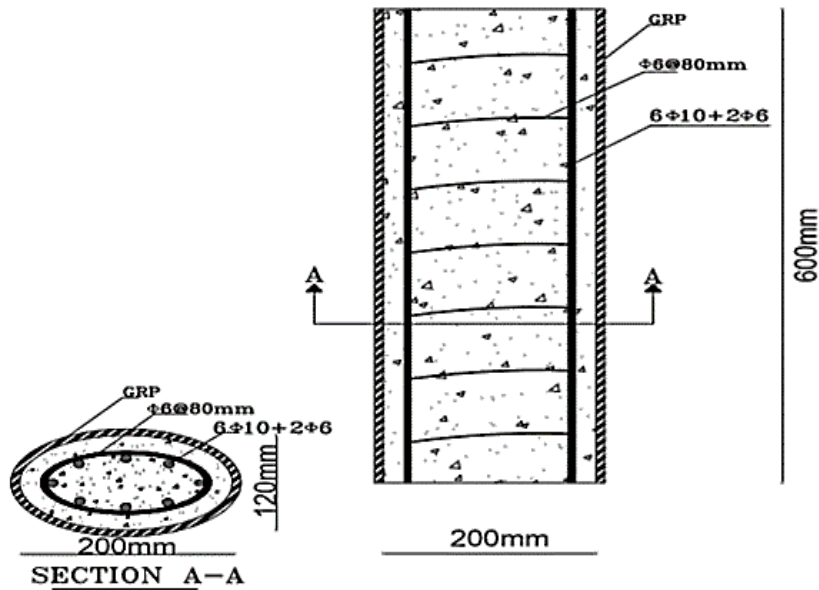
ابعاد مقطع و ارتفاع تمام ستون ها به ترتیب به صورت ۱۲۰×۲۰ و ۶۰۰ میلی متر است.

۳-۳- آماده سازی نمونه ها

آرماتور آجدار به قطر ۶ میلی متر تأمین شده است. برای جلوگیری از تمرکز تنش روی آرماتورهای طولی، این آرماتورها در فاصله ۲۰ میلی متر مانده به دو انتهای ستون قطع شدند؛ بنابراین طول واقعی آرماتورهای طولی ۵۶۰ میلی متر می باشد. هم چنین در هر شبکه، آرماتور ماریچ با گام ۸۰ و به قطر ۶ میلی متر استفاده گردید؛ این گام به صورتی انتخاب شده که محصور شدگی داخلی زیادی توسط خاموت ها ایجاد نشود. پوشش بتن روی آرماتورها به مقدار ۲۰ میلی متر منظور گردید. جهت تأمین پوشش مورد نظر برای

نمونه های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل ۱۲ عدد ستون بتنی با مقطع بیضی با قطرهای ۲۰۰ و ۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی متر هستند، هم چنین دو نمونه به عنوان ذخیره در نظر گرفته شدند که در صورت بروز مشکل در حین انجام آزمایش ها، مورد استفاده قرار گیرند. میزان آرماتورهای طولی استفاده شده در همه ستون ها برابر ۲/۸٪ سطح مقطع ناخالص ستون در نظر گرفته شد، که این مقدار با استفاده از ۶ عدد آرماتور آجدار به قطر ۱۰ و ۲ عدد





شکل ۱. مقاطع طولی و عرضی ستون‌های تحقیق

Fig. 1. Longitudinal and transverse sections of research columns

دقت به دور ستون‌ها پیچیده شدند. جهت اطمینان از عدم جدایی لبه‌های انتهایی دورپیچ، به میزان ۱۰۰ میلی‌متر همپوشانی شدند. ستون‌هایی که دارای دو لایه دورپیچ بودند، به مدت ۲ ساعت پس از نصب لایه اول، لایه دوم دورپیچی شد. تمام ستون‌ها با زاویه صفر درجه دورپیچ شدند و برای عمل‌آوری چسب، ستون‌ها به مدت ۷ روز در دمای محیط نگهداری شدند. ستون‌های دورپیچی شده با CFRP در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲. قالب بیضی ساخت ستون‌ها

Fig.2. Elliptical shape of columns

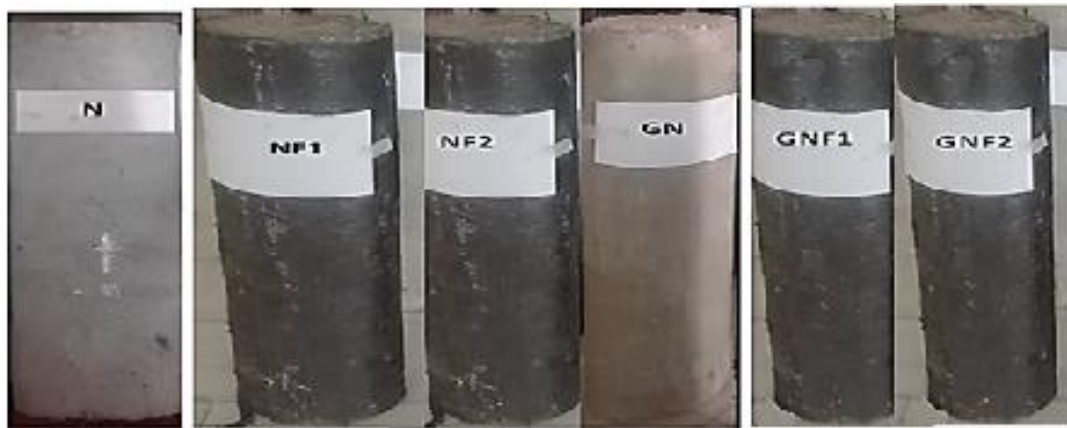
آرماچورهای طولی و عرضی، از فاصله انداز استفاده شد. تنش تسلیم آرماچورها بر اساس کاتالوگ کارخانه سازنده برای آرماچورهای طولی و عرضی به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۳۰۰ مگاپاسکال می‌باشد [۳۸]. در شکل ۱ مقاطع عرضی و طولی ستون‌های مورد تحقیق نشان داده شده است.

سپس قالب بیضی شکل مطابق شکل ۲ با قطرهای ۲۰۰ و ۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر ساخته شده، سپس در هر یک از دو گروه ستون‌ها ۳ عدد لوله GRP جهت ساخت ستون‌های با غلاف و ۴ عدد لوله GRP جهت قالب ستون‌های بدون غلاف تهیه گردید. لوله‌ها و قالب‌ها بر روی صفحات فلزی قرار گرفتند و سطح داخلی قالب‌ها جهت جداسازی آسان قالب از سطح بتن به روغن آغشته گشته و قفسه میلگردها در قالب قرار داده شدند. شکل ۳ نحوه قرارگیری قفسه میلگردها درون غلاف GRP و قالب نشان می‌دهد. در گروه اول از بتن معمولی و در گروه دوم از بتن پرمقاومت استفاده شد. پس از باز کردن قالب‌ها، ستون‌ها به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب عمل‌آوری شدند، سپس با CFRP دورپیچ گردیدند. در آماده‌سازی ستون‌های بتنی برای نصب لایه‌های دورپیچ قبل از استفاده از چسب اپوکسی، ابتدا سطح بیرونی ستون‌ها به طور کامل صاف، تمیز و خشک گردیدند. چسب مصرفی دو جزئی و متشکل از رزین و سخت‌کننده بوده، که به ترتیب با نسبت ۱:۳ ترکیب و به مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط گشته، و سپس یک لایه نازک از آن روی سطح استوانه بتنی مالیده شد و لایه‌های دورپیچ با



شکل ۳. نحوه قرارگیری قفسه میلگردها درون غلاف و قالب ها

Fig.3. How to place the network of rebars inside the casing and molds a) columns made of ordinary concrete; b) columns made of high- strength concrete



(الف) ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی



شکل ۴. ستون‌های تحقیق پس از دورپیچی با CFRP

Figure 4. Columns of research after twisting with CFRP

منظور تعیین منحنی‌های بار-تغییر مکان نمونه‌ها، بار اعمالی در هر لحظه با استفاده از یک نیروسنج ۵۰۰۰ کیلو نیوتنی به طور خودکار با استفاده از عدد مربوط به فشار روغن دستگاه ثبت گردید. در هنگام قرار گرفتن ستون‌ها در دستگاه دقت کافی جهت اطمینان از اینکه ستون‌ها در مرکز جک قرار گرفته باشند، انجام شد. در شکل ۶ نحوه بارگذاری و شکست نمونه‌ها توسط جک هیدرولیکی ۵۰۰۰ کیلو نیوتنی نمایش داده شده است.

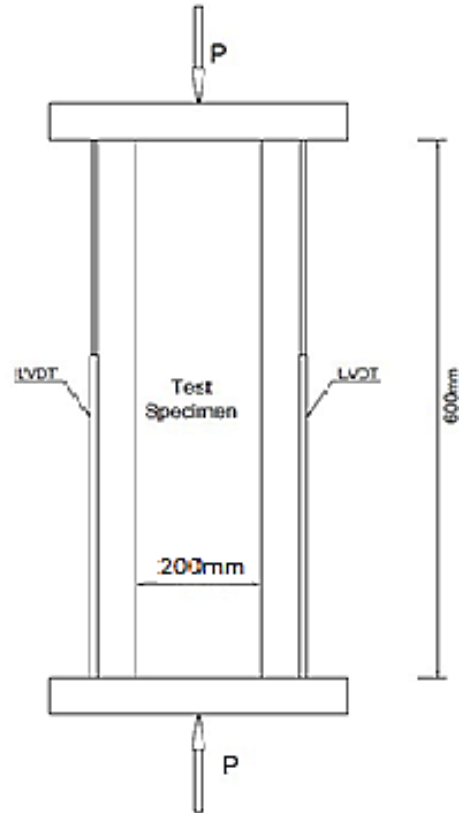
#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

##### ۴-۱- ظرفیت نهایی ستون‌ها

ستون‌ها توسط جک هیدرولیکی ۵۰۰۰ kN آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان تا لحظه شکست با سرعت ۱۰ بارگذاری شدند، ظرفیت و تغییر مکان نهایی ستون‌ها در جدول ۵ ارائه گردیده است.

طبق جدول ۵ و شکل ۷ مشهود است که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ در ستون‌های فاقد غلاف ساخته شده از بتن معمولی به ترتیب باعث افزایش ۲۹٪ و ۳۶٪ و در ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت نیز باعث افزایش ۱۶٪ و ۴۱٪ و در ستون‌های دارای غلاف و ساخته شده از بتن معمولی به ترتیب باعث افزایش ۱۰٪ و ۲۱٪ و در ستون‌های با بتن پرمقاومت نیز باعث افزایش ۶٪ و ۱۶٪ در ظرفیت نهایی ستون‌ها شده است. بنابراین استفاده از دورپیچ جهت محصور کردن ستون‌های بتنی، می‌تواند اثر بسیار خوبی در افزایش ظرفیت نهایی آن‌ها داشته باشد. به علاوه استفاده از دورپیچ در ستون‌های دارای غلاف به علت وجود اثر محصوریت زیاد غلاف، تاثیر قابل توجهی ایجاد نمی‌کند، لذا در صورت استفاده از غلاف، استفاده از دورپیچ جهت مقاوم‌سازی ستون‌های بتن‌آرمه اقتصادی نمی‌باشد. همچنین مشاهده گردید که اثر دورپیچ بر ظرفیت نهایی ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی بیش‌تر است.

طبق شکل ۸ دیده می‌شود که استفاده از غلاف در مقایسه با دورپیچ بسیار موثرتر است، به طوری که استفاده از غلاف به طور میانگین باعث افزایش ۳۱۵٪ ظرفیت فشاری ستون‌ها در گروه بتن‌های معمولی و ۲۵۱٪ در گروه بتن‌های پرمقاومت شده است. در حالی که افزودن یک لایه و دو لایه دورپیچ در گروه بتن‌های معمولی به طور میانگین باعث افزایش ظرفیت فشاری به میزان ۱۹٪ و ۲۸٪ گردید و در گروه بتن‌های پرمقاومت به طور متوسط باعث افزایش به میزان ۱۱٪ و ۲۸٪ شده است.



شکل ۵. محل نصب جابجایی سنج‌های محوری

Fig. 5. Installation location of axial displacement meters

##### ۳-۴- آزمایش ستون‌ها

ستون‌های تحقیق حاضر، تحت بارگذاری فشاری تک محوری توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰۰۰ کیلو نیوتن در آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان آزمایش شدند. آزمایش نمونه‌ها به روش کنترل تغییر شکل و با نرخ بارگذاری ۱۰ انجام شد [۳۷]. جهت تعیین تغییر شکل‌های محوری ستون‌ها، دو عدد جابجایی‌سنج<sup>۱</sup> در دو طرف ستون‌ها نصب شدند که در شکل ۵ محل نصب آن‌ها نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به تغییر شکل‌های محوری ستون‌ها، در هر ثانیه با استفاده از دیتالاگر الکترونیکی<sup>۲</sup> متصل به کامپیوتر ثبت شدند. همچنین به

1 Linear Variable Differential Transducer (LVDT)  
2 Electronic data-logger





شکل ۶. نحوه بارگذاری و شکست نمونه ها توسط جک هیدرولیکی ۵۰۰۰ kN

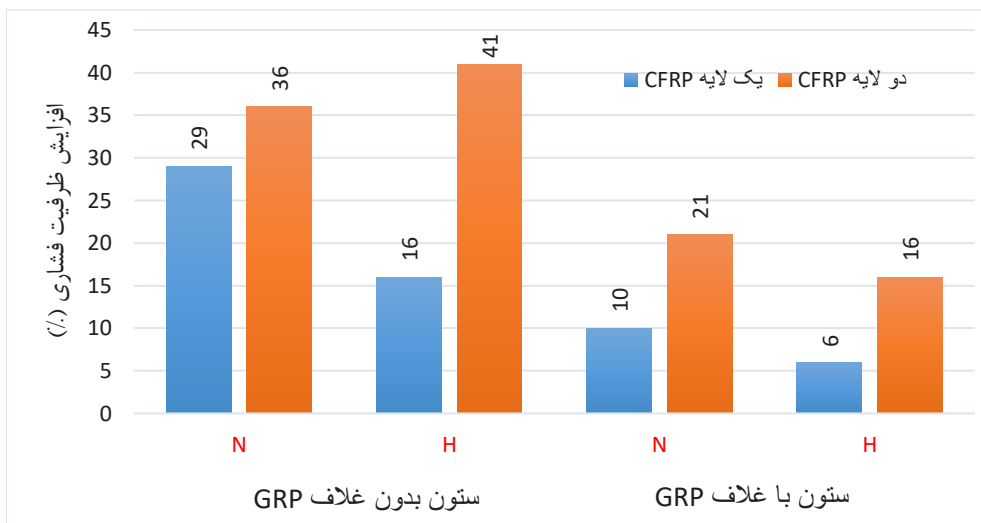
Fig. 6. How to load and break the specimens by 5000 kN hydraulic jack

جدول ۵. ظرفیت و تغییر مکان نهایی ستون های تحقیق

Table 5. Capacity and ultimate displacement of research columns

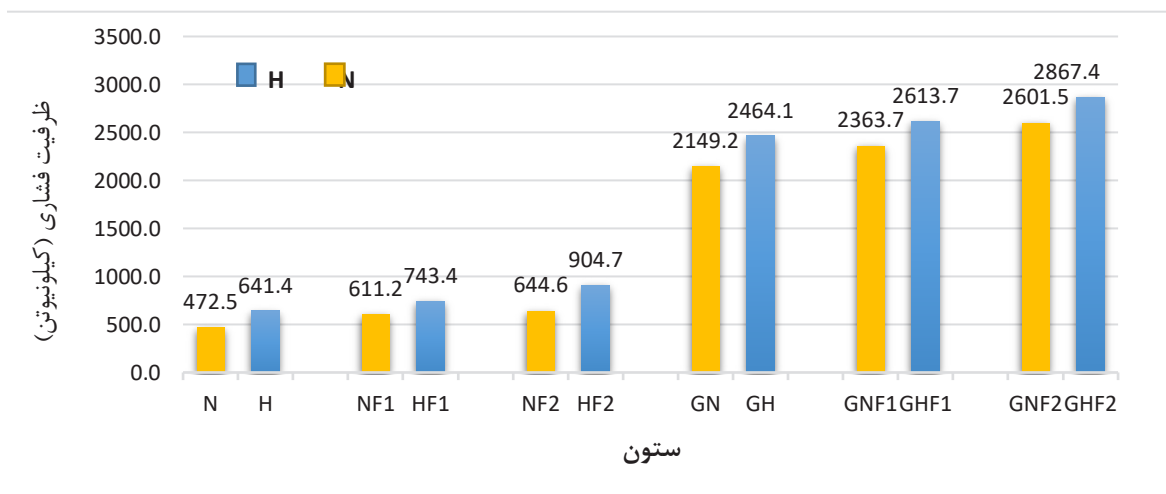
نام ستون	ظرفیت نهایی (kN)	* میانگین تغییر مکان های محوری (mm)
N	۴۷۲/۵	۱/۹
NF1	۶۱۱/۲	۲/۴
NF2	۶۴۴/۶	۲/۸
GN	۲۱۴۹/۲	۷/۹
GNF1	۲۳۶۳/۷	۹/۶
GNF2	۲۶۰۱/۵	۱۱/۷
H	۶۴۱/۴	۲/۴
HF1	۷۳۴/۴	۲/۸
HF2	۹۰۴/۷	۳/۲
GH	۲۴۶۴/۱	۹/۱
GHF1	۲۶۱۳/۷	۱۰/۶
GHF2	۲۸۶۷/۴	۱۲/۹

\*: با توجه به استفاده از دو عدد جابجایی سنج در دو طرف ستون ها، میانگین تغییر مکان های محوری لحاظ شدند.



شکل ۷. تاثیر دورپیچ CFRP در افزایش ظرفیت فشاری ستون های تحقیق

Fig. 7. The effect of CFRP wrapping on increasing the compressive capacity of research columns

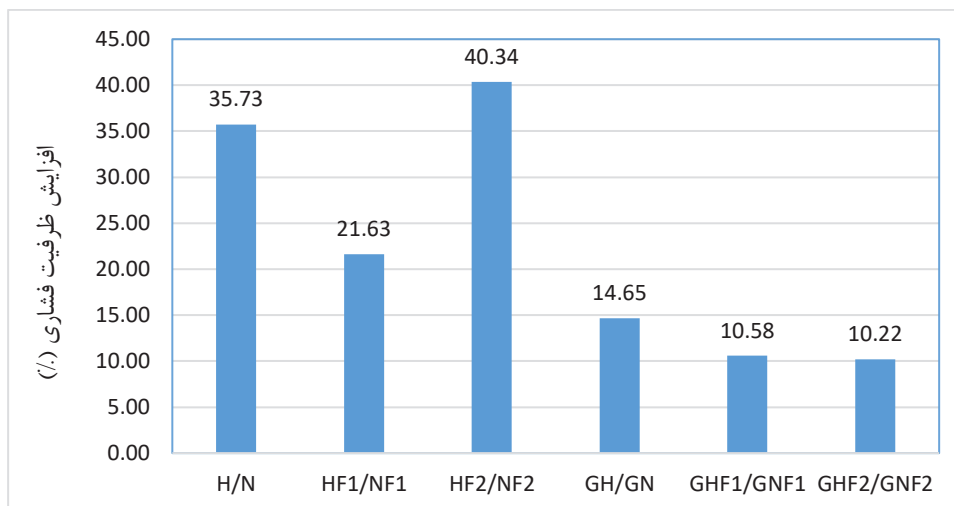


شکل ۸. ظرفیت فشاری ستون های تحقیق

Fig. 8. Compressive capacity of research columns

که تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت نهایی ستون های دارای غلاف به دلیل محصوریت زیاد این غلاف کمتر است. در شکل ۹ افزایش ظرفیت فشاری ستون های ساخته شده از بتن پرمقاومت نسبت به نوع ساخته شده از بتن معمولی نشان داده شده است.

بررسی و مقایسه بین ظرفیت نهایی ستون های ساخته شده از بتن معمولی و بتن پرمقاومت نشان می دهد که ستون های ساخته شده از بتن پرمقاومت دارای ظرفیت فشاری بیش تری هستند. به طور میانگین در ستون های فاقد غلاف به میزان ۳۲/۶٪ و در ستون های دارای غلاف به میزان ۱۱/۸٪ افزایش ظرفیت فشاری وجود دارد. این مقایسه نشان می دهد



شکل ۹. درصد افزایش ظرفیت فشاری ستون های ساخته شده از بتن پرمقاومت نسبت به نوع ساخته شده از بتن معمولی

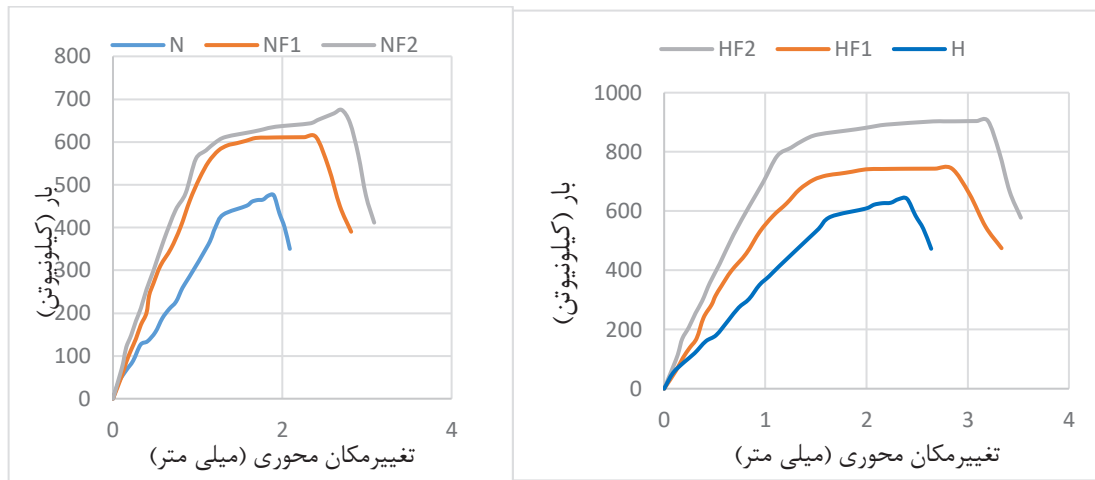
Fig. 9. Percentage increase in compressive capacity of columns made of high-strength concrete compared to the type made of ordinary concrete) Columns made of ordinary concrete; b) Columns made of high-strength concrete

#### ۴-۲- منحنی های بار - تغییر مکان ستون ها

به منظور مقایسه رفتار ستون ها، منحنی های بار-تغییر مکان مربوط به تغییر مکان محوری ستون های با و بدون غلاف در اشکال ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

بر اساس منحنی های بار-تغییر مکان محوری ستون ها ملاحظه می شود که با دورپیچ نمودن ستون های بتن مسلح بیضی شکل با CFRP، تغییر مکان های محوری آن ها افزایش یافته است؛ همچنین میزان تحمل فشار در این ستون ها به طور قابل ملاحظه ای زیاد شده است. بررسی دقیق تر منحنی های بار- تغییر مکان محوری ستون های فاقد غلاف نشان می دهد که این منحنی ها از دو قسمت سخت شونده خطی و نرم شونده غیرخطی تشکیل شده اند، تغییر رفتار ستون ها ناگهانی بوده و نشان از ایجاد ترک های فشاری در بتن و شروع به کار دورپیچ دارد. همچنین منحنی های بار- تغییر مکان محوری ستون های دارای غلاف از دو قسمت سخت شونده خطی و نرم شونده غیرخطی تشکیل شده اند، ولی تغییر رفتار ستون ها تدریجی بوده که علت آن را می توان در پیوستگی کامل و محصوریت بیشتر غلاف با ستون بتنی دانست. همچنین مشهود است که دورپیچ نمودن ستون ها با CFRP باعث افزایش سختی ستون و کاهش تغییر مکان محوری آن ها شده است که علت آن را می توان ناشی از ایجاد محصوریت توسط دورپیچ

مقایسه تغییر مکان محوری نهایی در ستون های بتن مسلح بیضی شکل فاقد غلاف نشان می دهد که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به ترتیب باعث افزایش ۲۳/۷٪ و ۴۲/۹٪ در ستون های ساخته شده از بتن معمولی و ۲۰/۷٪ و ۳۵/۸٪ در ستون های ساخته شده از بتن پرمقاومت شده است. در حالی که در ستون های دارای غلاف، این میزان افزایش برای ستون های با بتن معمولی ۲۱/۶٪ و ۴۸/۳٪ و در ستون های با بتن پرمقاومت ۱۶/۸٪ و ۴۱/۷٪ می باشد. لذا مشهود است که استفاده از دورپیچ جهت محصور کردن ستون های بتنی باعث افزایش تغییر مکان محوری نهایی ستون ها می شود، که این تاثیر در ستون های دارای غلاف به دلیل اثر زیادتر محصوریت غلاف مذکور بیش تر می باشد. همچنین مقایسه اثر محصوریت غلاف با دورپیچ در تغییر مکان محوری نهایی ستون ها نشان می دهد که غلاف بسیار موثرتر است. به عنوان مثال در ستون های با بتن معمولی استفاده از غلاف بدون استفاده از دورپیچ به میزان ۳۱۰٪ افزایش در تغییر مکان محوری نهایی ستون ها ایجاد نموده، در حالی که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به ترتیب باعث افزایش تغییر مکان محوری نهایی به میزان ۲۳/۷٪ و ۴۲/۹٪ شده است. تاثیر زیاد غلاف لوله ها در ایجاد تغییر مکان محوری نهایی را می توان در ساختار این لوله ها و وجود الیاف در ساخت آن ها دانست. بنابراین استفاده از غلاف در مناطقی که نیاز به طراحی شکل پذیر دارند، می تواند بسیار مفید واقع گردد.

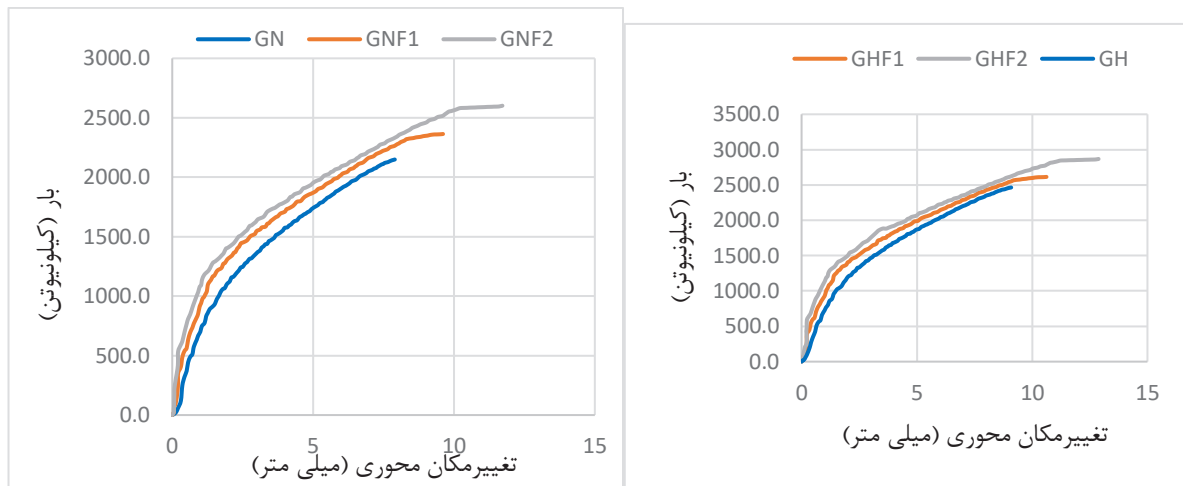


(الف) ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی

(ب) ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت

شکل ۱۰. منحنی بار-تغییر مکان محوری ستون‌های فاقد غلاف GRP

Fig. 10. Load - axial displacement curve of columns without GRP casing  
a) Columns made of ordinary concrete; b) Columns made of high- strength concrete



(الف) ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی

(ب) ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت

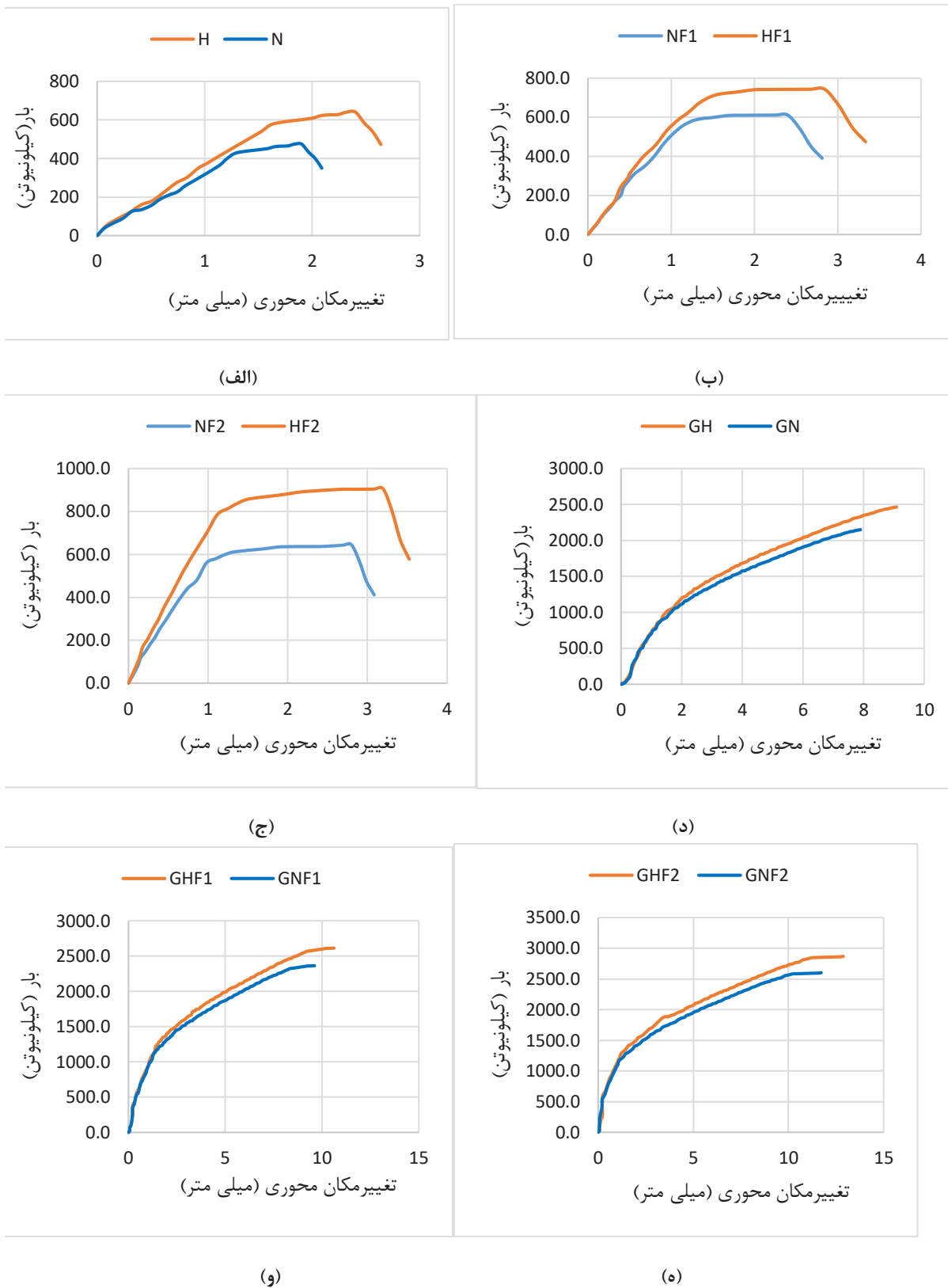
شکل ۱۱. منحنی بار-تغییر مکان محوری ستون‌های دارای غلاف GRP

Fig. 11. Load - axial displacement curve of columns with GRP casing

داده شده‌اند.

به منظور مقایسه رفتار ستون‌ها، منحنی‌های بار-تغییر مکان محوری

آن‌ها جهت بررسی تأثیر نوع بتن مصرفی در ساخت، در شکل ۱۲ نمایش



شکل ۱۲. منحنی های بار-تغییر مکان محوری برای ستون های ساخته شده از بتن های معمولی و پرمقاومت (الف) ستون های N و H (ب) ستون های NF1 و HF1 (ج) ستون های NF2 و HF2 (د) ستون های GN و GH (ه) ستون های GNF1 و GHF1 (و) ستون های GNF2 و GHF2

Fig.12. Load - axial displacement curves for columns made of ordinary and high-strength concrete((a) N and H columns (b) NF1 and HF1 columns (c) NF2 and HF2 columns (d) GN and GH columns (e) GNF1 and GHF1 columns (f) Column GNF2 and GHF2a) Columns made of ordinary concrete; b) Columns made of high- strength concrete





**N NF1 NF2 GN GNF1 GNF2**

(الف) ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی



**H HF1 HF2 GH GHF1 GHF2**

(ب) ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت

شکل ۱۳. نحوه گسیختگی ستون‌ها پس از اعمال بارگذاری

**Fig. 13. How the columns break after loading**

نشدن شبکه میلگردها و افزایش باربری ستون‌ها شد. گسیختگی و تخریب در ستون‌های NF2 و HF2 مشابه ستون‌های محصور شده با یک لایه دورپیچ بود. عموماً در ستون‌های فاقد غلاف، گسیختگی به صورت تدریجی و نرم اتفاق افتاد. در این ستون‌ها با افزایش فشار و شروع ترک‌های فشاری انبساط جانبی به تدریج در بتن آن‌ها رخ داد. در ستون‌های با دورپیچ، نیروی ناشی از محصوریت باعث جلوگیری از گسیختگی زود هنگام شد و نتیجتاً با افزایش نیروی فشاری و رشد ترک‌ها، ورق دورپیچ دچار پارگی شد و ستون گسیخته شد. در ستون‌های با غلاف نحوه گسیختگی متفاوت با ستون‌های بدون غلاف بود. در ستون GN گسیختگی کامل و به صورت انهدام با صدای انفجار در امتداد محور طولی و در سراسر طول ستون اتفاق افتاد؛ ولی در ستون GH گسیختگی به علت پارگی میلگردهای مارپیچ در نیمه بالایی ستون و کمانش میلگردهای طولی در این محل و گسیختگی

۳-۴- بررسی نحوه گسیختگی ستون‌ها

گسیختگی ستون‌ها در شکل ۱۳ ارائه شده است. در ستون‌های فاقد غلاف گسیختگی اکثراً به علت کمانش میلگردهای ستون، به صورت موضعی و به تدریج اتفاق افتاد. در این ستون‌ها گسیختگی در یکی از دو انتها رخ داد که علت آن را می‌توان محصوریت کمتر هسته بتنی در دو انتهای ستون‌ها از سوی شب که میلگردها دانست. در ستون‌های فاقد هرگونه محصوریت (ستون‌های N و H)، ستون‌ها به علت ایجاد ترک‌های فشاری در بتن بالا و پایین خود و نهایتاً جدا شدن قطعاتی از بتن در این قسمت‌ها و کمانش میلگردهای طولی، گسیخته شدند. در ستون‌های NF1 و HF1 با یک لایه دورپیچ، گسیختگی نیز به ترتیب در بالا و پایین آن‌ها به علت خرد شدن بتن و پارگی دورپیچ اتفاق افتاد. در این ستون‌ها برخلاف ستون‌های قبلی محصوریت ناشی از دورپیچ باعث خردشدگی کمتر بتن و گسیخته

در مدل مذکور برای تعیین فشار محصور شدگی معادل ( $f_l$ )، برای ستون‌های دایروی این مقدار برابر واحد در نظر گرفته شد تا بتوان از آن برای تعیین و مقایسه این مقدار با مقاطع غیردایروی که به همین میزان دورپیچ دارند، استفاده کرد. مساحت یک بیضی برابر با  $\pi ab$  می‌باشد و محیط آن تقریباً به مقدار  $\pi[1.5(a+b) - \sqrt{ab}]$  نزدیک می‌باشد. بنابراین نسبت حجمی دورپیچ برای ستون بیضوی که با دورپیچ به ضخامت  $t_{frp}$  روکش شده است، از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$\rho_{frp} = \frac{t_{frp}[1.5(a+b) - \sqrt{ab}]}{ab} \quad (3)$$

که  $a$  و  $b$  نصف قطرهای بیضی می‌باشند، بنابراین فشار محصور شدگی معادل از رابطه (۴) قابل محاسبه خواهد بود:

$$f_l = \frac{f_{frp}\rho_{frp}}{2} = \frac{t_{frp}[1.5(a+b) - \sqrt{ab}]f_{frp}}{2ab} \quad (4)$$

بنابراین ظرفیت محوری نهایی ستون‌های بتن‌آرمه بیضی شکل با غلاف و دورپیچ طبق آیین‌نامه BS810 [۳۹] از رابطه (۵) به دست می‌آید:

در رابطه (۵)  $A_c$ ،  $A_{sc}$ ،  $\gamma_s$ ،  $\gamma_{frp}$  و  $\gamma_c$  به ترتیب بیانگر سطح مقطع میلگردهای طولی، سطح مقطع بتن، ضریب جزئی ایمنی بتن، ضریب جزئی ایمنی فولاد و ضریب جزئی ایمنی دورپیچ می‌باشند. با جایگذاری مشخصات کامپوزیت‌های مصرفی تحقیق در روابط بالا و با تجمیع اثرات غلاف و دورپیچ در ستون‌های ترکیبی، مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط فوق در جدول ۶ و شکل ۱۴ داده شده است. نتایج داده شده در جدول ۶ نشان می‌دهند که همخوانی خوبی بین نتایج تحقیق و روابط آیین‌نامه‌ای وجود دارد.

$$P_u = \left(\frac{0.67}{\gamma_c} f'_{co} + \frac{k_1 k_s f_l}{\gamma_{frp}}\right) A_c + \frac{f_y A_{sc}}{\gamma_s} \quad (5)$$

غلاف به صورت موضعی رخ داد. در ستون‌های GNF1 و GHF1 گسیختگی مشابه ستون GN بود، با این تفاوت که محصوریت بیش‌تر ناشی از لایه دورپیچ باعث شد تا بتن ستون‌ها تغییر شکل فشاری بیش‌تری تحمل کنند، و نهایتاً در یک سوم پایینی با کماتش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای ماریچ گسیخته شوند. در ستون‌های GNF2 و GHF2 نیز گسیختگی مشابه ستون‌های با یک لایه دورپیچ بود، با این تفاوت که محصوریت زیادتر ناشی از دو لایه دورپیچ باعث شد تا گسیختگی به صورت کلی و به ترتیب در میانه و نیمه پایینی ستون‌ها با وقوع کماتش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای ماریچ اتفاق افتد. عموماً علت گسیختگی کامل و آبی ستون‌های با غلاف را می‌توان در میزان بسیار زیاد محصوریت ناشی از غلاف دانست، که این میزان محصوریت باعث رسیدن تمام نقاط ستون به حداکثر تغییر مکان قابل تحمل خود و همچنین کماتش میلگردهای طولی و نهایتاً گسیختگی ستون گردید.

#### ۴-۴ - تحلیل نتایج تحقیق

##### ۴-۴-۱ - مقایسه نتایج با روابط آیین‌نامه‌ای

تاکنون روابط متعددی برای محاسبه ظرفیت فشاری بتن محصور شده با دورپیچ و همچنین ظرفیت نهایی ستون‌های مقاوم‌سازی شده با غلاف و دورپیچ پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به مدل لام و تنگ [۲۰] به صورت رابطه (۱) اشاره کرد. در این رابطه  $f'_{co}$ ،  $f'_{cc}$  و  $f_l$  به ترتیب بیانگر ظرفیت فشاری بتن محصور نشده، ظرفیت فشاری بتن محصور شده و فشار محصورشدگی معادل می‌باشند.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 k_s f_l \quad (1)$$

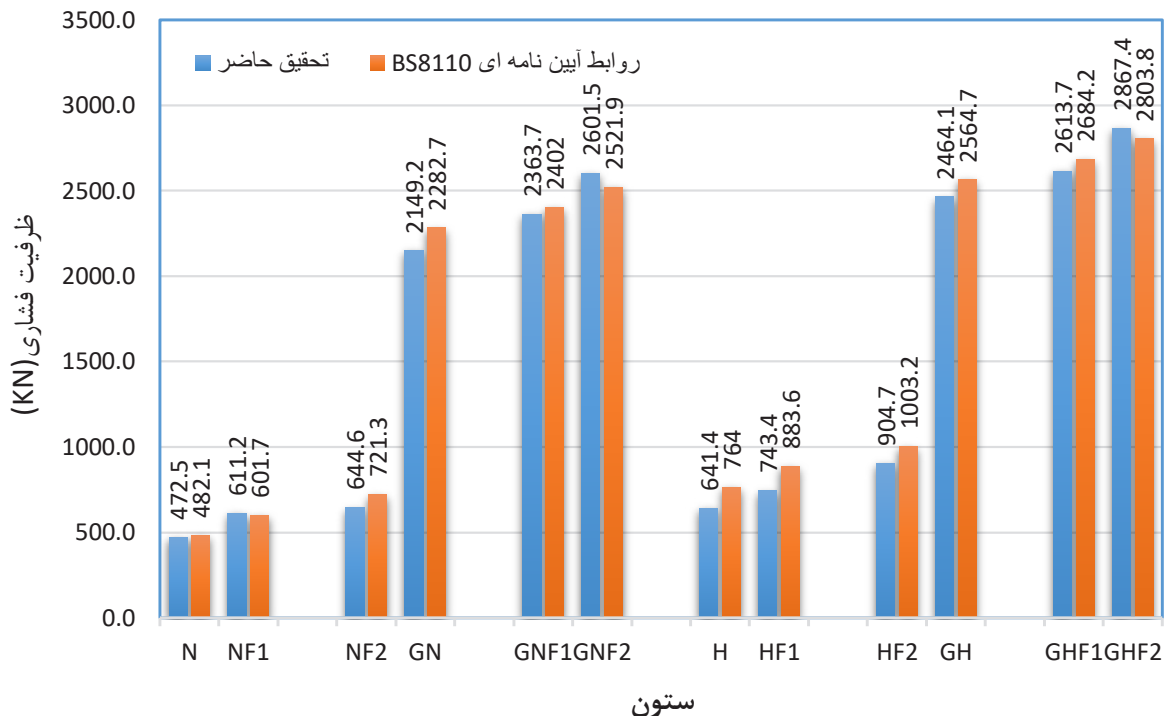
همچنین در رابطه (۱)،  $k_1$  ضریب تأثیر محصور شدگی است که طبق پیشنهاد لام و تنگ برابر ۲ می‌باشد. ضریب  $k_s$  با استفاده از معادله ساده ۲ به دست می‌آید:

$$k_s = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (2)$$

جدول ۶. مقایسه ظرفیت فشاری آزمایشگاهی ستون های تحقیق با آیین نامه BS 8110 [۳۹]

Table 6. Comparison of laboratory compressive capacity of research columns with BS 8110 [39]

نام ستون	ظرفیت فشاری بتن محصور نشده $f'_{co}$ (MPa)	ظرفیت فشاری بتن محصور شده $f'_{cc}$ (MPa)	ظرفیت نهایی ستون محصور شده $P_u$ (kN)	ظرفیت نهایی آزمایشگاهی $P_{exp}$ (kN)	$\frac{P_u - P_{exp}}{P_{exp}}$ (%)
N	۳۲/۳	۳۲/۳	۴۸۲/۱	۴۷۲/۵	۲/۰
NF1	۳۲/۳	۴۰/۲	۶۰۱/۷	۶۱۱/۲	-۱/۶
NF2	۳۲/۳	۴۸/۱۶	۷۲۱/۳	۶۴۴/۶	۱۱/۹
GN	۳۲/۳	۱۵۱/۸	۲۲۸۲/۷	۲۱۴۹/۲	۶/۲
GNF1	۳۲/۳	۱۵۹/۷	۲۴۰۲/۰	۲۳۶۳/۷	۱/۶
GNF2	۳۲/۳	۱۶۷/۶	۲۵۲۱/۹	۲۶۰۱/۵	-۳/۰
H	۶۵/۸	۶۵/۸	۷۶۴/۰	۶۴۱/۴	۱۹/۱
HF1	۶۵/۸	۷۳/۷	۸۳۳/۶	۷۴۳/۴	۱۸/۹
HF2	۶۵/۸	۸۱/۷	۱۰۰۳/۲	۹۰۴/۷	۱۰/۹
GH	۶۵/۸	۱۸۵/۳	۲۵۶۴/۷	۲۴۶۴/۱	۴/۱
GHF1	۶۵/۸	۱۹۳/۲	۲۶۸۴/۲	۲۶۱۳/۷	۲/۷
GHF2	۶۵/۸	۲۰۱/۱	۲۸۰۳/۸	۲۸۶۷/۴	-۲/۲



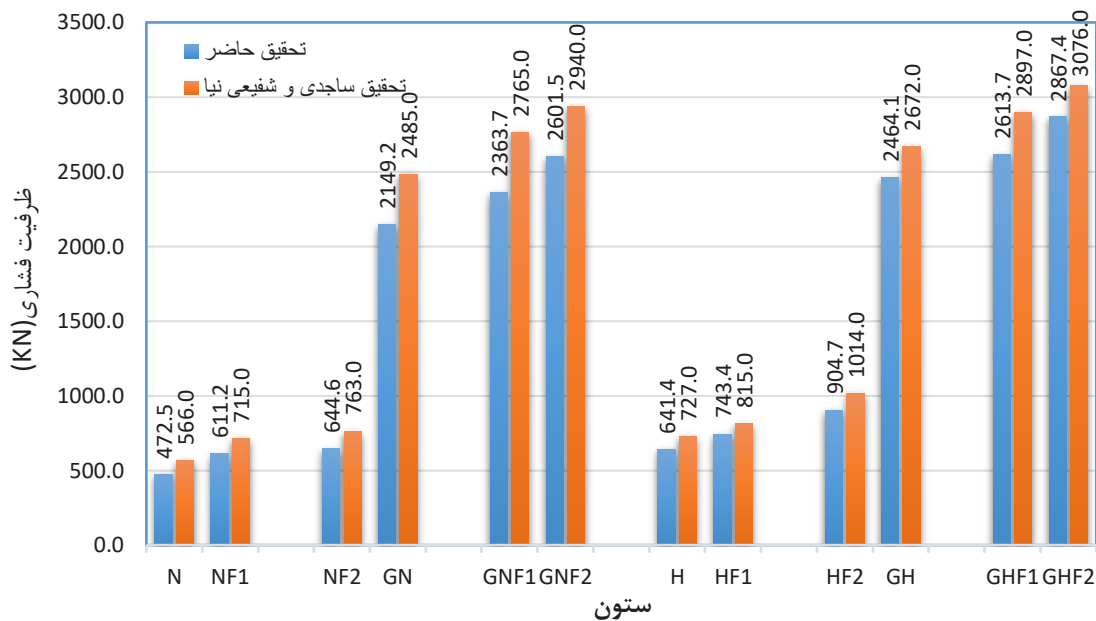
شکل ۱۴. مقایسه ظرفیت فشاری آزمایشگاهی ستون های تحقیق با روابط آیین نامه BS 8110 [۳۹]

Fig. 14. Comparison of laboratory compressive capacity of research columns with the relationships of BS 8110 [39]

جدول ۷. مقایسه ظرفیت فشاری نهایی ستون های تحقیق با نتایج آزمایشگاهی ساجدی و شفیعی نیا [۴۰]

Table 7. Comparison of ultimate compressive capacity of research columns with Sajedi and Shafieinia laboratory results [40]

ستون	$P_u (kN)$ تحقیق [۴۰]	$P_{exp} (kN)$ تحقیق حاضر	$(\%) \frac{P_{exp}-P_u}{P_{exp}}$
N	۵۶۶/۰	۴۷۲/۵	-۱۹/۸
NF1	۷۱۵/۰	۶۱۱/۲	-۱۷/۰
NF2	۷۶۳/۰	۶۴۴/۶	-۱۸/۴
GN	۲۴۸۵/۰	۲۱۴۹/۲	-۱۵/۶
GNF1	۲۷۶۵/۰	۲۳۶۳/۷	-۱۷/۰
GNF2	۲۹۴۰/۰	۲۶۰۱/۵	-۱۳/۰
H	۷۲۷/۰	۶۴۱/۴	-۱۳/۳
HF1	۸۱۵/۰	۷۴۳/۴	-۹/۶
HF2	۱۰۱۴/۰	۹۰۴/۷	-۱۲/۱
GH	۲۶۷۲/۰	۲۴۶۴/۱	-۸/۴
GHF1	۲۸۹۷/۰	۲۶۱۳/۷	-۱۰/۸
GHF2	۳۰۷۶/۰	۲۸۶۷/۴	-۷/۳



شکل ۱۵. مقایسه ظرفیت فشاری نهایی ستون های تحقیق با نتایج آزمایشگاهی ساجدی و شفیعی نیا [۴۰]

Fig15. Comparison of ultimate compressive capacity of research columns with laboratory results of Sajedi and Shafieinia [40]

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای به ترتیب ۳۲/۷ و ۶۳/۱ مگاپاسکال انجام دادند [۴۰]. مقایسه ظرفیت فشاری نهایی ستون‌های این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی تحقیق مذکور در جدول ۷ و شکل ۱۵ ارائه گردیده است.

۴-۲- مقایسه نتایج با سایر تحقیقات  
ساجدی و شفیعی نیا تحقیقی مشابه روی ۱۲ ستون بتن مسلح دایره‌ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر و میزان میلگرد طولی ۲/۷٪ سطح مقطع ناخالص ستون با گروه‌بندی مشابه و کاربرد بتن‌های معمولی و پرمقاومت با

جدول ۸. مقایسه ظرفیت فشاری نهایی ستون های تحقیق با نتایج آزمایشگاهی لام و تنگ [۲۰]

Table 8. Comparison of final compressive capacity of research columns with Lam and Tang laboratory results [20]

نام ستون	ظرفیت نهایی تحقیق لام و تنگ $P_u (kN)$	ظرفیت نهایی تحقیق حاضر $P_{exp} (kN)$	$(\%) \frac{P_{exp}-P_u}{P_{exp}}$
H	۴۷۵/۰	۶۴۱/۴	۲۵/۹
HF1	۷۴۸/۰	۷۴۳/۴	-۰/۶
HF2	۸۷۰/۰	۹۰۴/۷	۱۳/۸

جدول ۹. مقایسه تغییر مکان محوری نهایی ستون های تحقیق با نتایج عددی تحقیق ساجدی و شریعتی [۴۱]

Table 9. Comparison of the ultimate axial displacement of research columns with numerical results of Sajedi and Shariati research [41]

نام ستون	تغییر مکان محوری نهایی تحقیق [۴۱] $d_u (mm)$	تغییر مکان محوری تحقیق حاضر $d_{exp} (mm)$	$(\%) \frac{d_{exp}-d_u}{d_{exp}}$
N	۲/۱	۱/۹	-۸/۹
NF1	۲/۵	۲/۴	-۴/۸
NF2	۲/۹	۲/۸	-۵/۳
GN	۸/۱	۷/۹	-۲/۵
GNF1	۹/۰	۹/۶	۶/۴
GNF2	۱۰/۱	۱۱/۷	۱۳/۸
H	۲/۷	۲/۴	-۱۴/۶
HF1	۲/۹	۲/۸	-۲/۰
HF2	۳/۱	۳/۲	۳/۱
GH	۸/۹	۹/۱	۲/۱
GHF1	۹/۸	۱۰/۶	۷/۷
GHF2	۱۰/۵	۱۲/۹	۱۸/۵

ستون های این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی تحقیق لام و تنگ به طور نسبی همخوانی خوبی دارند.

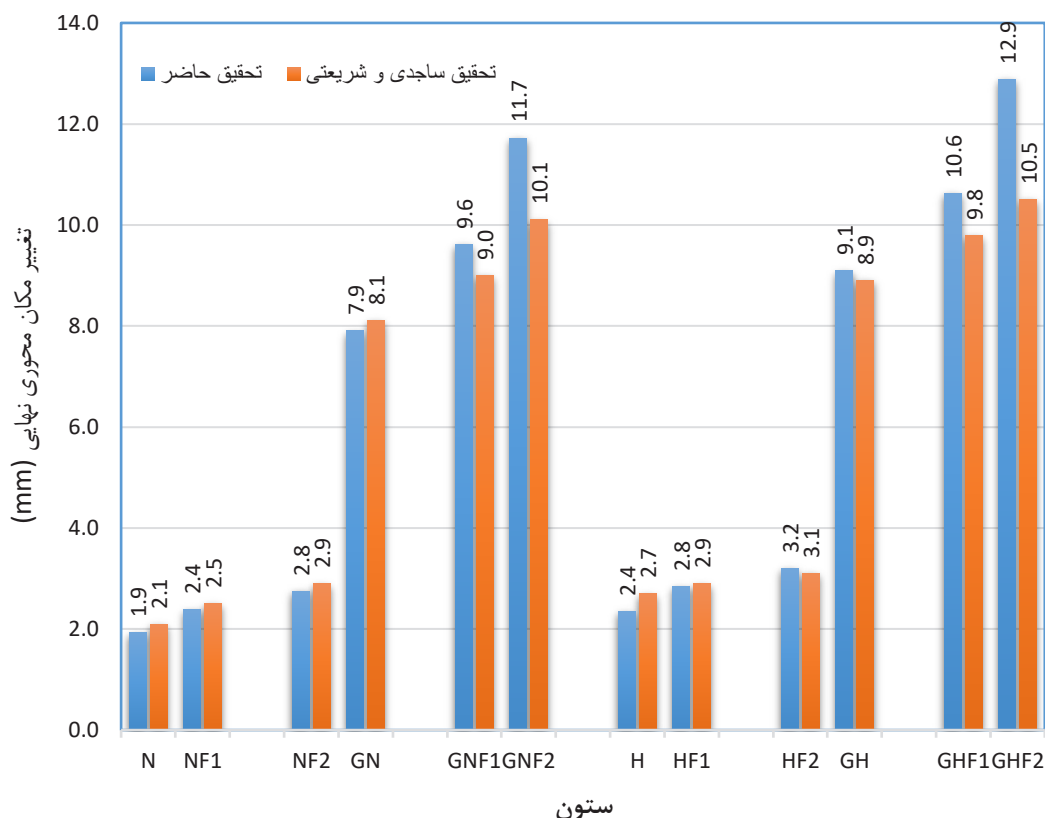
ساجدی و شریعتی تحقیقی مشابه روی ۱۲ ستون بتن مسلح با مقطع دایره ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی متر با گروه بندی مشابه و ساخته شده از بتن های معمولی و پرمقاومت با میانگین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نمونه استوانه ای به ترتیب به مقدار ۳۲/۷ و ۶۳/۱ مگاپاسکال انجام دادند مدل سازی با روش عددی اجزاء محدود به کمک نرم افزار آباکوس<sup>۱</sup> انجام گردید [۴۱]. مقایسه تغییر مکان محوری نهایی ستون های این تحقیق با نتایج عددی تحقیق مذکور در جدول ۹ و شکل ۱۶ ارائه گردیده است.

نتایج جدول ۷ نشان می دهد که ظرفیت فشاری نهایی ستون های این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی تحقیق ساجدی و شفیعی نیا بر اساس نتایج مدل لام و تنگ [۲۰] و همچنین میرمیران و همکاران [۱۲] که معتقدند تأثیر محصور کنندگی دورپیچ در مقاطع بتنی غیردایروی نسبت به مقاطع دایروی تا حدی کم تر است، همخوانی خوبی دارند.

لام و تنگ تحقیقی مشابه روی ستون های بتن مسلح با مقطع بیضی با قطرهای ۱۹۴/۸ و ۱۱۵/۹ و ارتفاع ۶۰۳ میلی متر و ساخته شده از بتن های با مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه به مقدار ۴۷/۱، ۴۶/۶ و ۴۵/۸ مگاپاسکال انجام دادند [۲۰]. مقایسه ظرفیت فشاری نهایی ستون های این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی تحقیق مذکور در جدول ۸ ارائه گردیده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۸ نشان می دهند که ظرفیت فشاری نهایی





شکل ۱۶. مقایسه تغییر مکان محوری نهایی ستون های تحقیق با نتایج عددی تحقیق ساجدی و شریعتی [۴۱]

Fig. 16. Comparison of the ultimate axial displacement of research columns with numerical results of Sajedi and Shariati [41]

به ضلع ۱۳۳ و ارتفاع ۵۰۰ میلی متر با خروج از مرکزیت صفر و ۳۰ میلی متر آزمایش شدند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، محصور شدگی ستون ها باعث افزایش ظرفیت باربری آن ها گردید. میزان افزایش ظرفیت باربری مربوط به خروج از مرکزیت های صفر و ۳۰ میلی متر به ترتیب ۲۸/۲٪ و ۲۷/۱٪ بود. همچنین نتایج تحقیق آن ها نشان داد که محصور کردن ستون ها با دورپیچ CFRP باعث افزایش شکل پذیری ستون ها می شود [۴۳]. در تحقیق حاضر میزان افزایش ظرفیت فشاری نهایی ستون های محصور شده با دورپیچ CFRP، ۱۶٪ است که علت اختلاف آن با نتایج تحقیق مستوفی نژاد و همکاران را می توان در شکل مقطع و مقاومت فشاری بتن های مصرفی دانست. مقاطع طولی و عرضی ستون های تحقیق مستوفی نژاد و همکاران در شکل ۱۷ داده شده اند.

نتایج داده شده در جدول ۹ نشان می دهند که تغییر مکان نهایی ستون های این تحقیق با نتایج عددی حاصل از تحقیق ساجدی و شریعتی همخوانی خوبی دارند.

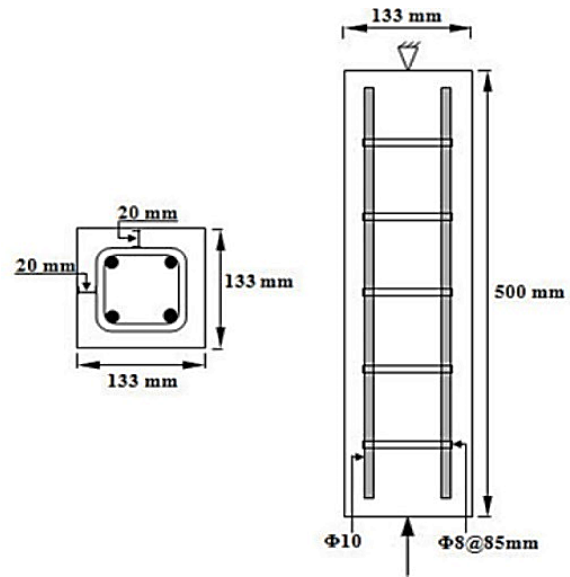
حسنیان و همکاران<sup>۱</sup> تحقیقی روی رفتار فشاری سازه ای و طراحی لوله های فولادی کوتاه بیضی شکل پر شده از بتن پرمقاومت انجام دادند. نتایج نشان داد که افزایش مقاومت فشاری بتن، ظرفیت ستون را به طور قابل توجهی افزایش می دهد [۴۲]. نتایج تحقیق حاضر با تحقیق حسنیان و همکاران همخوانی خوبی دارند. مستوفی نژاد و همکاران در سال ۱۳۹۳ به بررسی رفتار محوری ستون های بتن مسلح با مقطع مربعی و محصور شده با دورپیچ CFRP پرداختند. در این تحقیق ۴ نمونه ستون مربعی بتن آرمه

1 Hassanian et al.

ستون‌ها در نرم‌افزار انسیس<sup>۲</sup> مدل‌سازی گردیدند و اثر سطح مقطع و تعداد لایه‌های کامپوزیتی در ظرفیت ستون‌ها بررسی گردید. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در تمام ستون‌ها دورپیچ کردن آن‌ها با یک لایه CFRP تاثیر فراوانی بر ظرفیت نهایی خواهد داشت، اما افزودن لایه دوم تاثیر چندانی بر افزایش ظرفیت باربری ستون نخواهد داشت. ستون‌های دایره‌ای در مجموع عملکرد بهتری نسبت به ستون‌های مربعی داشتند [۴۵]. در تحقیق حاضر افزودن لایه اول دورپیچ باعث افزایش ظرفیت نهایی فشاری در ستون‌ها به میزان ۱۱٪ و افزودن لایه دوم نسبت به لایه اول به میزان ۱۶٪ گردید که همخوانی خوبی با نتایج تحقیق شابختی و همکاران دارد.

پوراهازی و گندمکار در سال ۱۳۹۵ تحقیقی عددی بر رفتار ستون‌های فولادی بیضوی پر شده با بتن تحت نیروی فشاری محوری انجام دادند. رفتار فشاری ستون مرکب با مقطع بیضوی پر شده با بتن مورد بررسی قرار گرفت. ضمن مدل‌سازی ستون‌های کوتاه توخالی و توپر با و بدون سخت کننده، مقایسه ظرفیت باربری نهایی و شکل‌پذیری ستون‌های مذکور با مقطع دایره‌ای هم‌ارز آن‌ها (دو مقطع با سطح مقطع یکسان) و تاثیر پارامترهای ضخامت جداره لوله، مساحت مقطع و رده بتن بر رفتار آن‌ها بررسی گردیدند. مدل‌سازی با روش عددی اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس<sup>۳</sup> و تحلیل استاتیکی غیرخطی و با الگوی بار خطی انجام گردید. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در شرایط یکسان، ستون‌های لوله‌ای با مقطع دایره‌ای ظرفیت باربری و شاخص شکل‌پذیری بیشتری نسبت به مقطع بیضوی هم‌ارز خود دارند. استفاده از سخت کننده طولی باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی به میزان ۱۰٪ گردید [۴۶]. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق مذکور از منظر کاهش ظرفیت فشاری و شکل‌پذیری مقاطع بیضوی نسبت به دایروی همخوانی خوبی دارند.

کوماتا و همکاران<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۴ تحقیقی آزمایشگاهی بر رفتار ستون‌های مستطیلی به ارتفاع ۷۵۰ میلی‌متر تحت بار محوری خالص که با یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP محصور شده بودند، انجام دادند. در این تحقیق ۹ ستون مستطیلی با نسبت ابعاد مقطع ۱، ۱/۲۵ و ۱/۶۷ با استفاده از دورپیچ مقاوم‌سازی شدند و اثر دورپیچ بر ظرفیت نهایی ستون‌ها بررسی گردید. در این تحقیق ستون‌ها به وسیله ۴ میلگرد آجدار طولی به قطر ۱۰ و خاموت به قطر ۶ و با فاصله ۱۲۵ میلی‌متر مسلح شده بودند و مقاومت فشاری بتن ۲۷/۵ مگاپاسکال بود. نتایج نشان داد که استفاده از یک لایه



شکل ۱۷. مقاطع طولی و عرضی ستون‌های استفاده شده در تحقیق مستوفی نژاد و همکاران [۴۳]

Fig. 17. Longitudinal and transverse sections of research columns used in the research of Mostifinejad et al. [43]

پارک و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۹ تحقیقی آزمایشگاهی بر روی ستون‌های بتن مسلح با غلاف CFRP تحت بارهای محوری فشاری انجام دادند. در این تحقیق ۴ ستون بتنی به قطر ۳۰۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر تحت بار محوری فشاری آزمایش شدند، که از این ستون‌ها یکی فاقد غلاف و سه‌تای دیگر دارای غلاف به ضخامت‌های ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بودند. نتایج تحقیق نشان داد که محصور نمودن ستون‌های بتن مسلح با استفاده از غلاف CFRP باعث بهبود ظرفیت و شکل‌پذیری می‌شود، به طوری که ظرفیت فشاری نهایی در ستون‌های دارای غلاف به ضخامت‌های ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر به ترتیب ۶۸٪، ۱۴۵٪ و ۲۱۹٪ نسبت به ستون‌های فاقد غلاف افزایش یافتند [۴۴]. این میزان افزایش ظرفیت نهایی در تحقیق حاضر ۲۵۱٪ است که علت اختلاف ظرفیت آن‌ها را می‌توان در تفاوت جنس غلاف و دورپیچ و ضخامت‌ها دانست. در شکل ۱۸ مقطع نمونه‌های تحقیق پارک و همکاران داده شده است.

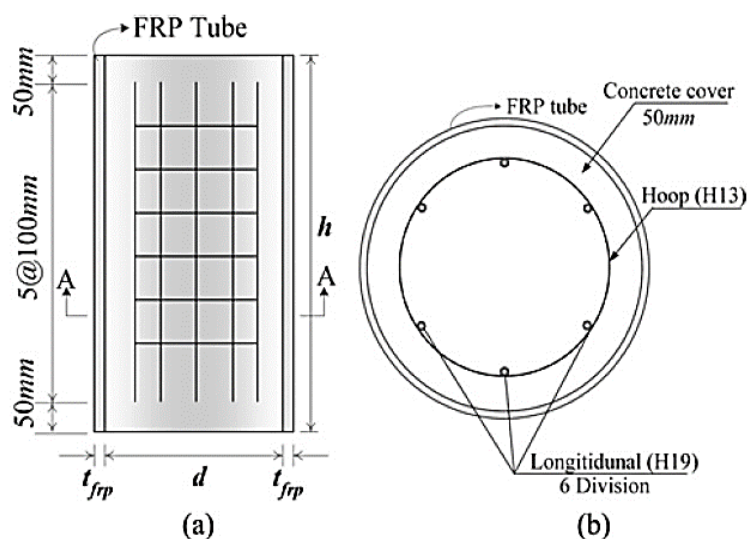
شابختی و همکاران در سال ۱۳۸۷ تحقیقی بر روی تعیین ظرفیت ستون‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP تحت بار محوری انجام دادند. آن‌ها ۵۰ ستون با مقاطع مختلف دایره‌ای، مربعی و مستطیلی که با استفاده از لایه‌های مختلف CFRP مقاوم‌سازی شده بودند، مورد بررسی قرار دادند و

2 Analysis System (ANSYS)

3 Abaqus

4 Kumutha et al.

1 Park et al.



شکل ۱۸. مقطع نمونه های مورد استفاده در تحقیق پارک و همکاران [۴۴]

Fig. 18. Cross section of specimens used in the research of Park et al. [44]

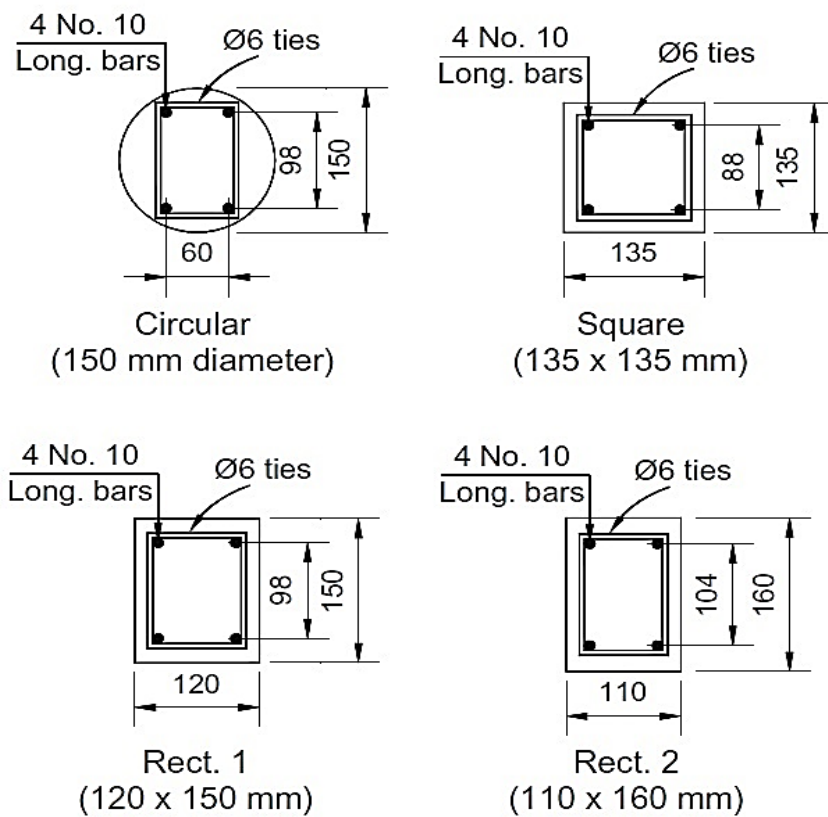
افزایش ۱۶٪ و ۴۱٪ شده است. همچنین مشاهده گردید که اثر دورپیچ بر ظرفیت نهایی ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی بیش‌تر است که این نتایج همخوانی نسبی با نتایج تحقیق مذکور دارند.

ال ماداوی و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۰ تاثیر شکل مقطع و نحوه بارگذاری را بر عملکرد ستون بتن مسلح محصور شده با CFRP تحت بار محوری بررسی کردند. آن‌ها ۳۲ ستون بتن مسلح با مقاطع دایره‌ای، مربعی و مستطیلی و با دو نسبت ابعاد مختلف (۱:۱/۲۵ و ۱:۱/۴۵) و به ارتفاع ۴۸۰ میلی‌متر را تحت بار محوری خالص قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش ظرفیت نهایی ستون محصور شده تحت بار محوری خالص از ۲۳٪ تا ۴۴٪ به ترتیب در مقاطع مستطیلی و دایره‌ای تغییر می‌کند [۴۹]. این افزایش ظرفیت در تحقیق حاضر در ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی ۲۹٪ است که همخوانی خوبی با نتایج تحقیق مذکور دارد. مقاطع استفاده شده در تحقیق ال ماداوی و همکاران در شکل ۱۹ و درصد افزایش ظرفیت فشاری نیز در شکل ۲۰ نشان داده شده‌اند.

حسینی واعظ و همکاران در سال ۱۳۹۴ یک بررسی فنی و اقتصادی به منظور جایگزینی بتن پرمقاومت با بتن معمولی در ساختمان‌های بتن‌آرمه انجام دادند. از آنجایی که باید جامعه بتن ایران در افق ۱۴۰۴، بتن با مقاومت ۵۰ مگاپاسکال را جایگزین بتن‌های امروزی کند، لزوم حرکت هر

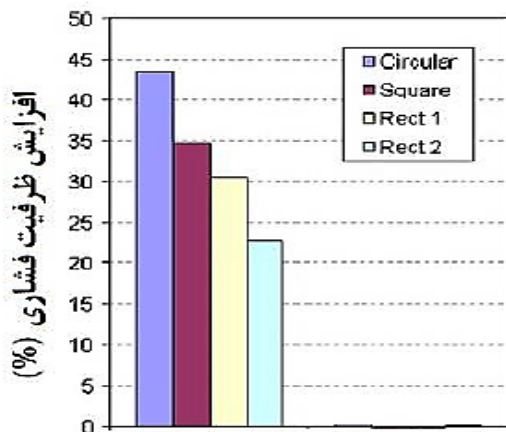
دورپیچ باعث افزایش ظرفیت فشاری نهایی به میزان ۳/۵٪، ۳/۰٪ و ۲/۹٪ و دو لایه دورپیچ ۲۶/۱٪، ۲۲/۶٪ و ۱۶/۲٪ به ترتیب برای ستون‌های مستطیلی با نسبت ابعاد مقطع ۱، ۱/۲۵ و ۱/۶۷ گردید [۴۷]. در تحقیق حاضر این مقدار افزایش ظرفیت نهایی برای یک لایه و دو لایه دورپیچ به ترتیب ۱۹/۷٪ و ۲۸/۷٪ می‌باشد که علت اختلاف نتایج را می‌توان به تفاوت موجود در شکل مقطع نسبت داد.

شهاوی و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۰ تحقیقی روی ستون‌های بتنی استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر ساخته شده از دو نوع بتن معمولی و پرمقاومت با مقاومت‌های فشاری ۱۹/۴ و ۴۹ مگاپاسکال و مقاومسازی شده با دورپیچ CFRP انجام دادند. نتایج نشان داد که تاثیر دورپیچ بر ستون‌های با مقاومت فشاری کم‌تر، بیش‌تر است. استفاده از ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ لایه دورپیچ در ستون‌های ساخته شده با بتن معمولی می‌تواند ظرفیت محوری را به میزان ۱/۷۴، ۲/۳۹، ۳/۲۳، ۳/۹ و ۴/۱۳ برابر افزایش دهد. همچنین استفاده از ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه دورپیچ در ستون‌های ساخته شده با بتن پرمقاومت، ظرفیت محوری را به میزان ۱/۲۱، ۱/۵۶، ۲/۰۲ و ۲/۳ برابر افزایش داد [۴۸]. در تحقیق حاضر نیز استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ در ستون‌های فاقد غلاف و ساخته شده از بتن معمولی به ترتیب باعث افزایش ۲۹٪ و ۳۶٪ و در ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت نیز باعث



شکل ۱۹. مقاطع نمونه های استفاده شده در تحقیق ال ماداوی و همکاران [۴۹]

Fig. 19. Cross section of specimens used in the research of El Madawi et al. [49]



شکل ۲۰. درصد افزایش ظرفیت فشاری ستون ها استفاده شده در تحقیق ال ماداوی و همکاران [۴۹]

Fig. 20. Percentage increase in the compressive capacity of the columns used in the research of El Madawi et al. [49]

چه سریع تر به این مقصود امری ضروری به نظر می رسد. لذا این محققان به بررسی و مقایسه فنی و اقتصادی بین هزینه اضافه در بتن پر مقاومت نسبت به صرفه جویی به دلیل کاهش ابعاد اعضای سازه، افزایش دوام و عمر سازه و کاهش مصرف آرماتور پرداختند. برای انجام این تحقیق با مدل سازی و طراحی دو ساختمان بتنی ۶ طبقه یکسان که در سازه اول در تمام اعضا از بتن معمولی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال و در سازه دوم در برخی اعضا از بتن با مقاومت بالا به میزان ۴۰ مگاپاسکال استفاده شده بود، به متری و مقایسه هزینه تمام شده این دو سازه پرداختند. نتایج نشان داد که جایگزینی بتن با مقاومت بالا در تیرچه ها و ستون ها موجب نزدیک شدن هزینه تمام شده دو سازه نسبت به یکدیگر خواهد شد [۵۰]. نتایج تحقیق حاضر از منظر مقایسه فنی و اقتصادی همخوانی خوبی با نتایج تحقیق حسینی واعظ و همکاران دارد.

جدول ۱۰. مقایسه فنی و اقتصادی ستون های تحقیق

Table 10. Technical and economic comparison of research columns

نام نمونه	هزینه قالب - بندی، آرما توری بندی و بتن ریزی (ریال)	غلاف GRP (m)	هزینه غلاف GRP (ریال)	CFRP (m <sup>2</sup> )	هزینه CFRP (ریال)	هزینه ساخت ستون (ریال)	نسبت هزینه ساخت ستون به هزینه ستون N	نسبت مقاومت ستون به مقاومت ستون N
N	۳,۰۰۰,۰۰۰	--	--	--	--	۳,۰۰۰,۰۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰
NF1	۳,۰۰۰,۰۰۰	--	--	--	--	۴,۲۰۰,۰۰۰	۱.۴۰	۱.۲۹
NF2	۳,۰۰۰,۰۰۰	--	--	--	--	۵,۴۰۰,۰۰۰	۱.۸۰	۱.۳۶
GN	۲,۹۵۰,۰۰۰	۰.۶	۳۵۰,۰۰۰	--	--	۶,۴۵۰,۰۰۰	۲.۱۵	۴.۵۵
GNF1	۲,۹۵۰,۰۰۰	۰.۶	۳۵۰,۰۰۰	۰.۶	۱۲۰,۰۰۰	۷,۶۵۰,۰۰۰	۲.۵۵	۵.۰۰
GNF2	۲,۹۵۰,۰۰۰	۰.۶	۳۵۰,۰۰۰	۱.۲	۲۴۰,۰۰۰	۸,۸۵۰,۰۰۰	۲.۹۵	۵.۵۱
H	۳,۲۰۰,۰۰۰	--	--	--	--	۳,۲۰۰,۰۰۰	۱.۰۷	۱.۳۶
HF1	۳,۲۰۰,۰۰۰	--	--	۰.۶	۱,۲۰۰,۰۰۰	۴,۴۰۰,۰۰۰	۱.۴۷	۱.۵۷
HF2	۳,۲۰۰,۰۰۰	--	--	۱.۲	۲,۴۰۰,۰۰۰	۵,۶۰۰,۰۰۰	۱.۸۷	۱.۹۱
GH	۳,۱۵۰,۰۰۰	۰.۶	۳۵۰,۰۰۰	--	--	۶,۶۵۰,۰۰۰	۲.۲۲	۵.۲۱
GHF1	۳,۱۵۰,۰۰۰	۰.۶	۳۵۰,۰۰۰	۰.۶	۱,۲۰۰,۰۰۰	۷,۸۵۰,۰۰۰	۲.۶۲	۵.۵۳
GHF2	۳,۱۵۰,۰۰۰	۰.۶	۳۵۰,۰۰۰	۱.۲	۲,۴۰۰,۰۰۰	۹,۰۵۰,۰۰۰	۳.۰۲	۶.۰۷

۴-۵- ارزیابی فنی و اقتصادی

در ادامه با ارزیابی هزینه های انجام شده جهت ساخت ستون ها و تعیین ظرفیت نهایی هر ستون مقایسه فنی و اقتصادی انجام شد [۴۰]. در جدول ۱۰ نسبت هزینه های ساخت ستون های تحقیق و تاثیر آن ها بر ظرفیت نهایی آن ها ارائه شده است. نسبت هزینه ساخت و ظرفیت نهایی هر یک از ستون ها به هزینه و ظرفیت نهایی ستون N و مقایسه آن ها در شکل ۲۱ ارائه شده است.

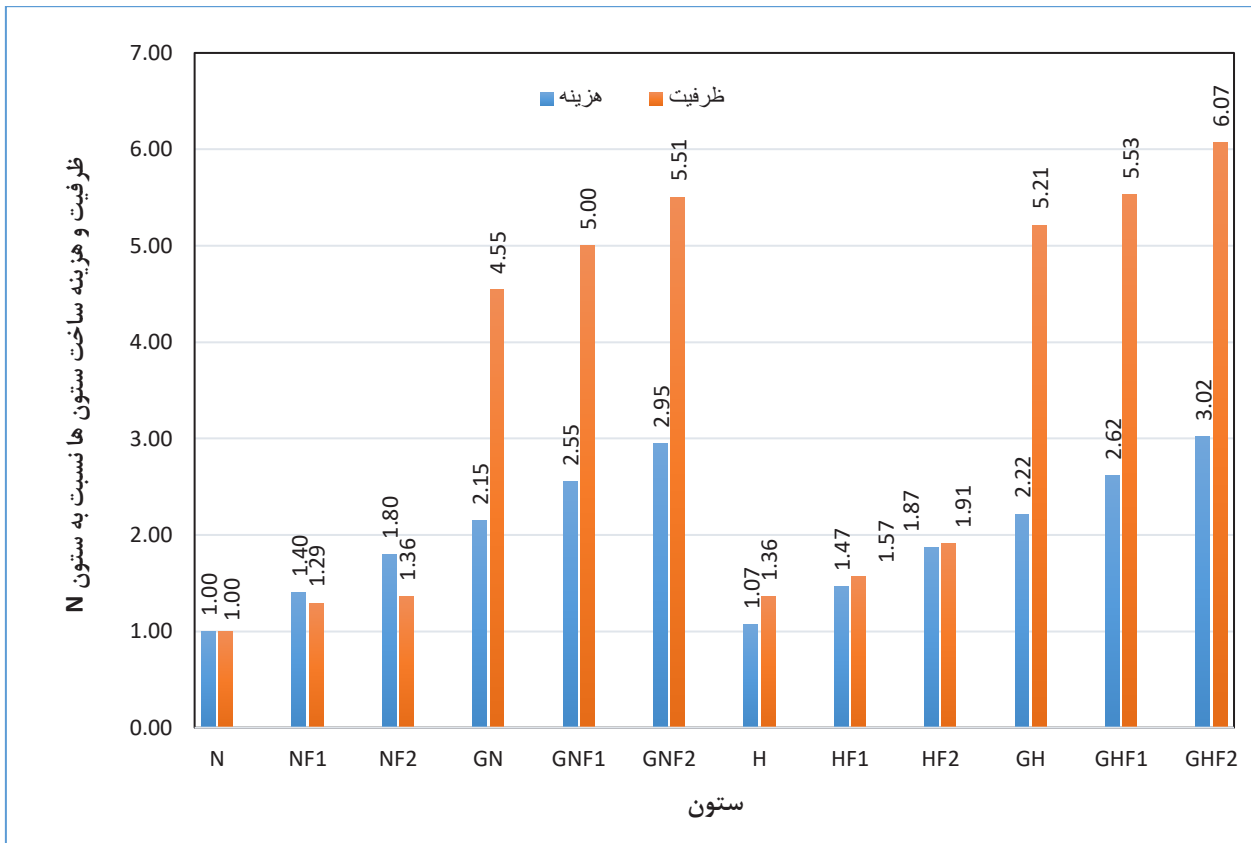
بررسی شکل ۲۱ نشان می دهد که نسبت ظرفیت نهایی فشاری ایجاد شده توسط دورپیچ های CFRP در ستون های فاقد غلاف کم تر از نسبت هزینه انجام شده ساخت ستون ها می باشد، در حالی که در ستون های دارای غلاف GRP، افزایش ظرفیت ایجاد شده بیش تر از هزینه انجام شده برای غلاف های آن ها می باشد. به طور میانگین افزایش ظرفیت حدود ۲/۰۶ برابر افزایش هزینه ساخت نسبت به ستون های مشابه بدون غلاف بوده است، لذا استفاده از غلاف جهت افزایش مقاومت ستون های بتن مسلح بیضی شکل مقرون به صرفه می باشد. هم چنین مشهود است که استفاده از دورپیچ، در

ستون های دارای غلاف مقرون به صرفه نیست، زیرا ظرفیت فشاری ایجاد شده ناشی از مقاوم سازی با این دورپیچ کم تر از هزینه انجام شده می باشد. از بین ستون های بررسی شده ستون های دارای غلاف و فاقد دورپیچ، یعنی ستون های GN و GH بیش ترین نسبت افزایش ظرفیت فشاری به هزینه ساخت به ترتیب به مقدار ۲/۱۲ و ۲/۳۵ برابر را دارند، لذا این ستون ها را به عنوان اقتصادی ترین ستون ها برای اجراء می توان پیشنهاد نمود.

۵- نتیجه گیری

نتیجه کلی این تحقیق معرفی یک نوع جدید از ستون های بتن آرمه بیضی شکل مرکب دارای غلاف GRP و دورپیچ CFRP می باشد. نتایج رضایت بخش استفاده از غلاف بیضی شکل نشان داد که این غلاف می تواند در اجرای پایه پل ها و ساختمان های جدید استفاده شود، هم چنین دورپیچ می تواند به منظور تقویت ستون های بتنی موجود که به دلیل استفاده از آیین نامه های طراحی قدیمی و یا به دلایل اجرایی دچار ضعف هستند، برای افزایش ظرفیت و سختی و ارتقاء عملکرد استفاده شوند.





شکل ۲۱. مقایسه افزایش ظرفیت و هزینه ساخت ستون ها نسبت به ستون N

Fig. 21. Comparison of increase in capacity and construction cost of columns compared to column N

۳- افزایش تعداد لایه‌های دورپیچ CFRP موجب افزایش ظرفیت نیروی فشاری ستون‌های بتن‌آرمه بیضی شکل گردید، به طوری که میانگین افزایش ظرفیت ناشی از کاربرد یک لایه و دو لایه دورپیچ نسبت به ستون‌های مشابه فاقد دورپیچ در ستون‌های با بتن معمولی به ترتیب  $19/7\%$  و  $28/7\%$  و در ستون‌های با بتن پرمقاومت  $11/0\%$  و  $28/7\%$  می‌باشد. مشهود است که تاثیر دورپیچ بر ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی بیش تر است.

۴- تغییر مکان محوری نهایی ستون‌های بتن‌آرمه بیضی شکل با دورپیچ CFRP در مقایسه با ستون‌های فاقد دورپیچ بیش تر است. به طوری که استفاده از یک لایه و دو لایه الیاف باعث افزایش تغییر مکان محوری نهایی به ترتیب در ستون‌های با بتن معمولی  $22/7\%$  و  $45/6\%$  و در ستون‌های با بتن پرمقاومت  $18/8\%$  و  $28/7\%$  گردید.

۵- استفاده از غلاف GRP باعث افزایش تغییر مکان محوری نهایی ستون‌های بتن‌آرمه بیضی شکل به مقدار زیادی شده به گونه‌ای که میانگین

نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

۱- استفاده از GRP به عنوان قالب و غلاف تقویتی ستون‌های بتن‌آرمه بیضی شکل باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت فشاری آن‌ها گردید، به طوری که ظرفیت فشاری ستون‌های دارای غلاف نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف، به ترتیب و به طور میانگین در ستون‌های ساخته شده از بتن‌های معمولی و پرمقاومت  $315\%$  و  $251\%$  بیش تر بوده است.

۲- تقویت ستون‌های بتن‌آرمه با دورپیچ CFRP باعث افزایش ظرفیت فشاری ستون‌ها می‌شود. به طور میانگین استفاده از دورپیچ در ستون‌های فاقد غلاف GRP و ساخته شده از بتن‌های معمولی و پرمقاومت به ترتیب به میزان  $33\%$  و  $10\%$  و در ستون‌های دارای غلاف و ساخته شده از بتن‌های معمولی و پرمقاومت به ترتیب به میزان  $28\%$  و  $11\%$  افزایش نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که تاثیر دورپیچ بر افزایش ظرفیت ستون‌های فاقد غلاف و ساخته شده از بتن پرمقاومت کم تر می‌باشد.

August 1-6, 2004.

[4] Hosinieh, M.M., Aoude, H., Cook, W.D., Mitchell, D., "Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under pure axial loading", *Engineering Structures*, Vol. 99, pp. 388–401, 2015.

[5] Hasan, H.A., Sheikh, M.N., Hadi, M.N.S., "Performance evaluation of high strength concrete and steel fibre high strength concrete columns reinforced with GFRP bars and helices", *Construction and Building Materials*, Vol. 134, pp. 297-310, 2017.

[6] Zeng, J.J., Guo, Y. Ch., Guo, W.Y., Chen, W.P., Li, L.J., "Stress-Strain Behavior of Circular Concrete Columns Partially Wrapped with FRP Strips", *Composite Structures*, Vol. 200, pp. 810–828, 2018.

[۷] اجتماعی، ب.، توکلی‌زاده، م.، ر.، قدس، ا.، ص.، " بررسی اثر دور پیچ GFRP به صورت نوارهای مجزا در رفتار ستون‌های بتن آرمه"، هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، مهرماه ۱۳۹۵.

[8] Santandrea, M., Imohamed, I.A.O., Jahangir, H., Carloni, C., Mazzotti, C., De Miranda, S., Ubertini, F., Savoia, M., Casadei, P., "An Investigation of the Debonding Mechanism in Steel FRP and FRCM Concrete Joints" *The New Boundaries of Structural Concrete Conference*, Capri Island, Italy, 2016.

[۹] جهانگیر، ه.، اصفهانی، م.، ر.، " رابطه‌سازی کرنش کامپوزیت‌های نوین الیافی در آزمون‌های خمشی"، نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۵، شماره ۳، صص ۱۰۷ - ۹۲، ۱۳۹۷.

[۱۰] برقیان، م.، فرزام، م.، رضانی، پ.، "نمودار اندرکنش ستون بتنی مسلح توخالی محصور با FRP"، نشریه علمی - پژوهشی مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۸، شماره ۱، صص ۶۴ - ۵۳، ۱۳۹۵.

[11] Seffo, M., Hamcho, M., "Strength of Concrete Cylinder Confined by Composite Materials (CFRP)", *Energy Procedia*, Vol. 19, pp. 276–285, 2012.

[12] Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., El Echary, H., Mastrapa, J.C., Pico, O., "Effect of column parameters on FRP-confined concrete", *Journal of Composites for Construction*, Vol.2, No.4, pp. 175–185, 1998.

این افزایش در ستون‌های دارای غلاف نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف برای ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی ۳۱۳٪ و ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت ۲۸۷٪ بوده است. لذا تاثیر استفاده از غلاف بر تغییر مکان محوری نهایی ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی بیش‌تر است.

۶- بررسی نحوه شکست ستون‌های بتن آرمه بیضی شکل نشان داد که اکثر ستون‌ها در اثر کمناش میلگردهای طولی دچار گسیختگی شدند. در ستون‌های فاقد غلاف GRP گسیختگی اکثرا موضعی و تدریجی اتفاق افتاد. در این ستون‌ها گسیختگی در یکی از دو انتهای ستون رخ داد که علت آن را می‌توان محصوریت کم‌تر هسته بتنی در دو انتهای ستون از سوی شبکه میلگردها دانست. در حالی که در ستون‌های دارای غلاف گسیختگی کامل و به صورت انهدام و با صدای انفجار در کل طول ستون واقع شد، که علت آن را می‌توان در میزان بسیار زیاد محصوریت ناشی از غلاف دانست؛ این میزان محصوریت باعث جلوگیری از کمناش زود هنگام میلگردها، رسیدن تمام نقاط ستون به حداکثر کرنش قابل تحمل خود، کمناش میلگردهای طولی، قطع میلگرد ماریچ و نهایتا گسیختگی ستون گردید.

۷- ارزیابی فنی و اقتصادی ستون‌های تحقیق نشان داد که استفاده از غلاف GRP جهت مقاوم‌سازی ستون‌ها بسیار مقرون به صرفه‌تر از کاربرد دور پیچ CFRP می‌باشد، به طوری که افزایش ظرفیت در ستون‌های دارای غلاف بیش‌تر از هزینه انجام شده برای مقاوم‌سازی آن‌ها است، ولی نسبت افزایش ظرفیت حاصل از دور پیچ در ستون‌های با و بدون غلاف به هزینه صرف شده جهت مقاوم‌سازی با این مصالح، کم‌تر بوده است. بیش‌ترین نسبت افزایش ظرفیت فشاری به هزینه ساخت، مربوط به ستون‌های دارای غلاف و فاقد دور پیچ، یعنی ستون‌های GN و GH است، لذا می‌توان آن‌ها را به عنوان اقتصادی‌ترین ستون‌ها برای اجراء پیشنهاد نمود.

## منابع

[۱] "سند جامع چشم‌انداز بتن ۱۴۰۴ کشور"، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران، ۱۳۹۲.

[۲] جانمیان، ک.، "تولید صنعتی بتن با مقاومت بالا"، انتشارات علم عمران، چاپ اول، صص ۱۵-۱۲، ۱۳۹۰.

[3] Ozbakkaloglu, T., Saatcioglu, M., "Seismic Performance of High-Strength Concrete Columns Cast in Stay-in-Place for Formwork", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper NO. 2719,

- confined RAC under axial and eccentric loading with and without expansive agent”, *Construction and Building Materials*, Vol. 73, pp. 575–585, 2014.
- [۲۳] حسن‌زاده، ی.، حکیم‌زاده، ح.، عیاری، ش.، " بررسی اثر اشکال مختلف پایه‌های پل بر الگوی جریان اطراف آن با استفاده از نرم‌افزار **Fluent** "، تحقیقات منابع آب ایران، سال هفتم، شماره سوم، ۱۳۹۰.
- [24] Uenaka, K., “Experimental study on concrete filled elliptical/oval steel tubular stub columns under compression”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 78, pp. 131-137, 2014.
- [25] Shen, Q., Wang, J., Wang, W., Wang, Zh., “Performance and design of eccentrically-loaded concrete-filled rounded elliptical hollow section stub columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 150, pp. 99-114, 2018.
- [26] Uenaka, K., Tsunokake, H., Gardner, L., “Concrete filled elliptical steel tubular members with large diameter-to-thickness ratio subjected to bending “, *Engineering Structures*, Vol. 5, pp. 58-66, 2016.
- [27] Jamaluddin, N., Lam, D., Dai, X.H., Ye, J., “An experimental study on elliptical concrete filled columns under axial compression”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 87, pp. 6-16, 2013.
- [28] Mccann, F., Gardner, L., Qiu, W., “Experimental study of slender concrete-filled elliptical hollow section beam-columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 113, pp. 185-194, 2015.
- [29] Yanga, H., Liua, F., Chanc, T. M., Wang, W., “Behaviours of concrete-filled cold-formed elliptical hollow section beamcolumns with varying aspect ratios”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 120, pp. 9-28, 2017.
- [30] Hadi, M.N.S., Wang, W., Sheikh, M.N, “ Axial compressive behaviour of GFRP tube reinforced concrete columns”, *Construction and Building Materials*, Vol. 81, pp. 198–207, 2015.
- [31] Xiao, J., Tresserras, J., Tam, V.W.Y., “GFRP-casing confined RAC under axial and eccentric loading with
- [13] Ozbakkaloglu, T., “Axial Compressive Behavior of Square and Rectangular High-Strength Concrete-Filled FRP Tubes», *journal of composites for construction*, Vol. 17, pp. 151-161, 2013.
- [14] EL Maaddawy, T., EL Sayed, M., Abdel-Magid, B., "The effects of cross-sectional shape and loading condition on performance of reinforced concrete members confined with Carbon Fiber-Reinforced Polymers», *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 2330–2341, 2010.
- [15] Ozbakkaloglu, T., Xie, T., “Geopolymer concrete-filled FRP tubes: Behavior of circular and square columns under axial compression», *Composites Part B*, Vol. 96, pp. 215-230, 2016.
- [16] Mirmiran, A., Shahawy, M., “A new concrete-filled hollow FRP composite column», *Composites Part B*, Vol. 27B, pp. 263-268, 1996.
- [17] Kusumawardaningsih, Y., Hadi, M.N.S., “Comparative behaviour of hollow columns confined with FRP composites», *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 198–205, 2010.
- [18] Almusallam, T.H., “Behavior of normal and high-strength concrete cylinders confined with E-glass/epoxy composite laminates», *Composites Part B*, Vol.38, pp. 629–639, 2007.
- [19] Vincent, T., Ozbakkaloglu, T., "Influence of concrete strength and confinement method on axial compressive behavior of FRP confined high- and ultra high-strength concrete», *Composites: Part B*, Vol. 50, pp. 413–428, 2013.
- [20] Teng, J. G., Lam, L., “Compressive Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete in Elliptical Columns”, *Engineering Structures*, Vol. 128, pp. 1535-1543, 2002.
- [21] Domingo, A.M., Chris, P.P., “Elliptical and circular FRP-confined concrete sections: A Mohr–Coulomb analytical model”, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, pp. 881-898, 2012.
- [22] Xiao, J., Tresserras, J., Tam, V.W.Y., “GFRP-tube

- [42] Hassanein, M.F., Patel, V.I., Hadidy, A.M.E., Abadi, H.A., Elchalakani, M., "Structural behaviour and design of elliptical high-strength concrete-filled steel tubular short compression members", *Engineering Structures*, Vol. 173, pp. 495-511, 2018.
- [۴۳] مستوفی‌نژاد، د.، سلجوقیان اصفهانی، ع.ر.، "بررسی رفتاری محوری و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه با مقطع مربعی، محصور شده با کامپوزیت CFRP"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل، اردیبهشت ماه ۱۳۹۳.
- [44] J.H, Park., B.W, Jo., S.J, Yoon., S.K, Park., "Experimental investigation on the structural behavior of concrete filled FRP tubes with/without steel re-bar", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 337-345, 2011.
- [۴۵] شایختی، ن.، قلعه‌نوعی، م.، شهرکی، م.، "تعیین ظرفیت ستون‌های مقاوم‌سازی شده با FRP تحت بار محوری"، اولین کنفرانس بین‌المللی، تبریز، ایران، ۲۹ مهرماه الی ۱ آبان ماه ۱۳۸۷.
- [۴۶] پوراهوازی، پ.، گندمکار، ف.، ع.، "مطالعه عددی رفتاری ستون‌های فولادی بیضوی پرشده با بتن تحت نیروی فشاری محوری"، چهارمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دبیرخانه دائمی کنفرانس، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۵.
- [47] Kumutha, R., Vaidyanathan, R., Palanichamy, M., "Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP", *Cement and concrete composites*, Vol. 29, No. 8, pp. 609-615, 2007.
- [48] Shahawy, M., Mirmiran, A., Beitelman. T., "Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 31, No. (6-7), pp. 471-480, 2000.
- [49] El Maaddawy, T., El Sayed., M., Abdel-Magid, B., "The effects of cross-sectional shape and loading condition on performance of reinforced concrete members confined with carbon fiber-reinforced polymers", *Materials & Design*, Vol. 23, No. 5, pp. 2330-2341, 2010.
- [۵۰] حسینی واعظ، س.ر.، خانی، ع.، اردکانی، ا.، برزگر سلوکلائی، ح.، باقری، ب.، "بررسی فنی و اقتصادی جایگزینی بتن پرمقاومت در ساختمان‌های بتن‌آرمه"، هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن، تهران، مرداد ۱۳۹۴.
- and without expansive agent", *Construction and Building Materials*, Vol. 73, pp. 575-585, 2014.
- [32] Huang, L., Sun, X., Yan, L., Kasal. B., "Impact behavior of concrete columns confined by both GFRP casing and steel spiral reinforcement", *Construction and Building Materials*, Vol. 131, pp. 438-448, 2017.
- [33] Bagheri, M., Chahkandi, A., Jahangir, H., "Seismic Reliability Analysis of RC Frames Rehabilitated by Glass Fiber-Reinforced Polymers" *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, pp. 1785-1797, 2019.
- [34] ASTM D7565/D7565M-10, Standard test method for determining tensile properties of fibre reinforced polymer matrix composites used for strengthening of civil structures, United States: ASTM International, 2010.
- [35] ASTM D2996-01, Standard Specification for Filament-Wound Fiberglass (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe, ASTM Committee D29; 2001.
- [36] ASTM D638-02, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM Committee D63; 2002.
- [37] ACI Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (Reapproved 2009), ACI 211.1-91. Farmington Hills, MI, USA, 1991.
- [38] <https://www.ahanpakhsh.com>
- [39] BS 8110, Structural use of concrete Part 1, Code of practice for design and construction, in, British Standard Institution, London, 1997.
- [40] Shafieinia, M., Sajedi, F., "Evaluation and comparison of GRP and FRP applications on the behavior of RCCs made of NC and HSC", *smart structures and systems*, Vol. 23, No. 5, pp. 495-506, 2019.
- [41] Sajedi, F., Shariati, M., "Behavior study of NC and HSC RCCs confined by GRP casing and CFRP wrapping", *Steel and Composite Structures*, Vol. 30, No. 5, pp. 417-432, 2019.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. M. Raghpour, S. F. Sajedi, A. Dalvand, Evaluation and comparison of capacity and rupture of elliptical columns, with and without casing, and application of single-layer and double-layer wrapping, under pure axial pressure, Amirkabir J. Civil Eng., 54(3) (2022) 1029-1056.*

**DOI:** 10.22060/ceej.2021.19193.7099

