

## Experimental and numerical comparison of the behaviour of elliptic RCC's made of NC and HSC with and without casing and wrapping, under axial load

Seyed Fathollah Sajedi<sup>\*1</sup>, Mohamad Morad Raghpour<sup>2</sup>

1- Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

2- PhD student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

### ABSTRACT

In this study, the numerical and experimental results of the behaviour of RCC's with an elliptic cross-section made of NC and HSC enclosed by a GRP casing and a CFRP wrapping were compared. Behaviour refers to the compressive capacity and ductility of columns. The effect of concrete type, casing, wrapping and layers number, were investigated. 12 columns with 200\*120 diameter and 600 mm height were made. The columns were divided into two groups from NC and HSC, and each group was divided into two part of three; the first part had a casing and the second without casing. Each part had a column without wrapping, 2<sup>nd</sup> with one layer, and 3<sup>rd</sup> column with two layers. Numerical modelling was performed with ABAQUS software and the results were compared with experimental results, which were well matched. The results showed that the wrapping and casing improved the behaviour of the columns. Addition of one layer and two layers of wrapping on average in the experimental method causes an increase of 19.7% and 28.7% in the CC in the 1<sup>st</sup> group and 11% and 28.7% in the 2<sup>nd</sup> group and in the numerical method causes an increase of 19.9% and 36.6% in CC in the 1<sup>st</sup> group and 16.8% and 30.9% in the 2<sup>nd</sup> group. Averagely, the use of casing increased the capacity in the experimental method by 4.15 times in the 1<sup>st</sup> group and 3.51 times in the 2<sup>nd</sup> group; in the numerical method; this increase in the capacity in the 1<sup>st</sup> group was 4.26 times and in the 2<sup>nd</sup> group was 3.25 times. Although the casing and the wrapping both create confinement, comparison showed that the casing, due to its greater confinement, has a much greater effect on improving the behaviour of columns, especially columns made of NC.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 24 August 2021

**Revise Date:** 08 February 2022

**Accept Date:** 24 April 2022

### Keywords:

Elliptic reinforced concrete column, Behaviour, High strength concrete (HSC), GRP casing, CFRP wrapping, ABAQUS

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.301216.2543>

\*Corresponding author: Seyed Fathollah Sajedi

Email address: [sajedi@iauahvaz.ac.ir](mailto:sajedi@iauahvaz.ac.ir)

## بتن آرمه بیضی شکل ساخته شده از بتن - های مقایسه عددی و آزمایشگاهی رفتار ستون تحت بار محوری دورپیچ و های معمولی و پرمقاومت با و بدون غلاف

سیدفتح اله ساجدی<sup>۱\*</sup>، محمدمراد راغ پور<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- دانشجوی دکتری عمران - سازه، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

### چکیده

در این تحقیق به مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی رفتار ستون های بتن آرمه با مقطع بیضی ساخته شده از بتن های معمولی و پرمقاومت که توسط غلاف پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه<sup>۱</sup> و دورپیچ الیاف پلیمری تقویتی کربن<sup>۲</sup>، محصور شدند، پرداخته شد. منظور از رفتار، ظرفیت فشاری و شکل پذیری ستون ها است. تأثیر نوع بتن، غلاف، دورپیچ و تعداد لایه های آن بررسی شدند. ۱۲ ستون به قطرهای ۲۰۰ و ۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی متر ساخته شدند. ستون ها به دو گروه ۶ تایی از بتن های معمولی و پرمقاومت، و هر گروه نیز به دو بخش ۳ تایی تقسیم شدند؛ بخش اول دارای غلاف و بخش دوم فاقد غلاف بودند. از هر بخش یک ستون فاقد دورپیچ، یک ستون یک لایه و ستون دیگر دو لایه داشتند. مدل سازی عددی با نرم افزار آباکوس<sup>۳</sup> انجام گردید و نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند که تطابق خوبی بین آن ها به دست آمد. نتایج تحقیق نشان داد که دورپیچ و غلاف باعث بهبود رفتار ستون ها گردیدند. افزودن یک لایه و دو لایه دورپیچ به طور میانگین در روش آزمایشگاهی سبب افزایش ۱۹/۷٪ و ۲۸/۷٪ در ظرفیت فشاری در گروه اول و ۱٪ و ۲۸/۷٪ در گروه دوم و در روش عددی سبب افزایش ۱۹/۹٪ و ۳۶/۶٪ در ظرفیت فشاری در گروه اول و ۱۶/۸٪ و ۳۰/۹٪ در گروه دوم گردید؛ کاربرد غلاف میانگین افزایش ظرفیت ستون ها در روش آزمایشگاهی در گروه اول به میزان ۴/۱۵ برابر و در گروه دوم ۳/۵۱ برابر و در روش عددی در گروه اول به میزان ۴/۲۶ برابر و در گروه دوم ۳/۲۵ برابر را نتیجه داد. هرچند که دورپیچ و غلاف هر دو محصوریت ایجاد می کنند، اما مقایسه اثر محصوریت غلاف با دورپیچ نشان داد که غلاف به خاطر محصوریت بیشتر، تأثیر بسیار زیادتری بر بهبود رفتار ستون ها به ویژه ستون های ساخته شده از بتن معمولی دارد.

کلمات کلیدی: ستون بتن آرمه بیضی شکل، رفتار، بتن پرمقاومت، غلاف GRP، دورپیچ CFRP، آباکوس

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.301216.2543	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.301216.2543	۱۴۰۱/۱۱/۳۰	۱۴۰۱/۰۲/۰۴	۱۴۰۱/۰۲/۰۴	۱۴۰۰/۱۱/۱۹	۱۴۰۰/۰۶/۰۲
سیدفتح اله ساجدی sajedi@iauhvaz.ac.ir					* نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

<sup>1</sup> Glass-fibre Reinforced Plastic Pipes (GRP)

<sup>2</sup> Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP)

<sup>3</sup> ABAQUS

## ۱- مقدمه

امروزه استفاده از بتن پرمقاومت<sup>۴</sup> در ساخت سازه‌های مختلف به ویژه ساختمان‌های بلند، در کشورهای پیشرفته دنیا رواج یافته است. از جمله مزایای این بتن‌ها می‌توان به مقاومت‌های فشاری و کششی بالا، ضریب ارتجاعی بیش‌تر و نفوذپذیری کم‌تر آن‌ها اشاره کرد. از عوامل موثر در رسیدن به مقاومت‌های بالا در بتن، استفاده از شن و ماسه مقاوم و با شکل مناسب، افزایش عیار سیمان مصرفی، محدودیت در اندازه بزرگترین سنگدانه، استفاده از ماسه با مدول نرمی مناسب و نسبت آب به سیمان مناسب برای همگنی بیش‌تر آن می‌باشد. همچنین با استفاده از مواد بسیار ریزدانه و با اندازه‌هایی کم‌تر از دهم میکرون مانند میکروسیلیس می‌توان بتن متراکم‌تر و با تخلخل بسیار کم را تهیه نمود. در بتن‌های پرمقاومت بایستی تا حد امکان نسبت آب به سیمان را کاهش و چگالی را افزایش داده تا مقاومت بیش‌تری به دست آید. برای تامین روانی و کارایی کافی در چنین مخلوط‌هایی که با آب بسیار کم تهیه می‌شوند، لازم است از فوق روان‌کننده‌ها استفاده شود [۱].

تاکنون تحقیقات زیادی بر عملکرد پایداری ستون‌های بتنی ساخته شده از بتن پرمقاومت با دورپیچ ورق‌های کربنی پلیمری تقویت‌ی ۵ 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 قابل توجهی 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 [۲-۴]. 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 موده‌های 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 سازه‌های استفاده می‌شوند. در کنار این برتری‌ها، مقاومت کم در برابر آتش، ناتوانی در اعمال بر روی سطح‌های مرطوب و در دماهای پایین را می‌توان از کاستی‌های کامپوزیت‌های CFRP دانست. از این رو کامپوزیت‌های نوین پایه سیمانی تقویت شده با الیاف ۶ 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 رابطه‌هایی برای محاسبه کرنش الیاف پیشنهاد گردید [۵-۸]. 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 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 [۹-۱۰]. 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 محصورشدگی قرار نمی‌گیرند، زیرا در این مقاطع بر خلاف مقاطع دایره‌ای فشار محصورکننده یکنواخت نیست و ستون‌های مربعی نسبت به ستون‌های دایره‌ای در نقطه کرنش حداکثر، تنش نهایی کم‌تری را تحمل می‌نمایند به طوری‌که تاثیر الیاف CFRP بر ظرفیت فشاری مقاطع دایره‌ای حدود ۴/۵ برابر مقاطع مربعی بود، چرا که در مقاطع دایره‌ای فشار محصورکننده یکنواخت است، ولی در مقاطع مربعی این فشار از بیش‌ترین مقدار در گوشه به کم‌ترین مقدار در میانه اضلاع

<sup>4</sup> High Strength Concrete (HSC)

<sup>5</sup> Carbon-fibres reinforced polymers (CFRP)

<sup>6</sup> Fibre reinforced cementitious matrix

تغییر می‌کند. هم چنین آن‌ها به بررسی شکل‌پذیری ستون‌های مورد مطالعه پرداختند و نتیجه گرفتند که ستون‌های با مقطع دایره‌ای افزایش شکل‌پذیری بیش‌تری نسبت به ستون‌های مربعی دارند. به‌طوری‌که تاثیر الیاف GFRP بر شکل‌پذیری مقاطع دایره‌ای حدود ۳ برابر مقاطع مربعی بود. علت این امر را می‌توان در توزیع یکنواخت فشار محصورکننده مقاطع دایره‌ای دانست [۱۴-۱۱]. به علاوه بررسی ستون‌های بتن مسلح توخالی محصورشده 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 ستون‌ها علاوه بر دوام بسیار عالی، مقاومت و شکل‌پذیری بالایی نیز داشتند [۱۶-۱۵]. 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 محصورکننده نسبت به مقاومت فشاری بتن دانست [۱۸-۱۷]. روش محصورسازی ستون‌های بتن مسلح با CFRP برای ستون‌های با مقطع دایروی بسیار موثر می‌باشد اما اثر بخشی آن برای ستون‌های مستطیلی بسیار کاهش می‌یابد، یک امکان برای افزایش این اثر بخشی تبدیل مقطع مستطیل به بیضی می‌باشد، تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که ظرفیت فشاری قابل توجهی برای مقاطع کاملاً بیضی به دست می‌آید، ظرفیت فشاری محوری بتن محصورشده با CFRP در ستون‌های بیضی را می‌توان با استفاده از فرم معمول مدل‌های مقاومت برای بتن محصورشده با CFRP در ستون‌های دایره‌ای با جایگزینی فشار محصورکننده با فشار محصورکننده 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 براساس معیار موهر-کلمب ۷ ارائه گردید [۱۹-۲۰].

یکی دیگر از روش‌های تقویت ستون‌ها استفاده از لوله به شکل غلاف می‌باشد. تا به حال تحقیقات مختلفی در استفاده از لوله‌های پلاستیکی ۸ 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 کم‌اندامش می‌شود [۲۱]. 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 آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل‌ها می‌باشد [۲۲]. تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص رفتار ستون‌های فولادی بیضی پر شده با بتن تحت نیروی فشاری انجام شده است. در اکثر مطالعات انجام شده موده‌های شکست به صورت کم‌اندامش موضعی در لوله‌های فلزی و گسیختگی برشی در بتن پرکننده 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 کم‌اندامش خمشی کلی اتفاق افتاد، اما در اکثر موارد تسلیم موضعی فولاد قبل از کم‌اندامش نهایی رخ داده است، و ستون‌های بتنی با مقاومت 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 [۲۶-۲۳]. 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 [۲۸-۲۷]. تحقیقات انجام شده بر ستون‌های بتنی با غلاف GRP نشان داده که این ستون‌ها از حیث ظرفیت فشاری، سختی و شکل‌پذیری عملکرد مناسبی دارند، استفاده از لوله‌های GRP جهت محصوریت ستون‌ها باعث افزایش ظرفیت فشاری، کاهش لاغری و افزایش مقاومت در برابر کم‌اندامش می‌شود [۲۹]؛ 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 نتایج آزمون نشان داد که الگوی شکست این ساختار ترکیبی به شدت وابسته به سطح انرژی ضربه است. به‌علاوه افزایش ضخامت لوله و نسبت حجمی فولاد تقویتی به بتن توانایی مقاومت در برابر ضربه را به مقدار قابل توجهی افزایش

<sup>7</sup> Mohr-Coulomb criterion

<sup>8</sup> Poly Vinyl Chloride (PVC)

می‌دهد، و با توجه به اینکه از دورپیچ GFRP برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح استفاده می‌شود تحقیقات نشان دادند که افزایش مقدار مواد FRP بر شاخص قابلیت اطمینان مقاوم‌سازی تأثیر ندارد [۳۰-۳۱].

در این تحقیق هدف بررسی عددی و 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 انجام آزمایش مقاومت فشاری و تغییرشکل محوری آن‌ها، این هدف دنبال شده است. علاوه بر این، مدل‌سازی سه بعدی و تجزیه و تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS انجام شد [۳۲]. نتایج تجزیه و تحلیل مدل اجزای محدود با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید.

## ۲- مشخصات دورپیچ CFRP و غلاف GRP مصرفی

ورقه‌های کامپوزیتی CFRP استفاده شده در تحقیق به صورت یک‌جهته و ساخت شرکت TORAY ژاپن می‌باشند. خواص مکانیکی دورپیچ CFRP براساس اطلاعات کارخانه تولید کننده، از آزمایش‌های انجام شده به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D7565 [۳۳] و ASTM D2996 [۳۴] در جدول ۱ ارائه شده‌اند. چسب اپوکسی مصرفی ساخت شرکت پایا و به صورت دوجزئی متشکل از رزین و سخت‌کننده 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 براساس گزارش کارخانه سازنده و از آزمایش‌های انجام شده طبق استاندارد ASTM D638 [۳۵] به دست آمده‌اند.

لوله‌های کامپوزیتی GRP بیضی‌شکل ساخت کارخانه فرابرد شیراز می‌باشند که با الیاف شیشه آغشته به رزین تولید می‌شوند. این لوله‌ها برحسب فشار داخلی که تحمل می‌کنند، دسته‌بندی می‌شوند. در این پژوهش از لوله‌های GRP بیضی‌شکل با تحمل فشار داخلی ۱۰ بار استفاده شده است. مشخصات لوله‌های GRP بیضی‌شکل براساس اطلاعات کارخانه تولید کننده از آزمایش‌های انجام شده طبق استاندارد ASTM D2996 [۳۴] در جدول ۱ ارائه شده‌اند. جهت انجام آزمایش‌های این تحقیق از لوله‌های GRP بیضی‌شکل به طول ۶۰۰، قطرهای داخلی ۱۲۰ و ۲۰۰ و ضخامت ۸ میلی‌متر استفاده شده است.

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

## ۳- برنامه آزمایشگاهی

### ۳-۱- آزمایش‌های اولیه

برای تعیین مقاومت فشاری بتن مصرفی در ساخت ستون‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای به ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر طبق توصیه ACI211 [۳۶] تهیه و پس از عمل‌آوری در حوضچه آب در سنین ۷ و ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری روی آن‌ها به عمل آمد. در شکل ۱ نحوه انجام آزمایش نمونه‌های بتنی با جک بارگذاری نشان داده شده‌اند. برای تهیه بتن پرمقاومت جهت ساخت بتن متراکم و کم تخلخل از ژل میکروسیلیس استفاده شد. هم‌چنین 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 شده است.

جدول ۲- جزئیات طرح اختلاط بتن های معمولی و پرمقاومت مصرفی در ساخت ستون های تحقیق ( $\text{kg/m}^3$ )							
w/b	فوق روان کننده	زل میکروسیلیس	ماسه	شن	آب	سیمان نوع ۲	نوع بتن
۰/۴	-	-	۹۰۶	۹۰۴	۱۶۰	۴۰۰	معمولی
۰/۲	۳	۵۵	۷۲۰	۹۳۰	۱۲۳	۵۵۰	پرمقاومت



شکل ۱- نحوه آزمایش نمونه های بتنی با جک بارگذاری

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.

جدول ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای استاندارد در سن ۲۸ روزه (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

### ۲-۳- مشخصات نمونه ها

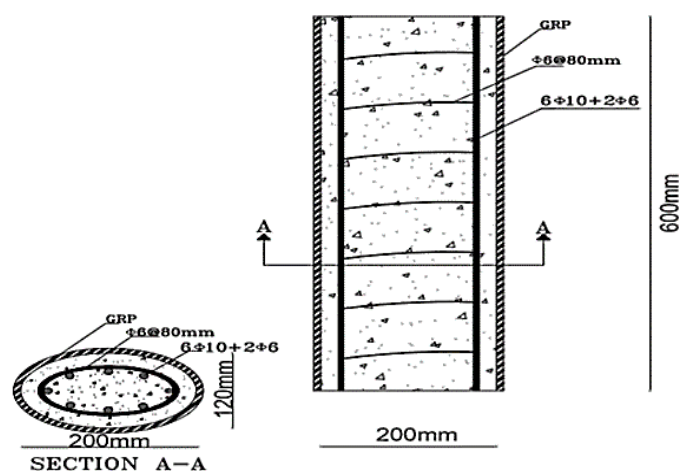
نمونه های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل ۱۲ عدد ستون بتنی با مقطع بیضی با قطرهای ۲۰۰ و ۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی متر هستند، که آزمایش فشار محوری خالص بر روی آن ها انجام شده است. تمام ستون ها از بتن آرمه ساخته شدند. ستون ها به دو گروه ۶ تایی از بتن معمولی و بتن پرمقاومت تقسیم شدند و در هر گروه سه ستون دارای غلاف 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 براساس 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.

جدول ۴- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق												
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	GRP	ندارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد
دورپیچ	CFRP	ندارد	دارد	دارد	ندارد	دارد	دارد	ندارد	دارد	دارد	ندارد	دارد
تعداد لایه‌های دورپیچ	-	۱	۲	-	۱	۲	-	۱	۲	-	۱	۲

ابعاد مقطع و ارتفاع تمام ستون‌ها به ترتیب به صورت ۲۰۰\*۱۲۰ و ۶۰۰ میلی‌متر است.

### ۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل ۱۲ عدد ستون بتنی با مقطع بیضی با قطرهای ۲۰۰ و ۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر هستند، هم‌چنین دو نمونه به عنوان ذخیره در نظر گرفته شدند که در صورت بروز مشکل در حین انجام آزمایش‌ها، مورد استفاده قرار گیرند. میزان آرماتورهای طولی استفاده شده در همه ستون‌ها برابر  $2/8\%$  سطح مقطع ناخالص ستون در نظر گرفته شد، که این مقدار با استفاده از ۶ عدد آرماتور آجدار به قطر ۱۰ و ۲ عدد آرماتور آجدار به قطر ۶ میلی‌متر تأمین شده است. برای جلوگیری از تمرکز تنش روی آرماتورهای طولی، این آرماتورها در فاصله ۲۰ میلی‌متر مانده به دو انتهای ستون قطع شدند؛ بنابراین طول واقعی آرماتورهای طولی ۵۶۰ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین در هر شبکه، آرماتور مارپیچ با گام ۸۰ و به قطر ۶ میلی‌متر استفاده گردید؛ این گام به صورتی انتخاب شده که محصورشدگی داخلی زیادی توسط خاموت‌ها ایجاد نشود. پوشش بتن روی آرماتورها به مقدار ۲۰ میلی‌متر منظور گردید. جهت تأمین پوشش مورد نظر برای آرماتورهای طولی و عرضی، از فاصله‌انداز استفاده شد. تنش تسلیم آرماتورها براساس کاتالوگ کارخانه سازنده برای آرماتورهای طولی و عرضی به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۳۰۰ مگاپاسکال می‌باشد [۳۷]. در شکل ۲ مقاطع عرضی و طولی ستون‌های مورد تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۲- مقاطع طولی و عرضی ستون‌های تحقیق

سپس قالب بیضی‌شکل مطابق شکل ۳ 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.

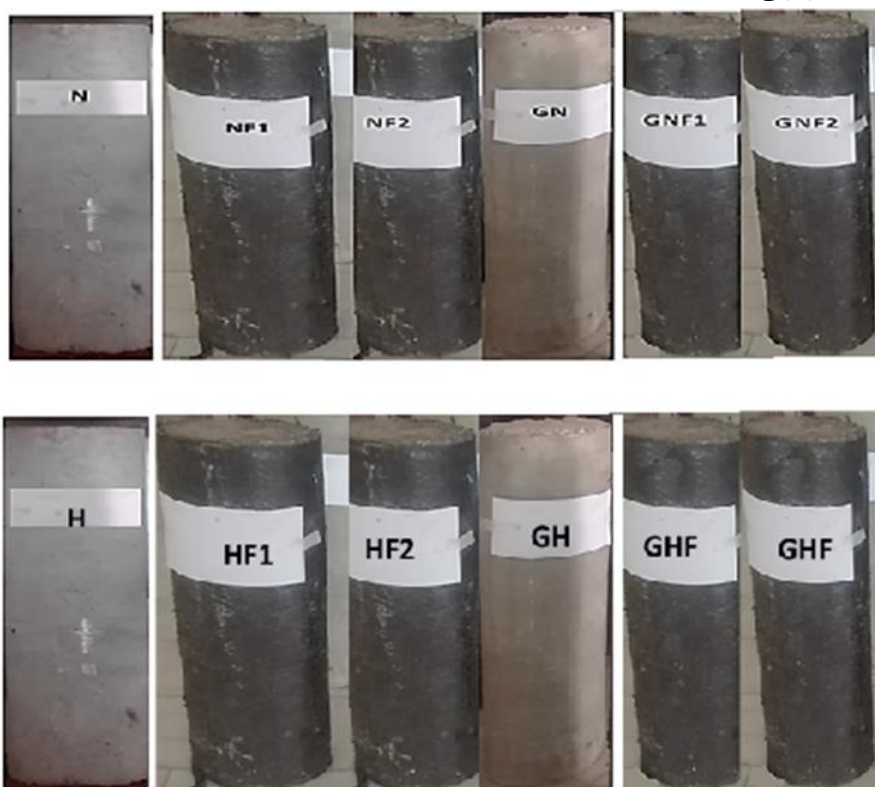


(الف)

(ب)

شکل ۳- (الف) قالب بیضی شکل ساخت ستون‌ها (ب) نحوه قرارگیری قفسه میلگردها درون غلاف و قالب‌های GRP شکل

در گروه اول از بتن معمولی و 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 به‌طور کامل صاف، تمیز و خشک گردیدند. چسب مصرفی دوجزئی 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 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 ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۵- ستون‌های تحقیق پس از دورپیچی با CFRP

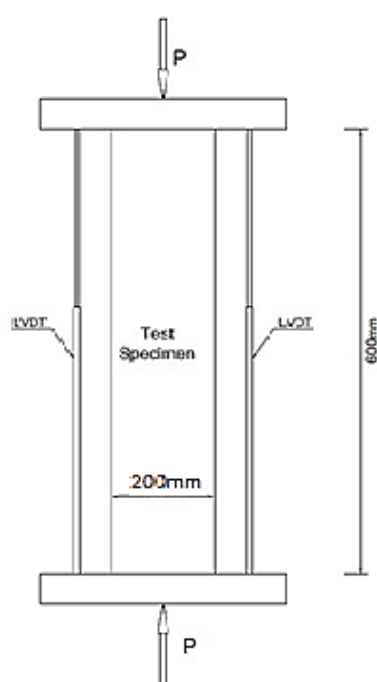


## ۳-۴- بارگذاری ستون‌ها

ستون‌های تحقیق حاضر، تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰۰۰ کیلونیوتن در آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان آزمایش شدند. آزمایش نمونه‌ها به روش کنترل تغییرشکل و با نرخ بارگذاری  $10 \frac{KN}{S}$  انجام شد [۳۶]. جهت تعیین تغییرشکل‌های محوری ستون‌ها، دو عدد جابجایی‌سنج<sup>۱</sup> در دو طرف ستون‌ها نصب شدند که در شکل ۶ محل نصب آن‌ها نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به تغییرشکل‌های محوری ستون‌ها، در هر ثانیه با استفاده از دیتالاگر الکترونیکی<sup>۲</sup> متصل به کامپیوتر ثبت شدند. هم‌چنین به منظور تعیین منحنی‌های بار-تغییرمکان نمونه‌ها، بار اعمالی در هر لحظه با استفاده از یک نیروسنج ۵۰۰۰ کیلونیوتنی 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 ۷ نحوه بارگذاری و شکست نمونه‌ها توسط جک هیدرولیکی ۵۰۰۰ کیلونیوتنی نمایش داده شده است.



شکل ۷- نحوه بارگذاری و شکست نمونه‌ها توسط جک هیدرولیکی ۵۰۰۰kN



شکل ۶- محل نصب جابجایی‌سنج‌های محوری

## ۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

## ۴-۱- ظرفیت نهایی ستون‌ها

ستون‌ها توسط جک هیدرولیکی ۵۰۰۰ کیلونیوتنی آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان تا لحظه شکست با سرعت  $10 \frac{KN}{S}$  بارگذاری شدند، ظرفیت و تغییرمکان نهایی ستون‌ها در جدول ۵ ارائه گردیده است.

<sup>1</sup> Linear Variable Differential Transducer (LVDT)

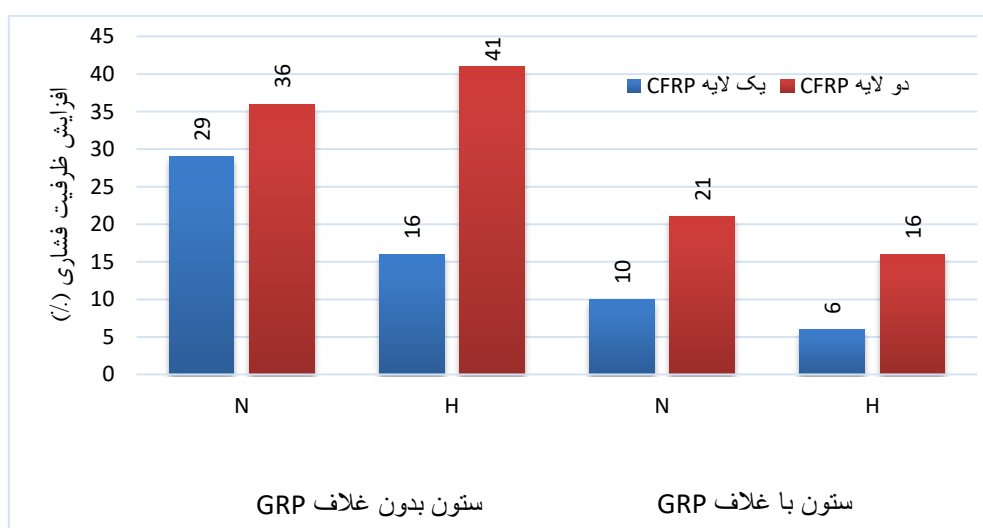
<sup>2</sup> Electronic data-logger

جدول ۵- ظرفیت و تغییر مکان نهایی ستون‌های تحقیق

نام ستون	N	NF1	NF2	GN	GNF1	GNF2	H	HF1	HF2	GH	GHF1	GHF2
ظرفیت نهایی (kN)	۴۷۲/۵	۶۱۱/۲	۶۴۴/۶	۲۱۴۹/۲	۲۳۶۳/۷	۲۶۰۱/۵	۶۴۱/۴	۷۴۳/۴	۹۰۴/۷	۲۴۶۴/۱	۲۶۱۳/۷	۲۸۶۷/۴
میانگین تغییر مکان‌های (mm)	۱/۹	۲/۴	۲/۸	۷/۹	۹/۶	۱۱/۷	۲/۴	۲/۸	۳/۲	۹/۱	۱۰/۶	۱۲/۹

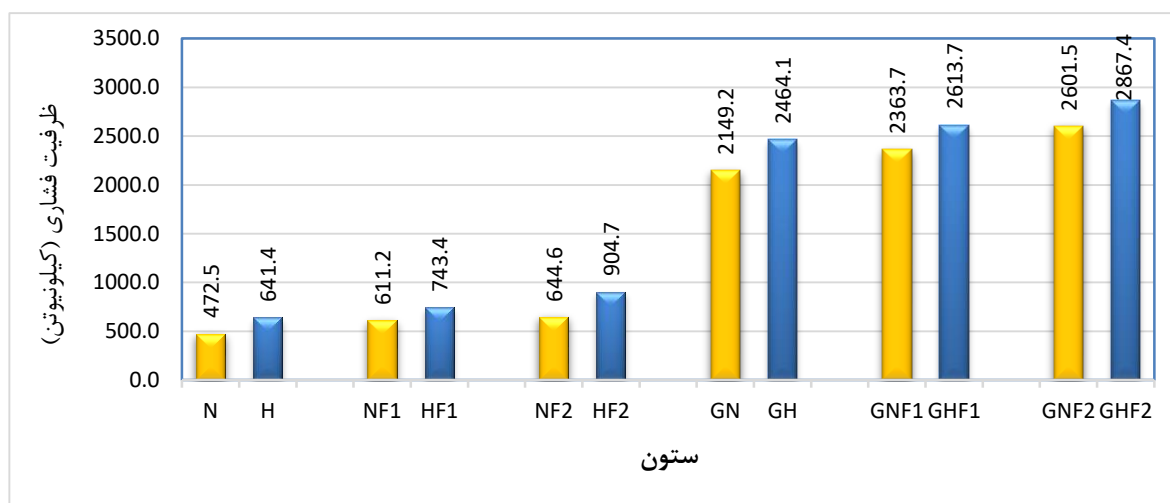
\*: باتوجه به استفاده از دو عدد جابجایی سنج در دو طرف ستون‌ها، میانگین تغییر مکان‌های محوری لحاظ شدند.

طبق جدول ۵ و شکل ۸ 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. به‌علاوه 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.



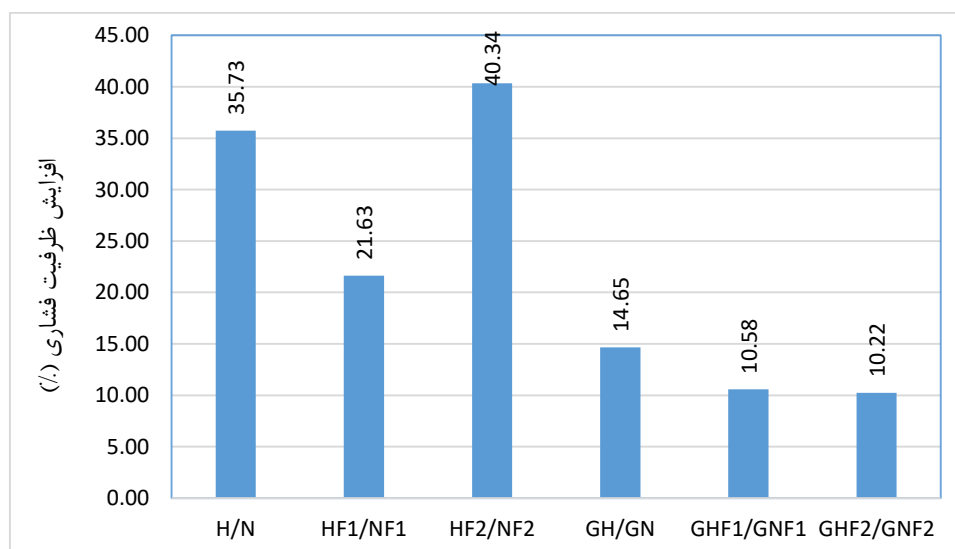
شکل ۸- تاثیر دورپیچ CFRP در افزایش ظرفیت فشاری ستون‌های تحقیق

طبق شکل ۹ دیده می‌شود که استفاده از غلاف در مقایسه با دورپیچ بسیار موثرتر است، به طوری که استفاده از غلاف به طور میانگین باعث افزایش ۴/۱۵ برابری ظرفیت فشاری ستون‌ها در گروه بتن‌های معمولی و ۳/۵۱ برابری 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 ۱۹/۷٪ و ۲۸/۷٪ گردید و در گروه بتن‌های پرمقاومت به طور متوسط باعث افزایش به میزان ۱۱/۰٪ و ۲۸/۷٪ شده است.



شکل ۹- ظرفیت فشاری ستون‌های تحقیق

بررسی و مقایسه بین ظرفیت نهایی ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی و بتن پرمقاومت نشان می‌دهد که ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت دارای ظرفیت فشاری بیش‌تری هستند. به طور میانگین در ستون‌های فاقد غلاف به میزان  $32/6\%$  و در ستون‌های دارای غلاف به میزان  $11/8\%$  افزایش ظرفیت فشاری وجود دارد. این مقایسه نشان می‌دهد که تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت نهایی ستون‌های دارای غلاف به دلیل محصوریت زیاد این غلاف کم‌تر است. در شکل ۱۰ افزایش ظرفیت فشاری ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت نسبت به نوع ساخته شده از بتن معمولی نشان داده شده است.



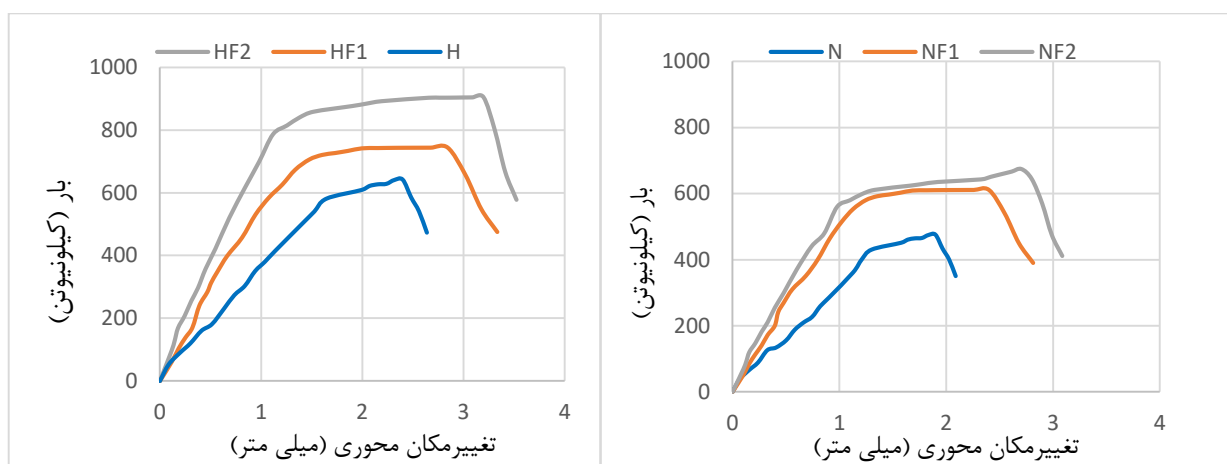
شکل ۱۰- درصد افزایش ظرفیت فشاری ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت نسبت به نوع ساخته شده از بتن معمولی

مقایسه تغییرمکان محوری نهایی در ستون‌های بتن مسلح بیضی‌شکل فاقد غلاف نشان می‌دهد که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به- ترتیب باعث افزایش  $23/7\%$  و  $42/9\%$  در ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی و  $20/7\%$  و  $35/8\%$  در ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت شده است. در حالی که در ستون‌های دارای غلاف، این میزان افزایش برای ستون‌های با بتن معمولی  $21/6\%$  و  $48/3\%$  در ستون‌های با بتن پرمقاومت  $16/8\%$  و  $41/7\%$  می‌باشند. لذا مشهود است که استفاده از دورپیچ جهت محصور کردن ستون‌های بتنی باعث افزایش تغییرمکان محوری نهایی ستون‌ها می‌شود، که این تاثیر در ستون‌های دارای غلاف به دلیل اثر زیادتر محصوریت غلاف مذکور بیش

تر می‌باشد. هم‌چنین مقایسه اثر محصوریت غلاف با دورپیچ در تغییرمکان محوری نهایی ستون‌ها نشان می‌دهد که غلاف بسیار موثرتر است. به عنوان مثال در ستون‌های با بتن معمولی استفاده از غلاف بدون استفاده از دورپیچ به میزان ۳۱٪ افزایش در تغییرمکان محوری نهایی ستون‌ها ایجاد نموده، در حالی که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به ترتیب باعث افزایش تغییرمکان محوری نهایی به میزان ۲۳/۷٪ و ۴۲/۹٪ شده است. تاثیر زیاد غلاف لوله‌ها در ایجاد تغییرمکان محوری نهایی را می‌توان در ساختار این لوله‌ها و وجود الیاف در ساخت آن‌ها دانست. بنابراین استفاده از غلاف در مناطقی که نیاز به طراحی شکل‌پذیر دارند، می‌تواند بسیار مفید واقع گردد.

#### ۲-۴- منحنی‌های بار - تغییرمکان ستون‌ها

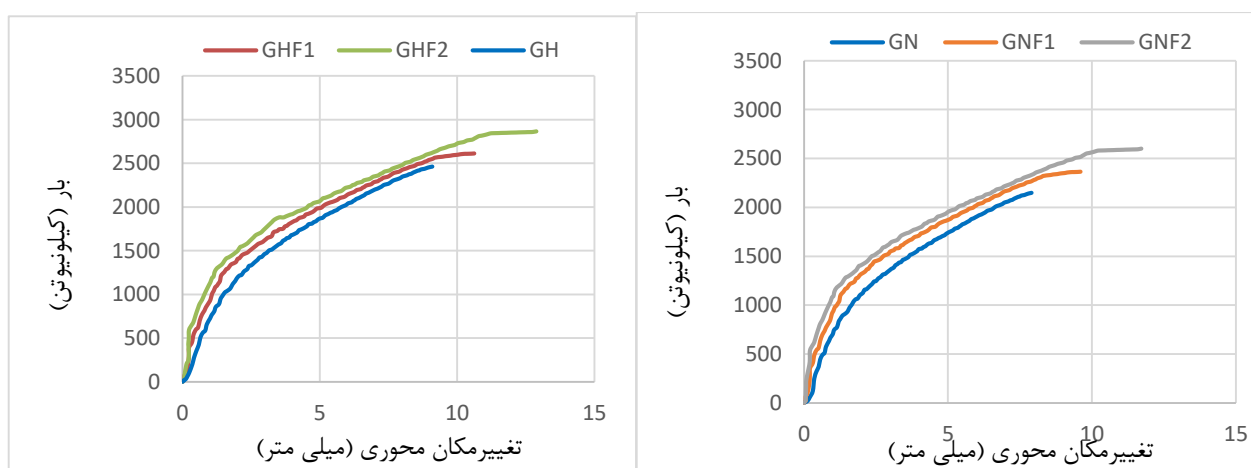
به منظور مقایسه رفتار ستون‌ها، منحنی‌های بار-تغییرمکان مربوط به تغییرمکان محوری ستون‌های با و بدون غلاف در اشکال ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.



(ب) ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی

(الف) ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت

#### شکل ۱۱- منحنی بار-تغییرمکان محوری ستون‌های فاقد غلاف GFRP



(ب) ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی

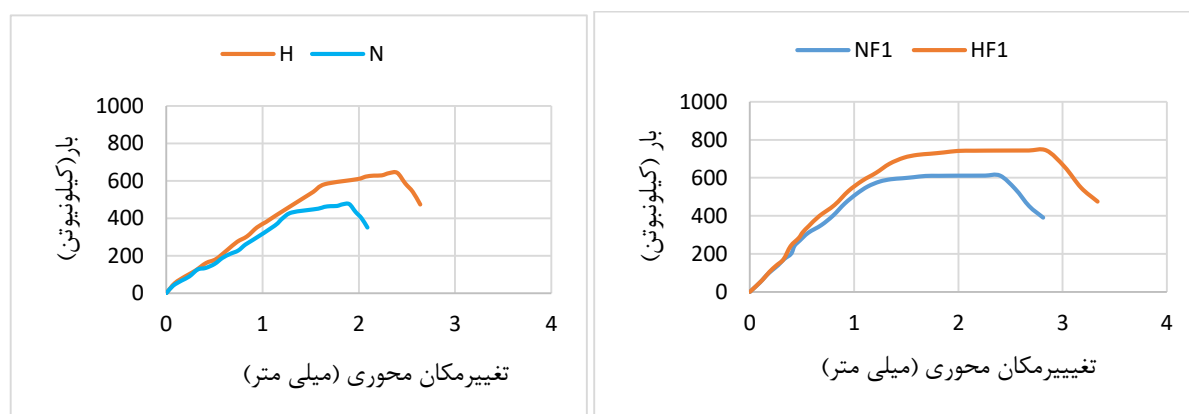
(الف) ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت

#### شکل ۱۲- منحنی بار- تغییرمکان محوری ستون‌های دارای غلاف GFRP

بر اساس منحنی‌های بار-تغییرمکان محوری ستون‌ها ملاحظه می‌شود که با دورپیچ نمودن ستون‌های بتن مسلح بیضی‌شکل با CFRP، تغییرمکان‌های محوری آن‌ها افزایش یافته است؛ هم‌چنین میزان تحمل فشار در این ستون‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای زیاد شده است. بررسی

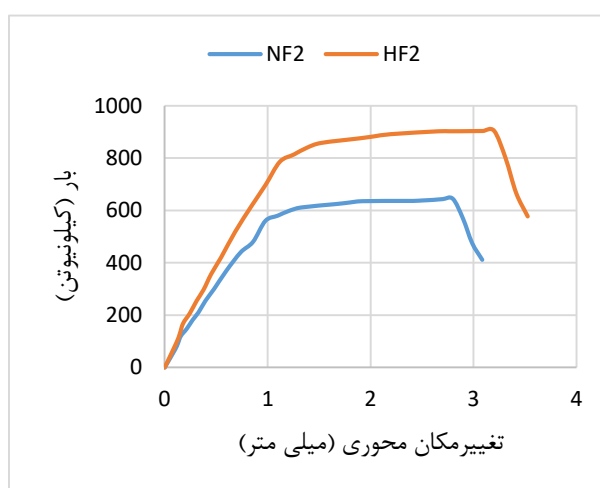
دقیق تر منحنی‌های بار- تغییرمکان محوری ستون‌های فاقد غلاف نشان می‌دهد که این منحنی‌ها از دو قسمت سخت‌شونده خطی و نرم-شونده غیرخطی تشکیل شده‌اند، تغییر رفتار ستون‌ها ناگهانی بوده و نشان از ایجاد ترک‌های فشاری در بتن و شروع به کار دورپیچ دارد. هم-چنین منحنی‌های بار- تغییرمکان محوری ستون‌های دارای غلاف از دو قسمت سخت‌شونده خطی و نرم‌شونده غیرخطی تشکیل شده‌اند، ولی تغییر رفتار ستون‌ها تدریجی بوده که علت آن را می‌توان در پیوستگی کامل و محصوریت بیش تر غلاف با ستون بتنی دانست. هم‌چنین مشهود است که دورپیچ نمودن ستون‌ها با CFRP باعث افزایش سختی ستون و کاهش تغییرمکان محوری آن‌ها شده است که علت آن را می‌توان ناشی از ایجاد محصوریت توسط دورپیچ است.

به منظور مقایسه رفتار ستون‌ها، منحنی‌های بار- تغییرمکان محوری آن‌ها جهت بررسی تأثیر نوع بتن مصرفی در ساخت، در شکل ۱۳ نمایش داده شده‌اند.

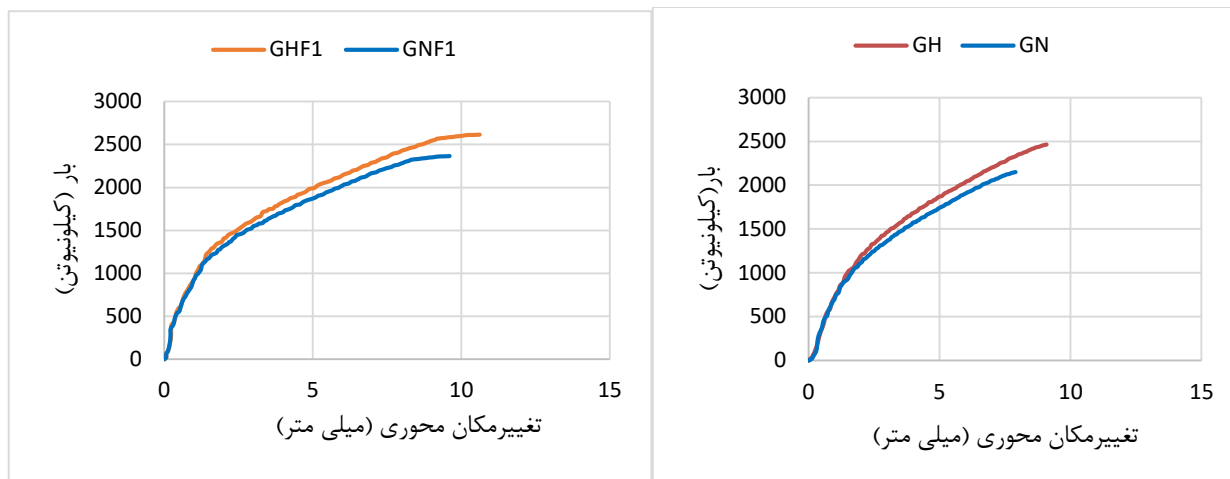


(الف) ستون‌های N و H

(ب) ستون‌های NF1 و HF1

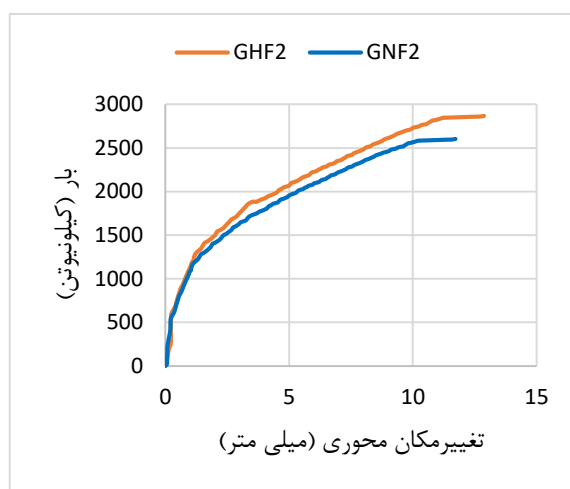


(ج) ستون‌های NF2 و HF2



(د) ستون‌های GH و GN

(ه) ستون‌های GHF1 و GNF1



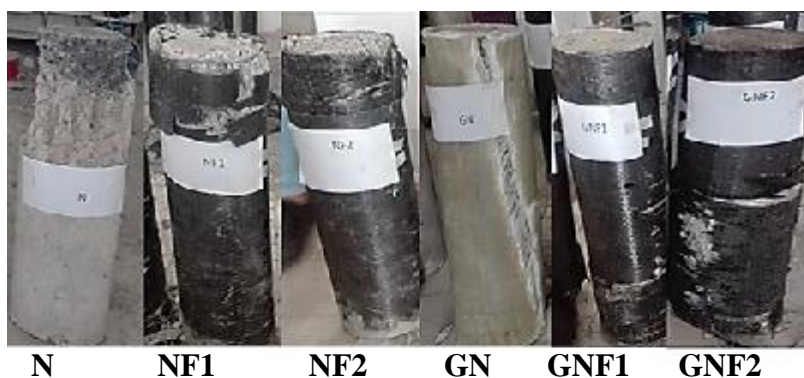
(و) ستون‌های GHF2 و GNF2

شکل ۱۳- منحنی‌های بار-تغییر مکان محوری برای ستون‌های ساخته شده از بتن‌های معمولی و پرمقاومت

#### ۳-۴- بررسی نحوه گسیختگی ستون‌ها

گسیختگی ستون‌ها در شکل ۱۴ ارائه شده است. در ستون‌های فاقد غلاف گسیختگی اکثراً به علت کم‌اندامش 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 شبکه میلگردها دانست. در ستون‌های فاقد هرگونه محصوریت (ستون‌های H و N)، ستون‌ها به علت ایجاد ترک‌های فشاری در بتن بالا و پایین خود و نهایتاً جدا شدن قطعاتی از بتن در این قسمت‌ها و کم‌اندامش میلگردهای طولی، گسیخته شدند. در ستون‌های HF1 و NF1 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 نشدن شبکه میلگردها و افزایش باربری ستون‌ها شد. گسیختگی و تخریب در ستون‌های HF2 و NF2 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 کمناش میلگردهای طولی در این محل و گسیختگی 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 کمناش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای مارپیچ 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 نیمه پایینی ستون‌ها با وقوع کمناش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای مارپیچ اتفاق افتد. عموماً علت گسیختگی کامل و آنی 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 کمناش میلگردهای طولی و نهایتاً گسیختگی ستون گردید.



الف) ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی



ب) ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت

شکل ۱۴ - نحوه گسیختگی ستون‌ها پس از اعمال بارگذاری

##### ۵- مدل‌سازی عددی ستون‌ها

##### ۵-۱- ساخت مدل ستون‌ها

برای مدل‌سازی ستون‌های مورد مطالعه از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شد. جهت مدل‌سازی، بتن توسط المان‌های حجمی ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (C3D8R)، میلگردهای طولی و عرضی توسط المان‌های تیر سه‌بعدی با تابع شکل درجه یک (B31)، ورق‌های CFRP با المان‌های صفحه‌ای با تابع شکل درجه یک و انتگرال کاهش‌یافته (S4R) و غلاف GRP نیز با المان‌های حجمی ۸ گرهی مدل‌سازی شدند [۳۲].

برای تعریف رفتار غیرخطی بتن از مدل ترکیبی خمیری خسارت بتن<sup>۱۱</sup> که پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل رفتاری می‌باشد، استفاده شده است. در این مدل نسبت پواسون  $0.2$  و زاویه اتساع داخلی (نسبت کرنش حجمی به کرنش برشی مصالح) برای بتن  $31$  در نظر گرفته شده است. این زاویه بین  $20$  تا  $40$  درجه (معمولاً  $31$  درجه) فرض می‌شود [۳۸].

جهت تعریف منحنی رفتار تک‌محوری بتن غیرمحصور از مدل رفتاری کنت-پارک<sup>۱۲</sup> استفاده گردید [۳۹]. این مدل رفتاری به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$\sigma_c = f'_{co} \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right) - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\sigma_c$  و  $\epsilon_c$  به ترتیب تنش و کرنش فشاری،  $f'_{co}$  و  $\epsilon'_c$  به ترتیب مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن غیرمحصور و کرنش متناظر با آن می‌باشند. پارک و پاولی<sup>۱۳</sup> مقدار  $\epsilon'_c$  را  $0.002$  گزارش کردند [۴۰]. در این پژوهش مقدار این پارامتر نیز برابر  $0.002$  استفاده گردید.

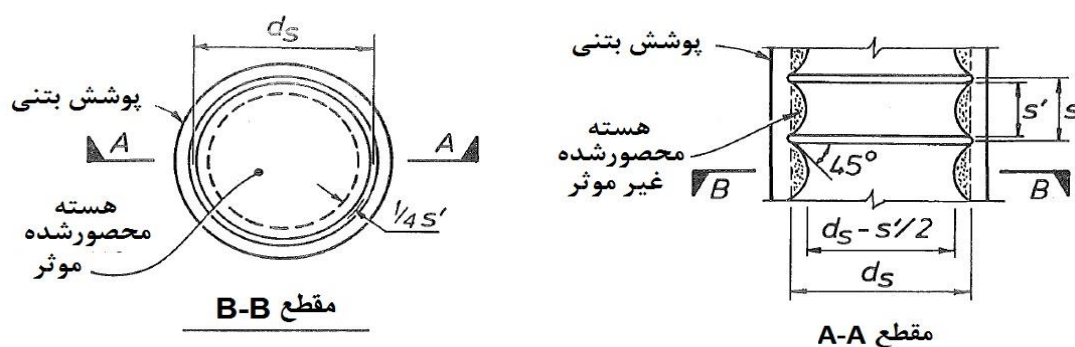
به منظور تعریف رفتار فشاری بتن محصور از مدل رفتاری مندر<sup>۱۴</sup> استفاده گردید. این مدل رفتار مقاومت فشاری بتن محصور با خاموت را با استفاده از یک ضریب به مقاومت فشاری بتن غیرمحصور مربوط می‌کند [۴۱]. این مدل رفتاری به صورت روابط (۲) الی (۵) می‌باشد. در این روابط  $f'_{cc}$ ،  $f'_{co}$ ،  $f'_l$ ،  $k_e$ ،  $f_{yh}$ ،  $\rho_{cc}$ ،  $\rho_s$ ،  $A_{sp}$  و  $d_c$  به ترتیب بیانگر مقاومت فشاری بتن محصور، مقاومت فشاری بتن غیرمحصور، تنش محصورکنندگی موثر، ضریب محصوریت موثر، تنش جاری شدن میلگرد عرضی، نسبت میلگرد طولی به هسته بتنی، نسبت میلگردهای عرضی، سطح مقطع میلگرد مارپیچ، فاصله خالص بین گام‌های خاموت، فاصله بین مرکز تا مرکز گام‌های خاموت و قطر هسته بتن می‌باشند. در شکل ۱۵ محصوریت موثر هسته ستون‌های بتنی با میلگرد مارپیچ نشان داده شده است.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left( -1.25 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (2)$$

$$f'_l = \frac{1}{2} k_e \rho_s f_{yh} \quad (3)$$

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_c}}{1 - \rho_{cc}} \quad (4)$$

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{sd_s} \quad (5)$$



شکل ۱۵- محصوریت موثر هسته ستون‌های بتنی با میلگرد مارپیچ [۴۰]

نحوه چیدمان میلگردهای طولی و عرضی در مدل اجزای محدود ستون در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

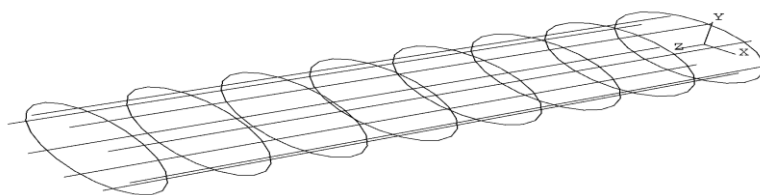
<sup>11</sup> Concrete damaged plasticity

<sup>12</sup> Kent & Park

<sup>13</sup> Park & Paulay

<sup>14</sup> Mander

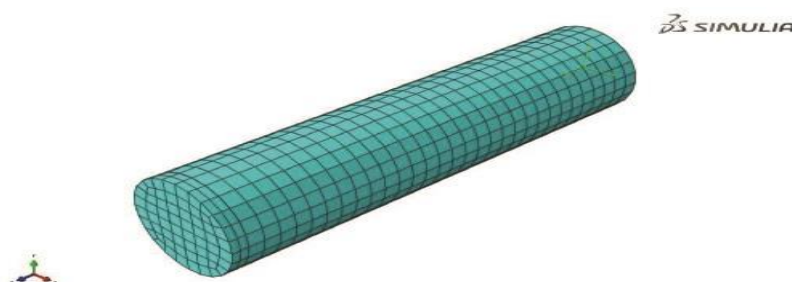




شکل ۱۶- نحوه چیدمان میلگردهای طولی و عرضی در مدل اجزای محدود ستون

در مدل سازی جهت تعریف اندرکنش ها، دو نوع اندرکنش در مدل تعریف شده است که عبارتند از اندرکنش تماس ستون بتنی با غلاف GRP و ورق های CFRP و همچنین اندرکنش غلاف GRP با ورق های CFRP که همگی از نوع سطح به سطح تعریف شده و اتصال آن ها به یکدیگر از نوع کاملاً چسبیده<sup>۱۵</sup> در نظر گرفته شدند. به علاوه اندرکنش بین میلگردها و بتن اطراف از نوع محدوده جاسازی شده<sup>۱۶</sup> فرض شد، که به صورت در برگرفتن میلگردها توسط بتن می باشد [۴۲].

ستون ها به صورت یک سر کاملاً گیردار و یک سر آزاد مدل سازی شدند و بارهای وارده به صورت متمرکز محوری افزایشی اعمال گردیدند. هم چنین جهت جلوگیری از اثر تمرکز تنش در محل اعمال نیرو، به جای اعمال بار به بتن، در محل وارد شدن بار، المانی با ضریب ارتجاعی بسیار بالا تعریف شد. در مدل سازی انجام شده نحوه شبکه بندی<sup>۱۷</sup> و ابعاد شبکه ها به گونه ای منظور شد که علاوه بر در نظر گرفتن دقت در نتایج به همگرایی جواب ها نیز کمک کند. ابعاد المان های ستون بتنی، میلگردهای طولی و عرضی، غلاف GRP و ورقه های CFRP برابر ۲۰ میلی متر فرض شدند [۴۲]. در شکل ۱۷ نحوه شبکه بندی ستون های بتنی نشان داده است.



شکل ۱۷- نحوه شبکه بندی ستون های بتنی

۲-۵- نتایج مدل سازی ستون ها

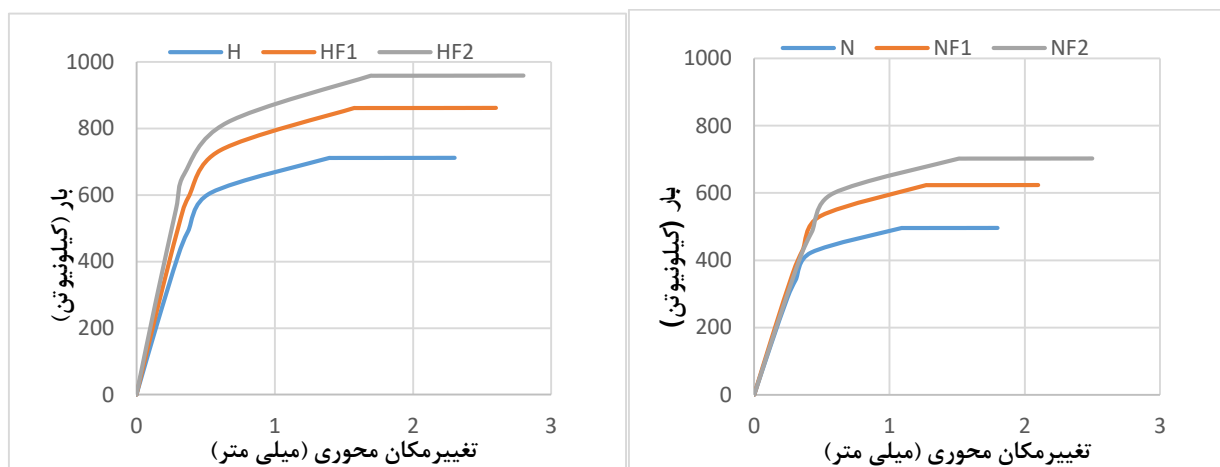
۵-۲-۱- منحنی بار-تغییر مکان

منحنی بار-تغییر مکان محوری ستون های مورد نظر در این پژوهش با استفاده از مدل اجزاء محدود در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

<sup>15</sup> Tie

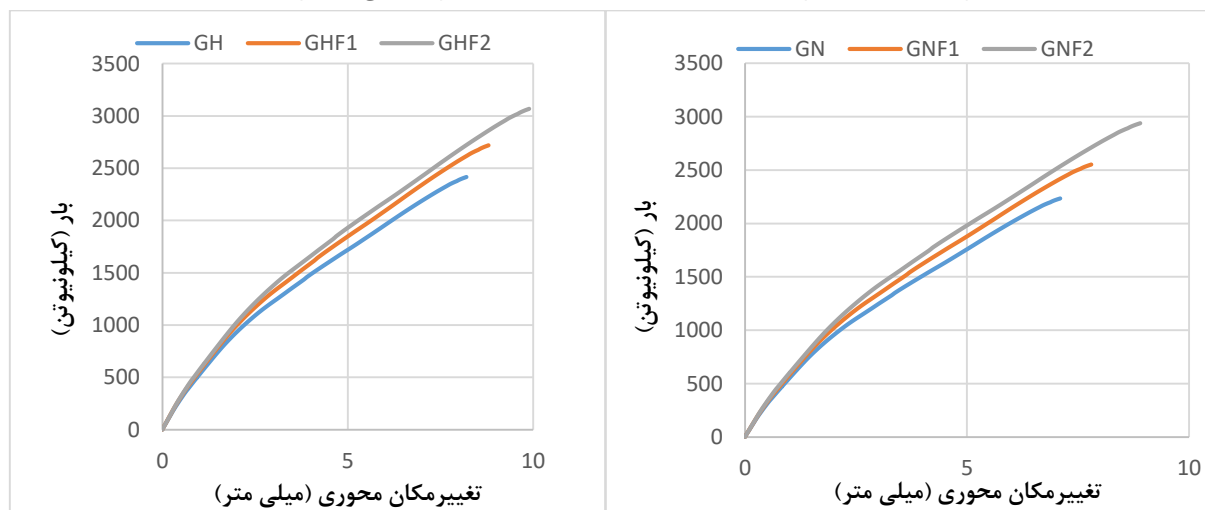
<sup>16</sup> embedded region

<sup>17</sup> meshing



الف) بار بتن معمولی و بدون غلاف GRP

ب) بار بتن پرمقاومت و بدون غلاف GRP



ج) بار بتن معمولی و دارای غلاف GRP

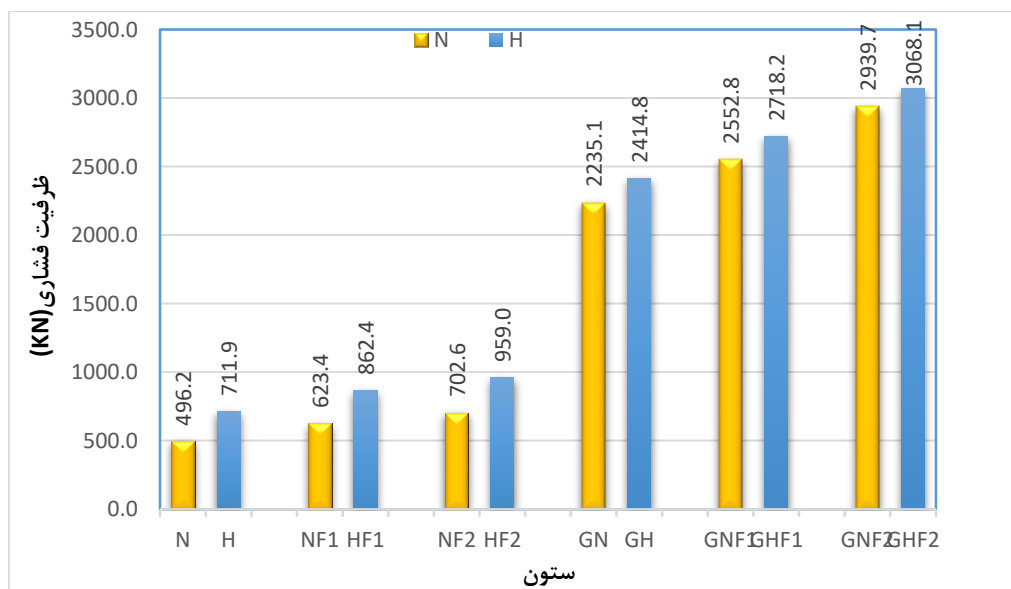
د) بار بتن با پرمقاومت و دارای غلاف GRP

شکل ۱۸- منحنی بار-تغییر مکان محوری برای ستون‌های مختلف تحقیق

با مشاهده منحنی‌های بار-تغییر مکان محوری ملاحظه می‌شود که با دورپیچ نمودن ستون‌های بتن آرمه با مصالح CFRP، ظرفیت فشاری ستون‌ها و هم‌چنین تغییر مکان محوری آن‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. بررسی بیش‌تر منحنی‌های بار-تغییر مکان محوری ستون‌های فاقد غلاف در شکل ۱۹ نشان می‌دهد که این منحنی‌ها از دو قسمت خطی و غیرخطی تشکیل شده‌اند. در قسمت خطی منحنی‌ها دارای شیب یکسانی بوده و نشان دهنده این موضوع می‌باشد که این ستون‌ها تا زمانی که ترک‌های فشاری در بتن شروع نشده، رفتار یکسانی دارند و پس از وقوع این ترک‌ها و شروع به کار دورپیچ CFRP رفتار ستون‌ها تغییر می‌کند و ادامه روند تحمل بار فشاری وارد مسیر غیرخطی می‌شود. هم‌چنین بررسی منحنی‌های بار-تغییر مکان محوری ستون‌های دارای غلاف در شکل ۱۸، نشان می‌دهد که این منحنی‌ها نیز از دو قسمت خطی و غیرخطی تشکیل شده‌اند، ولی تغییر رفتار ستون‌ها تدریجی بوده که علت آن را می‌توان در پیوستگی کامل و محصوریت بیش‌تر غلاف GRP با ستون بتنی دانست. در جدول ۶ نتایج ظرفیت فشاری و تغییر مکان محوری نهایی ستون‌های تحقیق ارائه شده است و میزان تاثیر غلاف GRP و دورپیچ ورق-های CFRP در تغییر این پارامترها نسبت به ستون N نیز بیان گردیده است. هم‌چنین در شکل ۱۹ ظرفیت فشاری حاصل از نتایج تحلیل عددی ستون‌های تحقیق نشان داده شده است.

جدول ۶- ظرفیت فشاری و تغییر مکان محوری نهایی ستون‌های تحقیق

نام ستون	N	NF1	NF2	GN	GNF1	GNF2	H	HF1	HF2	GH	GHF1	GHF2
ظرفیت نهایی (kN)	۴۹۶/۲	۶۲۳/۴	۷۰۲/۶	۲۲۳۵/۱	۲۵۵۲/۸	۲۹۳۹/۷	۷۱۱/۹	۸۶۲/۴	۹۵۹/۰	۲۴۱۴/۸	۲۷۱۸/۲	۳۰۶۸/۱
تغییر مکان محوری نهایی (mm)	۱/۸	۲/۱	۲/۵	۷/۱	۷/۸	۸/۹	۲/۳	۲/۶	۲/۸	۸/۲	۸/۸	۹/۹
نسبت ظرفیت نهایی ستون به ستون N	۱/۰	۱/۳	۱/۴	۴/۵	۵/۱	۵/۹	۱/۴	۱/۷	۱/۹	۴/۹	۵/۵	۶/۲
نسبت تغییر مکان نهایی ستون به ستون N	۱/۰	۱/۲	۱/۴	۳/۹	۴/۳	۴/۹	۱/۳	۱/۴	۱/۶	۴/۶	۴/۹	۵/۵



شکل ۱۹- ظرفیت فشاری ستون‌ها حاصل از نتایج تحلیل عددی

همان‌گونه که در جدول ۶ و شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، استفاده از دورپیچ CFRP جهت محصور کردن ستون‌های بتنی، می‌تواند اثر بسیار خوبی در افزایش ظرفیت نهایی ستون‌های بتن مسلح داشته باشد. به طور میانگین استفاده از یک لایه و دو لایه CFRP در تمام ستون‌های این تحقیق به ترتیب باعث افزایش ظرفیت نهایی به میزان ۱۸/۴٪ و ۳۳/۷٪ نسبت به ستون‌های فاقد CFRP شده است، که در ستون‌های با بتن معمولی به ترتیب باعث افزایش ظرفیت نهایی به میزان ۱۹/۹٪ و ۳۶/۶٪ شد، درحالی‌که این اعداد در مورد ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت ۱۶/۸٪ و ۳۰/۹٪ بود. از سوی دیگر، کاربرد غلاف لوله‌های GRP در مقایسه با استفاده از دورپیچ CFRP بسیار موثرتر می‌باشد. به طور میانگین، استفاده از غلاف GRP باعث افزایش ظرفیت نهایی به میزان ۳/۷۵ برابر نسبت به ستون‌های فاقد غلاف GRP شده است، که در ستون‌های با بتن معمولی باعث افزایش ظرفیت نهایی به میزان ۴/۲۶ برابر شد، درحالی‌که این اعداد در مورد ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت ۳/۲۵ برابر بود.

به علاوه مقایسه تغییرمکان نهایی محوری در جدول ۵ نشان می‌دهد که استفاده از دورپیچ CFRP جهت محصور کردن ستون‌های بتنی باعث افزایش این پارامتر می‌شود. به طور میانگین استفاده از یک لایه و دو لایه CFRP در تمام ستون‌های این تحقیق به ترتیب باعث افزایش تغییرمکان محوری به میزان ۱۱/۷٪ و ۲۶/۷٪ نسبت به ستون‌های فاقد CFRP شده است. همچنین استفاده از غلاف GRP باعث افزایش تغییرمکان نهایی به مقدار زیادی در ستون‌های مورد نظر گردید. به طور میانگین، استفاده از غلاف GRP باعث افزایش تغییرمکان نهایی به میزان ۳/۶۲ برابری نسبت به ستون‌های فاقد غلاف GRP شده است.

#### ۲-۲-۵- بررسی شکل‌پذیری محوری ستون‌ها

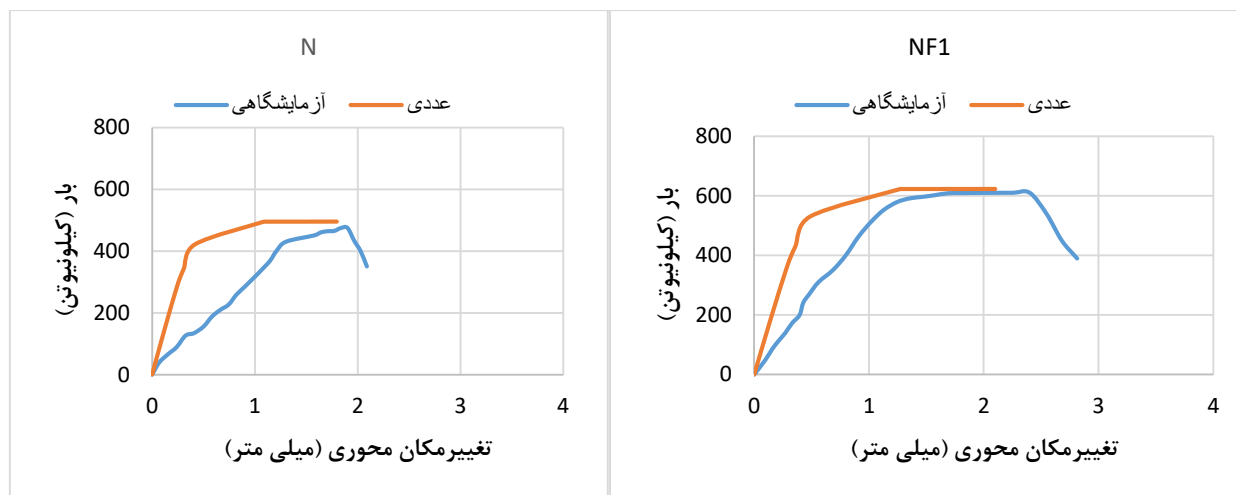
جهت مقایسه شکل‌پذیری ستون‌های مورد بررسی در این تحقیق، از سطح زیر منحنی‌های بار-تغییرمکان محوری که بیانگر مقدار جذب انرژی توسط سیستم یا به عبارتی مقدار کار انجام شده توسط نیروی خارجی روی سیستم می‌باشد، استفاده شده است [۴۳]. بر این اساس، سطح زیر منحنی بار-تغییرمکان محوری (Eu)، تا نقطه گسیختگی برای ستون‌های مورد آزمایش با استفاده از منحنی‌های ارائه شده در شکل ۱۹ محاسبه شده و نتایج آن به منظور مقایسه بین نمونه‌های مختلف، در جدول ۷ ارائه شده است.

نام ستون	N	NF1	NF2	GN	GNF1	GNF2	H	HF1	HF2	GH	GHF1	GHF2
شکل‌پذیری (Eu) (N.m=J)	۷۵۸	۱۱۱۲	۱۴۹۲	۹۴۱۱	۱۱۸۰۸	۱۵۵۱۶	۱۳۹۶	۱۹۲۸	۲۳۲۹	۱۱۷۴۳	۱۴۱۸۶	۱۸۰۱۳
شکل‌پذیری ستون نسبت به ستون N	۱	۱/۴۷	۱/۹۷	۱۲/۴۲	۱۵/۵۹	۲۰/۴۸	۱/۸۴	۲/۵۴	۳/۰۷	۱۵/۵۰	۱۸/۷۲	۲۳/۷۷

طبق جدول ۷، استفاده از دورپیچ CFRP جهت محصور کردن ستون‌های بتنی باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود. به طور میانگین استفاده از یک لایه و دو لایه CFRP به ترتیب باعث افزایش شکل‌پذیری محوری به میزان ۳۳٪ و ۷۱٪ نسبت به ستون‌های فاقد CFRP شده است. همچنین استفاده از غلاف GRP باعث افزایش شکل‌پذیری به مقدار زیادی در ستون‌های مورد نظر گردید. به طور میانگین، استفاده از غلاف GRP باعث افزایش شکل‌پذیری به میزان ۹/۴۹ برابری نسبت به ستون‌های فاقد غلاف GRP شده است.

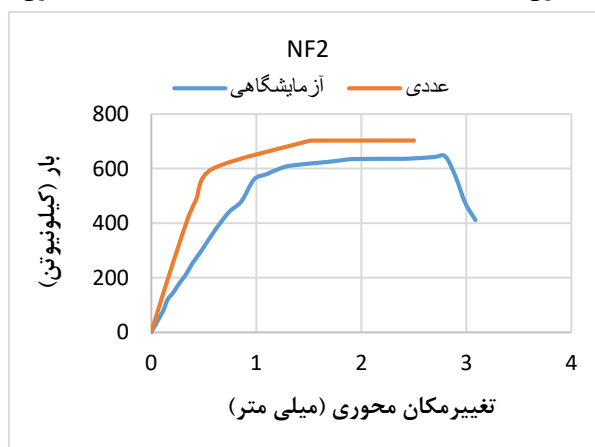
#### ۶- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

در شکل ۲۰ منحنی‌های بار-تغییرمکان محوری حاصل از نتایج به دست آمده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نشان داده شده است. هم‌چنین در جدول ۸ نتایج بار نهایی و تغییرمکان نهایی محوری حاصل از مدل‌های مذکور ارائه و با هم مقایسه گردید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی میان نتایج حاصل از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی وجود دارد.

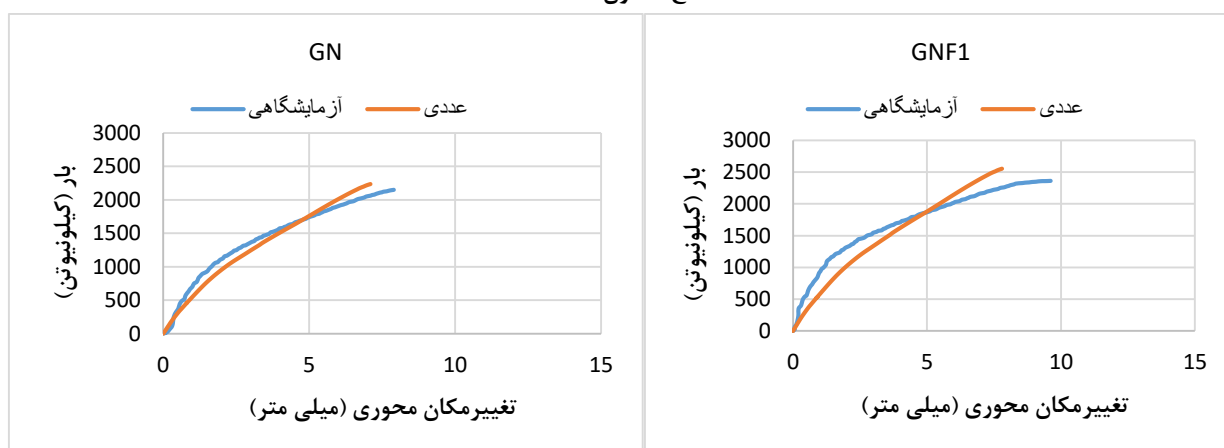


ستون N (الف)

ستون NF1 (ب)

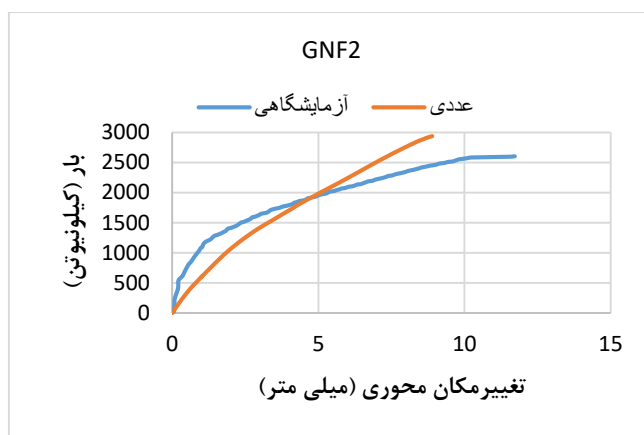


ستون NF2 (ج)

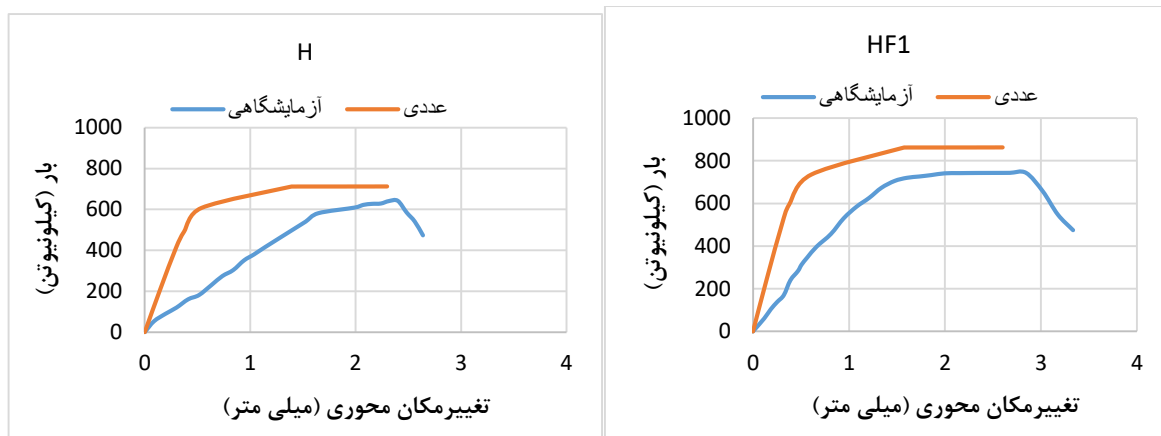


ستون GN (د)

ستون GNF1 (ه)

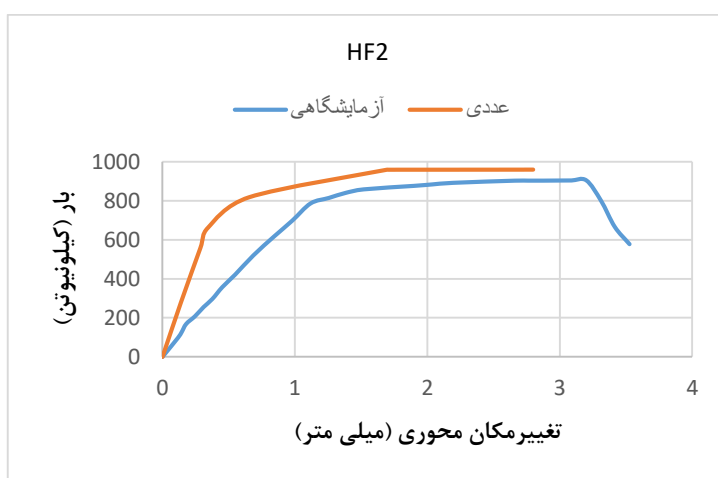


(و) ستون GNF2

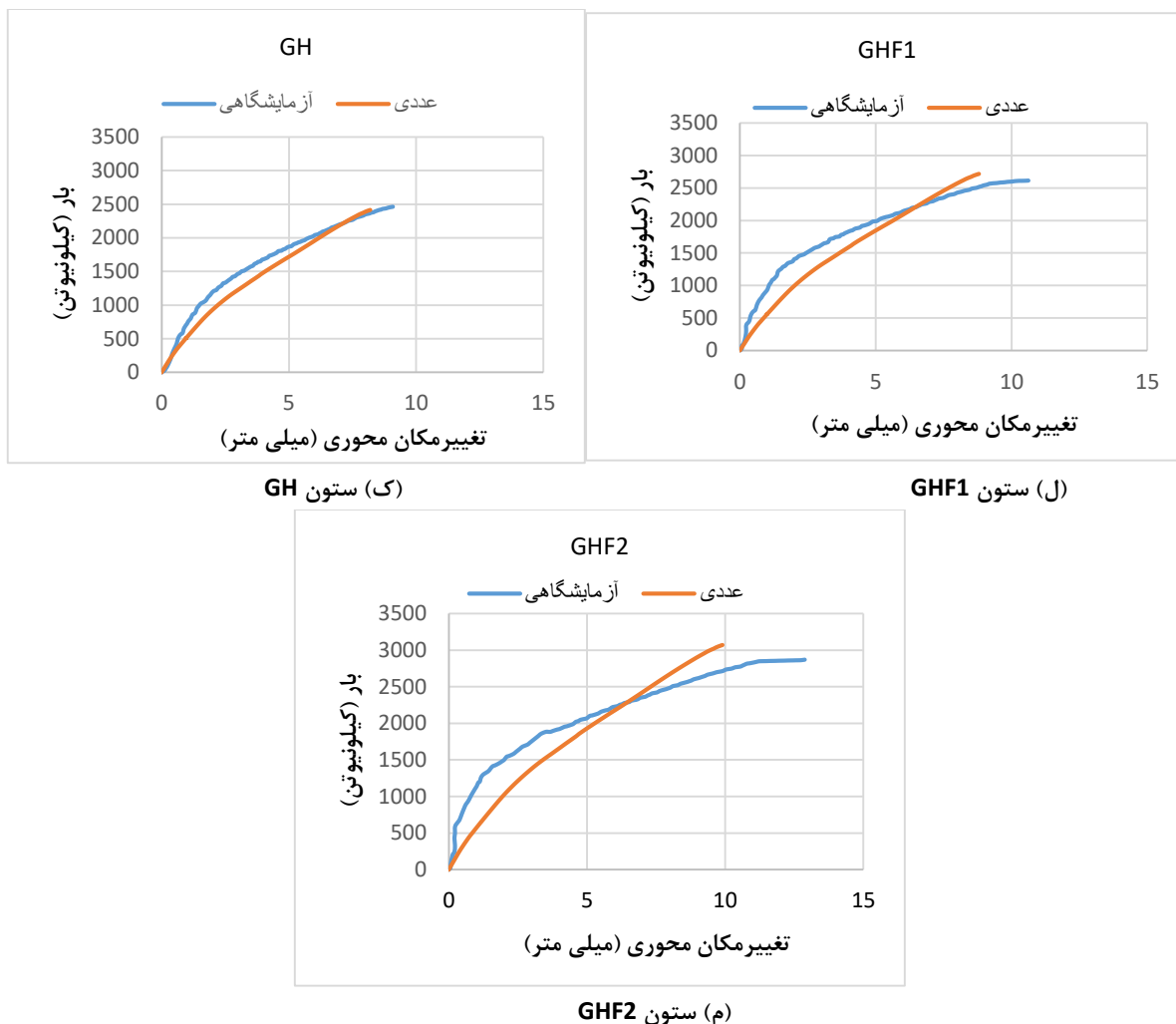


(ج) ستون H

(ط) ستون HF1



(ی) ستون HF2



شکل ۲۰- مقایسه منحنی بار-تغییر مکان محوری مدل‌های آزمایشگاهی و عددی برای ستون‌های مختلف تحقیق

جدول ۸- ظرفیت نهایی و تغییر مکان نهایی محوری حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی													
نام ستون		N	NF1	NF2	GN	GNF1	GNF2	H	HF1	HF2	GH	GHF1	GHF2
ظرفیت نهایی (kN)	مدل آزمایشگاهی (P <sub>E</sub> )	۴۷۲/۵	۶۱۱/۲	۶۴۴/۶	۲۱۴۹/۲	۲۳۶۳/۷	۲۶۰۱/۵	۶۴۱/۴	۷۴۳/۴	۹۰۴/۷	۲۴۶۴/۱	۲۶۱۳/۷	۲۸۶۷/۴
	مدل عددی (P <sub>N</sub> )	۴۹۶/۲	۶۲۳/۴	۷۰۲/۶	۲۲۳۵/۱	۲۵۵۲/۸	۲۹۳۹/۷	۷۱۱/۹	۸۶۲/۴	۹۵۹/۰	۲۴۱۴/۸	۲۷۱۸/۲	۳۰۶۸/۱
	P <sub>N</sub> / P <sub>E</sub>	۱/۰۵	۱/۰۲	۱/۰۹	۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۱۱	۱/۱۶	۱/۰۶	۰/۹۸	۱/۰۴	۱/۰۷
تغییر مکان محوری نهایی (mm)	مدل آزمایشگاهی (d <sub>E</sub> )	۱/۹	۲/۴	۲/۸	۷/۹	۹/۶	۱۱/۷	۲/۴	۲/۸	۳/۲	۹/۱	۱۰/۶	۱۲/۹
	مدل عددی (d <sub>N</sub> )	۱/۸	۲/۱	۲/۵	۷/۱	۷/۸	۸/۹	۲/۳	۲/۶	۲/۸	۸/۲	۸/۸	۹/۹
	d <sub>N</sub> / d <sub>E</sub>	۰/۹۵	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۸۱	۰/۷۶	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۸۳	۰/۷۷

با وجود همگرایی خوب بین نتایج مدل‌های عددی و نتایج آزمایشگاهی، اختلاف موجود بین نتایج را می‌توان ناشی از فرض‌ها و ساده‌سازی‌های انجام شده در مدل‌سازی عددی و تعریف پارامترها در بازه‌های منطقی بر طبق مدل‌های ارائه شده در تحقیقات پیشین دانست.

## ۷- نتایج

نتیجه کلی این پژوهش معرفی نوعی جدید از ستون‌های بتن مسلح بیضی‌شکل مرکب دارای غلاف GRP و الیاف پلیمری CFRP می‌باشد. نتایج عالی استفاده از غلاف GRP نشان داد که این غلاف می‌تواند در اجرای ساختمان‌های جدید استفاده شود، هم‌چنین الیاف پلیمری CFRP می‌توانند به منظور تقویت ستون‌های بتنی موجود که به دلیل استفاده از ویرایش‌های گذشته آیین‌نامه‌های طراحی و یا به دلایل اجرایی دچار ضعف هستند، برای افزایش ظرفیت باربری، سختی و ارتقاء عملکرد استفاده گردند. نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

۱- استفاده از غلاف به‌عنوان قالب و تقویت ستون‌های بتن‌آرمه بیضی‌شکل باعث افزایش تحمل بار فشاری به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای گردید، به‌طوری‌که میانگین افزایش ظرفیت در روش آزمایشگاهی برای ستون‌های با بتن معمولی به میزان ۴/۱۵ برابر و برای ستون‌های با بتن پرمقاومت ۳/۵۱ برابر و در روش عددی به ترتیب به میزان ۴/۲۶ و ۳/۲۵ برابر گردید.

۲- استفاده از دورپیچ در تقویت ستون‌های بتن‌آرمه بیضی‌شکل فاقد غلاف به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای باعث افزایش ظرفیت فشاری شدند، این در حالی است که در ستون‌های دارای غلاف این اثر به خاطر محصوریت غلاف کم‌تر بوده است.

۳- درصد افزایش ظرفیت ایجاد شده با دورپیچ و هم‌چنین غلاف برای ستون‌های بتن‌آرمه بیضی‌شکل ساخته شده از بتن‌های معمولی 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 پرمقاومت دانست.

۴- افزایش لایه‌های دورپیچ سبب افزایش ظرفیت فشاری ستون‌های بتن‌آرمه بیضی‌شکل گردید، افزودن یک لایه و دو لایه دورپیچ به‌طور میانگین در روش آزمایشگاهی سبب افزایش ۱۹/۷٪ و ۲۸/۷٪ در ظرفیت فشاری برای ستون‌های با بتن معمولی و ۱۱٪ و ۲۸/۷٪ برای ستون‌های با بتن پرمقاومت و در روش عددی سبب افزایش ۱۹/۹٪ و ۳۶/۶٪ در ظرفیت فشاری برای ستون‌های با بتن معمولی و ۱۶/۸٪ و ۳۰/۹٪ برای ستون‌های با بتن پرمقاومت گردید، ولی افزایش ظرفیت فشاری با افزایش تعداد لایه‌های دورپیچ رابطه مستقیم ندارد و با افزایش تعداد لایه‌ها از نرخ افزایش ظرفیت فشاری کاسته می‌شود.

۵- منحنی‌های بار- تغییرمکان ستون‌های بتن‌آرمه بیضی‌شکل فاقد غلاف و تقویت‌شده با دورپیچ به دو محدوده ارتجاعی خطی و ارتجاعی خمیری غیرخطی با شیب کاهشی (نرم شونده) تقسیم می‌شوند.

۶- منحنی‌های بار- تغییرمکان ستون‌های بتن‌آرمه بیضی‌شکل دارای غلاف به دو محدوده ارتجاعی و ارتجاعی خمیری خطی تقسیم می‌شوند، که در محدوده ارتجاعی خمیری شیب منحنی از شیب مشابه در محدوده ارتجاعی کم‌تر می‌باشد. به‌علاوه، این منحنی‌ها به‌دلیل ترد بودن لوله‌های غلاف، هیچ‌گونه شاخه نزولی ندارند.

۷- استفاده از دورپیچ برای تقویت ستون‌های بتن‌آرمه بیضی‌شکل باعث افزایش شکل‌پذیری به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای گردید، هم‌چنین شکل‌پذیری ستون‌های دارای غلاف به‌مقدار بسیار زیادی نسبت به ستون‌های فاقد غلاف بیش‌تر بودند. نتایج نشان داد که تاثیر دورپیچ و غلاف در افزایش شکل‌پذیری ستون‌های با بتن معمولی، نسبت به ستون‌های دارای بتن پرمقاومت، بیش‌تر است.

۸- بررسی نحوه شکست ستون‌های بتن‌آرمه بیضی‌شکل نشان داد که اکثر ستون‌ها در اثر کمانش میلگردهای طولی دچار گسیختگی شدند. در ستون‌های فاقد غلاف گسیختگی اکثراً 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 ناشی از شبکه میلگردها دانست؛ در حالی که در ستون‌های دارای غلاف، گسیختگی کامل و به‌صورت 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 کماتش زودهنگام میلگردها، رسیدن تمام نقاط ستون به حداکثر کرنش قابل تحمل خود، کماتش میلگردهای طولی، قطع میلگرد ماریچ و نهایتاً گسیختگی ستون گردید.

## مراجع

- [1] Janmian, K., "Industrial production of high strength concrete", Civil Science Publications, 1<sup>st</sup> edition, pp. 12-15, 1390 [In Persian].
- [2] Ozbakkaloglu, T., Saatcioglu, M., "Seismic Performance of High-Strength Concrete Columns Cast in Stay-in-Place for Formwork", 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper NO. 2719, August 1-6, 2004.
- [3] Hosinieh, M.M., Aoude, H., Cook, W.D., Mitchell, D., "Behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete columns under pure axial loading", Engineering Structures, Vol. 99, pp. 388–401, 2015.
- [4] 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.
- [5] Zeng, J.J., Guo, Y. Ch., Guo, W.Y., Chen, W.P., Li, L.J., "Stress-Strain Behaviour of Circular Concrete Columns Partially Wrapped with FRP Strips", Composite Structures, Vol. 200, pp. 810–828, 2018.
- [6] Ejtemaei, B., Tavakolizadeh, M.R., Ghods, A.S., "Investigation of the effect of GFRP wrapping as separate strips in the behavior of reinforced concrete columns", 8<sup>th</sup> Annual National Iranian Concrete Conference, Tehran, September 2016 [In Persian].
- [7] Santandrea, M., Imohamed Ali Omar 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, Capri Island, Italy, September 29-October 1, 2016.
- [8] Jahangir, H., Esfahani, M., R., "Strain Relationship of New Fibre Composites in Bending Tests", Scientific-research journal of structural engineering and construction, Vol. 5, No. 3, pp. 92-107, 1397 [In Persian].
- [9] Barghian, M., Farzam, M., Ramezani, P., "Interaction diagram of hollow reinforced concrete column surrounded by FRP", Amirkabir Scientific-Research Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol. 48, No. 1, pp. 53-64, 1395 [In Persian].
- [10] Seffo, M., Hamcho, M., "Strength of Concrete Cylinder Confined by Composite Materials (CFRP)", Energy Procedia, Vol. 19, pp. 276–285, 2012.
- [11] 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.
- [12] Ozbakkaloglu, T., "Axial Compressive Behaviour of Square and Rectangular High-Strength Concrete-Filled FRP Casings", journal of composites for construction, Vol. 17, pp. 151-161, 2013.
- [13] 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 Fibre-Reinforced Polymers", Materials and Design, Vol. 31, pp. 2330–2341, 2010.
- [14] Ozbakkaloglu, T., Xie, T., "Geopolymer concrete-filled FRP casings: Behavior of circular and square columns under axial compression", Composites Part B, Vol. 96, pp. 215-230, 2016.
- [15] Mirmiran, A., Shahawy, M., "A new concrete-filled hollow FRP composite column", Composites Part B, Vol. 27B, pp. 263-268, 1996.
- [16] Kusumawardaningsih, Y., Hadi, M.N.S., "Comparative behaviour of hollow columns confined with FRP composites", Composite Structures, Vol. 93, pp. 198–205, 2010.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Xiao, J., Tresserras, J., Tam, V.W.Y., "GFRP-tube confined RAC under axial and eccentric loading with and without expansive agent", Construction and Building Materials, Vol. 73, pp. 575–585, 2014.
- [22] Hassanzadeh, Y., Hakimzadeh, H., Ayari, Sh., "Investigation of the effect of different shapes of bridge piers on the flow pattern around it using Fluent software", Iranian Water Resources Research, Vol 7, No. 3, 1390 [In Persian]. .

- [23] Uenaka, K., " Experimental study on concrete filled elliptical/oval steel tubular stub columns under compression", *Thin-Walled Structures*, Vol. 78, pp. 131-137, 2014.
- [24] Shen, Q., Wang, J., Wang, W., Wang, Zh, "Performance and design of eccentrically-loaded concrete-filled round-ended elliptical hollow section stub columns", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 150, pp. 99-114, 2018.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Huang, L., Sun, X., Yan, L., Kasal. B., "Impact behaviour of concrete columns confined by both GFRP casing and steel spiral reinforcement", *Construction and Building Materials*, Vol. 131, pp. 438–448, 2017.
- [31] Bagheri, M., Chahkandi, A., and 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.
- [32] Abaqus Analysis User's Manual, ABAQUS 6.13, University of Cambridge, 2013.
- [33] 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.
- [34] ASTM D2996-01, Standard Specification for Filament-Wound Fiberglass (Glass-Fibre-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe, ASTM Committee D29; 2001.
- [35] ASTM D638-02, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM Committee D63; 2002.
- [36] 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.
- [37] <https://www.ahanpakhsh.com>
- [38] Bompa, D.V., Onet, T., "Identification of concrete damaged plasticity constitutive parameters", *The National technical-scientific modern technologies for the 3<sup>rd</sup> millennium*, 05-06 November 2010, Oradea.
- [39] Kent, D.C., Park, R., "Flexural Members with confined concrete, *Journal of Structural Division*", American Society of Civil Engineers. Structural Division, Vol. 97, No. 7, pp. 1969-1990, 1971.
- [40] Park, R., Paulay, T., "Reinforced concrete structures", John Wiley and Sons, 1975.
- [41] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R., "theoretical stress-strain model for confined concrete", *ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1824, 1988.
- [42] Aram, M. R., Noroozbeigi, H., "Seismic improvement of reinforced concrete columns with CFRP strips under reciprocating loads", *Scientific and Extension Journal of Concrete Materials and Structures*, Iranian Concrete Scientific Association, Vol. 1, No. 2, pp. 103 - 121, 1395 [In Persian].
- [43] Hadi, M.N.S., "Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading", *Composites Structure*; Vol. 77, No. 1, pp.92–96, 2007.