

مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی یک روش نوین ترکیبی در مقاوم‌سازی ستون‌های بتن آرمه با استفاده از آرماتورهای فولادی سطحی و دورپیچ‌های ناپیوسته‌ی FRP

نروان هزارمالیان *

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه عمران-سازه، نجف آباد، ایران

سید بهزاد طلائی طباء

استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، گروه عمران-سازه، خمینی شهر، ایران

چکیده

در تحقیق حاضر روشی ترکیبی با نام EBRGS (Externally Bonded Rebars in Grooves whit Surface FRP)، برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتن آرمه پیشنهاد می‌گردد و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش ابتدا شیارهای طولی بر روی سطح بتن ایجاد می‌شود سپس آرماتور طولی درون شیارها چسبانده می‌شود، در آخر از نوارهای حلقوی FRP (Fiber Reinforced Polymer) برای ایجاد محصورشدگی و افزایش شکل پذیری بر روی نمونه‌ها استفاده می‌گردد. در این پژوهش از ۱۶ نمونه‌ی کوچک مقیاس استفاده گردید، تمام نمونه‌ها تحت بارگذاری محوری استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایشات نشان داد که روش پیشنهادی (EBRGS) هم باعث افزایش ظرفیت فشاری و هم باعث افزایش شکل پذیری می‌گردد؛ چسباندن میلگرد داخل شیارهای سطحی روی بتن باعث افزایش ظرفیت فشاری به اندازه‌ی ۲۳٪ و استفاده هم‌زمان از الیاف کامپوزیت و آرماتورهای سطحی به‌عنوان محصورکننده باعث افزایش شکل پذیری و ظرفیت فشاری به اندازه‌ی ۴۱٪ نسبت به نمونه‌ی کنترل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مقاوم‌سازی ستون‌ها، روش شیارزنی، محصورشدگی، افزایش ظرفیت فشاری.

* نویسنده مسئول: norvanhazarmalian@gmail.com

۱- مقدمه

شيارها نصب مي‌شدند، مطالعات ايشان نشان داد كه اين روش به- صورت قابل ملاحظه‌اي مي‌تواند جداسدگي زودرس پوشش FRP را به تعويق بياندازد و در مواردی مي‌تواند كلاً مشكل جداسدگي را حل كند [۲۰]. دو سال بعد در سال ۲۰۱۳ مستوفي نژاد و شاملی روش تكميل يافته‌اي را ارائه نمودند كه در آن ورق‌هاي FRP به‌جای نصب بر روی شيارها داخل شيارها نصب مي‌شدند؛ اين روش EBRIG^۵ نام نهاده شد [۲۱]. در ادامه مطالعاتی كه بر روی اين روش انجام شد، در سال ۲۰۱۵ توسط مشیری و همكاران تأثيرات اين روش درحالي كه در آن جهت الياف موازی با محور ستون است، بر روی افزايش ظرفيت فشاری ستون بررسی شد. نتايج نشان داد كه روش NSM و استفاده از نوارهاي FRP به‌دليل حساس بودن اين روش به قرارگيري جهت الياف به‌صورت كاملاً موازی با محور ستون، برای افزايش ظرفيت فشاری زياد مناسب نيست. درحالي كه دو روش EBROG و EBRIG تأثيرات قابل ملاحظه‌اي بر افزايش ظرفيت فشاری داشتند [۲۲].

دورپيچ FRP باعث افزايش مقاومت فشاری مي‌شود و تأثيری بر مقاومت خمشی ندارد به عبارتی دورپيچ FRP نمی‌تواند ظرفيت اندركشی محوری و خمشی را به طور قابل ملاحظه ارتقا بخشد، پس در مواقعی كه ستون نیاز به مقاوم‌سازی دارد با افزايش مقاومت فشاری حاصل از محصور شدگی نسبت D/C (Demand/Capacity) به اندازه‌ی كافی ارضا نمی‌شود، از طرفی تحقيقات نشان مي‌دهد كه با افزايش لنگر خمشی كارایی دورپيچ FRP (كامپوزيت‌هاي حلقوی) در افزايش ظرفيت فشاری کاهش مي‌يابد [۲۳]. همان‌گونه كه قبلاً هم اشاره شد؛ برای حل اين مشكل محققين از ورق‌هاي FPR در جهت طولی استفاده نموده‌اند [۲۲ و ۲۴-۲۵]، مشكل اصلي استفاده از ورق‌هاي FRP در جهت طولی جداسدگي زودرس آن‌ها از سطح بتن، تحت نیروی فشاری است. راهكار ديگر ارائه شده برای جبران كمبود D/C افزودن ظرفيت فشاری از طريق محصورشدگی به ميزانی است كه اين نسبت ارضا شود، آيين نامه FIB و ACI 440 حد بالایی محصور

باتوجه به نقش ستون در باربری سازه حفظ ايمنی و كارایی اين عضو در طول زمان امری ضروری است. مقاوم‌سازی ستون‌ها ممكن است به دلایل زيادی انجام شود: از مهم‌ترين اين دلایل می‌توان به زوال كيفيت مواد تشكيل دهنده، تغيير كاربری سازه و تغيير آيين‌نامه‌هاي طراحی اشاره كرد [۲۰]. مطالعات زيادی كه بر روی روش‌هاي مقاوم‌سازی ستون‌ها انجام شده، پيشهاد مي‌دهند از ژاكت بتنی، ژاكت فولادی و پوشش‌هاي الياف پليمري مقاوم (FRP^۱) برای مقاوم‌سازی ستون‌ها استفاده شود [۲۰ و ۳-۱۴]. ژاكت‌هاي بتنی به‌دليل سختی در اجرا و به‌ويژه دشوار بودن ايجاد اتصال بين آرماتورهاي ژاكت بتنی و ستون بتنی، نسبت به دوروش ديگر محبوبيت كمتری دارند [۳-۶]. از مزایای كامپوزيت‌هاي FRP نسبت به ژاكت‌هاي فولادی می‌توان به وزن كمتر، سهولت در اجرا، مقاومت كششی و دوام بالاتر و مقاومت در برابر عوامل محيطی مخرب اشاره نمود [۱۵ و ۱۶]. در سال ۲۰۰۲ تحقيقات Tan نشان داد كه كامپوزيت‌هاي FRP كه اليافشان موازی با محور ستون‌ها است، تنها درصورتی می‌توانند عملكرد مناسبی در فشار داشته و باعث افزايش ظرفيت فشاری ستون شوند كه توسط حلقه‌هاي عرضی كامپوزيت مهار شوند و از كمانش زودرس آن‌ها جلوگيري شود، اما اين نوع روش استفاده از الياف FRP بر روی شكل‌پذیری تأثير چندانی ندارد [۱۷].

يكي از مشكلات اساسی كامپوزيت‌هاي FRP جداسدگي زودرس ورق‌هاي FPR قبل از رسيدن الياف به كرنش نهايي و پارگی است. Blaschko و Zilch در سال ۱۹۹۹ برای حل اين مشكل، روش CFRP in concrete slits را به‌جای روش نصب متداول FRP روی سطح (EBR^۲)، ارائه نمودند [۱۸]. مطالعات بيشتری بر روی اين روش در سال ۲۰۰۰ توسط De Lorenzis انجام شد و از آن تاريخ به بعد اين روش به NSM^۳ مرسوم گشت [۱۹]. روش شيار زنی روی سطح (Grooving Method) توسط مستوفي نژاد و محمودآبادی در سال ۲۰۱۰ ابداع شد، اين روش EBROG^۴ نام‌گذاری شد كه در آن ورق‌هاي FRP بر روی

^۴ External Bounded Reinforcement On Grooves

^۵ External Bounded Reinforcement In Grooves

^۱ Fiber-Reinforced Polymer

^۲ External Bounded Reinforcement

^۳ Near Surface Mounted

۲- مطالعه‌ی آزمایشگاهی

در این تحقیق ۱۶ نمونه‌ی استوانه‌ای بتنی با طرح اختلاط بتن مطابق جدول ۱ برای دستیابی به مقاومت فشاری بیست و هشت روزه ۳۰ مگا پاسکال، به ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد و تحت نیروی فشاری تک محوری مورد آزمایش قرار گرفت. و نتیجه‌ی هر آزمایش توسط نمودار بار-تغییر مکان ثبت شد.

جدول ۱- طرح اختلاط بتن

| ردیف | مصالح | وزن (Kg) |
|------|---------------------|----------|
| ۱ | درشت دانه (شن ۵-۱۲) | ۱۰۵۰ |
| ۲ | ریز دانه (ماسه ۰-۵) | ۷۵۰ |
| ۳ | سیمان | ۳۵۰ |
| ۴ | آب | ۱۷۵ |

۲-۱- نمونه‌های آزمایشگاهی و مشخصات مواد مصرفی

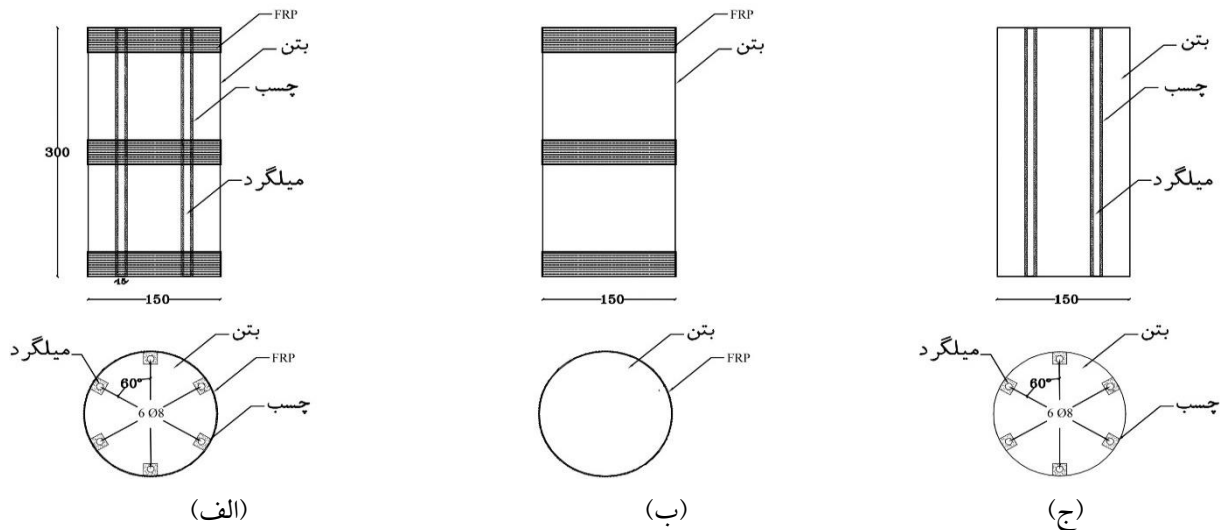
۱۶ نمونه‌ی ساخته شده بر اساس روش مقاوم‌سازی در چهار گروه دسته‌بندی و نام‌گذاری شد. دسته‌ی اول (S)، شامل ۴ نمونه‌ی بتن ساده، بدون هیچ عملیات مقاوم‌سازی بود که به منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها در هنگام شکست آماده شد. دسته‌ی دوم (S-Ex1.7) شامل چهار نمونه‌ی بتنی با تسلیح خارجی بود که در آن نسبت سطح میلگرد به سطح بتن ۱,۷٪ بود. با استفاده از دستگاه سنگ‌فروز بر روی سطح هر نمونه ۶ شیار محاطی یکسان با اختلاف زاویه ۶۰ درجه از مرکز بتن با عمق ۱۵ میلی‌متر و عرض ۱۵ میلی‌متر ایجاد شد. سپس با استفاده از دستگاه پمپ باد درون شیارها گردزادی گردید، سپس ۶ آرماتور با قطر ۸ میلی‌متر و طول ۲۹۸ میلی‌متر توسط چسب مخصوص کاشت میلگرد درون شیارها چسبانده شد. دسته‌ی سوم (S-2ply) شامل ۴ نمونه‌ی بتنی بود که به روش EBR توسط پوشش CFRP تسلیح گردید. این مقاوم‌سازی توسط سه ردیف حلقه‌ی CFRP ۲ لایه‌ای، واقع در دو انتها و وسط نمونه با فاصله آزاد ۱۰/۵ سانتی‌متر انجام شد. ورق‌های CFRP با عرض ۳۰ میلی‌متر تهیه گردید و به روش سطح مرطوب (wet lay-up) روی سطح نمونه‌ها چسبانده شد. دسته‌ی چهارم (S-Ex1.7-2ply) از چهار نمونه‌ی بتنی با مقاوم‌سازی به کمک تسلیح خارجی با میلگرد و پوشش FRP تشکیل شد. برای دستیابی به این نوع مقاوم‌سازی همانند روش توضیح داده

شدگی را محدود نموده‌اند، بنابراین عملاً این راهکار اجرایی نیست [۲۶ و ۲۷]. باتوجه به این که اکثر ستون‌های موجود در سازه‌ها تحت بار توأم محوری و لنگر خمشی می‌باشند و با در نظر گرفتن عملکرد فشاری مطلوب تر فولاد نسبت به ورق‌های FRP، در تحقیق حاضر مشابه با روش NSM (در این روش ابتدا بر روی سطح بتن شیارهایی ایجاد می‌شود و سپس میلگردهای FRP در این شیارها چسبانده می‌شود) شیارهای طولی بر روی سطح نمونه‌ها ایجاد گشته و به جای میلگرد FRP، میلگرد فولادی داخل شیارها چسبانده شد. سپس از نوارهای FPR به صورت دورپیچ‌های فاصله‌دار برای ایجاد محصورشدگی استفاده شد. نوارهای FRP علاوه بر ایجاد محصورشدگی نقش مهار جانبی را برای میلگردهای سطحی به منظور کمک به تأخیر کمانش داشتند (همانند خاموت برای آرماتورهای طولی).

باتوجه به مشاهدات عینی از دلایل اصلی خرابی ستون‌ها در زلزله‌ها تخریب پوشش روی آرماتورهای طولی، باز شدن خاموت‌ها و در نهایت بیرون زدگی و کمانش آرماتورهای طولی می‌باشد [۲۸]، با روش مقاوم‌سازی ارائه شده در تحقیق حاضر انتظار می‌رود این مشکل نیز حل شود. برای بررسی کارآمدی روش ارائه گشته ۱۶ نمونه‌ی استوانه‌ای استاندارد به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر ساخته، با روش نوین ارائه شده (EBRGS) مقاوم‌سازی و تحت بار محوری مورد آزمایش قرار گرفت.

از سوی دیگر به منظور کاهش هزینه‌های بالای مطالعات آزمایشگاهی اعم از هزینه‌های نیروی انسانی، هزینه‌های مواد مصرفی و صرف زمان زیاد؛ استفاده از نرم‌افزارهای اجزا محدود مورد توجه محققین قرار گرفته است [۲۹-۳۲]. بنابه دلایل ذکر شده، در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، مدل اجزا محدودی برای بررسی رفتار ستون‌های مقاوم‌سازی شده با این روش و انجام مطالعات پارامتری بر روی این ستون‌ها ارائه گشت، ابتدا برای صحت‌سنجی مدل ارائه شده، نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج تحقیقات آزمایشگاهی مقایسه و تأیید شد. در ادامه یک مطالعه‌ی پارامتری بر روی پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد این روش مقاوم‌سازی (نسبت سطح مقطع آرماتورهای طولی به سطح بتن و تعداد لایه‌های FPR) توسط مدل اجزا محدود ارائه شده انجام شد.

شده در دسته‌ی S-Ex1.7 ميلگردها بر روي سطح بتن كاشته شد، سپس سه رديف حلقه CFRP 2 لايه‌اي با عرض 30 ميلي متر به روش سطح مرطوب روي سطح نمونه‌ها چسبانده شد. در نام-گذاري نمونه‌ها عدد بعد از S شماره نمونه در گروه، عدد بعد از Ex نسبت سطح مقطع آرماتورهاي طولی به سطح مقطع بتن و عدد قبل از Ply تعداد لايه‌هاي FRP می‌باشد. شمای کلی هر گروه



شکل ۱- شمای کلی نمونه‌ها (الف) گروه S-EX1.7. (ب) گروه S-2ply. (ج) گروه S-Ex1.7-2ply

جدول ۲- مشخصات مصالح

| ميلگرد | قطر | مقاومت تسلیم (MPa) | مقاومت گسيختگی (Mpa) |
|------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| 8φ | 8 | 400 | 600 |
| چسب كامپوزيت FRP | مقاومت كشي (MPa) | مدول الاستيسيتيه (GPa) | حداكثر كرنش (%) |
| | 30 | 4/5 | 0/9 |
| چسب كاشت ميلگرد | چسبندگی به بتن (MPa) | چسبندگی به فولاد (MPa) | مقاومت فشاری (MPa) |
| | 3/5 | 20 | 90 |
| الياف FRP | مقاومت كشي (MPa) | مدول كشي (GPa) | حداكثر كرنش (%) |
| | 4950 | 240 | 1/5 |
| | | | ضخامت (mm) |
| | | | 0/111 |



شکل ۲- مراحل آماده سازی نمونه‌ها



شکل ۴- چیدمان ابزار آزمایش

۲-۳- مشاهدات آزمایش

در حین انجام آزمایش هیچ گونه جداشدگی میلگرد از سطح بتن مشاهده نشد (شکل ۵)؛ این امر نشان دهنده‌ی عملکرد خوب روش شیارزنی و چسب‌زنی برای کاشت میلگرد سطحی روی بتن است. همچنین در میلگردهای طولی تا لحظه‌ی تسلیم نمونه‌ها هیچ گونه کم‌انرژی رخ نداد و کم‌انرژی میلگردها پس از تسلیم نمونه‌ها و یا پس از تحمل حداکثر نیرو رخ داد (لازم به ذکر است که لحظه‌ی تسلیم نمونه‌ها لحظه‌ی شروع افت بار در حین بارگذاری و نقطه‌ی اکسترمم روی نمودار بار-تغییر مکان در نظر گرفته شد). عدم کم‌انرژی میلگردهای طولی تا لحظه‌ی تسلیم نمونه‌ها نشان دهنده‌ی عمل‌کرد مطلوب چسب به‌عنوان مهار جانبی و جلوگیری از کم‌انرژی میلگردها است. با توجه به عدم کم‌انرژی میلگردها تا لحظه‌ی وارد شدن حداکثر نیرو و با توجه به بار تحمل شده در نمونه‌های S-Ex1.7 و S-Ex1.7-2pl می‌توان این گونه استنباط کرد که میلگردها دچار تسلیم شده‌اند و کم‌انرژی پس از تسلیم میلگردها رخ داده است. این موضوع با مقایسه‌ی میزان بار تحمل شده توسط دو دسته نمونه S و S-Ex1.7 و با استفاده از رابطه (۱) قابل نتیجه‌گیری است؛ همان گونه که مشاهده می‌گردد میزان افزایش بار در نمونه‌ی S-Ex1.7 نسبت به نمونه‌ی S معادل ۱۲۹ (kN) است که این نیرو توسط آرماتورهای خارجی تحمل شده است، بر اساس رابطه‌ی (۱) و با انجام محاسبات ساده می‌توان مشاهده نمود که این نیرو تقریباً برابر با نیرویی است که برای تسلیم آرماتورهای سطحی لازم است.

۲-۲- نحوه‌ی انجام آزمایش

به‌منظور وارد کردن نیروی فشاری تک محوری بر روی نمونه‌ها، از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن استفاده شد. نمونه‌ها به روش کنترل جابه‌جایی و با نرخ بارگذاری معادل با ۰/۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه براساس آیین‌نامه ASTM C39 بارگذاری شدند [۳۳]. این نرخ بارگذاری معادل با ۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه است که توسط LVDT های نصب شده داخل جک تنظیم شد. تنش لحظه‌ای در نمونه‌ها از تقسیم عدد گزارش شده توسط جک بر روی سطح مقطع نمونه‌ها به‌دست آمد. جابه‌جایی‌های طولی در نمونه‌ها توسط دو LVDT با ارتفاع ۲۴۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۰۵ میلی‌متر که در وسط ارتفاع نمونه‌ها نصب شده بودند اندازه‌گیری شد، این LVDT ها روبه‌روی یکدیگر با اختلاف زاویه‌ی ۱۸۰ درجه نسبت به هم بر روی سطح نمونه‌ها توسط غلاف آهنی سفت بسته شده بودند. قبل از جایگذاری LVDT ها غلاف‌ها با یکدیگر و نیز با سطح نمونه تراز شده، تا اطمینان حاصل شود که در طول مراحل آزمایش هیچ گونه جابه‌جایی ناخواسته‌ای در LVDT ها پیش نیاید. دیتالاگر دیجیتالی موجود در دستگاه هر ۰/۱ ثانیه یک‌بار اطلاعات LVDT ها را ذخیره می‌نمود. کرنش متناظر با تنش لحظه‌ای در نمونه‌ها از تقسیم نمودن میانگین عدد گزارش شده توسط LVDT ها بر طول گیج LVDT ها یعنی همان ۲۴۰ میلی‌متر محاسبه شد. شکل ۳ تصویر LVDT ها و غلاف مذکور و شکل ۴ ستاپ توضیح داده شده در بالا را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصویر LVDT ها و غلاف‌ها

شكست نمونه پس از تسليم و نقطه‌ي حداكثر بار تا لحظه‌ي پارگي FRP به صورت تدريجي ادامه يافت و در لحظه‌ي پارگي شكست به صورت ناگهاني رخ داد؛ به علت تغيير حالت زياد نمونه‌ها امكان استناد به ديتاهاي ذخيره شده توسط LVDT پس از پارگي FRP وجود نداشت. گسيختگي در ورق‌هاي FRP با پاره شدن تمام الياف ورق‌ها رخ داد (شكل ۶).

$$P_{Ex-Steel} = A_{S-Ex} \times F_y \quad (1)$$

در اين رابطه $P_{Ex-Steel}$ نيروي لازم براي تسليم آرماتورهاي چسبيده شده در شيار سطحی، A_{S-Ex} سطح مقطع كل آرماتور در تمامي نمونه‌هايي كه از FRP براي مقاوم‌سازي استفاده شده بود مد شكست توسط پارگي ورق‌هاي حلقه‌ي FRP ميانبي تعيين شد.



شكل ۵- عدم جداشدگي ميلگرد از سطح بتن



شكل ۶- پارگي ورق‌هاي FRP

نتايج حاصل از انجام آرمایش بر روی نمونه‌ي S4-Ex1.7-2ply ذخيره سازي اطلاعات قابل استناد نبود و به همین دليل در جدول ۳ به دليل ايجاد نقص فني پس از طی ۴۰٪ از زمان آرمایش در دستگاه آورده نشده است.

جدول ۳- نتایج

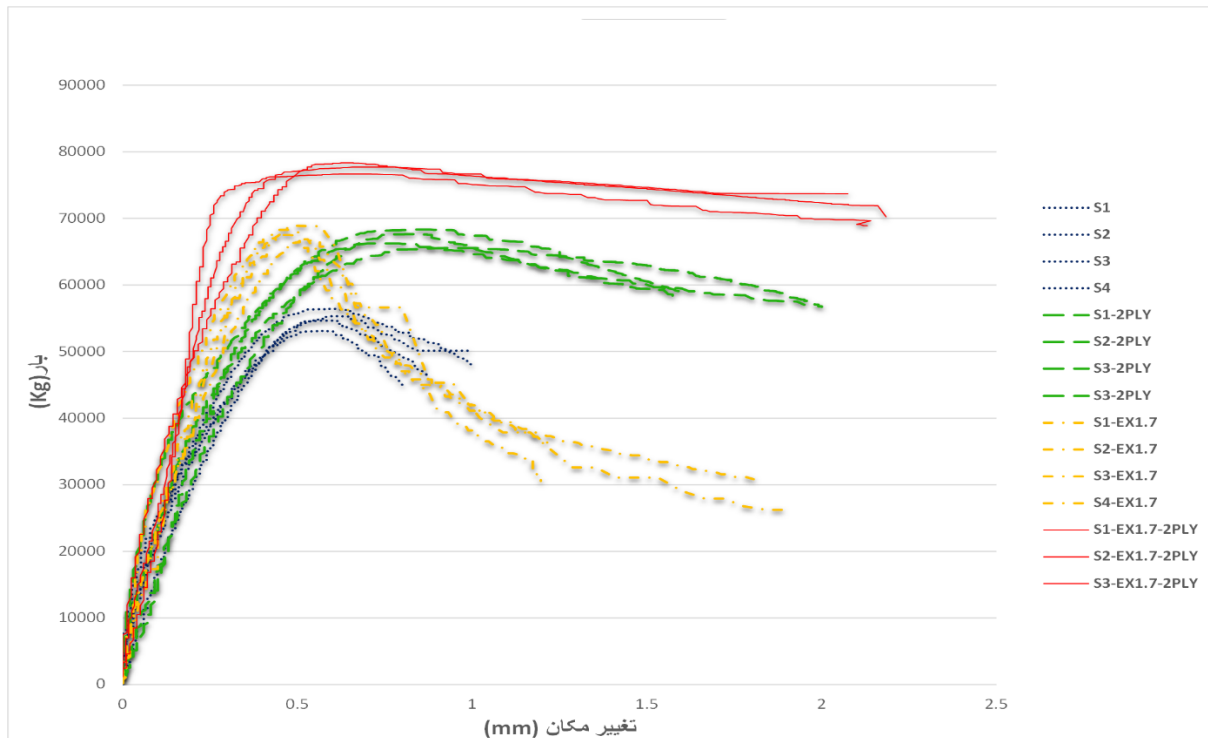
| افزایش نیروی محوری (%) | $Avg. \varepsilon a / \varepsilon co$ | $P_{max Avg} (kN)$ | εu_{Avg} | شاخص شکل پذیری (ψ) $E_u(N.m \approx J)$ | $P_{max} (kN)$ | εu | دسته |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------|---|----------------|-----------------|--------------|
| - | ۱ | ۵۴۹ | ۰/۰۰۴۰۵ | ۴۱۵/۶۴ | ۵۶۴ | ۰/۰۰۴۱ | S |
| | | | | | ۵۴۶ | ۰/۰۰۳۶ | |
| | | | | | ۵۵۳ | ۰/۰۰۵۱ | |
| | | | | | ۵۳۱ | ۰/۰۰۳۳ | |
| ۲۲ | ۱/۸۲۶۱۹ | ۶۶۹ | ۰/۰۰۷۴۱ | ۱۰۰۲/۲۹ | ۶۶۲ | ۰/۰۰۸۱ | S-2ply |
| | | | | | ۶۵۶ | ۰/۰۰۸۳ | |
| | | | | | ۶۸۳ | ۰/۰۰۶۶ | |
| | | | | | ۶۷۶ | ۰/۰۰۶۶ | |
| ۲۳ | ۰/۵۸۵۳۶ | ۶۷۸ | ۰/۰۰۲۳۷ | ۳۱۰/۱۵ | ۶۶۷ | ۰/۰۰۲۴ | S-Ex1.7 |
| | | | | | ۶۷۵ | ۰/۰۰۲۴ | |
| | | | | | ۶۸۹ | ۰/۰۰۲۵ | |
| | | | | | ۶۸۳ | ۰/۰۰۲۲ | |
| ۴۱ | ۲/۶۵۹۰۸ | ۷۷۶ | ۰/۰۱۰۷۹ | ۱۴۳۵/۴۹ | ۷۸۶ | ۰/۰۱۱۳ | S-Ex1.7-2ply |
| | | | | | ۷۶۷ | ۰/۰۱ | |
| | | | | | ۷۷۷ | ۰/۰۱۱ | |

۳- نتایج و بحث

این نگرش برگرفته از تحقیقات Piekarczyk در سال ۲۰۱۱ [۱۶] و Rousakis در سال ۲۰۰۷ [۳۴] می‌باشد، این شاخص با نماد ψ در جدول مشخص شده است. شکل ۷ نشان‌دهنده نمودار بار- تغییر مکان برای همه‌ی نمونه‌ها است، نقطه‌ی متناظر با ۰/۸۵ نیروی حداکثر، بر روی شاخه‌ی نزولی؛ به دلیل ایجاد تغییر شکل‌های شدید و انتشار زیاد ترک‌ها پس از این نقطه، به عنوان نقطه‌ی نهایی نمودار در نظر گرفته و کرنش نهایی (εu) برای

نتایج حاصل از شکست نمونه‌های آزمایشگاهی شامل حداکثر بار (P_{max})، کرنش نهایی (εu) و میانگین حداکثر بار و کرنش برای نمونه‌های هر گروه در جدول ۳ ارائه شده است (مقدار کرنش با توجه به روشی که در بخش ۲-۲ توضیح داده شده است محاسبه گردید)؛ در این جدول مقدار مساحت زیر نمودار بار- تغییر مکان به عنوان شاخصی از شکل‌پذیری ذکر شده است، که

همه‌ی نمونه‌ها کرنش متناظر با این نقطه انتخاب شد. در کرنش نهایی و میانگین حداکثر نیروی برای هر نمونه جدول ۳، ϵ_{uAVG} و P_{MaxAVG} به ترتیب بیانگر میانگین می‌باشد.



شکل ۷- منحنی بار-تغییر مکان

۱-۳- تغییرات حداکثر ظرفیت

دسته‌ی S-Ex1.7 دارای میانگین ظرفیت فشاری ۶۷/۸۳ تن بوده که نسبت به دسته کنترل S به میزان ۲۳٪ افزایش ظرفیت فشاری داشت؛ این میزان افزایش بار تقریباً برابر نیرویی است که آرماتورهای طولی تال‌لحظه‌ی تسلیم قادر به تحمل هستند این امر به این معناست که کل ظرفیت فشاری آرماتورها با استفاده از روش شیرزنی در ظرفیت نهایی شرکت کرده و ظرفیت فشاری این نمونه‌ها را می‌توان با جمع جبری ظرفیت فشاری بتن و ظرفیت فشاری کل آرماتورها تخمین زد؛ رابطه‌ی (۲) بیان‌کننده این ارتباط است.

$$f'_{c-ex} = f'_c \times A_n + f_y \times A_s \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق A_s سطح مقطع کل میلگردهای طولی، f_y مقاومت تسلیم فولادهای طولی، A_n سطح مقطع خالص بتن و f'_c مقاومت فشاری بتن است.

دسته‌ی S-2ply دارای میانگین ظرفیت فشاری ۶۶/۹۸ تن بود؛ که نشان‌دهنده‌ی افزایش ۲۲٪ ظرفیت فشاری نسبت به نمونه‌ی کنترل

است. ظرفیت فشاری این نمونه نیز توسط رابطه‌ی (۳) که آیین‌نامه FIB ارائه می‌کند [۲۶]؛ قابل تخمین است. در رابطه‌ی (۳)، f_l نیروی فشاری جانبی است که از رابطه‌ی (۴) به‌دست می‌آید و f_{co} مقاومت فشاری بتن محصور نشده است.

$$f'_{ce} = f_c \left[2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{F f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} - 1.254 \right] \quad (3)$$

$$f_l = K_e \times \frac{1}{2} \rho_j \times f_j \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴) K_e یک ضریب کاهش برای مواردی است که پوشش FRP به‌صورت ناپیوسته اجرا می‌شود و از رابطه‌ی (۵) به‌دست می‌آید؛ ρ_j از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود و f_j تنش کششی موجود در FRP است که از رابطه‌ی $E_j \times \epsilon_j$ محاسبه می‌شود؛ در این رابطه E_j مدول کششی پوشش FRP و ϵ_j کرنش ایجاد شده در آن است.

$$K_e = \left[1 - \frac{S'}{2D} \right]^2 \quad (5)$$

S' : فاصله آزاد بین حلقه‌های پوشش FPR

D : قطر نمونه‌های بتنی

$$\rho_j = \frac{4t_j}{d_j} \quad (6)$$

t_j : ضخامت پوشش FRP

میانگین ظرفیت فشاری دسته S-Ex1.7-2ply، ۷۷/۵۶۳ تن بود (۴۱٪ افزایش ظرفیت فشاری نسبت به نمونه‌های کنترل). با نگاهی دقیق‌تر می‌توان فهمید این میزان افزایش ظرفیت فشاری تقریباً برابر با مجموع افزایش ظرفیت فشاری در نمونه‌های S-Ex1.7 و S-2PLY است، به بیان دیگر می‌توان گفت مقدار ظرفیت فشاری این نمونه‌ها را می‌توان با رابطه‌ی ساده‌ی (۷) تخمین زد.

$$f'_{C-Ex-CFRP} = f'_{cc} \times A_n + A_s \times f_y \quad (7)$$

۳-۲- رفتار بار-تغییر مکان

منحنی بار-تغییر مکان تمامی نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است، چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود تمامی نمودارهای بار-تغییر مکان از یک شاخه‌ی صعودی اولیه و یک شاخه‌ی نزولی ثانویه تشکیل شده‌اند. مقایسه نمودارهای مربوط به دسته S-Ex1.7 که فقط با میلگرد تقویت شده‌اند با نمودارهای مربوط به دسته کنترل نشان داد، شیب اولیه نمودار بار-تغییر مکان در نمونه‌های S-Ex1.7 نسبت به شیب نمودار بار-تغییر مکان در نمونه‌های کنترل افزایش داشته است این امر حاکی از افزایش سختی به دلیل استفاده از میلگرد برای مقاوم‌سازی در این نمونه‌ها می‌باشد، همچنین شیب شاخه‌ی نزولی در این نمودارها نسبت به شیب شاخه‌ی نزولی در نمونه‌های کنترل زیادتر شده است، این پدیده نشان دهنده‌ی این امر است که استفاده از میلگرد به تنهایی برای مقاوم‌سازی باعث ایجاد شکست تردتر و ناگهانی‌تر می‌شود. در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود شاخص شکل‌پذیری (ψ) از ۴۵۰ برای نمونه بدون تسلیح به ۳۱۰ برای نمونه‌ی S-Ex1.7 رسیده است که نشان‌دهنده‌ی شکست تردتر می‌باشد.

مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به دسته‌های S-Ex1.7 و S-Ex1.7-2ply نشان می‌دهد که شیب اولیه نمودارهای این دو دسته یکسان است به بیان دیگر وجود میلگرد خارجی در نمونه‌های دسته S-Ex1.7-2ply نیز باعث افزایش سختی اولیه شده است، اما رفتار این دسته در شاخه‌ی نزولی در مقایسه با رفتار دسته

S-Ex1.7، به دلیل وجود FRP و ایجاد محصورشدگی به کلی متفاوت است. با توجه به شکل ۷ و جدول ۳ می‌توان دید که استفاده از FRP در دسته‌ی S-Ex1.7-2ply به شدت باعث افزایش شکل‌پذیری نسبت به دسته‌ی S-Ex1.7 و نمونه‌های کنترل می‌شود، به گونه‌ای که شاخص شکل‌پذیری از عدد ۱۵/۳۱۰ در گروه S-Ex1.7 به ۴۹/۱۴۳۵ در گروه S-Ex1.7-2ply رسیده است. این موضوع در شکل ۷ باعث ایجاد کاهش در شیب شاخه‌ی نزولی در این دسته نسبت به شیب شاخه‌ی نزولی در دسته‌ی S-Ex1.7 شده است و شکست ناگهانی در دسته‌ی S-Ex1.7 را تبدیل به شکست تدریجی کرده است. با مقایسه نمودارهای مربوط به دسته‌های S-Ex1.7-2ply و Ex1.7-2ply مشاهده شد که شیب شاخه‌ی نزولی در این نمودارها تقریباً یکسان است. این موضوع به این معناست که مد شکست نمونه‌هایی که در آن‌ها از FRP برای مقاوم‌سازی استفاده شده است توسط پارگی FRP تعیین می‌شود و در این نمونه‌ها شکست تدریجی رخ می‌دهد. با دقت بیشتر در نمودارهای مربوط به دسته‌ی S-Ex1.7-2ply می‌توان دیدی که قسمت اول نمودار یعنی شاخه‌ی صعودی از الگوی نمودارهای مربوط به S-Ex1.7 پیروی می‌کند و قسمت دوم یعنی شاخه‌ی نزولی نمودار از الگوی دسته‌ی Ex1.7-2ply پیروی می‌کند این امر حاکی از عملکرد مطلوب استفاده‌ی توام فولاد طولی و حلقه‌های FRP برای مقاوم‌سازی است.

۴- مطالعه‌ی عددی

علاوه بر کار آزمایشگاهی، در تحقیق حاضر برای انجام مطالعات پارامتری، از نرم‌افزار ABAQUS، و حل غیر خطی نمونه‌های جدید استفاده شد. ابتدا صحت این مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی سنجیده شد و سپس تأثیر دو پارامتر تأثیرگذار بر روی عملکرد ستون‌های مقاوم‌سازی شده با روش ابداعی؛ یعنی نسبت سطح مقطع آرماتورهای طولی به سطح مقطع بتن و تعداد لایه‌های FRP توسط این مدل مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ۹ نمونه‌ی استوانه‌ای با ارتفاع ۳۰۰ و قطر ۱۵۰ میلی‌متر دارای سه نسبت سطح مقطع آرماتور طولی به بتن؛ ۱/۷٪، ۲/۶٪ و ۳/۸٪ که به ترتیب شامل ۶ آرماتور فولادی با قطر ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر؛ محصور در یک، دو و سه لایه FRP؛ با روشی که در بخش ۴-۱ تا ۴-۴ توضیح داده شده است مدل گشت.

۴-۱- مدل سازی بتن

آن در سه جهت متعامد متفاوت است، مدل می شود، به این منظور مدول الاستیسته در جهت الیاف و عمود بر آن و ضریب پواسون و مدول برشی در راستاهای مختلف به نرم افزار معرفی می شود و نرم افزار با استفاده از تئوری های مکانیک مواد کامپوزیت رفتار کامپوزیت های FRP را شبیه سازی می نماید [۳۵]. مشخصات مصالح FRP در نرم افزار منطبق با مشخصات ورق های FRP مصرفی در نمونه های آزمایشی، معرفی شد. برای مدل کردن پارگی FRP از معیارهای متفاوتی همچون کرنش حداکثر، تسای-وو، تسای-هیل، hashin و ... می توان استفاده کرد. بر این اساس فام و ریز کالا استفاده از معیار گسیختگی تسای-وو را برای کامپوزیت FRP که تحت تنش دو محوره قرار دارد پیشنهاد کردند [۳۷]. به همین دلیل پارگی FRP با استفاده از معیار تسای-وو کنترل شد. این معیار می تواند اثر تنش های دو محوره را بر پارگی FRP در نظر بگیرد. در این معیار با استفاده از مشخصات مکانیکی دو راستای اصلی کامپوزیت؛ که در قسمت Fail stress به نرم افزار معرفی شد، یک منحنی بسته به عنوان معیار گسیختگی در صفحه ی تنش های دو محوره تعریف می شود. نقطه تلاقی این منحنی با منحنی تنش فشاری-تنش کششی کامپوزیت بیانگر زوج تنشی است که باعث گسیختگی می گردد [۳۵ و ۳۸]. معیار تسای-وو از رابطه ی (۸) استفاده می کند.

$$I_F = F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + (8) \\ F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} < 1$$

ضرایب معادله ی فوق به شرح زیر است:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c}, \quad F_2 = \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c}, \quad F_{11} = -\frac{1}{X_t X_c} \\ F_{22} = -\frac{1}{Y_t Y_c}, \quad F_{66} = -\frac{1}{s^2} \quad (9 \text{ الف-ه})$$

در این روابط σ_{11} و σ_{22} به ترتیب تنش کششی در راستای الیاف و تنش فشاری عمود بر راستای الیاف، σ_{12} تنش برشی، X_t و X_c مقاومت کششی و فشاری در راستای الیاف، Y_t و Y_c مقاومت کششی و فشاری در راستای عمود بر الیاف و K مقاومت برشی درون صفحه ای است. ارتباط بین بتن و FRP با استفاده از قید Tie معرفی شد؛ این نوع قید درجات آزادی تمام گره های روی سطح بتن را به درجات آزادی گره های متناظر روی سطح FRP مقید می کند.

برای معرفی بتن از المان سه بعدی ۸ گره ای C3D8R استفاده شد، از مدل پلاستیسته ی آسیب به دلیل همگرایی سریع حل و توانایی بهتر این مدل برای پیش بینی رفتار بتن تحت فشار، استفاده شد. برای تعریف رفتار الاستیک بتن ضریب پواسون برابر ۰/۱۹ و مدول الاستیسته آن برابر $4700\sqrt{f'_c}$ در نظر گرفته شد. با بهره گیری از مدل پلاستیسته ی آسیب و معرفی پارامتر های، خروج از مرکزیت ۰/۱، تنش دو محوره به تنش تک محوری ۱/۱۶، ویسکوزیته ۰/۰۰۰۵ و k برابر با ۰/۶۶۶، مشخصات پلاستیسته بتن به نرم افزار معرفی گشت [۳۵]. به منظور اعمال تأثیرات محصورشدگی بر رفتار بتن از روشی که yu و همکاران در سال ۲۰۱۰ ارائه کردند، استفاده شد؛ این محققین در این روش با استفاده از user subroutine در نرم افزار ABAQUS و اصلاح مدل پلاستیسته آسیب توانستند تأثیرات محصورشدگی بر رفتار بتن را اعمال کنند [۳۰ و ۳۶]. Yu و همکاران با وابسته سازی کرنش پلاستیک محوری به فشار دورگیر ناشی از عوامل محصور کننده توانستند تأثیرات محصورشدگی بر روی رفتار فشاری بتن را مدل سازی نمایند آن ها برای این کار با استفاده از برنامه نویسی در user subroutine به جای استفاده از یک منحنی تنش-کرنش پلاستیک برای معرفی رفتار فشاری بتن به نرم افزار از چندین منحنی تنش-کرنش به ازای تغییرات فشار جانبی استفاده نمودند. و از این طریق هم رفتار تنش-کرنش محوری بتن و هم زاویه ی اتساع را به فشار جانبی ناشی از عوامل محصورکننده وابسته کردند از این رو در تحقیق حاضر آنالیز حساسیت به زاویه ی اتساع برای رفتار فشاری بتن صورت نگرفته است. چرا که مقدار این عدد به فشار جانبی وابسته و متغیر است. نحوه ی استفاده از user subroutine برای وابسته سازی کرنش پلاستیک محوری به فشار جانبی به صورت مفصل در منابع [۳۰ و ۳۶] موجود است.

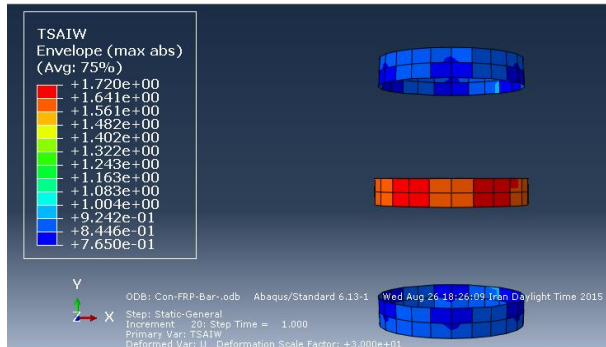
۴-۲- مدل سازی FRP

به منظور مدل سازی FRP از المان shell چهار گره ای S4R استفاده شد. باتوجه به این که رفتار FRP تا لحظه ی شکست الاستیک خطی است [۳۰]؛ این رفتار با استفاده از ثابت های مهندسی و به صورت یک ماده ی ارتوتروپیک که خصوصیات

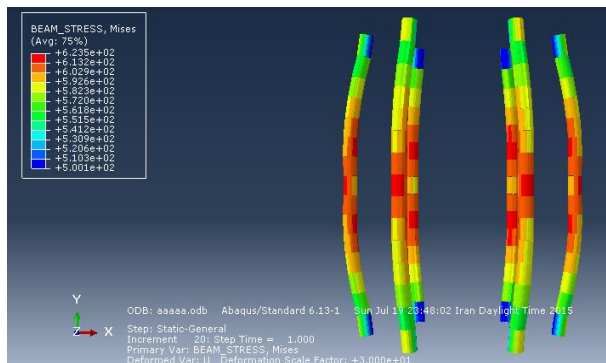
۳-۴- مدل سازی آرماتورها

میلگردها را می‌توان با المان تک بعدی T3D2 مدل‌سازی کرد. تنش محوری آرماتورهای فولادی نشان داده شده است (لازم به ذکر است برای وضوح بهتر آرماتورها در این شکل به صورت سه‌بعدی نشان داده شده است لذا همان گونه که قبلاً بیان گردید از المان تک بعدی برای مدل‌سازی آنها استفاده شده است) که مطابق با آنچه که در آزمایش‌ها مشاهده شد، در مدل ارائه شده نیز آرماتورها دچار تسلیم می‌شوند و سپس کمانش می‌نمایند.

ارتباط بین میلگرد و بتن با استفاده از قید Tie معرفی گشت. رفتار فولاد به صورت الاستوپلاستیک مدل شد؛ برای معرفی قسمت الاستیک از مدول الاستیسته‌ی و ضریب پواسون به ترتیب برابر $10^5 \times 2/1$ مگاپاسکال و $0/3$ استفاده شد و رفتار بعد از تسلیم، توسط منحنی تنش بر حسب کرنش غیر الاستیک به صورت تابع جدولی به نرم افزار معرفی شد.



(الف)



(ب)

۴-۴- بارگذاری، شرایط مرزی و انتخاب حل گر

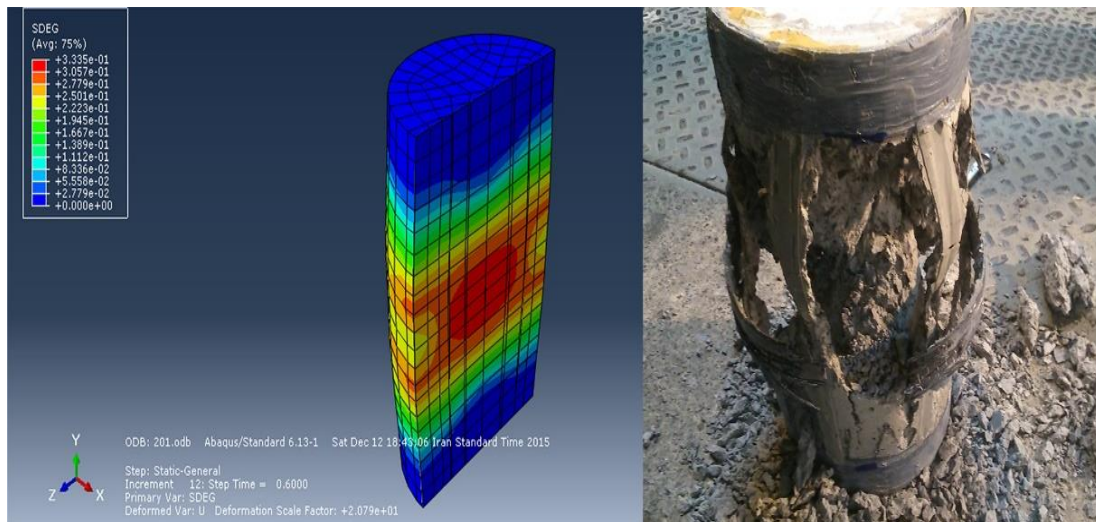
به صورت کلی در روند آزمایش نیروی‌های وارده را می‌توان به دو روش کنترل بار و کنترل جابه‌جایی اعمال نمود. در این مدل‌سازی، به منظور شبیه‌سازی شرایط اعمال بار و تکیه‌گاه در آزمایشگاه، از روش اعمال جابه‌جایی نیروی مورد نظر به نمونه‌ها اعمال گشت؛ ابتدا دو صفحه‌ی سه بعدی چهار گره‌ای R3D4 از نوع صلب با تخصیص نقطه‌ی Reference point مرکزی (به منظور اعمال شرایط مرزی به این نقطه)، مدل شد. سپس بارگذاری به صورت تغییر مکان قائم یکنواخت تدریجی بر روی نقطه‌ی تعریف شده در صفحه‌ی بالایی اعمال شد و نقطه‌ی تعریف شده در سطح پایینی نسبت به چرخش و تغییر مکان در کلیه جهات مقید گشت. لازم به ذکر است پس از پایان مراحل ساخت و مونتاژ نمونه، نوع تحلیل Static, General و برای کلیه نمونه‌های مدل‌سازی شده، شبکه بندی ۱۰ میلی‌متری انتخاب گردید.

۴-۵- صحت‌سنجی مدل

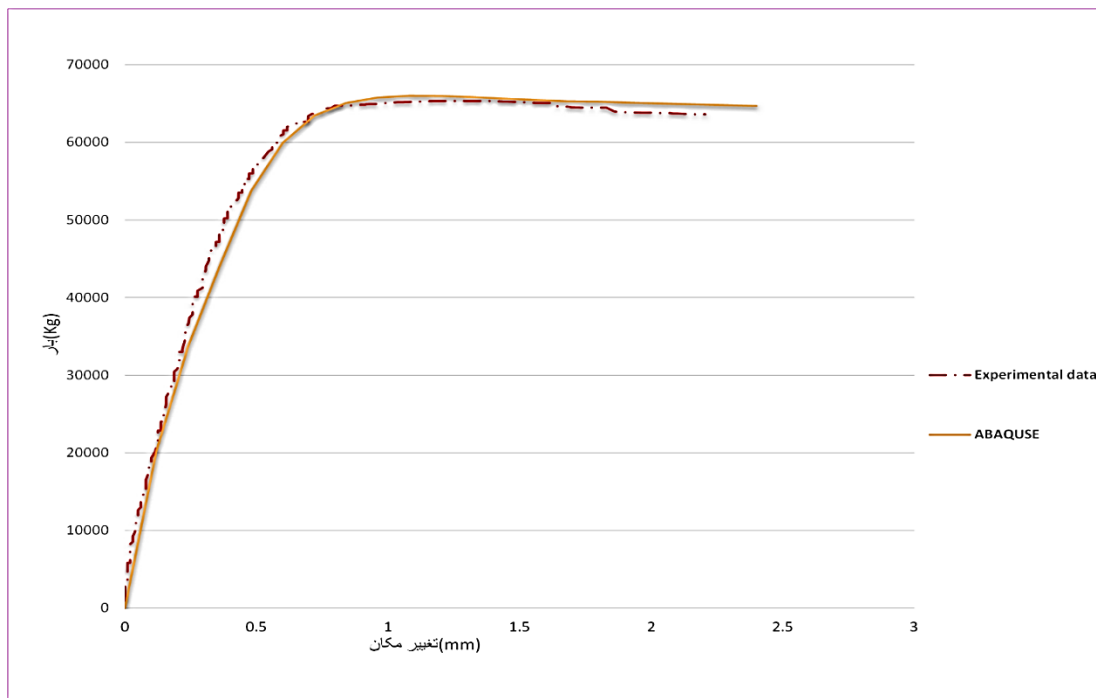
به منظور ارزیابی صحت مدل ارائه گشته نمونه‌ی S3-EX1.7-2ply از قسمت آزمایشگاهی انتخاب و مدل شد. در خروجی‌های نرم افزار ABAQUS شاخص شکستی به نام R وجود دارد که پارگی ورق FRP را بر اساس معیار تساوی کنترل می‌کند $R < 1.0$ نشان می‌دهد که وضعیت تنش درون سطح شکست است و $R \geq 1.0$ نشان دهنده‌ی شکست است [۳۵]. چنانچه در شکل (۸ الف) مشاهده می‌شود این معیار برای حلقه‌ی FRP میانی بیشتر از یک و برای حلقه‌های FRP انتهایی کمتر از یک می‌باشد که بیانگر گسیختگی حلقه‌ی میانی می‌باشد این امر در موارد آزمایشگاهی نیز مشاهده شد. در شکل (۸ ب) نیز کانتور

شکل ۸- الف) پارگی حلقه میانی FRP (ب) کمانش میلگردهای طولی پس از تسلیم

شکل ۹ نشان دهنده‌ی شمای ترک در نمونه آزمایشگاهی در مقایسه با مدل اجزا محدود می‌باشد. در شکل ۱۰ نمودار بار-تغییر مکان حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار با نتایج حاصل از آزمایش نشان داده شده است که بیانگر تطابق رفتاری مدل ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی است، بنابر نتایج حاصله در این بخش می‌توان به این نتیجه رسید که مدل ارائه شده به نحو مطلوبی توانایی پیش‌بینی رفتار ستون‌های مقاوم‌سازی شده با این روش را دارد و از این مدل برای انجام مطالعات پارامتری بر روی این ستون‌ها می‌توان استفاده نمود.



شکل ۹- مقایسه شمای ترک خوردگی در نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود



شکل ۱۰- منحنی تنش- کرنش حاصل از مدل سازی و آزمایش

۵- مطالعه پارامتری

مشخصه بتن و f_l از رابطه ۳ به دست می آید. همان گونه که مشاهده می شود؛ بیشترین نسبت محصورشدگی و شکل پذیری در نمونه هایی که میزان آرماتور در آن ها ثابت است، مربوط به نمونه هایی می شود که با سه لایه FRP مقاوم سازی شده اند و در نمونه هایی که از تعداد لایه های FRP یکسان برای مقاوم سازی استفاده شده است؛ محصورشدگی ثابت مانده، و بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه ای می شود که از فولاد طولی بیشتر برای مقاوم سازی آن استفاده شده است.

همان گونه که قبلاً اشاره شده به منظور انجام مطالعات پارامتری ۹ نمونه مدل سازی شد که مشخصات هر نمونه در جدول ۴ قابل مشاهده است. جدول ۵ و شکل ۱۱ به ترتیب نتایج حاصل از آنالیز نمونه های مدل سازی شده و نسبت محصورشدگی را برای هر نمونه نشان می دهد. برای محاسبه ی نسبت محصورشدگی از رابطه f_l/f'_{co} که توسط اسپالستر و موتی در سال ۱۹۹۹ [۳۹] ارائه شده است، استفاده شد. f'_{co} در این رابطه ی مقاومت

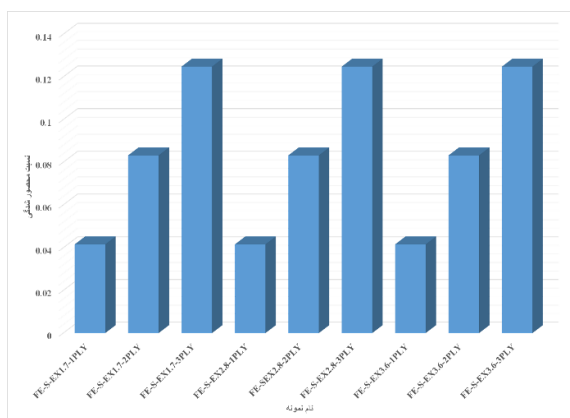
جدول ۴- مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی

| تعداد لایه‌های FRP | قطر آرماتورها (mm) | تعداد آرماتورها | اسم نمونه‌ها |
|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| ۱ | ۸ | ۶ | FE-S-EX1.7-1ply |
| ۲ | ۸ | ۶ | FE-S-EX1.7-2ply |
| ۳ | ۸ | ۶ | FE-S-EX1.7-3ply |
| ۱ | ۱۰ | ۶ | FE-S-EX2.6-1ply |
| ۲ | ۱۰ | ۶ | FE-S-EX2.6-2ply |
| ۳ | ۱۰ | ۶ | FE-S-EX2.6-3ply |
| ۱ | ۱۲ | ۶ | FE-S-EX3.8-1ply |
| ۲ | ۱۲ | ۶ | FE-S-EX3.8-2ply |
| ۳ | ۱۲ | ۶ | FE-S-EX3.8-3ply |

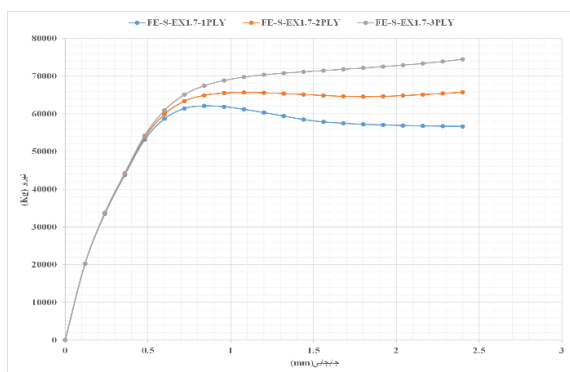
دهنده‌ی این موضوع است که با افزایش میزان سطح مقطع میلگردهای خارجی میزان محصورشدگی تغییر نمی‌کند ولی مقاومت نهایی نمونه به اندازه‌ی مقاومت فشاری تسلیم مجموع آرماتورها افزایش پیدا می‌کند؛ این موضوع در نمونه‌های آزمایشگاهی نیز مشاهده شد.

جدول ۵- نتایج حاصل از مدل‌سازی

| نام نمونه | ϵ_a | P_{max} (kN) | ψ |
|-----------------|--------------|----------------|-------------|
| FE-S-EX1.7-1ply | ۰/۰۰۷۹ | ۶۲۱۲۶/۶ | ۱۲۷۷۷۷/۵۴۹ |
| FE-S-EX1.7-2ply | ۰/۰۰۰۸ | ۶۵۷۵۲/۷ | ۱۳۸۷۲۰/۴۸۵۴ |
| FE-S-EX1.7-3ply | ۰/۰۰۰۸ | ۷۴۴۹۰/۱ | ۱۴۹۲۷۱/۵۹۲ |
| FE-S-EX2.6-1ply | ۰/۰۰۷۹ | ۷۱۷۳۲/۳ | ۱۴۸۵۱۴/۱۵ |
| FE-S-EX2.6-2ply | ۰/۰۰۰۸ | ۷۶۶۵۲/۸ | ۱۵۹۷۰۹/۶۸ |
| FE-S-EX2.6-3ply | ۰/۰۰۰۸ | ۸۵۴۶۱ | ۱۷۰۴۸۳/۵۶ |
| FE-S-EX3.8-1ply | ۰/۰۰۷۹ | ۸۳۷۸۱/۵ | ۱۷۳۸۳۷/۷۶ |
| FE-S-EX3.8-2ply | ۰/۰۰۰۸ | ۸۹۸۷۴/۸ | ۱۸۵۲۰۵/۶۹ |
| FE-S-EX3.8-3ply | ۰/۰۰۰۸ | ۹۸۷۴۹/۷ | ۱۹۶۱۸۵/۱۱ |



شکل ۱۱- نسبت محصور شدگی



شکل ۱۲

شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ منحنی بار-تغییر مکان حاصل از آنالیز توسط نرم‌افزار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تمامی نمونه‌ها با افزایش تعداد لایه‌های FRP شیب قسمت دوم منحنی افزایش پیدا می‌کند؛ این امر به معنای افزایش شکل‌پذیری و افزایش محصورشدگی در اثر افزایش تعداد لایه‌های FRP است (این امر در جدول ۵ نیز قابل مشاهده است). در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که با افزایش آرماتورهای خارجی مقاومت فشاری افزایش یافته ولی شیب شاخه‌ی ثانویه هیچ تغییری نمی‌کند؛ این امر نشان

و شکل پذیری ستون‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفت و اثبات شد. سپس در فاز دوم از نرم افزار ABAQUS برای مطالعات پارامتری بر روی این ستون‌ها استفاده شد. پارامترهای مورد بررسی شامل نسبت سطح مقطع میلگردهای طولی به سطح مقطع بتن و تعداد لایه‌های FRP بود. نتایج حاصله به شرح زیر است:

۱- ظرفیت فشاری نمونه‌های آزمایشگاهی مسلح شده با میلگرد خارجی تنها، حدود ۲۳٪ درصد افزایش داشت. این میزان در نمونه‌هایی که به صورت هم‌زمان با میلگرد خارجی و حلقه‌های FRP مسلح شده بودند به ۴۱٪ درصد افزایش پیدا کرد که این امر حاکی از عمل کرد مطلوب این دو عامل در همراهی با هم می‌باشد.

۲- با توجه به افزایش شیب اولیه نمودار تنش- کرنش و نیروی در لحظه‌ی شکست، هم در گروه‌هایی که فقط از میلگرد و هم در گروه‌هایی که علاوه بر میلگرد از پوشش FRP برای مقاوم‌سازی استفاده شده بود، این نتیجه استنباط شد که میلگردهای سطحی در چرخه‌ی باربری شرکت داشته و باعث افزایش باربری می‌شوند.

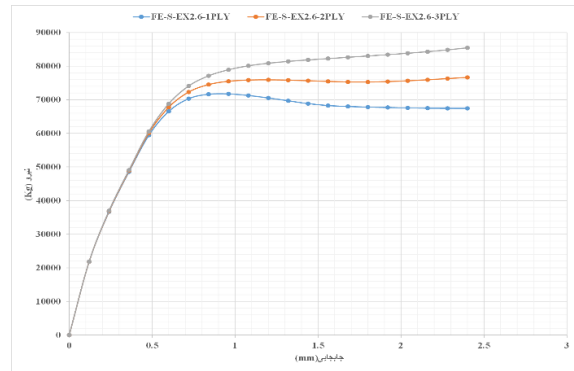
۳- در نمونه‌های مسلح شده که در آن‌ها تنها از میلگرد خارجی طولی استفاده شده بود، شکل پذیری هیچ گونه افزایشی نداشت؛ اما در نمونه‌هایی که فقط با FRP مسلح شده بودند و یا این که علاوه بر حلقه‌های FRP با میلگرد خارجی نیز مسلح شده بودند، شکل پذیری افزایش یافت. این امر نشان دهنده‌ی این موضوع است که تنها FRP باعث افزایش شکل پذیری شده است.

۴- با توجه به ظرفیت‌های فشاری به دست آمده از آزمایش‌ها، این نتیجه حاصل شد که میزان ظرفیت فشاری این نوع ستون‌ها را می‌توان از یک ضابطه‌ی ساده و با جمع جبری ظرفیت فشاری اجزاء به دست آورد.

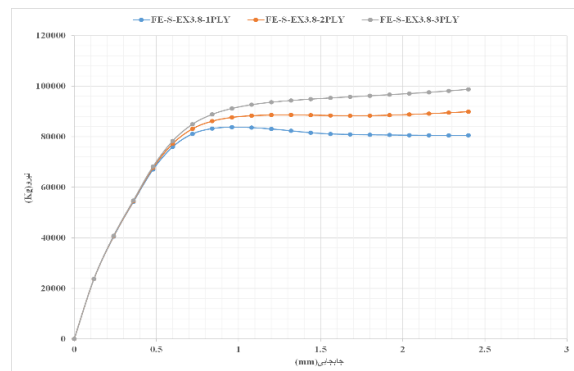
۵- در هیچ کدام از نمونه‌ها آرماتور طولی از سطح بتن جدا نشد؛ این امر حاکی از عمل کرد مناسب استفاده از آرماتور فولادی در روش NSM برای افزایش ظرفیت فشاری می‌باشد.

۶- با انجام مدل‌سازی در نرم افزار ABAQUS به خوبی می‌توان رفتار ستون‌های مقاوم‌سازی شده با این روش را پیش‌بینی کرد و از این نرم افزار می‌توان برای انجام مطالعات پارامتری بر روی عوامل تأثیرگذار روی عملکرد این ستون‌ها استفاده نمود.

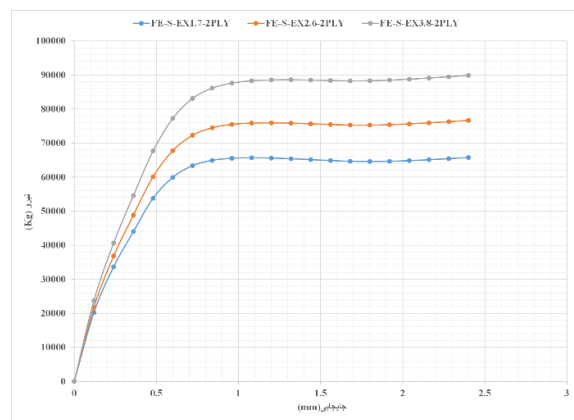
۷- افزایش نسبت سطح مقطع آرماتور طولی به سطح مقطع بتن تأثیری بر روی محصورشدگی ندارد و تنها باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود.



شکل ۱۳



شکل ۱۴



شکل ۱۵

۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر یک روش نوین برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی ارائه شد، در این روش آرماتورهای طولی داخل شیارهای سطحی روی بتن و سپس نوارهای حلقوی FRP به صورت فاصله‌دار بر روی سطح بتن چسبانده می‌شود، این روش EBRGS نام گذاری شد. در فاز اول با انجام آزمایش بر روی ۱۶ نمونه‌ی استوانه‌ای شامل ۴ دسته‌ی مختلف؛ که سه دسته آن‌ها دارای تسلیح خارجی بودند، عملکرد مطلوب و کارآمدی این روش برای افزایش ظرفیت فشاری

state-of-the-art review. *Struct Build* 2003;156(1):51–62.

[13] Harajli MH, Hantouche E, Soudki K. Stress-strain model for fiber-reinforced polymer jacketed concrete columns. *ACI Struct J* 2006;103(5):672–680.

[14] Pellegrino C, Modena C. Analytical model for FRP confinement of concrete columns with and without internal steel reinforcement. *J Compos Constr: ASCE* 2010;14(6):693–705.

[15] Barros JAO, Ferreira DRSM, Fortes AS, Dias SJE. Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening. *J Constr Build Mater* 2006;20:478–491.

[16] Piekarczyk J, Piekarczyk W, Blazewicz S. Compression strength of concrete cylinders reinforced with carbon fiber laminate. *J Constr Build Mater* 2011;25: 2365–2369.

[17] Tan KH. Strength Enhancement of Rectangular Reinforced Concrete Columns using Fiber-Reinforced Polymer. *J Compos Constr: ASCE* 2002;6:175-183.

[18] Blaschko M, Zilch K. Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits. In: *Proceedings of the twelfth international conference of composite materials: ICCM 12*. Paris, France, 1999.

[19] De Lorenzis L, Nanni A, La Tegola A. Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods. *International Meeting on Composite Materials: PLAST 2000*, Milan, Italy, May, 2000. p.9-11.

[20] Mostofinejad D, Mahmoudabadi E. Grooving as alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beams. *J Compos Constr: ASCE* 2010;14:804-811.

[21] Mostofinejad D, Shameli SM. Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams. *J Constr Build Mater* 2013;38:751–758.

[22] Moshiri N, Hosseini A, Mostofinejad D. Strengthening of RC columns by longitudinal CFRP sheets: Effect of strengthening technique. *J Constr Build Mater* 2015;79:318–325.

[23] Maaddawy TE. Strengthening of Eccentrically Loaded Reinforced Concrete Columns with Fiber-Reinforced Polymer Wrapping System: Experimental Investigation and Analytical Modeling. *J Compos Constr* 2009;13(1):13-24.

[24] Chaallal O, Shahawy M. Performance of Fiber-Reinforced Polymer-Wrapped Reinforced Concrete Column under Combined Axial-Flexural Loading. *ACI Struct J* 2000;97(4):650-669.

۸- افزایش تعداد لایه‌های FRP باعث افزایش نسبت محصورشدگی و شکل‌پذیری می‌شود.

۷- مراجع

[1] Vadoros KG, Dritsos SE. Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. *Constr Build Mater* 2008;22:264–276.

[2] Su RKL, Wang L. Axial strengthening of preloaded rectangular concrete columns by precambered steel plates. *Eng Struct* 2012;38:42–52.

[3] Bett BJ, Klingner RE, Jirsa JO. Lateral load response of strengthened and repaired reinforced concrete columns. *ACI Struct J*. 1988;85(5):499–508.

[4] Chronopoulos M, Scarpas A, Tassios TP. Response of original and repaired reinforced concrete joints under cyclic imposed deformations. In: *Proceeding of 10th European Conference Earthquake Engineering*. Vienna, Austria, 1994. p.2261–2267.

[5] Dritsos SE, Taylor CA, Vadoros KG. Seismic strengthening of reinforced concrete structures by concrete jacketing. In: *Proceeding of 7th International Conference Structural Faults Repair*. Edinburgh, UK, 1997;3:391–402.

[6] Dritsos SE, Vadoros KG, Taylor CA. Shaking table tests on a retrofitted small scale reinforced concrete model. In: *Proceeding of 6th SECED Conference on Seismic Design Practice into the next century*. Oxford, UK, 1998. p.525–33.

[7] Wu YF, Liu T, Oehlers DJ. Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing. *Adv in Struct Eng* 2006;9(4):507–533.

[8] Fukuyama H, Sugano S. Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake. *Cement Concr Compos*, 2000;22(1):59–79.

[9] Cirtek L. RC columns strengthened with bandage—experimental program and design recommendations. *J Constr Build Mater* 2001;15(8):341–349.

[10] Ramirez JL. Ten concrete column repair methods. *J Constr Build Mater*, 1996;10(3):195–202.

[11] Nishikawa K, Yamamoto S, Natori T, Terao K, Yasunami H, Terada M. Retrofitting for seismic upgrading of steel bridge columns. *Eng Struct*, 1998;20(4):540–51.

[12] Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L. Behavior and strength of FRP-strengthened RC structures: a

- [39] Spoelstra MR, Monti G. FRP-confined concrete model. *J Compos Constr* 1999;3(3):143–150.
- [25] Widiarsa IBR, Hadi MNS. Performance of CFRP Wrapped Square Reinforced Concrete Columns Subjected to Eccentric Loading. *Procedia Eng* 2013;54:365-376.
- [26] FIB. Externally bounded reinforcement for RC structures. Lausanne, Switzerland: International Federation for structural concrete; July, 2001.
- [27] ACI 440.2R-08. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute; 2008.
- [28] Kato D, Nagahashi T. Failure Mode of Columns of Existing R/C Building Damaged During the 2007 Niigata Chuetsu-Oki Earthquake. *Procedia Eng* 2011;14:204–211.
- [29] Tao Z, Uy B, Liao FY, Han LH. Finite element modelling of concrete-filled square stainless steel tubular stub columns under axial compression. In: *Proceedings of the 5th international symposium on steel structures*. 2009.
- [30] Yu T, Teng JG, Wong YL, Dong SL. Finite element modeling of confined concrete-II: Plastic-damage model. *Eng Struct* 2010;32(3):680–691.
- [31] Yuan W, Bin Z, Yang JJ. Experimental and numerical studies of short concrete-filled double skin composite tube columns under axially compressive loads. *J Constr Steel Res* 2013;80:23–31.
- [32] Yu T, Teng JG, Wong YL. Stress-Strain Behavior of Concrete in Hybrid FRP-Concrete-Steel Double-Skin Tubular Columns. *J Struct Eng* 2010;136(4):379–389.
- [33] ASTM. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C 39/C 39M-04a). West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing and Materials; 2005.
- [34] Rousakis TC, Karabinis AI, Kioussis PD. FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticity modelling. *Eng Struct* 2007;29(7):1343-1353.
- [35] ABAQUS Inc., ABAQUS/CAE User Manual, Version 6.13
- [36] Yu T, Teng JG, Wong YL, Dong SL. Finite element modeling of confined concrete-I: Drucker-Prager type Plasticity model. *Eng Struct* 2010;32:665-679.
- [37] Fam AZ, Rizkalla SH. Confined Model for Axially Loaded Concrete Confined Fiber Reinforced Polymer Tubes. *ACI Struct J*, 2001;98,4,451-461,
- [38] Tsai WS, Wu EM. A General Theory of Strength for Anisotropic Material. *J Compos Mater* 1970;5:58-80.

Experimental and Numerical Study on an Innovative Method for Strengthening Concrete Columns using Surface Steel Rebar and FRP Jacket

N. Hazarmalian*

Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

B. Talaeitaba

Department of Civil Engineering, Khomeini shahr Branch, Islamic Azad University, Khomeini shahr, Iran

Abstract

In this study, a method called EBRGS is developed for strengthening RC columns. In this method Grooves are initially cut out along the lengths of the concrete specimens into which longitudinal reinforcement is planted. And then FRP stirrups were used to enhance specimen's confinement. 16 cylindrical concrete specimens are manufactured, all specimens tested under static axial loading. It is found that the proposed EBRGS technique is capable of enhancing both the compressive strength and the ductility of the RC column specimens; steel rebars inside the grooves on the surface leads to an enhancement of 23% in compressive strength while the application of FRP stirrups along with surface rebar enhance both ductility and compressive strength by 41% relative the control specimen.

Keywords: strengthening of columns, grooving method, confinement, increasing compressive capacity.

* Corresponding Author: norvanhazarmalian@gmail.com

