

## مطالعه رفتاری GFRP در محصورسازی المان‌های فشاری و مقایسه با SIFCON

بهاره عبدالهی<sup>۱</sup>، محمد شکرچی زاده<sup>۲\*</sup>، مسعود متولی<sup>۲</sup> و مهدی بخشی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۶/۶/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۸/۲۵، تاریخ تصویب ۸۷/۹/۲۴)

### چکیده

در این مطالعه، مدل سازی آزمایشگاهی محصورسازی المان های فشاری بتنی، با استفاده از ورق های پلیمری مسلح به الیاف شیشه ای (GFRP) بررسی شده اند. پارامتر های مورد بررسی، با در نظر گرفتن اثر خواص بتن و الیاف، شامل مقاومت هسته بتنی محصور نشده، ضخامت لایه محصور کننده و زاویه جهت گیری الیاف در لایه محصور کننده GFRP هستند. آثار این پارامترها بر رفتار منحنی تنش-کرنش فشاری، مقاومت فشاری، کرنش نهایی و جذب انرژی بتن محصور شده برای استفاده در مقاصد طراحی ارزیابی شده اند. هدف نهایی این مطالعه، مقایسه روش محصورسازی ستون های بتنی توسط مصالح GFRP با روش نوین محصورسازی توسط حریره بتن الیافی (SIFCON) است. بدین منظور، نتایج آزمایش های فشاری بر روی المان های بتنی محصور شده با SIFCON، که توسط محققان دیگری انجام شده، با نتایج نمونه های بتنی محصور شده با GFRP مقایسه شده اند. نتایج مقایسه نشان می دهد که رفتار کلی منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده توسط SIFCON، به علت رفتار قابل توجه پس از تسلیم، نسبت به منحنی بتن محصور شده با GFRP تفاوت هایی دارد. محصورسازی توسط SIFCON، از نظر بهبود مقاومت فشاری و ظرفیت جذب انرژی، دارای نتایج قابل مقایسه با روش محصورسازی توسط GFRP می باشد.

**واژه های کلیدی:** محصور سازی، پلیمر های مسلح به الیاف، حریره بتن الیافی، منحنی تنش-کرنش، مقاومت

فشاری، کرنش نهایی، جذب انرژی

### مقدمه

افزایش جذب انرژی یا ظرفیت ستون در مناطق زلزله خیز، افزایش شکل پذیری در مناطق زلزله خیز، جلوگیری از کماتش و افزایش مقاومت فشاری اشاره کرد [۲]. مواد مختلط سیمانی توانمند مسلح به الیاف (HPFRCC) در دهه ۱۹۹۰ تهیه شد تا خواص و کارایی بتن الیافی را بهبود بخشند. مطالعات اخیر نشان می دهد که یک راه مطمئن و مقرون به صرفه برای افزایش ظرفیت باربری، پایایی، مقاومت در برابر زلزله و نیز افزایش سرعت اجرای سازه های جدید، استفاده از مصالح پیشرفته نظیر HPFRCC است. خواص ویژه این مصالح شامل توانایی مصالح تعمیری در اصلاح اختلاف مدول الاستیسیته و انبساط حرارتی، به همراه توانایی آن در فراهم آوردن شکل پذیری خوب، توزیع ترک مناسب و محدود کردن عرض ترک ها به مقادیر کوچک است. بدین ترتیب، استفاده از دورپیچ های HPFRCC نیز، راه حلی مناسب برای تقویت، مرمت و به طور کلی بهسازی ستون ها به نظر می آید [۳].

بسیاری از سازه ها به علت کیفیت نازل مصالح ساختمانی، شرایط نامناسب اجراء، قرار گرفتن در محیط های خورنده، بارگذاری بیش از ظرفیت، آسیب دیدگی در اثر بلایای طبیعی نظیر زلزله و طوفان و نیز به روز شدن آیین نامه های طراحی، نیازمند برخی از انواع روش های بهسازی هستند. لزوم توسعه سیستم های بدیع و قابل اطمینان برای بهسازی سازه ها، موجب گسترش استفاده از مصالح پیشرفته کامپوزیت از قبیل کامپوزیت های پلیمری مسلح به الیاف (FRPC) و کامپوزیت های سیمانی توانمند مسلح به الیاف (HPFRCC) شد [۱].

از کاربرد های FRP می توان به موارد تقویت عضو خمشی یا افزایش ظرفیت خمشی از راه کاهش خیز، کاهش عرض ترک، کاهش طول های مهاری، چسبندگی مناسب در فصل مشترک بتن و FRP در محل ترک ها، افزایش مقاومت برشی و افزایش مقاومت کششی و همچنین تقویت عضو فشاری به روش محصورسازی از راه

می شود. فشار محصورکننده ثابت، در مواردی ایجاد می شود که مصالح محصور کننده رفتار پلاستیک از خود نشان می دهد. در حالتی که محصورسازی توسط فولادهای مسلح کننده عرضی فراهم می شود و یا در محصورسازی با مصالح SIFCON، فشار محصورکنندگی از نوع غیر فعال ثابت است. فشار محصورکننده متغیر، در مواردی پدید می آید که مصالح محصور کننده سختی قابل توجهی دارد. فولاد در مرحله رفتار الاستیک خود و ژاکت های FPR که رفتار الاستیک خطی دارند، فشار محصورکننده متغیر تولید می کنند [۶].

### طراحی آزمایش ها

پارامترهای انتخاب شده در بررسی رفتار المان های فشاری محصور شده توسط FRP در این مطالعه عبارتند از مقاومت هسته بتنی، تعداد لایه های FRP و جهت گیری الیاف FRP. در طراحی آزمایش ها، سه مقاومت هدف برای بتن هسته برای مدل سازی بتن با مقاومت کم، متوسط و زیاد در نظر گرفته شده است که عبارتند از مقاومت های ۱۵، ۲۵ و ۴۰ مگاپاسکال.

برای بررسی اثر مقاومت هسته بتنی، سه طرح در نظر گرفته شده است که در آن ها، هسته های بتنی با مقاومت های ۱۵، ۲۵ و ۴۰ مگاپاسکال، با یک لایه GFRP و با جهت گیری صفر درجه الیاف نسبت به راستای محیطی نمونه استوانه ای محصور شدند. وضعیت قرارگیری لایه های GFRP در این سه طرح محصورسازی، به اختصار به صورت  $0^\circ$  نشان داده می شوند. برای بررسی اثر تعداد لایه های FRP و به عبارتی اثر ضخامت دورپیچ، سه طرح در نظر گرفته شده است. در این طرح ها، هسته های بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال توسط یک، دو و چهار لایه GFRP محصور می شوند. وضعیت قرارگیری لایه های GFRP در این سه طرح محصورسازی، به اختصار به صورت  $0^\circ$ ،  $0^\circ/0^\circ$  و  $0^\circ/0^\circ/0^\circ$  نشان داده می شوند.

برای بررسی اثر زاویه جهت گیری الیاف، سه طرح با هم مقایسه خواهند شد. در این طرح ها، هسته های بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال توسط دو لایه GFRP محصور شدند. در طرح اول، از دو لایه GFRP با زاویه صفر درجه الیاف نسبت به راستای محیطی برای دورپیچی نمونه های استوانه ای استفاده می شود. در طرح دوم، لایه اول

حریره بتن الیافی (بتن الیافی با تزریق ملات روان)، یک نوع بتن الیافی توانمند محسوب می شود. SIFCON از دو جنبه با بتن مسلح به الیاف فولادی متفاوت است. درصد الیاف افزوده شده در SIFCON، بسیار بیشتر از بتن مسلح به الیاف فولادی است و در SIFCON به جای بتن معمولی از لات سیمانی بسیار ریزدانه ای استفاده می شود که سبب تولید محصول نهایی بسیار مقاوم و شکل پذیر می شود. نمونه های SIFCON با درصد حجمی بین ۵ درصد تا ۳۰ درصد تولید می شوند. با چنین درصد حجمی زیاد، یک مصالح شکل پذیر و پرمقاومت تولید می شود که افت مقاومتی کم و قابلیت جذب انرژی زیادی را از خود نشان می دهند [۴].

در این مطالعه، مدل سازی آزمایشگاهی محصورسازی در المان های فشاری بتنی محصور شده با ورق های GFRP، با در نظر گرفتن اثر خواص بتن و الیاف، بررسی شده اند. هدف نهایی این مطالعه، مقایسه روش محصورسازی ستون های بتنی توسط مصالح GFRP با روش نوین محصورسازی توسط SIFCON است. بدین منظور، نتایج آزمایش های فشاری روی المان های بتنی محصور شده با SIFCON که توسط محققان دیگری [۵] انجام شده است، با نتایج نمونه های بتنی محصور شده با GFRP مقایسه شده اند.

### انواع محصور سازی

در ستون های بتنی که به صورت خارجی توسط ژاکت هایی مسلح شده اند و یا در ستون های بتن آرمه رایج، فشار محصور کننده ایجاد شده از نوع "غیر فعال" است. در این نوع محصورسازی، فشار محصور کننده در اثر انبساط جانبی بتن که خود ناشی از کرنش های محوری اصلی است، یا همان اثر پواسون، پدید می آید. در برخی موارد محصورسازی غیر فعال، یک فشار محصور کننده اولیه نیز از نوع "فعال" وجود دارد. به طور مثال، اگر دوغابی منبسط شونده بین بتن و ژاکت خارجی محصور کننده آن تزریق شود، فشاری محصورکننده از نوع فعال نیز در محصورسازی مشارکت می کند. با وجود این، فشار فعال اولیه موجود، در مقایسه با فشار اضافی ایجاد شده در اثر انبساط جانبی بتن ناچیز است [۶].

محصورسازی غیر فعال نیز خود به دو نوع ثابت و متغیر در طول تاریخچه بارگذاری محوری، تقسیم بندی

نهایی یعنی طرح های مخلوط کم مقاومت، معمولی و به نسبت پر مقاومت، در جدول (۳) نشان داده شده اند.  
جدول ۳: طرح اختلاط هسته های بتنی.

Materials	C10	C20	C40
Cement (Kg/m <sup>2</sup> )	200	250	400
Water (Kg/m <sup>2</sup> )	120	125	140
Super plasticizer(Kg/m <sup>2</sup> )	-	-	8
Coarse aggregates (Kg/m <sup>2</sup> )	832	815	741
Fine aggregates (Kg/m <sup>2</sup> )	1248	1213	11
Super plasticizer (with respect to cement content) (%)	-	-	2
Water to cement ratio (w/c)	0.6	0.5	0.3

### مشخصات مکانیکی SikaWrap Hex 430G اشباع شده توسط Sikadur 300

ورق های الیاف شیشه ای به کار برده شده در این مطالعه آزمایشگاهی، از محصولات شرکت Sika و با نام تجاری SikaWrap Hex 430G هستند. پلیمر های مسلح به الیاف شیشه ای (GFRP) برای دورپیچی نمونه های بتنی، با استفاده از این محصول و عمل آوری توسط یک رزین اپوکسی با نام تجاری Sikadur 300 به دست آمده است که در تهیه آن، از روش چسباندن دستی (hand lay-up) استفاده شده است. مشخصات مکانیکی مصالح GFRP نهایی، که در دفترچه اطلاعات فنی این مصالح وجود دارد، مطابق جدول (۴) است.

جدول ۴: مشخصات ورق های عمل آوری شده SikaWrap Hex 430G توسط Sikadur 300

Material Properties	Mean Value	Design Value
Tensile strength (MPa)	537	504
Tensile modulus (MPa)	26493	24591
Tensile strain (%)	2.21	1.93
90° Tensile strength (MPa)	23	15
90° Tensile modulus (MPa)	7069	5978
90° Tensile strain (%)	0.46	0.40
Thickness (mm)	0.508	-

این مقادیر، بر مبنای استاندارد ASTM، مطابق روش آزمایش D-3039 و پس از عمل آوری استاندارد در دمای ۲۱ تا ۲۴ درجه سانتی گراد به دست آمده اند. مقادیر میانگین مشخصات در این جدول، از متوسط گیری نتایج آزمایش های مربوط و مقادیر طراحی، از کم کردن دو

GFRP با زاویه صفر درجه الیاف نسبت به راستای محیطی قرار گرفته و دورپیچی توسط لایه دوم با زاویه ۹۰ درجه الیاف نسبت به راستای محیطی یا به موازات محور قطعه انجام می شود. در طرح سوم، لایه اول GFRP با زاویه ۴۵- درجه الیاف و لایه دوم با زاویه ۴۵+ درجه الیاف نسبت به راستای محیطی قرار می گیرد. وضعیت قرارگیری لایه های GFRP در این سه طرح محصورسازی، به اختصار به صورت ۰° / ۰°، ۰° / ۹۰° و ۴۵° / -۴۵- نشان داده می شوند. برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان، دو نمونه مشابه از هر طرح ساخته شده است. مشخصات طرح های شاهد و طرح های محصورسازی در جدول های (۱) و (۲) نمایش داده شده اند.

جدول ۱: مشخصات طرح های شاهد هسته های بتنی محصور نشده.

Control Specimen No.	Specimen ID	Concrete Core Strength (MPa)
1	FC150-A	15
	FC150-B	
2	FC250-A	25
	FC250-B	
3	FC400-A	40
	FC400-B	

جدول ۲: مشخصات طرح های محصورسازی هسته های بتنی محصور شده.

Plan No.	Specimen ID	Concrete Core Strength (MPa)	GFRP Layers No.	GFRP Ply Configuration
1	F1-A	15	1	°0
	F1-B			
2	F2-A	25	1	°0
	F2-B			
3	F3-A	40	1	°0
	F3-B			
4	F4-A	25	2	°0 / °0
	F4-B			
5	F5-A	25	4	°0 / °0 / °0 / °0
	F5-B			
6	F6-A	25	2	°0 / °90
	F6-B			
7	F7-A	25	2	°+45 / °-45
	F7-B			

### مشخصات بتن

برای رسیدن به مقاومت های هدف، طرح های اختلاط بتن با انتخاب نسبت های مختلف عیار سیمان، نسبت آب به سیمان و در صورت لزوم استفاده از روان ساز، طراحی و اجرا شد. پس از کنترل نتایج آزمایش نمونه های ۲۸ روزه، طرح های بهینه انتخاب شدند. سه طرح اختلاط

برابر انحراف معیار استاندارد از مقادیر میانگین متناظر، محاسبه شده اند.

### مراحل ساخت و عمل آوری آزمونه‌ها

برنامه آزمایشگاهی ساخت هسته های بتنی، عمل آوری و دورپیچی آنها توسط ورق های GFRP، در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران انجام شد. مراحل ساخت نمونه‌های بتنی محصور شده با GFRP به این شرح است:

(۱) آماده سازی طرح اختلاط بتن: ابتدا سیمان و سنگدانه های ریزدانه و درشت دانه در مخلوط کن ریخته شده و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند. سپس آب و در صورت نیاز، فوق روانساز حل شده در آب به مصالح خشک اضافه شدند و اختلاط آنها به مدت ۲ دقیقه انجام شد.

(۲) قالب گیری هسته های بتنی: طرح های اختلاط آماده شده در قالب های استوانه ای آغشته به روغن قالب، قالب گیری شدند. این قالب های فولادی که در ابعادی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر در آزمایشگاه وجود دارند، اغلب برای آزمایش فشاری نمونه های استاندارد طبق روش ASTM به کار گرفته می شوند. پس از پرکردن قالب‌ها از بتن، آزمونه ها روی میز لرزه متراکم شده و سپس با گونی مرطوب پوشیده شدند.

(۳) عمل آوری هسته های بتنی: نمونه های قالب گیری شده، به مدت یک روز در دمای آزمایشگاه که در حدود ۲۳ درجه سانتیگراد است، نگهداری شدند. پس از آن، آزمونه‌ها از قالب خارج شده و تا رسیدن به سن ۲۸ روز در داخل حوضچه آب قرار داده شدند. آزمونه های لازم برای تعیین مقاومت و رفتار فشاری در سن مورد نظر از حوضچه خارج شده و چند ساعت پس از خشک شدن آماده آزمایش شدند. سایر آزمونه های ۲۸ روزه پس از خارج شدن از آب، به مدت ۷ روز در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند تا به طور کامل خشک شده و آماده دورپیچی باشند.

(۴) آماده سازی سطح بتن: سطح نمونه های بتنی باید پیش از دورپیچی، تمیز و مسطح باشد. سطح بتن می تواند خشک یا مرطوب بوده، اما باید عاری از قطره های آب و یخ باشد. همچنین گرد و غبار، روغن و مواد باقیمانده از عمل آوری، بایستی از روی سطح نمونه های بتنی زوده شوند تا مانعی برای عدم چسبندگی بین بتن و GFRP

وجود نداشته باشد.

(۵) آماده سازی رزین: ابتدا هر یک از دو نوع مصالح سازنده رزین اپوکسی به طور جداگانه مخلوط می شوند. سپس محتویات ماده B به داخل ماده A ریخته شده، به طوری که نسبت لازم برای مخلوط کردن این دو نوع مصالح رعایت شود. سپس این دو مصالح سازنده به مدت ۵ دقیقه با هم مخلوط می شوند تا محصولی کاملاً یکنواخت به دست آید.

(۶) آماده سازی ورق های الیاف شیشه ای: ورق های الیاف شیشه ای در طول های مناسب آماده می شوند، به نحوی که طول همپوشانی به میزان حدود یک چهارم محیط نمونه های استوانه ای، معادل طولی برابر ۶۰ سانتی‌متر برای هر لایه GFRP است. این میزان طول همپوشانی، پیوستگی مناسب ژاکت محصور کننده را در جهت الیاف تضمین می کند. سپس، ورق های الیاف، به وسیله قلم مو یا غلتک، از اپوکسی اشباع می شوند.

(۷) دورپیچی نمونه های بتنی: ابتدا سطح آماده شده بتن با استفاده از قلم مو یا غلتک، توسط اپوکسی Sikadur 300 عایق بندی می شود. در این مرحله، لایه اشباع شده از رزین روی سطح آماده شده نمونه بتنی قرار گرفته و حباب های هوای تشکیل شده و غیر یکنواختی های موجود، با استفاده از یک غلتک پلاستیکی از بین می‌رود. شکل (۱) دو آزمونه دورپیچی شده با الیاف GFRP را نشان می‌دهد.



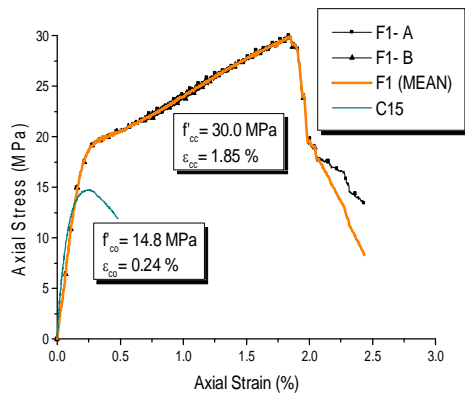
شکل ۱: آزمونه های محصور شده با الیاف GFRP.

(۸) عمل آوری نمونه های دورپیچی شده: آزمونه های بتنی دورپیچی شده با GFRP به مدت سه هفته در محیط

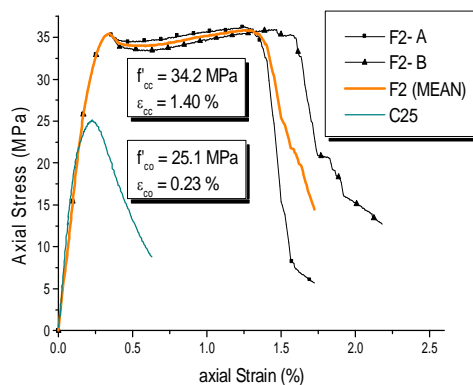
فشاری بتن محصور نشده ( $f_{cc}/f_{co}$ )، نسبت بهبود کرنش نهایی برابر با نسبت کرنش نهایی بتن محصور شده به کرنش نظیر در بتن محصور نشده ( $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ )، نسبت بهبود جذب انرژی برابر با نسبت جذب انرژی بتن محصور شده به جذب انرژی نظیر در بتن محصور نشده ( $U_{cc}/U_{co}$ ).

### نتایج بارگذاری فشاری نمونه‌های محصور شده با GFRP

نمودارهای تنش-کرنش هر یک از طرح‌های محصورسازی، با میانگین‌گیری از نتایج دو آزمون مشابه ساخته شده برای هر طرح بدست آمده‌اند. در نهایت از میانگین نتایج به دست آمده برای هر طرح، برای مقایسه و بررسی آثار مختلف محصورسازی نسبت به نمونه‌های محصورنشده استفاده شده است. نمودارهای هر یک از طرح‌های محصورسازی، به همراه نمودارهای رفتاری هسته‌های بتنی شاهد، در شکل‌های (۳) تا (۹) مشاهده می‌شوند.



شکل ۳: نمودار تنش-کرنش محوری طرح محصورسازی یک ( $0^\circ$ ) با هسته بتنی به مقاومت ۱۵ مگاپاسکال.



شکل ۴: نمودار تنش-کرنش محوری طرح محصورسازی دو ( $0^\circ$ ) با هسته بتنی به مقاومت ۲۵ مگاپاسکال.

آزمایشگاه نگهداری شدند تا عمل آوری رزین به طور کامل انجام شود. بدین ترتیب هسته‌های بتنی در سن ۵۶ روز آماده بارگذاری شدند.

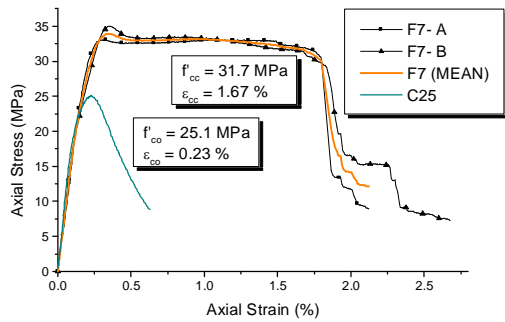
### انجام آزمایش و ثبت نتایج

آزمایش‌های بارگذاری فشاری آزمون‌های بتنی شاهد و آزمون‌های محصور شده با ورق‌های GFRP، در آزمایشگاه مکانیک سنگ و خاک دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران انجام شد. برای استخراج منحنی تنش-کرنش آزمون‌ها از دستگاه MTS موجود در این آزمایشگاه استفاده شده است. شکل (۲) یک آزمون بتنی را تحت بارگذاری فشاری با دستگاه MTS نشان می‌دهد. با توجه به استاندارد معتبر ASTM برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، از روش کنترل تغییرمکان با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر در دقیقه، معادل آهنگ تغییرات کرنش برابر  $0.033/0$  در ثانیه، استفاده شده است. طی بارگذاری، میزان بار و تغییر مکان دو انتهای آزمون که مساوی تغییر مکان بین دو فک بالایی و زیرین دستگاه بارگذاری است، به صورت دیجیتال اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند.

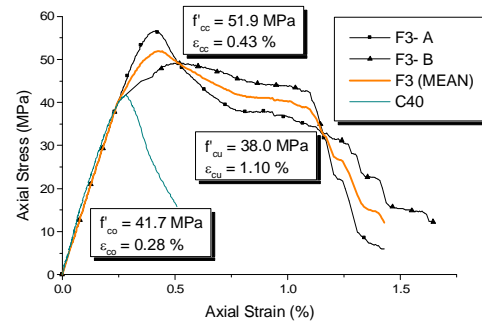


شکل ۲: آزمون بتنی تحت بارگذاری فشاری به وسیله دستگاه .MTS

اطلاعاتی که در این آزمایش‌ها برای هر آزمون، بررسی شدند عبارت‌اند از: نمودار تنش-کرنش محوری، مقاومت فشاری محصور شده ( $f_{cc}$ )، کرنش نهایی محصور شده یا کرنش متناظر با مقاومت فشاری ( $\epsilon_{cc}$ )، جذب انرژی محصور شده ( $U_{cc}$ )، نسبت بهبود مقاومت فشاری برابر با نسبت مقاومت فشاری بتن محصور شده به مقاومت



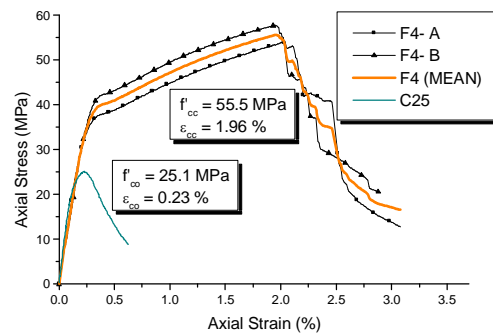
شکل ۹: نمودار تنش-کرنش محوری طرح محصورسازی هفت ( $45^\circ / +45^\circ$ ) با هسته بتنی به مقاومت ۲۵ مگاپاسکال.



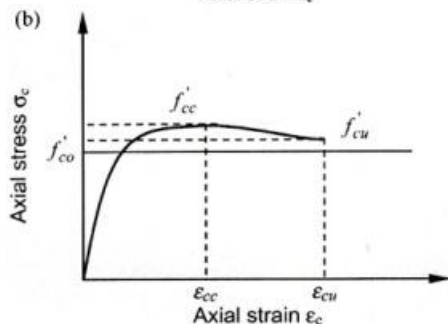
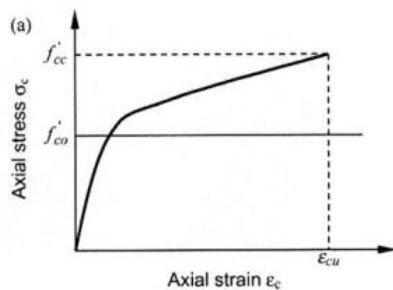
شکل ۵: نمودار تنش-کرنش محوری طرح محصورسازی سه ( $0^\circ$ ) با هسته بتنی به مقاومت ۴۰ مگاپاسکال.

### تحلیل نتایج

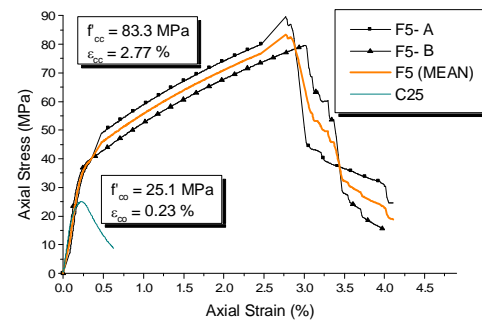
سه شکل کلی منحنی تنش-کرنش به علت نسبت‌های مختلف تنش محصور کننده جانبی به مقاومت بتن محصور نشده وجود دارد. در صورتی که مقدار FRP از حد معینی فراتر باشد، منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP، یک رفتار دو خطی صعودی، مطابق شکل (۱۰-الف)، نشان می‌دهد و می‌توان گفت که بتن به نحو مناسبی محصور شده است. در این نوع منحنی، بتن به طور همزمان به مقاومت فشاری و کرنش نهایی خود می‌رسد و مقادیر مقاومت و کرنش، نسبت به بتن محصور شده به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. [۷] این نوع اول از منحنی تنش-کرنش در شکل‌های (۳)، (۶) و (۷) مشاهده می‌شود.



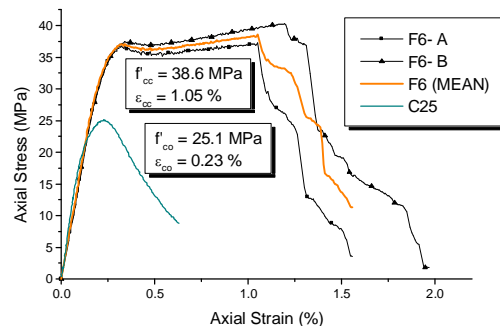
شکل ۶: نمودار تنش-کرنش محوری طرح محصورسازی چهار ( $0^\circ / 0^\circ$ ) با هسته بتنی به مقاومت ۲۵ مگاپاسکال.



شکل ۱۰: طبقه بندی منحنی های تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP.

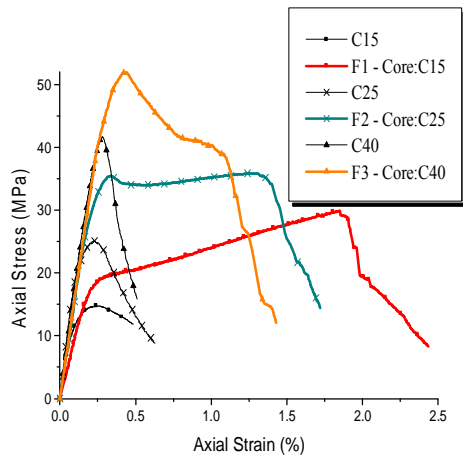


شکل ۷: نمودار تنش-کرنش محوری طرح محصورسازی پنج ( $0^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 0^\circ$ ) با هسته بتنی به مقاومت ۲۵ مگاپاسکال.



شکل ۸: نمودار تنش-کرنش محوری طرح محصورسازی شش ( $90^\circ / 0^\circ$ ) با هسته بتنی به مقاومت ۲۵ مگاپاسکال.

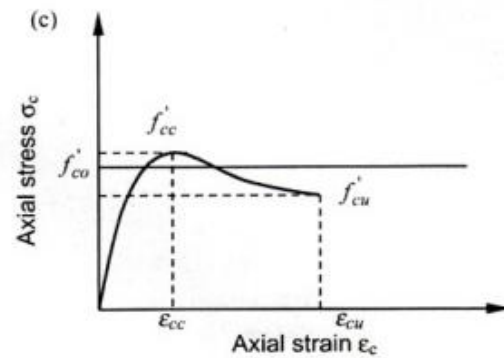




شکل ۱۱: اثر پارامتر مقاومت هسته بتنی بر ویژگی های بتن محصور شده با یک لایه GFRP و زاویه جهت گیری صفر درجه نسبت به راستای محیطی.

در مواردی که مقاومت بتن هسته کم است، منحنی های تنش-کرنش یک رفتار دوخطی به همراهی سخت شدگی کرنش از خود نشان داده اند. به عبارت دیگر می توان گفت که مشابه نوع اول منحنی تنش-کرنش، در حالت هسته بتنی با مقاومت کم، محصورسازی به نحو مناسبی انجام شده است. با افزایش مقاومت بتن در هسته بتنی با مقاومت متوسط ۲۵ مگاپاسکال، بخش دوم منحنی دو خطی تنش-کرنش از حالت سخت شدگی کرنش به حالت مسطح تبدیل شده است که مشابه نوع دوم منحنی تنش-کرنش، سختی فراهم شده توسط محصورسازی چندان قابل توجه نیست.

با افزایش بیشتر مقاومت بتن هسته، در هسته بتنی با مقاومتی به نسبت زیاد، بخش دوم منحنی به حالت نرم شدگی کرنش، همراه با افت ناگهانی شکل پذیری تبدیل شده است. در این حالت، محصورسازی بتن با ورق های GFRP، رفتار منحنی تنش-کرنش بتن را نسبت به بتن محصور نشده به میزان قابل توجهی بهبود بخشیده است. در این حالت محصورسازی به نحو مناسبی انجام نشده و منحنی تنش-کرنش از نوع سوم مشاهده می شود که در آن، مقاومت متناظر با کرنش نهایی بتن محصور شده نسبت به مقاومت بتن محصور نشده، دچار نزول شده است. در این حالت، کرنش نهایی بتن محصور شده متفاوت از کرنش متناظر با مقاومت بتن محصور شده است. این نتیجه نشان می دهد که برای محصورسازی بتن پر مقاومت، به تعداد بیشتری از لایه های GFRP نیاز



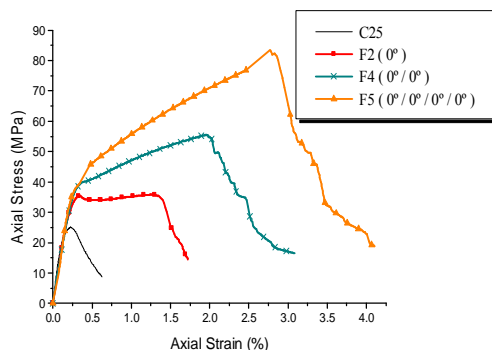
ادامه شکل ۱۰: طبقه بندی منحنی های تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP.

با وجود این در برخی موارد، منحنی تنش-کرنش پس از رسیدن به مقاومت پیک خود، رفتار نزولی دارد و بتن پیش از گسیختگی FRP به مقاومت فشاری خود می رسد. مقاومت متناظر با کرنش نهایی بتن محصور شده که در انتهای بخش نزولی منحنی قرار دارد، به عنوان  $f'_{cu}$  معرفی می شود. اگر مطابق شکل (۱۰-ب)،  $f'_{cu}$  در منحنی تنش-کرنش بیشتر از مقاومت فشاری بتن محصور نشده باشد، محصورسازی توسط FRP برای بهبود مقاومت، کافی و مناسب است و می توان گفت که بتن به نحو مناسبی محصور شده است. [۷] این نوع دوم منحنی تنش-کرنش در شکل های (۴)، (۸) و (۹) مشاهده شده است. در مقابل، اگر مطابق شکل (۱۱-پ)، مقدار  $f'_{cu}$  کمتر از مقاومت بتن محصور نشده باشد، بتن به نحو مناسبی محصور نشده و بهبود اندکی در مقاومت فشاری حاصل می شود. در این حالت، مقدار FRP محصور کننده برای عملکرد مناسب محصورسازی کافی نیست. [۷] نوع سوم منحنی تنش-کرنش در شکل (۵) مشاهده می شود.

### اثر مقاومت هسته بتنی بر ویژگی های بتن محصور شده

برای بررسی اثر پارامتر مقاومت هسته بتنی بر مشخصات بتن محصور شده، از یک لایه GFRP با زاویه جهت گیری صفر درجه نسبت به جهت محیطی، برای دورپیچی هسته های بتنی کم مقاومت، پر مقاومت و با مقاومت معمولی استفاده شده است. اثر مقاومت بتن محصور شده بر رفتار منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده با GFRP، در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

دهنده بهبود عملکرد محصورسازی ستون در سطوح بالاتر محصورسازی است. نتایج عددی مقایسه اثر ضخامت لایه محصور کننده GFRP بر ویژگی های بتن محصور شده در جداول (۷) و (۸) ارائه شده اند. نتایج نشان می دهد که افزایش ضخامت لایه محصور کننده موجب افزایش این موارد شده است: مقاومت فشاری، کرنش محوری و انرژی جذب شده نسبت به نمونه محصور نشده.



شکل ۱۲: اثر پارامتر ضخامت لایه محصور کننده بر ویژگی های بتن محصور شده با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال و زاویه جهت گیری صفر درجه نسبت به راستای محیطی.

جدول ۷: مقایسه نتایج اثر ضخامت لایه محصور کننده بر نسبت بهبود مقاومت فشاری بتن محصور شده.

$f_{cc}/f_{co}$	$f_{cc}$	$f_{co}$	GFRP Layers No.	Plan
	(MPa)	(MPa)		
1.36	34.2	25.1	1	F2
2.21	55.5	25.1	2	F4
3.31	83.3	25.1	4	F5

جدول ۸: مقایسه نتایج اثر ضخامت لایه محصور کننده بر نسبت بهبود کرنش نهایی و انرژی جذب شده بتن محصور شده.

$U_{cc}/U_{co}$	$U_{cc}$	$U_{co}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{cc}$	$\epsilon_{co}$	Plan
	(KJ/m <sup>3</sup> )	(KJ/m <sup>3</sup> )		(%)	(%)	
11.26	439	39	6.09	1.40	0.23	F2
22.10	862	39	8.52	1.96	0.23	F4
41.90	1634	39	12.04	2.77	0.23	F5

اثر زاویه جهت گیری الیاف لایه محصور کننده بر ویژگی های بتن محصور شده

برای بررسی اثر زاویه جهت گیری الیاف در لایه محصور کننده GFRP بر مشخصات بتن محصور شده، دو لایه GFRP با زاویه های جهت گیری ۰°/۰°، ۰°/۹۰° و ۴۵°/۴۵° - نسبت به راستای محیطی، برای دورپیچی هسته های بتنی با مقاومت معمولی ۲۵ مگاپاسکال به کار

است.

جدول ۵: مقایسه نتایج اثر مقاومت هسته بتنی بر نسبت بهبود مقاومت فشاری بتن محصور شده.

$f_{cc}/f_{co}$	$f_{cc}$	$f_{co}$	Concrete Core Target Strength	Plan
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
2.03	30.0	14.8	15	F1
1.36	34.2	25.1	25	F2
1.25	51.9	41.7	40	F3

جدول ۶: مقایسه نتایج اثر مقاومت هسته بتنی بر نسبت بهبود کرنش نهایی و انرژی جذب شده بتن محصور شده.

$U_{cc}/U_{co}$	$U_{cc}$	$U_{co}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{cc}$	$\epsilon_{co}$	Plan
	(KJ/m <sup>3</sup> )	(KJ/m <sup>3</sup> )		(%)	(%)	
15.07	407	27	7.71	1.85	0.24	F1
11.26	439	39	6.09	1.40	0.23	F2
6.15	418	68	3.93	1.10	0.28	F3

نتایج عددی مقایسه اثر مقاومت هسته بتنی بر ویژگی های بتن محصور شده در جداول (۵) و (۶) ارائه شده اند. با افزایش مقاومت فشاری هسته های بتنی، نسبت بهبود مقاومت نمونه محصور شده نسبت به نمونه شاهد آن، کاهش یافته است. نسبت بهبود کرنش نهایی و جذب انرژی نمونه های محصور شده نیز از روند مشابهی پیروی کرده اند. بدین ترتیب در این مقایسه، محصورسازی به ترتیب بیشترین کارایی را برای بهسازی ستون های بتنی با مقاومت کم و کمترین بازده را برای بتن پر مقاومت دارد.

اثر ضخامت لایه محصور کننده بر ویژگی های بتن محصور شده

برای بررسی اثر ضخامت لایه محصور کننده GFRP بر مشخصات بتن محصور شده، به ترتیب یک، دو و چهار لایه GFRP معادل لایه هایی به ضخامت ۰/۵۰۸، ۰/۱۶ و ۳/۰۳۲ میلی متر، برای دورپیچی هسته های بتنی با مقاومت معمولی به کار گرفته شده اند اثر ضخامت لایه محصور کننده بر رفتار منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده با GFRP، در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

با افزایش سطح محصورسازی در هسته های بتنی با مقاومت متوسط ۲۵ مگاپاسکال، شیب بخش دوم منحنی تنش-کرنش از روندی صعودی پیروی کرده و افزایش تعداد لایه های محصور کننده موجب افزایش شیب این بخش از منحنی رفتاری شده است. این نتیجه، نشان



می‌کنند. بیشترین بهبود کرنش نهایی و جذب انرژی به ترتیب در وضعیت های  $0^\circ / 0^\circ$ ،  $0^\circ / +45^\circ$  و  $0^\circ / -45^\circ$  مشاهده شده است.

### مقایسه نتایج بارگذاری فشاری نمونه های محصور شده با GFRP و SIFCON

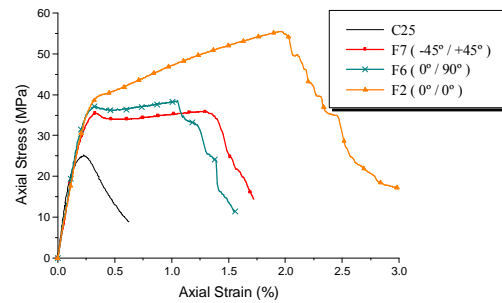
در مطالعه انجام شده توسط بخشی و همکارانش [۵]، پارامترهای انتخاب شده برای بررسی رفتار فشاری ستون های محصور شده با غلاف SIFCON، شامل مقاومت هسته بتنی محصورنشده، ضخامت لایه محصورکننده، نوع الیاف و مقاومت ملات محصور کننده است.

برای مطالعه اثر مقاومت بتن هسته بر عملکرد محصورسازی توسط SIFCON، سه مقاومت فشاری ۱۵، ۲۵ و ۴۰ مگاپاسکال، به ترتیب به عنوان نماینده بتن ضعیف، معمولی و به نسبت پرمقاومت برای هسته های محصور نشده طراحی شده اند. این مقاومت های هدف انتخاب شده، مشابه مقاومت های مورد بررسی برای بتن محصور نشده در قالب پروژه حاضر است. برای بررسی اثر پارامتر ضخامت غلاف SIFCON، غلاف هایی به ضخامت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی متر، به عنوان غلاف های نازک، معمولی و ضخیم بررسی شده اند. برای بررسی اثر پارامتر طول الیاف فولادی، الیاف به قطر  $0.3$  میلی متر در طول های ۳۰ و ۵۰ میلی متر تهیه شده اند. انتخاب درصد حجمی الیاف، بر اساس مشخصات کلی SIFCON، تجربیات آزمایشگاهی و لزوم کارپذیری بتن، برابر مقدار ثابت ۸ درصد انتخاب شده است. مقاومت های طراحی شده برای بررسی اثر پارامتر مقاومت حریه بتن، شامل دو مقاومت ۳۸ مگاپاسکال و ۸۵ مگاپاسکال می باشد. مشخصات طرح های محصورسازی با SIFCON، با در نظر گرفتن پارامترهای مصالح، مطابق جدول (۱۱) است.

مراحل ساخت نمونه های فشاری بتنی محصور شده با غلاف SIFCON، عبارت اند از: (۱) ساخت هسته های بتنی کم مقاومت، معمولی و پرمقاومت (۲) گذاشتن هسته های بتنی در مرکز قالب و پرکردن کل حجم باقیمانده قالب توسط الیاف فولادی (۳) تزریق ملات روان در میان توده الیاف و ساخت غلاف SIFCON.

آزمونه ها پس از اتمام ساخت، به اتاق بخار، با رطوبت نسبی ۹۸ درصد و دمای  $50^\circ$  درجه سانتی گراد منتقل شدند. پس از گذشت تقریباً دو روز از ساخت آزمونه ها،

گرفته شده اند. اثر زاویه جهت گیری الیاف بر رفتار منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده با GFRP، در شکل (۱۳) نمایش داده شده است.



شکل ۱۳: اثر پارامتر زاویه جهت گیری الیاف بر ویژگی های بتن محصور شده با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال و دو لایه GFRP.

در حالی که جهت دهی الیاف، با زاویه صفر درجه نسبت به راستای محیطی انجام شده است، ژاکت محصور کننده به نحو مناسبی در جهت محصورسازی بتن عمل کرده و بخش دوم منحنی، از روندی صعودی پیروی می کند. در حالی که در صورت جهت دهی الیاف در راستایی غیر از راستای محیطی، این بخش منحنی به حالت تقریباً مسطح تبدیل شده است. نتایج عددی مقایسه اثر زاویه جهت گیری الیاف، بر ویژگی های بتن محصور شده در جداول (۹) و (۱۰) ارائه شده اند.

جدول ۹: مقایسه نتایج اثر زاویه جهت گیری الیاف بر نسبت بهبود مقاومت فشاری بتن محصور شده.

$f_{cc}/f_{co}$	$f_{cc}$	$f_{co}$	GFRP Ply Configuration	Plan
	(MPa)	(MPa)		
2.22	55.5	25.1	$0^\circ / 0^\circ$	F4
1.54	38.6	25.1	$0^\circ / 90^\circ$	F6
1.26	31.7	25.1	$0^\circ +45^\circ / -45^\circ$	F7

جدول ۱۰: مقایسه نتایج اثر زاویه جهت گیری الیاف بر نسبت بهبود کرنش نهایی بتن محصور شده.

$U_{cc}/U_{co}$	$U_{cc}$	$U_{co}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{cc}$	$\epsilon_{co}$	Plan
	(KJ/m <sup>3</sup> )	(KJ/m <sup>3</sup> )		(%)	(%)	
22.10	862	39	8.52	1.96	0.23	F4
8.87	346	39	4.57	1.05	0.23	F6
13.15	513	39	7.26	1.67	0.23	F7

در وضعیت  $0^\circ / 0^\circ$ ، که هر دو لایه در راستای محیطی آزمونه ها قرار دارند، بیشترین بهبود مقاومت فشاری، نسبت به دو حالت دیگر حاصل شده است. نسبت های بهبود کرنش نهایی و جذب انرژی بتن محصور شده از روند دیگری متفاوت از روند بهبود مقاومت فشاری پیروی

می شود. بدین ترتیب، به علت وجود رفتار قابل توجه پس از تسلیم در بتن محصور شده با SIFCON، کرنش نهایی به عنوان یک پارامتر مقایسه ای در این دو روش محصورسازی، قابل استفاده نیست. با وجود این، کرنش نهایی بتن محصور شده با SIFCON با معیار کرنش معادل ۱۵٪ افت مقاومت از مقدار حداکثر آن، مشخص شده است. از طرف دیگر، مقاومت بتن محصور شده در این دو روش، در برخی از طرح های محصورسازی قابل مقایسه است. به عبارت دیگر می توان ضخامت معادل غلاف SIFCON را در مقایسه با تعداد لایه های GFRP، که به بهبود یکسان مقاومت فشاری می انجامند، به دست آورد. جذب انرژی بتن محصور شده با GFRP، از محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا محل کرنش نهایی به دست می آید. با وجود این، در بتن محصور شده با SIFCON، جذب انرژی از انتگرال گیری سطح زیر منحنی تا یک کرنش محوری معین محاسبه می شود که این میزان کرنش به طور معمول برابر دو درصد در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب با در نظر گرفتن این تفاوت، به جای پارامتر کرنش نهایی، پارامتر جذب انرژی بتن محصور شده در طرح های محصورسازی قابل مقایسه هستند. همچنین نتایج مقایسه نشان می دهد که ویژگی های قابل مقایسه بتن محصور شده توسط SIFCON و GFRP، به مقاومت بتن محصور نشده نیز وابسته است. به همین دلیل، مقایسه این دو حالت محصورسازی در سه مقوله مجزا بر حسب مقاومت بتن محصور نشده بررسی و ارائه می شود.

### مقایسه نتایج در هسته بتنی با مقاومت ۱۵ مگاپاسکال

نمودارهای تنش-کرنش و نتایج مقایسه ای ویژگی های بتن محصور شده در طرح های F2 (محصورسازی هسته بتنی با مقاومت ۱۵ مگاپاسکال توسط یک لایه GFRP در راستای محیطی) و S1 (محصورسازی هسته بتنی با مقاومت ۱۵ مگاپاسکال توسط غلاف SIFCON به ضخامت ۱۵ میلی متر، مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و طول الیاف ۳۰ میلی متر) در شکل (۱۵) و جدول (۱۲) ارائه شده اند. نتایج نشان می دهد که از نظر مقاومت فشاری و انرژی جذب شده در حالت محصور شده در هسته بتنی با مقاومت ۱۵ مگاپاسکال، غلاف ۱۵ میلی متری SIFCON با مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و متشکل از الیاف

قالب باز شده و نمونه های محصور شده با SIFCON، برای عمل آوری، به مدت ۱۴ روز در حوضچه آب با دمای ۲۳ درجه نگهداری شدند. سپس نمونه ها به مدت ۵ روز در محیط آزمایشگاه و در هوای آزاد نگهداری شدند تا به خوبی خشک و آماده آزمایش شوند.

جدول ۱۱: مشخصات نمونه های دورپیچی شده با SIFCON.

Plan	Concrete Core Strength	Jacket Thickness	Fiber Length	Slurry Concrete Strength
	(MPa)	(mm)	(mm)	(MPa)
S1	15	15	30	85
S2	25	15	30	85
S3	40	15	30	85
S4	25	20	30	85
S5	25	10	30	85
S6	25	15	50	85
S7	25	15	30	38

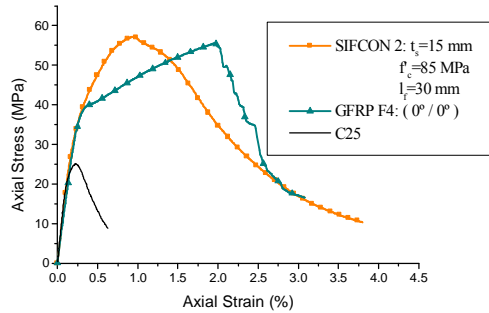
در شکل (۱۴) یک هسته بتنی دورپیچی شده با غلاف SIFCON، در سن ۵۶ روز که آماده انجام آزمایش فشاری است مشاهده می شود. نمونه های محصور شده با SIFCON نیز توسط دستگاه MTS که برای آزمایش طرح های محصورسازی با GFRP به کار گرفته شد، آزمایش شدند.



شکل ۱۴: هسته بتنی دورپیچی شده با غلاف SIFCON.

### مقایسه نتایج طرح های محصورسازی توسط GFRP و SIFCON

مقایسه کلی نمودارهای تنش-کرنش نشان می دهند که رفتار کلی بتن محصور شده با GFRP، از رفتار بتن محصور شده با SIFCON متفاوت است. منحنی بتن محصور شده با GFRP تا رسیدن به گسیختگی، اغلب به صورت یک منحنی دو خطی است. در حالی که بتن محصور شده با SIFCON، تا رسیدن به سطح تنش نهایی خود به صورت یک منحنی تقریباً غیر خطی عمل کرده و رفتار پس از تسلیم نیز در این نوع محصور شدگی مشاهده

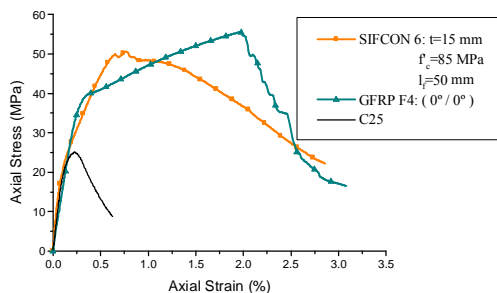


شکل ۱۶: نمودار تنش-کرنش هسته بتنی به مقاومت ۲۵ مگاپاسکال، محصور شده توسط طرح های محصورسازی S2 و F4

جدول ۱۳: مقایسه نتایج محصورسازی در طرح های S2 و F4.

Specimen	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\epsilon_{cc}$ (%)	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$U_{cc}/U_{co}$	
					$U_{cc}$ (KJ/m <sup>2</sup> )	$U_{cc}/U_{co}$
GFRP (F4)	55.5	2.22	1.96	8.52	862	22.10
SIFCON (S2)	57.2	2.28	1.52	6.61	904	23.17

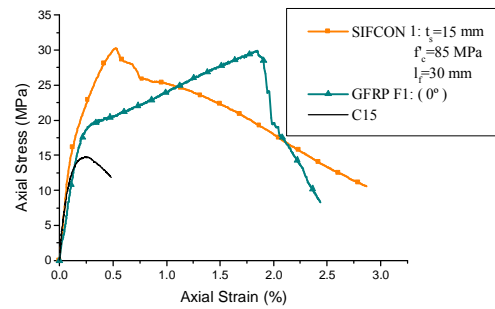
از طرف دیگر، مطابق شکل (۱۷) می توان گفت که از نظر مقاومت فشاری و جذب انرژی در هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال، غلاف ۱۵ میلی متری SIFCON با مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و متشکل از الیاف ۵۰ میلی متری، معادل دو لایه GFRP عمل کرده است. دو یافته اخیر، تأثیر ناچیز طول الیاف به کار برده شده را در عملکرد محصورسازی نشان می دهد.



شکل ۱۷: نمودار تنش-کرنش هسته بتنی به مقاومت ۲۵ مگاپاسکال، محصور شده توسط طرح های محصورسازی S6 و F4

همچنین مطابق شکل (۱۸) می توان گفت که از نظر مقاومت فشاری و جذب انرژی در هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال، غلاف ۱۵ میلی متری SIFCON با مقاومت حریره بتن ۳۸ مگاپاسکال و متشکل از الیاف ۳۰ میلی متری، مشابه دو لایه GFRP زاویه دار نسبت به راستای محیطی عمل نموده است.

۳۰ میلی متری، معادل یک لایه GFRP عمل کرده است.



شکل ۱۵: نمودار تنش-کرنش هسته های بتنی به مقاومت ۱۵ مگاپاسکال، محصور شده توسط طرح های محصورسازی S1 و F1

جدول ۱۲: مقایسه نتایج محصورسازی در طرح های S1 و F1.

Specimen	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\epsilon_{cc}$ (%)	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$U_{cc}/U_{co}$	
					$U_{cc}$ (KJ/m <sup>2</sup> )	$U_{cc}/U_{co}$
GFRP (F1)	30.0	2.03	1.85	7.71	407	15.07
SIFCON (S1)	30.3	2.05	0.82	3.42	459	17.00

## مقایسه نتایج در هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال و غلاف SIFCON با ضخامت متوسط

در هسته بتنی با مقاومت متوسط ۲۵ مگاپاسکال، بر خلاف حالت محصورسازی هسته بتنی با مقاومت کم، مقاومت های فراهم شده توسط یک لایه GFRP و غلاف SIFCON به ضخامت ۱۵ میلی متر قابل مقایسه نیست و محصورسازی فراهم شده توسط غلاف ۱۵ میلی متری SIFCON، به مراتب بیشتر از یک لایه GFRP، مقاومت هسته بتنی را بهبود بخشیده است. با وجود این، از نظر مقاومت فشاری و جذب انرژی در هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال، غلاف ۱۵ میلی متری SIFCON به مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و متشکل از الیاف ۳۰ میلی متری، معادل محصورسازی توسط دو لایه GFRP عمل کرده است.

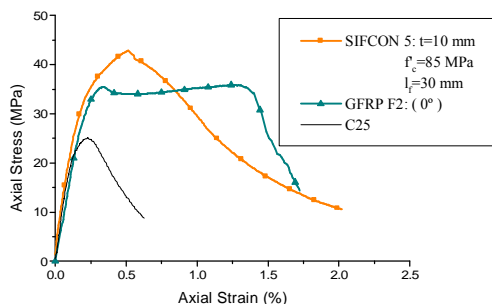
نمودارهای تنش-کرنش و نتایج مقایسه ای ویژگی های بتن محصورشده در طرح های F4 (محصورسازی هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال توسط دو لایه GFRP در راستای محیطی) و S2 (محصورسازی هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال توسط غلاف SIFCON به ضخامت ۱۵ میلی متر، مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و طول الیاف ۳۰ میلی متر) در شکل (۱۶) و جدول (۱۳) ارائه شده اند.

## جدول ۱۴: مقایسه نتایج محصورسازی در طرح های F5 و 4.

$U_{cc}/U_{co}$	$U_{cc}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$f_{cc}$	Specimen
	( $KJ/m^2$ )					
41.90	1634	12.04	2.77	3.31	83.3	GFRP (F5)
30.97	1208	8.39	1.93	3.06	76.9	SIFCON (S4)

## مقایسه نتایج در هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال و غلاف SIFCON با ضخامت کم

محصورسازی هسته بتنی به مقاومت ۲۵ مگاپاسکال، توسط غلاف ۱۰ میلی متری SIFCON به مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و متشکل از الیاف ۳۰ میلی متری، با محصورسازی توسط یک لایه GFRP قابل مقایسه است که در شکل (۲۰) نمایش داده شده است. نتایج عددی مقایسه طرح های F2 (محصورسازی هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال توسط یک لایه GFRP در راستای محیطی) و S5 (محصورسازی هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال توسط غلاف SIFCON به ضخامت ۱۰ میلیمتر، مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و طول الیاف ۳۰ میلی متر) در جدول (۱۵) ارائه شده اند.



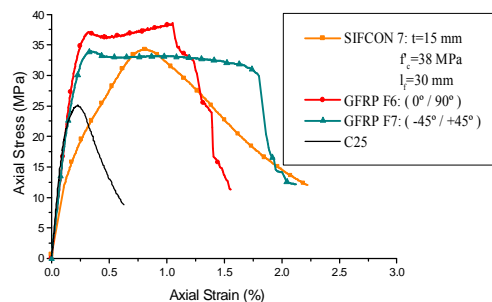
شکل ۲۰: نمودار تنش- کرنش هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال، محصور شده توسط طرح های محصورسازی S5 و F2

## جدول ۱۵: مقایسه محصورسازی در طرح های F2 و S5.

$U_{cc}/U_{co}$	$U_{cc}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$	$\epsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$f_{cc}$	Specimen
	( $KJ/m^2$ )					
11.26	439	6.09	1.40	1.36	34.2	FRP (F2)
13.35	521	3.43	0.79	1.71	42.8	SIFCON (S5)

## مقایسه نتایج در هسته بتنی با مقاومت به نسبت زیاد (۴۰ مگاپاسکال)

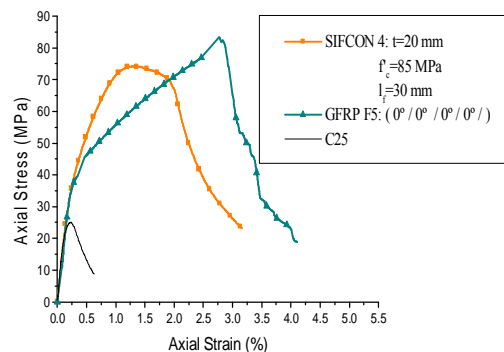
در هسته بتنی پرمقاومت ۴۰ مگاپاسکال، دو حالت محصورسازی توسط یک لایه GFRP و غلاف SIFCON به



شکل ۱۸: نمودار تنش- کرنش هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال، محصور شده توسط طرح های محصورسازی S7 و F7, F6

## مقایسه نتایج در هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال و غلاف SIFCON با ضخامت زیاد

نمودارهای تنش- کرنش و نتایج مقایسه ای ویژگی های بتن محصور شده در طرح های F5 (محصورسازی هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال توسط چهار لایه GFRP در راستای محیطی) و S4 (محصورسازی هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال توسط غلاف SIFCON به ضخامت ۲۰ میلی متر، مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و طول الیاف ۳۰ میلی متر) در شکل (۱۹) و جدول (۱۴) ارائه شده اند. بدین ترتیب می توان گفت که از نظر مقاومت فشاری و جذب انرژی در هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال، چهار لایه GFRP، معادل غلاف ۲۰ میلی متری SIFCON با مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و متشکل از الیاف ۳۰ میلی متری عمل کرده است.



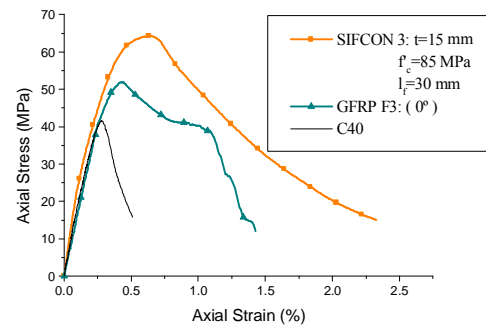
شکل ۱۹: نمودار تنش- کرنش هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال، محصور شده توسط طرح های محصورسازی S4 و F5

- با افزایش مقاومت بتن هسته، بازدهی محصورسازی از نظر مقاومت و شکل پذیری کاهش می یابد. بدین ترتیب برای محصورسازی هسته بتنی پر مقاومت به تعداد لایه های بیشتری برای دورپیچی نیاز است.
- افزایش ضخامت لایه محصور کننده، موجب شده است مشخصه های رفتاری بتن محصور شده نسبت به بتن محصور نشده افزایش قابل توجهی داشته باشد. همچنین در محدوده پارامتر های مورد بررسی در این مطالعه، به عنوان موثرترین پارامتر در جهت بهبود رفتار بتن محصور شده شناخته شده است.
- نتایج کلی آزمایش های انجام شده، در قالب طرح های محصورسازی المان های فشاری توسط SIFCON، نشان داده اند که این تکنیک نیز سبب بهبود قابل توجه مشخصه های رفتار فشاری بتن محصور شده، شده است. با توجه به نتایج ارزیابی اقتصادی انجام شده توسط بخشی [۳] حاکی از مقرون به صرفه بودن این روش، می توان آن را به عنوان جایگزینی برای سایر روش های بهسازی، به ویژه برای حذف نقایص آن روش ها مطرح کرد.
- مقایسه کیفی نتایج محصورسازی توسط GFRP و SIFCON نشان داده است که رفتار کلی منحنی بتن محصور شده با GFRP، از رفتار بتن محصور شده با SIFCON متفاوت است. با وجود این، مقاومت بتن محصور شده و جذب انرژی، در برخی از طرح های محصورسازی قابل مقایسه است.
- با توجه به ضعف روش محصورسازی توسط FRP در دورپیچی قطعات فشاری گوشه دار، بررسی رفتار فشاری غلاف های SIFCON، برای دورپیچی آزمون های منشوری با مقاطع مربع مستطیل، برای شناخت بهتر عملکرد این روش با در نظر گرفتن اثر گوشه ها توصیه می شود.

### تقدیر و تشکر

بدین وسیله از یاری و پشتیبانی جناب آقای مهندس جواد نجفی، مدیر عامل محترم شرکت رادیاب، در امر تهیه مصالح و آزمایش نمونه ها قدردانی و سپاسگزاری می شود. ساخت نمونه های آزمایش شده در این پروژه تحقیقاتی، با همیاری پرسنل محترم انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی و آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشکده فنی انجام

ضخامت ۱۵ میلی متر، مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و طول الیاف ۳۰ میلی متر مقایسه شده اند (شکل ۲۱). در این حالت نیز، مشابه حالت محصورسازی هسته بتنی با مقاومت متوسط، سطح تنش نهایی فراهم شده توسط GFRP نسبت به SIFCON دچار نزول شده است. با وجود این، شکل کلی منحنی تنش- کرنش بتن محصور شده با GFRP و SIFCON، به طور تقریبی مشابه می باشند. رفتار هر دو منحنی، تا رسیدن به مقاومت بتن محصور شده تا حدودی به صورت خطی است و پس از آن نیز باربری به همراه افت تنش ادامه می یابد. تشابه شکل منحنی در این دو حالت، به دلیل محصورسازی ناکافی هسته بتنی پر مقاومت توسط یک لایه GFRP است. نتایج مقایسه ای ویژگی های بتن محصور شده در طرح های F3 (محصورسازی هسته بتنی با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال توسط یک لایه GFRP در راستای محیطی) و S3 (محصورسازی هسته بتنی با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال توسط غلاف SIFCON به ضخامت ۱۵ میلی متر، مقاومت حریره بتن ۸۵ مگاپاسکال و طول الیاف ۳۰ میلی متر) در جدول (۱۶) ارائه شده اند.



شکل ۲۱: نمودار تنش-کرنش هسته بتنی به مقاومت ۴۰ مگاپاسکال، محصور شده توسط طرح های محصورسازی S3 و F3

جدول ۱۶: مقایسه نتایج محصورسازی در طرح های F3 و S3.

$U_{cc}/U_{co}$	$U_{cc}$	$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{cc}$	$f_{cc}/f_{co}$	$f_{cc}$	Specimen
	( $KJ/m^3$ )					
6.15	418	3.93	1.10	1.25	51.9	FRP (F3)
12.26	834	3.14	0.88	1.54	64.2	SIFCON (S3)

### نتیجه گیری

- سه شکل کلی منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP، در نتایج آزمایش های انجام شده در این مطالعه مشاهده شده است.

شده است. همچنین آزمایش نمونه ها در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن دانشکده فنی و با همکاری پرسنل محترم این مرکز محقق شده است. بدین وسیله از تمامی این عزیزان تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع

- 1 - Toutanji, H. A. (1999). "Stress-strain relationship of concrete cylinders confined with FRP composites." *ACI Materials Journal*, V. 96, No. 3, May-June, PP. 397-404.
- 2 - Abdollahi, B. (2007). *Experimental and Analytical Modeling of Compressive Concrete Elements Confined with Glass Fiber Reinforced Polymers in Comparison with an Innovative Confinement Method Using Slurry Infiltrated Fiber Concrete*, M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran.
- 3 - Bakhshi, M. (2007). *Experimental Modeling of Compressive Elements Confined with SIFCON Technique Considering the Effects of Concrete and Fiber Properties*, M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran.
- 4 - Naaman, A. E. and Homrich, J. R. (1989). "Tensile stress-strain properties of SIFCON." *ACI Materials Journal*, V. 86, No. 3, May-June, PP. 244-251.
- 5 - Bakhshi, M., Abdollahi, B., Ghalibafian, M. and Shekarchi, M. (2007). "Effects of material parameters on compressive behavior of HPFRC strengthened concrete columns." *5<sup>th</sup> International Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'07*, France, June, , PP. 1777-1788.
- 6 - Harries, K. A. and Kharel, G. (2003). "Experimental investigation of the behavior of variably confined concrete." *Cement and Concrete research*, Elsevier Science Ltd., PP. 873-880.
- 7 - Lam, L. and Teng, J. G. (2003). "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete." *Construction and Building Materials*, Elsevier Science Ltd., PP. 471-489.

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Glass Fiber Reinforced Polymer
- 2 - Slurry Infiltrated Fiber Concrete
- 3 - Fiber Reinforced Polymer Composites
- 4 - High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites
- 5 - Fiber Reinforced Polymer