

بررسی آزمایشگاهی مقاطع مستطیل شکل بتنی تقویت شده با GFRP

سیدمحمد رضا مرتضوی^{۱*}، بهروز زعیمدار^۲ و کامران نصیری^۲

^۱استادیار، گروه آموزشی سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی

^۲دانش آموخته، کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی

mortazavi@sru.ac.ir

چکیده: با مطالعه رفتار سازه‌های بتنی مشخص می‌شود عوامل متعددی نظیر اشتباهات طراحی و محاسباتی و عدم اجرای مناسب و تغییر آیین‌نامه‌های ساختمانی و تغییر کاربری سازه و ... سبب ارزیابی و بازنگری مجدد طراحی سازه می‌گردد تا در صورت لزوم بهسازی و تقویت شود. در این مقاله با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی تأثیر مستقیم محصورکنندگی خارجی GFRP جهت تعیین معیارهایی برای مقاوم‌سازی سازه‌های موجود و همچنین ساخت و سازه‌های جدید مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق نمونه‌های مربع-مستطیل بتنی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که نمونه با 1 لایه نوار تقویت نسبت به نمونه شاهد 27%، نمونه با 2 لایه نوار تقویت نسبت به نمونه شاهد 46%، نمونه با 3 لایه نوار تقویت نسبت به نمونه شاهد 59% و نمونه با 4 لایه نوار تقویت نسبت به نمونه شاهد 69% افزایش مقاومت داشته است. پر واضح است که با افزایش تعداد لایه نوار تقویت مقاومت افزایش یافته و این افزایش مقاومت همراه با افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی نمونه‌هاست.

کلمات کلیدی: بهسازی سازه‌های بتنی، GFRP، محصورشدگی، مقاوم‌سازی

Experimental Studies of Rectangular Concrete Sections Confined with GFRP

S.M.R. Mortazavi, B. Zaeimdar and K. Nasiri

Abstract: By studying the behavior of concrete structures, several factors such as design and calculation mistakes, and the lack of proper implementation and changes in building regulations and changes in structural structures, etc., will result in the evaluation and re-evaluation of the design and construction, in order to improve it if necessary. In this paper, using experimental studies, GFRP has been used to determine the criteria for determining the design of seismic rehabilitation and improvement of existing structures as well as new constructions. Also, rectangular concrete samples has been tested. The results indicate that, the strength of samples containing 1, 2, 3, and 4 layers of GFRP increased by 27, 46, 59 and 69%, respectively, when compared with control sample. Also, with increasing the number of GFRP layers, the durability of specimens increases, considerably.

Keywords: Retrofitting, Concrete, Structure, GFRP, Confinement.

1- مقدمه

امروزه نگهداری از سازه‌ها به دلیل هزینه ساخت و تعمیر بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با مطالعه رفتار سازه‌های بتنی مشخص می‌شود که عوامل متعددی مانند اشتباهات طراحی و محاسبه و عدم اجرای مناسب و کاربری سازه و آسیب‌دیدگی ناشی از بارهای تصادفی و خوردگی بتن و شرایط محیطی از دوام آن‌ها می‌کاهد. ضمناً تغییر در آیین‌نامه‌های ساختمانی (تغییر در بارگذاری و ضرایب اطمینان) باعث ارزیابی و بازنگری مجدد طراحی سازه می‌گردد تا در صورت لزوم بهسازی و تقویت شود. همچنین بسیاری از سازه‌های بتنی در ایران و سایر نقاط جهان عمری بیشتر از چند دهه دارند و به دلیل حوادث طبیعی از قبیل زلزله و باد و یا بر اثر خستگی مصالح و عوامل خورنده آسیب دیده‌اند. از آنجا که این سازه‌ها عموماً اهمیت زیادی داشته و تعداد آن‌ها نیز فراوان است جایگزین کردن آن‌ها با سازه‌های جدید اکثراً بدون توجه اقتصادی است و از نظر اجرایی غیره عملی می‌باشد در حالی که تعمیر و ترمیم آن‌ها در اغلب موارد امری ضروری و مقرون به صرفه می‌باشد.

طی دهه گذشته استفاده از روش‌هایی چون افزایش سطح مقطع با استفاده از فولاد و بتن و ... برای تعمیر و تقویت ستون‌های بتن مسلح رواج زیادی داشته است لیکن این روش‌ها نیاز به تجهیزات و نیروی کار نسبتاً زیادی داشته و علاوه بر آن بار مرده‌ی سازه را نیز زیاد می‌کند و بعضاً در محیط‌های خورنده به مرور زمان دچار آسیب می‌شوند.

حرکت مستمری علم در عرصه مهندسی سازه و زلزله موجب گردیده است تا نوسازی و بهسازی در سال‌های اخیر از روش‌های نوین و مصالحی جدید بهره گیرد که در پیشینه طولانی ساخت و ساز سابقه نداشته است. در میان این نوآوری‌ها استفاده از FRP (مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف) از جایگاه ویژه برخوردار می‌باشد تا آنجا که به نظر برخی از متخصصان کامپوزیت‌های FRP را باید مصالح هزاره سوم نامید. داشتن ویژگی‌های ممتازی چون نسبت بالای مقاومت به وزن، دوام در برابر خوردگی و سرعت و سهولت در حمل و نصب، درجه‌ای نو پیش روی مهندسین عمران

گشوده است به گونه‌ای که امروز سازه‌های متعددی در سراسر دنیا با استفاده از این مواد تقویت شده‌اند. استفاده از مصالح کامپوزیتی خصوصاً در صنعت ساختمان بازاری رو به رشد و در حال توسعه داشته است. سیستم‌های الیاف مسلح شده پلیمری برای تقویت سازه‌های بتنی پدیدار شده و به عنوان یک جانشین برای روش‌های سنتی از قبیل چسباندن صفحات فولادی، افزایش سطح مقطع با بتن‌ریزی مجدد و پیش تنیدگی خارجی می‌باشد. پوشش‌های FRP عمدتاً برای بهسازی رفتار سازه‌های موجود یا تعمیر خرابی‌های ایجاد شده در اثر خستگی، خوردگی، فرسودگی و ... در سازه‌های موجود به کار می‌روند. این پوشش‌ها توسط چسب‌های مخصوصی به وجه خارجی عضو بتنی می‌چسبند. نسبت وزن به مقاومت این مواد حداقل 50 برابر بتن و 18 برابر فولاد می‌باشد. انواع کامپوزیت‌های پلیمری FRP متداول در مهندسی عمران عبارتند از: الیاف کربن (CFRP)، الیاف شیشه (GFRP) و الیاف آرامید. از محاسن کامپوزیت‌های پلیمری FRP می‌توان به وزن کم، انعطاف‌پذیری بالا، راحتی در جابه‌جایی، سرعت عمل بالا، برشکاری در قطعات دلخواه، سادگی اجرا و امکان تقویت به صورت خارجی و از معایب آن نیز می‌توان به آسیب‌پذیری در مقابل آتش‌سوزی و کم تجربگی مشاوران و پیمانکاران اشاره نمود.

اولین تحقیقات انجام شده در این زمینه از اوایل دهه 1980 در سوئیس آغاز شد و نتایج آن در تقویت پل‌های بتن‌آرمه در سال 1991 بکار رفت اما زلزله‌های 1990 کالیفرنیا و 1995 کوبه ژاپن باعث شد کاربرد کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف FRP جهت تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و بنایی در مناطق زلزله‌خیز جهان به صورت جدی و در عمل در دستور کار قرار گیرد.

با توجه به معایب روش‌های ذکر شده مانند چسباندن صفحات فولادی، افزایش سطح مقطع با بتن‌ریزی مجدد، پیش تنیدگی خارجی و بازدهی کم و یا نیاز به امکانات و فناوری‌های خاص آن‌ها، امروزه روش‌های مقاوم‌سازی با استفاده از کامپوزیت‌ها توسعه روز

گیگاپاسکال تغییر می‌کردند. برای هر ضخامت پوشش 8 نمونه آزمایش شد و آزمایش افزایش مقاومت فشاری و شکل‌پذیری بتن محصور را نتیجه داد.

تحقیق انجام شده توسط جلال و همکاران بر روی ستون‌های بتنی با مقطع مستطیل که هم در جهت طولی و هم در جهت عرضی با استفاده از پوشش FRP مسلح شده بودند نشان داد که FRP ها ظرفیت محوری را حدود 30 درصد و ظرفیت خمشی را در حالت خمش خالص حدود 54 درصد و در حالت خمش و بار محوری حدود 70 درصد افزایش می‌دهد [4]. پوشش طولی در افزایش ظرفیت خمشی و پوشش عرضی در افزایش ظرفیت بار محوری تأثیرگذار است. کرنش فشاری به علت محصورشدگی حدود 49 الی 166 درصد افزایش می‌یابد.

در مطالعاتی که در سال 2013 توسط ازبک‌ولگو و لیم انجام شد، مجموعه تحقیقات تمامی محققان از 1992 تا 2013 که شامل 253 مطالعه انجام شده و مجموع 3042 نمونه، جمع‌آوری شده است [5]. در اکثر این تحقیقات نمونه‌ها با GFRP مقاوم‌سازی شده و نتایج تحلیل‌ها نشان داده است که استفاده از این مصالح برای مقاوم‌سازی ستون‌ها بسیار کارآمد و هنوز نیاز به تحقیقات گسترده‌تری به خصوص در بحث شکل‌پذیری نمونه‌های مقاوم‌سازی شده است.

3- ضرورت انجام تحقیق

در این مقاله محصوریت ناشی از 1، 2، 3 و 4 لایه ییاف GFRP بررسی شده است تا میزان مشارکت تعداد این لایه‌ها در محصوریت به دست آمده مشخص شود. دیگر پارامترها از جمله پارامترهای مقاومت بتن و ییاف و رزین برای همه نمونه‌ها ثابت می‌باشد و فقط تعداد لایه‌های GFRP در نمونه‌ها متغیر می‌باشد. مقاومت 28 روزه نمونه استوانه‌ای به ارتفاع 30 سانتیمتر، 14 مگاپاسکال است.

شش نمونه ستون به شکل مقطع مربع- مستطیل به ابعاد 15 و طول 40 سانتیمتر ساخته شده است. از این شش نمونه، دو نمونه شاهد، 1 نمونه با 1 لایه نوار تقویت، 1 نمونه با 2 لایه نوار تقویت، 1 نمونه با 3 لایه

افزون‌تری دارد. عمده‌ی محدودیت‌های استفاده و کاربرد کامپوزیت‌ها در مهندسی ساختمان به هزینه بالای مصالح آن بر می‌گردد، البته هزینه و قیمت آن‌ها به تدریج رو به کاهش می‌باشد و بدین ترتیب در آینده‌ای نزدیک استفاده از آن‌ها بیشتر و فراگیرتر خواهد شد.

امروزه مقاوم‌سازی هر چند هزینه بالایی در بر دارد اما با توجه هزینه اجرای کم و نیز سایر مزایای آن در کل استفاده از FRP روشی نسبتاً به صرفه و مؤثر در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی به شمار می‌رود.

2- مطالعات گذشته

زرغام و ریزکالا [1]، سه عدد لوله به قطر 219 و ارتفاع 438 میلی‌متری با استفاده از پلیمرهای GFRP سوراخ‌دار و بتن با مقاومت 58.3 مگاپاسکال را تحت فشار محوری قرار دادند. نیروی محوری به هر دو مصالح بتن و لوله وارد شد. برای لوله‌ها و رزین G-glass شامل فیبرهای GFRP پوش شکست دو محوری لوله‌های محوری-جانبی به دست آمد. مشاهده گردید که با افزایش قطر سوراخ داخلی اثر محصورشدگی کم شده است.

در تحقیقی که توسط هوستانی و همکاران بر روی نمونه‌های بتن مسلح استوانه‌ای محصورشده با الیاف کربن با مدول الاستیسیته و ضخامت‌های مختلف انجام شد نشان داده شد که با افزایش مدول الاستیسیته و ضخامت FRP مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌های بتنی محصور تا حد زیادی افزایش یافته است [2]. میرمیران و شاه‌اوی در سال 1997، لوله‌های پر شده با بتن به قطر 152.5 و ارتفاع 305 میلی‌متر شامل GFRP را تحت بار فشاری محوری آزمایش کردند [3]. مقاومت بتن محصور نشده از 29.6 تا 32 مگاپاسکال بود و FRP با زاویه +15 و -15 درجه چسبانده شده بودند. از اندرکنش رشته‌های رزین پلی‌استر و فیبرهای E-glass به صورت مستقیم میان بتن و پوشش در جهت محوری جلوگیری شده بود. نمونه‌ها شامل پوشش GFRP، 7، 10 و 14 لایه‌ای با ضخامت دیواره 1.3، 1.2 و 3 میلی‌متری بودند، مقاومت حلقه از 37.23 تا 40.74



شکل 1. آماده سازی نمونه های بتنی
Fig 1. Preparing concrete specimens

5- انجام تست های غیر مخرب جهت تعیین مقاومت بتن

بر اساس آزمایش چکش اشمیت [7] مقاومت 15 مگاپاسکال برای نمونه ها به دست آمده است. با انجام تست اولتراسونیک (شکل 2) و با توجه به فرمول ارائه شده (1) می توان به مقاومت مشخصه بتن رسید.

$$V = F \left[\frac{gE}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

با پیدا کردن E مقدار مقاومت 15 مگاپاسکال به دست آمده که نزدیک به مقاومت طرح اختلاط می باشد.



شکل 2. انجام تست اولتراسونیک
Fig. 2. Performing ultrasonic test

در مرحله بعد نوارهای تقویت به سطح بتن چسبانیده شد؛ اما قبل از این کار گوشه های نمونه ها کاملاً گرد شده است تا از تمرکز تنش و پاره شدن زود هنگام نوارها در این نواحی جلوگیری شود. برای این کار از سنگ فرز مخصوص بتن استفاده شده است.

نوار تقویت و 1 نمونه با 4 لایه نوار تقویت محصور شده است.

در این پژوهش نمونه ها زیر بار فشاری مرکزی مورد آزمایش قرار گرفته و منحنی هایی که از این پارامترها به دست می آید را با هم مقایسه کرده و میزان مشارکت هر یک از لایه ها در حصول طرح بهینه در مقاوم سازی سازه های بتن آرمه را به دست می آوریم.

4- برنامه آزمایش

به طور کلی بخش آزمایشگاهی این مقاله شامل دو مرحله است. مرحله اول ساخت نمونه های بتنی و دیگری تقویت خارجی این نمونه ها است. هر یک از این دو مرحله ذکر شده شامل مراحل مختلفی است که در ادامه به طور کامل توضیح داده خواهند شد.

نمونه های بتنی با مقاومت 28 روزه 14 مگاپاسکال درست شده اند در حین عملیات بتن ریزی به وسیله یک میله فلزی هوای داخل بتن خارج شده است. پس از بتن ریزی سطح روی بتن را توسط ماله کاملاً صاف می کنیم (شکل 1). نمونه های آماده شده پس از گیرش اولیه برای عمل آوری به مدت 28 روز در حوضچه آب قرار داده شدند.

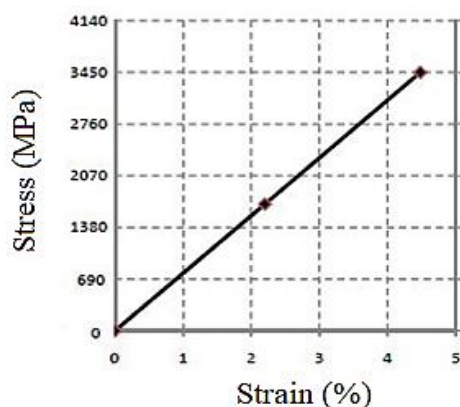
برای به دست آوردن طرح اختلاط بتن جهت دستیابی به مقاومت بتن مورد نظر از ACI 211. 1-81 [6] استفاده شده است.

جدول 1. طرح اختلاط بکار رفته جهت تهیه نمونه ها
Table 1. Mix design used for the preparation of specimens

Gravel	Sand	Water	Cement	Water to cement ratio	Compressive strength
$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\left(\frac{W}{C}\right)$	(MPa)
1184	485	225	342	0.65	14

جدول 2. مشخصات ظاهری و مکانیکی الیاف GFRP

Fiber materials	E-Glass
Layer width	508 mm
Nominal thickness	0.151 mm/ply
Ultimate tensile strength	3450 MPa
Tensile modulus	77 GPa
Ultimate strain	4.48 %



شکل 4. نمودار تنش - کرنش GFRP

Fig. 4. Stress-Strain diagram (GFRP)

از اپوکسی Dur 300 برای چسباندن ورق‌های GFRP استفاده شده است که جدول 3 مشخصات آن را نشان می‌دهد.

جدول 3. مشخصات مکانیکی اپوکسی Dur 300

Flexural Modulus of Elasticity (MPa)	Tensile Modulus of Elasticity (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Type of Adhesive
2800	3500	45	Epoxy Dur300

پس از آن آماده‌سازی نمونه‌ها به ترتیب زیر انجام می‌شود:

- برش فیبرها در اندازه‌های مناسب
- آماده‌سازی سطح بتن
- تمیز کردن سطح بتن و شستشوی آن
- بتونه کردن سطوح بتن
- چسب زدن بر روی سطح بتن و فیبرها

نتایج مطالعاتی که به منظور بررسی تأثیر گرد شدگی گوشه‌ها بر نمونه‌هایی با سطح مقطع مربع انجام شده است، نشان می‌دهد که هرچه گرد شدگی گوشه بیشتر باشد گسیختگی مقطع به تأخیر می‌افتد [8 و 9]. در سال 2013 در مطالعاتی بر روی 15 نمونه به ابعاد 12.5 و ارتفاع 120 سانتی‌متر نشان داده شد که نمونه‌هایی که مقدار گرد شدگی گوشه‌های آن 5 سانتی‌متر است و با دولایه GFRP مقاوم‌سازی شده‌اند، نمونه‌ها رفتار بسیار بهتری از لحاظ مقاومت داشته و از ظرفیت کامل آن‌ها استفاده شده است [10، 11 و 12]. بعد از گرد کردن گوشه‌ها به شعاع 2 سانتی‌متر، گوشه‌ها با مخلوطی از پودر سنگ و اپوکسی پوشانده شد و سپس با سمباده زدن به این قسمت‌ها و همه نواحی بتن و با زدن بتونه قسمت‌های خالی پر شده تا سطحی کاملاً صاف و صیقلی حاصل گردد (شکل 3).



شکل 3. آماده‌سازی نمونه‌ها قبل از محصور کردن با GFRP

Fig. 3. Preparing specimens before confining with GFRP

همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش از GFRP برای تقویت استفاده می‌کنیم. الیاف شیشه استفاده شده در این آزمایش دارای مدول الاستیسیته حدود 77 GPa می‌باشد. کرنش کششی الیاف که از تست لیف به دست آمده است برابر 4.48 درصد و کرنش کششی شکست کامپوزیت (الیاف+رزین) با استفاده از استاندارد ASTM D3039 برابر 2.20 درصد به دست آمده است (مقدار هم‌پوشانی الیاف برابر 10 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است). مشخصات ظاهری و مکانیکی GFRP در جدول 2 و نمودار تنش کرنش آن در شکل 4 نمایش داده شده است.

- چسباندن فیبرها روی سطح بتن
- چسب زدن مجدد بر روی فیبرها
- پیچیدن نخ روی نوارها تا از بلند شدگی آنها جلوگیری شود (شکل 5 و 6).



شکل 7. دستگاه بارگذاری و LVDT های عمودی و افقی
Fig. 7. Loading device and vertical and horizontal LVDTs

در حین اعمال بار به نمونه‌ها صدایی از الیاف به گوش می‌رسید و در نهایت در اثر پاره شدن الیاف صدایی شبیه انفجار اتفاق افتاد (شکل 9). همانگونه که در شکل 8 مشاهده می‌شود در نمونه‌ی شاهد شکست با زاویه 45 درجه رخ داده است.



شکل 5. محصور کردن نمونه‌ها توسط GFRP
Fig. 5. Confining specimens with GFRP



شکل 6. نمونه آماده شده برای تست آزمایشگاهی
Fig. 6. Specimen prepared for testing



شکل 8. نمونه شاهد با شکست 45 درجه
Fig. 8. Control specimen with 45° failure line

به علت تمرکز تنش در گوشه‌ها، شکست همه نمونه‌های تقویت شده که تحت آزمایش قرار گرفته است از وسط ارتفاع نمونه‌ها (شکل 9) و نزدیک به یکی از چهار گوشه رخ داده است. در ابتدای اعمال نیرو فقط بتن باربری داشته و پس از آنکه بتن خرد شد، به علت فراهم شدن محصورشدگی جانبی توسط الیاف، بتن محصور شده هنوز قادر به تحمل بار بود. این امر به چسبیدن خوب الیاف به نمونه بتنی نیز بستگی دارد.

همان‌طور که در شکل 7 مشخص است برای ثبت جابجایی‌ها در این آزمایش از 2 عدد LVDT استفاده شده است. برای ثبت تغییر مکان جانبی از یک عدد LVDT 1 سانتیمتری و برای ثبت تغییر مکان قائم از یک عدد LVDT 5 سانتیمتری استفاده شد و نتایج توسط دستگاه دیتا لاگر ثبت و برای هر نمونه نمودار تنش-کرنش به دست آمد.

این تجهیزات در آزمایشگاه مهندسی سازه دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی موجود بوده که همگی دارای تاییدیه کالیبراسیون بوده و از داده‌های ثبت شده برای تحلیل و تفسیر نتایج استفاده می‌شود.

6- نتیجه گیری

مقاوم سازی و بهسازی روند و شیوه تعمیر کردن یا اصلاح کردن یک سازه به منظور دستیابی به شرایط بهره برداری جدید و یا افزایش عمر مفید بهره برداری آن است.

در واقع ما در طرح و اجرای مقاوم سازی به دنبال حصول شرایط جدید در سازه از نظر بهره برداری و یا بارگذاری می باشیم. عملیات مقاوم سازی می تواند به علل زیر مورد نیاز باشد:

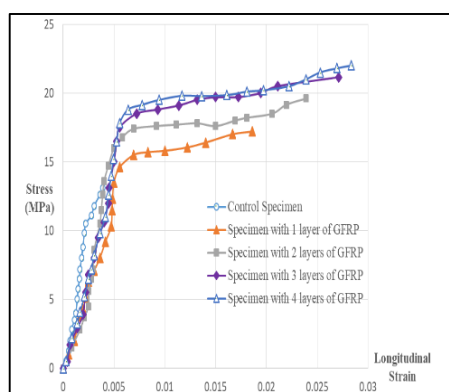
- اشتباهات و مشکلات طراحی
- مشکلات و اشتباهات اجرایی
- تغییر در استانداردها و آیین نامه ها
- افزایش عمر مفید بهره برداری
- تغییر کاربری سازه
- افزایش طبقات و بار وارده

پرو واضح است که در حالت اول و دوم ما نیازمند شرایطی بوده ایم که به علت اشتباهات در طرح و اجرای سازه دارای آن شرایط نبوده و نیازمند تقویت آن می باشیم. مانند زمانی که بتن نتوانسته مقاومت لازم را کسب نماید یا زمانی که ابعاد عضو باربر کوچک تر از ابعاد مورد نیاز اجرا گردیده است. همچنین این امر می تواند زمانی پدید آید که ستون به صورت خارج از محور اجرا و دچار پیچش شده است.

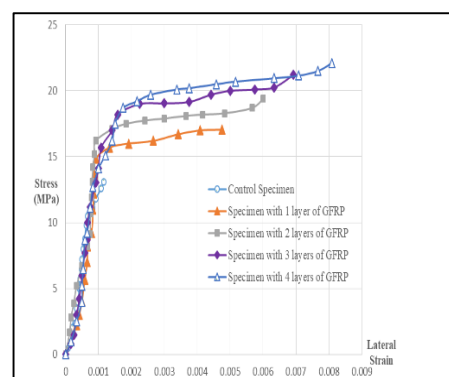
در چهار حالت بعد، سازه در شرایط موجود مشکلی نداشته و شرایط جدید بهره برداری ایجاد می کند که تغییراتی از منظر باربری در سازه ایجاد گردد. به طور مثال، سازه با آیین نامه مرتبط با زمان خود دقیق طراحی و اجرا می گردد ولی پس از چندین سال تغییراتی در آیین نامه طراحی مانند آیین نامه 2800 داده می شود که مطابق آیین نامه جدید سازه نیازمند اصلاح می گردد. همچنین وقتی ما سازه ای داریم که اکنون عمر مفید آن اتمام یافته و یا در شرف اتمام است و تصمیم داریم چند سال دیگر از سازه بهره برداری نماییم یا ممکن است ما سازه و ساختمانی داشته باشیم که طرح و اجرای آن براساس ساختمان مسکونی انجام شده باشد و در آینده ما تصمیم بگیریم از آن کاربری آموزشی و یا اداری داشته باشیم. در همه این موارد ما



شکل 9. شکست نمونه آزمایشگاهی محصور شده با GFRP
Fig. 9. Failure of specimen confined with GFRP



شکل 10. مقایسه نمودار تنش- کرنش (عمودی) در نمونه شاهد و نمونه های تقویت شده با 1، 2، 3 و 4 لایه GFRP
Fig. 10. Comparison of stress-strain (vertical) diagram in the control specimen and specimens with 1, 2, 3 and 4 layers of GFRP



شکل 11. مقایسه نمودار تنش- کرنش (جانبی) در نمونه شاهد و نمونه های تقویت شده با 1، 2، 3 و 4 لایه GFRP
Fig. 11. Comparison of stress-strain (horizontal) diagram in the control specimen and specimens with 1,2,3 and 4 layers of GFRP

- by fiber composites”, J. Struct. Engrg. ASCE, vol. 123, No. 5, p.p. 583—590, 1997.
- [4] Challal, O.; Shahawy, M.; Hassan, M.; “Performance of Axially Loaded Short Rectangular Columns Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Wrapping”, ASCE JI. of Compos. For Constr, vol. 7, No. 3, p.p. 200-208, 2003.
- [5] Ozbakkaloglu, T.; Lim, J. C.; “Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model”, Composites Part B: Engineering, 55, p.p. 607-634, 2013.
- [6] ACI 211.1-8.; “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete”, 2008.
- [7] Aydin, A.; Basu, A.; “The Schmidt hammer in rock material characterization”, Engineering Geology, vol. 81, No. 1, p.p. 1-14, 2005.
- [8] Al-Salloum, Y. A.; “Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates”, Composites Part B: Engineering, vol. 38, No. 5-6, p.p. 640-650, 2007.
- [9] Hollaway, L. C.; Teng, J. G.; “Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites”, Elsevier, 2008.
- [10] Youssef, M. N.; Feng, M. Q.; Mosallam, A. S.; “Stress-strain model for concrete confined by FRP composites”, Composites Part B: Engineering, vol. 38, No. 5-6, p.p. 614-628, 2007.
- [11] Green, M. F.; Bisby, L. A.; Fam, A. Z.; Kodur, V. K.; “FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions”, Cement and concrete composites, vol. 28, No. 10, p.p. 928-937, 2006.
- [12] Sharma, S. S.; Dave, U. V.; Solanki, H.; “FRP wrapping for RC columns with varying corner radii”, Procedia Engineering, 51, p.p. 220-229, 2013.

نیازمند آن هستیم که مقاومت و بایری سازه را افزایش و آن را تقویت نماییم.

در این مقاله با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی تأثیر مستقیم محصورکنندگی خارجی GFRP جهت تعیین معیارهایی برای مقاومسازی سازه‌های موجود و همچنین ساخت و سازه‌های جدید مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق نمونه‌های مربع-مستطیل بتنی مورد آزمایش قرار گرفته است.

در این پژوهش تجربی، محصوریت ناشی از 1، 2، 3 و 4 لایه الیاف GFRP بررسی شده است تا میزان مشارکت تعداد این لایه‌ها در محصوریت به دست آمده مشخص شود. دیگر پارامترها از جمله پارامترهای مقاومت بتن و الیاف و رزین برای همه نمونه‌ها ثابت می‌باشد و فقط تعداد لایه‌های GFRP در نمونه‌ها متغیر می‌باشد. با توجه به اشکال 10 و 11 و مقایسه نمودار تنش کرنش در نمونه شاهد و نمونه‌های مقاومسازی شده با GFRP، نتایج حاکی از آن است که نمونه با 1 لایه نوار تقویت نسبت به نمونه شاهد 27 درصد، نمونه با 2 لایه نوار تقویت نسبت به نمونه شاهد 46 درصد، نمونه با 3 لایه نوار تقویت نسبت به نمونه شاهد 59 درصد و نمونه با 4 لایه نوار تقویت نسبت به نمونه شاهد 69 درصد افزایش مقاومت داشته است. پر واضح است که با افزایش تعداد لایه نوار تقویت مقاومت افزایش یافته و این افزایش مقاومت همراه با افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی نمونه‌هاست.

مراجع

- [1] Zarfam, A.; Rizkalla, S. H.; “Flexural behavior of concrete-filled fiber-reinforced polymer circular tubes”, Journal of Composites for Construction, vol. 6, No. 2, p.p. 123-132, 2002.
- [2] Hosotani, M.; Kawashima, K.; Hoshikuma, jun-ichi.; “A Stress-Strain Model for Concrete Cylinders Confined by Carbon Fiber Sheets”, Report No. TIT/EERG 98-2, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 1998.
- [3] Mirmiran, A.; and Shahawy, M.; “Behavior of concrete columns confined