

مقاوم‌سازی پایه پل‌های بتن‌آرمه به کمک FRP با استفاده از روش‌های

دورپیچ، نزدیک به سطح و ترکیبی

محمد حاجی، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

حسین نادرپور*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

علی خیرالدین، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: naderpour@semnan.ac.ir

دریافت: ۹۶/۱۰/۱۸ پذیرش: ۹۶/۱۲/۳

چکیده:

پل‌ها جزو سازه‌های زیر بنایی هر کشور محسوب می‌شوند که قسمت اعظمی از هزینه یک پروژه راه‌سازی را به خود اختصاص می‌دهند و به علت ظرافت ساختار سیستم سازه‌ای آن‌ها از آسیب‌پذیری زیادی در برابر حوادث طبیعی مانند زلزله برخوردارند مخصوصاً پایه پل‌ها که وظیفه انتقال بارها را از عرشه به زمین دارا هستند لذا طراحی دقیق و ایمن اجزای پل‌ها به‌خصوص پایه‌ها باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. زلزله‌های اتفاق افتاده در دهه ۹۰ میلادی در آمریکا، ژاپن، تایوان و ترکیه، خرابی‌های نسبتاً زیادی در پل‌ها ایجاد کردند. پل‌ها به دلایلی چون ازدیاد بارهای ناشی از افزایش جریان ترافیک، سرویس‌دهی به وسایل نقلیه سنگین‌تر از بارهای اولیه طراحی، پایین بودن کیفیت اجرا، مسائل لرزه‌ای، مسائل زیست‌محیطی اعم از خوردگی آرماتورها، افت‌های پیش‌تندگی ناشی از خزش و جمع‌شدگی بتن، تغییر آیین‌نامه و کوتاه بودن پایه در پل‌هایی که به صورت شیب‌دار ساخته شده و پایه‌های با ارتفاع متغیر دارند، نیاز به مقاوم‌سازی پایه دارند. یکی از آسیب‌های قابل توجه در پایه پل‌ها به آسیب‌های وابسته به شکست برشی به علت کوتاه بودن پایه پل و ظرفیت برشی ناکافی پایه پل می‌باشد. در این مقاله، به کمک روش اجزای محدود، به بررسی روش‌های جدید و ترکیبی مقاوم‌سازی پایه پل‌ها با FRP پرداخته می‌شود. بدین منظور، یک ستون کوتاه که در برش ضعیف طراحی شده است با روش‌های دورپیچ کامل و نواری، نصب میلگرد در شیار نزدیک به سطح و روش‌های ترکیبی مدل شدند و به روش اجزای محدود تحلیل گردید. بررسی نتایج نشان می‌دهد که روش ترکیبی بهترین روش در مقاوم‌سازی پایه‌های کوتاه پل‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پایه پل، ستون کوتاه، مقاوم‌سازی، FRP، اجزای محدود.

۱. مقدمه

در این مقاله، به بررسی روش‌های جدید و ترکیبی مقاوم‌سازی پایه پل‌ها با FRP پرداخته می‌شود. بدین منظور، یک ستون کوتاه که در برش ضعیف طراحی شده است با روش‌های دورپیچ کامل و نواری، نصب میلگرد در شیار نزدیک به سطح و روش‌های ترکیبی در نرم‌افزار (ABAQUS) مدل شدند و از نظر جذب انرژی و شکل‌پذیری مورد بررسی قرار گرفتند.

هدف اصلی از بهسازی لرزه‌ای ستون‌های بتن آرمه افزایش مقاومت برشی، به ویژه در پایه‌ها می‌باشد. این کار شکل‌پذیری ستون را افزایش می‌دهد زیرا از شکست برشی زودرس جلوگیری می‌کند؛ اما اگر فقط شکل‌پذیری افزایش یابد، ممکن است تغییر شکل پسماند در پایه بعد از زلزله افزایش یابد. مقاومت خمشی پایه هم باید افزایش یابد که این منجر به افزایش نیروی زلزله انتقالی از پایه به پی می‌شود (ابوطاها، ۱۹۹۹).

۲. انواع خرابی‌های پل‌ها در اثر زلزله

اعم آسیب‌های دیده شده در پل‌ها تحت زلزله عبارت‌اند از:

- خرابی پل در اثر گسیختگی گسل یا روانگرایی خاک
- خرابی نشیمن و انحراف رو سازه در هر دو امتداد طولی و عرضی
- فروریزی و کج شدگی پایه‌های پل به علت خرابی برشی
- فروریزی دهانه‌های پل به خاطر لغزش از نشیمن
- خرابی دیواره پشتیبان کوله‌ها

۱.۲. خرابی پل‌ها ناشی از گسیختگی

گسیختگی خمشی و عدم شکل‌پذیری خمشی

گسیختگی‌های خمشی در ناحیه مفصل پلاستیک عمدتاً در پایه پل‌ها با آرماتورهای طولی پیوسته رخ می‌دهد. بعضی گسیختگی‌ها به این علت است که هسته بتن به‌طور کافی با آرماتور عرضی محصور نشده تا به پایه اجازه رسیدن به جابجایی غیر الاستیک وارد شده توسط زلزله را بدهد. گسیختگی مفصل پلاستیک به‌وسیله

تاکنون مطالعات زیادی روی مقاوم‌سازی ستون‌ها به وسیله FRP^۱ صورت گرفته است (سعادت‌منش و همکاران، ۱۹۹۷؛ جلال و همکاران، ۲۰۰۵؛ کلمب و همکاران، ۲۰۰۸).

سعادت‌منش و همکاران (۱۹۹۴)، روش‌های جدیدی برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی پل‌ها با FRP ارائه کردند که باعث بهبود مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌ها شد. چلیک و برنا (۲۰۰۴)، مطالعه‌ای آزمایشگاهی روی ستون‌های پل‌ها که با مقیاس یک‌چهارم ستون‌های واقعی ساخته شده بود انجام دادند. آن‌ها با دو نوع الیاف کربن و آرامید ستون‌های ساخته شده را در ناحیه مفصل پلاستیک تقویت کردند. گارال‌نیک و گاناوان (۲۰۰۶)، مدلی برای مقاومت فشاری بتن محصورشده با الیاف FRP در پایه پل‌ها بر اساس توسعه نظریه مور که وابسته به تنش فشاری بتن محصورشده و فشار محصورکننده می‌باشد، پیشنهاد کردند. پاندلیدز و دافین (۲۰۰۷)، به بررسی عددی تقویت پایه‌های چند ستونی در پل‌ها پرداختند.

^۱Fiber reinforced polymer

یک گسیختگی ترکیبی برشی-خمشی هم می‌تواند رخ بدهد و با انتقال ناحیه مفصل پلاستیک همراه باشد. مفصل پلاستیک می‌تواند به مقطعی که نسبت فشار حلقوی به ممان خمشی اعمالی کمتر باشد منتقل شود. اگر فاصله آرماتورهای عرضی در ارتفاع پایه یکسان نباشد گسیختگی برشی ممکن است دور از ناحیه مفصل پلاستیک رخ دهد.

ماهیت ترد و ناگهانی شکست برشی باعث شده است در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله یکی از مهم‌ترین الزامات، به‌کارگیری تدابیری برای دوری از انهدام برشی باشد. از آنجاکه شکست برشی ستون همراه با ایجاد ترک‌های مورب در کل ارتفاع ستون خواهد بود لذا در مقاوم‌سازی ستون‌های بتن آرمه در برابر برش لازم است کل ارتفاع ستون مقاوم‌سازی شود. ستون‌های بتن آرمه به دلایل مختلفی ممکن است در اثر برش آسیب پذیر باشند، مهم‌ترین این علت‌ها عبارت‌اند از: ناکافی بودن خاموت‌ها، کوتاه بودن ستون‌ها، کمتر بودن ظرفیت برشی اولیه مقطع از نیروی برشی وارد بر آن در هنگام زلزله و نهایتاً کاهش ظرفیت برشی مقطع در هنگام زلزله (ابوطاها، ۱۹۹۹).

ایجاد ترک‌های افقی، فروریختن هسته بتن در فشار و شکست آرماتور عرضی و کمانش آرماتور طولی ایجاد می‌شود. به علت کمبود فشار دور گیر کافی در سطح پارگی ناحیه وصله آرماتور، لغزش قبل از اینکه مقطع به ظرفیت خمشی نهایی برسد رخ می‌دهد. این مکانیزم لغزش در اثر وقوع ترک‌های عمودی ریز در هسته بتن فعال می‌شود. لغزش افزایش می‌یابد و با بزرگ شدن ترک‌های قائم و یکپارچه شدن آن‌ها پوشش بتنی در ناحیه وصله آرماتور تخریب می‌شود. کم شدن مقاومت خمشی معمولاً برای تقاضای شکل‌پذیری در جابه‌جایی کم رخ می‌دهد و حتی می‌تواند قبل از تسلیم آرماتور طولی پایه رخ دهد (لسته نشایی و همکاران، ۱۳۸۷).

گسیختگی برش

شکست‌های برشی ترد هستند و منجر به کاهش سریع مقاومت جانبی پایه می‌گردند. ستون‌های کوتاه با جزئیات آرماتوربندی عرضی قدیمی به‌ویژه به شکست برشی آسیب پذیرند، درحالی‌که برای یک بار جانبی داده شده مقاومت خمشی موجود معمولاً خیلی بیشتر از مقاومت برشی می‌باشد. نمونه‌ای از ستون کوتاه در پل‌های شیب‌دار در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱. وجود ستون کوتاه در پل‌های شیب‌دار



شکل ۲. نمونه‌هایی از شکست در پایه پل‌ها

۲.۲. شیوه‌های نوین مقاوم‌سازی پل‌ها

میراگرها

در اثر اعمال بارهای دینامیکی تغییر مکان حاصله همراه با سرعت و شتاب خواهد بود. جهت مقابله با شتاب وارده نیرویی به‌عنوان نیروی لختی در اثر جرم آن و جهت مقابله با سرعت نیرویی به نام نیروی میرایی در اثر اصطکاک بین ذرات و لقی اتصالات و غیره به وجود می‌آید و باعث تلف شدن مقداری انرژی می‌شود به این پدیده در اصطلاح میرایی می‌گویند با تعبیه میراگر (دمپر) می‌توان اثر تخریب دینامیکی و انتقال جانبی سازه را به حداقل رساند.

استهلاک انرژی در این وسایل عمدتاً با استفاده از روش‌های مختلفی نظیر جاری شدن یک فلز نرم، اصطکاک مواد بر روی هم، حرکت یک پیستون درون یک ماده ویسکوز و یا رفتار ویسکو الاستیک در موادی از جنس شبیه لاستیک می‌باشد (ملکی، ۱۳۸۵).

مقاوم‌سازی ستون و عرشه با FRP

استفاده از تکنیک‌های مقاوم‌سازی با FRP نشان داده که می‌توان از شکست ترد پایه‌های پل حین وقوع زلزله جلوگیری کرد. در کنار توانایی این مصالح برای مقاوم‌سازی موفق پایه‌های پل مزایای اجرایی فراوان و

جداگرها

جداگرها به منظور جداسازی سازه از حرکات شدید زمین هنگام زلزله بکار می‌روند. برخلاف ساختمان که جداسازی آن غالباً از روی فونداسیون انجام می‌پذیرد، در پل‌ها این جداسازی ما بین روسازه و زیر سازه اعمال می‌گردد.

جداگر لاستیکی

این جداگرها از دهه هفتاد میلادی در سازه‌ها بکار گرفته شده‌اند در پل‌ها، به‌عنوان یک دستگاه تکیه‌گاهی (که در ایران نئوپرن نامیده می‌شود) اکثراً بکار گرفته می‌شوند.

جداگرهای اصطکاکی

می‌توان گفت این جداگرها از قدیمی‌ترین روش‌های جداسازی است. زیرا که از صدها سال پیش بشر کشف کرده بود که اگر زیر یک ساختمان را با شن گرد پر کند در زلزله روی آن می‌لغزد و می‌تواند پایدار بماند. امروزه جداسازی توسط صفحات فولادی پولیش شده که آغشته به ماده تفلون شده‌اند انجام می‌پذیرد.

- همچنین خصوصیات ذاتی مصالح FRP (از جمله مقاوم بودن در مقابل خوردگی) باعث شده تا مهندسين روز به روز با فرار از روش‌های سنتی، از روش مقاوم‌سازی با مصالح FRP استقبال کنند. نسبت وزن به مقاومت این مواد ۵۰ برابر بتن و ۱۸ برابر فولاد می‌باشد. در اعضای عمودی مانند ستون‌ها برای تقویت از صفحات پیش ساخته که در آن‌ها الیاف به صورت حلقه‌ای قرار دارند استفاده می‌شود. پس از آماده‌سازی سطح عضو بتنی با لایه چسب روی آن را می‌پوشاند و صفحه مورد نظر در راستای مشخص روی عضو چسبانده می‌شوند (ناطق الهی، ۱۳۸۵).
 - ایده‌آل بودن این راهکار برای مقاوم‌سازی پایه پل شناور در آب
 - به حداقل رساندن افزایش ابعاد پایه پل پس از مقاوم‌سازی به کمک مصالح کامپوزیت پلیمری
 - حذف مرحله تعمیر سطح بتن پیش از روند اصلی مقاوم‌سازی
 - کاهش شدید خوردگی به دلیل بدون درز بودن این روش
- سرعت زیاد اجرای مقاوم‌سازی پایه پل به کمک مصالح کامپوزیت پلیمری بدون ایجاد اختلال در بهره‌برداری (نشریه شماره ۵۲۴).

مزایا و ویژگی‌های استفاده از FRP

- افزایش ظرفیت محوری، برشی، و خمشی پایه پل‌ها



شکل ۳. مقاوم‌سازی پایه‌های پل با FRP

مقابل حرارت است. بنابراین روش نصب در نزدیک سطح^۲ NSM مورد قبول واقع شد. مبنای روش NSM

با گسترش علم صنعت مقاوم‌سازی مشخص شد که روش رایج^۱ EBR دارای کاستی‌هایی مثل جدا شدن ورق FRP، نداشتن مقاومت و عملکرد مناسب در

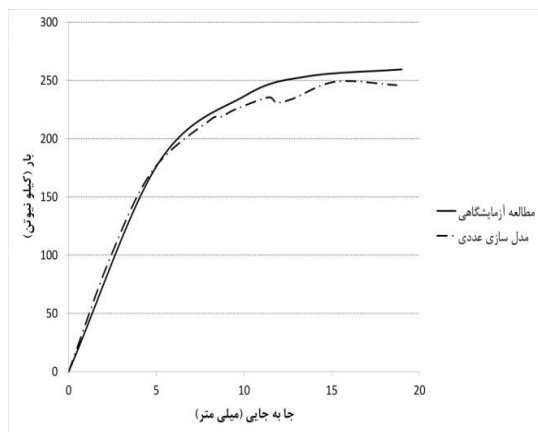
² Near surface mounted

¹Externally bonded reinforcement

غیرخطی را دارا می‌باشد. در ادامه مشخصات مصالح تعریف شده در نرم‌افزار و هندسه مدل‌ها و روش‌های مقاوم‌سازی ارائه می‌گردد.

۱.۳. صحت سنجی

به منظور اطمینان از صحت عملکرد نرم‌افزار و روش مدل‌سازی، یک ستون کوتاه مربعی که به صورت آزمایشگاهی توسط کلمب (۲۰۰۸) مورد ارزیابی قرار گرفته شده بود انتخاب و توسط نرم‌افزار آباکوس مدل گردید. در شکل ۴ نتایج مطالعه آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته، آمده است.



شکل ۴. صحت سنجی انجام گرفته در این مطالعه

۲.۳. مشخصات مصالح:

بتن

مشخصات بتن تعریف شده در نرم‌افزار با مقاومت ۳۰ مگاپاسگال بوده و با استفاده از مدل CDP به دست آمد. در جدول ۱ مشخصات بتن مورد استفاده قرار داده شده است.

قرار دادن میل‌ه یا ورقه‌های FRP در شیارهای تعبیه شده در سطح بتن و ایجاد پیوستگی لازم با اپوکسی است.

مقایسه روش EBR و NSM

در مقایسه با کاربرد مصالح FRP به روش EBR، روش NSM دارای مزایای زیر می‌باشد:

- به علت عدم نیاز به عملیات آماده‌سازی سطحی، حجم عملیات مقاوم‌سازی کاهش می‌یابد.
- مسلح‌کننده‌های NSM به مراتب کم‌تر در معرض جداشدگی قرار دارند.
- مسلح‌کننده‌های NSM را می‌توان به راحتی در سطوح جنبی قطعات مهار نمود تا مانع از جداشدگی آن‌ها گردید؛ این مزیت به خصوص در مقاوم‌سازی خمشی اجزای قاب‌های خمشی در نواحی لنگر منفی مورد توجه می‌باشد.
- مسلح‌کننده‌های NSM راحت‌تر پیش‌تنیده می‌گردند.
- مسلح‌کننده‌های NSM به وسیله‌ی پوشش بتنی محافظت شده و در نتیجه کم‌تر در معرض ضربه‌ها و آسیب‌های مکانیکی، آتش‌سوزی و حرکات خراب کارانه قرار دارند.
- ظاهر سازه پس از مقاوم‌سازی بدون تغییر می‌ماند.

۳. مدل‌سازی اجزای محدود

نرم‌افزار ABAQUS مجموعه‌ای بسیار توانمند از برنامه‌های مدل‌سازی است که بر پایه روش اجزاء محدود شکل گرفته است و توانایی حل طیف گسترده‌ای از مسائل علمی و صنعتی، از مسائل ساده و دارای تحلیل خطی تا مباحث پیچیده مدل‌سازی

جدول ۱. مشخصات بتن تعریف شده در نرم افزار

Density= 2.4×10^9 (Ton/mm ³)		Youngs Modulus= 25000		Poissons ratio= 0.2	
Dilation Angle= 30		Eccentricity=0.1		$fb_0/fc_0 = 1.16$	
K=0.67		Viscosity Parameter= 0.001			
σ_c (MPa)	ϵ_c in	dc	σ_t (MPa)	ϵ_t in	dt
9	0	0	3	0	0
15.83957	2.6E-05	0.011429	2.064378	0.000237	0.708429
21.4377	8.78E-05	0.02805	1.949531	0.000292	0.760093
25.7038	0.000206	0.053534	1.899847	0.000319	0.780364
28.46048	0.000389	0.087873	1.737619	0.000426	0.838342
30	0.000816	0.160883	1.477468	0.000687	0.907717
24.88764	0.001901	0.350011	1.316869	0.000944	0.938122
15.04807	0.00432	0.669285	1.204422	0.001199	0.954649
9.574259	0.006553	0.828326	1.119711	0.001452	0.96483
6.633656	0.008678	0.902175	1.046563	0.001731	0.972215
4.902233	0.010751	0.939253	0.998	0.001958	0.976462
3.796558	0.012798	0.959622	0.952072	0.002209	0.980033
3.044651	0.01483	0.971704	0.912781	0.002461	0.982767
2.507877	0.016853	0.979329	0.878637	0.002713	0.984916

فولاد و الیاف

کوچکی (یک میلی متر) در وسط میلگردهایی که تحت فشار قرار می گیرند اعمال کنیم. به این بار کوچک که معمولاً در تحلیل های کمانشی مورد استفاده قرار می گیرد Imperfection می گویند.

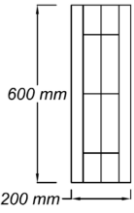
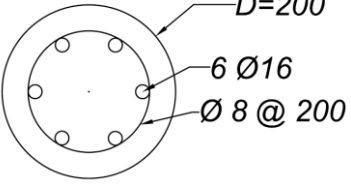
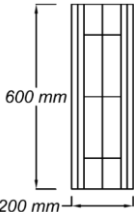
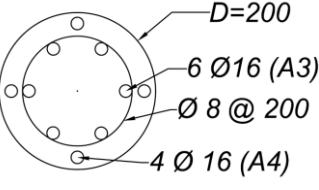

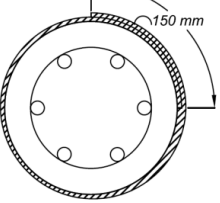

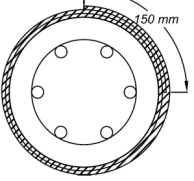

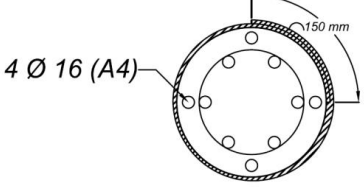
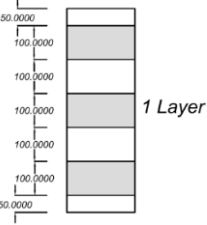
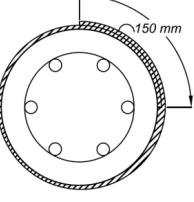
۴. مشخصات نمونه ها

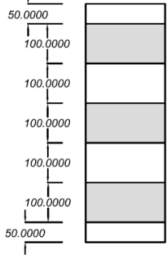
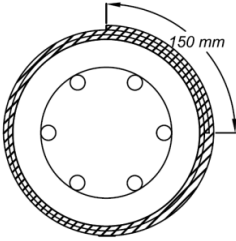
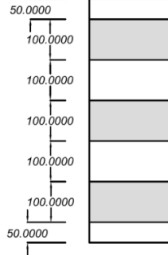
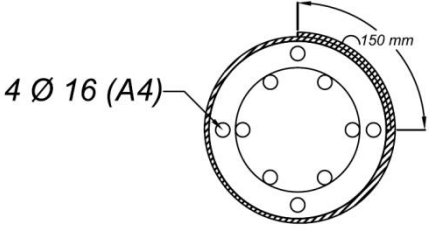
در جدول ۲ مشخصات نمونه ها آورده شده است.

مشخصات فولاد تعریف شده در نرم افزار به صورت دوخطی می باشد. از فولاد معمولی (A۳) برای طراحی و از فولاد با مقاومت بالا (A۴) برای مقاوم سازی استفاده شد. همچنین الیاف مورد استفاده برای مقاوم سازی از جنس کربن می باشد.

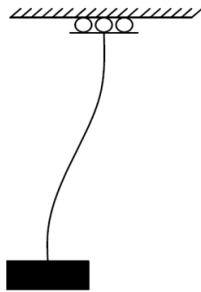
برای آنکه تغییرشکل میلگردها در جهت صحیح و مطابق با واقعیت انجام شود، باید تغییر مکان بسیار

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های مورد بررسی

شکل	مقطع عرضی	نام نمونه
	 <p>$D=200$ 6 Ø16 Ø8 @ 200</p>	نمونه مرجع (CR)
	 <p>$D=200$ 6 Ø16 (A3) Ø8 @ 200 4 Ø16 (A4)</p>	نمونه تقویت شده با کاشت میلگرد نزدیک به سطح (CNSM)
 <p>1 Layer</p>	 <p>150 mm</p>	نمونه تقویت شده با FRP به روش دورپیچ کامل یک لایه (CEBR1-1L)
 <p>2 Layer</p>	 <p>150 mm</p>	نمونه تقویت شده با FRP به روش دورپیچ کامل دو لایه (CEBR1-2L)
 <p>1 Layer</p>	 <p>4 Ø16 (A4) 150 mm</p>	نمونه تقویت شده با FRP به روش دورپیچ کامل یک لایه + تقویت شده با کاشت میلگرد نزدیک به سطح (CEBR1+CNSM)
 <p>1 Layer</p>	 <p>150 mm</p>	نمونه تقویت شده با FRP به روش دورپیچ نواری یک لایه (CEBR2-1L)

 <p>2 Layer</p>	 <p>150 mm</p>	<p>نمونه تقویت شده با FRP به روش دورپیچ نواری دو لایه (CEBR2-2L)</p>
 <p>1 Layer</p>	 <p>150 mm</p> <p>4 Ø 16 (A4)</p>	<p>نمونه تقویت شده با FRP به روش دورپیچ نواری یک لایه + تقویت شده با کاشت میلگرد نزدیک به سطح (CEBR2+CNSM)</p>

۱.۴. بارگذاری



شکل ۵. شرایط تکیه‌گاهی مدل شده در نرم‌افزار

ستون‌های مدل شده تحت بارگذاری محوری ثابت () $(0.1f'_cA_g)$ و بارگذاری یک جهته جانبی قرار گرفتند. همچنین پایین ستون به صورت گیردار مدل شد و بالای آن به منظور اطمینان از شکست برشی به صورت غلطک مدل شد (برای اطمینان از شکست برشی قسمت بالای ستون نباید چرخش داشته باشد و تنها در راستای افقی حرکت کند). شرایط تکیه‌گاهی اختصاص یافته را در شکل ۵ مشاهده می‌کنید.

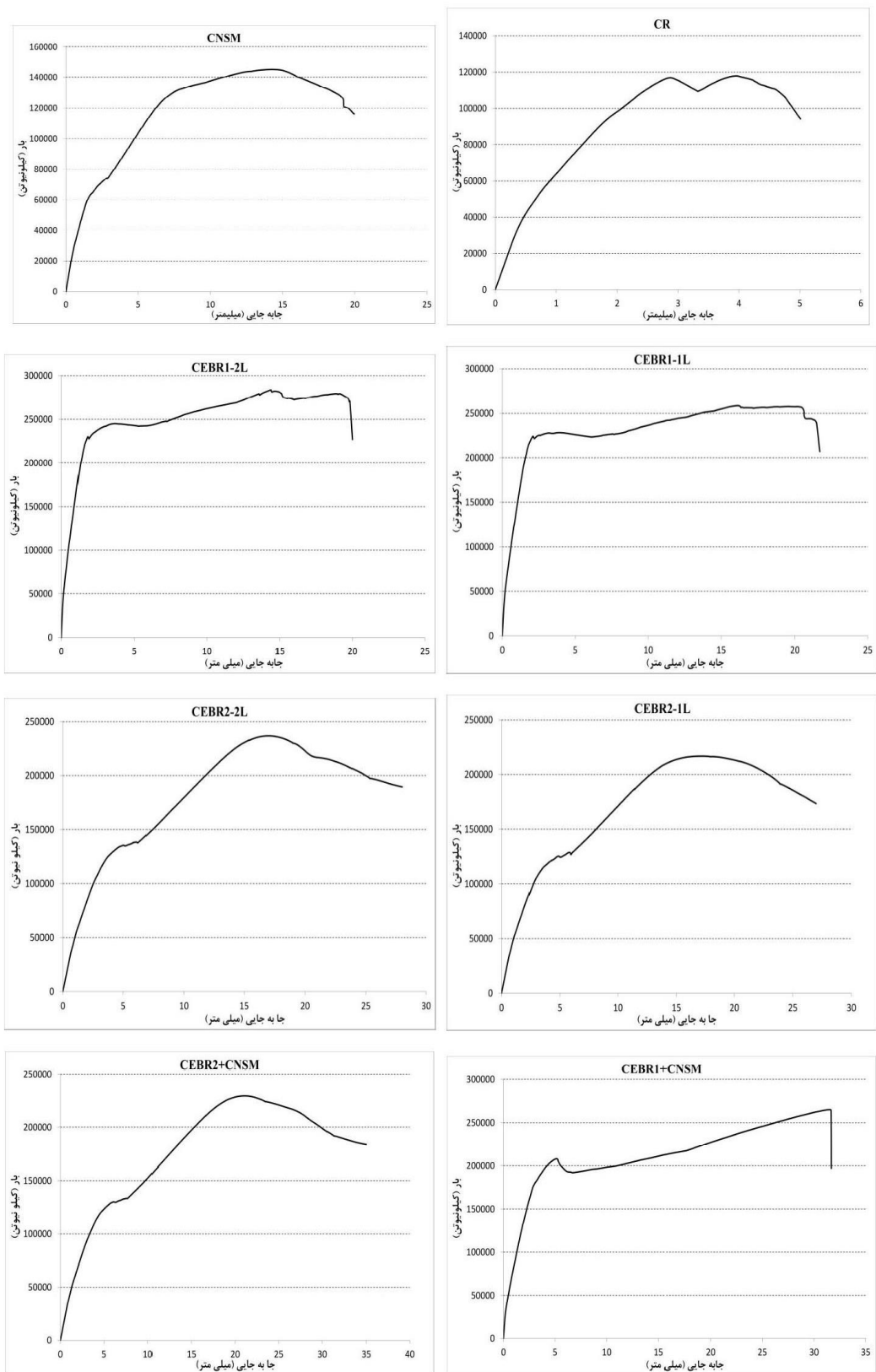
به طور کلی در واقعیت و اجرا برای این‌که میلگردها ظرفیت ستون را بالا ببرند باید با طول مهاری کافی در تیر بالا و فونداسیون ادامه داده شوند. در این مقاله بالای میلگردها شرایط تکیه‌گاهی مطابق با ستون را دارد و پایین میلگردها نیز شرایط تیه‌گاهی گیردار را دارند مطابق شکل ۵.

برای مش زدن ستون از المان (C3D8R)، برای مش زدن میلگردها از المان (T3D2) و برای مش زدن الیاف FRP از المان (S4R) استفاده شد.

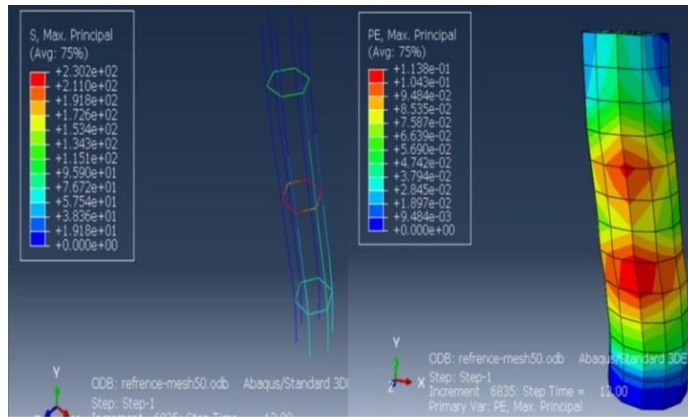
۵. نتایج

نمودارهای نیرو - جابه‌جایی در **Error! Reference source not found.** آمده است. همچنین تنش‌های موجود در میلگردها و الیاف و ترک‌های روی بتن نیز در شکل ۶ تا شکل ۱۳ آمده است.

مقاوم‌سازی پایه پل‌های بتن‌آرمه به کمک FRP با استفاده از روش‌های دورپیچ، نزدیک به سطح و ترکیبی



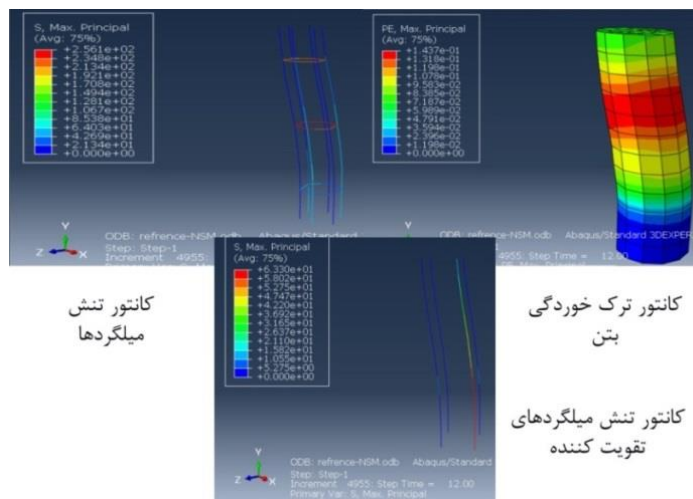
شکل ۶. نمودارهای نیرو - جاب‌جایی در نمونه‌های مختلف



کانتور تنش میلگردها

کانتور ترک خوردگی بتن

شکل ۶. نمونه CR

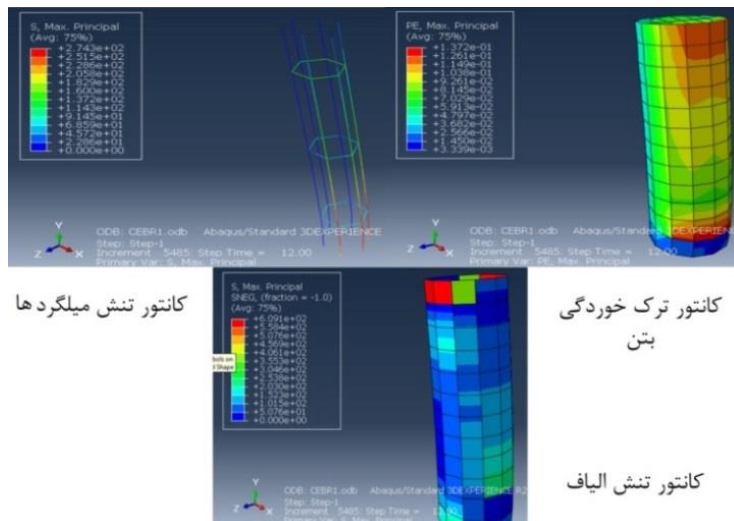


کانتور تنش میلگردها

کانتور ترک خوردگی بتن

کانتور تنش میلگردهای تقویت کننده

شکل ۷. نمونه CNSM



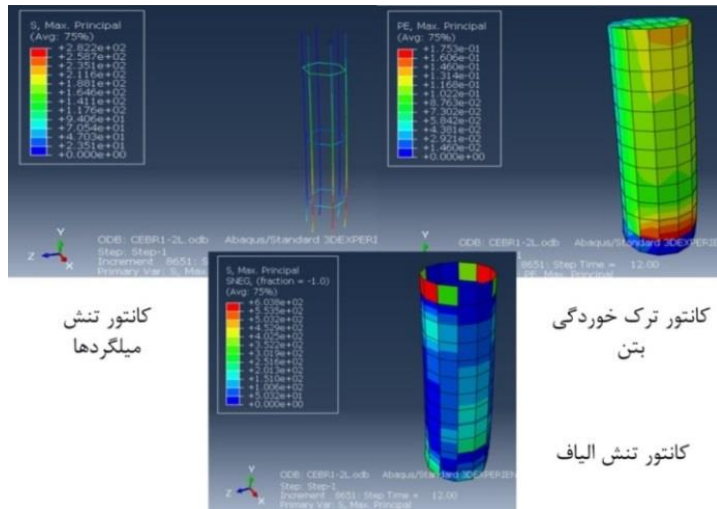
کانتور تنش میلگردها

کانتور ترک خوردگی بتن

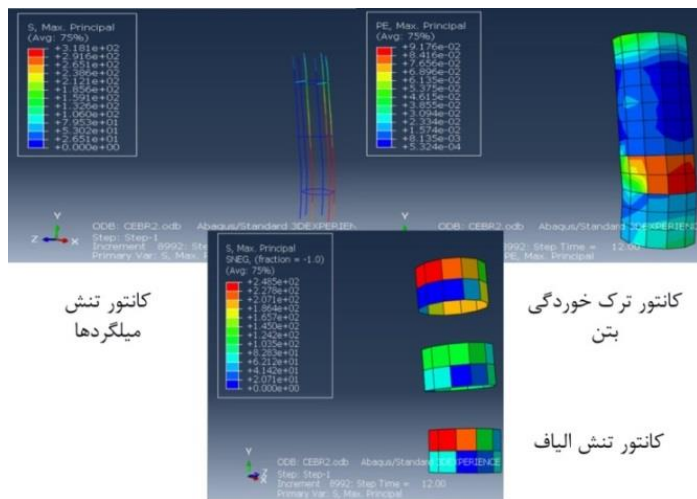
کانتور تنش الیاف

شکل ۸. نمونه CEBR1-1L

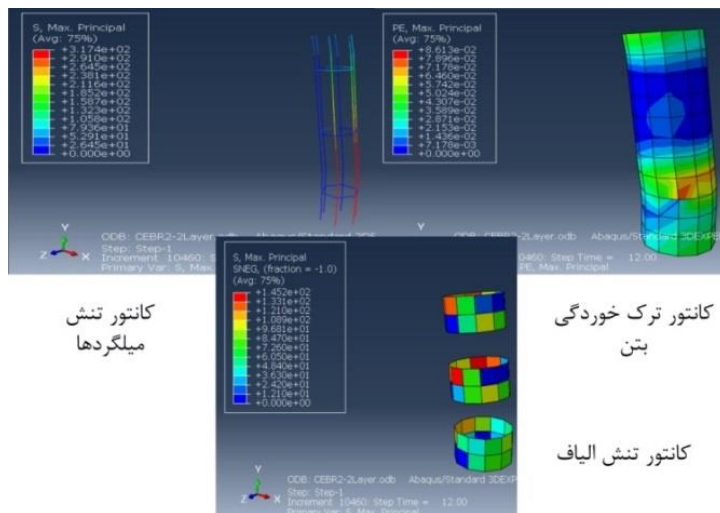
مقاوم‌سازی پایه پل‌های بتن‌آرمه به کمک FRP با استفاده از روش‌های دورپیچ، نزدیک به سطح و ترکیبی



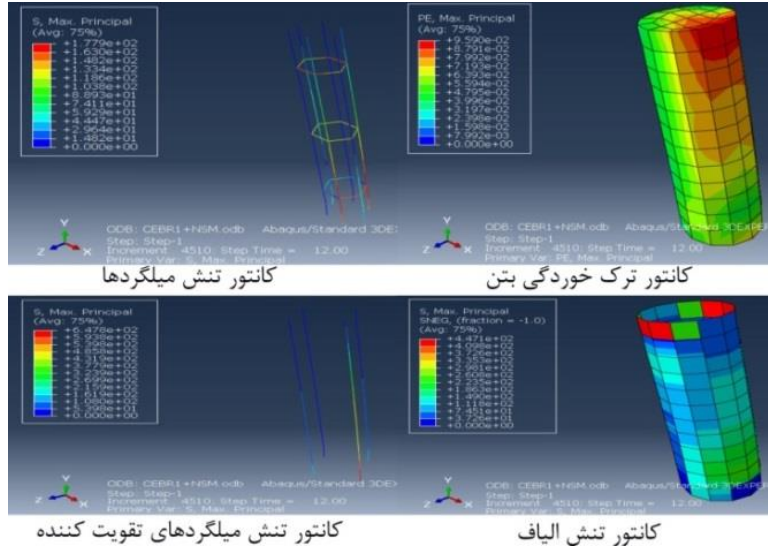
شکل ۹. نمونه CEBR1-2L



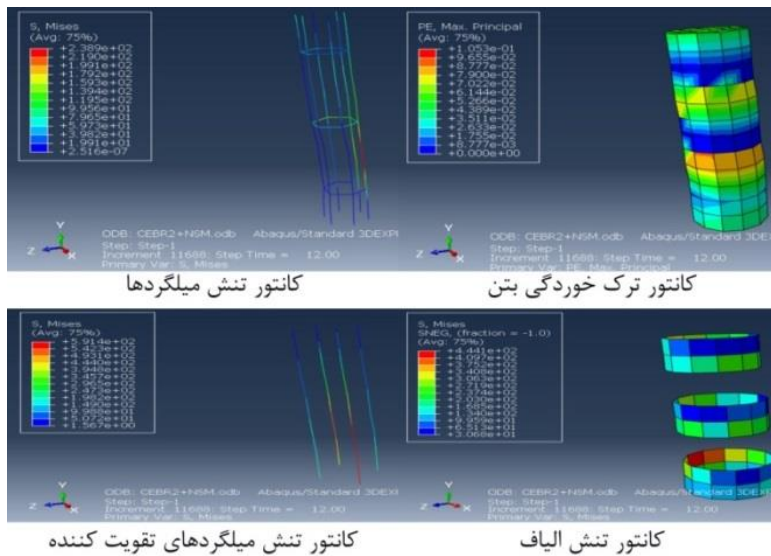
شکل ۱۰. نمونه CEBR2-1L



شکل ۱۱. نمونه CEBR2-2L



شکل ۱۲. نمونه CEBR1+CNSM



شکل ۱۳. نمونه CEBR2+CNSM

تغییر مکان) و در جدول ۴ مقادیر شکل پذیری در نمونه‌ها محاسبه شده است. منظور از شکل پذیری، نسبت جابه‌جایی نهایی (جابه‌جایی متناظر با $0/8$ برابر با بار ماکزیمم) به جابه‌جایی تسلیم (جابه‌جایی متناظر با جاری شدن اولین میلگرد) می‌باشد. همچنین در جدول ۵ مقدار بار ماکزیمم که هر نمونه تحمل کرده، آورده شده است.

همان‌گونه که از کانتورهای ترک‌خوردگی و تنش میلگردها در نمونه‌ها مشاهده می‌شود به غیر از مدل‌هایی که با الیاف FRP به صورت کامل دورپیچ شده‌اند و تغییر شکل خمشی دارند، نمونه‌های مرجع و CNSM تغییر شکل برشی، و نمونه‌هایی که به صورت دورپیچ نواری تقویت شدند تغییر شکل خمشی - برشی دارند. Error! Reference source not found. مقادیر انرژی جذب‌شده (مساحت زیر منحنی نیرو -

جدول ۳. مقادیر انرژی جذب شده در نمونه‌ها

نام نمونه	انرژی جذب شده (kJ)	انرژی جذب شده انرژی جذب شده نمونه مرجع
CR	۴۵۴/۷	۱
CNSM	۲۳۴۴/۹	۵/۱۶
CEBR1-1L	۵۰۳۰	۱۱/۰۶
CEBR1-2L	۵۵۲۴	۱۲/۱۵
CEBR1+CNSM	۶۷۰۳/۲	۱۴/۷۴
CEBR2-1L	۴۵۷۰	۱۰/۰۵
CEBR2-2L	۵۰۵۵	۱۱/۱۲
CEBR2+CNSM	۶۱۵۰/۱	۱۳/۵۲

جدول ۴. مقادیر شکل‌پذیری در نمونه‌ها

نام نمونه	جاب‌جایی نهایی Δ_u (mm)	جاب‌جایی تسلیم Δ_y (mm)	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu_{CR}}$
CR	۵	۴/۱۷	۱/۲	۱
CNSM	۱۷/۷۵	۵/۵۴	۳/۲	۲/۶۷
CEBR1-1L	۲۱/۷۱	۹/۴۴	۲/۳	۱/۹۲
CEBR1-2L	۲۰	۷/۱۴	۲/۸	۲/۳۳
CEBR1+CNSM	۳۱/۶۸	۸/۳۴	۳/۸	۳/۱۷
CEBR2-1L	۲۷/۰۱	۱۰/۴	۲/۶	۲/۱۷
CEBR2-2L	۲۸/۰۱	۹/۲۴	۳/۰۳	۲/۵۲
CEBR2+CNSM	۳۴/۹۹	۸/۳۳	۴/۲	۳/۵

جدول ۵. حداکثر بار تحمل شده در هر نمونه

نام نمونه	F_{max} (kN)	$\frac{F_{max}}{F_{maxCR}}$
CR	۱۱۷۸۶۸/۹	۱
CNSM	۱۴۵۱۲۷/۵	۱/۲۳
CEBR1-1L	۲۵۸۶۲۳/۹	۲/۱۹
CEBR1-2L	۲۸۳۷۷۸/۳	۲/۴۱
CEBR1+CNSM	۲۶۵۱۵۲/۴	۲/۲۵
CEBR2-1L	۲۱۶۸۶۹/۹	۱/۸۴
CEBR2-2L	۲۳۶۸۶۸/۹	۲
CEBR2+CNSM	۲۲۹۶۹۴/۶	۱/۹۵

۶. نتیجه گیری

نمونه را به میزان ۱۶۶/۶۷ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش می‌دهد ولی کمک زیادی به افزایش ظرفیت باربری نمونه نمی‌کند (افزایش ۲۳ درصدی نسبت به نمونه مرجع) به همین دلیل پیشنهاد می‌شود که روش NSM، همیشه به صورت ترکیبی با روش‌های دورپیچ (کامل و نواری) به کار گرفته شود.

نمونه های CEBR1+CNSM و CEBR2+CNSM از نظر جذب انرژی به ترتیب افزایش ۱۴/۷۴ و ۱۳/۵۲ برابری را نسبت به نمونه مرجع از خود نشان داده‌اند.

در کل روش مقاوم‌سازی ترکیبی (نصب نزدیک سطح+دورپیچ) از نظر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و جذب انرژی روش برتری نسبت به روش‌های رایج مقاوم‌سازی (دورپیچ کامل و نواری) بوده و می‌تواند در مقاوم‌سازی پایه‌های پل‌ها به جای روش‌های رایج مورد استفاده قرار بگیرد

با توجه به خروجی‌های به دست آمده از نرم‌افزار می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

از نظر ظرفیت باربری جانبی (برش)، به ترتیب در نمونه‌های CEBR1-2L و CEBR1+CNSM حداکثر بار تحمل شده نسبت به نمونه مرجع ۲/۴۱ و ۲/۲۵ برابر شده است که می‌توان نتیجه گرفت در روش دورپیچ کامل، ستون دایره‌ای دارای محصورشدگی زیادی نسبت سایر نمونه‌ها شده که این علاوه بر افزایش ظرفیت باربری جانبی و جذب انرژی، منجر به رفتاری کاملاً شکل‌پذیر گردیده است (در روش دورپیچ کامل به دلیل اینکه تمام ارتفاع ستون با الیاف پوشیده می‌شود تنش‌های بتن و میلگرد را کاهش داده و باعث افزایش مقاومت ستون می‌گردد).

با توجه به مقادیر شکل‌پذیری می‌توان نتیجه گرفت که ستون مقاوم‌سازی شده به روش NSM شکل‌پذیری

مراجع

- لشته نشایی، م.، اصغری سرخی، م. و بخشیان لموکی، ا. ۱۳۸۷. "شیوه‌های نوین مقاوم سازی پل‌ها. اولین کنفرانس بین-المللی مقاوم سازی لرزه‌ای". ۲۹ مهر الی ۱ آبان، تبریز.
- ملکی، ش. ۱۳۸۵. "روش‌های نوین در مقاوم سازی لرزه‌ای پل‌ها". همایش آشنایی با تکنولوژی‌های نوین بهسازی لرزه-ای، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، تهران.
- ناطق الهی، ف. ۱۳۸۵. "مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با استفاده از FRP". نوپردازان، تهران.
- نشریه شماره ۵۲۴. "راهنمای روش‌ها و شیوه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و جزئیات اجرایی".
- Abaqus Analysis User's Manual. 2016.
- Aboutaha, R. S., Engelhardt, M. D., Jirsa, J. O. and Kreger, M. E. 1999. "Rehabilitation of shear critical concrete columns by use of rectangular steel jackets". *ACI Struct. J.*, 96: 68-78.
- Schlick, B. M. and Brena, S. F. 2004. "Seismic rehabilitation of reinforced concrete bridge columns in moderate earthquake regions using FRP composites". *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada, Aug. 1-6.*
- Huang, P. C., Hsu, Y. T. and Nanni, A. 2000. "Assessment and proposed structural repair strategies for bridge piers in Taiwan damaged by the Ji-Ji earthquake". *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and structures, Ottawa, Canada, 15-18 Aug., pp. 593-600.*
- Colomb, F., Tobbi, H., Ferrier, E. and Hamelin, P. 2008. "Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials". *Compos. Struct.*, 82(4): 475-487.
- Galal, K., Arafa, A. and Ghobrah, A. 2005. "Retrofit of RC square short columns". *Eng. Struct.*, 27(5): 801-813.
- Guralnick, S. A. and Gunawan, L. 2006. "Strengthening of reinforced concrete bridge columns with FRP wrap". *Prac. Period. Struct. Design Constr.*, 11(4): 218-228.
- Pantelides, C. P., Duffin, J. B. and Reaveley, L. D. 2007. "Seismic strengthening of reinforced-concrete multicolumn bridge piers". *Earthq. Spec.* 23(3): 635-664.
- Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. and Jin, L. 1994. "Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps". *ACI Struct. J.* 91(4): 434-447.
- Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. and Jin, L. 1997. "Repair of earthquake-damaged RC columns with FRP wraps". *ACI Struct. J.*, 94(2): 206-X.