



## بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتنی مسلح شده با میلگردهای FRP

محمدحسین برادران خلخالی<sup>۱</sup>، محمدرضا توکلی زاده<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری عمران-سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

Mhb.khalkhali@yahoo.com  
drt@um.ac.ir

### خلاصه

پلیمرهای مسلح شده یکی از مهمترین مصالحی می‌باشند که در سال‌های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش قاب‌های بتنی مسلح شده با FRP<sup>۱</sup> بررسی می‌شود. بدین منظور، ابتدا برای مقایسه شکل‌پذیری یک قاب نمونه یک طبقه به صورت سه‌بعدی یک بار با میلگردهای معمولی و بار دیگر با میلگردهای از جنس FRP مدل‌سازی شده‌است. برای مقایسه رفتار لرزه‌ای نیز دو قاب نمونه هشت طبقه مشابه حالت قبل مدل‌سازی و مقایسه گردیده‌است. باید افزود، میلگردهای معمولی در سازه مسلح شده با FRP<sup>۱</sup>ها، در مفاصل پلاستیک به کار گرفته می‌شود. عملکرد لرزه‌ای این قاب با اعمال شتاب نگاشت مربوط به زلزله مصنوعی با دوره بازگشت ۲۰۰۰ساله و چندین شتاب‌نگاشت میدان نزدیک مورد بررسی قرار گرفته‌است و رفتار سازه از قبیل جابجایی نسبی طبقات، جابجایی بام و برش پایه جذب شده توسط سازه مقایسه گردیده‌است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از FRP باعث افزایش جابجایی بام و کاهش برش پایه در قاب نسبت به سازه معمولی می‌گردد.

کلمات کلیدی: تحلیل تاریخیچه پاسخ غیر خطی، FRP، قاب بتنی، پوش آور.

### ۱. مقدمه

در هنگام بروز زلزله، سازه‌های سنگین خصوصاً سازه‌های بتنی به دلیل داشتن جرم زیاد تحت اثر نیروی قابل توجهی قرار می‌گیرند، در نتیجه توجه به راه‌هایی که بتوان به کمک آن‌ها انرژی تحمیل شده به سازه‌ها را در هنگام زلزله بدون از بین بردن پایداری سازه تلف کرد حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به اهمیت این موضوع استفاده از مصالح نوین، بخش قابل توجهی از تحقیقات امروز در زمینه مهندسی سازه و زلزله را به خود اختصاص داده‌است. FRP<sup>۱</sup>ها دارای مزایا و ویژگی‌های منحصر به فردی هستند، از جمله مقاومت بالا در برابر خوردگی، چگالی بسیار پایین در حدود یک پنجم چگالی فولاد، رفتار کاملاً کشسان [۱].

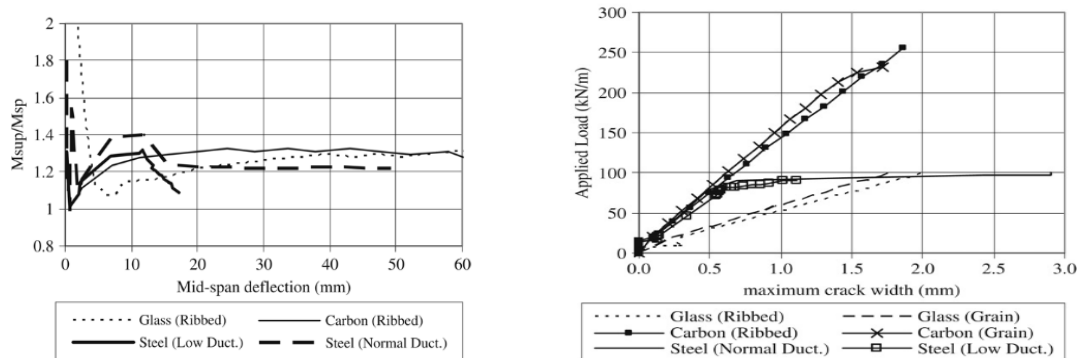
در این پژوهش رفتار لرزه‌ای قاب بتنی مسلح با میله‌های از جنس FRP<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار می‌گیرد، برای این منظور دو قاب بتنی مشابه را که اولی با آرماتورهای معمولی و دیگری با آرماتورهای معمولی همراه با میلگرد های از جنس FRP<sup>۱</sup> مسلح گردیده‌است را طراحی و تحلیل می‌نماییم. هر دو قاب در نواحی با لرزه خیزی بالا ایران در نظر گرفته می‌شود و طراحی و جزئیات قاب‌ها بر اساس استانداردهای طراحی لرزه‌ای می‌باشد. برای راستی آزمایشی نرم افزار اجزای محدود در این پژوهش از نتایج بدست آمده از آزمایش میز لرزاننده مربوط به ستون بتن مسلح استفاده می‌گردد [۲]. در انتها رفتار هر دو قاب تحت تاثیر تحریک لرزه‌ای مقیاس شده مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری عمران-سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
<sup>۲</sup> استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> Fiber Reinforced Polymer

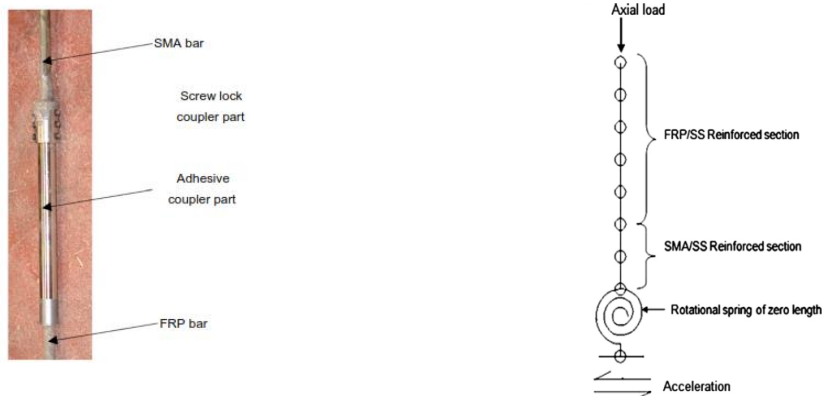
## ۲. کارهای تحقیقاتی سال‌های اخیر

همانطور که بیان گردید در سال‌های اخیر مطالعه بر روی رفتار مقاطع بتنی مسلح شده با میلگردهای FRP صورت گرفت، در سال ۲۰۰۹ Gravina & smeeet به بررسی رفتار تیرهای بتنی مسلح با میلگردهای FRP پرداختند [۳]. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از عرض ترک‌ها، مقایسه رفتار خمشی تیرها و مقایسه شکل‌پذیری که همانطور که در شکل ۱ نمایش داده می‌شود آنها نتیجه گرفتند که استفاده از FRP باعث کاهش چشم‌گیر عرض ترک‌ها در نمونه مسلح شده با کربن، شکل‌پذیری مشابه با تیر مسلح شده با میلگرد فولادی و مقاومت و سختی مشابه با تیر معمولی در مورد بررسی می‌شود.



شکل ۱ - نمودار بار در مقابل حداکثر ترک خمشی و جابجایی وسط دهانه تیر.

همچنین در سال ۲۰۱۲ نیز Bilah & Alam به بررسی رفتار لرزه‌ای ستون بتنی مسلح شده با آرماتورهای FRP و SMA [۴]. نتایج حاصل از پژوهش آنها عبارت بود از کاهش میزان جابجایی باقی مانده در حالت‌های استفاده از SMA، در سیستم ترکیبی SMA و FRP میزان بیشتری از انرژی مستهلک می‌گردد و ستون با میلگرد معمولی دارای شکل‌پذیری بیشتری می‌باشد. در شکل ۲ ستون شماتیک آزمایش شده توسط Bilah & Alam نمایش گردیده است [۴].

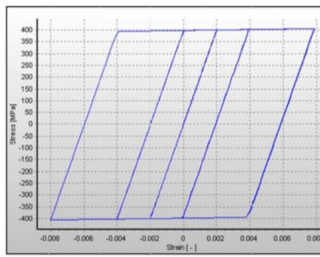


شکل ۲ - ستون شماتیک آزمایش شده توسط Bilah & Alam

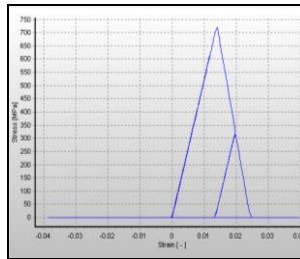
Ferreira و همکاران در سال ۲۰۱۵ نیز به بررسی کرنش برشی و پارامترهای مربوط به آن برای تیرهای بتنی مسلح با میلگردهای FRP پرداختند [۵]. نمونه‌ای از تیر مدل شده توسط آنها در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج حاصل از کار تحقیقاتی آنها عبارتند از:

- افزایش میزان جابجایی برشی در تیر با میلگرد FRP.
- دقت بالای رابطه پیشنهادی برای پیش‌بینی رفتار برشی تیر همراه با FRP.

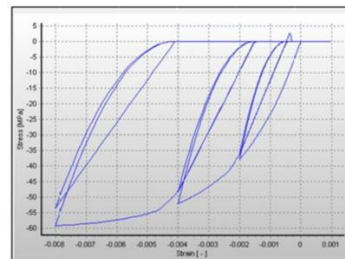




فولاد



FRP



بتن

شکل ۵- رفتار چرخه‌ای مصالح استفاده شده در ساختمان‌های نمونه.

جدول ۱ - جزئیات تیرها و ستون‌های ساختمان نمونه هشت طبقه.

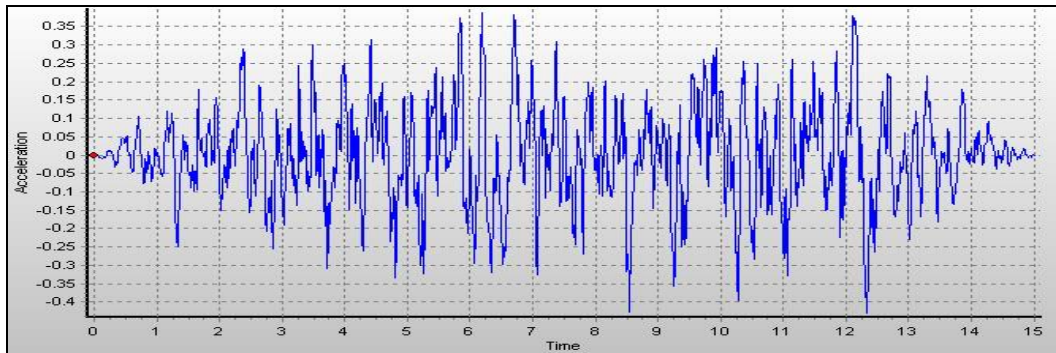
نوع ساختمان	توضیحات	شماره ستون	C <sub>۱</sub>	C <sub>۲</sub>	C <sub>۳</sub>	C <sub>۴</sub>
هشت طبقه	ابعاد ستون (mm) آرماتورهای گوشه سایر آرماتورها	شماره تیر	B <sub>۱</sub>	B <sub>۲</sub>		
هشت طبقه	ابعاد تیر (mm) آرماتورهای بالا آرماتورهای پایین					

جدول ۲ - مشخصات مصالح مصرفی در ساختمان‌های نمونه.

نوع ماده	مشخصات	مقدار
بتن	مقاومت فشاری (MPa)	۳۵
	مقاومت کششی (MPa)	۳/۵
	کرنش در هنگام بیشترین تنش (%)	۰/۰۲
فولاد	مقاومت کششی (MPa)	۴۰۰
	میزان سخت‌شدگی	۰/۱۵
	مدول الاستیسته (MPa)	۲۰۰۰۰۰
FRP	مدول الاستیسته (MPa)	۵۲/۲
	مقاومت کششی حداکثر (Mpa)	۷۵۰
	مقاومت فشاری حداکثر (Mpa)	۵۰۰

#### ۴. نتایج تحلیل

به منظور بررسی اثرات بکارگیری میلگردهای FRP در رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتنی مسلح، میزان حداکثر تغییر شکل بام، تغییر شکل نسبی طبقات و میزان برش پایه وارد شده به سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. تحلیل دینامیکی غیرخطی با شتابنگاشت مربوط به زلزله مصنوعی ارائه شده توسط Campos-costa و Pinto با حداکثر شتاب زمین (PGA) برابر ۱/۰۸ انجام گرفته که در شکل ۶ نمایش گردیده‌است و اعمال لرزش فقط در یک جهت می‌باشد [۶]. به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای این قاب‌ها در زمین لرزه‌های میدان نزدیک از زمین لرزه‌های ChiChi، Corralitos و Friulli استفاده گردید.



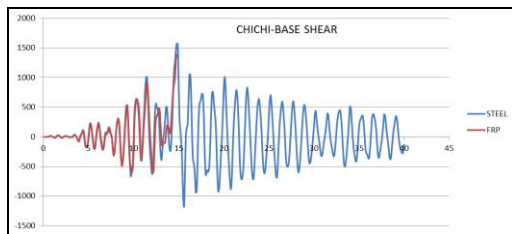
شکل ۶ - شتاب نگاشت مربوط به زلزله مصنوعی اراعه شده توسط Campos-costa و Pinto با دوره بازگشت ۲۰۰۰ ساله.

پس از اعمال نیروی زلزله به هردو قاب نمونه نتایج بدست آمده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی مقایسه گردیدند.

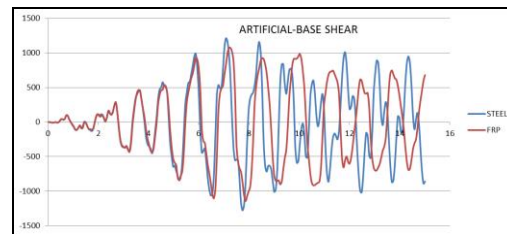
الف) برش پایه

همانطور که در شکل ۷ نشان داده می شود، میزان تغییرات برش پایه در طول مدت اعمال زلزله در سازه مسلح شده با میلگرد FRP معمولاً

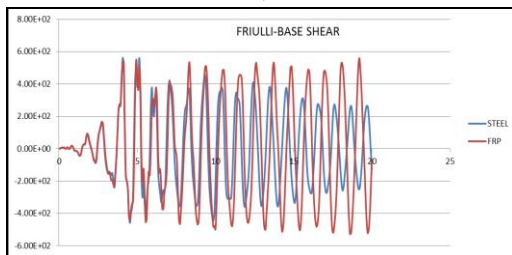
کمتر از سازه معمولی می باشد. بنابراین میزان انرژی اعمالی به سازه همراه با FRP کاهش یافته است.



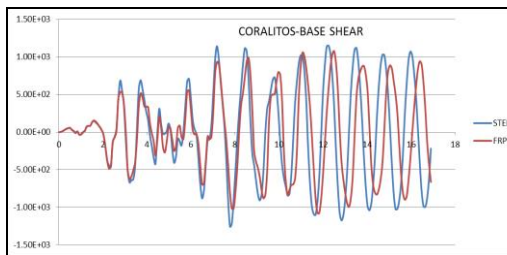
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

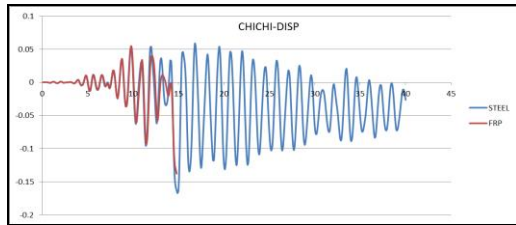
شکل ۷- نمودارهای مقدار برش پایه در طول زلزله مربوط به قاب های هشت طبقه بر حسب کیلو نیوتن در مقابل ثانیه، الف- زلزله مصنوعی، ب- زلزله ChiChi، ج- زلزله Corralitos، د- زلزله Friulli.

ب) جابجایی بام

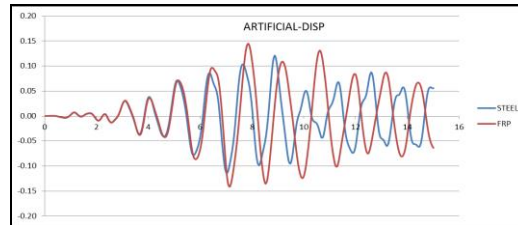
با توجه به شکل ۸، از آنجایی که سازه همراه با FRP شکل پذیری بیشتری نسبت به سازه های معمولی دارد اگرچه برش پایه کمتری نسبت به سازه معمولی جذب می کنند اما میزان حداکثر جابجایی بام نسبت به سازه معمولی افزایش پیدا نموده است. میزان حداکثر جابجایی بام برای سازه همراه با FRP برابر ۱۴ سانتی متر می باشد در حالی که این میزان برای سازه معمولی ۱۲ سانتی متر می باشد.

پ) جابجایی نسبی طبقات

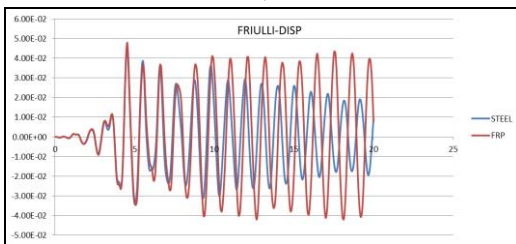
همان طور در شکل ۹ نشان داده می شود میزان جابجایی نسبی طبقات در تمامی تحلیل های لرزه ای انجام شده برای هردو قاب تقریباً برابر است و تنها در بعضی موارد میزان جابجایی نسبی طبقات آخر در قاب همراه با FRP بیشتر از قاب معمولی می باشد.



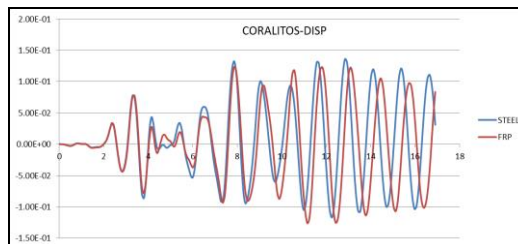
(ب)



(الف)

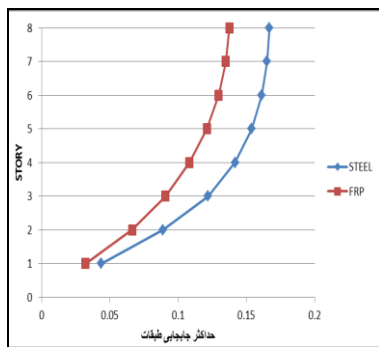


(د)

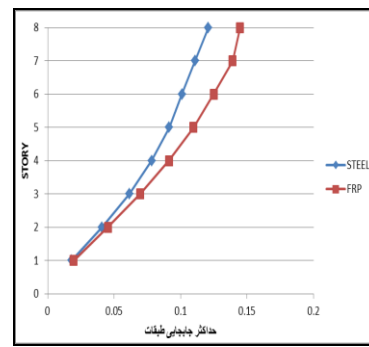


(ج)

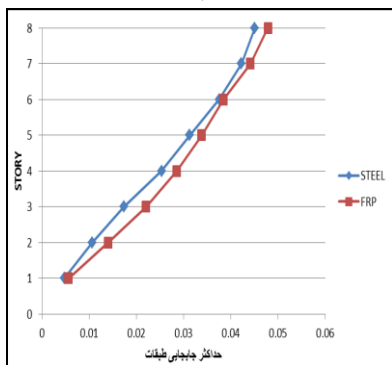
شکل ۸- نمودارهای جابجایی بام در طول زلزله مربوط به قاب‌های هشت طبقه بر حسب کیلو نیوتن در مقابل ثانیه، الف- زلزله مصنوعی، ب- زلزله ChiChi، ج- زلزله Corralitos، د- زلزله Friulli.



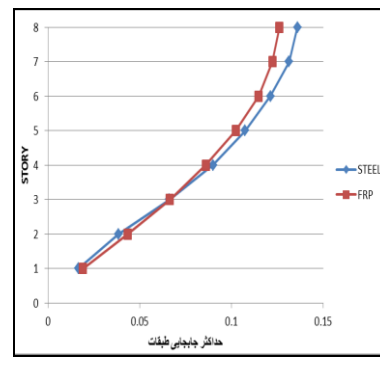
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۹- نمودار حداکثر جابجایی نسبی طبقات. الف) زلزله مصنوعی (ب) زلزله ChiChi (ج) زلزله Corralitos (د) زلزله Friulli.



## ۵. نتایج تحلیل

نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر این مطلب است که کاربرد FRP در قاب‌های بتن مسلح به عنوان میلگرد علاوه بر جلوگیری از پدیده خوردگی، به علت شکل‌پذیرتر کردن سازه باعث ایجاد عملکرد لرزه‌ای بیشتری در سازه‌ها می‌گردد. به طور خلاصه نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- برش پایه: کاربرد FRP باعث کاهش برش پایه در قاب می‌گردد، این کاهش ارتباط مستقیم با نوع زلزله دارد.
- جابجایی بام: کاربرد FRP باعث افزایش جابجایی بام در ساختمان نمونه هشت طبقه به میزان ۱۰ درصد می‌گردد.
- جابجایی نسبی طبقات: کاربرد FRP در قاب هشت طبقه باعث افزایش جابجایی نسبی طبقات از ۲ تا ۱۲ درصد در طبقات مختلف می‌گردد.
- میزان جذب انرژی: کاربرد FRP باعث کاهش انرژی جذب شده در سازه می‌گردد.
- میزان خسارت ناشی از زلزله: خسارت اجزاء سازه از جمله تیرها و ستون‌ها در سازه همراه با FRP در هردو سازه نمونه بسیار کمتر از سازه معمولی است به گونه‌ای که در هیچکدام از قاب‌های نمونه میلگردهای طولی دچار گسیختگی نمی‌شود و این امر عملیات ترمیم سازه را پس از زلزله بسیار سهل می‌نماید.

## ۶. پیشنهادها و چشم اندازهای آینده پژوهشی

به عنوان پیشنهاد برای کارهای تحقیقاتی آینده می‌توان به زمینه‌های پژوهشی زیر اشاره نمود.

- ✓ بررسی تاثیر میله‌های SMA به همراه FRP.
- ✓ بررسی میزان خسارت وارد شده به یک نمونه قاب بتنی همراه با میلگردهای FRP در آزمایشگاه و میزان قابلیت ترمیم پذیری سازه پس از اعمال زلزله.
- ✓ تعیین ضریب رفتار برای سازه‌های بتنی همراه با میگردهای FRP.
- ✓ استفاده از FRP در دیوارهای برشی بتنی به عنوان میلگرد.

## ۷. مراجع

1. Cai C, Wenjie Wu, Suren C, Voyiadjis G. (۲۰۰۳) "Applications of smart materials in structural engineering". Louisiana Transportation, Louisiana Transportation Research Center.
۲. Saiidi, M.S. and Wang, H. (۲۰۰۶) "Exploratory study of seismic response of concrete columns with shape memory alloys reinforcement". ACI Struct ; ۱۰۳: ۴۳۵-۴۴۲.
۳. Gravina, R. and Smith, S. (۲۰۰۹) "Flexural behaviour of indeterminate concrete beams reinforced with FRP bars". Engineering Structures ; ۳۰: ۲۳۷۰-۲۳۸۰.
۴. Muntasir Billah, Shahria Alam. (۲۰۱۲) . " Seismic performance of concrete columns reinforced with hybrid shape memory alloy (SMA) and fiber reinforced polymer (FRP) bars". Elsevier. Construction and Building Materials. ۲۸: ۷۳۰-۷۴۲.
۵. Denise Ferreira, Eva Oller, Cristina Barris, Lluís Torres. (۲۰۱۵) . " Shear strain influence in the service response of FRP reinforced concrete beams". Elsevier. Composite Structures. ۱۲۱: ۱۴۲-۱۵۳.
۶. Campos-Costa A, Pinto A. (۱۹۹۹) "European Seismic Hazard Scenarios – An Approach to the Definition of Input Motions for Testing and Reliability Assessment of Civil Engineering Structures". JRC Special publication ; X۹۹: ۱۹۰-۲۱۰.



نهمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۲۱ و ۲۲ اردیبهشت ماه ۱۳۹۵  
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران



۷. Ali Zaidi, Radhouane Masmoudi, Mohamed Bouhicha. (۲۰۱۳) . " Numerical analysis of thermal stress-deformation in concrete surrounding FRPbars in hot region". Elsevier. Construction and Building Materials. ۳۸: ۲۰۴-۲۱۳.
۸. Saadat S, Salichs J, Noori M, Hou Z, Davoodi H, Baron I, Suzuki Y, Masuda A. (۲۰۰۲) "An overview of vibration and seismic application of NiTi shape memory alloy". Elsevier, Smart Materials and Structures; ۱۲: ۶۷۱-۶۸۰.
۹. Ilker K, Cengiz D. (۲۰۱۳) . " Deflection of concrete structures reinforced with FRP bars". Elsevier. Composites. Part B ۴۴: ۳۷۵-۳۸۴.
۱۰. Domenico D, Pisano A, Fuschi P. (۲۰۱۴) . " A FE-based limit analysis approach for concrete elements reinforced with FRP bars". Elsevier. Composite Structures. ۱۰۷: ۵۹۴-۶۰۳.