



مقاوم سازی ستون های بتن مسلح تحت بارگذاری لرزه‌ای با استفاده از میلگردهای CFRP به روش NSM با افزایش لاغری

علی مهوری¹، مصطفی رضوانی شریف²

1- دانشجوی دکتری، گروه عمران- سازه، دانشگاه اصفهان، ایران

Ali_Mahvari@yahoo.com

2- استادیار، گروه عمران- سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران، ایران

barghi@kntu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، روشی جهت بهبود ظرفیت خمشی ستون های بتنی در معرض خمش و فشار با استفاده از میلگردهای FRP که اصطلاحاً NSM نامیده می شود، مورد مطالعه قرار گرفته است. این روش شامل قرار دادن میلگردهای FRP در داخل شیارهای ایجاد شده بر روی سطح ستون بتن مسلح می باشد. تحقیقات زیادی در خصوص تقویت خمشی و برشی تیرهای بتنی با استفاده از این اجزا انجام شده است ولی در خصوص تقویت ستونهای بتنی تحقیقات چندانی صورت نگرفته و سوالات زیادی مطرح است. یکی از مهمترین پارامترها در استفاده از میلگردهای NSM در تقویت سازهها، میزان لاغری ستون های بتن آرمه می باشد. در این تحقیق اثر میلگردهای CFRP در افزایش ظرفیت باربری ستونهای بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار دو نمونه ستون بتنی با مقطع $20 \times 20 \text{ cm}^2$ و ارتفاع یک متر و 1.5 متر با نسبت میلگردهای $0/21\%$ مقطع ستون، در نرم افزار آباکوس تحت بارگذاری محوری و جانبی قرار گرفته است که تأثیر ارتفاع ستون در میزان افزایش ظرفیت باربری ستون بررسی گردیده است.

کلمات کلیدی: NSM، FRP، ستون بتن مسلح، لاغری

1. مقدمه

تا اواخر قرن بیستم بارگذاری لرزه ای عمدتاً در طراحی ساختمان های بتن مسلح در نظر گرفته نمی شد یا زمانی که در نظر گرفته می شد، ممکن بود نتایج جزئیات مقاوم سازی با استفاده از استانداردهای آیین نامه های سازه ای رضایت بخش نباشد. به همین دلیل، می تواند آسیبهای قابل توجهی در ساختمان های قدیمی حتی با وقوع بارهای لرزه ای متوسط رخ دهد، در اغلب موارد، ستون ها نشان دهنده بیشترین عناصر آسیب پذیرند، از آنجا که پس از شکست خود منجر به فرو ریختن سازه می شوند [1].

تا اوایل دهه 1990 استفاده از جکت بتنی و نصب صفحات فولادی که دوغاب سیمان و مواد منبسط شونده در آن تزریق می شد، دو روش رایج و متداول برای تقویت ستونهای بتنی ضعیف بود. روکش فولادی نسبت به جکت بتنی عملکرد بهتری از خود نشان می دهد، چون جکت کردن با استفاده از بتن مسلح، باعث افزایش سطح مقطع و وزن سازه می گردد. اجرای هر دو روش بسیار دشوار بوده و با مشکلات زیادی همراه است، به همین دلیل در



سالهای اخیر مواد کامپوزیت (FRP) بطور گسترده ای برای تقویت ستونهای بتنی مورد استفاده قرار گرفته اند [2]. مزایای استفاده از این مواد کامپوزیت نسبت بالای مقاومت به وزن و سختی به وزن، و همچنین مقاومت بالا در برابر اقدامات زیست محیطی، سبکی، دوام و سهولت اجرا می باشد.

2. روش « نصب در نزدیک سطح (NSM) »

ورقه های FRP عموماً بر روی سطح اعضای سازه ای که لازم است مقاوم شوند، به کار می روند. این روش با عنوان « مسلح شده با اتصال خارجی (EBR) » شناخته می شود. تحقیقاتی که تاکنون انجام گرفته است، بیانگر آن است که در این روش، به علت جداسدگی زود هنگام، استفاده از مقاومت کامل این مصالح امکان پذیر نمی باشد [3].

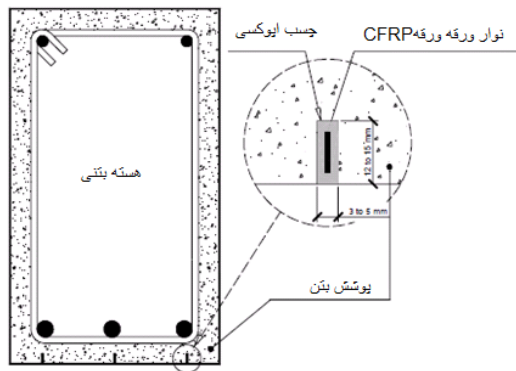
از آنجایی که در روش EBR مصالح تقویت کننده در سطوح خارجی نمایان هستند، عملکرد آنها می تواند تحت تأثیر اثرات منفی سیکل های یخ زدن و ذوب شدن قرار بگیرد. برای غلبه بر این ضعف ها تلاش های متعددی صورت گرفته است که یکی از آنها روش « نصب نزدیک سطح (NSM) » می باشد. مبنای روش NSM قرار دادن میله یا تسمه های FRP در شیارهای ایجاد شده در سطح بتن می باشد.

در روشهای قدیمی چسباندن ورقه ها روی سطح، لازم است برای اطمینان از چسبیدن مناسب بتن و کامپوزیت، قبل از به کار بردن چسب، لایه ی خارجی بتن برداشته شده و سنگدانه ها نمایان شوند. در اکثر موارد این کار به کمک ماسه پاشی صورت می گیرد که عملیات پیچیده ای به شمار نمی رود. به عنوان مثال اگر سطح بتن دارای اشکالات اجرایی باشد، یا ماسه پاشی نتواند تأثیر قابل ملاحظه ای ایجاد کند، باید از روش ساییدن سطح بتن یا روشهای آماده سازی سطحی قوی تری استفاده کرد که در هر صورت پرهزینه و زمان بر خواهد بود. اما قراردادن مصالح مقاوم کننده در شیارهایی که در بتن تعبیه شده اند، نیازی به هیچ گونه عملیات آماده سازی سطح به جز تمیز کردن شیارها با فشار متوسط آب یا هوا ندارد. همچنین با استفاده از تیغه اره های مناسب می توان شیارهایی کاملاً مستقیم، حتی در سطوح ناهموار ایجاد کرد. این شکاف قبلاً با چسب اپوکسی پر شده است. معمولاً نوار ورقه ورقه شده CFRP ضخامت حدود 1/4 میلیمتر و عرض 10 میلیمتر دارد؛ در حالی که عرض و عمق شکاف به ترتیب بین 3 تا 5 میلیمتر و 12 تا 15 میلیمتر متغیر است.

اجرای روش NSM شامل مراحل زیر می باشد:

ابتدا شیار در راستای مورد نظر در سطح بتن ایجاد می شود. اندازه پایین شیار باید طوری باشد که در اطراف مسلح کننده ها فضای کافی برای ایجاد چسبندگی مناسب وجود داشته باشد. سپس شیار تا نیمه با چسب اپوکسی پر شده و مصالح مقاوم کننده درون آن قرار گرفته و به آهستگی فشار داده می شوند. این فشار باعث نفوذ چسب به اطراف مصالح مقاوم کننده و گوشه های شیار می شود. سپس شیار با چسب بیشتری پر شده و سطح با برداشتن مواد اضافی هم سطح می گردد. این مرحله نیاز به مراقبتهای خاص در جهت اطمینان که شکاف به طور کامل با چسب اپوکسی پر شده است، دارد؛ در غیر این صورت امکان تشکیل حفره هست. زمان بهبود با چسب اپوکسی،

نشان داده شده توسط تولید کننده، باید محترم شمرده شود و قبل از آن انتظار می رود به طور کامل در دسترس باشد [4].



شکل 1: تکنیک مورد استفاده برای افزایش ظرفیت خمشی تیر با استفاده از روش نصب نزدیک سطح با مصالح CFRP [4]

برای کاربرد به عنوان مسلح کننده NSM، FRP دارای مزیت هایی نسبت به فولاد می باشد که شامل مقاومت بهتر در برابر خوردگی، راحتی و سرعت اجرای بالاتر به خاطر سبک وزن بودن و بهینه بودن عملیات اجرای شیار می باشند. به جهت مقاومت کششی بالای این مصالح می توان از میله های با قطر کوچک برای نیروی کششی خواسته شده استفاده کرد که این امر کاهش اندازه ی شیارها را در پی دارد [5].

3. مروری بر تحقیقات انجام شده

Zilch و Blaschko چسبندگی NSM کربن به بلوک بتنی را مورد آزمایش قرار دادند. در این آزمایش مقایسه ای بین عملکرد NSM و الیاف FRP انجام گرفت. نتیجه آزمایش نشان داد که چسبندگی NSM به بتن نسبت به الیاف FRP بیشتر است [6].

Rizkalla و Gentile از NSM جهت تقویت عرشه یک پل چوبی استفاده نمودند. این پل که در سال 1960 و در کانادا ساخته شده بود پس از تقویت ضوابط آیین نامه AASHTO را برآورده نمود [7].

Nanni و De Lorenzis تحقیقاتی بر روی عملکرد تیرهای بتنی تقویت شده با NSM کربنی و شیشه ای انجام دادند. تیرهای تقویت شده بین 26 تا 44 درصد افزایش ظرفیت خمشی را نشان دادند. همچنین ظرفیت برشی نمونه های تقویت شده در برش حدود 106 درصد افزایش یافت [8].

Nordin و همکاران از میلگردهای NSM بصورت پیش تنیده جهت تقویت تیرهای بتنی استفاده نمودند. نتیجه آزمایشات نشان داد که در این حالت بدون تغییر در حالت خرابی نهایی تیر، ظرفیت خمشی تیر افزایش یافته و تیر دیر ترک می خورد [9].

Nanni و De Lorenzis به بررسی مقاومت چسبندگی NSM به بتن پرداختند. نتیجه آزمایش نشان داد که میزان تأثیر NSM در تقویت تیرهای بتنی، بستگی به مشخصات و نحوه چسبندگی NSM به بتن دارد. در حین این آزمایش سه حالت خرابی توسط محققین گزارش شد که شامل بیرون آمدن NSM از داخل بتن، ترک خوردگی بتن در اطراف شیار محل نصب NSM و شکست چسبندگی اتصال NSM به بتن بوده است [10].

Teng و De Lorenzis به بررسی پارامترهای مؤثر در بهبود چسبندگی NSM به بتن پرداختند. این محققین پیشنهاد کردند که حداقل نسبت طول به عمق شیار برای کاشت NSM باید برابر 1/5 باشد [11].

Rizkalla و Hassan امکان استفاده از میلگرد NSM در تقویت خمشی تیرهای بتنی را بررسی نمودند. در این تحقیق نشان داده شده که با افزایش طول مهاری NSM در داخل بتن، می توان از حداکثر ظرفیت NSM استفاده نمود [12].

Aidoo و همکاران یک تیر عرضی پل را با NSM تقویت نموده و تحت بارگذاری قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش حاکی از افزایش ظرفیت خمشی تیر تحت بارهای وارده بوده است [13].

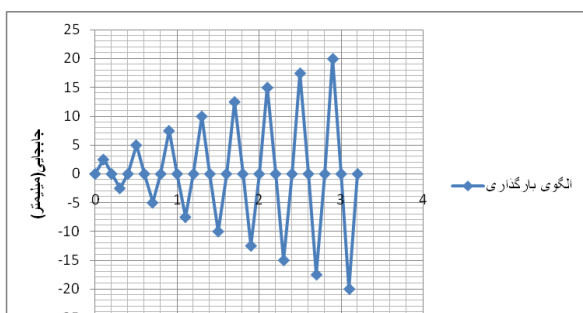
Kishi و همکاران به مقایسه رفتار خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با میلگرد NSM از جنس آرامید و الیاف CFRP پرداختند که نتایج آزمایش نشان از افزایش ظرفیت خمشی تیر با افزایش طول مهاری میلگرد NSM داشت [14].

Teng و همکاران تحقیقات زیادی بر روی ظرفیت خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با میلگرد NSM انجام دادند. نتایج آزمایش نشان داد که در صورت استفاده از NSM ظرفیت و سختی خمشی تیر افزایش می یابد و حالت خرابی تیر به صورت خرابی برشی می باشد [15].

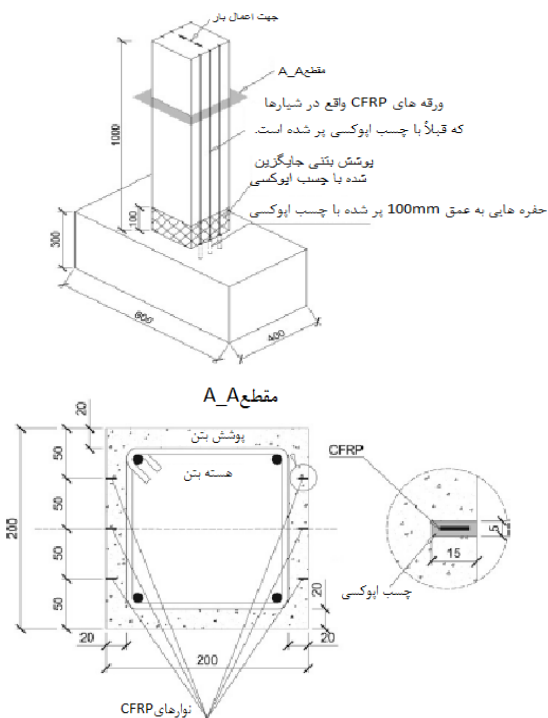
4. مقایسه مدل آزمایشگاهی و مدلسازی عددی

در این تحقیق، اثر روش NSM در مقاومت خمشی ستون های بتن مسلح در معرض بارگذاری چرخه ای و بار محوری فشاری ثابت ارزیابی شد. در بخش های زیر تحقیق آزمایشگاهی و عددی توصیف می شود و نتایج اصلی ارائه شده و مورد بحث قرار می گیرد.

برای صحت سنجی، یک نمونه ستون بتنی توسط چهار میلگرد فولادی و میلگردهای NSM مطابق شکل 3 توسط Barros و همکاران تحت بار چرخه ای جانبی و بار محوری فشاری در حدود 150 کیلو نیوتن متناظر با نسبت بار محوری 0/22 قرار می گیرد. تاریخچه جابجایی شامل هشت سیکل بارگذاری- باربرداری کامل: 2.5 ± میلیمتر، 5.0 ± میلیمتر، 7.5 ± میلیمتر، 10.0 ± میلیمتر، 12.5 ± میلیمتر، 15 ± میلیمتر، 17.5 ± میلیمتر، 20 ± میلیمتر، با نرخ جابجایی 150 میکرومتر بر ثانیه است.



شکل 2: الگوی بارگذاری



شکل 3: روش تقویت خمشی برای ستون های بتن آرمه (ابعاد بر حسب میلیمتر)

5. خصوصیات مواد

1.5. بتن

رفتار فشاری تک محوره بتن با انجام آزمایش های فشاری با استوانه ای به قطر 150 میلیمتر و ارتفاع 300 میلیمتر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده در آزمایش های فشاری، مقاومت فشاری متوسط در 28 روز را 16/7 مگاپاسکال، با انحراف استاندارد 3/31 مگا پاسکال نشان داد. مقاومت کششی متوسط 2/62

مگاپاسکال، با انحراف استاندارد معادل 0/48 مگاپاسکال، و انرژی شکست متوسط $0/08 \text{ N mm/mm}^2$ در 28 روز ثبت شد.

2.5. فولاد

تنش تسلیم (f_{sy})، تنش نهایی (f_{su})، و مدول الاستیسیته (E_s) میلگرد $\Phi 6$ برای استفاده جهت خاموت و میلگرد $\Phi 10$ برای استفاده جهت میلگرد طولی به صورت جدول 1 است.

جدول 1: جزئیات آرماتور های استفاده شده در آنالیز عددی

آرماتور	$E_s \left(\frac{N}{mm^2} \right)$	$f_{sy} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$	ϵ_{su}	$f_{su} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$
$\Phi 6$	203700	352.4	0.03	352.8
$\Phi 10$	216900	323.3	0.03	456.5

3.5. نوار CFRP ورقه ورقه

نوار CFRP که به صورت رول استفاده شد، ضخامت $1/45 \pm 0/005$ میلیمتر و عرض $9/59 \pm 0/009$ میلیمتر داشت. مدول الاستیسیته 159000 Mpa و مقاومت کششی 1741 Mpa حاصل از آزمایشات برای این نوارها بدست آمد.

4.5. چسب اپوکسی

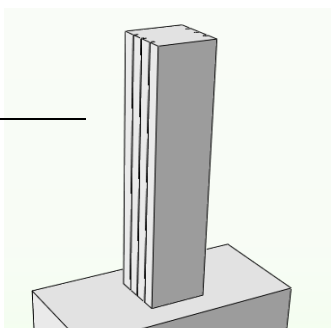
چسبی که برای اتصال نوارهای CFRP به بتن مورد استفاده قرار گرفت، از دو بخش اپوکسی و یک بخش سخت شدگی تشکیل شد. با توجه به توصیه های ISO527-2، مدول الاستیسیته 5090 ± 590 مگاپاسکال به دست آمد.

6. خصوصیات المان های معرفی شده در نرم افزار آباکوس

1.6. خصوصیات المان معرفی شده برای بتن

برای مدل سازی بتن با توجه به سه بعدی بودن مدل سازی ستون در این پروژه از المان سه بعدی هشت گره ای $C3D8^1$ استفاده شده است.

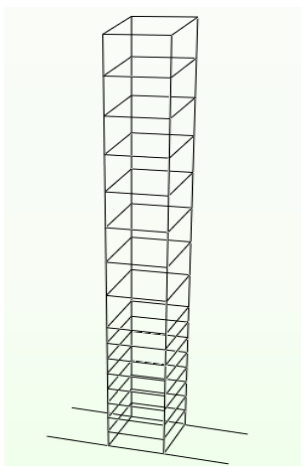
¹ node linear brick



شکل 4: مدل‌سازی بتن در Abaqus

2.6. خصوصیات المان معرفی شده برای رفتار آرماتورها

برای معرفی آرماتورهای طولی و خاموت‌ها از المان‌های خرپایی¹ استفاده می‌شود. در اینجا برای مدل‌سازی آرماتورهای طولی و عرضی از المان خرپایی T3D2 که یک المان سه بعدی دو گرهی با تغییر شکل‌های خطی است استفاده می‌شود که این المان‌ها در المان‌های بتن خوابانده² شده و رفتاری هماهنگ با آنها خواهند داشت.



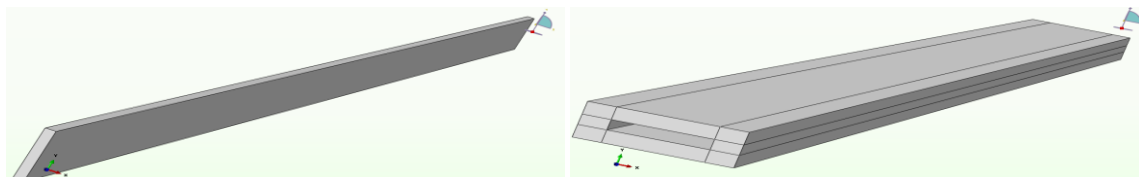
شکل 5: آرماتورهای طولی و خاموت‌های مدل‌سازی شده در Abaqus

3.6. خصوصیات ماده معرفی شده برای رفتار آرماتورهای FRP

¹ Truss elements

² Embedded

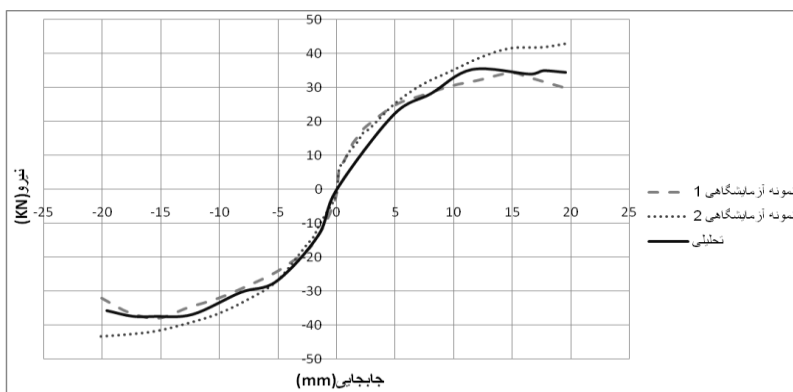
برای آرماتورهای FRP رفتار الاستیک خطی در نظر گرفته شده است و از آنجا که میلگردهای FRP با استفاده از المان خرابایی مدل شده و تنها در یک جهت عمل می کنند، مدل ماده الاستیک خطی از نوع ایزوتروپیک فرض شده است.



شکل 6: اپوکسی و FRP مدل سازی شده در Abaqus

7. صحت سنجی نتایج

شکل 7 صحت سنجی مدل آزمایشگاهی با مدل سازی عددی نشان می دهد. در شکل زیر پوش حلقه های هیستریزیس به یکدیگر متصل شده است و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

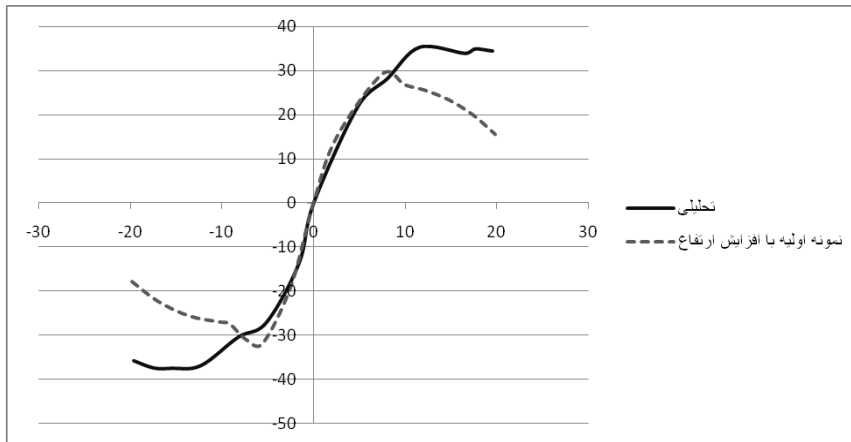


شکل 7: پوش نمودار بار-جابجایی برای تمام چرخه های بارگذاری برای نمونه مقاوم شده با CFRP

• مشاهده می شود که نتایج حاصل از نرم افزار آباکوس مطابقت خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد. نمونه مدل سازی شده در آباکوس بین دو نمونه آزمایشگاهی واقع شده است. ظرفیت باربری در ستون های مقاوم شده با میلگردهای FRP نسبت به ستون مقاوم نشده، 62٪ افزایش یافته است. افت مقاومت در نمونه مقاوم شده با میلگردهای FRP نیز 2/5٪ بوده است. ظرفیت جذب انرژی ستون های مسلح آزمایش شده با این روش افزایش چندانی (حدود 5٪) نمی یابد، زیرا محصور شدگی کافی برای بتن ایجاد نمی کند.

8. افزایش ارتفاع ستون

در این قسمت از ستون با مقطع $200 \times 200 \text{ mm}^2$ با ارتفاع 1500mm استفاده شده است که در مقایسه با ستون قبل 1.5 برابر شده است.
شکل 8 پوش منحنی هیستریزیس نیرو- جابجایی را برای ستون ذکر شده، مقاوم شده با CFRP و افزایش ارتفاع نشان می دهد.



شکل 8: پوش نمودار بار- جابجایی برای تمام چرخه های بارگذاری با افزایش ارتفاع

با توجه به شکل 8 مقدار ظرفیت باربری با افزایش ارتفاع 28٪ کاهش یافته است.

9. نتیجه گیری

- استفاده از میلگردهای تقویتی NSM باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی و ظرفیت خمشی ستون های بتنی می گردد.
- ظرفیت جذب انرژی ستون های مسلح آزمایش شده با این روش افزایش چندانی (حدود 5٪) نمی یابد، زیرا محصور شدگی کافی برای بتن ایجاد نمی کند.
- افزایش ارتفاع باعث کاهش ظرفیت باربری می شود.
- با افزایش ارتفاع افت مقاومت افزایش می یابد.

مراجع

- [1] Joaquim A.O. Barros, Rajendra K. Varma, Jose M. Sena-Cruz, Alvaro F.M. Azevedo " Near surface mounted CFRP strips for the flexural strengthening of RC columns" Engineering Structures, 2008.

- [2] H. Saadetmanesh, M.R. Ehsani, L.Jin " Seismic strengthening of circular bridge pier models with fiber composites" , ACI Structural journal, Vol. 93, No.6, pp.639-647, 1996.
- [3] ACI Committee 440 "Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures".
- [4] مهوری، علی و رضوان شریف، مصطفی " بررسی عملکرد لرزه ای ستون های بتن آرمه تقویت شده با FRP با روش NSM "، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، 1392
- [5] L.Delorenzis, J.G.Teng "Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures"
- [6] M. Blaschko, K. Zilch "Rehabilitation of Concrete with Strips Glued into Slits", Proceeding of the 12th International Conference on Composite Materials ICCM 12, Paris, France, July 5-9, 1999.
- [7] C. Gentile, S. Rizkalla "Flexural Strengthening of Timber Beams Using FRP", Technical Progress Report, ISIS Canada, University of Manitoba, Winnipeg, 1999.
- [8] L. De Lorenzis A. Nanni "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Reinforced Polymer Rods", ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 1, pp. 60-68, 2001.
- [9] H. nordin, B. Taljsten, A. Carolin "Concrete Beams Strengthened with Prestressed Near Surface Mounted Reinforcement", Proceeding of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2001), Hong Kong, CHINA, pp. 1067-1075, 2000.
- [10] L. De Lorenzis, A. Nanni "Bond between Near-Surface Mounted FRP Rods and Concrete in Structural strengthening", ACI Structural Journal, Vol 99. No. 2, pp. 123-132. 2002.
- [11] L. De Lorenzis, J.G Teng " Near-Surface Mounted FRP Reinforcement: An Emerging Technique for Strengthening Structures", Composites Part B: Engineering, Vol. 38, No. 2, pp. 119-143, 2007.
- [12] T. Hassan, S. Rizkalla "Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips", Journal of Composites for Construction, vol. 7, No. 3, pp. 248-257, 2003.
- [13] J. Aidoo, K.A. Harries, M.F. Petrou "Full-Scale Experimental Investigation of Repair of Bridge Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 350-358, 2006.
- [14] N. Kishi, H. Mikami, Y. Kurihashi, S. Sawada "Flexural Behavior of RC Beams Reinforced with NSM AFRP Rods", Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures, BBFS 2005, pp. 337-342, 2005.
- [15] W.C. Teng, R.V. Balendran, A. Nadeem, H.Y. Leung "Flexural Strengthening of Reinforced Lightweight Polystyrene Aggregate Concrete Beams with Near-Surface Mounted GFRP Bars", Building and Environment, Vol. 41, No. 10, pp. 1381-1393, 2006.