



بررسی رفتار تیرهای عمیق تقویت شده با ورق FRP به روش NSM

مریم تقی زاده^۱، منصور قلعه نوی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

خلاصه

کاهش تأثیرگذاری پوشش محافظ در سازه های بتن مسلح، برگرفته از تغییراتی است که در ساختار بتن و شرایط محیطی آن صورت می گیرد [۱]؛ اهمیت نقش تیر نیز به عنوان یک عضو اصلی و پرکاربرد در سازه، شناخت راهکارهای مناسب را برای بهبود کارایی آن، ملزم می کند. در این پژوهش برای دستیابی به این هدف، تأثیر سه نوع ورق AFRP، CFRP و GFRP به روش NSM و در جهت عمود بر ترکها که بهترین شرایط را ایجاد می کند، بر روی تیرهای عمیق بتن مسلح بررسی می شود. بدین منظور جهت الگوسازی و تجزیه ی آنها از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS استفاده شده است. نتایج حاکی از افزایش مقاومت و سختی تیرهای عمیق تقویت شده نسبت به بدون تقویت می باشد؛ این میزان رشد در مقاومت و سختی، برای AFRP، GFRP و CFRP به ترتیب: ۰/۵۷٪، ۱/۴۳٪، ۲/۴۸٪ و ۳/۱۸٪، ۵/۱۶٪، ۱۱/۶۷٪ مشاهده می شود.

کلمات کلیدی: تیر عمیق بتن مسلح، روش اجزاء محدود، روش نصب در نزدیک سطح، FRP – NSM.

۱. مقدمه

در سازه های بتن مسلح، تیرها در دو نوع تیرهای معمولی و تیرهای عمیق تعریف می شوند؛ آنها در هندسه، رفتار و کاربرد تفاوت اساسی با هم دارند. ارتفاع تیرهای عمیق نسبت به تیرهای معمولی بیشتر است به همین جهت تیرهای عمیق را برمبنای نسبت دهانه برشی که همان نسبت دهانه به عمق تیر (L/D)[†] است، مورد سنجش قرار می دهند. تیرهای معمولی دارای رفتار خمشی می باشند این درحالی است که در تیرهای عمیق به دلیل داشتن ارتفاع بیشتر، رفتار برشی حاکم است. کاربرد تیرهای عمیق در سیلوهای بتنی، دیوارهای برشی، سازه های بلند، دال های تا شده، سازه های دریایی، مخازن و غیره می باشد. با توجه به اینکه تیر یک عضو اصلی در سازه به شمار می رود، شناخت عواملی که منجر به تضعیف کارایی آن می شود و یافتن راهکارهای مناسب برای مقاوم سازی آن، اهمیت زیادی دارد. از جمله عوامل مخربی که می توان به آنها اشاره کرد: اجرای نادرست، تغییرات در سازه مانند ایجاد بازشو، اشتباه محاسباتی، مشکلات ناشی از عمر بالای سازه، اثرات محیطی مانند خوردگی میلگرد و غیره می باشد [۲]. راهکارهای زیادی برای تقویت سازه های بتنی ارائه شده

* Corresponding author: منصور قلعه نوی

Email: ghalehnovi@um.ac.ir

† Length to Depth



است؛ مانند: سبک سازی سازه، استفاده از روش پیش تنیدگی خارجی، افزایش ابعاد بتن، چسباندن ورق های فولادی به عضو بتنی و غیره [۳]، اما نقش آفرینی الیاف کامپوزیتی FRP*، تحولی بزرگ را در مقاوم سازی اعضاء بتن آرمه ایجاد کرده است. از خواص مثبت FRP نسبت به مصالح دیگر، می توان به مقاومت بالا نسبت به وزن کم، تنوع در ابعاد و هندسه، سادگی در اجرا، مقاومت کششی بالا، عایق مغناطیسی و الکتریکی، بهینه سازی هزینه در مجموع کل مخارج صرف شده در سازه و مقاومت در برابر خوردگی اشاره کرد. این الیاف برای ترمیم انواع سازه های بلند مانند: سطوح دال و تیر و ستون، فونداسیون ها، دیوارهای باربر، پل ها، مخازن آب، برج های خنک کننده و غیره کاربرد فراوانی دارد [۴]. از جمله نقاط ضعف این الیاف نیز می توان به احتمال جداشدگی FRP از عضو و مقاومت کم در برابر آتش سوزی و اشعه ی ماوراء بنفش اشاره کرد [۵].

از آن جایی که نحوه ی اجرا و اعمال FRP بر رفتار اعضاء بتن مسلح اثر می گذارد، روش نصب در نزدیک سطح (NSM)†، به عنوان روشی بهبوددهنده در رفتار تیر به شمار می رود. در این پژوهش به بررسی تأثیر AFRP‡، GFRP§ و CFRP** بر روی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح به روش NSM و با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود†† ABAQUS پرداخته می شود. در ادامه به برخی از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه اشاره می گردد.

شاراکی‡‡ و همکاران اثر تعامل بین نوارهای GFRP نصب شده به روش NSM و میلگردهای داخلی را بر رفتار ساختاری تیرهای بتن مسلح از لحاظ موقعیت، ترتیب و مساحت نوارهای GFRP، به صورت تجربی بررسی کرده اند. برای این کار، شش تیر تقویت شده و یک تیر جهت بازبینی را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان می دهد تنش سطحی در تیرهای با GFRP نصب شده در کنار هم، نسبت به تیرهای با تقویت جدا از هم، کمتر است. این موضوع در نوارهایی که نزدیک به میلگردها قرار دارند، شفاف تر دیده می شود. ظرفیت باربری در تیرهای با شیار عمیق نسبت به کم عمق آن، بیشتر است. بار نهایی تیری که با یک نوار NSM در شیار عمیق قرار دارد، تقریباً ۱/۵ برابر نوار NSM در شیار کم عمق است که این نسبت با افزایش مساحت نوارها، کاهش می یابد [۶].

آل عیسی وی §§ و کاموننا *** رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت شده با میله های فولادی را به روش NSM بررسی کردند. بدین منظور ۱۳ تیر عمیق بتن مسلح ساخته و براساس نسبت دهانه برشی، به سه دسته تقسیم شدند که در هر دسته یک تیر تقویت نشده برای بازبینی می باشد و سایر نمونه ها به روش NSM تقویت شدند. نمونه ها به لحاظ تعداد میله ها، فاصله ی میله ها و زاویه ی قرارگیری آن ها با هم تفاوت دارند. تیرها دارای تکیه گاه ساده و تحت بارگذاری دو نقطه ای قرار گرفتند. نتایج حاکی از رشد ۷/۳۵ تا ۲۰/۶ درصدی ظرفیت نهایی می باشد. کاهش نسبت دهانه برشی، با انعطاف پذیری روبه رو است و تقویت تیرها به صورت مورب نسبت به حالت قائم، از افزایش کمتری در ظرفیت باربری برخوردار است. با افزایش تعداد میله ها، افزایش ظرفیت باربری و با کاهش فاصله ی میله ها و استفاده از قطر بزرگتر آن ها به صورت شیب دار، افزایش در سختی و انعطاف پذیری و کاهش عرض و تعداد ترک ها را به همراه دارد. استفاده از روش NSM شکست برشی را به شکست خمشی تبدیل می کند [۷].

* Fiber Reinforced Polymer

† Near Surface Mounted

‡ Aramid Fiber Reinforced Polymer

§ Glass Fiber Reinforced Polymer

** Carbon Fiber Reinforced Polymer

†† Finite Element Method

‡‡ Sharaky

§§ Al-Issawi

*** Kamonna



آلبیداه* و همکاران به بررسی تجربی و تجزیه‌ای تقویت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح با کمبود برش، پرداخته‌اند. بدین جهت، شش نمونه تیر عمیق بتن مسلح در دو گروه سه‌تایی به صورتی که گروه اول با بتن بدون الیاف و گروه دوم با بتن دارای نیمی از الیاف فولادی و نیمی بدون الیاف، ریخته‌گری شد. نصفی از تیرها از آرماتور فولادی و نصف دیگر توسط طرح‌های مختلف مقاوم‌سازی، برای تقویت برشی استفاده شده‌است. تقویت برشی در گروه اول با استفاده از نوارهای U شکل CFRP، به صورت NSM و نوارهای افقی CFRP به صورت EB[†] صورت گرفته است؛ گروه دوم با استفاده از نوارهای U شکل CFRP و نوارهای افقی CFRP به صورت توری و هردو به روش EB، می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که تقویت برشی در تیرهای با توری FRP-EB بهتر از تقویت با فولاد بوده است. افزودن یک درصد الیاف فولادی در بتن، مقاومت برشی را نسبت به بتن معمولی بیشتر می‌کند [۸].

بارریس[‡] و همکاران رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با نوارهای CFRP-NSM را به صورت تجربی بررسی کرده‌اند. برای این کار، هشت تیر بتن مسلح ساخته شده است که هفت تیر از آن‌ها با میله های GFRP تقویت شده‌اند و یک تیر دارای آرماتور فولادی، با نوار CFRP-NSM مقاوم‌سازی شده است. تمامی نمونه‌ها تا آخرین مرحله‌ی بارگذاری تقویت نشده‌اند اما پس از آن، شش نمونه با نوار CFRP و با استفاده از تکنیک NSM مقاوم‌سازی شد و دو تیر برای بازبینی به صورت تقویت نشده باقی ماند. نتایج تغییر در حالت تخریب را به دلیل مقاوم‌سازی تیرهای تقویت شده با میله‌های GFRP با استفاده از نوارهای CFRP-NSM نشان می‌دهد. در تیرهایی که با میله‌های فولادی و مقاوم‌سازی شده با CFRP-NSM هستند، تخریب در اثر خرد شدن بتن نیست و به دلیل جداسدگی نوار CFRP می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی افزایش ظرفیت خمشی در اثر افزایش تقویت‌کننده‌ی CFRP است [۹].

اکبرزاده‌ی بنگر و همکاران رفتار شش تیر عمیق بتن مسلح را که توسط ورق‌های CFRP برای برش، با دو روش EB و NSM مقاوم‌سازی شده‌اند، بررسی کردند. بدین منظور تیرها به دو گروه تقسیم شدند که در هر گروه یک تیر بدون CFRP جهت بازبینی، یک تیر با CFRP-EB و یک تیر با CFRP-NSM قرار گرفت. تیرها توسط دو بار متمرکز آزمایش شدند. نتایج نشان می‌دهد در تیرهای عمیق با CFRP-NSM، ظرفیت باربری ۱۸٪ و تغییر شکل نهایی ۱۶٪ نسبت به تیر عمیق بدون CFRP افزایش داشته است. تیرهای عمیق با CFRP-NSM نسبت به CFRP-EB، در حداکثر باربری و تغییر شکل نهایی به ترتیب ۶٪ و ۱۵٪ رشد کرده‌اند. کرنش نهایی فشاری بتن در ناحیه‌ی خمش ثابت، برای تیرهای عمیق با CFRP-NSM نسبت به CFRP-EB، ۵۰٪ بیشتر می‌باشد [۱۰].

۲. مبانی نظری

۱-۲ شناخت ویژگی‌های الیاف FRP

الیاف FRP در سه نوع الیاف آرامید (AFRP) شیشه (GFRP) و کربن (CFRP) کاربرد دارند. در ادامه به صورت اجمالی به ویژگی‌های آن‌ها پرداخته می‌شود [۱۱]:

- (۱) AFRP: کاربرد این الیاف، به علت مقاومت بالا در شکست، در ساخت کلاه ایمنی و ضدگلوله می‌باشد. اما به خاطر حساسیت به رطوبت، حرارت بالا و اشعه‌ی ماورای بنفش، در عمران نقش زیادی ندارند.
- (۲) GFRP: این الیاف از دو نوع شیشه‌ی تجاری ساخته شده است؛ شامل: E-Glass که در صنعت ساختمان‌سازی و S-Glass که دارای عایق الکتریکی خوبی است و در صنعت هوافضا کاربرد دارند.

* Albidah

† External Bond

‡ Barris

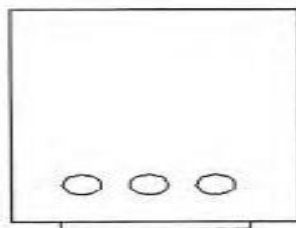


۳) CFRP: این الیاف به نسبت الیاف GFRP و AFRP، سختی بیشتری دارد. همچنین دارای مقاومت کششی بسیار بالا، مدول ارتجاعی بالا نسبت به وزن کم، مقاومت بالا در برابر بارهای ضربه‌ای و قیمت بالا می‌باشد.

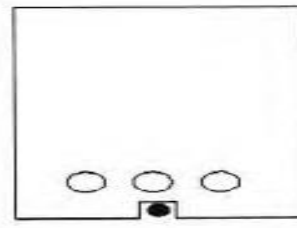
۲-۲ روش نصب در نزدیک سطح (NSM)

۲-۲-۱ مقدمه

مقاوم‌سازی اعضاء بتن مسلح عموماً با چسباندن الیاف FRP بر روی سطح آن‌ها صورت می‌گیرد؛ این روش همان روش نصب بیرونی (EB) نام دارد اما در این روش نمی‌توان از تمام ظرفیت کششی FRP جهت تقویت اعضاء، استفاده نمود. این ضعف به دلیل جداشدگی زودهنگام صورت می‌پذیرد. در این روش به علت تغییرات شدید دما، الیاف FRP دچار افت عملکرد می‌شوند [۱۲]؛ پس با استفاده از روش NSM می‌توان این ضعف‌ها را برطرف نمود. این روش اولین بار در سال ۱۹۵۰ میلادی در شمال کشور سوئد، مورد استفاده قرار گرفت. علت استفاده از این روش، جهت مقاوم‌سازی قسمت لنگر منفی یک پل بود که با جایگذاری آرماتورها در پوشش بتنی با استفاده از ملات سیمانی به عنوان چسب، صورت گرفت [۱۳]. در شکل ۱ تفاوت میان این دو روش نصب EB و NSM ارائه شده است [۱۴].



EBR Technique

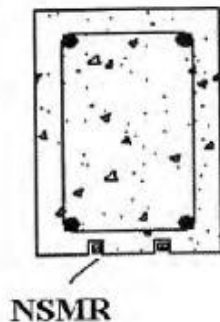


NSM Technique

شکل ۱- تفاوت روش‌های EB و NSM

۲-۲-۲ روند نصب NSM

- ۱) با توجه به میزان ضخامت پوشش بتن و قطر میله یا ورق کامپوزیت، شیاری ایجاد می‌شود [۱۵].
- ۲) از بین بردن ذرات داخل شیار، با استفاده از فشار ۱۰۰-۱۵۰ اتمسفری آب [۱۵].
- ۳) خشک کردن کامل سطح شیار [۱۵].
- ۴) پُر کردن نصف عمق شیار با چسب مورد نظر و جایگذاری FRP و در نهایت پُر کردن ادامه‌ی شیار با چسب در ادامه شکل ۲. مراحل روش نصب NSM را نشان می‌دهد [۱۵].



NSMR



شکل ۲- مراحل روش نصب NSM

۳-۲-۲ مزایای روش NSM

- ۱) FRP در روش NSM به علت محافظت توسط پوشش بتنی، از آسیب های مکانیکی همانند ضربه و پوسته شدن بیشتر در امان است [۱۶].
- ۲) نسبت به روش EBR، مسلح کننده ها در روش NSM کمتر دچار جداشدگی قرار می گیرند [۱۶].
- ۳) در روش NSM به دلیل عدم نیاز به آماده سازی سطح، حجم عملیات اجرایی کاهش می یابد [۱۶].
- ۴) عملکرد بهتر اندرکنش کامپوزیت، به علت درگیر بودن سه ضلع از کامپوزیت در روش NSM [۱۶].

۳. تعریف مصالح

برای الگوسازی مصالح نیاز به تعریف رفتار فولاد، بتن و FRP به نرم افزار می باشد، در ادامه شرح داده می شوند.

۳-۱ بتن

جهت الگوسازی در نرم افزار ABAQUS به دلیل شباهت رفتاری که الگوی آسیب خمیری بتن (CDP)* با رفتار واقعی بتن دارد، از این الگو استفاده می شود. از روابط (۱) تا (۷) هانگستاد [۱۷] نیز برای تعریف رفتار تک محوری فشاری بتن بهره گرفته شده است. لازم به ذکر است ضریب پواسون در تمام الگوها، مقدار ۰/۲ می باشد.

$$f_c'' = k_s \times f_c' \begin{cases} f_c' = 15 \rightarrow k_s = 1 \\ f_c' = 20 \rightarrow k_s = 0.97 \\ f_c' = 25 \rightarrow k_s = 0.95 \\ f_c' = 30 \rightarrow k_s = 0.93 \\ f_c' \geq 35 \rightarrow k_s = 0.92 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c''} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{c_0} = 1.8 \frac{f_c''}{E_c} \rightarrow 0.0015 < \varepsilon_{c_0} < 0.003 \text{ \& } \varepsilon_{cu} \geq 0.003 \quad (3)$$

$$\sigma_c = f_c'' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c_0}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c_0}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \sigma_c E_c^{-1} \quad (5)$$

* Concrete Damage Plastic



$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (6)$$

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (7)$$

در این روابط، f_c'' : حداکثر تنش بتن، f_c' : مقاومت فشاری بتن، ε_{c0} : کرنش متناظر با تنش حداکثر، ε_{cu} : کرنش نهایی و d_c : خسارت فشاری بتن تعریف می شوند.

برای اعمال رفتار کششی بتن، رابطه ی (۸) به کار می رود و با جایگذاری عناصر کششی به جای فشاری در روابط (۵) تا (۷) نیز محاسبات مورد نیاز صورت می گیرد.

$$\sigma_t = 0.3\sigma_c^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

۲-۳ فولاد

در این پژوهش مدول ارتجاعی فولاد ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون آن، ۰/۳ می باشد و الگوی سخت شونده گی دوخطی برای اعمال رفتار فولاد به کار رفته است.

FRP ۳-۳

در تحقیق حاضر از الیاف FRP تک جهته استفاده شده است بنابراین در نرم افزار از شیوه ی Lamina که FRP را به صورت تنش صفحه ای تعریف می کند و توانایی اعمال خواص متفاوت را در جهات متفاوت دارد، استفاده می شود. لازم به ذکر است دو نوع الگوی خرابی برای FRP وجود دارد: ۱- پارگی FRP که در اعضاء دارای اهمیت مجصورشدگی، مانند: اعضاء فشاری که به صورت دورپیچ با FRP مقاوم سازی شده اند، پدیدار می شود و ۲- جداشدگی و لایه لایه شدن FRP: که احتمال رخداد آن در اعضاء خمشی بیشتر است. با توجه به دو حالت ذکر شده، بهترین روش برای تعریف اندرکنش بین بتن و FRP، این است که اپوکسی میان آن ها براساس روابط رفتار چسبنده الگو شود؛ اما در این پژوهش از روش NSM استفاده شده است که جدایش FRP را به کمترین احتمال تبدیل می کند و از آنجایی که هدف این پژوهش، بررسی میزان اثرگذاری FRP است نه رفتار آن، بنابراین از قید گره* برای اندرکنش بین بتن و FRP استفاده می شود [۱۸].

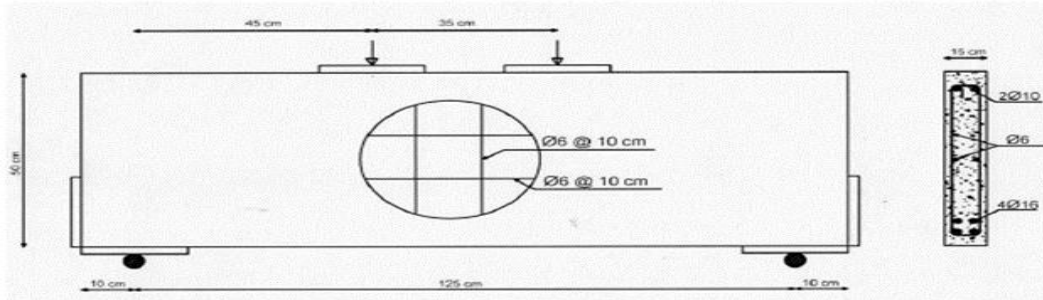
۴. تعریف الگو

۴-۱ آزمایش اکبرزاده بنگر و همکاران (۱۳۹۷)

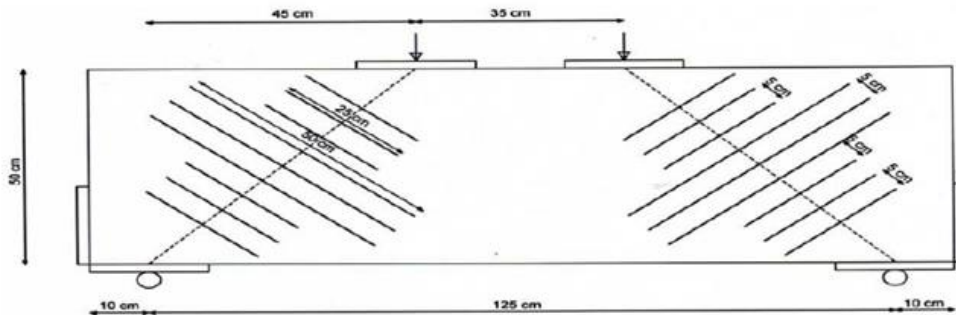
* Tie



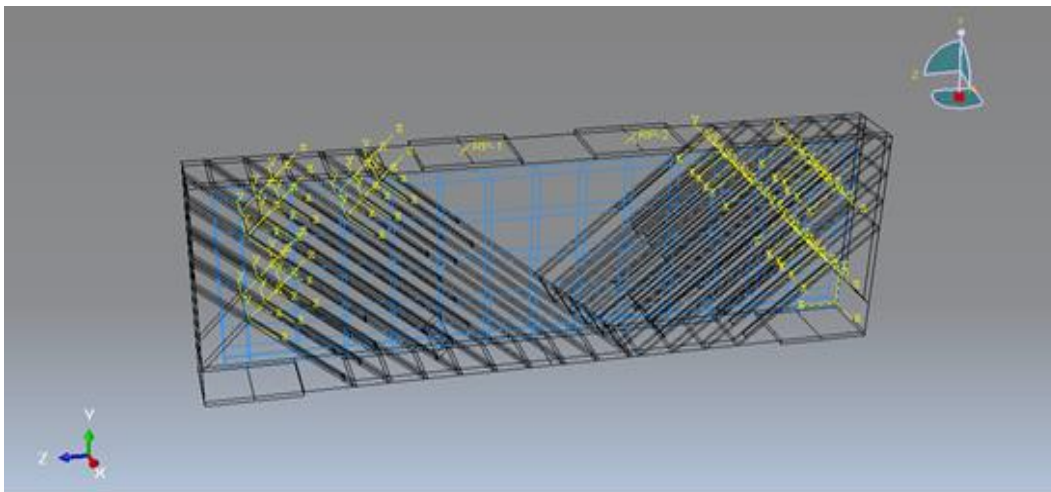
یک تیر عمیق بتن مسلح به ابعاد $1450 \times 150 \times 500$ با چهار میلگرد طولی به قطر ۱۶ در دو سرفه، دو میلگرد فشاری با قطر ۱۰ و خاموت های عرضی و طولی به قطر ۶ در فاصله ی ۱۰۰، با واحد میلی متر تعریف شده است. صفحات فولادی با ابعاد $10 \times 200 \times 150$ در محل اعمال بار برای جلوگیری از تمرکز تنش قرار گرفته است. در این آزمایش انتهای میلگردها از مهار مکانیکی به کار رفته است و در الگوسازی به جای آن، چسبندگی کامل میان میلگرد و بتن اعمال شده است. تکیه گاه ها ساده (مفصلی) و بارگذاری به صورت دو نقطه ای و به مقدار ۱۰۰ تن می باشد. برای مقاوم سازی از ورق های CFRP به روش NSM استفاده شده است. طول ورق ها ۵۰ و ۲۵ سانتی متر، عرض و عمق شیارها به ترتیب: ۵ و ۲۵ میلی متر می باشد. شکل ۳ و ۴. جزئیات تیر و شکل ۵. الگوی نرم افزار را نشان می دهد [۱۰].



شکل ۳- اجزاء تیر برای صحت سنجی



شکل ۴- مقاوم سازی تیر به روش NSM



شکل ۵- الگوی تیر در نرم افزار



۲-۴ مشخصات مصالح

جداول ۱. تا ۳. مصالح به کار رفته در آزمایش را بدست می دهد [۱۰].

جدول ۱- مشخصات فولاد و بتن

نمونه	آرماتور کششی	آرماتور فشاری	آرماتور طولی و عرضی برشی (cm)	تنش تسلیم (MPa) (F _y)	مقاومت فشاری مکعبی بتن (MPa) (F _{cu})
A-N	۴φ _{۱۶}	۲φ _{۱۰}	φ _{۱۰} @۱۰ (cm)	۴۰۰	۴۸/۳۷

جدول ۲- مشخصات CFRP مدل Sika Carbo Dur S۵۱۲

نمونه	طول (cm)	عرض (cm)	عرض شیار (cm)	عمق شیار (cm)	چگالی (kg/cm ^۳)	ضخامت (cm)	تنش کششی نهایی (MPa) (F _{tu})	مدول الاستیسیته (GPa) (E _{tu})	کرنش نهایی (ε _{tu}) (%)
A-N	۵۰ (cm) → عدد ۳	۱/۶۵	۰/۵	۲/۵	۱/۶	۰/۱۲	۲۸۰۰	۱۶۵	۱/۷
	۲۵ (cm) → عدد ۴								

جدول ۳- مشخصات اپوکسی محصول Sika

چگالی (kg/cm ^۳)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت برشی (MPa)
۱/۷۷	>۹۰	>۲۵	۱۲/۸	>۱۵

۳-۴ الگوی عددی

در این پژوهش به جای ورق های CFRP مصرفی در الگوی صحت سنجی شده، از ورق های AFRP، GFRP و CFRP با خواص ارائه شده در جدول ۴. استفاده می شود.

جدول ۴- مشخصات مصالح FRP [۱۹]

ویژگی ها	واحد	نوع FRP		
		AFRP	CFRP	GFRP
E _۱	(Mpa)	۷۵۰۰۰	۱۳۸۰۰۰	۴۰۰۰۰
E _۲	(Mpa)	۶۰۰۰	۹۶۵۰	۸۰۰۰
ν _{۱۲}	-	۰/۳۴	۰/۳	۰/۲۵
G _{۱۲}	(Mpa)	۲۰۰۰	۵۲۴۰	۴۰۰۰
G _{۱۳}	(Mpa)	۲۰۰۰	۵۲۴۰	۴۰۰۰
G _{۲۳}	(Mpa)	۱۰۰۰	۲۲۴۰	۳۰۰۰
X _t	(Mpa)	۱۳۰۰	۲۲۸۰	۱۰۰۰
X _c	(Mpa)	۲۸۰	۱۴۴۰	۶۰۰
Y _t	(Mpa)	۳۰	۵۷	۳۰
Y _c	(Mpa)	۱۴۰	۲۲۸	۱۱۰
S	(Mpa)	۶۰	۷۱	۴۰
چگالی	(ton/mm ^۳)	۱/۴۴×۱۰ ^{-۹}	۱/۵۸×۱۰ ^{-۹}	۱/۹×۱۰ ^{-۹}
ضخامت	(mm)	۱	۱	۱

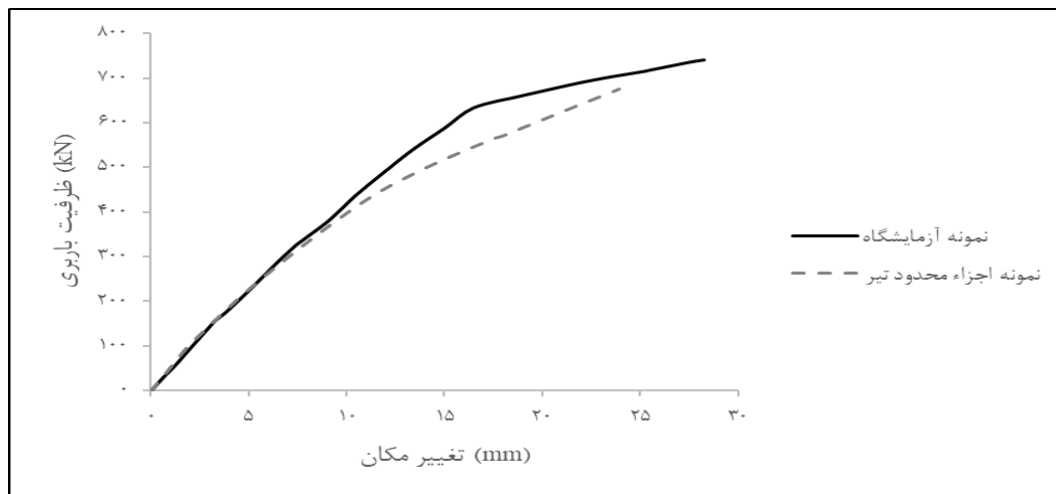


۴-۴ جزء های انتخابی

تیر بتنی و صفحات بارگذاری توسط جزء توپُر (Solid) با هشت گره و انتگرال کاهش یافته (C3D8R) و میلگردها با جزء سه بعدی سیمی (Wire) دارای دو گره و سه درجه آزادی (Beam B31)، الگوسازی شده اند. برای FRP نیز از جزء صفحه ای (Shell) دارای چهار گره و شش درجه آزادی (S4R) استفاده شده است و جهت اعمال اندرکنش بین FRP - بتن و میلگرد - بتن، به ترتیب از قید گره (Tie) و از شیوهی مدفون کردن (Embedded Region) بهره گرفته شد.

۴-۵ صحت سنجی

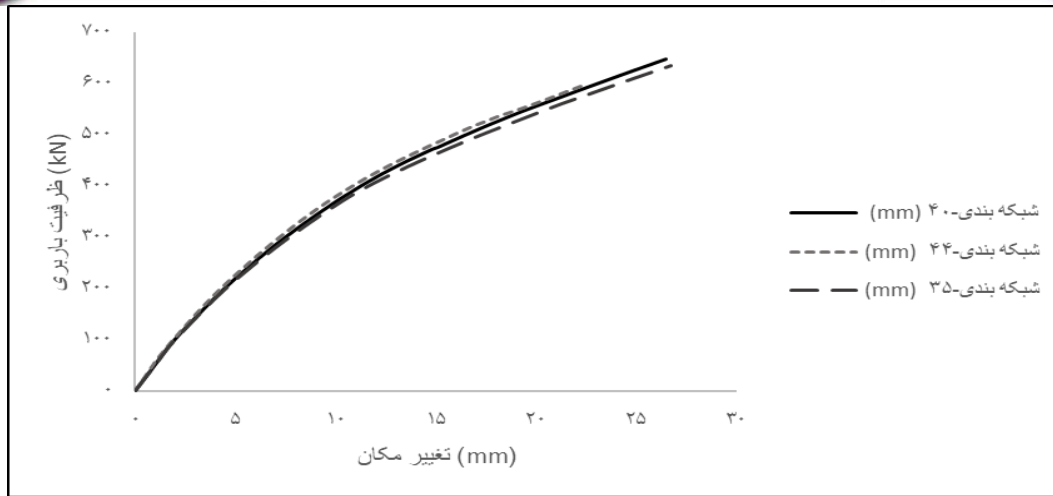
از آنجایی که برای انجام پژوهش مورد نظر، نیاز به الگوی اولیهی معتبر می باشد، بررسی الگوی آزمایشگاهی توسط نرم افزار ABAQUS صورت می گیرد. شکل ۶. نمودار صحت سنجی نمونهی آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل ۶- نمودار صحت سنجی

۴-۶ اندازه شبکه بندی اجزاء

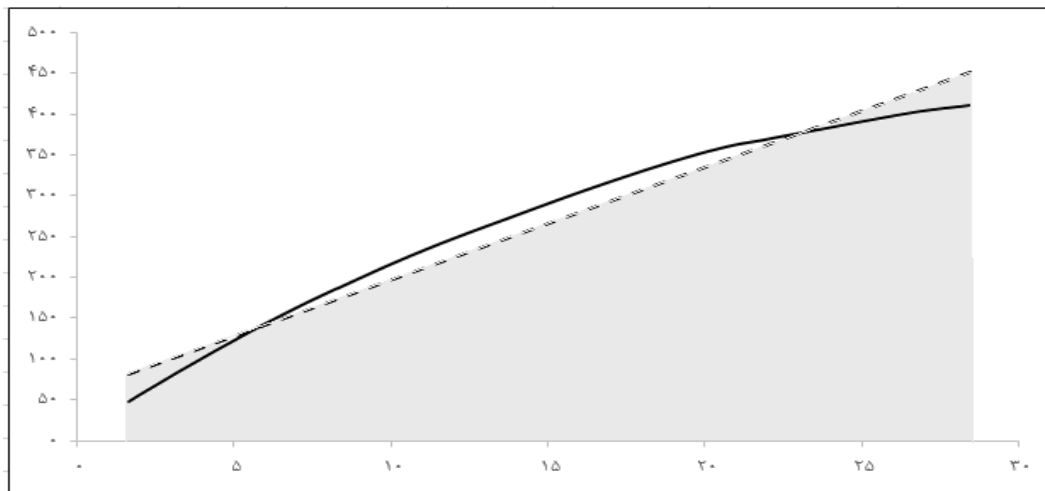
بدیهی است شبکه بندی کوچک اجزاء، مانع از واگرایی نتایج می شود؛ با این حال در این پژوهش که از اندازهی ۴۰ استفاده شده است، شبکه بندی در اندازه های دیگر نیز با خطای بسیار کم، نتایج ثابتی را بدست می دهد. شکل ۷. نمودار همگرایی نتایج را در اندازه های دیگر نشان می دهد.



شکل ۷- نمودار همگرایی نتایج با شبکه بندی مختلف

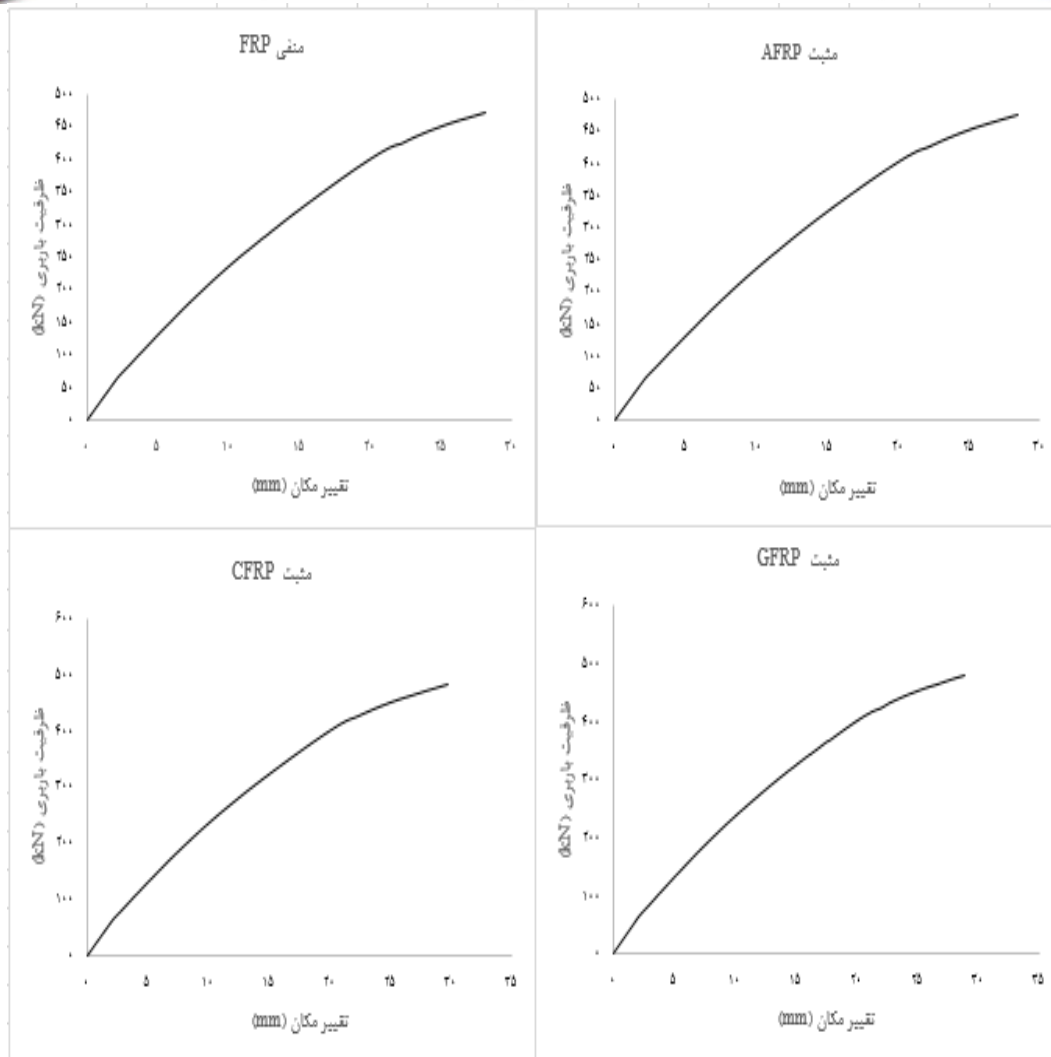
۵. نتایج

پس از بدست آوردن نتایج حاصل از تجزیه ی الگوهـا، تغییرات حداکثر ظرفیت باربری به صورت نمودارهای میله ای ارائه می شود. تغییرات سختی با محاسبه ی سطح زیر نمودار معادل منحنی نیز، در قالب نمودارهای میله ای آورده شده است. شکل ۸، روش محاسبه ی سختی معادل را نشان می دهد.



شکل ۸- مساحت زیر نمودار معادل

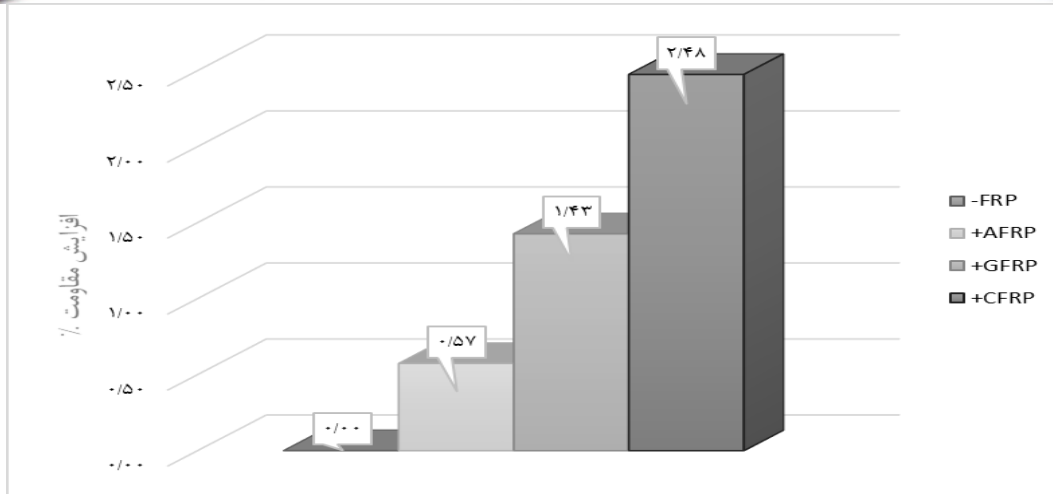
شکل ۹، نمودارهای بار - جابجایی را برای حالت بدون FRP و دارای انواع FRP، نشان می دهد. قابل پیش بینی است که با اعمال FRP، اثر بهبود در ظرفیت باربری مشهود می شود؛ جدول ۵، مقدار حداکثر ظرفیت باربری را برای همه ی حالات نشان می دهد. شکل های ۱۰ و ۱۱، نیز به ترتیب روند افزایشی در مقاومت و سختی را نسبت به حالت بدون FRP، بیان می کند.



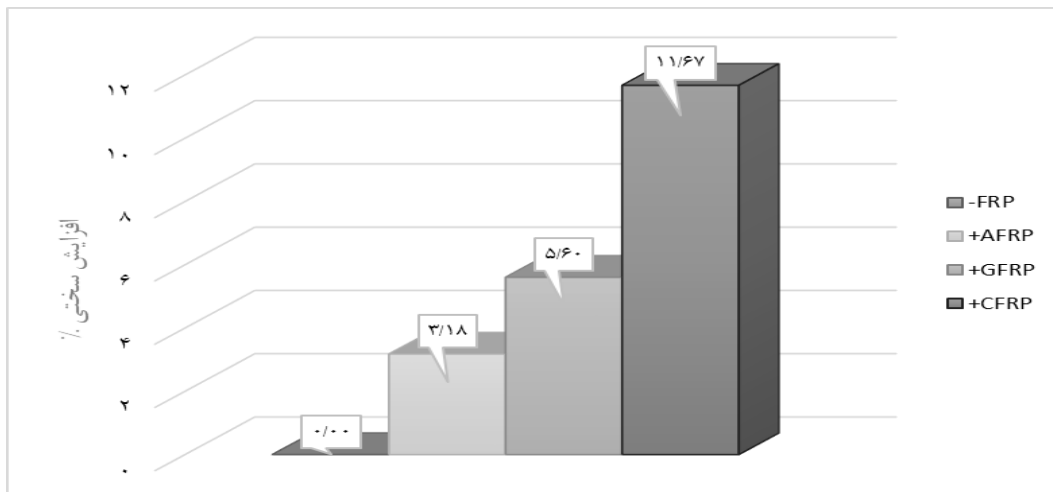
شکل ۹- نمودارهای بار - جابجایی

جدول ۵- حداکثر ظرفیت باربری

نوع FRP	حداکثر ظرفیت باربری kN
-FRP	۴۷۳/۲۴۴
AFRP	۴۷۵/۹۶
GFRP	۴۷۹/۹۹۴
CFRP	۴۸۴/۹۵۸



شکل ۱۰- نمودار درصد افزایش مقاومت تیر عمیق



شکل ۱۱- نمودار درصد افزایش سختی تیر عمیق

۶. نتیجه گیری

نتایج بدست آمده در این پژوهش، حاکی از تأثیر بهبودبخش FRP می باشد؛ به طوری که افزایش مقاومت برای حالت های بدون FRP، دارای AFRP، GFRP و CFRP به ترتیب: ۰٪، ۱۵۷٪، ۱۴۳٪، ۲۴۸٪ و افزایش سختی نیز شامل: ۰٪، ۳۱۸٪، ۵۶۰٪، ۱۱۶۷٪ می باشد. این موضوع نشان می دهد، میزان اثرگذاری بهبودبخش CFRP به ترتیب بیشتر از GFRP و AFRP می باشد.

۱۲. مراجع

۱. حبیبی، م.، (۱۳۸۸). "تحلیل اجزاء محدود ترک ناشی خوردگی آرماتور در تیرهای بتن مسلح"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، گروه عمران.



۲. زمانی، س.، (۱۳۹۸). "تقویت تیرهای عمیق RC با استفاده از روش NSM برای برش و خمش"، پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو.
۳. عاشوری، ز.، هاشمی، ح.، (بهمن ۱۳۹۱). "بررسی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح مقاوم سازی شده با کامپوزیت FRP به روش اجزاء محدود"، اولین کنفرانس ملی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، اراک.
۴. هاشمی دانش، ن.، (بهمن ۱۳۹۵). "بهسازی تیرهای عمیق بتن مسلح با استفاده از الیاف FRP"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی عمران.
۵. یوسفی مقدم شیخانی، ص.، (۱۳۹۴). "بررسی تحلیلی رفتار تیرهای بتن مسلح آسیب دیده در اثر خوردگی، ترمیم شده با FRP"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، گروه عمران.
6. I.A. Sharaky, S.A.I. Selmy, M.M. El-Attar, H.E.M. Sallam, (2019), "The Influence of Interaction Between NSM and Internal Reinforcements on the Structural Behavior of Upgrading RC Beams", Composite Structures.
۷. A.S.H., Al-Issawi, H.H., Kamonna, (۲۰۱۹), "Experimental Study of RC Deep Beams Strengthened by NSM Steel Bars", Materials Today: Proceedings.
8. A. Albidah, A. Abadel, H. Abbas, T. Almusallam, Y. Al-Salloum, (2019), "Experimental and Analytical Study of Strengthening Schemes for Shear Deficient RC Deep Beams", Construction and Building Materials 216.673–686.
9. C. Barris, P. Sala, J. Gómez, L. Torres, (2020), "Flexural Behavior of FRP Reinforced Concrete Beams Strengthened with NSM CFRP Strips", Composite Structures.
10. اکبرزاده بنگر، ح.، احمدنژاد، م.، نوروزی، م.، (۱۳۹۷). "مطالعه ای آزمایشگاهی تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت شده برای برش با CFRP به روش NSM"، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، ۳(۵)، ۱۵۳-۱۷۱.
11. P.K. Mallick, (1993), "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design", Marcel Dekker, Inc., New York. ISBN-13: 978-0849342059.
12. J. A. O. Barros, A. S. fortes, (2005), "Flexural Strengthening of Concrete Beams with CFRP Laminates Bonded into Slits", Cement and Concrete Composites, NO. 27, pp. 471-480.
13. S, Q. Apslund, (1949), "Strengthening Bridge Slabs with Grouted Reinforcement", ACI Structural Journal Vol. 52, No. 6, pp.397-406.
14. A. Carolin, H. Hordin, B. Taljsten, (2001), "Concrete Beams Strengthened with Near Surface Mounted Reinforcement of CFRP", Proceeding of the International Conference On FRP Composites In Civil Engineering, CICE, Vol. 2, pp. 1059-1066, Hung Kong, China.
15. A. De Lorenzis, A. Nanni, (2001), "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near Surface mounted FRP Bars", ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 1, pp. 60-68.
16. L. De Lorenzis, G. J. Teng, (2007), "Near Surface FRP Reinforcement: An Emerging Technique for Strengthening Structures", Composites: Part B; Engineering, No. 38, pp. 119-143.
۱۷. سروش نیا سهیل، "کامل ترین مرجع کاربردی ABAQUS (سطح پیشرفته، ویژه عمران)"، تهران، انتشارات نگارنده دانش، (۱۳۹۲).



۱۸. نخجوان نیا، ح.، (۱۳۹۴). "مقاوم سازی برشی تیرهای عمیق بتنی با مقاومت بالا با استفاده از نوار و گرید FRP"، پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه‌ی آموزش عالی دانش پژوهان.

1۹. Todupunoori Shiva Sai, G.A.V.S. Sandeep Kumar, Dr.N. Kiran Kumar, Dr. Cyril Thomas A, (2020), "Behavior of Reinforced Concrete Beams Bonded with Glass Fiber Reinforced Polymer and Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets", International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), ISSN: 2249 – 8958, Volume-9 Issue-3, February.