

## بررسی عملکرد تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با میله‌های FRP به روش نصب نزدیک سطح جانبی (S-NSM)

حسن عرفانی نسب<sup>۱</sup> و محمد رضا توکلی زاده<sup>۲</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

drt@um.ac.ir

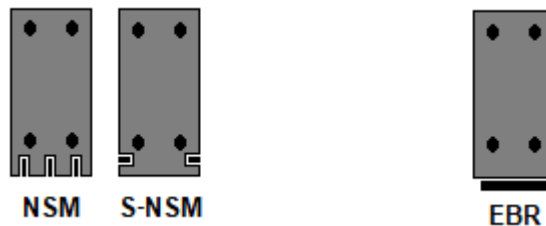
### خلاصه

تعمیر و تقویت سازه‌ها به دلایلی مانند رخداد زمین‌لرزه، تغییر کاربری سازه و یا خسارت‌های گوناگون مورد توجه مهندسان و طراحان سازه‌ها بوده است. یکی از این روش‌های بهسازی که در چند دهه‌ی گذشته رواج پیدا کرده، استفاده از پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) بوده است. روش نصب نزدیک سطح (NSM) کارایی این روش بهسازی را به صورت قابل توجهی بهبود بخشیده است. در مواردی که دسترسی به سطح زیرین تیرهای بتن آرمه امکان‌پذیر نیست، نصب میله‌های FRP در شیارهای تعبیه شده در سطوح جانبی (S-NSM) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش ۶ تیر بتنی با ابعاد  $200 \times 300 \times 3100$  میلی‌متر مسلح شده با ۴ میلگرد طولی فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر به در نظر گرفته شده و رفتار آنها به صورت عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای هر یک از تیرهای مدل‌سازی شده، دو شیار (در هر وجه جانبی یک شیار)  $20 \times 20$  میلی‌متر مربعی به طول ۱۹۱۰ میلی‌متر در فاصله‌های گوناگون ۲۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر از وجه پایینی تیر در نظر گرفته شده و میله‌ی FRP کربنی به قطر  $9/5$  میلی‌متر در داخل شیار مدل‌سازی شده است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد استفاده از شیارهای جانبی در افزایش ظرفیت تیرهای بتن آرمه موثر بوده و ایجاد شیارها در فاصله‌ی ۴۰ میلی‌متری از سطح پایین تیر چیدمان بهینه خواهد بود.

**کلمات کلیدی:** تقویت خمشی با FRP، تیر بتن آرمه، روش نصب نزدیک سطح جانبی، روش اجزای محدود

### ۱- مقدمه

امروزه بسیاری از سازه‌های بتن مسلح موجود بنا به دلایلی از قبیل تغییر کاربری، افزایش بارهای وارد بر سازه و عدم طراحی درست دچار مشکل در باربری و بهره‌برداری می‌شوند. از آنجا که هزینه‌ی تخریب و ساخت ساختمان جدید بسیار سنگین است، بحث بهسازی و تقویت سازه‌های موجود به شدت رونق یافته است. در دهه‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی تقویت سازه‌های بتن آرمه صورت گرفته است. یکی از این روش‌ها که به سرعت مورد توجه‌ی مهندسان قرار گرفته و پروژه‌های متعددی در دنیا انجام شده است، استفاده از پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) می‌باشد. دو روش رایج برای تقویت خمشی تیرها روش تقویت مسلح کننده بیرونی (EBR) و روش تقویت نصب سطح نزدیک (NSM) هستند که در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲- روش تقویت نصب سطح نزدیک

شکل ۱- روش تقویت مسلح کننده بیرونی



جداشدن ورق‌های FRP از سطح بتن یکی از چالش‌های روش EBR است. با توجه به کاستی‌هایی که در روش EBR وجود داشت، روش NSM مطرح گردید. در روش NSM میله‌ها یا نوارهای FRP در داخل شیار ایجاد شده در سطح بتن، قرار می‌گیرند. یکی از روش‌های دیگر تقویت تیرهای بتن آرمه که در سال‌های اخیر پیشنهاد شده، روش نصب نزدیک سطح جانبی (S-NSM) است. به دلیل اینکه در برخی موارد دسترسی به زیر طاق تیرهای بتن آرمه محدود است این روش می‌تواند روش مناسبی برای تقویت این گونه تیرها باشد. در این روش برخلاف روش NSM معمول، میلگردهای FRP در داخل شیارهای تعبیه شده در دو وجه جانبی تیر قرار می‌گیرند (شکل ۲).

## ۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

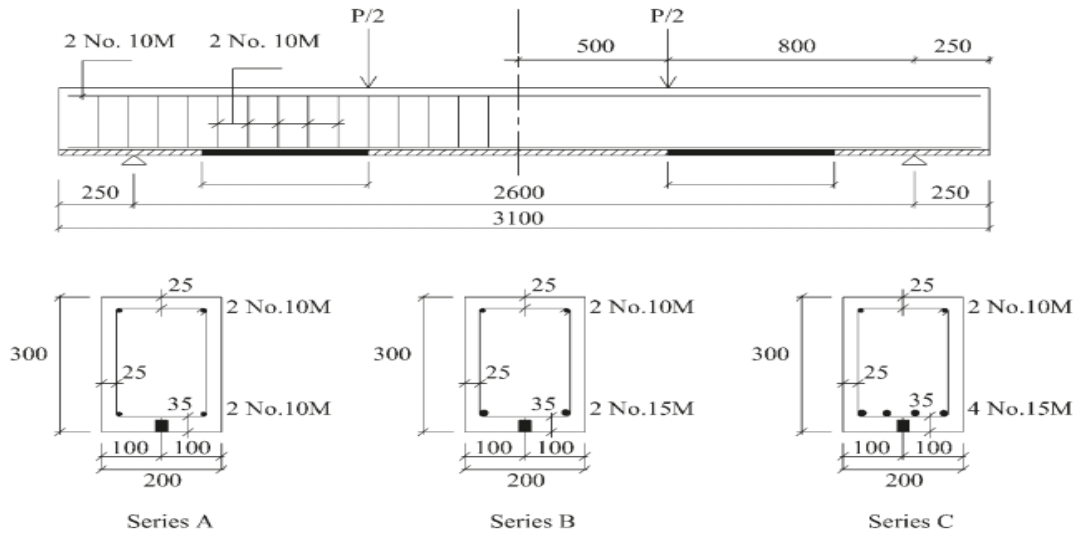
تاکنون تحقیقات زیادی در مورد روش EBR انجام شده است. بر اساس تحقیقات صیادمنش و همکارانش [۱] ظرفیت باربری تیر بتنی تقویت شده با ورق CFRP، به میزان ۶۵/۴٪ و با ورق GFRP به میزان ۵۴/۳٪ افزایش می‌یابد. اوه و سیم [۲] به منظور جداشدگی ورق کامپوزیتی تاثیر طول، ضخامت و عرض ورق تقویتی GFRP را بر روی تیر بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق GFRP، بررسی کردند. بر اساس نتایج آزمایش‌های ایشان در صورتی که از ورق تقویتی به طول  $0.6L$  (طول دهانه‌ی موثر تیر) استفاده شود، جداشدگی پوشش بتن از روی آرماتورهای کششی رخ می‌دهد، در صورتی که طول ورق تقویتی  $0.8L$  انتخاب شود، ورق تقویتی از سطح بتن جدا خواهد شد. علیپور و توکلی‌زاده [۳] به بررسی اثر آماده‌سازی سطحی بر مقاومت نهایی تیر بتنی تقویت شده به روش EBR پرداختند. بر اساس تحقیقات ایشان بار نهایی تیرهای تقویت شده با یک لایه ورق FRP با آماده‌سازی سطح به روش شیار زنی دایره‌ای و پس از آن روش‌های شیار طولی و سوراخ‌زنی نسبت به سایر روش‌های آماده‌سازی سطوح، بیشتر می‌باشد. همانطور که بیان شد یکی از چالش‌های EBR جداشدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن می‌باشد. برای برطرف کردن این مشکل پژوهشگران روش NSM را پیشنهاد دادند. صیادمنش و همکارانش [۱] روش ترکیبی EBR و NSM را بر روی تیرهای بتن آرمه انجام دادند، که نتایج حاکی از افزایش ظرفیت خمشی تیر تقویت شده به مقدار ۱۰۹/۹٪ می‌باشد. بر اساس پژوهش آنها، افزایش عرض شیار تاثیر چندانی در ظرفیت خمشی تیر بتنی ندارد. دلورنزیس و همکارانش [۴] برای تامین چسبندگی مناسب بین میلگرد و بتن، پیشنهاد دادند ابعاد شیار ۲ برابر قطر میلگرد FRP باشد. مستوفی‌نژاد و عروجی [۵] برای جلوگیری از جداشدگی ورق FRP پیشنهاد افزایش عمق شیار را ارائه دادند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد افزایش عمق شیار باعث افزایش بار گسیختگی می‌گردد، و همچنین در نمونه‌هایی که با دولایه تقویت می‌شوند مشکل جداشدگی برطرف شده و در نتیجه از حداکثر ظرفیت باربری تیر استفاده می‌شود.

پژوهش‌های صورت گرفته توسط هوسن و همکارانش [۶] و شکری و همکارانش [۷] نشان می‌دهد که روش S-NSM برای تقویت تیرهای بتن آرمه تحت خمش و ظرفیت بار نهایی، موثرتر است. در این پژوهش‌ها تیرهای بتن آرمه تقویت شده با میلگردهای فولادی و CFRP به قطر ۸ و ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر ساخته شدند. نشان دادند که روش S-NSM یک افزایش قابل ملاحظه در ظرفیت باربری و بار ترک خوردگی ایجاد کرد، به طوری که شکست تیرهای تقویت شده با میلگردهای فولادی و CFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر به صورت جداشدن پوشش بتن ایجاد شد. سلیمان [۸] پارامترهای نسبت میلگردهای کششی، نوع میلگردهای NSM-FRP، قطر میلگرد FRP، ابعاد شیار و طول اتصال میلگردهای NSM-FRP بر روی تیر تحت خمش بررسی کردند. با توجه به نتایج آزمایش‌های آنها میلگردهای فولادی با درصد کم (در محدوده نسبت فولادگذاری ۰/۴ درصد ابعاد سطح مقطع) بیشترین تاثیر را در افزایش ظرفیت باربری خمشی دارند. افزایش در طول مهارتی تا ۴۸ برابر قطر میلگرد FRP در افزایش ظرفیت باربری تاثیر گذار است و بیشتر از آن تاثیر در افزایش ظرفیت باربری ندارد. کریستین ساباو و همکاران [۹] در پژوهشی تاثیر S-NSM نسبت به NSM معمول را با طول اتصال متفاوت در شرایط ظرفیت نهایی، توزیع ترک، سختی و حالت شکست بررسی کردند. بر اساس آزمایش‌های انجام شده توسط آنها، در حالت کلی تیرهای تقویت شده با S-NSM در مقایسه با تیرهای تقویت شده با NSM معمول، باعث کاهش بار ترک خوردگی، کاهش سختی خمشی، کاهش بار تسلیم، افزایش کرنش نهایی CFRP در لحظه‌ی شکست، افزایش استهلاک انرژی در لحظه‌ی شکست و جابجایی بیشتر در لحظه‌ی شکست می‌شود. بر اساس پژوهش شهبازی و توکلی‌زاده [۱۰] که بر روی تیر تقویت شده تحت خمش به روش NSM معمول انجام شد، با افزایش عمق شیار، بار نهایی و تغییر مکان وسط تیر افزایش می‌یابد.

علاوه بر بررسی ابعاد شیار، هندسه شیارها نیز مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج نشان می‌دهد تیرهای با شیار نیم‌دایره‌ای به دلیل حذف گوشه‌های تیز در اطراف شیار که به نوعی باعث ایجاد تمرکز تنش در اطراف شیار می‌شود، دارای بیشترین بار نهایی می‌باشند.

### ۳- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

در این پژوهش برای درست‌آزمایی از مدل آزمایشگاهی سلیمان [۸] استفاده شده است (شکل ۳) بدین منظور ابتدا در مورد مشخصات و رفتار مصالح به کار رفته و مش‌بندی و همگرایی مدل با مش‌های متفاوت در نرم‌افزار آباکوس و در انتها بررسی درست‌آزمایی مدل بیان می‌شود.



شکل ۳- نمونه‌ی آزمایشگاهی سلیمان جهت درست‌آزمایی [۸]

### ۳-۱ مشخصات مصالح مصرفی در پژوهش سلیمان [۸]

بتن مصرفی با رده مقاومتی C40 و ویژگی‌های نمایش داده شده در جدول ۱ در این پژوهش در نظر گرفته شده است. میلگردهای CFRP مورد استفاده در این پژوهش با قطر اسمی ۹/۵ میلی‌متر و سطح مقطع ۷۱ میلی‌متر مربع با ویژگی‌های ارایه شده در جدول ۱ برای قرار دادن در داخل شیارها در نظر گرفته شده‌اند. دو نوع میلگرد فولادی با قطرهای اسمی ۱۱/۳ و ۱۵/۹ میلی‌متر برای مسلح کردن تیر بتن آرمه با ویژگی‌های مندرج در جدول ۱ به کار گرفته شده‌اند. ویژگی‌های چسب مورد استفاده (از نوع اپوکسی) در درون شیارها نیز در جدول ۱ به نمایش درآمده است.

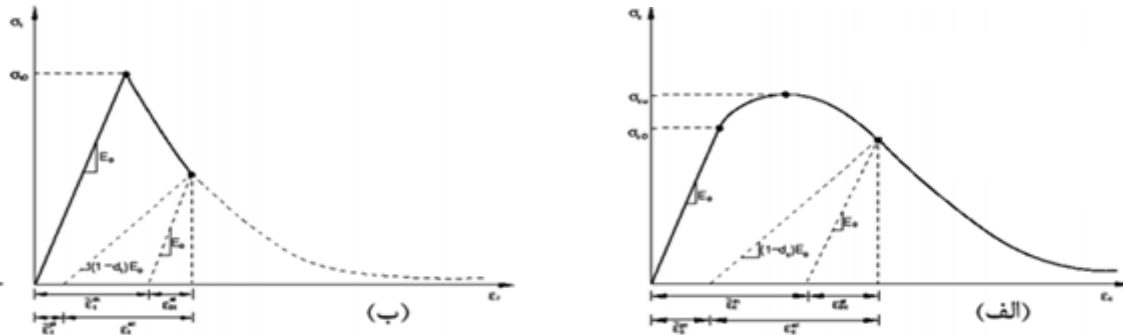
جدول ۱- مشخصات مصالح مصرفی در نمونه‌های آزمایشگاهی سلیمان [۸]

ماده مصرفی	قطر (mm)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی تسلیم (نهایی) (MPa)	ضریب کشسانی (GPa)	ضریب پواسان	کرنش نهایی (%)
بتن	-	۴۱	۳/۳	۲۹	۰/۱۸	۰/۳
میلگرد CFRP	۹/۵	-	۱۵۹۶/۰	۱۲۴	-	۱/۴
میلگرد فولادی	۱۱/۳	-	۴۵۴/۰ (۵۷۱/۰)	۲۰۰	۰/۳	۲۱/۰
میلگرد فولادی	۱۵/۹	-	۴۶۰/۰ (۵۵۸/۰)	۲۰۰	۰/۳	۲۱/۰
چسب اپوکسی	-	۸۲/۷	۴۳/۵	۱/۵	۰/۳	۳/۰

### ۲-۳ مدل رفتاری مصالح در نرم‌افزار آباکوس

#### ۱-۲-۳ رفتار فشاری و کشش بتن

بتن رفتار پیچیده‌ای دارد به گونه‌ای که در تنش‌های پایین نیز از خود رفتار غیرخطی نشان می‌دهد. تئوری‌های مختلفی برای رفتار بتن توسط پژوهشگران ارائه شده است. از بین آنها، تئوری ترکیبی پلاستیسته و خرابی بیشترین تطابق را با رفتار واقعی بتن دارد [۱۱]. در این پژوهش برای مدل‌سازی رفتار بتن از مدل بتن آسیب دیده پلاستیک (CDP) استفاده شده است. در این مدل دو ساز و کار گسیختگی بتن تحت کشش و خرد شدگی بتن تحت فشار در نظر گرفته می‌شود که در شکل ۴ به نمایش درآمده است. رفتار تنش-کرنش بتن تحت کشش تک محوره تا لحظه‌ی تشکیل ترک‌های ریزی که در ابتدای بارگذاری تشکیل می‌شود به صورت خطی تعریف می‌شود. رفتار بتن بعد از ایجاد اولین ترک باید بر حسب کرنش ترک خوردگی تعریف شود. بتن تحت تنش تک محوره تا لحظه‌ی رسیدن به  $\sigma_{co}$  در محدوده‌ی کشسان می‌باشد پس از آن منحنی به صورت منحنی سخت شدگی تبدیل می‌شود تا به حداکثر تنش  $\sigma_{cu}$  برسد پس از آن منحنی به صورت منحنی نرم شدگی درمی‌آید. با توجه به غیرخطی بودن رفتار بتن، رفتار پس از شکست بتن به صورت تابعی از کرنش ترک خوردگی  $\epsilon_{crk}$  می‌باشد. کرنش ترک خوردگی عبارت است از تفاوت بین کرنش کل و کرنش کشسان. می‌توان با داشتن مقادیر تنش و کرنش فشاری و یا کششی بتن پارامترهای خرابی و کرنش‌های مومسان بتن را به دست آورد [۱۲]. برای مدل‌سازی بتن در نرم‌افزار آباکوس از مدل لاگراتژی C3D8R استفاده شده است. این المان یک المان خطی ۸ گرهی از نوع Solid با سه درجه‌ی آزادی در هر گره می‌باشد.



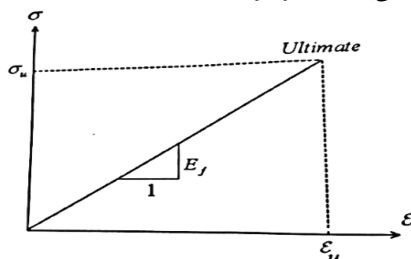
شکل ۴- مدل رفتاری بتن در نرم‌افزار آباکوس، (الف) رفتار فشاری و (ب) رفتار کششی [۱۲]

#### ۲-۲-۳ رفتار میلگرد فولادی

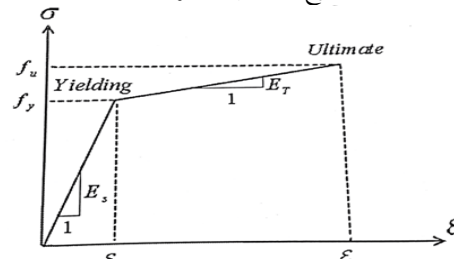
فولاد تا حد تنش جاری شدن از خود رفتار کشسان نشان می‌دهد و پس از آن وارد ناحیه‌ی مومسان می‌شود. برای شبیه‌سازی رفتار فولاد از مدل الاستوپلاستیک دو خطی مطابق شکل ۵ استفاده می‌شود. در این پژوهش آرماتورهای فولادی با المان خرابی T3D2 با دو گره و سه درجه‌ی آزادی در هر گره، مدل شده است. میلگردها در نرم‌افزار آباکوس به صورت مدفون در بتن (Embedded) مدل می‌شوند.

#### ۳-۲-۳ رفتار میلگرد CFRP

رفتار میلگردهای FRP به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود، بنابراین این مواد تا لحظه‌ی گسیختگی (رسیدن به کرنش نهایی) دارای رفتار کشسان و خطی می‌باشند و در نهایت دچار شکستگی ترد می‌شوند (شکل ۶). لذا رفتار مواد CFRP به صورت خطی در نظر گرفته شده است. برای میلگرد FRP المان T3D2 که یک المان از نوع Truss با دو گره و سه درجه‌ی آزادی در هر گره می‌باشد در نظر گرفته شده است.



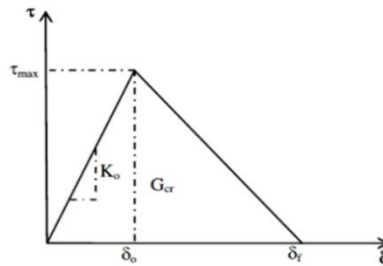
شکل ۶- نمودار رفتار میلگرد CFRP [۱۲]



شکل ۵- نمودار رفتار فولاد تحت کشش [۱۲]

### ۳-۲-۴ رفتار چسب

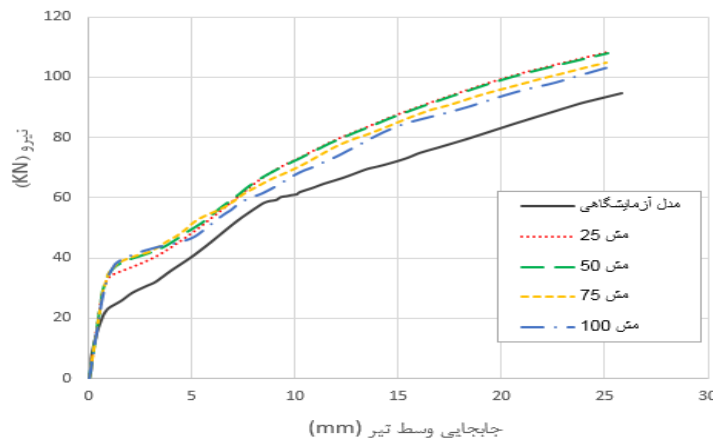
رفتار لایه‌ی چسب به دو بخش کشسان و خرابی تقسیم می‌شود. رفتار چسب در در نرم‌افزار به صورت مدل کشش - جدایی تعریف شده است. شکل ۷ رفتار کشش - جدایی چسب را نشان می‌دهد. این رفتار توسط دو پارامتر کشش ( $\tau$ ) و جابجایی نسبی حاصل از جدایشگی ( $\delta$ ) تشکیل شده است. برای رفتار جدایشگی چسب از مدل گسیختگی بنزگاه - کنان (BK) در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است [۱۳]. میلگرد CFRP به صورت مدفون در چسب در نظر گرفته شده است. در این پژوهش با توجه به اینکه در اثر تنش‌های ایجاد شده بین چسب و بتن اطراف شیار لغزش و جدایشگی به وجود می‌آید، برای اتصال چسب به بتن در نرم‌افزار آباکوس از حالت تماس سطح به سطح (Surface to Surface) استفاده شده است تا بتوان اثر لغزش بین بتن و چسب را لحاظ نمود.



شکل ۷- نمودار رفتار تنش برشی - لغزش بین چسب و بتن [۱۳]

### ۳-۳ مش بندی

برای درست‌آزمایی، از نمونه‌ی تقویت‌شده‌ی AC3 از پژوهش سلیمان [۸] استفاده شده است. برای همگرایی تیر AC3، نمونه با مش‌های ۲۵، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متر تحلیل شد (شکل ۸). در این پژوهش برای تحلیل تیرهای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار، پارامتر شکست بر مبنای جدایشگی میلگرد CFRP در نظر گرفته شد.

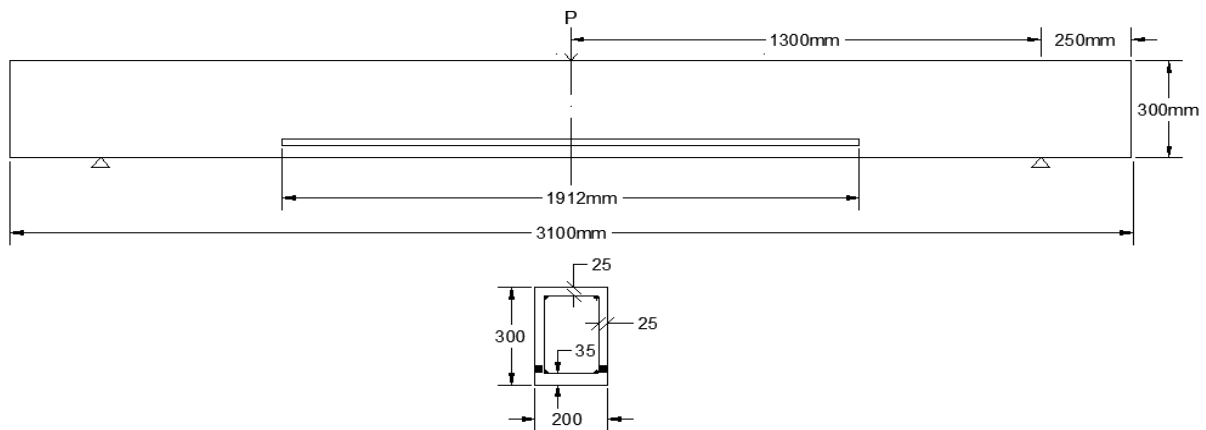


شکل ۸- تحلیل حساسیت اندازه مش بندی در مدل‌سازی عددی تیر بتن آرمه تقویت شده (نمونه AC3 مرجع [۸])

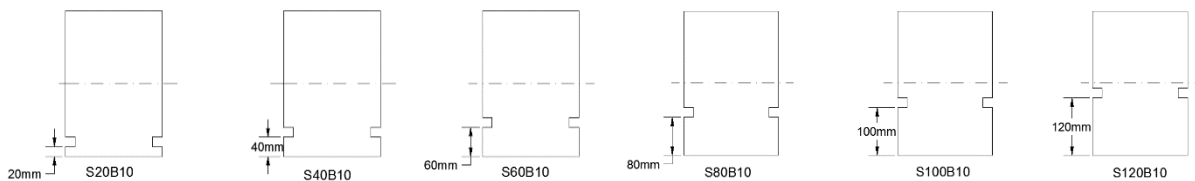
### ۴- تحلیل نتایج عددی

تمامی نمونه‌های تیرهای بتنی که توسط نرم‌افزار آباکوس مدل شدند، دارای مشخصات هندسی مشابه بودند. تیرهای بتنی مورد بررسی دارای طول ۳۱۰۰ میلی‌متر با سطح مقطع ۲۰۰×۳۰۰ میلی‌متر مربع، دارای میلگرد CFRP به قطر ۹/۵ میلی‌متر و طول ۱۹۱۲ میلی‌متر که در شیارهای ۲۰×۲۰ میلی‌متر مربعی قرار داده شده‌اند می‌باشد (شکل ۹). با توجه به اینکه قسمت کششی در پایین محور میانی تیر قرار دارد در این بخش به بررسی فواصل شیار در قسمت پایینی محور میانی پرداخته می‌شود. به منظور بررسی کردن فاصله‌ی بهینه ۶ نمونه به نام‌های SXBZ مدل‌سازی شده است (S فاصله شیار از پایین تیر و Z قطر میله CFRP)، به نحوی که در هر وجه جانبی تیر یک شیار تعبیه شده است (شکل ۱۰).

پس از مدل‌سازی تیرها، نیروی نهایی و جابه‌جایی متناظر با آن در وسط تیر مطابق جدول ۲ می‌باشد. با توجه به این مقادیر، مدل S40B10 دارای بیشترین مقاومت می‌باشد. مدل S20B10 با اینکه دارای فاصله‌ی بیشتری نسبت به تار خنثی می‌باشد ولی به دلیل قرار گرفتن میلگرد CFRP در ناحیه پوشش بتن و جدا شدن زود هنگام پوشش بتنی دارای مقاومت کمتری نسبت به مدل S40B10 می‌باشد. در ادامه برای تفسیر بهتر مدل‌ها مطابق شکل ۱۱ نمودار نیرو-جابه‌جایی آنها ترسیم شده است. با توجه به شکل ۱۱، برای تمامی مدل‌ها بخش اول نمودار بر یکدیگر منطبق می‌باشند، به عبارتی تا قبل از ترک خوردن بتن میلگردهای CFRP در تمامی مدل‌ها نقش چندانی در تحمل بار ندارند. همانطور که مشاهده می‌شود در مدل‌های S60B10 و S80B10 با زیاد شدن فاصله‌ی شیار از کف تیر (نزدیک شدن شیار به محور خنثی) ظرفیت باربری تیر کاهش می‌یابد اما در مدل S100B10 افزایش ظرفیت تیر مشاهده شده است و بعد از آن کاهش ظرفیت مشاهده می‌شود.



شکل ۹- ابعاد و سطح مقطع تیرهای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار



شکل ۱۰- مقاطع مدل‌های SXBZ (تک شیار)

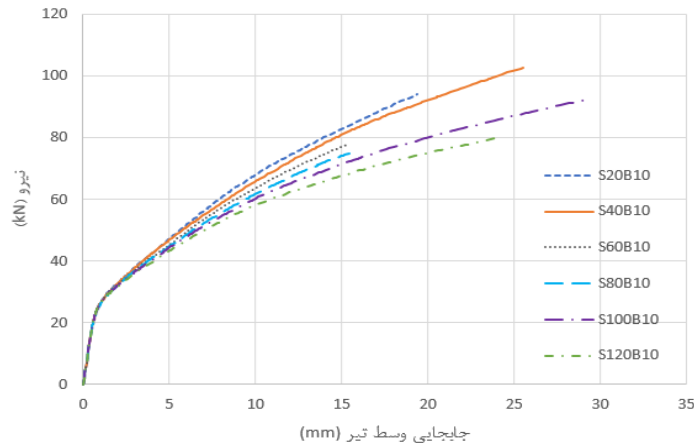
جدول ۲- نیروی نهایی و جابه‌جایی وسط تیر در مدل‌های SXB10

چگونگی شکست	جابه‌جایی وسط تیر (mm)	نیروی نهایی (kN)	مدل
خرد شدن بتن	۱۹/۳۷	۹۴/۱۲	S20B10
خرد شدن بتن	۲۵/۵۲	۱۰۲/۷۵	S40B10
جداشدگی میلگرد CFRP	۱۵/۳۷	۷۷/۸۰	S60B10
جداشدگی میلگرد CFRP	۱۵/۴۱	۷۴/۹۷	S80B10
خرد شدن بتن	۲۹/۱۳	۹۲/۳۱	S100B10
جداشدگی میلگرد CFRP	۲۴/۰۵	۷۹/۹۵	S120B10

با بررسی کرنش‌های ایجاد شده در اطراف شیار، تنها بتن اطراف شیار مدل‌های S20B10، S40B10 و S100B10 در لحظه‌ی نهایی خرد شده است، در حالی که در مدل‌های S60B10، S80B10 و S120B10 در لحظه‌ی نهایی قبل از خرد شدن بتن اطراف شیار جداشدگی میلگرد CFRP از داخل شیار اتفاق می‌افتد و به عبارتی از کل ظرفیت باربری تیر استفاده نشده است. بنابراین با توجه به اینکه در مدل S100B10 در لحظه‌ی نهایی خرد شدگی

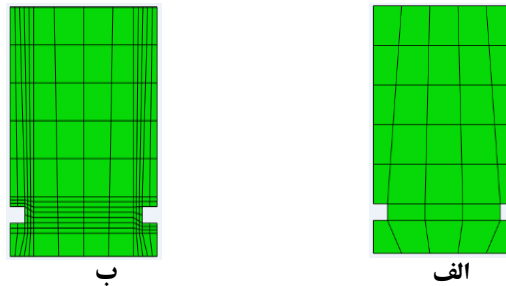
بتن در اطراف شیار اتفاق می‌افتد، نیروی نهایی وارده نسبت به مدل S80B10 بیشتر می‌باشد. با تغییر فاصله‌ی شیار از ۱۰۰ میلی‌متر به بعد با توجه به نزدیک شدن شیار به تار خنثی نیروی نهایی کاهش یافته است.

مدل S40B10 دارای بیشترین تنش ایجاد شده در میلگردهای CFRP می‌باشد، به عبارتی در این مدل میلگردهای CFRP بیشترین مشارکت را در تحمل تنش تیر دارند. با توجه به اینکه مدل S40B10 (دارای شیار به فاصله‌ی ۴۰ میلی‌متر از وجه پایین تیر) دارای بیشترین مقاومت نهایی می‌باشد و همچنین از حداکثر ظرفیت باربری تیر استفاده شده است، بهینه‌ترین فاصله از وجه پایین تیر ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

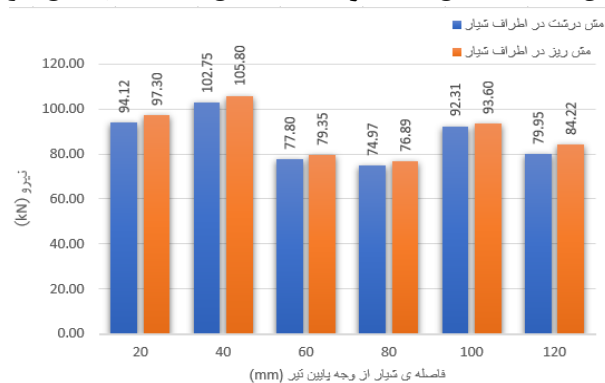


شکل ۱۱- نمودار بار-جاب‌جایی تیرهای بتنی با یک شیار جانبی و میلگرد CFRP ۱۰ میلی‌متری

نتایج موجود در بخش پیشین، بدون در نظر گرفتن مش بندی ریز در اطراف شیار بدست آمده است (شکل ۱۲- الف). در این بخش تلاش شده است به دلیل تمرکز تنش اطراف شیار، تحلیل دقیق تری با تعداد اجزای بیشتر انجام شود. بدین منظور اندازه‌ی مش اطراف شیارها ریزتر از ناحیه‌های دور از شیارها در تیر بتن‌آرمه در نظر گرفته شده است (شکل ۱۲- ب). در صورتی که مش اطراف شیار با اندازه‌ی ریزتر در نظر گرفته شود، نتایج به دست آمده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. به راحتی می‌توان مشاهده کرد که در صورت استفاده از مش ریز در اطراف شیار اختلاف کمی در برآورد ظرفیت باربری تیر دیده می‌شود. این اختلاف در نمونه‌های مختلف بین ۱/۴ تا ۵/۳ درصد با میانگین ۲/۹۵٪ مشاهده شده است.



شکل ۱۲- اندازه مش بندی نمونه‌ها، الف) مش درشت و ب) مش ریز



شکل ۱۳- مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ها با مش درشت و ریز در اطراف شیار



## ۵- نتایج

- در این پژوهش، یک تیر بتن آرمه تحت خمش با روش S-NSM به صورت تک شیار مدل‌سازی شده است و اثر فاصله تک شیار جانبی از کف تیر بر ظرفیت خمشی تیرها، مورد بررسی قرار گرفت. در پایان می‌توان به نتایج مهم زیر اشاره نمود:
- ایجاد شیار جانبی در فاصله کم از کف تیر بتن آرمه یا ناحیه پوشش (علی‌رغم ایجاد بازوی لنگر بیشتر) برای افزایش ظرفیت مطلوب نبوده و باعث جداشدگی زودرس پوشش بتن و در نتیجه سبب شکست ترد تیر بتن آرمه تقویت شده می‌شود.
  - فاصله بهینه شیار از کف تیر باید به گونه‌ای باشد که از لایه‌ی پوشش بتن بیرون رود و در این پژوهش (برای تیرهای بتن آرمه با ابعاد مورد مطالعه) فاصله ۴۰ میلی‌متر بهترین عملکرد را نشان داده است.
  - با افزایش فاصله شیار از کف تیر، اثر گذاری میلگردهای CFRP برای افزایش ظرفیت باربری کاهش می‌یابد و نحوه شکست به صورت ترد و با جداشدگی زود هنگام میلگردهای CFRP همراه است.
  - در صورت استفاده از اندازه مش ریز در اطراف شیار به جای مش درشت در مدل‌سازی عددی، اختلاف اندکی در ظرفیت باربری تیر ایجاد می‌شود به نحوی که بیشترین اختلاف در این حالت کمتر از ۵/۵٪ می‌باشد.

## ۶- مراجع

۱. صیادمنش، م و خیرالدین، ع (۱۳۸۸). "تقویت تیرهای بتن آرمه به روش ترکیبی EBR و NSM". هشتمین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران
2. OH, H S and Sim, J, (2004). "Interface Debonding Failure in Beams Strengthened with Externally Bonded GFRP", Composite Interfaces, 11(1), 25-42.
۳. علیپور، ع و توکلی‌زاده، م (۱۳۹۳). "روش شیار دایره‌ای به منظور جلوگیری از جداشدگی زودرس در تیرهای بتنی تقویت شده با GFRP"، دومین کنفرانس ملی مصالح و سازه‌های نوین در مهندسی عمران، اصفهان.
4. De Lorenzis, L and Teng, G J, (2007). "Near Surface Mounted FRP Reinforcement: An Emerging Technique for Strengthening Structures", Composites Part B: Engineering, No. 38, pp. 119-143.
۵. مستوفی‌نژاد، د و عروجی، م (۱۳۹۳). "مروری بر روش‌های تقویت خمش تیرهای بتن آرمه با استفاده از کامپوزیت‌های FRP"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل.
6. Hosen M A, Jumaat M Z and Islam A, (2015). "Side Near Surface Mounted (SNSM) technique for flexural enhancement of RC beams", Materials & Design. 83:587-97.
7. Shukri A A, Hosen M A, Muhamad R and Jumaat M Z, (2016). "Behavior of Precracked RC Beams Strengthened Using the Side-NSM Technique", Construction and Building Materials. 123:617-26.
8. Soliman, S M, (2008). "Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted fiber reinforced polymer bars", PhD Dissertation, Civil Engineering Department, Sherbrooke University, Canada.
9. Cristian S, Cosmin P, Gabriel S, Jacob WS, Thomas B and Björn T. (2018). "Strengthening of RC beams using bottom and side NSM reinforcement". Composites Part B. Engineering, No. 149, pp. 82-91
۱۰. شاهبازی، ن و توکلی‌زاده، م (۱۳۹۲). "بررسی تاثیر ابعاد و فواصل شیارها در روش NSM، بر رفتار خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با میله‌های FRP"، پنجمین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران.
11. Hansen E, Willam K and Carol I, (2001). "A two-surface anisotropic damage/plasticity model for plain concrete" Proc. Framcos-4 Conf. Paris Fracture Mechanics of Concrete Materials, Rotterdam.
12. Abaqus, (2010) "Theory manual and user manual and Example Manual". Version 6.10. Providence, RI.
۱۳. سلیمانی کیا، آ و وارسته‌پور، ح (۱۳۹۲). "مدل‌سازی لایه‌ی چسب به منظور پیش‌بینی شکست زودرس در تیرهای بتنی تقویت شده با صفحات FRP"، پنجمین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران.