بررسی تاثیر ابعاد و فواصل شیارها درروش NSM ، بر رفتار خمشی تیرهای تقویت شده با میله‌های FRP

(کد B)

محمدرضا توکلی‌زاده[۱]، نفیسه شاهبازی[۲]

۱-استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

Email: drt@um.ac.ir

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

Email:nafisshahbazi@gmail.com

چکیده

مقاوم سازی سازه‌های بتن مسلح با استفاده از پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف (FRP) این روزها به عنوان یک روش مرسوم در اکثر نقاط جهان پذیرفته شده است. دلیل این امر را می‌توان در رسیدن به ظرفیت بالا با سرعت زیاد و هزینه پایین بدون تغییردادن ابعاد و شکل سازه جستجو کرد. روش‌های مختلفی جهت مقاوم‌سازی سازه‌ها با استفاده از این مصالح پیشنهاد شده است، که یکی از کاراترین آنها روش نصب نزدیک سطح (NSM) می‌باشد. مبنای این روش بر اساس کارگذاشتن مصالح مقاوم‌کننده در شیارهای تعبیه شده در سطح تیرها می‌باشد. در مطالعه‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام یافته، ابعاد و فواصل شیارها کمتر مورد توجه قرار گرفته و همچنین در آیین‌نامه‌های موجود این پارامترها فقط به صورت چند محدودیت اجرایی بیان شده است. در این پژوهش سعی شده تا با استفاده از روش المان محدود و توسط نرم‌افزار آباکوس ،تاثیر تغییر ابعاد و فاصله بین شیارها بر نحوه توزیع تنش در اطراف آنها و همچنین رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح مورد بررسی قرارگیرد و در نهایت ابعاد و فواصل بهینه‌ای جهت رسیدن به بیشترین ظرفیت خمشی پیشنهاد گردد.

کلمات کلیدی: مقاوم‌سازی خمشی، مصالح FRP، تیرهای بتن مسلح، روش NSM، هندسه شیارها.

۱.مقدمه

به دنبال فرسوده شدن سازه‌های زیربنایی و به منظور تقویت سازه‌ها همچنین برای برآورده کردن شرایط سخت‌گیرانهٔ طراحی، طی دو دههٔ اخیر تأکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم سازی سازه‌ها در سراسر جهان، صورت گرفته است. از طرفی بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها به‌خصوص در مناطق زلزله خیز، اهمیت فراوانی یافته است. در این میان تکنیک‌های استفاده از مواد مرکب FRP به‌عنوان مسلح کنندهٔ خارجی(EBR) به دلیل خصوصیات منحصر به فرد آن، از جمله مقاومت بالا، سبکی، مقاومت شیمیایی و سهولت اجرا، در مقاوم سازی و احیاء سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. از طرف دیگر، این تکنیک‌ها به دلیل اجرای سریع و هزینه‌های کم جذابیت ویژه‌ای یافته‌اند. به مرور زمان و با توجه به پیشرفت تحقیقات علمی در این عرصه مشخص گردید که این روش نیز دارای کاستی‌ها و مشکلاتی می‌باشد. بنابراین برای غلبه بر این ضعف‌ها تلاش‌های بسیاری صورت گرفته و روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده که یکی از قابل قبول‌ترین آنها روش نصب نزدیک سطح (NSM) می‌باشد. مبنای این روش قرار دادن میله یا تسمه‌های FRP در شیارهای ایجاد شده درسطح بتن می‌باشد. از مزایای این روش بهبود پیوستگی و انتقال نیرو در بتن اطراف الیاف FRP می‌باشد.

با بررسی پژوهش‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام یافته، چنین استنباط می‌شود که ابعاد و فواصل شیارها در روش NSM کمتر مورد توجه قرار گرفته همچنین در آیین‌نامه‌های موجود این پارامترها فقط به صورت چند محدودیت اجرایی مطرح شده است. در این پژوهش سعی شده تا با استفاده از روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس، تاثیر تغییر ابعاد و فاصله بین شیارها بر نحوه توزیع تنش در اطراف آنها و همچنین رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح مورد بررسی قرارگیرد.

۲. پیشینه پژوهش

تاکنون تحقیقات فراوانی پیرامون استفاده از میله‌های FRP به روش NSM انجام شده است که در این بخش به تعدادی از آنها اشاره می شود. اولین کاربرد این ایده در دهه‌ی ۱۹۵۰در شمال سوئد به منظور مقاوم سازی دال یک پل در قسمت لنگر منفی، صورت گرفت[۱]. چندین سال بعد نانی در سال ۲۰۰۰، رفتار پانلهای عرشه پل با تکیه‌گاه ساده، تقویت شده با لایه‌های CFRP به روش EBR و همچنین با میلگردهای CFRP به روش NSM را مورد بررسی قرار داده است. براساس نتایج به دست آمده مقاومت خمشی عرشه‌های تقویت شده با ورق‌های CFRP به روش EBR به میزان ۱۷درصد، و برای عرشه‌های تقویت شده به روش NSM با میلگردهای FRP، ۲۹ درصد افزایش پیدا کرده بود[۲].

در سال ۲۰۰۰، لاتگولا و نانی ودی‌لورنزیس برای بررسی ظرفیت خمشی تیرهای تقویت شده با میله‌های FRP به روش NSM ، ۴ عدد تیر بتن مسلح با سطح مقطع T شکل را مورد آزمایش قرار داده‌اند. تیرهای مورد استفاده در این آزمایش با توجه به مشخصات میله FRP مورد استفاده در آنها به صورت زیر نامگذاری شده‌اند. تیرBFV بدون تقویت خارجی به عنوان تیر کنترل و تیرهای BFC3 و BFC4 به ترتیب دارای دو میله‌ی Sandblast CFRP نمره ۳و۴، همچنین تیر BFG4 با دو میله‌ی CFRP Deformed نمره۴می‌باشند[۳]. به منظور مشخص کردن تاثیر نوع مواد مصرفی و هندسه شیارها بر رفتار تیرهای تقویت شده به روش NSM، دی لورنزیس و نانی در سال ۲۰۰۱ ، خصوصیات کششی میله FRP و مکانیزم انتقال بار بین میله‌های NSM-FRP و بتن را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها از ۵ عدد تیر T شکل برعکس در آزمایش خود استفاده کرده‌اند. تیرها با دهانه برشی ۴۸۳ میلیمتر در چهار نقطه خمشی تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه شیار از ۱۲/۷ به ۱۹ و ۲۵/۵ میلیمتر ،در میزان بار نهایی به ترتیب ۱۵و ۸ درصد افزایش ایجاد می‌کند. با افزایش اندازه شیارها ضخامت کاور اپوکسی نیز افزایش پیدا می‌کند که این امر باعث افزایش مقاومت در برابر شکاف خوردگی و همچنین افزایش بار نهایی می‌شود[۴].

ال هاچا در سال۲۰۰۴، به همراه ریزکالا ، عملکرد سازه‌ای تیرهای بتن مسلح تقویت شده به روش NSM با تیرهای تقویت شده به EBR مورد مقایسه قرار داده‌اند. در این آزمایش هشت عدد تیر T شکل مورد آزمایش قرار داده‌اند. یکی از تیرها به عنوان تیر کنترل، به منظور مقایسه با سایر تیرها، بدون هیچ‌گونه تقویتی در نظرگرفته شده، چهار تیر با سیستم‌های مختلف NSM- FRP

یک میلگرد CFRP، دو نوع نوار CFRP و یک نوار GFRP مقاوم‌سازی شده‌اند. سه تیر باقیمانده نیز با اتصال خارجی نوارهای GFRP و CFRP تقویت شده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش مشاهده می‌شود که، استفاده از میلگردها و نوارهای CFRP با سختی محوری یکسان، باعث افزایش مقاومت نهائی تیرهامی‌شوند. نوارهای CFRP با اتصال خارجی، مقاومت تیرهای B2a و B3a را در مقایسه با تیر تقویت نشده به میزان ۱۶/۶٪ و ۲۵٪ افزایش می‌دهند. این افزایش مقاومت، تا لحظه شکست ناشی از جدا شدن نوارهای با اتصال خارجی از سطح بتن ادامه پیدا می‌کند. همچنین نوارهای CFRP که به روش NSM متصل شده‌اند، مقاومت را به ترتیب در تیرها B3 و B2 به میزان ۷۹ و ۹۹ درصد افزایش می‌دهند. مقدار افزایش مقاومت در صورت استفاده از نوارهای CFRP به روش NSM حدوداً ۴ تا ۴/۸ برابر مقادیر به دست آمده در روش EBR می باشد[۵].

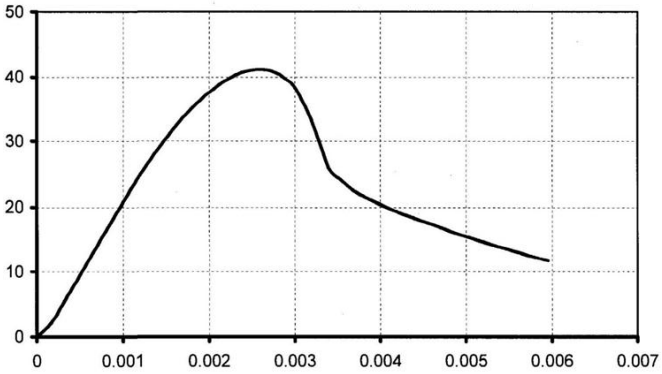
در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۸، سلیمان با انجام آزمایش‌هایی تاثیر پارامترهای مختلف، از جمله طول چسبندگی، نوع میله FRP و ابعاد شیار بر رفتار تیرهای تقویت شده با میله‌های FRP به روش NSM را مورد بررسی قرار داده است.

نتیجه حاصل از آزمایش تیرهای موجود در این پژوهش بیانگر این است که افزایش طول چسبندگی تا حد مشخصی باعث افزایش بار نهایی می‌گردد، در صورتیکه طول چسبندگی از این حد فراتر رود، افزایش کمتری در بار نهایی مشاهده می‌شود. اگرچه این نتایج می‌توانند با تغییر درصد فولادگذاری و قطر میله NSM-FRP تغییر پیدا کنند. همچنین با تغییر نوع میله FRP از CFRP به GFRP مشاهده می‌گردد که تیرهای تقویت شده با میله GFRP بارهای بزرگی را تا لحظه شکست تحمل می‌کنند اما به علت مدول الاستیسیته پایین میله‌های GFRP دارای سختی کمتر می‌باشند. به منظور بررسی ابعاد شیار در این پژوهش تیرها با شیارهایی به ابعاد ۱/۵و ۲ برابر قطر میله FRP در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در صورتیکه طول چسبندگی کافی باشد، تیرهایی با اندازه شیار ۲d نسبت به شیار با اندازه ۱/۵dشامل حجم بیشتری از اپوکسی می‌شوند، بنابراین مقاومت کششی بیشتری نیز خواهند داشت[۶].

در مطالعه‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام یافته، ابعاد و فواصل شیارها کمتر مورد توجه قرار گرفته و همچنین در آیین‌نامه‌های موجود این پارامترها فقط به صورت چند محدودیت اجرایی بیان شده است. در این پژوهش سعی شده تا با استفاده از روش المان محدود و توسط نرم‌افزار آباکوس ،تاثیر تغییر ابعاد و فاصله بین شیارها بر نحوه توزیع تنش در اطراف آنها و همچنین رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح مورد بررسی قرارگیرد

۳. مدل‌سازی المان محدود

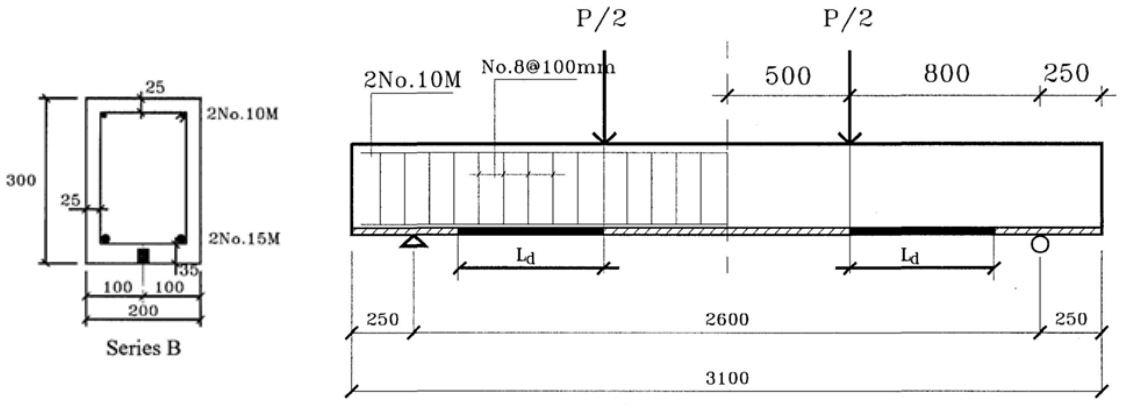
به منظور اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از نرم‌افزار المان محدود و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی ، تیرهای B0 و B2 که توسط سلیمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند انتخاب گردیده، و توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی شده است. نمونه در مقیاس واقعی و به ابعاد ۲۰۰ x ۳۰۰ x ۳۱۰۰ میلی‌متر با استفاده از بتن با مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی ۴۱/۵ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۹ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. نمودار تنش-کرنش بتن مصرفی در این آزمایش مطابق شکل (۱) می‌باشد.



شکل۱ - نمودار تنش-کرنش بتن

برای مدل‌سازی رفتار بتن از مدل آسیب خمیری بتن استفاده شده است. در این معیار امکان مدل‌سازی رفتار الاستیک و پلاستیک بتن هم در ناحیه کششی و هم در ناحیه فشاری وجود دارد. المان در نظر گرفته شده جهت مدل‌سازی مصالح بتنی، المان C3D8 از نوع SOLID هشت گرهی با سه درجه آزادی در هر گره می‌باشد.

در مدل المان محدود رفتار میلگردهای فولادی ، الاستیک- پلاستیک کامل فرض شده است و نیز میلگردها به صورت المان خرپایی T3D2 با دوگره و سه درجه آزادی در هر گره مدل‌سازی شده است. این المان‌ها فقط قابلیت تحمل نیروی محوری را دارد و به صورت مجزا از بتن عمل می‌کند. بنابراین برای مدل‌سازی رفتار تیر به صورت بتن مسلح این المان‌ها در داخل بتن نهفته می‌شوند. جزئیات آرماتورگذاری تیرها مطابق شکل(۲) می‌باشد.



شکل ۲– مشخصات ابعاد و آرماتورگذاری تیرها

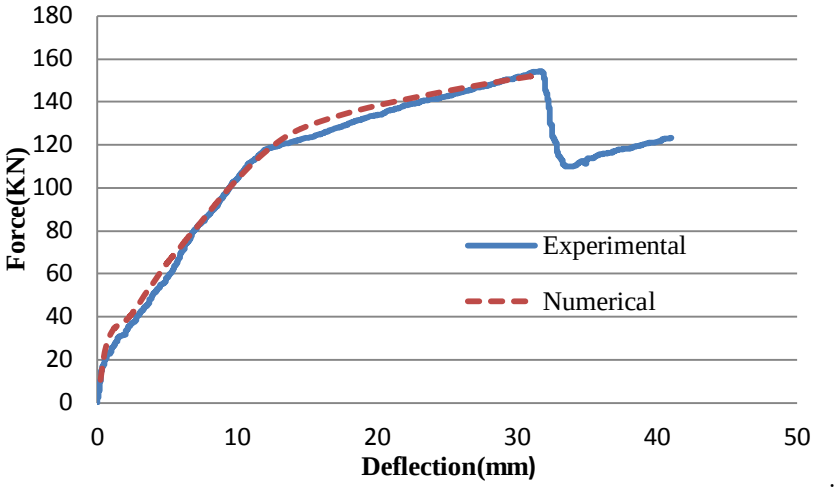
برای مدلسازی میله های FRP نیز از المان‌های خرپایی T3D2 استفاده شده است. مشخصات میلگردهای فولادی و میله‌های CFRP مورد نیاز جهت مدلسازی المان محدود در جدول(۱) ارائه شده است.

چسب اپوکسی نیز دارای رفتار الاستیک خطی تا مرحله شکست می‌باشد. در این پژوهش چسب اپوکسی استفاده شده از نوع HIT RE500 و دارای مدول الاستیسیته ۱۴۹۳ مگاپاسکال و مقاومت چسبندگی ۱۲.۴ مگاپاسکال می‌باشد.

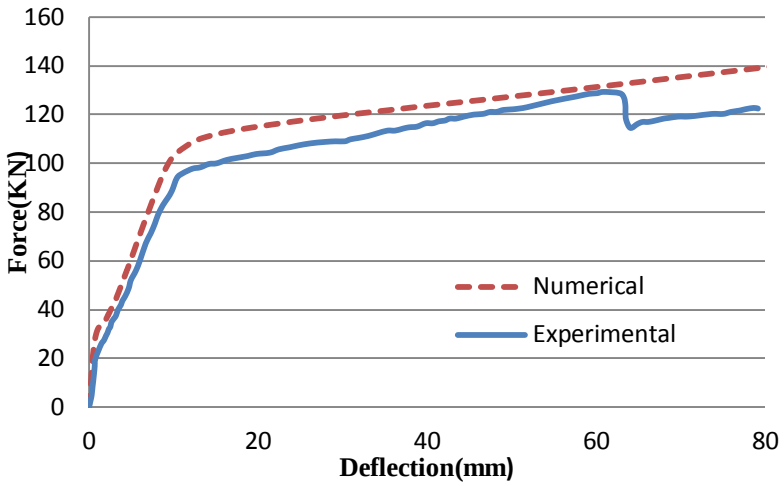
جدول ۱- مشخصات میلگردهای فولادی و میله‌های CFRP

نوع میلگرد	قطر میله (mm)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش نهایی ٪
CFRP	۹/۵	۷۱	۱۵۹۶	۱/۴
فولاد	۱۱/۳	۲۰۰	f_y=۴۵۴ f_u=۵۷۱	۰/۲۳
	۱۵/۹	۲۰۰	f_y=۴۶۰ f_u=۸۵۸	۰/۲۳

منحنی نهایی بار- تغییر مکان مدلهای تحلیلی B2 و B0 مطابق با شکل‌های (۳) و (۴) می‌باشد. همانطور که در این شکل‌ها مشخص است مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی تطابق نسبتا خوبی باهم دارند لذا می‌توان از این مدل المان محدود به منظور مطالعات پارامتریک و ساخت مدل‌های المان محدود دیگر، استفاده کرد.



شکل ۳- مقایسه منحنی بار- تغییرمکان‌وسط تیر B2

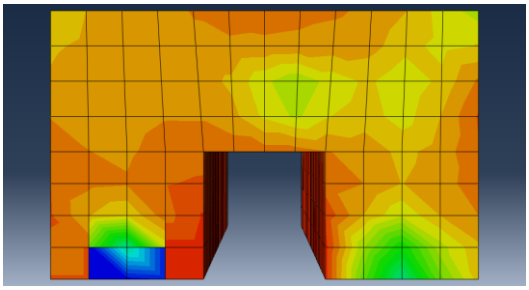


شکل ۴- مقایسه منحنی بار- تغییرمکان‌وسط تیرکنترلB0

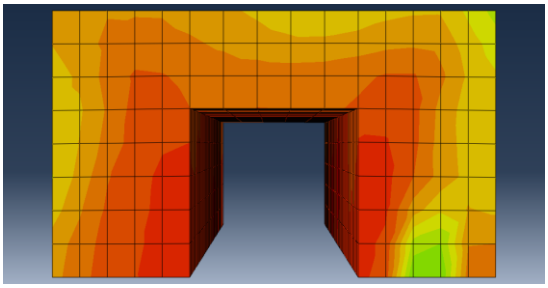
۴.مطالعه پارامتریک

ابعاد شیار

به منظور بررسی تاثیر عرض و عمق شیار در روش NSM بر ظرفیت خمشی تیرها، ۶ عدد تیر با شیارهایی به ابعاد ۱/۵dx۱/۵d ،۲dx۱/۵d ،۲dx ۲d ،۲d x۲/۵d ،۱/۵d x۲d و ۲/۵d x۲d مدلسازی شده‌اند. (d قطر میله FRP می‌باشد.) هندسه تیرها و مشخصات مصالح مصرفی مطابق مدلسازی‌های قبل در نظر گرفته شده است. با بررسی کانتورهای تنش در اطراف شیارها مشاهده می‌شود که با افزایش عمق و عرض شیار، تنش در اطراف آن افزایش پیدا می‌کند. البته این افزایش تنش ، با تغییر عمق شیار محسوس‌تر می‌باشد. به عنوان نمونه کانتورهای تنش اطراف دو شیار در شکلهای (۵) و (۶) نشان داده شده است.



شکل۵-کانتور تنش شیار۱/۵dx۱/۵d



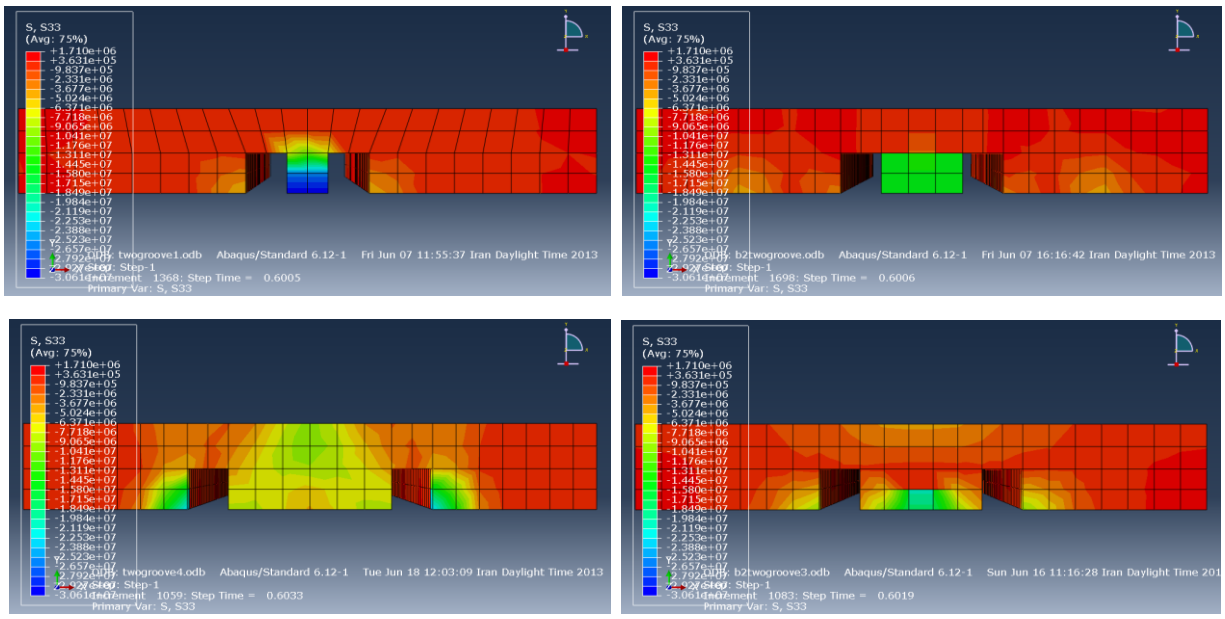
شکل۶- کانتور تنش شیار۲dx۲d

در این دو شکل به وضوح می‌توان مشاهده نمود که تنش در اطراف شیار به ابعاد ۱/۵d x۱/۵d کمتر از تنش در اطراف شیار۲d x۲d می‌باشد.

نمودارهای بار- تغییر مکان وسط تیر برای تیرهایی با ابعاد شیار متفاوت تقریبا برهم منطبق می‌باشند و فقط ظرفیت تیر به میزان اندکی با افزایش اندازه شیار افزایش پیدا کرده است. در حالت کلی در صورتیکه طول چسبندگی کافی باشد، تیرهایی با اندازه شیار بزرگتر شامل حجم بیشتری از اپوکسی می‌شوند، بنابراین مقاومت کششی بیشتری نیز خواهند داشت همچنین با افزایش اندازه شیارها ضخامت کاور اپوکسی نیز افزایش پیدا می‌کند که این امر باعث افزایش مقاومت در برابر شکاف خوردگی و همچنین افزایش بار نهایی می‌شود.

فاصله شیار

یکی دیگر از پارامترهای موردر بررسی در این پژوهش فاصله بین شیارها می باشد. برای بررسی تاثیر این پارامتر بر ظرفیت خمشی تیرها، چهار عدد تیر با دو شیار به فاصله مختلف h،۲h،۱/۵h،h ،۲/۵ مدلسازی شده است. در این مدلسازی فاصله بین شیارها به صورت ضریبی از عمق شیار در نظر گرفته شده است. با بررسی کانتورهای تنش در اطراف شیار ها طبق شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله، میزان تنش بین شیارها کاهش پیدا کرده و کانتورهای تنش اطراف هر شیارها با یکدیگر تداخل کمتری دارند. بنابراین به نظر می‌رسد که کانتورهای تنش اطراف هر شیاردر فاصله ۲h کاملا از هم جدا می‌شوند لذا می‌توان این فاصله را به عنوان فاصله بهینه در نظر گرفت.

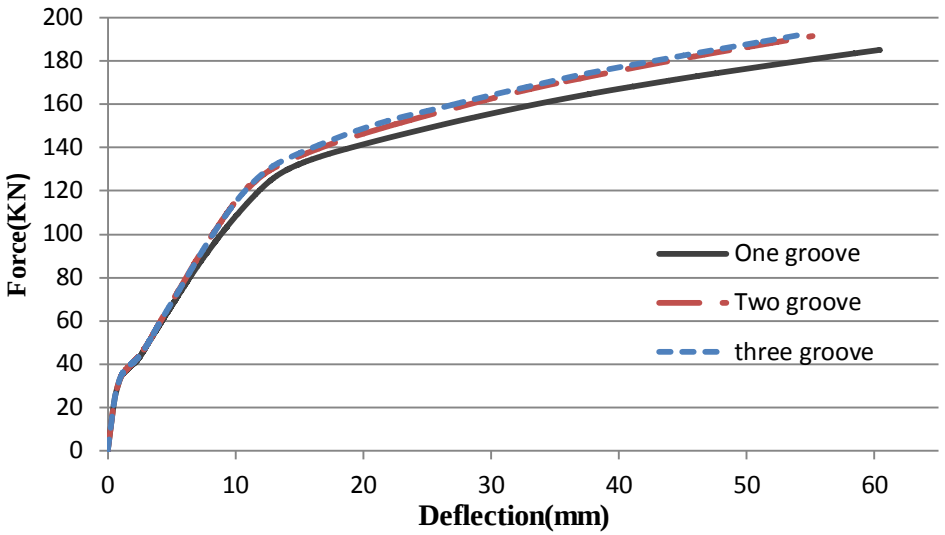


شکل ۷- کانتور تنش اطراف شیارها

تقسیم شیار به چند شیار متعدد

در این بخش از پژوهش سعی شده تا با تقسیم مساحت مقطع شیار و میله FRP به چند شیار کوچکتر، تاثیر افزایش تعداد شیار با مجموع مساحت ثابت بر ظرفیت خمشی تیر ها مورد بررسی قرار گیرد . بدین منظور ابتدا تیری با یک شیار به مساحت سطح مقطع ۳۶۱ میلی‌مترمربع و یک میله CFRP با مساحت ۷۰/۸۸ میلی‌متر مربع مدلسازی شده ، سپس دو تیر دیگر با تقسیم این مساحت‌ها، به دو و سه شیار کوچکتر مدلسازی شده است.

با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شودکه با افزایش تعداد شیار ، هرچند میزان حجم اپوکسی و CFRP مصرفی ثابت می‌باشد ولی به علت افزایش سطح چسبندگی بین بتن و چسب و بنابراین افزایش مقاومت کششی، ظرفیت تیر افزایش می یابد .



شکل۸ – مقایسه منحنی بار-تغییر مکان تیرها

واضح است که با تقسیم یک شیار به دو و سه شیار، طول چسبندگی افزایش پیدا می‌کند، اما با توجه به شکل(۸) افزایش طول چسبندگی تا حد مشخصی باعث افزایش بار نهایی می‌گردد، در صورتیکه طول چسبندگی از این حد فراتر رود، افزایش کمتری در بار نهایی مشاهده می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارها و شکل‌های ارائه شده می‌توان نتایج زیر را استنباط نمود:

۱. ظرفیت تیرهای بتنی با افزایش ابعاد شیار افزایش ناچیزی یافته است .
۲. با افزایش ابعاد شیار تنش در اطراف آن افزایش پیدا می‌کند.
۳. با افزایش فاصله شیار در روش NSM، مقدار تنش بین دوشیار کاهش پیدا می‌کند.
۴. با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی چنین برداشت می شود که می‌توان دو برابر عمق شیار را به عنوان فاصله بهینه در نظر گرفت .

۵. بکار بردن چندین شیار به جای یک شیار با مجموع مساحت معادل حالت اول ، باعث افزایش سطح چسبندگی بین بتن و چسب و در نهایت افزایش مقاومت کششی و ظرفیت تیر خواهد شد.

۶. فهرست مراجع

[1] Apslund, S. Q. "**Strengthening Bridge Slabs with Grouted Reinforcement**" ACI Structural Journal, Vol. 52, No. 6, pp. 397-406,1949

[2] Nanni, A. "**FRP Reinforcement for Bridge Structures**." Proceedings, Structural Engineering Conference, University of Kansas, Lawrence, Kans., Mar. 16, pp. 1-5, 2000

[3] De Lorenzis,L., Nanni, A., and Tegila, A. L. "**Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods**." International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000, Milan, Italy, May 9-1, 2000

[4] De Lorenzis, L., and Nanni, A."**Characterization of FRP Rods as Near Surface Mounted Reinforcement**" Journal of Composites for Construction, ASCE, V. 5, No. 2,pp. 114-121, 2001

[5] El-Hacha, R., and Rizkalla, S. "**Near-Surface-Mounted Fiber- Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures**" ACI Structural Journal, V. 101, V. 5, Sept.-Oct., pp. 717-72.6. 2004

[6] Soliman, S.M.. "**Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Near surface Mounted FRP Bars**" PhD Dissertation ,Civil Engineering Department, Sherbrooke University, Canada, 2008