

پایان نامه برای دریافت کارشناسی ارشد

رشته مهندسی عمران گرایش سازه

عنوان

آرایش بهینه‌ی نصب مصالح FRP در مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح با روش تعبیه در

نزدیک سطح

نگارنده

ابراهیم مزین بازکیایی

استاد راهنما

دکتر حمیدرضا خوشنود

استاد مشاور

مهندس شاهین چرختاب

اسفند ۱۳۹۳

تقدیم به

تقدیم به پدر و مادر و خانواده‌ی عزیز و ارجمندم که در همه‌ی عرصه‌های زندگی حامی و یار و یاورم بوده و امکانات زندگی و شرایط تحصیل را برایم فراهم نموده‌اند .

و تقدیم به تمام انسانهایی که همیشه خدا را در نظر داشته، گفتارشان صواب و راه و رسمشان اعتدال و رفتارشان با فروتنی آمیخته است. کسانی که گوشه‌های خود را وقف دانش با منفعت نموده‌اند، جویای علم هستند و دانش را به بردباری و گفتار را با کردار زینت بخشیده‌اند. دلشان خاشع است و نفسشان قانع. به خیرشان امید است و از شرشان ایمنی. عیوب مردم را دنبال نمی‌کنند و از گمان بد دوری می‌نمایند. جز رضای الهی و پیشرفت و سعادت جامعه، هدفی ندارند. انسانهای پاک و زلالی که بوی ناب آدمیت می‌دهند.

و نیز تقدیم به انسانهای آزاده‌ای که جان و مال و قلم خود را در حفظ و سرافرازی این سرزمین فدا نموده و می‌نمایند.

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس خدایی را که انواع مخلوقات را پدید آورد و ساخته‌هایش را با حکمتش محکم نمود، خدایی که ساخته‌های هیچ سازنده‌ای همانند ساخته‌های او نیست و اوست پاداش‌دهنده‌ی هر سازنده.

مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمَخْلُوقَ لَمْ يَشْكُرِ الْخَالِقَ

کسی که مخلوق را شکرگزاری نکند، خالق را شکر گزار نیست

با تشکر از پدر و مادر دلسوز و مهربانم که زحماتشان با هیچ واژه‌ای قابل قدردانی نیست. خدایا شکرگزاری از آنان در توانم نیست، تو خود جوابگوی مهر و محبت‌هایی که به من داشته‌اند، باش. خداوندا هر دو را به پاس تربیت من جزای نیکو ده و در مقابل آنکه مرا گرمی داشتند جزای خیر عطا فرما و در دنیا و آخرت برایشان نیکی قرار بده. خداوندا، صدایم را در محضر آنان ملایم کن و گفتارم را بر آنان دلنشین فرما و خویم را نسبت به آنان نرمی عنایت کن و قلبم را بر هر دو مهربان ساز و مرا نسبت به هر دو خوش‌رفتار و دلسوز قرار ده.

با تشکر از برادر عزیزم که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم بود و همیشه مانند یک دوست واقعی، در تلخی و شیرینی روزگار، کنارم و در فراز و نشیب زندگانی همراهم بوده و وجودش مایه دلگرمی من می‌باشد و از خداوند رحمان، خیر دنیا و آخرت را برای او و خانواده‌اش آرزو مندم.

با تشکر از استاد عزیزم دکتر خوشنود که نام و یادشان همیشه در ذهن و قلبم خواهد بود، برای ایشان سلامتی و سعادت و توفیق روز افزون از خداوند متعال خواستارم و کمال تشکر را دارم.

و با تشکر خالصانه خدمت همه‌ی کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند.

چکیده

گستره‌ی استفاده از مصالح FRP برای مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح در سال‌های اخیر رو به افزایش است. علاوه بر روش متداول استفاده از ورقهای FRP که روی سطح بتن چسبانده می‌شوند؛ اخیراً تحقیقات زیادی درمورد روش نصب نزدیک سطح (NSM) صورت گرفته است. در بخشی از این پایان‌نامه، آزمایشاتی روی تیرهای بتن مسلح تقویت شده در برش به روش NSM و با میلگرد GFRP انجام گرفت. تیرها در ترم ظرفیت بارنهایی و مدگسیختگی ارزیابی شدند. نتایج آزمایشات نشان داد که با مقدار برابر GFRP و فاصله‌ی نصب یکسان، کاربرد میلگردهای GFRP با زاویه‌ی ۶۰ درجه بیشتر از ۹۰ درجه تاثیر دارد. همچنین مشخص شد که با مقدار برابر GFRP و زاویه‌ی نصب یکسان، استفاده از میلگرد با قطر کوچکتر و با فاصله‌ی کمتر، تاثیر بیشتری در ظرفیت باربری نهایی تیر تقویت شده دارد. در بخش دیگر این پایان‌نامه، تیرهای بتن مسلح تقویت شده در برش با مصالح GFRP و با روش NSM مدل‌سازی عددی گردید و نتایج مدل‌سازی ارزیابی شد. در روشهای متعارف مدل‌سازی رفتار چسبندگی بین بتن و فولاد و همچنین رفتار ترک‌خوردگی بتن با فرضیات ساده شده‌ای مدل می‌شوند. مشاهده شد که در تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM با تعداد برابر و فاصله‌ی نصب یکسان میله‌ی GFRP، آرایش میله‌ها با زاویه‌ی ۴۵ درجه، بیشترین تاثیر را نسبت به زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه دارد. همچنین مشخص گردید که با مقدار برابر GFRP و فاصله‌ی نصب یکسان، آرایش میلگردهای GFRP با زاویه‌ی ۶۰ درجه بیشتر از ۹۰ درجه تاثیر دارد. بررسی نشان داد که در تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM با زاویه‌ی نصب یکسان میله‌ی GFRP، استفاده از میله با ابعاد کوچکتر و با فاصله‌ی کمتر، تاثیر بیشتری بر کارایی تیر تقویت شده دارد.

واژه‌گان کلیدی: مقاوم سازی برشی، تیر بتن مسلح، روش تعبیه در نزدیک سطح، GFRP

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول ها	۵
فهرست نمودارها	۵
فهرست شکلها	ح

فصل اول : مقدمه

۱-۱ مقدمه	۱
۲-۱ تاریخچه	۲
۳-۱ بیان مسأله، اهمیت تحقیق و فرضیه ها	۴
۱-۳-۱ اهداف پایان نامه	۵
۲-۳-۱ ساختار پایان نامه	۵
۳-۳-۱ فرضیه ها	۶
فصل دوم	۷
مروری بر مطالعات و کارهای انجام شده	۷
۱-۲ FRP چیست؟	۸
۲-۲ تقویت کننده ها (الیاف)	۸
۱-۲-۲ الیاف شیشه	۱۰
۲-۲-۲ الیاف کربن	۱۱
۳-۲-۲ آرامید	۱۲
۳-۲ زمینه	۱۳
۴-۲ خصوصیات FRP	۱۳
۱-۴-۲ خصوصیات فیزیکی	۱۳
۱-۱-۴-۲ چگالی	۱۳
۲-۱-۴-۲ ضریب انبساط حرارتی	۱۴

۱۵	۲-۴-۲ خصوصیات و رفتار مکانیکی
۱۵	۱-۲-۴-۲ رفتار کششی
۱۶	۲-۲-۴-۲ رفتار فشاری
۱۶	۳-۲-۴-۲ رفتار برشی
۱۷	۴-۲-۴-۲ رفتار چسبندگی
۱۷	۵-۲-۴-۲ رفتار تابع زمان
۱۸	۶-۲-۴-۲ دوام
۱۹	۷-۲-۴-۲ نگهداری و جابجایی
۱۹	۵-۲ انواع محصولات FRP
۱۹	۱-۵-۲ میل‌های کامپوزیتی
۲۰	۲-۵-۲ شبکه‌های کامپوزیتی
۲۱	۳-۵-۲ کابل‌های کامپوزیتی
۲۱	۴-۵-۲ ورقه‌های کامپوزیتی
۲۲	۵-۵-۲ پروفیل‌های ساختمانی کامپوزیتی
۲۳	۶-۲ کاربرد مصالح FRP
۲۵	۱-۶-۲ کاربرد FRP در تقویت ستون‌ها
۲۶	۲-۶-۲ کاربرد FRP در تقویت دیوارهای برشی
۲۶	۳-۶-۲ کاربرد FRP در تقویت دال‌ها
۲۷	۴-۶-۲ کاربرد FRP در تقویت اتصالات
۲۷	۵-۶-۲ کاربرد FRP در تقویت برشی و خمشی تیرها
۲۹	۷-۲ روشهای نصب مصالح FRP در سازه‌های بتنی
۲۹	۱-۷-۲ روش اتصال خارجی (EBR)
۳۲	۲-۷-۲ روش تعبیه در نزدیک سطح (NSM)
۳۵	۳-۷-۲ مودهای گسیختگی برشی در تیر تقویت‌شده با مصالح FRP
۳۵	۱-۳-۷-۲ انواع مکانیزم برشی تیر تقویت‌شده به روش EBR
۳۵	۱-۱-۳-۷-۲ گسیختگی برشی با پارگی ورق FRP

۳۵	 گسیختگی برشی بدون پارگی ورق FRP
۳۶	 گسیختگی برشی ناشی از عدم پیوند یا چسبندگی ورق FRP
۳۶	 گسیختگی نزدیک مهار مکانیکی
۳۶	 گسیختگی محلی
۳۶	 انواع مکانیزم شکست تیر تقویت شده به روش NSM
۳۷	 مزایای روش تعبیه در نزدیک سطح
۳۷	 ۸- بررسی تحقیقات انجام شده
۵۰	 فصل سوم
۵۰	 تشریح آزمایشهای انجام شده
۵۱	 ۱-۳ مقدمه
۵۲	 ۲-۳ خواص مصالح مصرفی
۵۴	 ۳-۳ روش انجام مقاوم سازی
۵۷	 ۴-۳ مشخصات تیرهای آزمایش شده
۵۹	 ۵-۳ انجام آزمایش
۶۱	 ۶-۳ مد گسیختگی
۶۳	 ۷-۳ بار نهایی تیرها
۶۶	 ۸-۳ نتیجه گیری
۶۸	 فصل چهارم
۶۸	 تشریح مدل سازی عددی
۶۹	 ۱-۴ مقدمه
۷۰	 ۲-۴ نمونه آزمایشگاهی
۷۱	 ۳-۴ مشخصات و نحوه مدل سازی
۷۵	 ۴-۴ بررسی نتایج مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی
۷۶	 ۵-۴ مدل سازی عددی جهت بررسی آرایش بهینه نصب مصالح FRP
۷۶	 ۱-۵-۴ تشریح تیرهای مدل شده
۸۱	 ۲-۵-۴ مدل سازی عددی تیرها

۸۲	۶-۴ محاسبه‌ی نیروی برشی FRP در تقویت برشی تیر به روش NSM
۸۵	۷-۴ نتایج مدل سازی عددی
۸۶	۱-۷-۴ بررسی تاثیر تعداد و فاصله‌ی میله GFRP در تقویت برشی تیر به روش NSM
۹۳	۲-۷-۴ بررسی زاویه‌ی نصب میله‌ی GFRP در تقویت برشی تیر به روش NSM
۱۰۱	۸-۴ نتیجه گیری
۱۰۳	فصل پنجم
۱۰۳	نتیجه گیری
۱۰۴	۱-۵ نتیجه گیری
۱۰۶	منابع و مراجع

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۴	جدول ۱-۲ چگالی مواد FRP
۱۴	جدول ۲-۲ ضریب انبساط حرارتی مصالح FRP
۱۶	جدول ۳-۲ خصوصیات مکانیکی مصالح FRP و فولاد
۱۸	جدول ۴-۲ مقایسه ویژگی‌های الیاف کربن و شیشه و آرامید
۴۲	جدول ۵-۲ مشخصات تیرها
۴۲	جدول ۶-۲ نتایج آزمایش
۴۴	جدول ۷-۲ نتایج آزمایش
۴۷	جدول ۸-۲ مشخصات تیرها
۴۷	جدول ۹-۲ نتایج آزمایش
۷۷	جدول ۱-۴ جزئیات تیرهای مدل‌سازی شده
۸۴	جدول ۲-۴ محاسبه نیروی برشی FRP و افزایش ظرفیت برشی تیرها طبق روابط پیشنهادی نانی
۸۷	جدول ۳-۴ مقایسه تیرهای Beam2 و Beam5 و Beam8 با زاویه نصب ۹۰ درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1
۸۹	جدول ۴-۴ مقایسه تیرهای Beam3 و Beam6 و Beam9 با زاویه نصب ۶۰ درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1
۹۱	جدول ۵-۴ مقایسه تیرهای Beam4 و Beam7 و Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1
۹۴	جدول ۶-۴ مقایسه تیرهای Beam2 با زاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam3 با زاویه نصب ۶۰ درجه و Beam4 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP با تیر بدون تقویت Beam1
۹۶	جدول ۷-۴ مقایسه تیرهای Beam5 با زاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam6 با زاویه نصب ۶۰ درجه و Beam7 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1
۹۸	جدول ۸-۴ مقایسه تیرهای Beam8 با زاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam9 با زاویه نصب ۶۰ درجه و Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1
۱۰۰	جدول ۹-۴ مقایسه کلیه تیرهای تقویت شده با تیر بدون تقویت Beam1

فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار ۱-۲ رفتار تنش-کرنش الیاف مختلف در کشش	۱۵
نمودار ۲-۲ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرها	۳۹
نمودار ۳-۲ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرها	۴۴
نمودار ۴-۲ منحنی نیرو-تغییر مکان تیر تقویت شده با CFRP	۴۷
نمودار ۱-۴ منحنی تنش-کرنش بتن Mander	۷۳
نمودار ۲-۴ منحنی تنش-کرنش میلگردها	۷۴
نمودار ۳-۴ منحنی نیرو-تغییر مکان تیر آزمایشگاهی CB و تیر CBA مدل سازی شده با نرم افزار ...	۷۵
نمودار ۴-۴ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرهای Beam2 و Beam5 و Beam8 با زاویه نصب ۹۰ درجه ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1	۸۷
نمودار ۵-۴ درصد کاهش تغییر مکان وسط دهانه ی تیرهای Beam2 و Beam5 و Beam8 با زاویه نصب ۹۰ درجه ی GFRP در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1	۸۸
نمودار ۶-۴ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرهای Beam3 و Beam6 و Beam9 با زاویه نصب ۶۰ درجه ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1	۸۹
نمودار ۷-۴ درصد کاهش تغییر مکان وسط دهانه ی تیرهای Beam3 و Beam6 و Beam9 با زاویه نصب ۶۰ درجه ی GFRP در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1	۹۰
نمودار ۸-۴ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرهای Beam4 و Beam7 و Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1	۹۱
نمودار ۹-۴ درصد تقویت تیرهای Beam4 و Beam7 و Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1	۹۲
نمودار ۱۰-۴ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرهای Beam2 با زاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam3 با زاویه نصب ۶۰ درجه و Beam4 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1	۹۳
نمودار ۱۱-۴ درصد تقویت تیرهای Beam2 با زاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam3 با زاویه نصب ۶۰ درجه و Beam4 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1	۹۴
نمودار ۱۲-۴ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرهای Beam5 با زاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam6 با زاویه نصب ۶۰ درجه و Beam7 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1	۹۵

نمودار ۴-۱۳ درصد کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی Beam5 بازاویه نصب ۹۰ درجه، Beam6 بازاویه نصب ۶۰ درجه و Beam7 بازاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP و درمقایسه با تیربدون تقویت Beam1 ۹۶

نمودار ۴-۱۴ منحنی نیرو-تغییرمکان تیرهای Beam8 بازاویه نصب ۹۰ درجه، Beam9 بازاویه نصب ۶۰ درجه و Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP و تیربدون تقویت Beam1 ۹۷

نمودار ۴-۱۵ درصد تقویت تیرهای Beam8 بازاویه نصب ۹۰ درجه، Beam9 بازاویه نصب ۶۰ درجه و Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP درمقایسه با تیربدون تقویت Beam1 ۹۸

نمودار ۴-۱۶ منحنی نیرو-تغییرمکان کلیه‌ی تیرهای مدل سازی شده ۹۹

نمودار ۴-۱۷ درصد تقویت کلیه‌ی تیرهای تقویت شده در مقایسه با هم ۱۰۰

فهرست شکلها

صفحه	عنوان
۹.....	شکل ۲-۱ ساختار FRP
۱۰.....	شکل ۲-۲ شکل‌های مختلف GFRP
۱۱.....	شکل ۲-۳ شکل‌های مختلف CFRP
۱۲.....	شکل ۲-۴ شکل‌های مختلف AFRP
۲۰.....	شکل ۲-۵ میلگردهای FRP
۲۰.....	شکل ۲-۶ شبکه‌های FRP
۲۱.....	شکل ۲-۷ نوار و طناب FRP
۲۲.....	شکل ۲-۸ ورقه‌ی FRP
۲۳.....	شکل ۲-۹ پروفیل‌های FRP
۲۶.....	شکل ۲-۱۰ تقویت ستون با ورقه‌ی FRP
۲۶.....	شکل ۲-۱۱ تقویت دیوار برشی با FRP
۲۷.....	شکل ۲-۱۲ تقویت دال با FRP
۲۷.....	شکل ۲-۱۳ تقویت اتصالات با FRP
۲۹.....	شکل ۲-۱۴ تقویت خمشی و برشی تیر با FRP
۳۲.....	شکل ۲-۱۵ مراحل اجرای روش EBR
۳۳.....	شکل ۲-۱۶ شیارها و جزئیات نصب میله FRP
۳۹.....	شکل ۲-۱۷ جزئیات مقطع و بارگذاری تیر
۴۱.....	شکل ۲-۱۸ نمای شماتیک تیرهای آزمایش شده
۴۳.....	شکل ۲-۱۹ جزئیات تیرها
۴۶.....	شکل ۲-۲۰ جزئیات و مقطع تیرها
۵۲.....	شکل ۳-۱ میلگردگذاری تیرها
۵۲.....	شکل ۳-۲ نمای شماتیک جزئیات میلگردگذاری تیرها
۵۳.....	شکل ۳-۳ آزمایش نمونه مکعبی

- شکل ۳-۴ میلگرد GFRP ۵۴
- شکل ۳-۵ علامت‌گذاری محل قرار گرفتن شیار ۵۵
- شکل ۳-۶ ایجاد شیار ۵۵
- شکل ۳-۷ تمیز کردن شیار ۵۵
- شکل ۳-۸ چسب زدن شیار ۵۶
- شکل ۳-۹ قرار دادن میلگرد GFRP در شیار ۵۶
- شکل ۳-۱۰ پر کردن شیار با چسب ۵۶
- شکل ۳-۱۱ نمای شماتیک تیر NSMV10 ۵۷
- شکل ۳-۱۲ نمای شماتیک تیر NSMV7 ۵۸
- شکل ۳-۱۳ نمای شماتیک تیر NSMIL10 ۵۸
- شکل ۳-۱۴ جزئیات مقطع شیار در روش NSM ۵۸
- شکل ۳-۱۵ تکیه گاه فولادی ۵۹
- شکل ۳-۱۶ نمای شماتیک قرارگیری تیرهای بتنی و فولادی و ریزسنگ ها ۶۰
- شکل ۳-۱۷ قرارگیری تیرهای بتنی و فولادی و ریزسنگ ها؛ شکل (a) تیر NSMV10 و NSMV7 ،
شکل (b) تیر NSMIL10 ۶۱
- شکل ۳-۱۸ ترک خوردن و گسیختگی تیر NSMV10 ۶۲
- شکل ۳-۱۹ ترک خوردن و گسیختگی تیر NSMV7 ۶۲
- شکل ۳-۲۰ ترک خوردن و گسیختگی تیر NSMIL10 ۶۳
- شکل ۳-۲۱ نمای شماتیک زاویه‌ی بین ترک برشی و میلگرد GFRP در تیر NSMV10 ۶۴
- شکل ۳-۲۲ نمای شماتیک زاویه‌ی بین ترک برشی و میلگرد GFRP در تیر NSMV7 ۶۴
- شکل ۳-۲۳ نمای شماتیک زاویه‌ی بین ترک برشی و میلگرد GFRP در تیر NSMIL10 ۶۵
- شکل ۳-۲۴ مقایسه نحوه‌ی ترک خوردن تیر آزمایش شده و تیر مدل‌سازی شده NSMV7 ۶۵
- شکل ۴-۱ مشخصات کلی تیرهای مورد آزمایش راج و سورومی ۷۰
- شکل ۴-۲ المان C3D8R ؛ المان T3D2 و المان S4R ۷۱
- شکل ۴-۳ جریئات میلگردگذاری و مقطع تیرهای مدل‌سازی شده ۷۷
- شکل ۴-۴ نمای شماتیک تیر Beam2 با نصب ۱۶ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۹۰ درجه ۷۸
- شکل ۴-۵ نمای شماتیک تیر Beam3 با نصب ۱۶ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۶۰ درجه ۷۸

- شکل ۴-۶ نمای شماتیک تیر Beam4 با نصب ۱۶ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۴۵ درجه ۷۸
- شکل ۴-۷ نمای شماتیک تیر Beam5 با نصب ۳۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۹۰ درجه ۷۹
- شکل ۴-۸ نمای شماتیک تیر Beam6 با نصب ۳۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۶۰ درجه ۷۹
- شکل ۴-۹ نمای شماتیک تیر Beam7 با نصب ۳۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۴۵ درجه ۷۹
- شکل ۴-۱۰ نمای شماتیک تیر Beam8 با نصب ۱۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۹۰ درجه ۸۰
- شکل ۴-۱۱ نمای شماتیک تیر Beam9 با نصب ۱۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۶۰ درجه ۸۰
- شکل ۴-۱۲ نمای شماتیک تیر Beam10 با نصب ۱۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۴۵ درجه ۸۰
- شکل ۴-۱۳ مدل سازی با Abaqus تیر Beam5 با نصب ۳۲ عدد میله GFRP با زاویه ۹۰ درجه ۸۱
- شکل ۴-۱۴ مش بندی تیر Beam5 با نصب ۳۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۹۰ درجه ۸۱
- شکل ۴-۱۵ پارامترهای رابطه ی نانی و همکاران ۸۳
- شکل ۴-۱۶ تغییر شکل تیر Beam1 پس از بارگذاری ۸۵
- شکل ۴-۱۷ جاری شدن میلگردهای طولی تیر Beam3 ۸۶
- شکل ۴-۱۸ جاری شدن و ترک خوردن بتن در تیر Beam1 ۸۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

در کاربردهای مهندسی، اغلب به تلفیق خواص مواد نیاز است. به عنوان مثال در صنایع هوافضا، کاربردهای زیرآبی، حمل و نقل و امثال آنها، امکان استفاده از یک نوع ماده که همه‌ی خواص مورد نظر را فراهم نماید، وجود ندارد. به عنوان مثال در صنایع هوافضا به موادی نیاز است که ضمن داشتن استحکام بالا، سبک باشند، مقاومت سایشی خوبی داشته باشند. از آنجا که نمی‌توان ماده‌ای یافت که همه خواص مورد نظر را دارا باشد، مواد مرکب یا کامپوزیت اختراع شد. کامپوزیتها موادی چند جزئی هستند که خواص آنها در مجموع از هر کدام از اجزاء بهتر است. ضمن آنکه اجزای مختلف، کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند. اگرچه کامپوزیت‌های طبیعی، فلزی و سرامیکی نیز در این بحث می‌گنجند، ولی در اینجا ما بیشتر به کامپوزیت‌های پلیمری می‌پردازیم. مواد مرکبی که در مهندسی عمران بکار می‌روند به صورت پلیمرهای مسلح با الیاف^۱ FRP می‌باشند.

FRP ها مصالحی سبک، با دوام و مقاوم هستند که امروزه به راحتی در دسترس مهندسين قرار گرفته‌اند. مصالح FRP در محیط‌های مغناطیسی عایق می‌باشند و مشکل خوردگی ندارند، بنابراین با استفاده از این مصالح از مشکل خوردگی سازه‌های بتنی می‌توان اجتناب نمود. همچنین این مصالح دارای خصوصیات برتری از قبیل مقاومت کششی بالا می‌باشد که استفاده‌ی آنها را به عنوان مسلح کننده سازه‌های بتنی مناسب می‌نماید. لازم به ذکر است که مانند هر مصالحی FRP ها دارای نقاط ضعفی نظیر حساسیت در مقابل آتش و ضعف در تحمل تنشهای فشاری و همچنین قیمت بالا می‌باشند.

^۱ Fiber Reinforced Polymer

۱-۲ تاریخچه

کامپوزیتها یا مواد چندسازه‌ای یا کاه‌گل‌های عصرجدید، رده‌ای از مواد پیشرفته هستند که در آنها از ترکیب مواد ساده به منظور ایجاد موادی جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی برتر استفاده شده است. اجزای تشکیل دهنده ویژگی خود را حفظ کرده، در یکدیگر حل نشده و با هم ممزوج نمی‌شوند. استفاده از این مواد در طول تاریخ نیز مرسوم بوده است. از اولین کامپوزیت‌ها یا همان چندسازه‌های ساخت بشر می‌توان به کاه‌گل و آجرهای گلی که در ساخت آنها از تقویت کننده‌ی کاه استفاده می‌شده است، اشاره کرد. هنگامی که این دو باهم مخلوط شوند و محصولی بدست می‌آید که بسیار ماندگارتر و مقاوم‌تر از هر دو ماده‌ی اولیه یعنی گل و کاه است. قایق‌هایی که سرخ‌پوست‌ها با قیر و بامبو می‌ساختند و تنورهایی که از گل، پودرشیشه و پشم بز ساخته می‌شدند و در نواحی مختلف کشورمان یافت شده است، نیز از کامپوزیت‌های نخستین هستند. قدیمی‌ترین مثال از کامپوزیت‌ها مربوط به افزودن کاه به گل جهت تقویت گل و ساخت آجرهای مقاوم جهت استفاده در بناها بوده است. قدمت این کار به ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح باز می‌گردد. در این مورد کاه نقش تقویت کننده و گل نقش زمینه یا ماتریس را دارد. ارگ بم که شاهکار معماری ایرانیان بوده است، نمونه‌ی بارزی از استفاده از تکنولوژی کامپوزیت‌ها در قرون گذشته بوده است. مثال دیگر، تقویت بتن توسط میله‌های فولادی می‌باشد. در بتن مسلح یا تقویت شده، میله‌های فلزی، استحکام کششی لازم را در بتن ایجاد می‌نمایند، زیرا بتن یک ماده‌ی ترد می‌باشد و مقاومت اندکی در برابر بارهای کششی دارد. بدین ترتیب بتن وظیفه‌ی تحمل بارهای فشاری و میله‌های فولادی وظیفه تحمل بارهای کششی را بر عهده دارند. بسیاری از نیازهای صنعتی مانند صنایع فضایی، راکتورسازی، الکترونیکی، ساختمان‌سازی، حمل‌ونقل، نمی‌توانند با استفاده از مواد معمولی برآورده شود و نیاز به تغییر گسترده‌ی خواص دارد. بنابراین استفاده از کامپوزیت‌ها بسیاری از مشکلات را حل نموده است. تاریخچه‌ی مواد پلیمری تقویت شده با الیاف به سالهای ۱۹۴۰ در صنایع دفاعی و به خصوص کاربردهای هوا-فضا برمی‌گردند. برای

مثال در سال ۱۹۴۵ بیش از ۷ میلیون پوند الیاف شیشه به طور خاص برای صنایع نظامی، مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه با توجه به مزایای آنها، به صنایع عمومی نیز راه یافتند. کامپوزیت‌های پایه پلیمری مهم‌ترین دسته از کامپوزیت‌ها می‌باشند. طیف وسیعی از صنایع، از قبیل صنایع رده بالا، مثل تولید قطعات هواپیما تا صنایع رده پایین مثل تولید سینک ظرفشویی، از کامپوزیت‌های پایه پلیمری تولید می‌شوند و به همین دلیل بزرگترین زیر مجموعه‌ی مواد مرکب محسوب می‌گردند.

به دنبال فرسوده‌شدن سازه‌های زیربنایی و نیاز به تقویت سازه‌ها برای برآورده کردن شرایط سخت‌گیرانه‌ی طراحی، طی دو دهه‌ی اخیر تأکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم‌سازی 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 مسلح‌کننده خارجی به دلیل خصوصیات منحصر به فرد آن، از جمله مقاومت بالا، سبکی، مقاومت شیمیایی و سهولت اجرا، در مقاوم‌سازی و احیاء سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. از طرف دیگر، این تکنیک‌ها به دلیل اجرای سریع و هزینه‌های کم جذابیت ویژه‌ای یافته‌اند.

مواد مرکب FRP در ابتدا به‌عنوان مواد مقاوم‌کننده‌ی خمشی برای پله‌های بتن مسلح و همچنین به‌عنوان محصورکننده در ستون‌های بتن مسلح مورد استفاده قرار می‌گرفتند؛ اما به دنبال تلاش‌های تحقیقاتی اولیه، از اواسط دهه ۱۹۸۰ توسعه‌ی بسیار زیادی در زمینه‌ی استفاده از مواد FRP در مقاوم‌سازی سازه‌های مختلف مشاهده می‌شود. تعداد موارد کاربرد مواد FRP در مقاوم‌سازی، تعمیر و یا بهسازی سازه‌ها از چند مورد در ۱۰ سال پیش، به هزاران مورد در حال حاضر رسیده است. اجزاء سازه‌ای مختلفی شامل تیرها، دال‌ها، ستون‌ها، دیوارهای برشی، اتصالات، دودکش‌ها، طاق‌ها، گنبد‌ها و خرپاها تاکنون توسط مواد FRP مقاوم شده‌اند. از سیستم‌های FRP برای بهسازی یک عضو سازه‌ای خسارت‌دیده و یا مقاوم‌سازی یک عضو سالم و یا رفع اشکالات در حال ساخت بهره گرفته

می‌شود. هم‌اکنون تعداد زیادی از محققان و پژوهشگران صنعت سازه در سراسر جهان در حال بررسی، مطالعه و انجام آزمایشات تقویت سازه‌ها با کامپوزیت‌های FRP می‌باشند.

در این ۳۵ سال کاربرد این روش تنها به سازه‌های بتنی محدود نمانده و برای انواع سازه‌های بنایی، چوبی و فولادی بکار رفته است. در این مدت پژوهشگران زیادی در این سه قاره به توسعه‌ی کاربرد مواد FRP توجه نموده‌اند که نتیجه‌ی زحمات آنها تدوین آیین‌نامه‌های مختلف می‌باشد. در ده سال گذشته انجمن مهندسين ژاپن^۱ چند گزارش در رابطه با نحوه‌ی طراحی سیستم‌های FRP ارائه داده است. به طور همزمان در اروپا سازمان بین‌المللی سازه‌های بتنی^۲ مجموعه‌ای برای اصول تقویت و طراحی سازه‌های بتنی با FRP ارائه داده است. انجمن استاندارد کانادا^۳ نیز مجموعه‌های مشابهی را تدوین نموده است. در ایالات متحده‌ی آمریکا این وظیفه به عهده‌ی انجمن بتن آمریکا^۴ واگذار شده که کمیته‌ی ۴۴۰، هفت آیین نامه و دستور طراحی تدوین نموده است.

۱-۳ بیان مسأله، اهمیت تحقیق و فرضیه‌ها

نیاز به تقویت و افزایش ظرفیت برشی در بسیاری از اعضا بتن مسلح در سازه‌های قدیمی یا جدید ضروری است. از میان روشهای مختلف مقاوم‌سازی برشی، استفاده از مصالح کامپوزیت FRP به صورت منقطع یا پیوسته، با توجه به مزایای فنی و توجیه اقتصادی یکی از روشهای مطرح در این زمینه می‌باشد.

یکی از روشهای تقویت برشی اعضای بتنی، روش تعبیه‌ی مصالح FRP در نزدیک سطح NSM^۵ و قراردادن مصالح FRP در شیارهای ایجاد شده در دو طرف تیر بتن مسلح می‌باشد که در چند سال اخیر در ایران فعالیتهایی برای بکارگیری این روش با انجام کارهای آزمایشگاهی و تحلیلی انجام شده

^۱ JSCE

^۲ FIB

^۳ CSA

^۴ ACI

^۵ Near surface mounted

است. مبنای روش تعبیه در نزدیک سطح NSM چسباندن مصالح FRP در شیارهای ایجاد شده در سطح بتن می‌باشد. روش NSM یک روش موثر در افزایش مقاومت برشی و خمشی اعضای بتنی است. روش تعبیه در نزدیک سطح، جزو روشهای جدید تقویت تیرهای بتن مسلح بوده که با استفاده از مصالح FRP اقدام به تقویت برشی آنها شده است. در نتیجه نیاز به انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه خصوصا در کشور ما کاملا مشهود است.

۱-۳-۱ اهداف پایان نامه

- ۱- بررسی تاثیر تقویت برشی تیر بتن مسلح با میله‌ی FRP به روش NSM در ظرفیت باربری نهایی تیر
- ۲- تقویت برشی تیرهای بتن مسلح با آرایش مختلف میله‌ی FRP به روش NSM و ارزیابی آرایش بهینه‌ی نصب میله‌ی FRP
- ۳- تاثیر مقاوم‌سازی برشی تیر بتن مسلح با مصالح FRP به روش NSM بر تغییر مکان تیر بتن مسلح

۱-۳-۲ ساختار پایان نامه

این پایان نامه شامل پنج فصل مجزا می‌باشد. در فصل اول همانطور که مطالعه شد؛ مقدمه، تاریخچه، ضرورت تحقیق به همراه اهداف پایان نامه مطرح گردید. خواص مصالح FRP، انواع محصولات، کاربرد و انواع روشهای نصب مصالح FRP و تحقیقات انجام شده در این زمینه، در فصل دوم مطرح می‌گردد. آزمایشاتی که توسط نگارنده‌ی پایان نامه انجام گرفت در فصل سوم ارائه می‌شود که در آن تیرهای بتن مسلح با GFRP و به روش NSM تقویت برشی شدند تا آرایش بهینه‌ی نصب میلگرد GFRP در مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح با روش تعبیه در نزدیک سطح ارزیابی شود. مدل‌سازی عددی در فصل چهارم ارائه شده است. در این فصل، با ایجاد مدل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS و صحت‌سنجی آنها با آزمایش انجام شده‌ی موجود، اقدام به تقویت برشی تیر بتن مسلح با میله‌ی FRP به روش NSM شده تا آرایش بهینه‌ی نصب میله‌ی FRP در

مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح با روش تعبیه در نزدیک سطح ارزیابی شود. در فصل پنجم این پایان‌نامه نتیجه‌گیری کلی و پیشنهاد برای تحقیقات آینده ارائه می‌شود.

۱-۳-۳ فرضیه‌ها

در این پایان‌نامه فرض بر مسلح بودن تیرهای بتنی با ابعاد متعارف بوده و شامل تیرهای عمیق، تیرهای T شکل، پیش تنیده و غیره نمی‌شود.

فصل دوم

مروری بر مطالعات و کارهای

انجام شده

۲-۱ FRP چیست؟

FRP نوعی ماده‌ی کامپوزیت متشکل از دو بخش فیبر یا الیاف تقویتی است که به وسیله‌ی یک زمینه یا ماتریس^۱ رزین از جنس پلیمر احاطه شده است. اساسی‌ترین شکل یک ماده‌ی کامپوزیتی، شکلی است که در آن دو جزء ترکیب شده‌اند و ماده‌ای را با خواصی که متفاوت از خصوصیات اجزای آن است تولید کرده‌اند.

پلیمرهایی مسلح از الیاف بسیارنازکی تشکیل شده‌اند که توسط ماده‌ی زمینه محصور می‌شوند. الیاف دارای جنس‌های متفاوت بوده و به صورت قطعات کوتاه، رشته‌های دراز و پارچه‌های بافته تولید می‌شود. زمینه در FRP ها نقش محافظت از الیاف و انتقال تنش بین آنها را ایفا می‌کند و الیاف نقش باربری دارد. قطعات FRP به روش‌های مختلف صنعتی، نیمه صنعتی و یا دست‌ساز ساخته می‌شود.

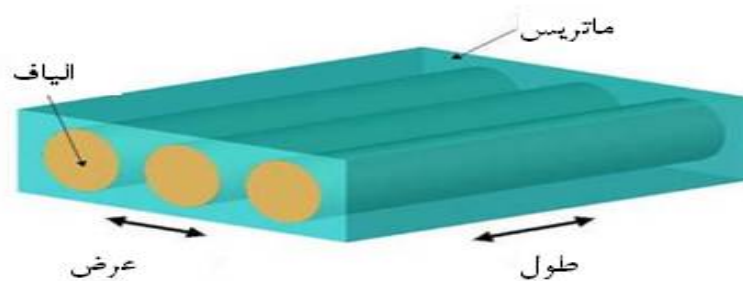
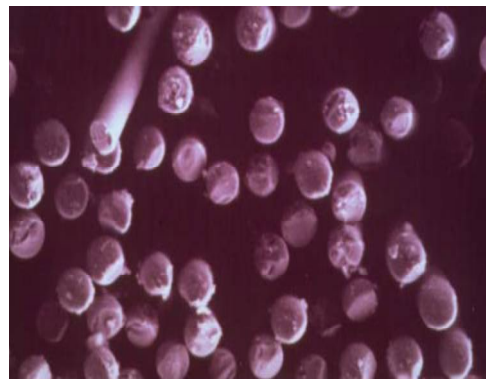
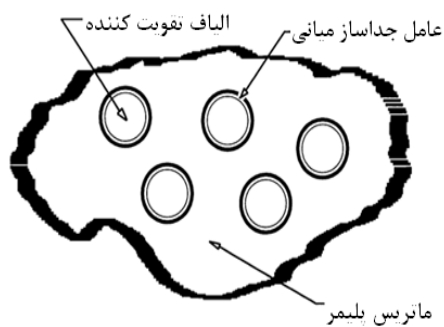
۲-۲ تقویت‌کننده‌ها(الیاف)

مواد FRP از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند؛ تقویت‌کننده‌ها یا الیاف(فیبر) و رزین (ماده‌ی زمینه). الیاف که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در مصالح FRP محسوب می‌شوند. بسته به نوع فایبر، قطر آن در محدوده‌ی ۵ تا ۲۵ میکرون می‌باشد. الیاف ممکن است از شیشه، کربن، آرامید، وینیلون و بازالت باشد که در اینصورت محصولات کامپوزیت مربوطه به ترتیب به نامهای GFRP^۲، CFRP^۱، AFRP^۳ و VFRP^۴ و BFRP^۴ و شناخته می‌شوند. امروزه با توجه به دوام،

^۱ Matrix

^۲ Glass Fiber Reinforced Polymer

مقاومت و سختی بالای الیاف کربنی بیشترین کاربرد را پیدا نموده‌اند. الیاف شیشه‌ای در محیط‌های خشک کارایی مناسب داشته و از الیاف آرامیدی برای جذب انرژی و ضربه استفاده می‌شود. در ادامه شرح مختصری از بعضی از الیاف متداول ارائه خواهد شد. در شکل ۱-۲ ساختار میکروسکوپی مصالح FRP را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۲ ساختار FRP

¹ Carbon Fiber Reinforced Polymer

² Aramid Fiber Reinforced Polymer

³ Vinilon Fiber Reinforced Polymer

⁴ Bazalt Fiber Reinforced Polymer

۲-۲-۱ الیاف شیشه

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری که با الیاف شیشه تقویت شده‌اند، GFRP نام دارند. فایبرگلاس یک نام معمولی از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری است که توسط الیاف ریز شیشه تقویت شده است. به طور کلی 90% کامپوزیت‌های زمینه پلیمری با الیاف شیشه تقویت می‌شوند. شیشه به طور وسیعی به عنوان الیاف تقویت کننده به علت ایجاد خواص زیر در این نوع کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود:

- ۱- دسترسی آسان و سریع و مواد ارزان
 - ۲- تکنولوژی ساده و ارزان تهیه الیاف پیوسته از شیشه مذاب
 - ۳- مقاومت به خوردگی بالا
 - ۴- استحکام کششی بالا در حدود ۴۱۰۰ مگا پاسکال
- انواع شیشه‌های مورد استفاده در فایبرگلاس عبارتند از:
- ۱- : عمومی ترین و ارزان ترین الیاف شیشه است. حرف E به معنای الکتریکی و یک عایق عالی است. مدول ینگ نسبتا بالایی دارند.
 - ۲- S- glass : قوی تر از الیاف E- glass است. حرف S به معنای استحکام است. در کاربرد های نظامی و هوافضا استفاده می شوند.
 - ۳- S+R- glass : قویترین و گرانتین الیاف شیشه با قطر کم است.
 - ۴- C- glass : این الیاف شیشه مقاوم به خوردگی و فعل و انفعالات شیمیایی است و در ساخت تانک‌های ذخیره‌سازی و دیگر تجهیزات مقاوم به فعل و انفعالات شیمیایی به کار می‌رود.



شکل ۲-۲ شکلهای مختلف GFRP

۲-۲-۲ الیاف کربن

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری که با الیاف کربن تقویت شده‌اند، CFRP نام دارند. الیاف کربن که یکی از قوی‌ترین الیاف هستند، به وسیله‌ی کربونیزاسیون الیاف طبیعی یا مصنوعی پلیمری، در دمای بالاتر از ۲۷۰۰ درجه سانتی گراد و یا از تاب خوردن مواد آلی مانند قیر و رزین به وجود می‌آیند. الیاف کربن خیلی گران هستند. این الیاف محدوده‌ی وسیعی از خواص را ایجاد می‌کنند، بنابراین به مهندسين اجازه می‌دهند که کامپوزیت‌های بهتری را طراحی کنند. وقتی الیاف کربن در یک زمینه‌ی پلیمری به عنوان تقویت کننده استفاده می‌شوند خواص زیر را ایجاد می‌کنند:

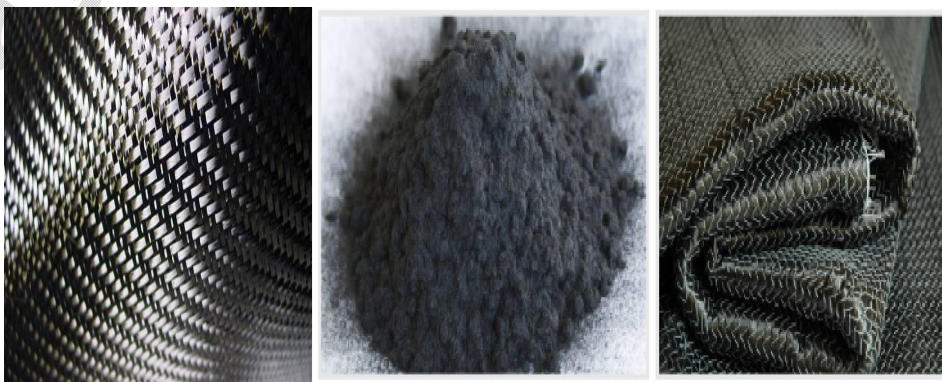
۱- مدول کشسانی بالا در حد فولاد

۲- استحکام کششی بالا حدود ۷ گیگاپاسکال

۳- چگالی پایین حدود ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب

۴- خنثی بودن از نظر شیمیایی بالا

عمومی‌ترین ماده‌ی زمینه برای ساخت پلیمر با تقویت کننده‌ی الیاف کربن، از گرماسخت‌ها، پلی‌استر و از گرمانرم‌ها، پلی‌آمید هستند. واکنش با فلزات و تشکیل فازهای کاربریدی ترد و شکننده، هدایت الکتریکی بالا، مقاومت به ضربه پایین، نداشتن کارایی در محیط اسیدی و قیمت بالا، از معایب الیاف کربنی می‌باشند. در شکل ۲-۳ اشکال مختلف CFRP ارائه شده‌است.



شکل ۲-۳ شکلهای مختلف CFRP

۳-۲-۲ آرامید

آرامید، یک کلمه‌ی اختصاری از آروماتیک پلی‌آمید است. دو نام تجاری الیاف آرامید، کولار^۱ و نومکس^۲ است. این الیاف ابتدا به عنوان جایگزین فولاد در لاستیک توسعه یافتند و بعد کاربردهای دیگری پیدا کردند. این الیاف نسبت استحکام به وزن خیلی بالا نشان می‌دهند. مدول کششی در آنها خیلی بزرگتر از مدول فشاری آنها است. مقاومت به ضربه‌ی آنها در نتیجه‌ی بالا بودن مدول کششی خیلی زیاد است.

آرامید الیاف کربن را حمایت می‌کند و خواص آنها را بهبود می‌بخشد. الیاف ترکیبی (آرامید + الیاف کربن) استحکام کششی خیلی بالا با مقاومت به سایش و ضربه را به هم پیوند می‌دهد. عمومی‌ترین ماده‌ی زمینه برای ساخت پلیمرهای تقویت شده با آرامید، ترموست‌ها مانند اپوکسی و وینیل استروفنولیک هستند. پلیمرهای تقویت شده با الیاف آرامید توسط پروسه‌های قالب گیری باز، بسته و پالتروژن انجام می‌گیرد. شکل ۲-۴، اشکال مختلف AFRP را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴ شکلهای مختلف AFRP

¹ Kevlar

² Nomex

۳-۲ زمینه

خیلی از مواد هنگامی که به صورت الیاف هستند استحکام خیلی خوبی را نشان می‌دهند، اما برای رسیدن به این خواص، الیاف باید به یک زمینه خوب پیوند زده شوند. زمینه، الیاف را در محل نگه می‌دارد و آنها را از هم جدا می‌کند تا از ساییدگی و تشکیل عیوب سطحی جدید جلوگیری نماید. یک زمینه‌ی خوب باید توانایی تغییر شکل تحت بار به کار رفته را دارا باشد، نیرو را به الیاف انتقال دهد، تمرکز تنش را توزیع کرده و الیاف را از صدمات محافظت نماید و از اشاعه‌ی ترک در کامپوزیت جلوگیری کند. زمینه (ماتریس یا رزین) را می‌توان از مخلوط‌های ترموست و یا ترموپلاستیک و یا الاستومرها انتخاب کرد. ماتریس‌های ترموست با اعمال حرارت سخت شده و دیگر به حالت مایع یا روان در نمی‌آیند؛ در حالیکه رزین‌های ترموپلاستیک را می‌توان با اعمال حرارت، مایع نموده و با اعمال برودت به حالت جامد درآورد. الاستومرها حد وسط بین ترموست‌ها و ترموپلاستیک‌ها هستند. به عنوان رزین‌های ترموست می‌توان از پلی‌استر، وینیل‌استر و اپوکسی، و به عنوان رزین‌های ترموپلاستیک از پلی‌وینیل کلرید، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن، نام برد. مواد کامپوزیتی براساس نوع زمینه به سه گروه کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی تقسیم می‌شوند.

۴-۲ خصوصیات FRP

۱-۴-۲ خصوصیات فیزیکی

۱-۱-۴-۲ چگالی

مواد FRP بسیار سبک بوده و چگالی آن حدود یک پنجم چگالی فولاد است که این وزن کاهش یافته، منجر به هزینه‌ی کمتر حمل و نقل و راحتی جابجایی مصالح و همچنین کاهش بار مرده سازه خواهد شد. در جدول ۱-۲، جرم حجمی انواع FRP ها ارائه شده است.

جدول ۱-۲ چگالی مواد FRP (kg/m^3). Error! Reference source not found.

AFRP	CFRP	GFRP	فولاد
۱۲۰۰-۱۵۰۰	۱۵۰۰-۱۶۰۰	۱۲۰۰-۲۱۰۰	۷۹۰۰

۲-۱-۴-۲ ضریب انبساط حرارتی

ضریب انبساط حرارتی مواد FRP بستگی به نوع رزین، نوع و درصد حجم و راستای الیاف آن دارد که در جدول ۲-۳ این مقادیر برای دو راستای طولی و عرضی آورده شده است. ضریب انبساط حرارتی طولی به وسیله خصوصیات الیاف مشخص می شود، ولی ضریب انبساط حرارتی عرضی به وسیله خصوصیات رزین مشخص می شود. افزایش دما فراتر از نقطه ی نرمی بر روی ضریب کشسانی رزین اثر گذاشته و مقدار آن را به اندازه ی قابل توجهی کاهش می دهد. نقطه ی نرمی اکثر پلیمرهای مصرفی بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد می باشد. این درحالی است که الیاف قابلیت تحمل دمای بسیار بالاتری را دارا می باشد. در نتیجه در مواردی که پیوستگی بین FRP و عضو بتنی تعیین کننده است، استفاده در دمای بالاتر از نقطه نرمی پیشنهاد نمی شود. درنظر داشته باشید که ضریب انبساط حرارتی منفی نشان می دهد که با افزایش دما ماده منقبض و با کاهش درجه ی حرارت ماده منبسط می شود. در جدول ۲-۲ ضریب انبساط حرارتی مصالح FRP ارائه گردیده است.

جدول ۲-۲ ضریب انبساط حرارتی مصالح FRP ($1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$). Error! Reference source not found.

AFRP	CFRP	GFRP	راستا
(-۲) - (-۶)	۰ - (-۱)	۱۰ - ۶	طولی (α_L)
۶۰ - ۸۰	۲۲ - ۵۰	۱۹ - ۲۳	عرضی (α_T)

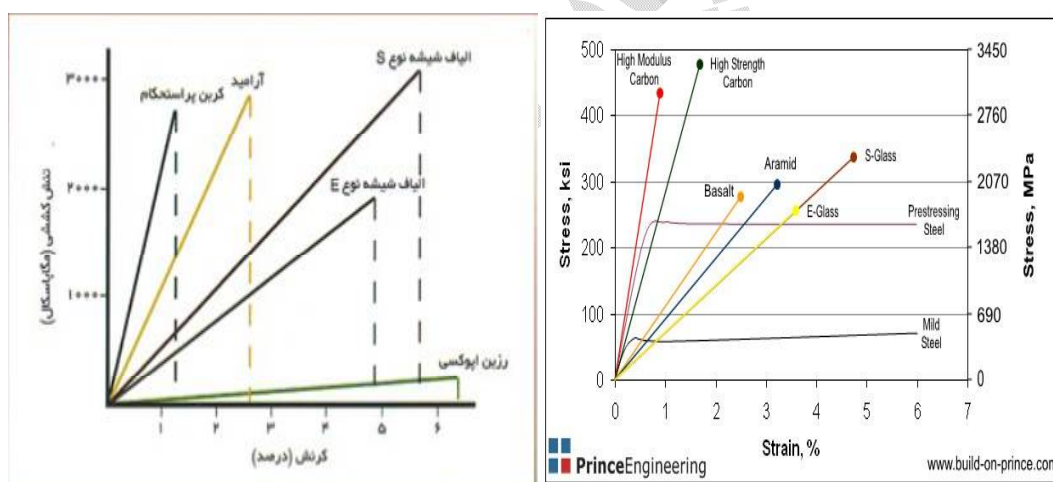
بتن ضریب انبساط حرارتی متغیری از 7×10^{-6} تا 11×10^{-6} معمولاً فرض می‌شود که ایزوتروپیک می‌باشد، فولاد نیز دارای ضریب انبساط حرارتی ایزوتروپیک 11.7×10^{-6} می‌باشد. Error! .

Reference source not found.

۲-۴-۲ خصوصیات و رفتار مکانیکی

۲-۴-۲-۱ رفتار کششی

مصالح FRP در هنگام بارگذاری کششی رفتاری کاملاً کشسان دارند و گسیختگی آنها ناگهانی است. در صورت رسم نمودار تنش-کرنش برای الیاف بکار رفته در آنها، خطوط راستی بدست خواهد آمد که شیب آنها ضریب کشسانی الیاف می‌باشد. ضریب کشسانی اکثر الیاف کوچکتر از فولاد بوده اما در چند سال اخیر الیاف کربنی با ضریب کشسانی بزرگتر از فولاد نیز تولید شده است. نمودار ۱-۲ رفتار تنش-کرنش الیاف مختلف FRP در کشش را نمایش می‌دهد.



نمودار ۱-۲ رفتار تنش-کرنش الیاف مختلف در کشش

مقاومت کششی و سختی مصالح FRP به چندین عامل بستگی دارد. به دلیل اینکه الیاف در مصالح FRP عضو اصلی باربر هستند، نوع الیاف، جهت قرارگیری و مقدار الیاف حاکم بر خصوصیات کششی مصالح می‌باشد. مقاومت و سختی متفاوتی در مصالح با درصد حجم الیاف مختلف با سطح

مقطع یکسان پدیدار می‌شود. میزان سخت‌شدن، محل ساخت و کنترل کیفیت در خصوصیات مکانیکی مصالح نیز تاثیر می‌گذارد. جدول ۳-۲ خصوصیات مکانیکی مصالح FRP و فولاد را ارائه می‌کند.

جدول ۳-۲ خصوصیات مکانیکی مصالح FRP و فولاد (۲)

	Steel	GFRP	CFRP	AFRP
تنش جاری شدن	۵۱۷ تا ۲۷۶ MPa	-	-	-
مقاومت کششی	۶۹۰ تا ۴۸۳ MPa	۱۶۰۰ تا ۴۸۳ MPa	۳۶۹۰ تا ۶۰۰ MPa	۲۵۴۰ تا ۱۷۲۰ MPa
مدول الاستیسیته	۲۰۰ GPa	۵۱ تا ۳۵ GPa	۵۸۰ تا ۱۲۰ GPa	۱۲۵ تا ۴۱ GPa
کرنش جاری شدن	۲.۵ تا ۱.۴	-	-	-
کرنش شکست	۱۲ تا ۶	۳.۱ تا ۱.۲	۱.۷ تا ۰.۵	۴.۴ تا ۱.۹

۲-۲-۴-۲ رفتار فشاری

به طور کلی، تکیه کردن به مقاومت مصالح FRP در برابر تنش‌های فشاری توصیه نمی‌شود. پژوهشگران در آزمایش‌های متعدد نشان داده‌اند که ظرفیت فشاری FRP های کربنی، شیشه‌ای و آرامیدی به ترتیب در حدود ۷۸ و ۵۵ و ۲۰ درصد ظرفیت کششی آنهاست. این کاهش ظرفیت به دلیل کماتش موضعی الیاف در داخل FRP است. مدول الاستیسیته‌ی فشاری مصالح FRP، معمولاً کمتر از مدول الاستیسیته کششی آن می‌باشد. به عنوان نمونه مدول الاستیسیته‌ی فشاری FRP های کربنی، شیشه‌ای و آرامیدی به ترتیب در حدود ۸۵ و ۸۰ و ۱۰۰ درصد مدول الاستیسیته کششی آنها می‌باشد. **Error! Reference source not found.**

۲-۲-۴-۳ رفتار برشی

اغلب میلگردهای FRP نسبتاً ضعیف در برش درون لایه‌ای، جایی که لایه‌های رزین بین الیاف قرار می‌گیرد، می‌باشند. بدلیل اینکه معمولاً هیچ لایه الیافی در عرض میلگرد وجود ندارد، مقاومت برشی

درون لایه‌ای به وسیله ماتریس پلیمری نسبتاً ضعیف تامین می‌شود. جهت قرارگیری الیاف در راستای غیراصلی مقاومت برشی را نیز با توجه به زاویه‌ی قرارگیری افزایش خواهد داد. در مورد میلگردهای FRP، این کمبود مقاومت برشی می‌تواند به وسیله تابیدن یا پیچیدن الیاف جانبی عرضی در برابر الیاف اصلی بهبود یابد.

۴-۲-۴ رفتار چسبندگی

عملکرد چسبندگی مصالح FRP، به طراحی فرآیند تولید، خصوصیات الیاف و رزین و شرایط محیطی بستگی دارد. برای مهار یک میلگرد در بتن، نیروی چسبندگی می‌تواند به وسیله‌ی عوامل زیر منتقل شود:

- مقاومت فصل مشترک چسب که چسبندگی شیمیایی نامیده می‌شود.

- مقاومت اصطکاک در فصل مشترک در برابر لغزش

- درگیری مکانیکی میلگرد و بتن بدلیل نامنظمی سطح

خصوصیات چسبندگی میلگردهای FRP مورد تحقیقات بیشماری از سوی تعداد زیادی محقق و از طریق انواع آزمایشات مختلف از قبیل آزمایش کششی و آزمایش همپوشانی قرار گرفته است.

۵-۲-۴ رفتار تابع زمان

خزش و خستگی دو ویژگی مهم تابع زمان مصالح هستند که می‌بایست در طراحی در نظر گرفته شوند. میلگردهای FRP که تحت یک بار ثابت در مدت زمانی طولانی قرار می‌گیرند، می‌توانند به‌طور ناگهانی بعد از یک دوره‌ی زمانی که زمان دوام نامیده می‌شود، شکست پیدا کنند. این پدیده به عنوان شکست خزشی شناخته می‌شود. زمان دوام شکست خزشی می‌تواند تحت شرایط محیطی خاصی از قبیل دمای زیاد، اشعه ماوراءبنفش، محیط قلیایی زیاد، سیکل‌های تر و خشک شدن یا سیکل‌های یخ زدن و ذوب شدن متوالی کاهش یابد. الیاف کربنی کمترین حساسیت را نسبت به بارهای دائمی نشان می‌دهند، اما الیاف شیشه و آرامید در مقابل این گونه بارگذاری‌ها نسبتاً ضعیف عمل می‌کنند. در مورد خستگی و

فروپاشی ناشی از آن، FRP های کربنی عملکرد بسیار مناسبی داشته در حالیکه FRP های شیشه‌ای و آرامیدی حساسیت بیشتری نشان می‌دهند.

با توجه به نتایج بدست آمده، به واسطه‌ی عدم وجود روشهای آزمایش استاندارد خزش که مانع از طراحی دقیق می‌گردد و اطلاعات کمی که در حال حاضر برای زمان‌های دوام بالای ۱۰۰ سال در دسترس هستند، استفاده از سیاستی محافظه‌کارانه، برای طراحی پیشنهاد می‌گردد تا تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود. در جدول ۲-۴ برخی از ویژگی‌های الیاف کربن و شیشه و آرامید باهم مقایسه می‌شود.

جدول ۲-۴ مقایسه ویژگی‌های الیاف کربن و شیشه و آرامید

ویژگی / الیاف	الیاف کربن	الیاف شیشه	الیاف آرامید
حساسیت به خزش	کم	زیاد	متوسط
حساسیت در عوامل محیطی	کم	زیاد	متوسط
ضریب الاستیسیته	زیاد	کم	متوسط
تحمل ضربه	کم	زیاد	متوسط
انتقال بار در حریق	متوسط	زیاد	کم
رسانایی الکتریکی	بالا	پایین	متوسط
مقاومت	متوسط	کم	زیاد
ضریب انبساط حرارتی	متوسط	زیاد	کم

۲-۴-۶ دوام

ویژگی‌های مکانیکی بسیاری از مواد FRP در صورت مجاورت با عوامل محیطی نظیر رطوبت، مواد شیمیایی و دمای بالا کاهش می‌یابد. در این زمینه خصوصیات چسبندگی و مقاومت کششی میلگردهای FRP، پارامترهای مهمی برای سازه‌های بتن مسلح می‌باشند. لازم به ذکر است که بیشتر اطلاعات داده شده توسط تولیدکنندگان FRP در شرایط آزمایشگاهی بوده و وظیفه در نظر گرفتن اثر شرایط محیطی به عهده‌ی طراح و مشاور طرح مقاوم‌سازی می‌باشد.

۷-۲-۴-۲ نگهداری و جابجایی

مصالح FRP به تنهایی خطر سلامتی برای کاربران بوجود نمی‌آورند. این درحالی است که مصالح تشکیل دهنده آنها (الیاف و چسب‌های صنعتی) می‌توانند نگرانی‌های زیست محیطی ایجاد نمایند. پس برای نگهداری و جابه جایی این مواد و در صورت نیاز برای معدوم کردن مصالح اضافی می‌بایست برگه‌های اطلاعات ایمنی مصالح (¹MSDS) که عموماً به همراه مصالح وارد کارگاه می‌شود با دقت مطالعه و در صورت بروز هر مشکل بر طبق آنها عمل گردد. در هنگام نصب ورقهای FRP و استفاده از چسب‌های صنعتی و دیگر مواد شیمیایی استفاده از پوشش‌های مناسب و جلوگیری از تماس این مواد با پوست و تنفس گازهای منتشر شده می‌تواند اقدام پیش‌گیرانه‌ی مناسبی تلقی شود.

۵-۲ انواع محصولات FRP

۱-۵-۲ میله^۲های کامپوزیتی

میله‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های FRP محصولاتی هستند که جانشین میله‌های فولادی در بتن آرمه خواهند شد. کاربرد این میله‌ها به دلیل عدم خوردگی، مساله کربناسیون و کلراسیون را که از جمله مهم‌ترین عوامل مخرب در سازه‌های بتن آرمه هستند، حل خواهند نمود. به دلیل اینکه میله‌های FRP دارای یک رفتار غیر شکل‌پذیر می‌باشند، بیشترین مورد استفاده این میله‌ها، در سازه‌هایی است که مهمترین مشکل آنها خوردگی یا مشکلات الکترومغناطیسی می‌باشد. رفتار مکانیکی میله‌های FRP با میله‌های فولادی تفاوت دارد؛ لذا نحوه طراحی سازه‌های بتنی با استفاده از میله‌های FRP دارای تغییراتی نسبت به میله‌های فولادی می‌باشد. میله‌های

¹ Material Safety Data Sheet

² rod

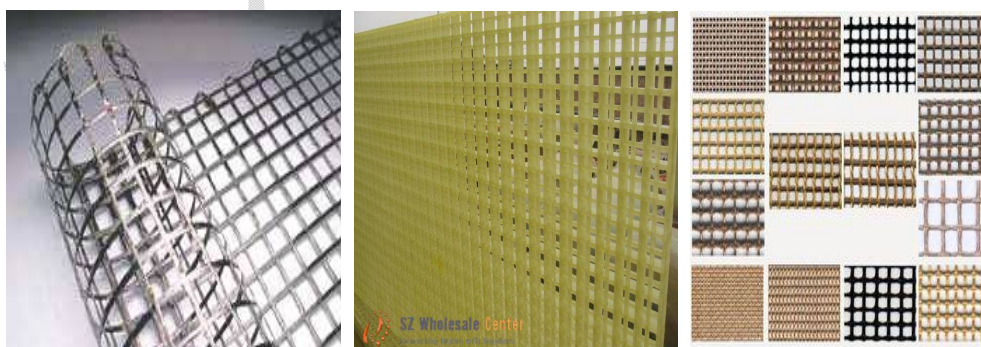
فولادی دارای رفتار تقریباً همسانگرد می‌باشد ولی میلگردهای FRP دارای رفتار ناهمسانگرد هستند. این رفتار ناهمسانگرد در مقاومت برشی و رفتار چسبندگی میلگردهای FRP به بتن تاثیر می‌گذارد. مصالح FRP بر خلاف مصالح فولادی، رفتار الاستیک خطی از خود نشان می‌دهند. در شکل زیر میلگردهای FRP نشان داده شده است. شکل ۲-۵ میلگردهای FRP را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵ میلگردهای FRP

۲-۵-۲ شبکه^۱های کامپوزیتی

شبکه‌های کامپوزیتی FRP محصولاتی هستند که از برخورد میله‌های FRP در دو جهت و یا در سه جهت ایجاد می‌شوند. نمونه‌ای از این محصول، شبکه کامپوزیتی NEFMAC است که از فایبرهای کربن، شیشه یا آرامید و رزین وینیل استر تولید می‌شود و برای مسلح کردن بتن مناسب است. در شکل ۲-۶ شبکه‌های FRP نشان داده شده است.

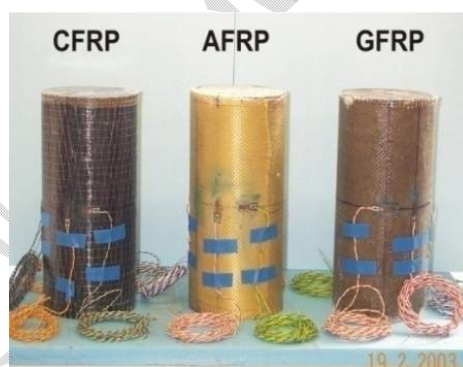


شکل ۲-۶ شبکه‌های FRP

^۱ Grid

۲-۵-۳ کابل‌های کامپوزیتی

نوار^۱، طناب و تاندن‌های پیش‌تنیدگی، محصولاتی شبیه میله‌های کامپوزیتی FRP، ولی به صورت انعطاف‌پذیر هستند، که در سازه‌های کابلی و بتن پیش‌تنیده در محیط‌های دریایی و خورنده کاربرد دارند. این محصولات در اجزاء پیش‌تنیده در مجاورت آب نیز بکار گرفته می‌شوند. شکل ۲-۷ نوار و طناب‌های FRP را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۷ نوار و طناب FRP

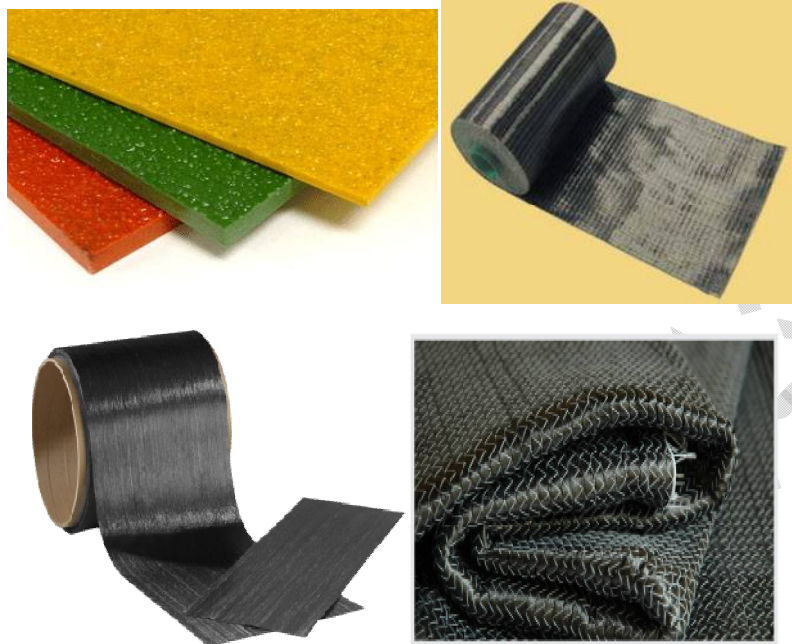
۲-۵-۴ ورقه‌های کامپوزیتی

ورقه‌های کامپوزیتی، ورقه‌های با ضخامت چند میلیمتر از جنس FRP هستند. این ورقه‌ها با چسب‌های مستحکم و مناسب به سطح بتن چسبانده می‌شوند. ورقه‌های FRP پوشش مناسبی جهت ایزوله کردن سازه‌های آبی از محیط خورنده‌ی مجاور هستند. همچنین از ورقه‌های کامپوزیتی FRP، جهت تعمیر و تقویت سازه‌های آسیب دیده استفاده می‌شوند. ورقه‌های FRP از لحاظ شکل‌پذیری می‌توانند به شکل پارچه‌ای و صفحه‌ای باشند. شکل پارچه‌ای خاصیت شکل‌پذیری بالایی دارد و راستای الیاف در آن می‌تواند در یک جهت یا دو جهت باشد. صفحه‌ها بر خلاف الیاف پارچه‌ای، شکل

¹ strip

² Sheet

پذیر نیستند و در ضخامت و عرض‌های مختلف یافت می‌شوند. در شکل ۸-۲ ورقه‌های FRP ارائه شده است.



شکل ۸-۲ ورقه‌ی FRP

۵-۵-۲ پروفیل‌های ساختمانی کامپوزیتی

مصالح FRP همچنین در شکل پروفیل‌های ساختمانی به صورت I شکل، T شکل، نبشی و ناودانی تولید می‌شوند. چنین محصولاتی می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای قطعات و سازه‌های فولادی در مجاورت آب تلقی شوند. شکل ۹-۲ پروفیل‌های ساختمانی FRP را ارائه می‌کند.



۲-۶ کاربرد مصالح FRP

به دنبال فرسوده شدن سازه های زیربنایی و نیاز به تقویت سازه ها برای برآورده کردن شرایط سخت گیرانه ی طراحی، طی دو دهه ی اخیر تأکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم سازی سازه ها در سراسر جهان، صورت گرفته است. از طرفی، بهسازی لرزه ای سازه ها به خصوص در مناطق زلزله خیز، اهمیت فراوانی یافته است. در این میان تکنیک های استفاده از مواد مرکب FRP به عنوان مسلح کننده خارجی به دلیل خصوصیات منحصر به فرد آن، از جمله مقاومت بالا، سبکی، مقاومت شیمیایی و سهولت اجرا، در مقاوم سازی و احیاء سازه ها اهمیت ویژه ای پیدا کرده اند. از طرف دیگر، این تکنیک ها به دلیل اجرای سریع و هزینه های کم جذابیت ویژه ای یافته اند.

مواد مرکب FRP، دامنه ی وسیعی از کاربردها را برای مقاوم سازی سازه های بتن مسلح در مواردی که تکنیک های مرسوم مقاوم سازی ممکن است مسئله ساز باشند، به خود اختصاص داده اند. برای نمونه، یکی از معمول ترین تکنیک ها برای بهسازی اجزا بتن مسلح، استفاده از ورق های فولادی است که از بیرون به این اجزا چسبانده می شود. این روش، روشی ساده، مقرون به صرفه و کارا است؛ اما از جهات زیر مسئله ساز است: زوال چسبندگی بین فولاد و بتن که از خوردگی فولاد ناشی میشود- مشکلات ساخت صفحات فولادی سنگین در کارگاه ساختمان- نیاز به نصب داربست- محدودیت طول در انتقال صفحات فولادی به کارگاه ساخت (در مورد مقاوم سازی خمشی اجزاء بلند). نوارها یا صفحات FRP می توانند جایگزین مناسبی برای صفحات فولادی باشند. مواد FRP برخلاف فولاد، تحت تأثیر زوال الکتروشیمیایی قرار نمی گیرند و می توانند در مقابل خوردگی اسیدها، بازها و نمک ها و مواد مهاجم مشابه در دامنه ی وسیعی از دما مقاومت کنند. در نتیجه نیاز به سیستم های حفاظت از خوردگی نمی باشد و آماده کردن سطوح اعضاء قبل از چسباندن صفحات FRP و

نگهداری از آن‌ها بعد از نصب، از صفحات فولادی آسان‌تر است. علاوه بر این، الیاف مسلح‌کننده در FRP می‌توانند در موضع معین و در نسبت حجمی و جهت خاصی درون ماتریس قرار گیرند تا بیش‌ترین کارایی به‌دست آید. مواد حاصله تنها با درصدی از وزن فولاد، مقاومت و سختی بالایی در جهت الیاف دارند. آن‌ها همچنین حمل و نقل آسان‌تری داشته، نیازمند داربست کمتری برای نصب می‌باشند و می‌توانند برای مکان‌هایی که دارای دسترسی محدود هستند، مورد استفاده قرار گیرند و پس از نصب، بار اضافی قابل‌توجهی را به سازه تحمیل نمی‌کنند.

روش مرسوم دیگر در مقاوم‌سازی اعضای بتن مسلح، استفاده از پوشش‌هایی از نوع بتن مسلح، بتن پاشیدنی و یا فولاد می‌باشد. این روش تا جایی که مربوط به مقاومت، سختی و شکل‌پذیری می‌شود، کاملاً مؤثر است؛ اما باعث افزایش ابعاد مقاطع و بار مرده سازه می‌شود. همچنین این شیوه نیازمند عملیات پر دردرسر و تخلیه ساکنین است و به صورت بالقوه باعث افزایش نامطلوب سختی اعضای بتن مسلح می‌شود. به‌عنوان یک جایگزین، صفحات FRP می‌توانند به دور اجزاء بتن مسلح پیچیده شوند و افزایش قابل توجه مقاومت و شکل‌پذیری را به دنبال داشته باشند؛ بدون آن‌که تغییر زیادی در سختی ایجاد نمایند. یک نکته مهم در ارتباط با مقاوم‌سازی اعضا با استفاده‌ی خارجی از FRP آن است که باید درجه‌ی مقاوم‌سازی (نسبت ظرفیت نهایی عضو مقاوم‌شده به ظرفیت نهایی عضو مقاوم نشده) را محدود کنیم تا حداقل سطح ایمنی در حوادثی مانند آتش‌سوزی که منجر به از دست رفتن کارایی FRP می‌شوند، حفظ گردد. امروزه مواد کامپوزیتی FRP به وفور جهت تقویت خمشی و برشی تیرهای بتن مسلح به کار می‌روند که نمونه‌ای از آن در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که با متصل کردن صفحات FRP به وجه پایینی تیر ظرفیت خمشی مثبت و با متصل کردن آن به وجه بالایی تیر ظرفیت خمشی منفی حاصل می‌شود. همچنین می‌توان با اتصال صفحات FRP به دو وجه کناری تیر، ظرفیت برشی مناسبی فراهم نمود.

در شکست تیرهای بتن مسلح تقویت شده با صفحات FRP مکانیزم‌های مختلف شکست، از جمله گسیختگی صفحات FRP، خردشدگی بتن، شکست برشی بتن و ترک‌خوردگی در محل اتصال

چسب با بتن، گزارش شده است. همچنین نشان داده شده است که نوع FRP، ضخامت و طول آن باعث ایجاد انواع مختلفی از شکست نرم یا ترد می‌شود. بخصوص خواص مکانیکی ناحیه اتصال FRP و بتن از اهمیت خاصی برخوردار است. در این میان جدا شدن صفحات FRP از بتن مسأله کاملاً حائز اهمیت است و امروزه توجه زیادی را در دنیا به خود جلب می‌نماید. در این ارتباط به نظر می‌رسد که استفاده از تقویت‌کننده‌های خارجی حتی به میزان کم، می‌تواند ایمنی قابل ملاحظه‌ای در برابر جدا شدن صفحات FRP از بتن، و نیز شکست‌های برشی ترد فراهم آورد. از طرفی مواد کامپوزیتی FRP به وفور جهت تقویت خمشی و فشاری و نیز افزایش شکل‌پذیری ستون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در همین ارتباط محصورشدگی بتن مهم‌ترین خصوصیتی است که می‌توان آن را با چسباندن این مواد در اطراف ستون‌ها فراهم نمود. از طرفی استفاده از مواد کامپوزیتی FRP برای افزایش شکل‌پذیری اتصالات و رفتار مناسب‌تر آن در زلزله نیز بسیار مطلوب خواهد بود.

در ادامه به چند کاربرد FRP در سازه‌های بتن مسلح به اختصار اشاره می‌شود.

۲-۶-۱ کاربرد FRP در تقویت ستون‌ها

FRP کاربردهای فراوانی در تقویت ستون‌های بتنی دارد. از FRP می‌توان برای تقویت خمشی ستون‌ها، افزایش مقاومت مشخصه بتن و افزایش شکل‌پذیری (اثر محصور شدگی) استفاده نمود. به علت ضخامت کم ورق FRP، این روش یکی از راه‌های مناسب برای تقویت ستون‌ها است زیرا در معماری ساختمان خللی ایجاد نمی‌نماید. تاثیر عمده‌ی تقویت توسط FRP، در ستون‌های دایره شکل بوده ولی ستون‌های مربع یا مستطیل را می‌توان با گرد کردن گوشه‌ها، به صورت مناسب جهت تقویت با FRP تبدیل نمود. در شکل ۲-۱۰ کاربرد FRP در تقویت ستون‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰ تقویت ستون با ورقه ی FRP

۲-۶-۲ کاربرد FRP در تقویت دیوارهای برشی

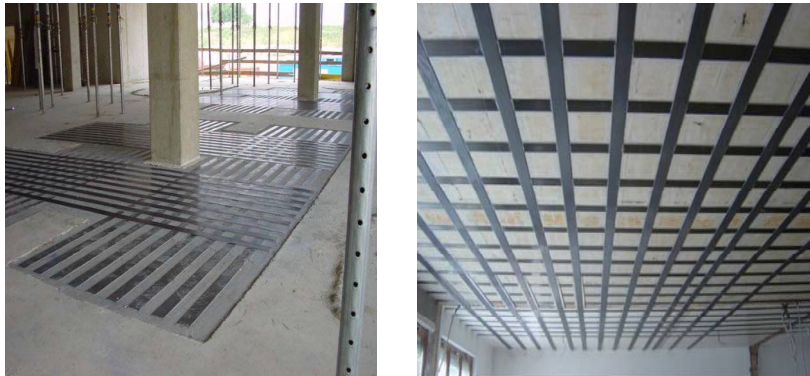
FRP می تواند تاثیر زیادی در تقویت خمشی و برشی دیوارهای برشی داشته باشد. شکل ۲-۱۱ کاربرد FRP در تقویت دیوارهای برشی را ارائه می کند.



شکل ۲-۱۱ تقویت دیوار برشی با FRP

۲-۶-۳ کاربرد FRP در تقویت دال ها

از FRP به شکل موثری می‌توان برای تقویت دال‌ها استفاده نمود. افزایش ظرفیت خمشی مثبت و منفی دال‌ها و کنترل ترک‌ها و حتی تغییر شکل دال‌ها از کاربردهای FRP برای تقویت دال‌ها می‌باشد. در شکل ۱۲-۲ کاربرد FRP در تقویت دال‌ها نشان داده شده‌است.



شکل ۱۲-۲ تقویت دال با FRP

۲-۶-۴ کاربرد FRP در تقویت اتصالات

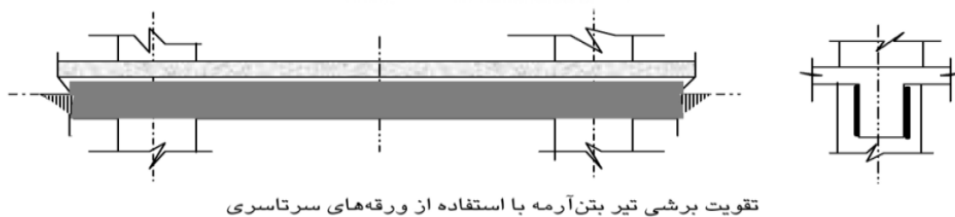
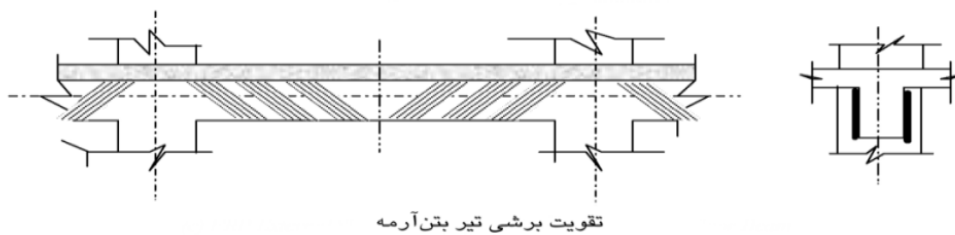
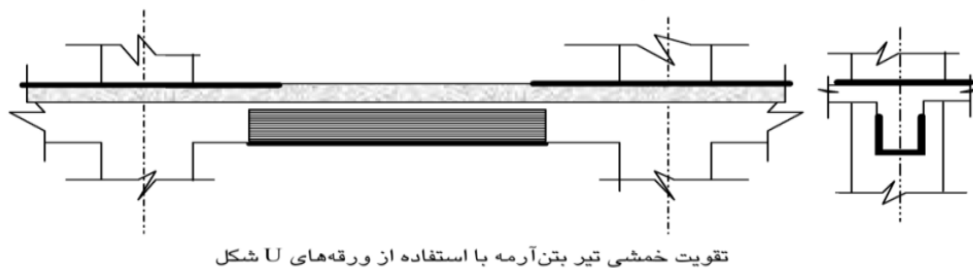
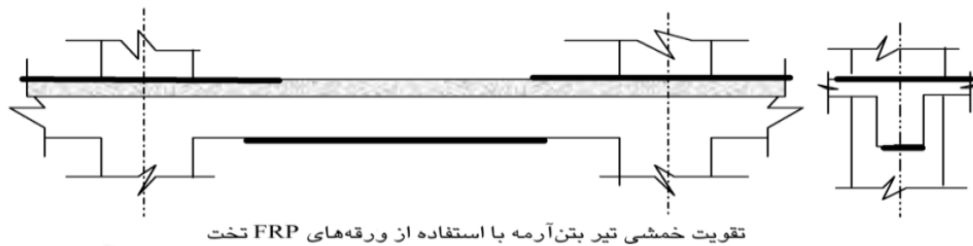
اتصالات آسیب پذیرترین قسمت سازه بوده و در عین حال سخت‌ترین جزء سازه برای تقویت کردن می‌باشند. تقویت با مصالح FRP یکی از موثرترین و ساده‌ترین روش‌های تقویت اتصالات سازه می‌باشد. در شکل ۱۳-۲ کاربرد FRP در تقویت اتصالات ارائه شده‌است.



شکل ۱۳-۲ تقویت اتصالات با FRP

۲-۶-۵ کاربرد FRP در تقویت برشی و خمشی تیرها

تکنیک‌های تقویت تیرهای بتن مسلح توسط الیاف FRP، تقویت خمشی و یا برشی آنها را شامل می‌شود. با متصل کردن صفحات FRP به وجه پایینی تیر، ظرفیت خمشی مثبت و با متصل کردن آن به وجه بالایی، تیر ظرفیت خمشی منفی حاصل می‌شود. همچنین می‌توان با اتصال صفحات FRP به دو وجه کناری تیر، ظرفیت برشی مناسبی فراهم نمود. شکل ۲-۱۴ تقویت تیرها را نشان می‌دهد.





شکل ۲-۱۴ تقویت خمشی و برشی تیر با FRP

۷-۲ روشهای نصب مصالح FRP در سازه‌های بتنی

نصب مصالح در سازه‌های بتنی به دو روش^۱ EBR و NSM انجام می‌گیرد که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

۲-۷-۱ روش اتصال خارجی (EBR)

روش EBR در دال، ستون، دیواربرشی، اتصالات و تیر بتن مسلح برای افزایش مقاومت برشی و خمشی کاربرد دارد. در این روش مصالح بر روی سطح خارجی بتن چسبانده می‌شوند. مراحل گام به گام اجرای ورقه‌ی FRP برای تقویت و مقاوم‌سازی به شرح زیر است:

۱- آماده‌سازی سازه: قبل از انجام هرگونه تقویت با ورقه‌های FRP بایستی در صورت نیاز بتن

تخریب شده را جدا کرده و در صورت رسیدن به میلگرد خورده شده اقدامات مربوط به ترمیم آنها یا تعویض آنها را انجام دهیم و سپس با مصالح یکنواخت سطح آنها را بپوشانیم.

^۱ Externally Bonded Reinforcing

۲- آماده‌سازی سطح: پس از تعمیر سازه‌ی آسیب دیده، سطح آن کاملاً صاف شده و نامنظمی‌ها و زوایای تند و تیز گوشه‌ها به وسیله ماسه پاشی^۱، مال، فشار آب^۲ یا ساب زدن کاملاً گرد می‌شود.

۳- به‌کار بردن آستری یا پرایمر: برای افزایش چسبندگی و جلوگیری از جدایش ورقه FRP از لایه‌ی چسب بین بتن و ورقه، با غلتک یک لایه اپوکسی با لزجت کم به‌طور موضعی روی سطح موردنظر به‌عنوان پرایمر می‌مالند.

۴- بتونه‌کردن سطح: یک لایه چسب با ویسکوزیته‌ی بالا برای پرکردن خلل و فرج و فرورفتگی‌ها در محل‌های مورد نیاز به‌کار برده می‌شود.

۵- بریدن ورقه: بر روی یک سطح تمیز و آماده که عاری از هر گونه آلودگی، چسب و ناصافی است ورقه‌ی FRP مطابق مشخصات و جزئیات موردنظر، بریده می‌شود.

۶- اشباع کردن ورقه: در پروژه‌های بزرگ مقاوم‌سازی ورقه‌ها با دستگاه‌های گرداننده خاص در کارخانه اشباع می‌شوند و لایه‌ی اپوکسی یا ماتریس رزین به آن اضافه می‌شود و فقط کافی است در محل موردنظر چسبانده شود ولی در کارهای کوچکتر در محل کارگاه رزین روی سطح موردنظر مالیده شده سپس ورقه‌ی FRP خشک و بدون چسب بر روی سطح بتن چسبانده می‌شود.

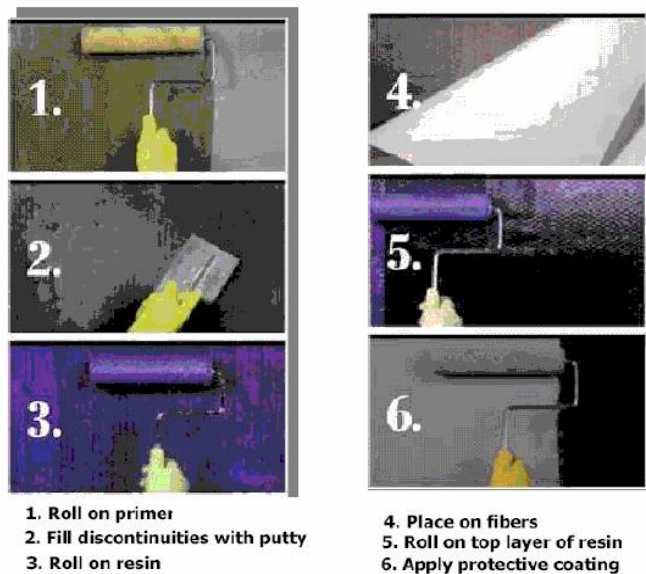
۷- کاربرد مصالح: الیاف را با دقت روی سطح هموار و بدون هیچ گونه آلودگی و حباب هوای محبوس، به‌صورت کاملاً صاف و مستقیم و دقیق می‌چسبانند.

۸- نظارت بر کنترل کیفیت: در زمان عمل‌آوری ۲ تا ۶ ساعت بسته به شرایط حاکم، سطح مقاوم‌سازی شده با FRP چک و کنترل می‌شوند تا هیچ گونه حباب هوا بین لایه FRP و بتن حبس نشده باشد و خم‌شدگی یا بیرون‌زدگی وجود نداشته باشد. ناظرهای تربیت شده‌ای برای کنترل کیفیت FRP استفاده می‌شود.

^۱ Send Blast

^۲ Water Jet

اطمینان از
اجرا: گزارش‌های
کیفیت تهیه
خوبی نگهداری
تا اطمینان
موفقیت آمیز
تقویت و تعمیر



۹-
کیفیت
کنترل
شده و به
می‌شوند
از اجرای
ترمیم،

جزئیات نصب ورقه FRP

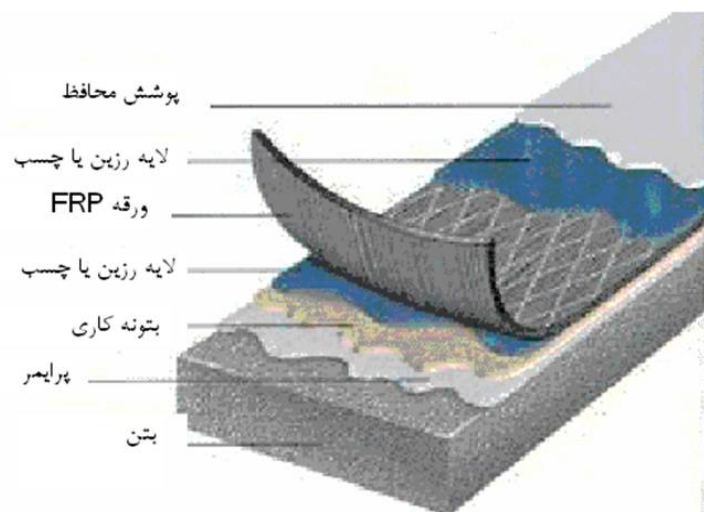
حاصل شود.

۱۰-

رویه: پس از

عمل‌آوری و نظارت بر کیفیت اجرای مقاوم‌سازی، ورقه‌های FRP به منظور حفاظت، نگهداری و حفظ زیبایی و معماری با یک لایه بتن یا ماده‌ای دیگر پوشانده می‌شوند.

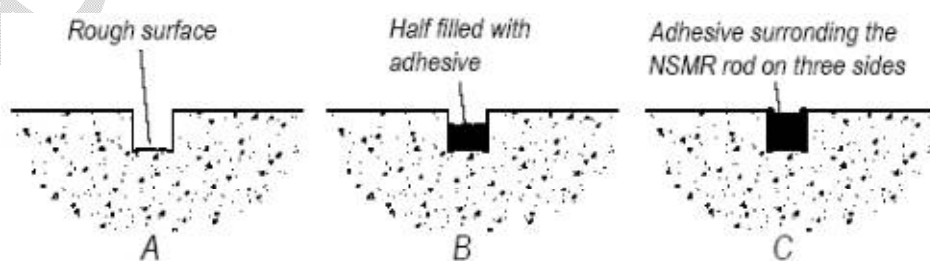
شکل ۲-۱۵ مراحل اجرای روش EBR را ارائه می‌کند.

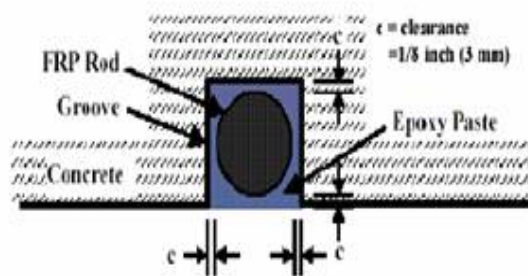


شکل ۲-۱۵ مراحل اجرای روش EBR

۲-۷-۲ روش تعبیه در نزدیک سطح (NSM)

کاربرد این روش برای افزایش مقاومت برشی و خمشی عضو بتن مسلح می‌باشد. روش کار این است که با برش سطح بتن، شیارهایی روی سطح المان ایجاد می‌شود، بعد از تخلیه شیار از ذرات اضافی و گرد و غبار، تا حدود نیمی از شیار با اپوکسی یا چسب پر می‌شود، سپس مصالح FRP در داخل شیار قرار می‌گیرد و سرانجام نیمه دیگر شیار نیز با چسب پر می‌شود تا سطح بتن مسطح گردد. در استفاده از این روش برای تقویت اعضای بتنی، باید پوشش بتن ضخیمی در المان وجود داشته باشد. در کاربرد این روش، تمیزی سطوح داخل شیار و خشک بودن قبل از نصب اهمیت زیادی دارد. انتقال تنش از بتن به FRP در این کاربرد با کارایی بالا اتفاق می‌افتد. شکل و ابعاد شیارها با توجه به سطح مقطع FRP مشخص می‌شود. در شکل ۲-۱۶ شیارها و جزئیات نصب میله FRP نشان داده شده‌است.





شکل ۲-۱۶ شیارها و جزئیات نصب میله FRP

مراحل اجرای گام به گام تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM، به شرح زیر می باشد (۳):

۱- ایجاد شیار روی کاور بتن. ابعاد شیار معمولاً ۲ میلی متر بزرگتر از مصالح FRP است.



۲- تمیز کردن شیار از گرد و خاک که معمولاً با کمپرس هوا انجام می شود.



۳- تمیز کردن FRP



۴- پر کردن نصف شیار با چسب



۵- آغشته کردن مصالح FRP به چسب



۶- قرار دادن مصالح FRP در داخل شیار



۷- پر کردن کامل شیار با چسب و بر داشتن چسب اضافه و مسطح کردن سطح



۸- محافظت و نگهداری

۲-۷-۳ مودهای گسیختگی برشی در تیر تقویت شده با مصالح FRP

۲-۷-۳-۱ انواع مکانیزم برشی تیر تقویت شده به روش EBR

۲-۷-۳-۱-۱ گسیختگی برشی با پارگی ورق FRP

این نوع گسیختگی اغلب اوقات به وسیله یک ترک برشی کششی قطری اتفاق می افتد. ترکهای خمشی عمودی ابتدا در وجه کششی تیر به وجود می آیند. یک ترک نزدیک تکیه گاه ممکن است به سمت محل اعمال بار گسترش یابد و سبب به وجود آمدن یک ترک مورب گردد. در برخی موارد یک ترک مورب ممکن است به صورت ناگهانی رخ دهد. همراه با عریض شدن ترک قطری، FRP سرانجام به کرنش نهایی می رسد. پاره شدن FRP در طول ترک قطری روی سطح بتن رخ داده و سبب گسیختگی کامل تیر به صورت ترد می گردد. عدم پیوند نسبی FRP در دو سطح کناری تیر غالباً قبل از گسیختگی اتفاق می افتد ولی در نهایت گسیختگی در اثر پاره شدن FRP رخ می دهد. بنابراین عدم پیوند^۱ FRP نمی تواند بر ظرفیت برشی این مد اثر بگذارد. داده های آزمایشی موجود ولی محدود، نشان می دهد که همواره همه ی تیرهای دورپیچ شده یا برخی از تیرهای ژاکت شده ی U شکل در این مد فرو می ریزند.

۲-۷-۳-۱-۲ گسیختگی برشی بدون پارگی ورق FRP

^۱ Debonding

روند گسیختگی در این مد لزوماً مشابه با گسیختگی برشی ناشی از پارگی FRP می‌باشد مگر اینکه FRP در گسیختگی ناشی از این مد پاره شود. FRP می‌تواند بعد از فرو ریختن تیر، مقدار قابل ملاحظه‌ای بار تحمل کند.

۲-۷-۳-۱-۳ گسیختگی برشی ناشی از عدم پیوند یا چسبندگی ورق FRP

گسیختگی یک تیر بتنی تقویت شده ممکن است برای برش در اثر از بین رفتن پیوند بین بتن و FRP بوجود بیاید. زمانی که FRP جهت لایه لایه شدن^۱ آماده می‌شود، تیر به سرعت فرو ریزد. شکل پذیری تیر در این مد غالباً محدود می‌باشد. نتایج آزمایشهای موجود نشان می‌دهد غالباً همه‌ی تیرهای تقویت شده با پیوندهای FRP کناری و اکثر ژاکت‌های U شکل در این مد فرو می‌ریزند.

۲-۷-۳-۱-۴ گسیختگی نزدیک مهار مکانیکی

اگر برای مهار FRP در وجوه تیر بتن مسلح از مهارهای مکانیکی استفاده شود، این امکان وجود دارد که در نزدیکی محل مهار شده گسیختگی رخ دهد. به طور مثال مهارهای مکانیکی استفاده شده برای مهار ژاکت‌های U شکل، زیر بال‌های تیر T شکل ممکن است سبب به وجود آمدن لایه لایه شدن در مجاورت بال شود. معمولاً پیرامون مهارهای مکانیکی هم در ورقه و هم در بتن می‌تواند سبب گسیختگی‌های محلی شود. این مدهای گسیختگی در مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده قابل دسترسی می‌باشد. جهت طراحی دقت بیشتری را باید مبذول داشت. این موضوع تا زمان به دست آمدن درکی بهتر از این مد باید رعایت شود.

۲-۷-۳-۱-۵ گسیختگی محلی^۲

۲-۷-۳-۲ انواع مکانیزم شکست تیر تقویت‌شده به روش NSM

^۱ Delamination

^۲ Local Failure

مکانیزم شکست برای تیرهای بتن مسلح تقویت شده با میلگردهای FRP به روش NSM در برش عبارتند از:

الف- جدایش میله‌های FRP و کنده شدن پوشش رزین با ایجاد ترک‌های قطری در بتن احاطه شده

ب- جدا شدن پوشش بتن میلگردهای طولی

۲-۷-۴ مزایای روش تعبیه در نزدیک سطح

در مقایسه با روش EBR، روش NSM دارای مزایای متعددی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- نیاز به فضا و سطح عملکرد کمتری دارد.
- مسلح کننده‌های NSM بسیار کمتر در معرض جاداشدگی پیش از موعد قرار می‌گیرند.
- مهم‌ترین دلیل استفاده از روش NSM به جای روش EBR، جلوگیری از جاداشدگی زودرس است. در روش NSM به دلیل محصور شدن سه طرف FRP با چسب، از جاداشدگی زودرس جلوگیری و باعث استفاده بیشتر از ظرفیت کششی FRP می‌گردد.
- مهار کردن مسلح کننده‌های NSM در سطوح جانبی اعضاء مقاوم شونده به راحتی امکان پذیر است. این امر بخصوص در مقاوم سازی خمشی تیرها و ستون‌ها در قابهای خمشی، که در آن لنگر حداکثر عموماً در نواحی انتهایی اعضاء مشاهده می‌شود، سودمند خواهد بود.
- میلگردهای FRP در روش NSM به راحتی پیش تنیده می‌شوند.
- میله‌ها در روش NSM به خاطر پوشیده شدن توسط بتن و استفاده کمتر از رزین در مقابل ضربه‌های تصادفی و خرابی‌های مکانیکی مقاوم‌تر است.
- در این نوع تقویت، زیبایی یا ریخت سازه تغییر نمی‌کند.

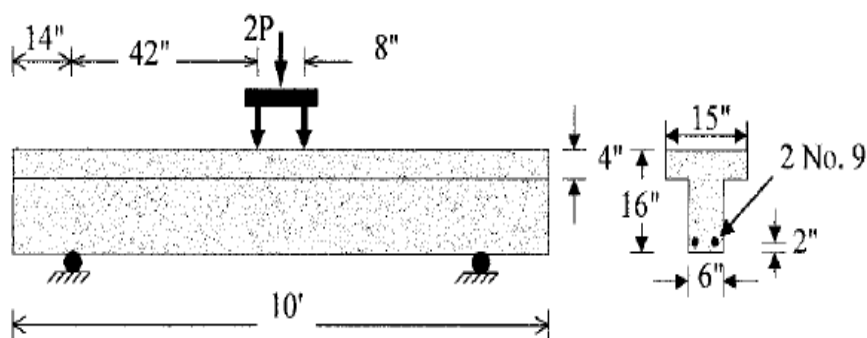
۲-۸ بررسی تحقیقات انجام شده

بسیاری از اعضا بتن مسلح در سازه‌های قدیمی یا جدید نیاز به مقاوم‌سازی برشی دارند. یکی از روش‌های مقاوم‌سازی برشی تیر بتن مسلح که در سال‌های اخیر بکار برده می‌شود، نصب مصالح FRP در نزدیک سطح تیر می‌باشد. در این روش مصالح FRP در شیارهایی که در پوشش بتن ایجاد می‌شود قرار گرفته و با چسب به سطح بتن متصل می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی زیادی انجام شده تا تاثیر مقاوم‌سازی برشی تیر بتن مسلح به روش تعبیه در نزدیک سطح (NSM) با استفاده از مصالح FRP را ارزیابی نماید که در ادامه به چند مورد آن به اختصار اشاره می‌شود.

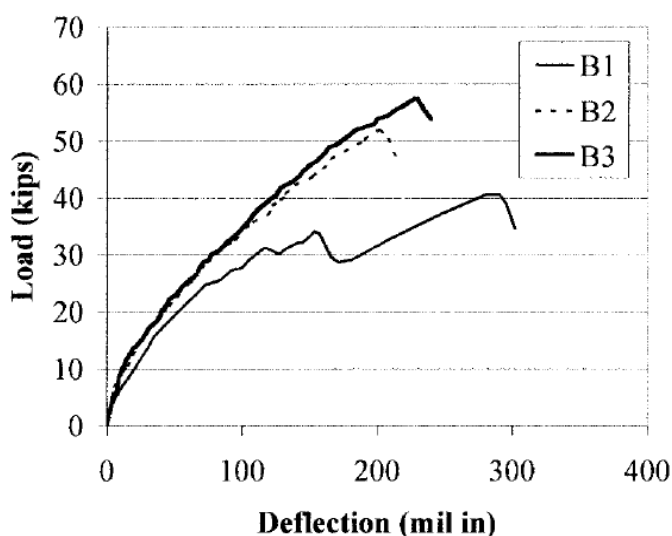
دی لورنزیس و نانی^۱ (۴)، هشت تیر T شکل بتنی را مورد آزمایش قرار دادند که شش تیر بدون خاموت بودند. تیرها با استفاده از میله‌های CFRP به صورت تعبیه در نزدیک سطح مقاوم‌سازی برشی شدند. پارامترهای متغیر آزمایش؛ فاصله میله‌ها، زاویه میله‌ها با محور تیر و تاثیر حضور خاموت بودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در غیاب خاموت استفاده از میله‌های CFRP باروش NSM باعث افزایش حدود ۱۰۶ درصد در مقاومت برشی تیرها شدند. در حضور خاموت مقاومت برشی تیر حدود ۳۵ درصد افزایش پیدا کرد.

دی لورنزیس و نانی^۵ (۵)، سه تیر بتن مسلح T شکل با مقیاس واقعی و بدون خاموت را مورد آزمایش قرار دادند. تیر B1 تیر بدون تقویت بود و به عنوان تیر نمونه‌ی کنترلی در نظر گرفته شد. تیر B2 و B3 با میله‌های CFRP و به صورت عمودی و در دو طرف تیر تقویت شد. فاصله‌ی CFRP در تیر B2، ۱۷۸mm و در تیر B3، ۱۲۷mm بود. جزئیات مقطع تیر و بارگذاری آن در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که همه‌ی تیرها در برش گسیخته شدند. بار نهایی در تیر B1، ۱۸۰،۶ و در تیر B2، ۲۳۰،۴ و در تیر B3، ۲۵۵،۳ کیلونیوتن بدست آمد. در تیر B2، ۲۸ و در تیر B3، ۴۱ درصد ظرفیت برشی افزایش پیدا کرد. شکل ۲-۱۷ جزئیات مقطع و بارگذاری تیر و نمودار ۲-۲ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرها را ارائه می‌کند.

¹ De Lorenzis and Nanni



شکل ۲-۱۷ جزئیات مقطع و بارگذاری تیر (۵)



نمودار ۲-۲ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرها (۵)

باروس و دیاس^۱ (۶)، تیرهایی با اندازه مختلف را مورد آزمایش قرار دادند که خاموت نداشتند. بعضی از تیرها با استفاده از نوارهای CFRP با زوایای مختلف به صورت NSM مقاوم سازی برشی شده و بعضی از تیرها با CFRP معادل و به صورت اتصال خارجی (EBR) مقاوم سازی برشی شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نوارهای CFRP باعث افزایش حدود ۲۲ تا ۷۷ درصد در مقاومت برشی تیرها شدند. همچنین در همه‌ی موارد نتایج روش NSM بالاتر از روش EBR بود.

¹ Barros and Dias

باروس و دیاس (۷)، درجه‌ی تاثیر تقویت برشی تیر بتن مسلح مستطیلی شکل به روش NSM و EBR در پارامتر افزایش بار نهایی را با هم مقایسه کردند. در هر دو روش از CFRP استفاده گردید. نتایج نشان داد که به طور میانگین ظرفیت باربری نهایی در روش EBR، ۵۴ درصد و در روش NSM، ۸۳ درصد بیشتر از تیرهای نمونه‌ی کنترلی بود.

ونوی و همکاران^۱ (۸)، تاثیرات تقویت تیرهای بتن مسلح با استفاده از نوار CFRP و به روش NSM را مورد آزمایش قرار دادند. آنها نشان دادند که استفاده از نوار CFRP باعث افزایش ۲۲٫۵ تا ۴۱٫۲ درصدی ظرفیت باربری تیر گردید ولی شکل‌پذیری تیر تقویت شده کاهش یافت.

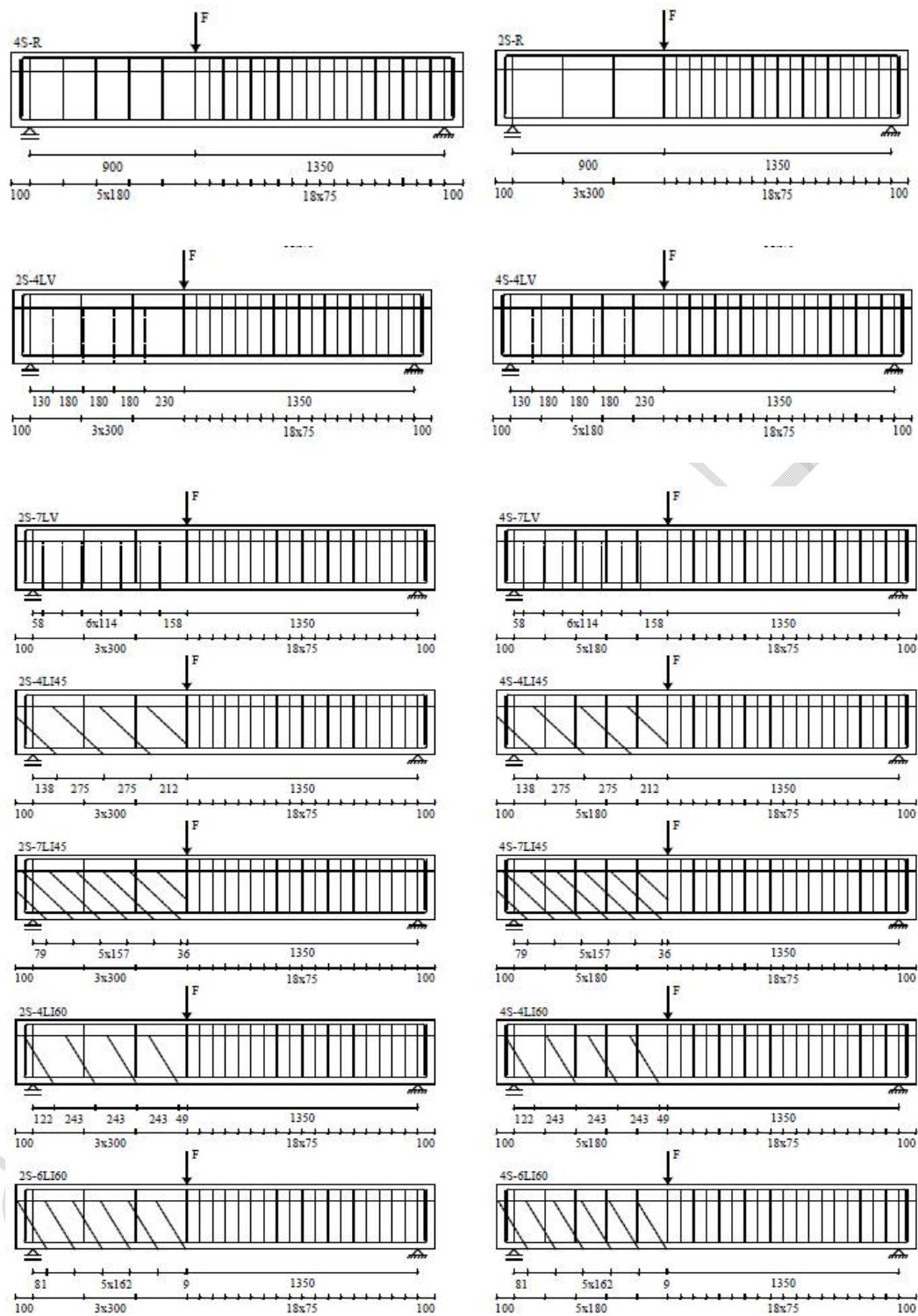
دی‌لورنزیس و ریزو^۲ (۹)، نه تیر بتن مسلح مستطیلی شکل را مورد آزمایش قرار دادند. یک تیر نمونه و یک تیر به روش EBR و ۵ تیر با میله‌ی CFRP و ۲ تیر با نوار FRP و به روش NSM تقویت برشی شدند. آنها نشان دادند ظرفیت برشی تیرهای تقویت شده به روش NSM بین دامنه‌ی ۲۲ تا ۴۳ درصد و تیر تقویت شده به روش EBR، ۱۶ درصد در مقایسه با تیر کنترل، افزایش پیدا کرد. میله‌ی CFRP از نوار CFRP کارایی بهتری داشت. تقویت با زاویه ۹۰ درجه بهتر از تقویت با زاویه ۴۵ درجه بود.

باروس و دیاس (۱۰)، آزمایشی انجام دادند که در آن به تاثیرات وجود خاموت در موثر بودن تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM با لایه‌های^۳ CFRP می‌پردازد. برای این منظور ۷ تیر T شکل با درصد خاموت ۰٫۱ ($\phi 6@300mm$) و ۷ تیر دیگر با درصد خاموت ۰٫۱۷ ($\phi 6@180mm$) که ۶ تیر از آنها با لایه‌های CFRP به روش NSM تقویت برشی شدند و ۲ تیر به نیز عنوان تیر نمونه کنترلی در نظر گرفته شدند. تیرها در دهانه‌ی Lr از لحاظ برشی مقاوم هستند و فقط در دهانه‌ی Li متغیرها بکار برده می‌شوند. شکل ۲-۱۸ نمای شماتیک تیرهای آزمایش شده را نشان می‌دهد.

¹ Wenwei

² De Lorenzis and Rizzo

³ Laminates



شکل ۲-۱۸ نمای شماتیک تیرهای آزمایش شده (۱۰)

مشخصات تیرهای مورد آزمایش در جدول ۲-۵ ارائه شده است.

جدول ۲-۵ مشخصات تیرها (۱۰)

CFRP quantity	CFRP percentage (%)	CFRP spacing (mm)	Angle ^a (°)	Beams ^b ($\rho_{sw} = 0.10\%$)	Beams ^c ($\rho_{sw} = 0.17\%$)
2x4 laminates	0.08	180	90	2S-4LV	4S-4LV
2x4 laminates	0.08	275	45	2S-4LI45	4S-4LI45
2x4 laminates	0.07	243	60	2S-4LI60	4S-4LI60
2x7 laminates	0.13	114	90	2S-7LV	4S-7LV
2x7 laminates	0.13	157	45	2S-7LI45	4S-7LI45
2x6 laminates	0.11	162	60	2S-6LI60	4S-6LI60

نتایج آزمایش نشان داد که تقویت برشی تیر بتن مسلح با لایه‌های CFRP به روش NSM باعث افزایش بیشترین بار (F_{MAX})، در حدود ۱۱ تا ۳۹ درصد در مقایسه با تیر نمونه کنترل شد. همچنین مشخص شد که خاموت برشی نقش خیلی مهمی در تاثیر کاربرد CFRP به روش NSM دارد. در حقیقت در نمونه‌های با درصد خاموت کمتر، لایه‌های CFRP تاثیر بیشتری دارد. لایه‌های CFRP با شیب، تاثیر بیشتری از لایه‌های عمودی دارند. با افزایش درصد CFRP ظرفیت برشی تیر بیشتر می‌شود. جدول ۲-۶ نتایج این آزمایش را ارائه می‌کند.

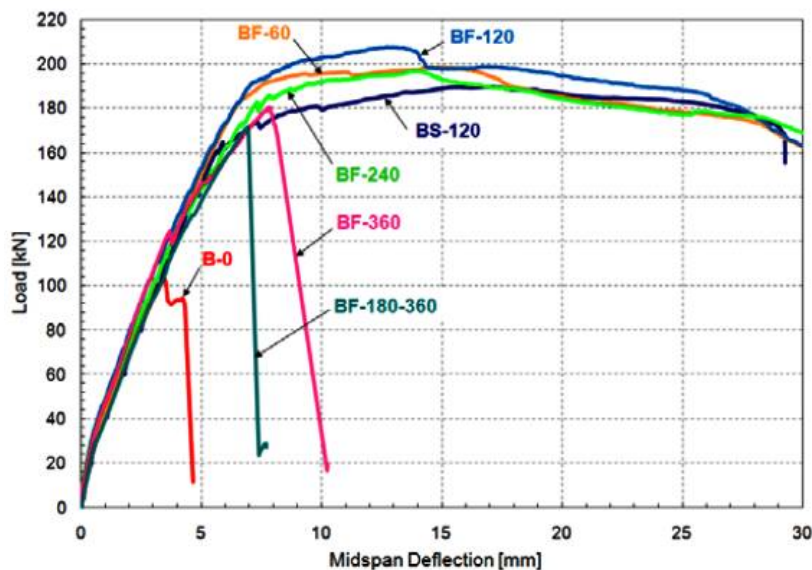
جدول ۲-۶ نتایج آزمایش (۱۰)

CFRP		Beams	F_{max}	Gain due to	U_{Fmax}	Beams	F_{max}	Gain due to	U_{Fmax}
Percentage (%)	Angle (°)	($\rho_{sw} = 0.10\%$)	(kN)	CFRP (%)	(mm)	($\rho_{sw} = 0.17\%$)	(kN)	CFRP (%)	(mm)
-	-	2S-R	303.8	-	5.88	4S-R	371.4	-	6.25
0.08	90	2S-4LV	337.4	11.1	7.14	4S-4LV	424.5	14.3	9.32
0.08	45	2S-4LI45	392.8	29.3	6.45	4S-4LI45	442.5	19.1	7.93
0.07	60	2S-4LI60	386.4	27.2	6.90	4S-4LI60	443.8	19.5	6.91
0.13	90	2S-7LV	374.1	23.1	7.17	4S-7LV	427.4	15.1	9.75
0.13	45	2S-7LI45	421.7	38.8	7.93	4S-7LI45	478.1	28.7	8.26
0.11	60	2S-6LI60	394.4	29.8	7.87	4S-6LI60	457.6	23.2	7.31

باشد تا از گسیختگی برشی جلوگیری شود. در جدول ۷-۲ نتایج آزمایش و در نمودار ۳-۲ منحنی نیرو-تغییرمکان تیرها ارائه شده است.

جدول ۷-۲ نتایج آزمایش (۱۱)

BEAM ID	Type of Stirrups/Spacing [@ mm]	Pu (kN)	Failure Mode
B-0	0	103.2	Shear Failure
BS-120	Steel @ 120	189.6	Flexural Failure
BF-60	CFRP @ 60	198.6	Flexural Failure
BF-120	CFRP @ 120	207.7	Flexural Failure
BF-240	CFRP @ 240	196.6	Flexural Failure
BF-360	CFRP @ 360	180	Shear Failure
BF-180-360	CFRP @ 180-360	171.3	Shear Failure



نمودار ۳-۲ منحنی نیرو-تغییرمکان تیرها (۱۱)

خلدون^۱ و همکاران (۱۲)، آزمایشی را روی ۴ تیر بتن مسلح T شکل با اندازه‌ی واقعی انجام دادند که سه تیر به روش NSM و با میله‌های CFRP تقویت برشی شدند. بررسی‌ها نشان داد که تقویت برشی به روش NSM باعث افزایش مقاومت برشی بین دامنه ۳۷ تا ۹۲ درصد شد و ظرفیت

^۱ Khaldoun

باربری و شکل‌پذیری افزایش پیدا کرد و نیز نشان داده شد که تیرهای تقویت شده با میله‌های CFRP با شیب ۴۵ درجه، بیشترین کارایی دارد.

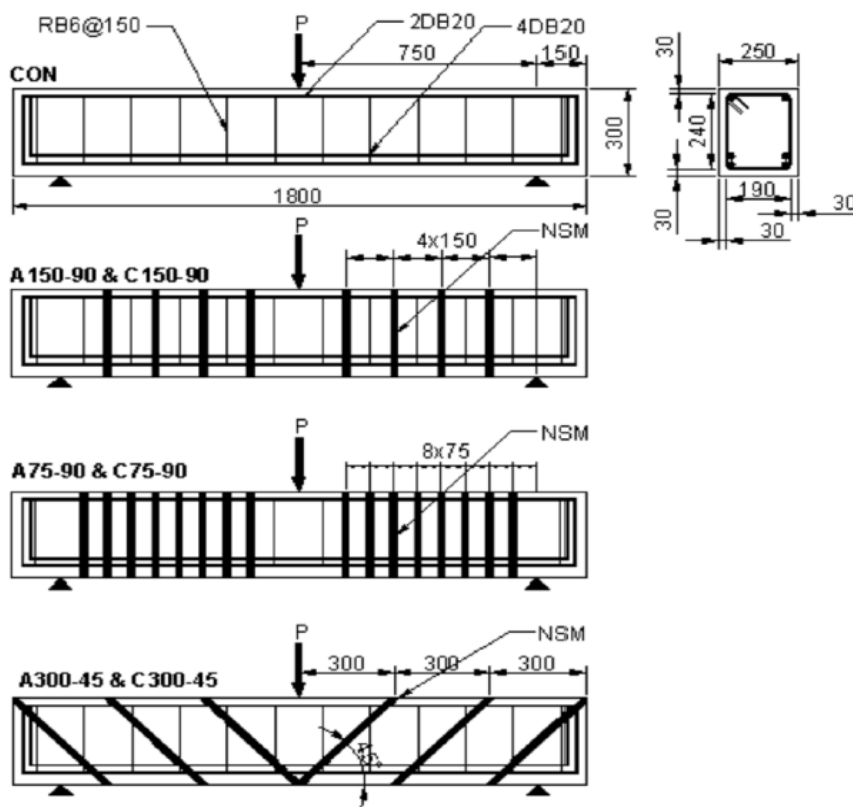
کبرایی و همکاران (۱۳) تحقیقاتی انجام دادند که در آن به تاثیرات استفاده‌ی میله‌ی CFRP به جای خاموت برشی در تیر بتن مسلح رسیدگی شد. همه‌ی تیرها دارای بتن با مقاومت بالا بودند. نتایج نشان داد که تیرهای دارای خاموت CFRP دارای ظرفیت باربری بیشتر و تغییرمکان کوچکتر در مقایسه با تیر دارای خاموت فولادی بود. تیرهای دارای خاموت CFRP ترکها را بهتر توزیع کردند اگرچه پهنای ترکها بزرگتر از تیرهای با خاموت فولادی بود. با کاهش فاصله خاموتهای CFRP تعداد ترکها بیشتر و پهنای آن کمتر شد.

دیاس و باروس (۱۴)، مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام دادند که در آن تاثیر کاربرد CFRP به روش NSM بر مقاومت برشی تیر بتن مسلح T شکل ارزیابی شده است. همچنین تاثیر دو روش NSM و EBR در تقویت برشی تیر باهم مقایسه شدند. بررسی‌ها نشان داد که هر دو روش بکار برده شده برای تقویت برشی (NSM و EBR) باعث افزایش ظرفیت برشی تیر شدند. روش تقویت برشی NSM موثرتر از روش EBR بود. قرارگیری لایه‌ها در شیب ۴۵ درجه بیشترین تاثیر را در میان انواع قرارگیری داشت. وجود خاموت نقش مهمی را در کارایی تقویت برشی به روش NSM ایفا نمود. در حقیقت در تیرهای با درصد خاموت کمتر، این کارایی بیشتر بود.

پونگساک^۱ و همکاران (۱۵) هفت تیر بتنی را مورد آزمایش قرار دادند. یک تیر به عنوان تیر کنترل (CON) در نظر گرفته شد. سه تیر با استفاده از میله‌های CFRP و سه تیر با استفاده از میله‌های AFRP به صورت NSM تقویت برشی شدند. پارامترهای متغیر آزمایش، فاصله بین میله‌ها و زاویه‌ی میله‌ها با محور تیر بود. شکل ۲-۲۰ جزئیات و مقطع تیرها را نشان می‌دهد. در جدول ۲-۸ مشخصات تیرها ارائه گردیده است. از این آزمایش نتایج زیر بدست آمد: - اندازه شیار $1.5d_b$ در روش NSM در مقایسه با شیار $2d_b$ تاثیر بیشتری دارد. این تاثیرات در چسبندگی بیشتر بین بتن و چسب،

¹ Pongsak

سختی بیشتر و نیاز کمتر به چسب مشاهده شد - ظرفیت برشی تیرهای تقویت شده به روش NSM، برای میله‌ی CFRP به بین دامنه ۲۳ تا ۳۲ درصد و برای میله‌ی AFRP به بین دامنه ۲۹ تا ۴۱ درصد در مقایسه با تیرکنترل، افزایش پیدا کرد. - اگرچه افزایش تعداد میله‌های FRP معمولاً باعث افزایش ظرفیت برشی تیر می‌شود، اگر فاصله بین میله‌های FRP و یا پوشش بتن کم باشد، این افزایش ممکن است به جدا شدن FRP منجر شود. در جدول ۹-۲ نتایج آزمایش و در نمودار ۴-۲ منحنی نیرو-تغییر مکان تیر تقویت شده با CFRP ارائه شده است.



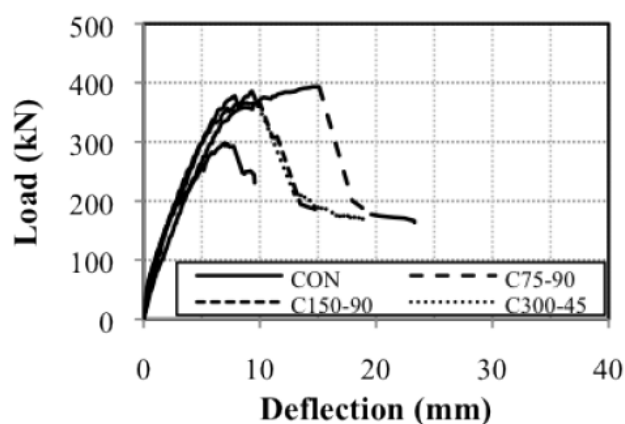
شکل ۲-۲۰ جزئیات و مقطع تیرها (۱۵)

جدول ۸-۲ مشخصات تیرها (۱۵)

Code	Shear strengthening system	Spacing of steel stirrup (mm)	Spacing of NSM rods (mm)	Slope of NSM FRP (degree)
CON	Steel stirrups	150	-	-
A75-90	Steel stirrups & AFRP	150	75	90
A150-90	Steel stirrups & AFRP	150	150	90
A300-45	Steel stirrups & AFRP	150	300	45
C75-90	Steel stirrups & CFRP	150	75	90
C150-90	Steel stirrups & CFRP	150	150	90
C300-45	Steel stirrups & CFRP	150	300	45

جدول ۹-۲ نتایج آزمایش (۱۵)

Code	P_{max} (kN)	$\frac{P_{max_F}}{P_{max_C}}$	δ_{max} (mm)	$\frac{\delta_{max_F}}{\delta_{max_C}}$	Failure mode
CON	297.93	1.00	6.96	1.00	Shear
A75-90	388.87	1.31	11.35	1.63	Shear (peeling of NSM layers)
A150-90	420.75	1.41	16.21	2.33	Flexure
A300-45	385.73	1.29	13.84	1.99	Shear
C75-90	392.99	1.32	15.11	2.17	Shear (peeling of NSM layers)
C150-90	385.43	1.29	9.33	1.34	Shear (peeling of NSM layers)
C300-45	365.32	1.23	9.56	1.37	Shear



نمودار ۴-۲ منحنی نیرو-تغییر مکان تیر تقویت شده با CFRP (۱۵)

تورس^۱ و همکاران (۱۶)، آزمایش بیرون کشیدگی^۲ انجام دادند تا تاثیر فاکتورهای گوناگون روی رفتار پیوستگی روش تقویت NSM FRP در بتن مطالعه گردد. از این آزمایش نتایج زیر بدست آمد:

- وقتی که نوع چسب اپوکسی از A به B تغییر کرد (قوی تر شد) بارگسیختگی در نمونه‌های NSM CFRP با طول گیرایی و شیار مشابه، تقریباً ۲۰,۴ درصد افزایش پیدا کرد. بارگسیختگی در نمونه‌های NSM GFRP، با تغییر نوع چسب اپوکسی از A به B و C و D، به ترتیب ۳۲,۴، ۳۶,۷ و ۴۶,۳ درصد افزایش پیدا کرد.

- افزایش قطر میلگرد از ۸ به ۹,۵ میلیمتر، برای CFRP با سختی محوری مشابه، باعث افزایش بار گسیختگی تا حدود ۲۱,۹۵ درصد و افزایش قطر میلگرد از ۸ به ۱۲ میلیمتر، باعث افزایش بار گسیختگی تا حدود ۷۲ درصد و بدون تغییر در مد گسیختگی شد.

- افزایش پهنای شیار و افزایش طول گیرایی باعث افزایش بار گسیختگی شد.

- نتایج نشان داد که مهم‌ترین فاکتورهای موثر رفتار چسبندگی و بارگسیختگی و نحوه‌ی گسیختگی میلگرد NSM، طول گیرایی و اندازه‌ی میلگرد NSM و مشخصات چسب می‌باشد.

باروس و دیاس (۱۷)، آزمایشات انجام شده بر روی عوامل موثر کارایی تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM و با لایه‌های CFRP با جزئیات کامل شرح و نتایج حاصل از آزمایشات مورد بحث قرار دادند که نتایج در ادامه آمده است: تقویت برشی به روش NSM و با لایه‌های CFRP روش موثری برای تقویت برشی تیر بتن مسلح با درصد خاموت معین، می‌باشد. تقویت برشی به روش NSM و با لایه‌های CFRP نه تنها باعث افزایش بیشترین بار می‌شود، بلکه ظرفیت باربری بعد از تشکیل ترک برشی را نیز افزایش می‌دهد- علیرغم درصد CFRP، درصد خاموت و مقاومت بتن، مشخص گردید که لایه‌های شیب‌دار CFRP بیشتر از لایه‌های عمودی تاثیر دارد- افزایش درصد CFRP به افزایش مقاومت برشی تیر بتن مسلح منجر می‌شود- افزایش درصد خاموت بر کارایی تقویت برشی تیر

¹ Torres

² pullout test

بتن مسلح به روش NSM و با لایه‌های CFRP، تاثیر منفی دارد- سهم مقاومت برشی NSM-CFRP به مقاومت بتن محدود می‌شود. اگر چه روش NSM-CFRP برای تیر بتن مسلح با بتن با مقاومت پایین هم موثر است، اما این روش در تیرهای بتن مسلح، با مقاومت بتن بالا، تاثیر بیشتری دارد. این تاثیر نه تنها باعث افزایش ظرفیت باربری بلکه باعث بکارگیری بیشتر از خصوصیات کششی CFRP می‌شود.

مستوفی‌نژاد و همکاران (۱۸) آزمایشاتی انجام دادند که در آن رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با مصالح FRP به روش NSM مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که مقاومت تیرهای مقاوم‌سازی شده، حدود ۱۰ درصد نسبت به تیر تقویت نشده افزایش یافت. حداکثر کرنش کششی ثبت شده‌ی نوار CFRP برای نمونه‌ی تقویت شده در مقطع بحرانی، برابر با 65 درصد کرنش نهایی نوار CFRP بوده است. شکل پذیری تیر تقویت شده ۷ درصد کمتر از تیر بدون تقویت ثبت شد.

مستوفی‌نژاد و همکاران (۱۹) مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح با استفاده از مصالح پیش تنیده FRP به روش نصب در نزدیک سطح را مورد بررسی قرار دادند. یک تیر بدون به عنوان تیر مرجع، یک تیر تقویت شده با مصالح غیر پیش تنیده FRP، و سه تیر تقویت شده با مصالح پیش تنیده FRP آزمایش شد. نتایج آزمایشات نشان داد که تیرهای تقویت شده ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده بیشتر از تیر بدون تقویت می‌باشد و تیرهای تقویت شده با مصالح پیش تنیده FRP، حدود ۱۵ درصد نسبت به تیرهای تقویت شده با مصالح غیر پیش تنیده FRP باعث افزایش ظرفیت باربری تیر شد.

فصل سوم

تشریح آزمایشهای انجام شده

۳-۱ مقدمه

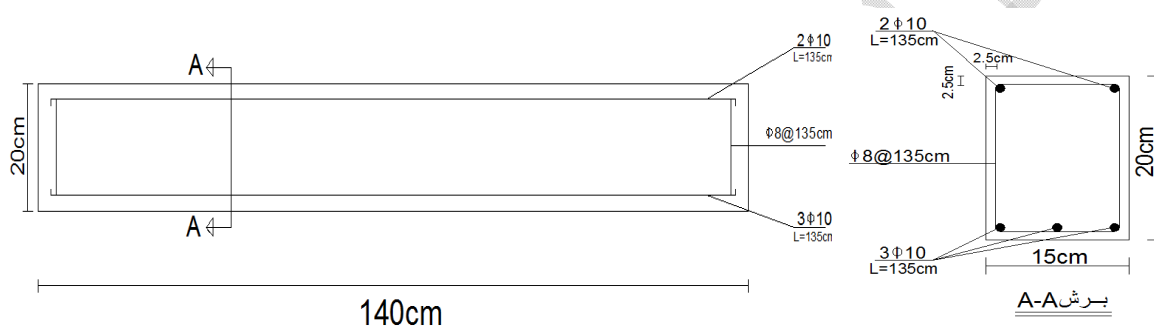
در این آزمایش، که توسط نگارنده‌ی پایان‌نامه انجام گرفت، سه تیر بتن مسلح با میلگرد GFRP و به روش NSM تقویت برشی شدند. فاصله‌ی بین میلگرد GFRP، قطر میلگرد GFRP و زاویه‌ی میلگرد GFRP با محور طولی تیر بتن مسلح پارامترهای متغیر این آزمایش می‌باشند تا آرایش بهینه‌ی نصب میلگرد GFRP در مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح با روش تعبیه در نزدیک سطح ارزیابی شود. برای این منظور، سه تیر بتن مسلح، با سطح مقطع و طول یکسان ساخته شد و تا لحظه‌ی شکست تحت آزمایش خمشی یک نقطه‌ای قرار گرفت. طول تیرهای مورد آزمایش ۱۴۰ سانتیمتر بود که بر روی تکیه‌گاه‌هایی با دهانه‌ی ۱۲۰ سانتیمتر مورد بارگذاری و آزمایش قرار گرفتند.

سطح مقطع تیرها مستطیلی و به ابعاد 20×15 سانتیمتر در نظر گرفته شده است. دو عدد میلگرد با قطر ۱۰ میلیمتر به عنوان میلگرد فشاری و ۳ عدد میلگرد با قطر ۱۰ میلیمتر به عنوان میلگرد کششی تیرها منظور شده است. از ۲ خاموت بسته با میلگرد به قطر ۸ میلیمتر که در دو انتهای میلگردهای طولی بسته شده است، به عنوان میلگرد برشی استفاده شده است. تیرها با ضعف برشی طراحی شدند تا در برش جوابگو نباشد. پوشش بتن ۲٫۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. در شکل ۳-۱ و ۳-۲ جزئیات میلگردگذاری تیرها نشان داده شده است.

هدف این بود که از نتایج این آزمایش برای صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی که در فصل ۴ آورده می‌شود، استفاده شود. ولی با توجه به امکانات و ابزار موجود و محدود بودن نتایج ثبت شده، از نتایج این آزمایش برای صحت‌سنجی مدل‌سازی استفاده نشد.



شکل ۳-۱ میلگردگذاری تیرها



شکل ۳-۲ نمای شماتیک جزئیات میلگردگذاری تیرها

۳-۲ خواص مصالح مصرفی

نمونه‌های مکعبی 15×15 سانتیمتر در هنگام بتن‌ریزی تیرها ساخته شد و در شرایط مشابه با تیرها عمل‌آوری گردید. میانگین مقاومت فشاری این نمونه‌ها در روز آزمایش برابر با ۴۲۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بدست آمد. میلگردهای آجدار مصرفی ساخت کارخانه‌ی ذوب آهن اصفهان و دارای تنش تسلیمی برابر با ۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشند.

میلگرد FRP استفاده شده در این آزمایش به قطر ۱۰ و ۷ میلیمتر و از نوع شیشه با وزن ۰,۱۲ کیلوگرم بر متر می‌باشد. رفتار این ماده تا لحظه شکست به صورت خطی بوده که کارخانه‌ی سازنده، تنش کششی حداکثر و مدول الاستیسیته آن را به ترتیب برابر با ۱۲۰۰ و ۵۵۰۰۰ مگاپاسکال اعلام

کرده است. کرنش شکست میلگرد GFRP ، برابر با ۲,۲ درصد می باشد. در شکل ۳-۳ نحوه ی آزمایش نمونه ی مکعبی و در شکل ۴-۳ میلگرد GFRP را نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ آزمایش نمونه مکعبی



شکل ۳-۴ میلگرد GFRP

۳-۳ روش انجام مقاوم سازی

در مقاوم سازی برشی تیر بتن مسلح به روش NSM، با برش سطح بتن، شیارهایی روی سطوحی جانبی تیر در دهانه های برشی ایجاد و بعد از تخلیه ی شیار از ذرات اضافی و گردوغبار، تا حدود نیمی از شیار با اپوکسی یا چسب پرگردید، سپس میلگرد GFRP در داخل شیار قرار داده شد و سرانجام نیمه ی دیگر شیار را نیز با چسب پر شد تا سطح بتن مسطح گردد. برای استفاده از میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلیمتر، شیارهایی با سطح مقطع $1,4 \times 1,4$ سانتیمتر و برای استفاده از میلگرد GFRP به قطر ۷ میلیمتر، شیارهایی با سطح مقطع $1,1 \times 1,1$ سانتیمتر روی سطح بتن و در محل های مورد نظر ایجاد شد.

شکل ۳-۵ علامت گذاری محل قرار گرفتن شیار، شکل ۳-۶ ایجاد شیار با دستگاه سنگ تراش ، شکل ۳-۷ تمیز کردن شیار از گرد و خاک ، شکل ۳-۸ چسب زدن شیار، شکل ۳-۹ قرار دادن میلگرد GFRP در شیار و شکل ۳-۱۰ پر کردن شیار با چسب را نشان می دهد.



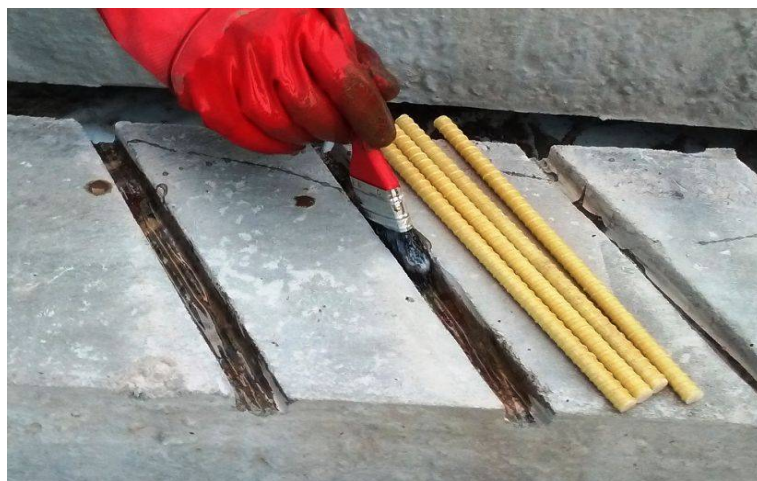
شکل ۳-۵ علامت گذاری محل قرار گرفتن شیار



شکل ۳-۶ ایجاد شیار



شکل ۳-۷ تمیز کردن شیار



شکل ۳-۸ چسب زدن شیار



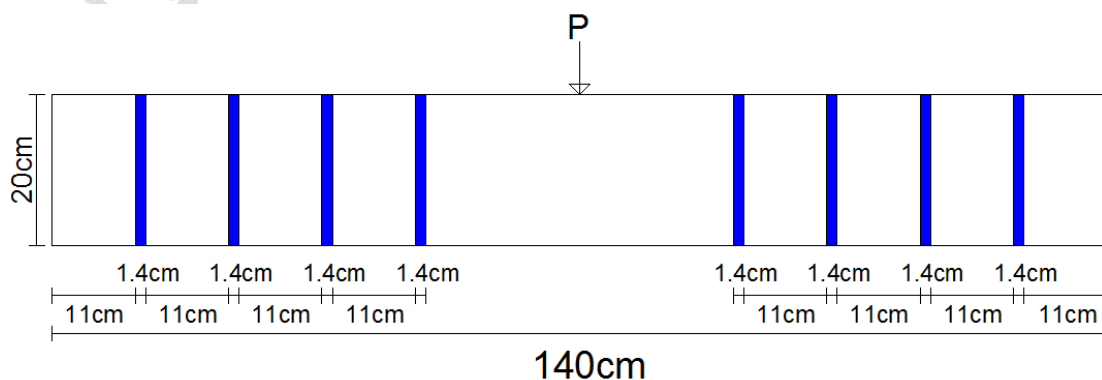
شکل ۳-۹ قرار دادن میلگرد GFRP در شیار



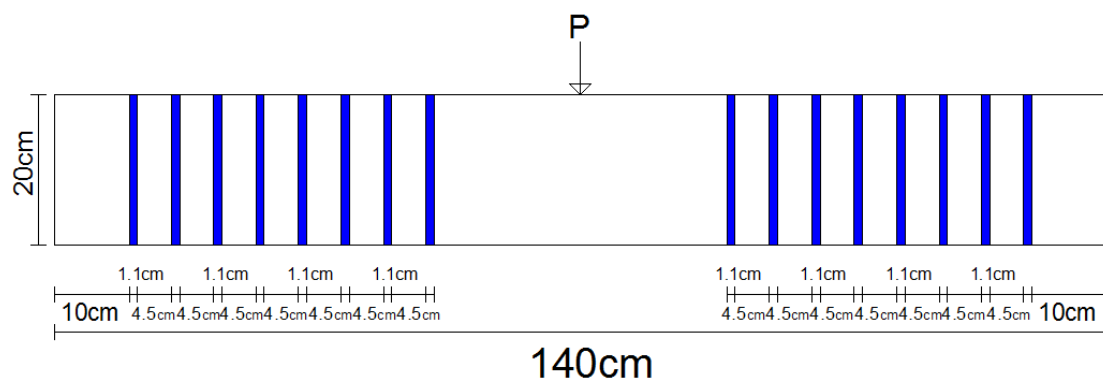
شکل ۳-۱۰ پر کردن شیار با چسب

۳-۴ مشخصات تیرهای آزمایش شده

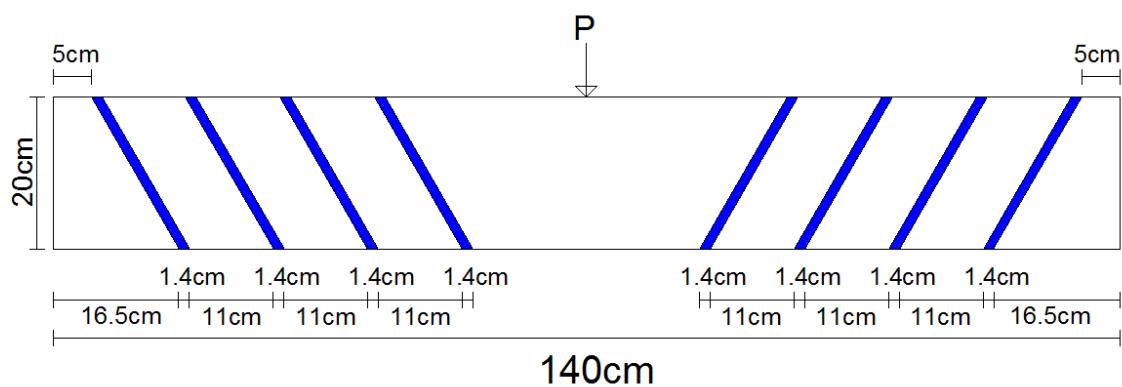
تیرهای NSMIL10، NSMV10 و NSMV7 به روش NSM تقویت برشی شدند. مقدار GFRP استفاده شده در تیرها برابر می‌باشد. تیر NSMV10، با ۱۶ عدد میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلیمتر و با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۱۲۴ میلیمتر و با زاویه‌ی ۹۰ درجه با محور طولی تیر تقویت برشی گردید. در تیر NSMV7، ۳۲ عدد میلگرد GFRP به قطر ۷ میلیمتر و با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۵۶ میلیمتر و با زاویه‌ی ۹۰ درجه با محور طولی تیر استفاده شد. در تیر NSMV10 در دو طرف هر دو دهانه‌ی برشی، فاصله‌ی اولین شیار از لبه‌ی کناری تیر ۱۱ سانتیمتر و در تیر NSMV7 این فاصله، ۱۰ سانتیمتر شد. در تیر NSMIL10، ۱۶ عدد میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلیمتر و با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۱۲۴ میلیمتر و با زاویه‌ی ۶۰ درجه با محور طولی تیر بکار برده شد. در دو طرف هر دو دهانه‌ی برشی، فاصله‌ی اولین شیار از لبه‌ی کناری تیر، در بالای تیر ۵ سانتیمتر و در پایین تیر ۱۶،۵ سانتیمتر شد. دلیل انتخاب زاویه‌ی ۶۰ درجه، اجرای راحت‌تر و در عین حال تاثیرگذاری آن می‌باشد. در تیرهایی که با میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلیمتر تقویت برشی شدند، ابعاد شیار $۱,۴ \times ۱,۴$ سانتیمتر و در تیری که با میلگرد GFRP به قطر ۷ میلیمتر تقویت برشی شد، ابعاد شیار $۱,۱ \times ۱,۱$ سانتیمتر در نظر گرفته شد. شکل ۳-۱۱ نمای شماتیک تیر NSMV10، شکل ۳-۱۲ نمای شماتیک تیر NSMV7، شکل ۳-۱۳ نمای شماتیک تیر NSMIL10 و شکل ۳-۱۴ جزئیات مقطع شیار را ارائه می‌کند.



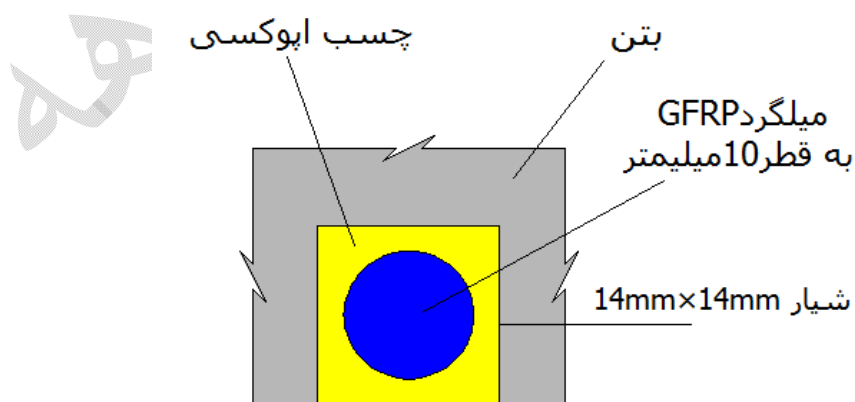
شکل ۳-۱۱ نمای شماتیک تیر NSMV10



شکل ۳-۱۲ نمای شماتیک تیر NSMV7



شکل ۳-۱۳ نمای شماتیک تیر NSMIL10



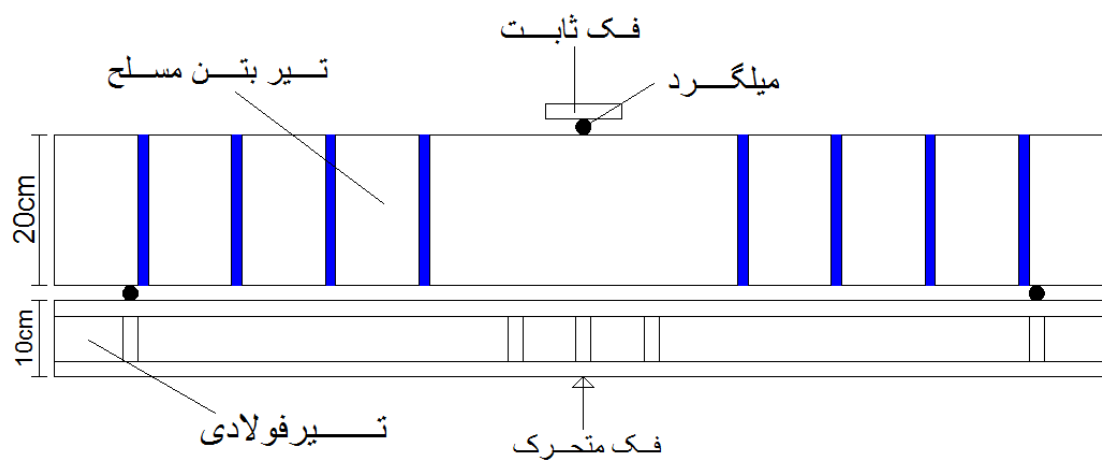
شکل ۳-۱۴ جزئیات مقطع شیار در روش NSM

۳-۵ انجام آزمایش

برای بارگذاری تیر بتن مسلح دستگاه جک بتن شکن ۳۰۰ تن برقی بکار برده شد. این دستگاه مخصوص بدست آوردن مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای بتن می‌باشد و به دلیل نبود امکانات برای انجام این آزمایش استفاده شد. از ورقهای فولادی به ضخامت ۲۰ میلیمتر، تیر فولادی ایجاد و با ورق سخت کننده تقویت گردید. روی تیر فولادی دو عدد میلگرد به قطر ۲۰ میلیمتر و با فاصله‌ی ۱۲۰ سانتیمتر جوش و از آن به عنوان تکیه‌گاه استفاده شد. ابتدا تیر فولادی روی قسمت متحرک جک بتن شکن قرار داده شد. سپس تیر بتن مسلح بر روی میلگردهای تیر فولادی قرار گرفت و در بالا و در وسط دهانه‌ی تیر بتن مسلح نیز یک میلگرد کار گذاشته شد. در این سیستم میلگردهای قرار داده شده روی تیر فولادی به عنوان تکیه‌گاه و میلگرد قرار داده شده روی وسط دهانه‌ی تیر بتن مسلح به عنوان بار متمرکز در نظر گرفته شد. در مرکز پایینی تیر بتن مسلح ریز سنج D1، برای اندازه‌گیری تغییر مکان وسط دهانه و در بالای تیر بتن مسلح و در راستای تکیه‌گاه، ریزسنج D2 برای اندازه‌گیری تغییر مکان تکیه‌گاه، قرار گرفت. در شکل ۳-۱۵ تیر فولادی ساخته شده به عنوان تکیه‌گاه و نحوه‌ی قرار گرفتن روی دستگاه جک بتن شکن، در شکل ۳-۱۶ نمای شماتیک قرارگیری تیرهای بتنی و فولادی و ریزسنج‌ها و شکل ۳-۱۷ نحوه‌ی قرارگیری تیرهای بتنی و فولادی و ریزسنج‌ها در دستگاه جک بتن شکن نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۵ تکیه‌گاه فولادی



شکل ۳-۱۶ نمای شماتیک قرارگیری تیرهای بتنی و فولادی و ریزسنگ ها



(a)



(b)

شکل ۳-۱۷ قرارگیری تیرهای بتنی و فولادی و ریزسنگ ها؛ شکل (a) تیر NSMV10 و NSMV7،

(b) تیر NSMIL10

۳-۶ مد گسیختگی

در همه‌ی تیرها گسیختگی برشی بوسیله ترک قطری برشی مشاهده شد. این ترکها به تدریج از بار متمرکز شروع و به سمت محل تکیه‌گاه گسترش پیدا کردند. تیرها با لغزیدن میلگردهای GFRP و کنده‌شدن پوشش چسب از سطح شیار، با ایجاد ترکهای قطری در بتن گسیخته شدند که این موضوع نشان دهنده‌ی چسبندگی نامناسب بین میلگرد و بتن می‌باشد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت و نتایج آزمایشهای موجود نیز نشان می‌داد، این نوع گسیختگی برای تیرهای مقاوم سازی برشی شده به روش NSM، دیده شد. شکل ۳-۱۸ نحوه‌ی ترک خوردن و گسیختگی تیر NSMV10، شکل ۳-۱۹ نحوه‌ی ترک خوردن و گسیختگی تیر NSMV7 و شکل ۳-۲۰ نحوه‌ی ترک خوردن و گسیختگی تیر NSMIL10 ارائه می‌کند.



شکل ۳-۱۸ ترک خوردن و گسیختگی تیر NSMV10



شکل ۳-۱۹ ترک خوردن و گسیختگی تیر NSMV7



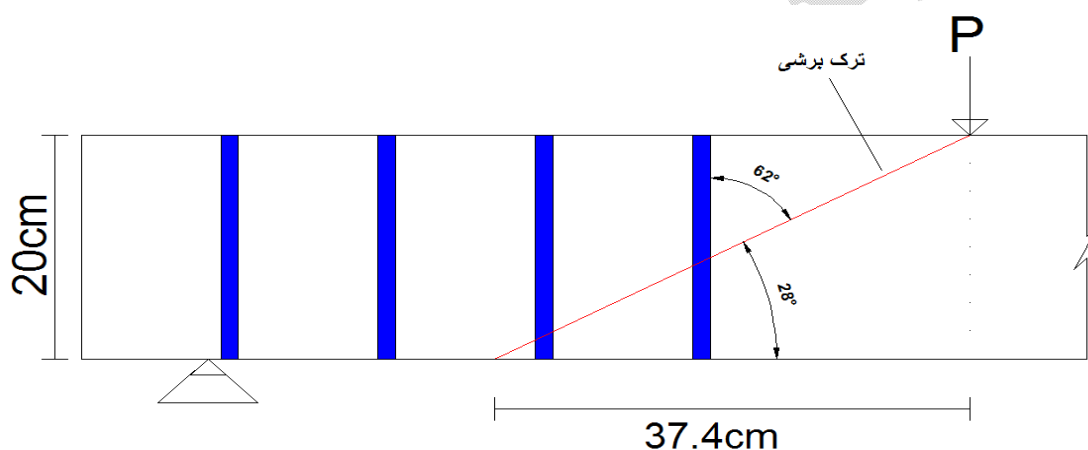
شکل ۳-۲ ترک خوردن و گسیختگی تیر NSMIL10

۳-۷ بار نهایی تیرها

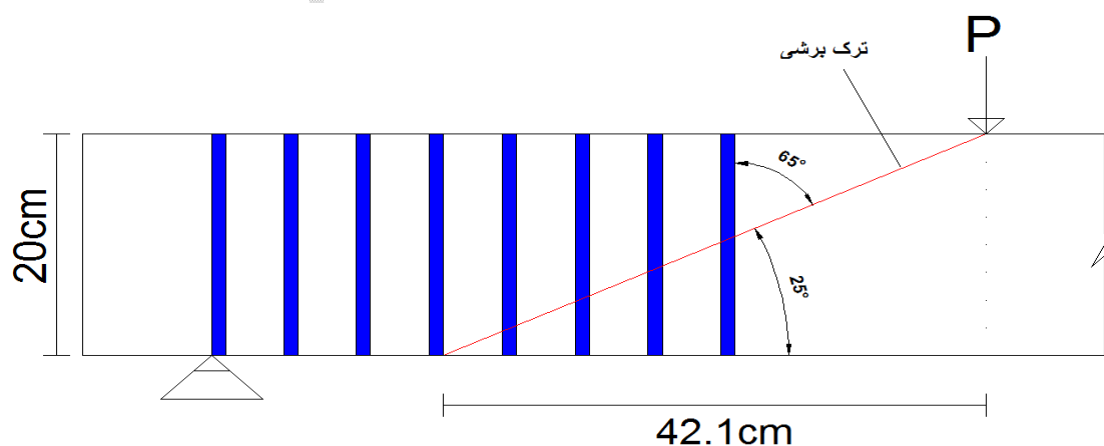
تیر تقویت شده‌ی NSMIL10 کارایی بهتری از دو تیر دیگر نشان داد. بار نهایی تیر NSMV10، ۶,۸۷ تن، تیر NSMV7 ۷,۹۴ تن و تیر NSMIL10، ۱۱,۲۹ تن بدست آمد. تیر NSMIL10 در مقایسه با تیر NSMV10 و تیر NSMV7، به ترتیب باعث افزایش ۶۴,۳ و ۴۲,۲ درصد در ظرفیت باربری گردید. هرچه زاویه تقاطع ترک و میلگرد GFRP کار گذاشته شده، به زاویه‌ی ۹۰ درجه نزدیک باشد، در جلوگیری از عریض تر شدن ترک بهتر عمل می‌کند. در تیر NSMIL10، کاربرد میلگرد GFRP با زاویه‌ی ۶۰ درجه با محور طولی تیر، باعث قطع ترک قطری برشی در زاویه‌ی حدود ۹۳ درجه شد. در تیر NSMV10، زاویه‌ی بین میلگرد و ترک برشی حدود ۶۲ درجه بدست آمد. این زاویه برای تیر NSMV7، حدود ۶۵ درجه ثبت شد. مشخص گردید که کاربرد میلگردهای GFRP با زاویه‌ی ۶۰ درجه بیشتر از ۹۰ درجه تاثیر دارد. ظرفیت باربری تیر NSMV7 نسبت به تیر NSMV10، ۱۵,۶ درصد افزایش یافت. مشخص شد که با یک مقدار برابر GFRP و زاویه‌ی نصب یکسان، استفاده از

میلگرد با قطر کوچکتر و با فاصله‌ی کمتر، تاثیر بیشتری در باربری نهایی تیر تقویت شده دارد. تعداد میلگرد GFRP که ترک برشی را قطع نماید، بر تاثیر تقویت برشی می‌افزاید. در شکل‌های ۳-۲۱ تا ۳-۲۳ نمای شماتیک حدود تقریبی قطع ترک برشی با میلگردهای GFRP و زاویه‌ی بین آنها نشان داده شده است.

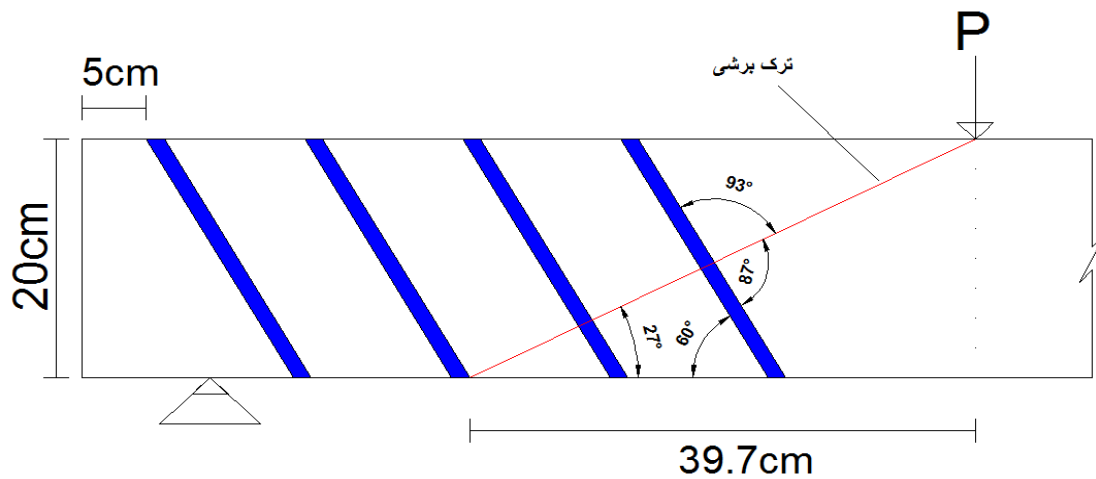
مدل‌سازی تیر آزمایش شده‌ی NSMV7 با نرم افزار اجزاء محدود Abaqus انجام گرفت. نحوه‌ی گسترش ترک و نوع ترک خوردن در تیر مدل‌سازی شده، شباهت زیادی به تیر آزمایش شده‌ی NSMV7 دارد. در شکل ۳-۲۴ نحوه‌ی ترک خوردن تیر آزمایش شده‌ی NSMV7 با تیر مدل‌سازی شده‌ی NSMV7، مقایسه شده است.



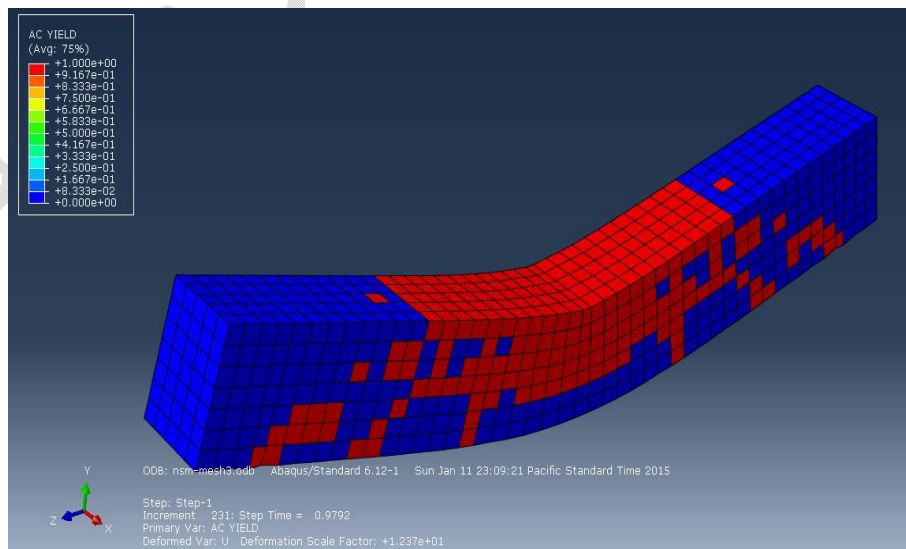
شکل ۳-۲۱ نمای شماتیک زاویه‌ی بین ترک برشی و میلگرد GFRP در تیر NSMV10



شکل ۳-۲۲ نمای شماتیک زاویه‌ی بین ترک برشی و میلگرد GFRP در تیر NSMV7



شکل ۳-۲۳ نمای شماتیک زاویه‌ی بین ترک برشی و میلگرد GFRP در تیر NSMIL10



شکل ۳-۲۴ مقایسه نحوه‌ی ترک خوردن تیر آزمایش شده و تیر مدل‌سازی شده NSMV7

۳-۸ نتیجه گیری

تیرهای بتن مسلح تقویت شده در برش با آرایش مختلف میلگرد GFRP و به روش NSM، آزمایش شد، تا آرایش بهینه‌ی نصب میلگرد GFRP در مقاوم سازی برشی تیرهای بتن مسلح با روش تعبیه در نزدیک سطح ارزیابی شود. مقدار استفاده‌ی میلگرد GFRP در تیرها یکسان می‌باشد. از این آزمایش نتایج زیر بدست آمد:

۱- در ترم مد گسیختگی، در همه‌ی تیرها، گسیختگی برشی بوسیله‌ی ترک قطری برشی مشاهده شد. این ترکها به تدریج از بار متمرکز شروع و به سمت محل تکیه‌گاه گسترش پیدا کردند. تیرها با لغزیدن میلگردهای GFRP و کنده شدن پوشش چسب از سطح شیار، با ایجاد ترکهای قطری در بتن گسیخته شد که این موضوع نشان‌دهنده‌ی چسبندگی نامناسب بین میلگرد و بتن می‌باشد. این نوع گسیختگی برای تیرهای مقاوم‌سازی برشی شده به روش NSM، رایج می‌باشد.

۲- در ترم ظرفیت باربری نهایی، تیر تقویت شده‌ی NSMIL10 کارایی بهتری از دو تیر دیگر نشان داد. تیر NSMIL10 در مقایسه با تیر NSMV10 و تیر NSMV7، به ترتیب باعث افزایش ۶۴,۳ و ۴۲,۲ درصد در ظرفیت باربری نهایی گردید.

۳- هرچه زاویه تقاطع ترک و میلگرد GFRP کار گذاشته شده، به زاویه‌ی ۹۰ درجه نزدیک باشد، در جلوگیری از عریض تر شدن ترک بهتر عمل می‌کند.

۴- در تیر NSMIL10، کاربرد میلگرد GFRP با زاویه‌ی ۶۰ درجه با محور طولی تیر، باعث قطع ترک قطری برشی در زاویه‌ی حدود ۹۳ درجه شد. در تیر NSMV10، زاویه‌ی بین میلگرد و ترک برشی حدود ۶۲ درجه بدست آمد. این زاویه برای تیر NSMV7، حدود ۶۵ درجه ثبت شد. مشخص گردید که با مقدار برابر GFRP و فاصله‌ی نصب یکسان، آرایش میلگردهای GFRP با زاویه‌ی ۶۰ درجه بیشتر از ۹۰ درجه تاثیر دارد.

۵- ظرفیت باربری تیر NSMV7 نسبت به تیر NSMV10، ۱۵,۶ درصد افزایش یافت. مشخص شد که با مقدار برابر GFRP و زاویه‌ی نصب یکسان، استفاده از میلگرد با قطر کوچکتر و با فاصله‌ی

کمتر، تاثیر بیشتری در باربری نهایی تیر تقویت شده دارد. تعداد میلگرد GFRP که ترک برشی را قطع نماید، بر تاثیر تقویت برشی می افزاید.

۶- مدل سازی تیر آزمایش شده ی NSMV7 با نرم افزار اجزاء محدود Abaqus انجام گرفت. مقایسه ی تیرهای مدل سازی شده و آزمایش شده ی NSMV7 نشان داده که نحوه ی گسترش ترک و نوع ترک خوردن در تیر مدل سازی شده، شباهت زیادی به تیر آزمایش شده ی NSMV7 دارد.

فصل چهارم

مدل سازی عددی

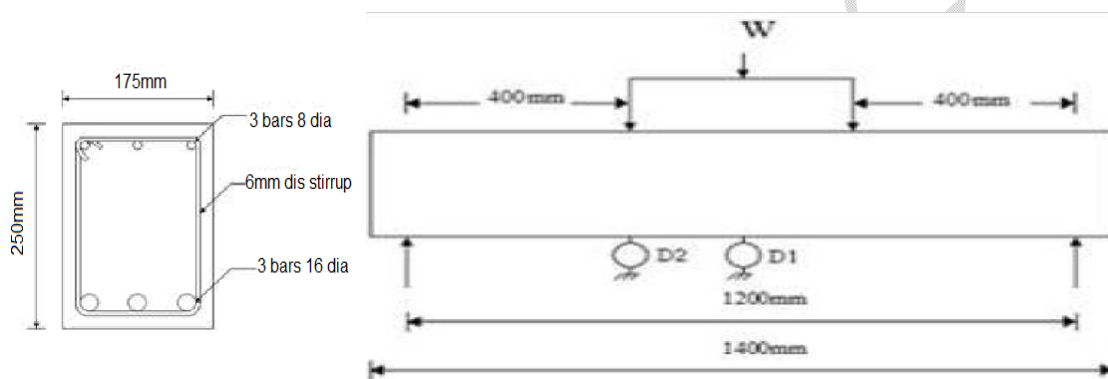
۴-۱ مقدمه

تحقیقات متنوعی در زمینه‌ی کاربرد FRP به روش NSM برای مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح انجام شده است که اغلب آنها آزمایشگاهی بوده و تحقیقات عددی انجام شده در این زمینه محدود می‌باشد. تحقیق حاضر مدل‌سازی عددی تیرهای بتن مسلح تقویت شده در برش با GFRP و به روش NSM می‌باشد. پارامترهای متغیر این مدل‌سازی، فاصله‌ی بین میله‌ی GFRP، قطر و زاویه‌ی میله‌ی GFRP با محور طولی تیر بتن مسلح می‌باشد تا آرایش بهینه‌ی نصب میلگرد GFRP در مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح با روش تعبیه در نزدیک سطح ارزیابی شود. برای اینکه صحت مدل‌سازی مشخص گردد، لازم بود تا مدل‌سازی بر روی کارهای آزمایشگاهی که نتایج آنها منتشر شده، انجام و نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج واقعی مقایسه شود. هدف این بود که از نتایج آزمایش انجام شده توسط نگارنده‌ی پایان‌نامه که در فصل ۳ آورده شده است، برای صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی استفاده شود. ولی با توجه به محدودیت امکانات و ابزار موجود و نیز محدود بودن نتایج بدست آمده، از نتایج آزمایشی که راج و سورومی^۱ (۲۰) انجام دادند، استفاده شد.

^۱ Raj and Surumi

۲-۴ نمونه آزمایشگاهی

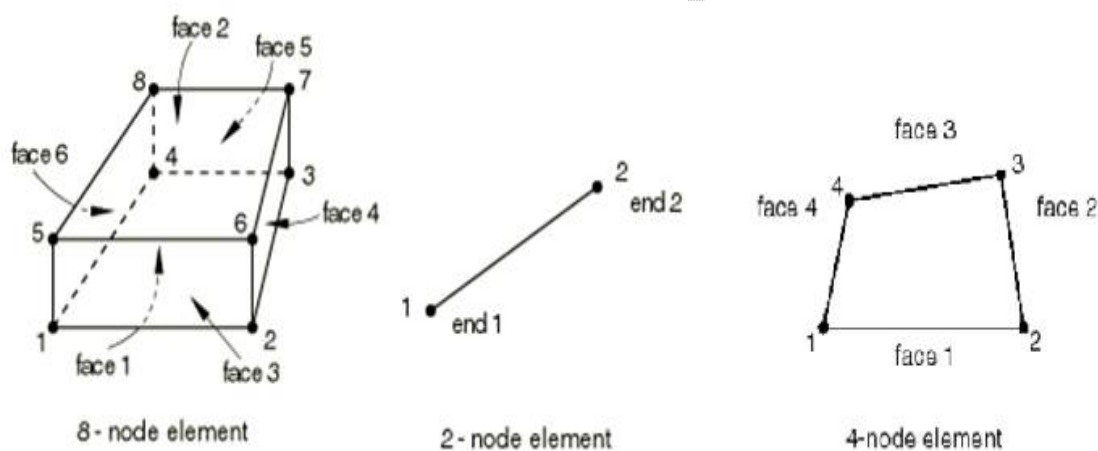
در آزمایشی که توسط راج و سورومی انجام گرفت، ابعاد مقطع تیرها، 175×250 میلیمتر و طول تیرها ۱۴۰۰ میلیمتر می‌باشند. تیرها بدون آرماتور عرضی (خاموت) طراحی شدند. آرماتورهای طولی تیر عبارتند از سه عدد میلگرد با قطر ۱۶ میلیمتر در ناحیه‌ی کششی تیر و سه عدد میلگرد با قطر ۸ میلیمتر در ناحیه فشاری تیر و آرماتور عرضی صرفاً دو عدد خاموت با قطر ۶ میلیمتر در دو طرف میلگردهای طولی استفاده شد. پوشش بتن ۲۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۱ مشخصات نمونه را ارائه می‌کند. مقاومت فشاری بتن کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و تنش تسلیم فولاد ۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در نظر گرفته شد.



شکل ۴-۱ مشخصات کلی تیرهای مورد آزمایش راج و سورومی (۲۰)

۳-۴ مشخصات و نحوه مدل سازی

برای مدل سازی عددی از نرم افزار Abaqus استفاده شد (۲۱). برای مدل سازی بتن و میل به مستطیلی شکل GFRP، از المان C3D8R استفاده شد که المان سه بعدی هشت گرهی است که در هر گره، دارای سه درجه‌ی آزادی انتقالی در جهات X و Y و Z می باشد. این المان برای مدل سازی سه بعدی با یا بدون تسلیح بکار می رود و توانایی ترک خوردن در کشش و خرد شدن در فشار را دارد. برای مدل سازی میلگردهای طولی و عرضی از المان T3D2 استفاده گردید که المانی یک بعدی با قابلیت تحمل فشار یا کشش می باشد و در هر گره، سه درجه آزادی انتقالی در جهات X و Y و Z دارد. برای مدل سازی ورقه‌ی GFRP از المان S4R استفاده شد که از نوع المان صفحه‌ای چهار گره‌ای می باشد. شکل ۲-۴ نمای شماتیک این المانها را نشان می دهد.



شکل ۲-۴ المان C3D8R؛ المان T3D2 و المان S4R

در مدل سازی بتن، از مدل مندر^۱ (۲۲) به عنوان معیار گسیختگی استفاده شده است. در این مدل

منحنی تنش-کرنش بتن توسط روابط زیر تعریف می شود:

$$\varepsilon \leq 2\varepsilon'_c$$

$$(۱-۴)$$

$$f = \frac{f'_c \cdot x \cdot r}{x - 1 - x^r}$$

که در آن :

$$(۲-۴)$$

$$r = \frac{E}{E - \frac{f'_c}{\varepsilon'_c}}$$

$$(۳-۴)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_c}$$

$$\text{و برای } 2\varepsilon'_c < \varepsilon \leq \varepsilon_u$$

$$(۴-۴)$$

$$f = \left(\frac{2r \cdot f'_c}{r - 1 + 2^r} \right) \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - 2\varepsilon'_c} \right)$$

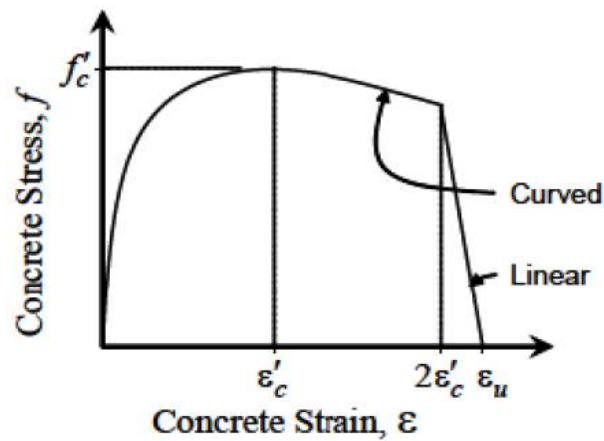
در این روابط؛ f تنش بتن؛ f'_c مقاومت فشاری بتن؛ ε کرنش؛ ε'_c کرنش متناظر با مقاومت فشاری بتن

و E مدول الاستیسیته بتن می باشند. همانطور که در نمودار ۱-۴ نشان داده شده است رفتار تنش-

کرنش بتن تا ۳۰ درصد مقاومت فشاری آن، به صورت خطی و پس از آن به صورت غیر خطی مدل

می شود.

^۱ Mander



نمودار ۱-۴ منحنی تنش-کرنش بتن Mander (۲۲)

مدل سازی میلگرد با استفاده از روابط منحنی تنش-کرنش زیر صورت گرفته است :

برای ناحیه الاستیک $\varepsilon \leq \varepsilon_y$

(۵-۴)

$$f = E \cdot \varepsilon$$

برای ناحیه پلاستیک؛ $\varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh}$

(۶-۴)

$$f = f_y$$

برای ناحیه الاستو-پلاستیک؛ $\varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq \varepsilon_u$

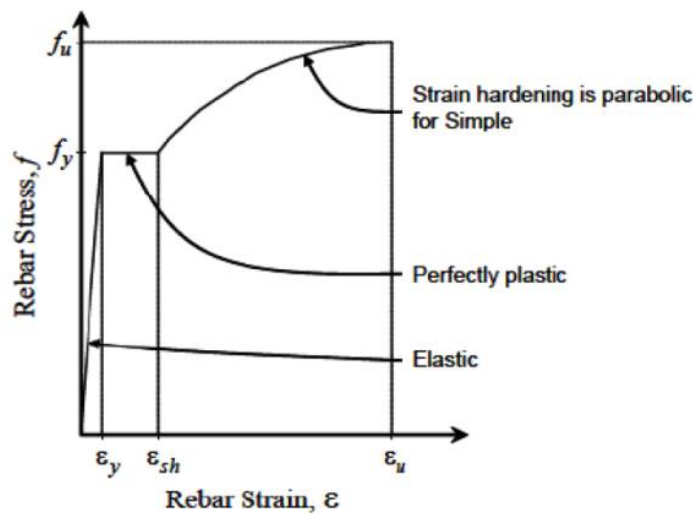
(۷-۴)

$$f = f_y + (f_u - f_y) \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}}}$$

در این روابط؛ f تنش؛ f_y تنش تسلیم؛ f_u تنش نهایی؛ ε کرنش؛ ε_{sh} کرنش سخت شدگی؛

ε_u کرنش نهایی و E مدول الاستیسیته میلگرد می باشند. جزئیات منحنی، در نمودار ۲-۴ نشان داده

شده است.



نمودار ۲-۴ منحنی تنش-کرنش میلگردها

برای FRP نیز رفتار الاستیک خطی لحاظ گردید. در این مطالعه، لغزش بین میلگردها و بتن و همچنین بین FRP و بتن در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است. مساحت و مشخصات GFRP استفاده شده در تیرها یکسان می‌باشد. برهم‌کنش بین بتن و میلگرد با گزینه‌ی embedded در نرم افزار انجام شد. در مدل‌سازی به روش NSM، چون FRP داخل شیار قرار گرفته و شیار با چسب پر می‌شود برهم‌کنش بین بتن و FRP با embedded انجام شد. بارگذاری به صورت اعمال فشار بر سطح زیر جک انجام شده و از قابلیت خودکار گامهای حل در نرم افزار استفاده شده است.

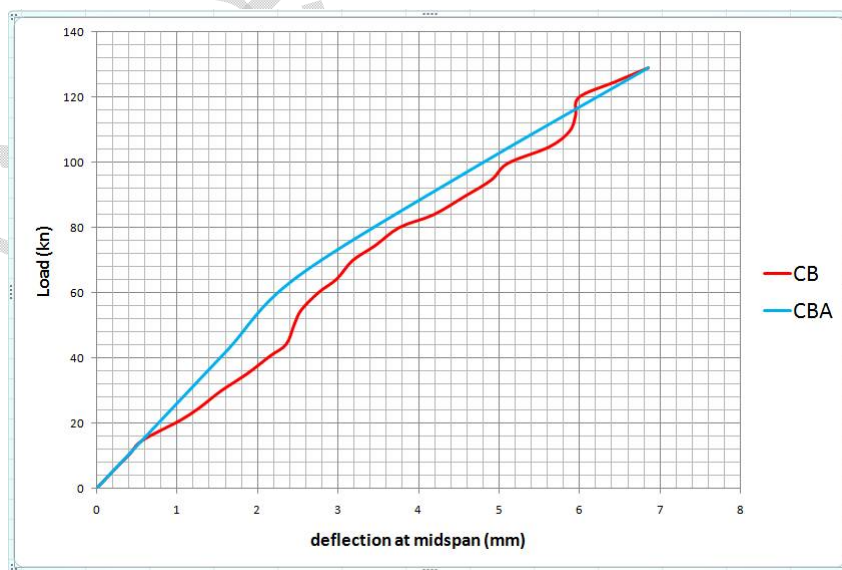
۴-۴ بررسی نتایج مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی

در این بخش نتایج مدل سازی عددی تیر مورد آزمایش راج و سورومی (۲۰) با هم مقایسه و صحت سنجی شده‌اند. مقاومت فشاری بتن ۳۴۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و تنش تسلیم فولاد ۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در نظر گرفته شد. مدول الاستیسیته بتن از رابطه ۳-۸ که در مبحث نهم مقرارت ملی ساختمان (۲۳) آورده شده است، برابر ۹۳۲۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و مدول الاستیسیته فولاد ۲۰۰۰۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع لحاظ گردید. تیر CB به عنوان تیر کنترل آزمایش شده بدون تقویت و تیر CBA به عنوان تیر کنترل مدل سازی شده، نامگذاری شدند.

(۸-۴)

$$E = 5000\sqrt{f_c}$$

منحنی نیرو-تغییر مکان تیر آزمایش شده‌ی بدون تقویت CB و تیر مدل سازی شده بدون تقویت CBA در نمودار ۳-۴ نشان داده شده است. از نظر تطابق شکل کلی نمودار، مدل سازی عددی، نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است.



نمودار ۳-۴ منحنی نیرو-تغییر مکان تیر آزمایشگاهی CB و تیر CBA مدل سازی شده با نرم افزار

۴-۵ مدل سازی عددی جهت بررسی آرایش بهینه نصب مصالح FRP

در این بخش پس از اطمینان از صحت مدل سازی مدل عددی تیر مدل سازی شده بدون تقویت CBA؛ اقدام به مدل سازی تیرهای تقویت شده با میله های FRP به روش نصب در نزدیک سطح می کنیم تا آرایش بهینه نصب مصالح FRP در تقویت برشی تیر بتن مسلح را بررسی نماییم. برای اینکار مجموعه ای شامل ۱۰ تیر بشرح زیر مدل سازی شده اند.

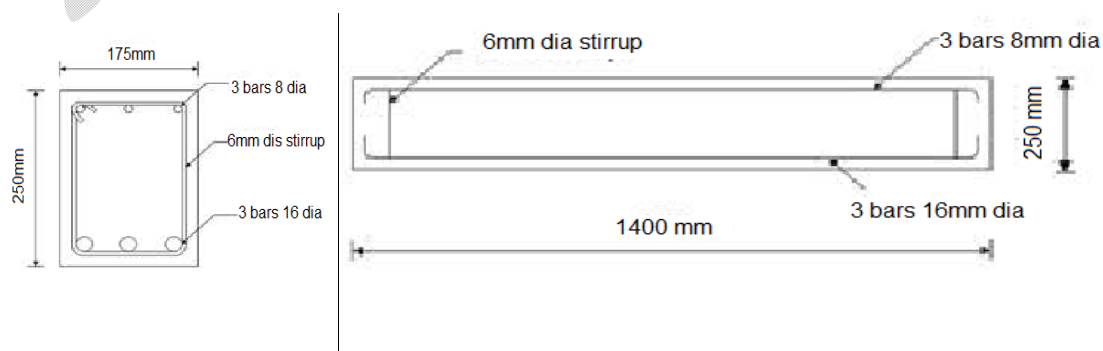
۴-۵-۱ تشریح تیرهای مدل شده

۱ تیر بتن مسلح بدون تقویت و ۹ تیر بتن مسلح با میله های GFRP و تقویت برشی شده به روش NSM، مدل سازی شدند. ابعاد مقطع، میلگرد گذاری، مشخصات مصالح، بارگذاری و تکیه گاه همه ی تیرها یکسان می باشد. مقاومت فشاری بتن 210 kg/cm^2 و تنش تسلیم فولاد 3000 kg/cm^2 در نظر گرفته شد. مساحت و مشخصات GFRP استفاده شده در تیرها یکسان می باشد. ابعاد مقطع کلیه تیرها 175×250 میلیمتر و طول تیرها 1400 میلیمتر هستند. سه عدد میلگرد با قطر 16 میلیمتر در ناحیه ی کششی تیر و سه عدد میلگرد با قطر 8 میلیمتر در ناحیه فشاری تیر و دو عدد خاموت با قطر 6 میلیمتر در دو طرف میلگردهای طولی استفاده شد. پوشش بتن 25 میلیمتر در نظر گرفته شده است. تیر Beam1 تیر بدون تقویت می باشد و به عنوان تیر کنترل در نظر گرفته می شود. تیر Beam2 ، با 16 عدد میله مستطیلی شکل GFRP با ابعاد $10 \times 22,5$ میلیمتر و با فاصله ی 90 میلیمتر و با زاویه ی 90 درجه با محور طولی تیر، تقویت برشی گردید. تیر Beam3، با 16 عدد میله مستطیلی شکل GFRP با ابعاد $10 \times 22,5$ میلیمتر و با فاصله ی 90 میلیمتر و با زاویه ی 60 درجه و تیر Beam4 نیز با 16 عدد میله مستطیلی شکل GFRP با ابعاد $10 \times 22,5$ میلیمتر و با فاصله ی 90 میلیمتر و با زاویه ی 45 درجه با محور طولی تیر، تقویت برشی گردید. تیرهای Beam5، Beam6 و Beam7 با 32 عدد میله مستطیلی شکل GFRP با ابعاد $5 \times 22,5$ میلیمتر و با فاصله ی 45 میلیمتر تقویت برشی شدند. زاویه ی میله مستطیلی شکل GFRP با محور طولی تیر، در تیر Beam5، 90 درجه، در تیر Beam6، 60 درجه و در تیر Beam7، 45 می باشد. تیرهای Beam8، Beam9 و Beam10 با 12 عدد میله

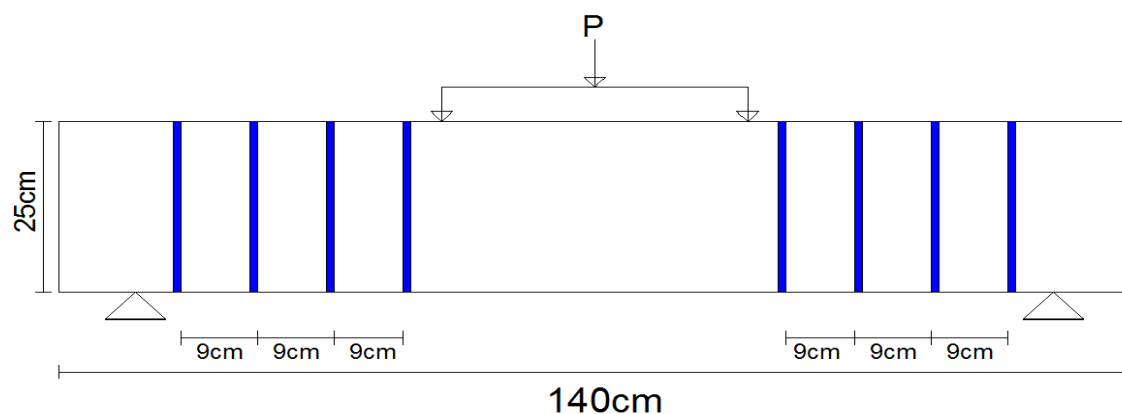
مستطیلی شکل GFRP با ابعاد $13 \times 22,5$ میلیمتر و با فاصله ی ۱۵۰ میلیمتر تقویت برشی شدند. زاویه ی میله مستطیلی شکل GFRP با محور طولی تیر، در تیر Beam8، ۹۰ درجه، در تیر Beam9، ۶۰ درجه و در تیر Beam10، ۴۵ می باشد. جدول ۴-۱ جزئیات تیرهای مدل سازی شده را ارائه می کند. شکل ۴-۳ جزئیات میلگردگذاری و مقطع تیرهای مدل سازی شده و شکل های ۴-۴ تا ۴-۱۲ نمای شماتیک تیرهای تقویت شده ی برشی به روش NSM را نشان می دهد.

جدول ۴-۱ جزئیات تیرهای مدل سازی شده

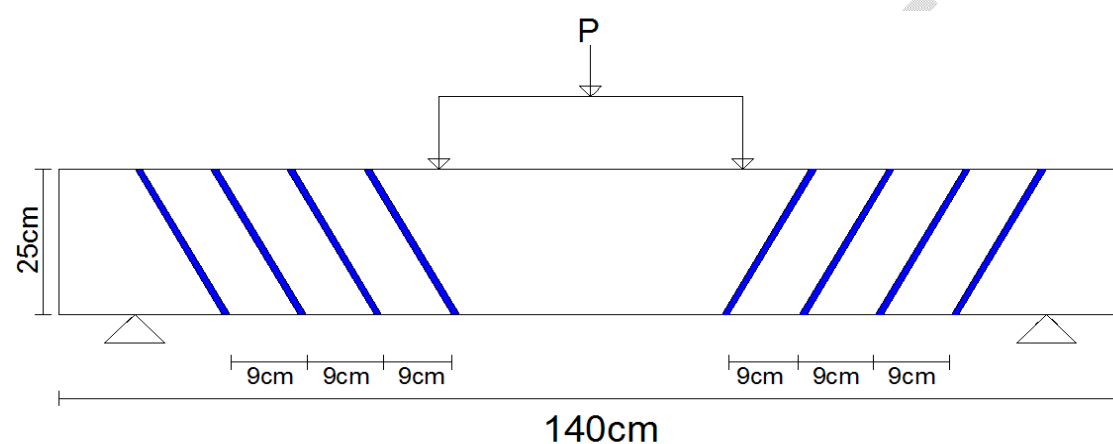
نام تیر	عرض FRP a_f (mm)	طول FRP b_f (mm)	فاصله بین FRP s_f (mm)	تعداد FRP n	زاویه FRP α (درجه)
Beam1	-	-	-	-	-
Beam2	۱۰	۲۲,۵	۹۰	۱۶	۹۰
Beam3	۱۰	۲۲,۵	۹۰	۱۶	۶۰
Beam4	۱۰	۲۲,۵	۹۰	۱۶	۴۵
Beam5	۵	۲۲,۵	۴۵	۳۲	۹۰
Beam6	۵	۲۲,۵	۴۵	۳۲	۶۰
Beam7	۵	۲۲,۵	۴۵	۳۲	۴۵
Beam8	۱۳	۲۲,۵	۱۵۰	۱۲	۹۰
Beam9	۱۳	۲۲,۵	۱۵۰	۱۲	۶۰
Beam10	۱۳	۲۲,۵	۱۵۰	۱۲	۴۵



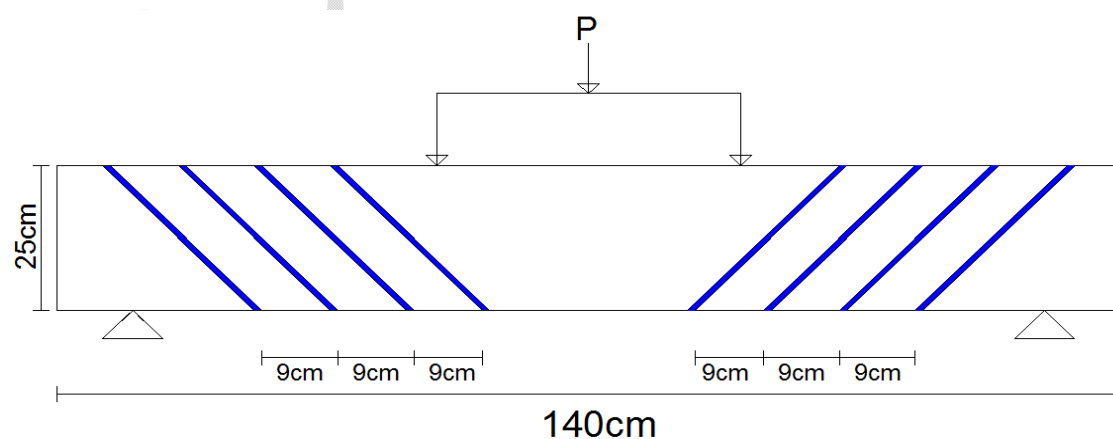
شکل ۴-۳ جزئیات میلگردگذاری و مقطع تیرهای مدل سازی شده



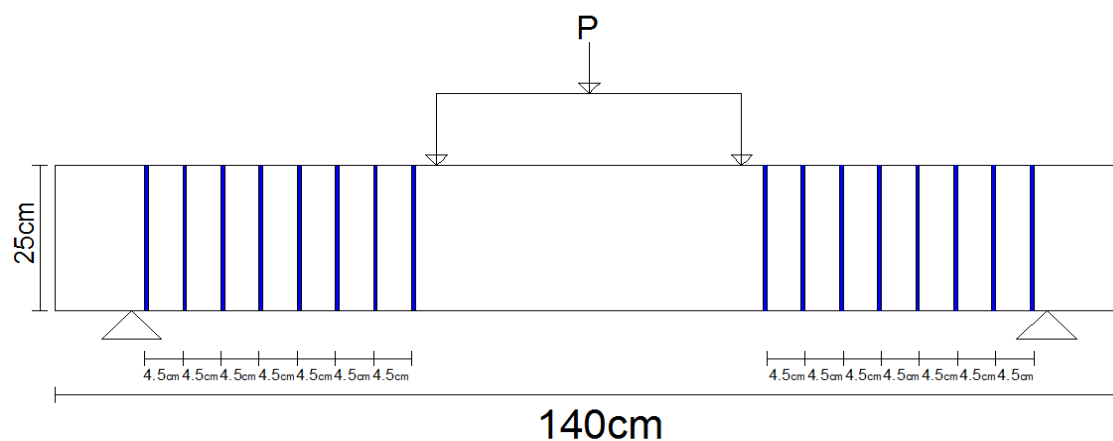
شکل ۴-۴ نمای شماتیک تیر Beam2 با نصب ۱۶ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۹۰ درجه



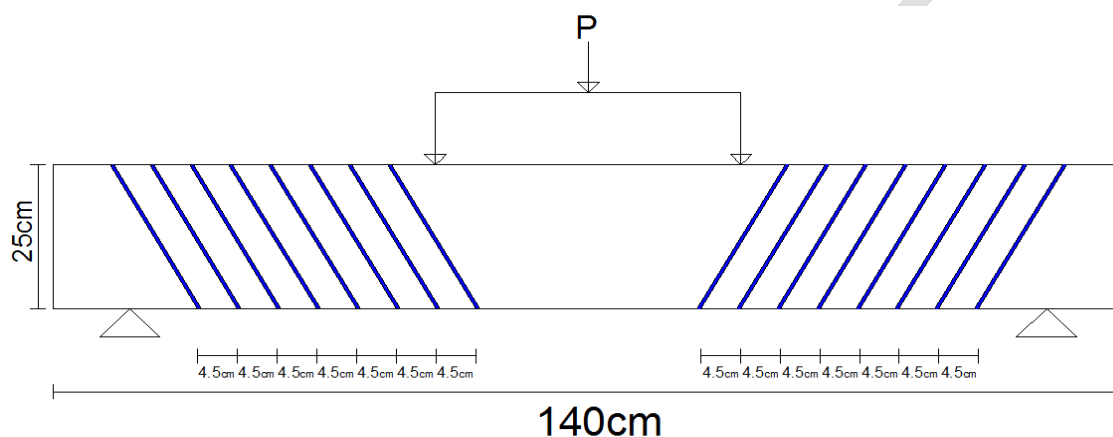
شکل ۴-۵ نمای شماتیک تیر Beam3 با نصب ۱۶ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۶۰ درجه



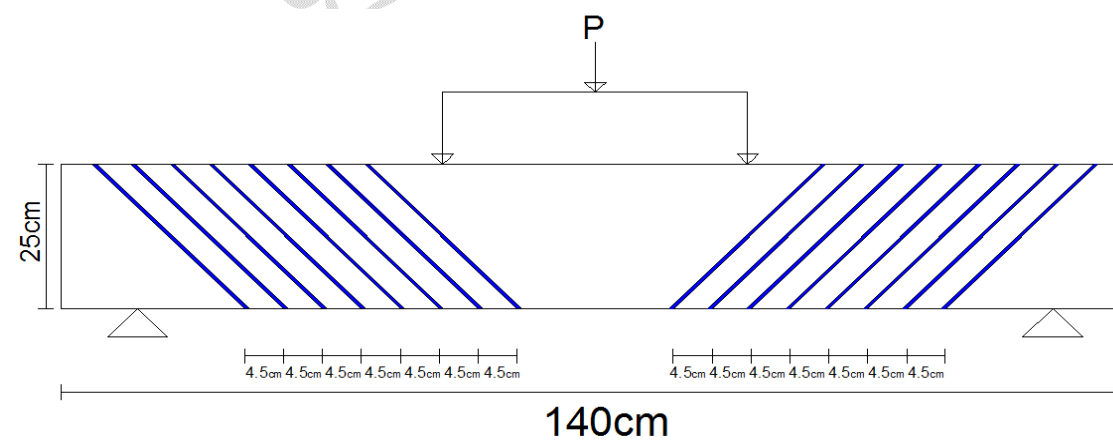
شکل ۴-۶ نمای شماتیک تیر Beam4 با نصب ۱۶ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۴۵ درجه



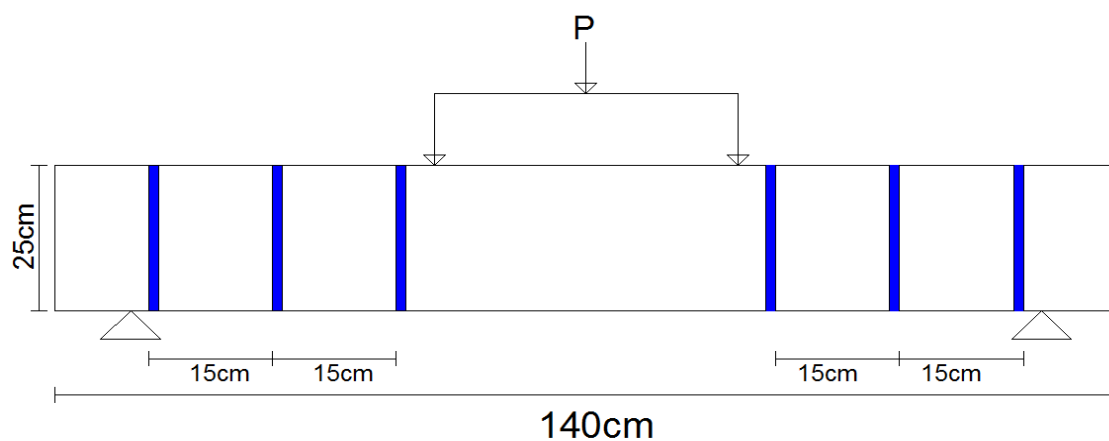
شکل ۷-۴ نمای شماتیک تیر Beam 5 با نصب ۳۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۹۰ درجه



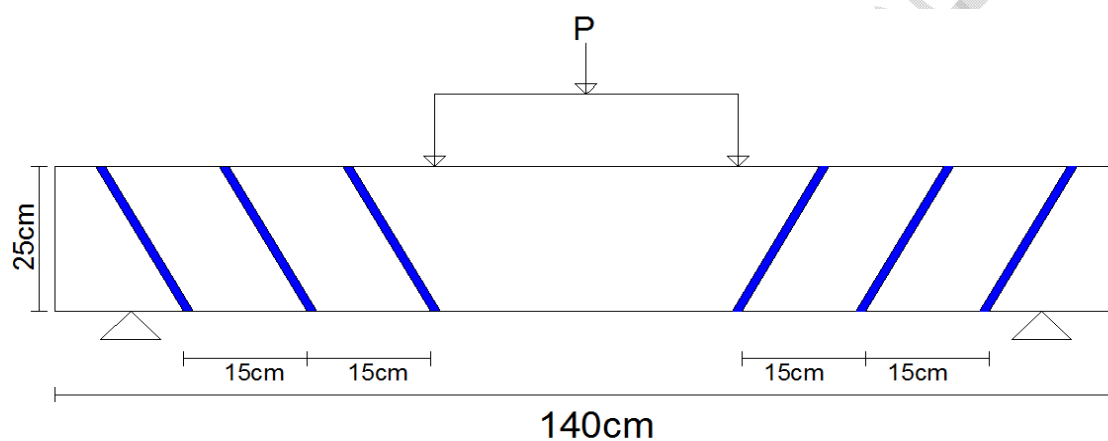
شکل ۸-۴ نمای شماتیک تیر Beam 6 با نصب ۳۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۶۰ درجه



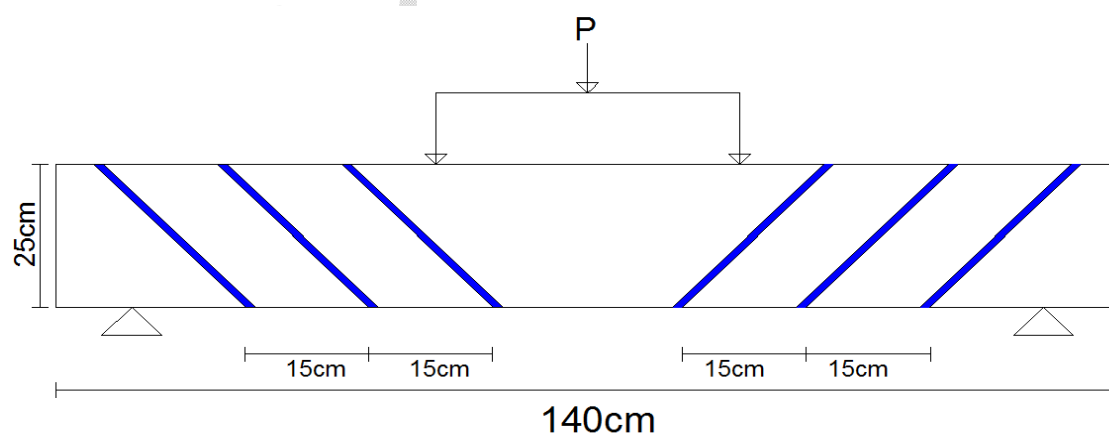
شکل ۹-۴ نمای شماتیک تیر Beam 7 با نصب ۳۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۴۵ درجه



شکل ۴-۱۰ نمای شماتیک تیر Beam8 با نصب ۱۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۹۰ درجه



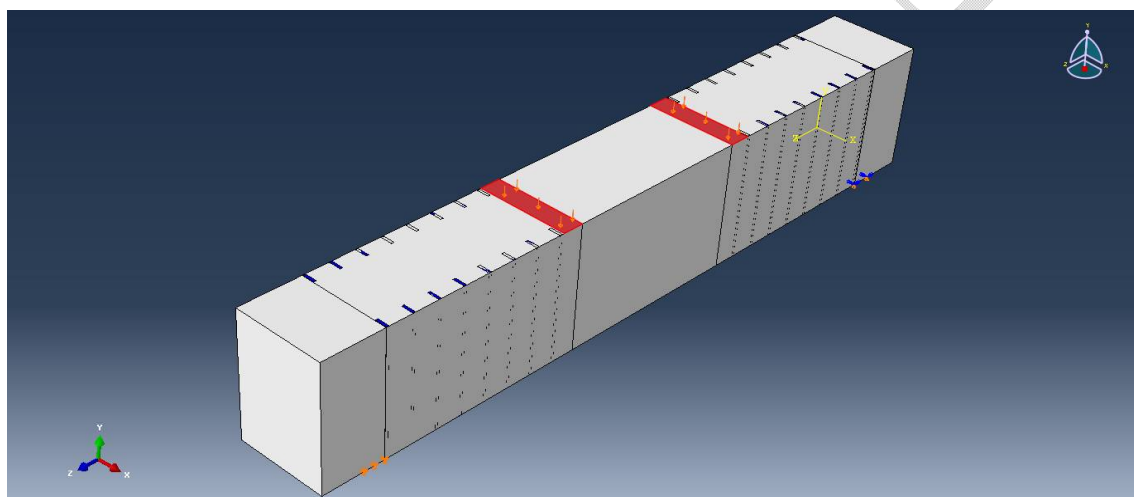
شکل ۴-۱۱ نمای شماتیک تیر Beam9 با نصب ۱۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۶۰ درجه



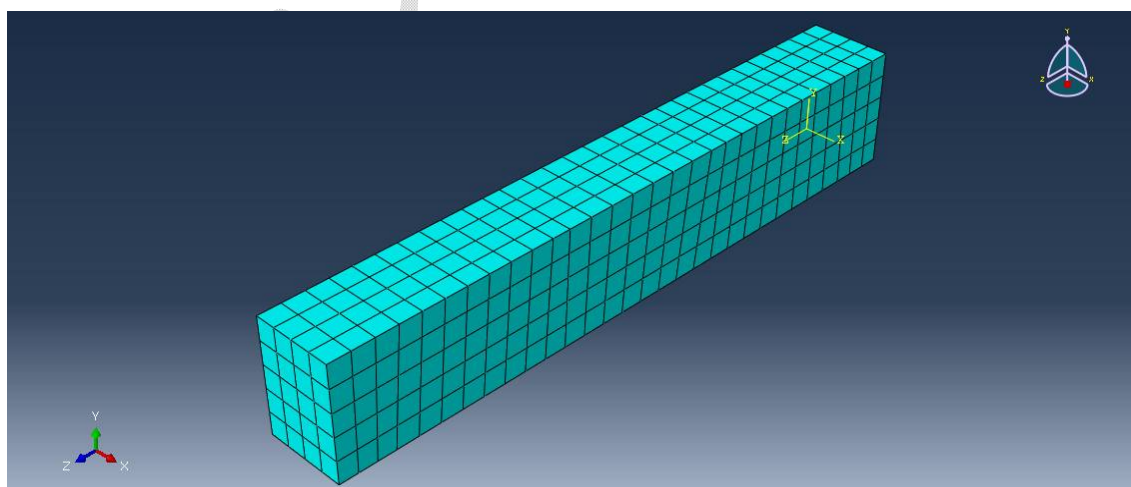
شکل ۴-۱۲ نمای شماتیک تیر Beam10 با نصب ۱۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۴۵ درجه

۴-۵-۲ مدل سازی عددی تیرها

در شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴ مدل سازی با Abaqus برای تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM و مش بندی آن نشان داده شده است. برای مش بندی بهتر بخش بین بار متمرکز و تکیه گاه در نرم افزار Abaqus تقسیم بندی^۱ شده است. با فرض عدم جدایی میله های FRP از بتن از مدل کردن چسب بین آنها صرف نظر شده است. برای جلوگیری از طولانی شدن غیر ضروری زمان تحلیل از اندازه المانهای کوچک پرهیز شده است.



شکل ۴-۱۳ مدل سازی با Abaqus تیر Beam5 با نصب ۳۲ عدد میله GFRP با زاویه ۹۰ درجه



شکل ۴-۱۴ مش بندی تیر Beam5 با نصب ۳۲ عدد میله GFRP با زاویه نصب ۹۰ درجه

^۱ Partition

۴-۶ محاسبه نیروی برشی FRP در تقویت برشی تیر به روش NSM

نیروی برشی FRP برای تقویت برشی تیرهای بتن مسلح به روش NSM طبق فرمول پیشنهادی نانی^۱ و همکاران (۲۴)، از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

(رابطه ۹-۴)

$$V_f = 4 \cdot (a_f + b_f) \cdot \tau_b \cdot L_{tot \min}$$

در رابطه‌ی بالا a_f و b_f ابعاد مقطع FRP، τ_b میانگین تنش پیوستگی می‌باشد. $L_{tot \min}$ از رابطه ۱۰-۴ بدست می‌آید.

(رابطه ۱۰-۴)

$$L_{tot \min} = \sum_i L_i$$

و L_i طول هر عضو FRP NSM می‌باشد که به وسیله‌ی ترک برشی ۴۵ درجه قطع می‌شود و L_i از رابطه‌ی ۱۱-۴ بدست می‌آید.

(رابطه ۱۱-۴)

$$L_i = \begin{cases} \min\left(\frac{s_f}{\sin\alpha + \cos\alpha} i; l_{\max}\right) & i = 1 \wedge \frac{N}{2} \\ \min\left(l_{\max} - \frac{s_f}{\sin\alpha + \cos\alpha} i; l_{\max}\right) & i = \frac{N}{2} + 1 \wedge N \end{cases}$$

$L_{tot \min}$ به نحوه‌ی آرایش میله‌های FRP وابسته است. در رابطه‌ی ۱۱-۴، α زاویه‌ی بین میله‌ی FRP و محور طولی تیر و s_f فاصله‌ی بین میله‌های FRP می‌باشد.

^۱ Nanni

(رابطه ۴-۱۲)

$$l_{eff} = l_b \sin \alpha - 2c$$

(رابطه ۴-۱۳)

$$N = \frac{l_{eff}(1 + \cot \alpha)}{s_f}$$

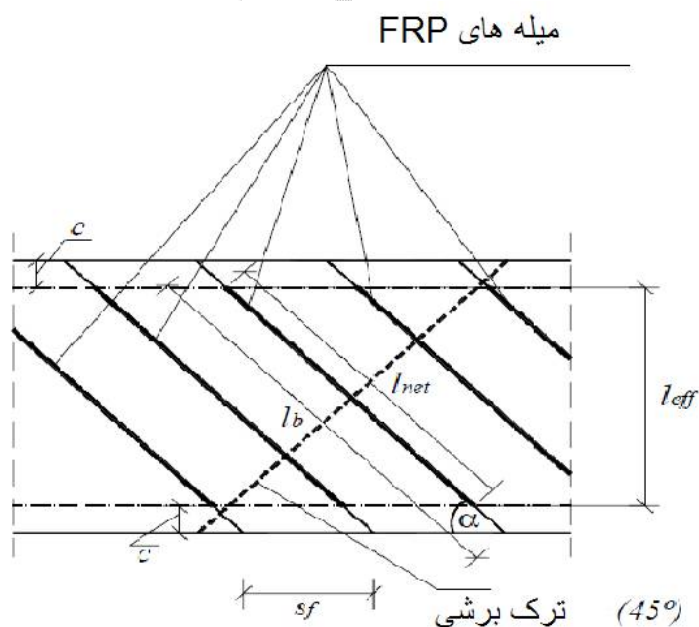
(رابطه ۴-۱۴)

$$l_{net} = l_b - \frac{2c}{\sin \alpha}$$

(رابطه ۴-۱۵)

$$L_{max} = \frac{\varepsilon_{fe}}{2} \cdot \frac{a_f \cdot b_f}{a_f + b_f} \cdot \frac{E_f}{\tau_b}$$

که در روابط بالا که l_b طول حقیقی میله‌ی FRP، c پوشش بتن، E_f مدول الاستیسیته‌ی FRP و ε_{fe} کرنش FRP می‌باشد. N به کوچکترین عدد صحیح قبل از خود، رند می‌شود.



شکل ۴-۱۵ پارامترهای رابطه‌ی نانی و همکاران (۲۴)

با فرض مدول الاستیسیته‌ی GFRP (E_f) برابر ۵۱۰۰۰ مگاپاسکال و میانگین تنش پیوستگی GFRP

(τ_b) برابر ۶,۹ مگاپاسکال و کرنش GFRP (ε_f) برابر ۵,۹ درصد و حل روابط بالا، V_f برای تیرهای

تقویت شده محاسبه گردید که در جدول ۴-۲ آورده شده است.

همچنین ظرفیت برشی مقطع بتن از رابطه ۴-۱۶ بدست می‌آید.

(رابطه ۴-۱۶)

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w \cdot d$$

که d ارتفاع موثر تیر، b_w عرض تیر و f'_c مقاومت فشاری بتن می‌باشد. تیرها بدون میلگرد برشی طراحی شدند.

جدول ۴-۲ محاسبه‌ی نیروی برشی FRP و افزایش ظرفیت برشی تیرها طبق روابط پیشنهادی

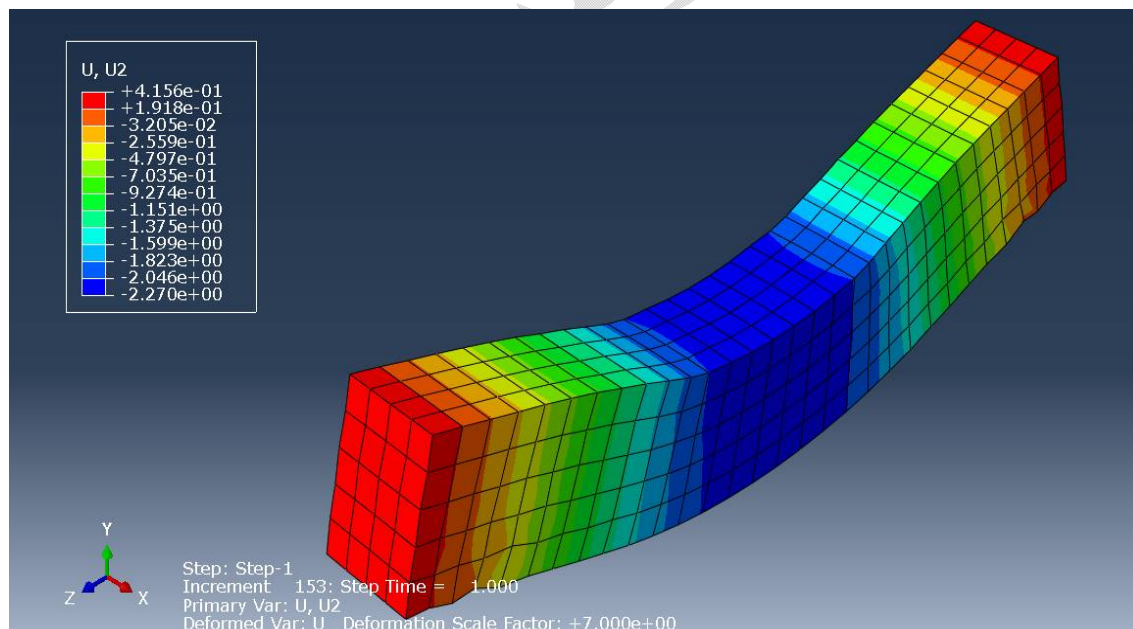
نانی (۲۴)

نام تیر	عرض FRP a_f (mm)	طول FRP b_f (mm)	فاصله بین FRP s_f (mm)	زاویه FRP α (درجه)	تعداد FRP بکار رفته	V_c نیروی برشی بتن (kg)	V_f نیروی برشی FRP (kg)	افزایش ظرفیت برشی تیر (%)
Beam1	-	-	-	-	-	۳۰۰۷,۳۲	-	-
Beam2	۱۰	۲۲,۵	۹۰	۹۰	۱۶	۳۰۰۷,۳۲	۹۸۷۰	۳۲۸,۱۹
Beam3	۱۰	۲۲,۵	۹۰	۶۰	۱۶	۳۰۰۷,۳۲	۱۷۷۹۱	۵۹۱,۵۹
Beam4	۱۰	۲۲,۵	۹۰	۴۵	۱۶	۳۰۰۷,۳۲	۲۵۶۷۲	۸۵۳,۶۵
Beam5	۵	۲۲,۵	۴۵	۹۰	۳۲	۳۰۰۷,۳۲	۱۴۱۱۳	۴۶۹,۲۸
Beam6	۵	۲۲,۵	۴۵	۶۰	۳۲	۳۰۰۷,۳۲	۲۳۴۲۱	۷۷۸,۷۹
Beam7	۵	۲۲,۵	۴۵	۴۵	۳۲	۳۰۰۷,۳۲	۳۲۰۷۴	۱۰۶۶,۵۳
Bram8	۱۳	۲۲,۵	۱۵۰	۹۰	۱۲	۳۰۰۷,۳۲	۴۸۹۹	۱۶۲,۹
Beam9	۱۳	۲۲,۵	۱۵۰	۶۰	۱۲	۳۰۰۷,۳۲	۱۱۸۶۶	۳۹۴,۵۷
Beam10	۱۳	۲۲,۵	۱۵۰	۴۵	۱۲	۳۰۰۷,۳۲	۱۷۳۲۲	۵۷۵,۹۹

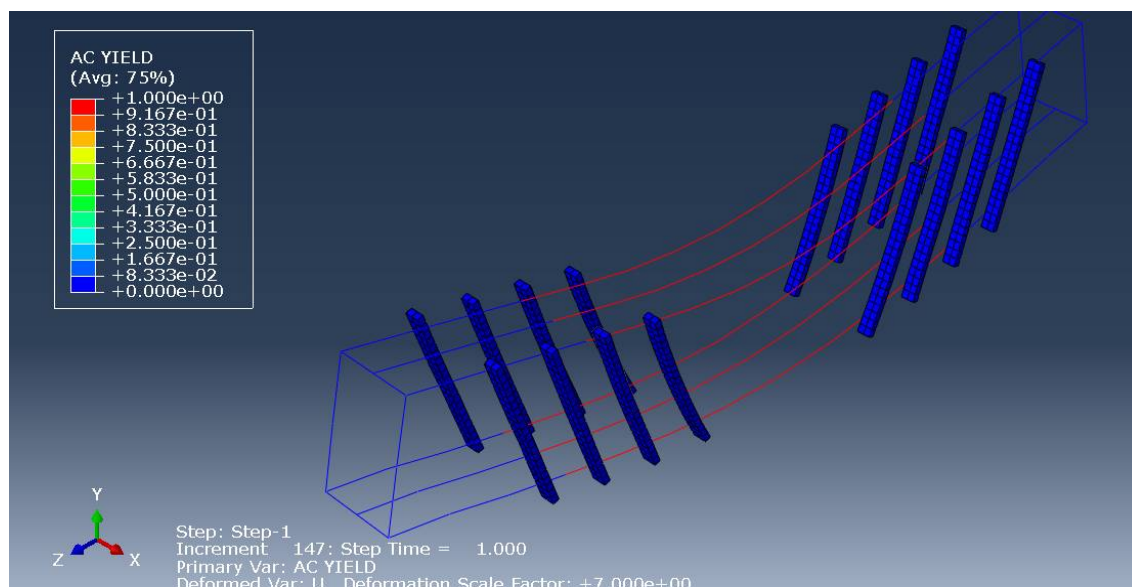
جدول ۲-۴ نشان می‌دهد که تقویت برشی تیر بتن مسلح با GFRP به روش NSM، باعث افزایش ظرفیت برشی تیر بین دامنه‌ی ۱۶۲٫۹ تا ۱۰۶۶٫۵۳ درصد شده که نشان دهنده‌ی کارایی مناسب روش NSM در افزایش ظرفیت برشی تیر می‌باشد.

۷-۴ نتایج مدل سازی عددی

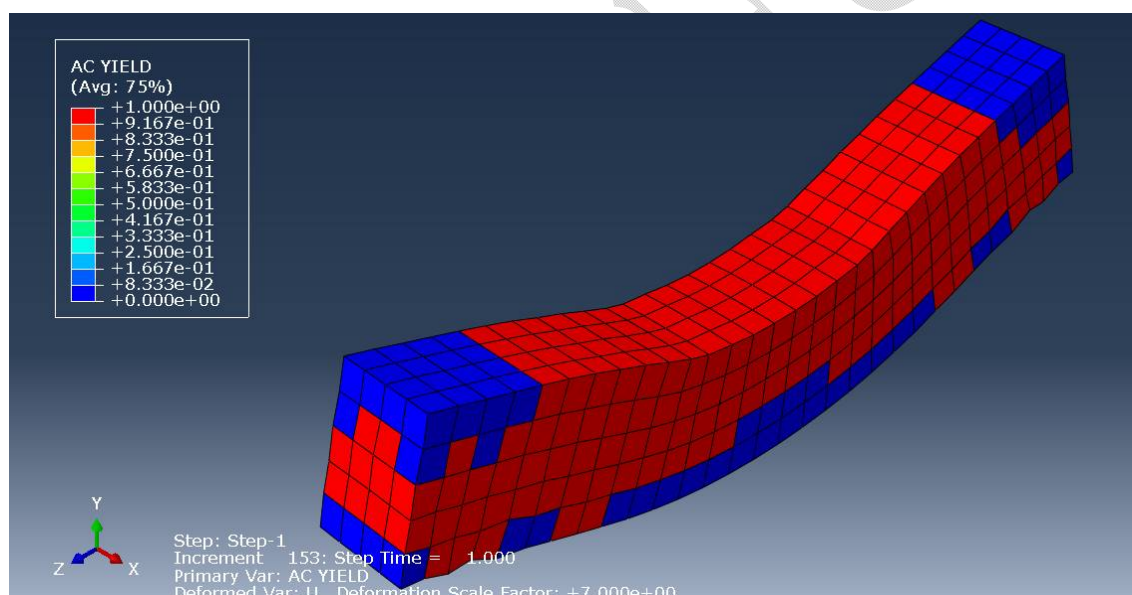
پس از اینکه اقدام به مدل سازی تیرهای تقویت شده با میله‌های GFRP به روش نصب در نزدیک سطح شد، پارامترهای فاصله، تعداد و زاویه‌ی نصب میله‌های GFRP مورد بررسی قرار گرفت تا آرایش بهینه نصب مصالح GFRP در تقویت برشی تیر بتن مسلح را ارزیابی شود. در شکل ۱۶-۴ تغییر شکل تیر Beam1 پس از بارگذاری، در شکل ۱۷-۴ جاری شدن میله‌های طولی تیر Beam3، در شکل ۱۸-۴ جاری شدن و ترک خوردن بتن در تیر Beam1 نشان داده شده است.



شکل ۱۶-۴ تغییر شکل تیر Beam1 پس از بارگذاری



شکل ۴-۱۷ جاری شدن میلگردهای طولی تیر Beam3

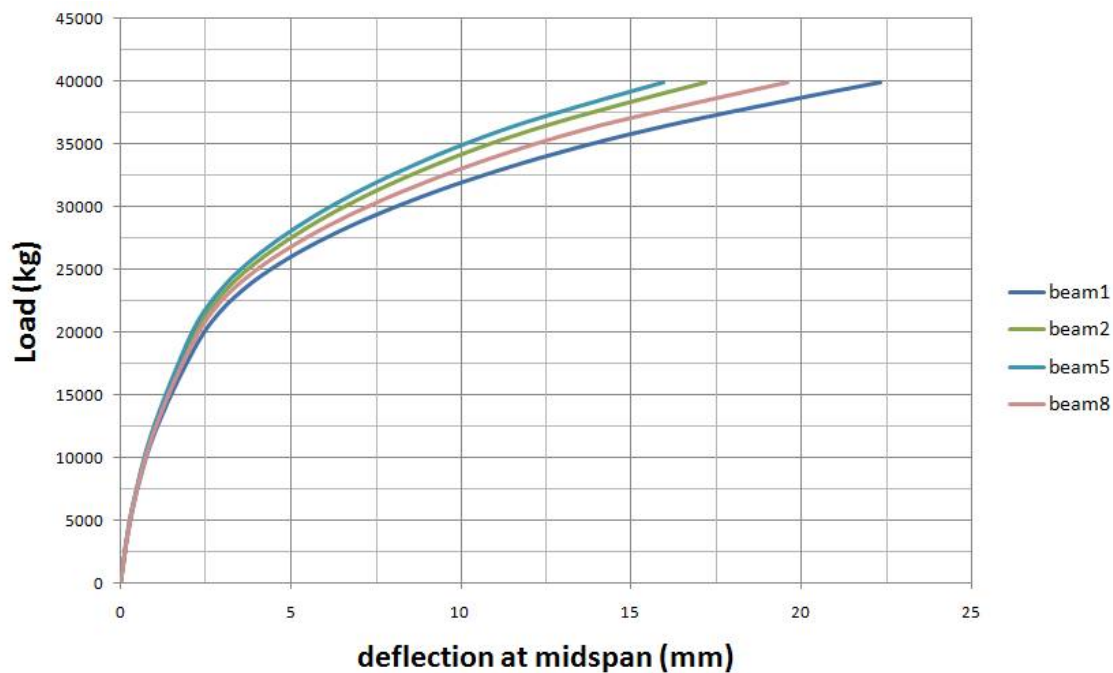


شکل ۴-۱۸ جاری شدن و ترک خوردن بتن در تیر Beam1

۴-۷-۱ بررسی تاثیر تعداد و فاصله‌ی میله GFRP در تقویت برشی تیر به روش NSM

در این بخش تاثیر تعداد و فاصله‌ی میله‌های GFRP در تقویت برشی تیر به روش NSM با زاویه نصب یکسان میله‌های GFRP بررسی می‌گردد تا آرایش بهینه نصب مصالح FRP در تقویت برشی تیر بتن مسلح را ارزیابی شود.

نمودار ۴-۴ منحنی نیرو-تغییرمکان، جدول ۳-۴ تغییرمکان نهایی و نمودار ۴-۵ درصد کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای Beam2 و Beam5 و Beam8 که با میله‌های GFRP با زاویه نصب ۹۰ درجه تقویت برشی شده‌اند؛ در مقایسه با تیر Beam1 نشان می‌دهد.

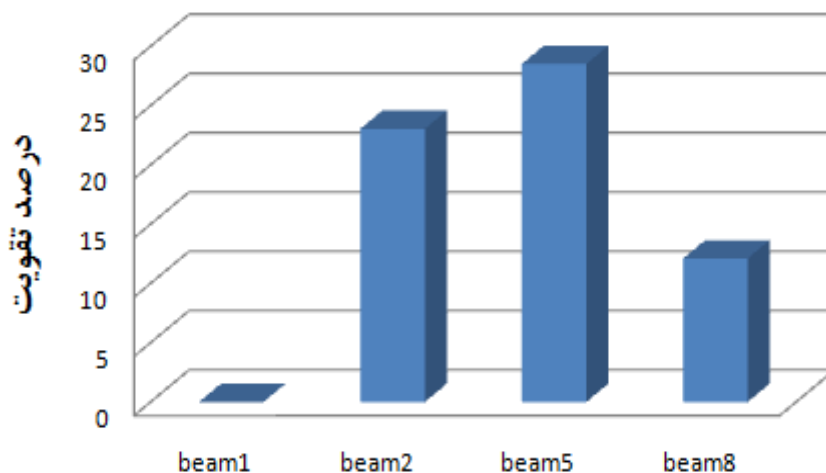


نمودار ۴-۴ منحنی نیرو-تغییرمکان تیرهای Beam2 و Beam5 و Beam8 با زاویه نصب ۹۰ درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1

جدول ۳-۴ مقایسه تیرهای Beam2 و Beam5 و Beam8 با زاویه نصب ۹۰ درجه‌ی GFRP و تیر

بدون تقویت Beam1

نام تیر	تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر (mm)	درصد کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر (%)
Beam1	۲۲,۳۱	-
Beam2	۱۷,۱۷	۲۳,۰۳
Beam5	۱۵,۹۵	۲۸,۵
Bram8	۱۹,۶۱	۱۲,۱۲

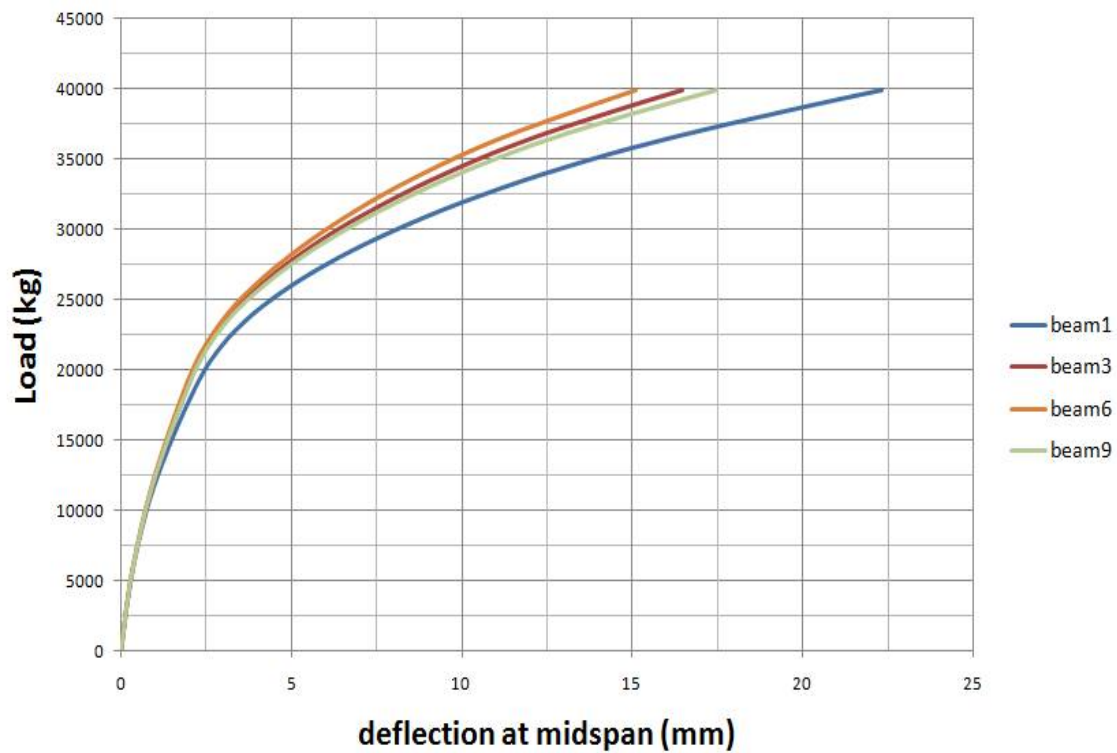


نمودار ۴-۵ درصد کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای Beam2 و Beam5 و Beam8 با زاویه

نصب ۹۰ درجه‌ی GFRP درمقایسه با تیر بدون تقویت Beam1

همانطور که در جدول ۴-۳ و نمودارهای ۴-۴ و ۴-۵، نتایج مدل‌سازی تیرهای تقویت شده‌ی برشی با میله‌های GFRP با زاویه نصب ۹۰ درجه نشان داده شده است؛ تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر بدون تقویت ۲۲,۳۱ میلی‌متر ثبت شد. این مقدار برای تیر Beam2 با نصب ۱۶ عدد میله‌ی GFRP با فاصله‌ی ۹۰ میلی‌متر، مقدار ۱۷,۱۷ میلی‌متر بدست آمد. تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر Beam5 با تقویت ۳۲ عدد میله‌ی GFRP با فاصله‌ی نصب ۴۵ میلی‌متر، مقدار ۱۵,۹۵ میلی‌متر، و تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر Beam8 با تقویت ۱۲ عدد میله‌ی GFRP و با فاصله‌ی نصب ۱۵۰ میلی‌متر، مقدار ۱۹,۶۱ میلی‌متر، ثبت گردید. در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1، تیرهای Beam2، Beam5 و Beam8، به ترتیب ۲۳,۰۳، ۲۸,۵ و ۱۲,۱۲ درصد باعث کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر شده است.

در نمودار ۴-۶ منحنی نیرو-تغییرمکان، جدول ۴-۴ تغییرمکان نهایی و نمودار ۴-۷ درصد کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای Beam3 و Beam6 و Beam9 که با میله‌های GFRP با زاویه نصب ۶۰ درجه تقویت برشی شده‌اند، در مقایسه با تیر Beam1 ارائه شده است.

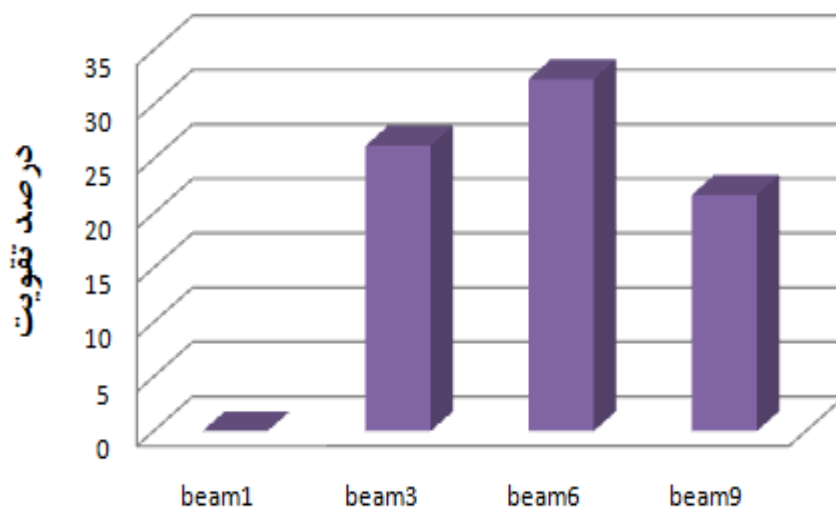


نمودار ۴-۶ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرهای Beam3 و Beam6 و Beam9 با زاویه نصب ۶۰ درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1

جدول ۴-۴ مقایسه تیرهای Beam3 و Beam6 و Beam9 با زاویه نصب ۶۰ درجه‌ی GFRP و تیر

بدون تقویت Beam1

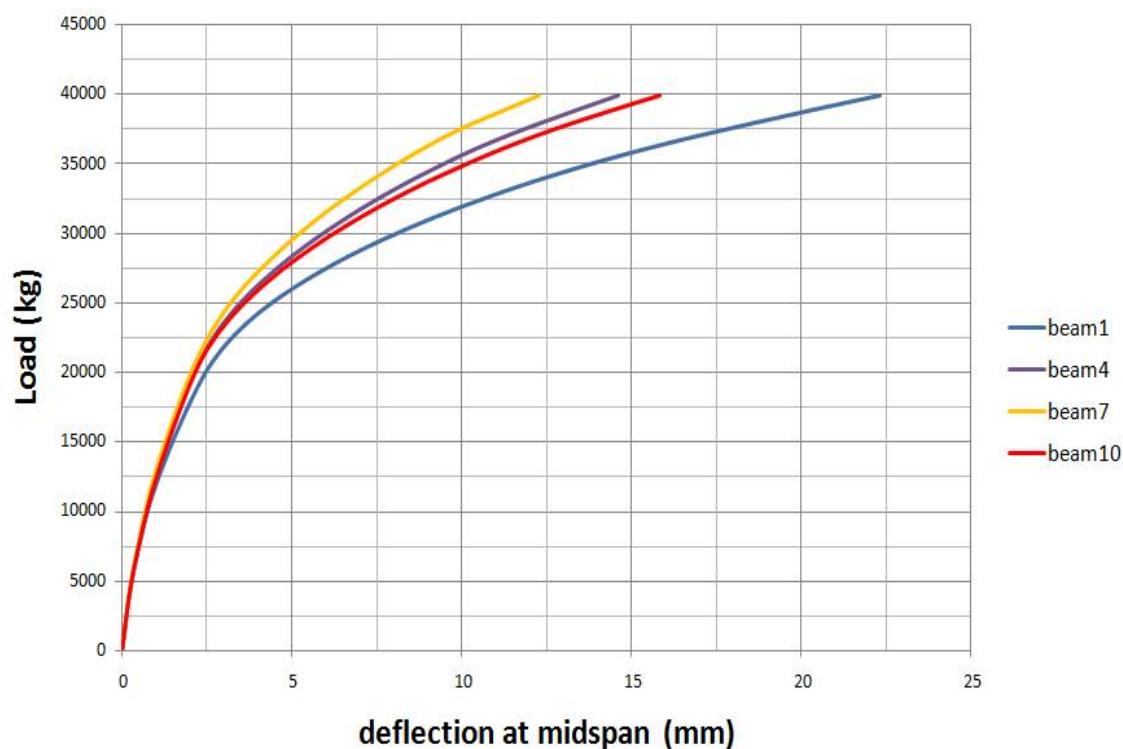
نام تیر	تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر (mm)	درصد کاهش تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر (%)
Beam1	۲۲,۳۱	-
Beam3	۱۶,۴۶	۲۶,۲۲
Beam6	۱۵,۰۹	۳۲,۳۳
Bram9	۱۷,۴۷	۲۱,۶۹



نمودار ۴-۷ درصد کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای Beam3 و Beam6 و Beam9 با زاویه نصب ۶۰ درجه‌ی GFRP در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1

نتایج مدل‌سازی تیرهای تقویت شده‌ی برشی با میله‌های GFRP با زاویه نصب ۶۰ درجه نشان می‌دهد که تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر Beam3 با نصب ۱۶ عدد میله‌ی GFRP با فاصله‌ی ۹۰ میلی‌متر، مقدار ۱۶،۴۶ میلی‌متر، تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر Beam6 با تقویت ۳۲ عدد میله‌ی GFRP با فاصله‌ی نصب ۴۵ میلی‌متر، مقدار ۱۵،۰۹ میلی‌متر، و تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر Beam9 با تقویت ۱۲ عدد میله‌ی GFRP و با فاصله‌ی نصب ۱۵۰ میلی‌متر، مقدار ۱۷،۴۷ میلی‌متر، بدست آمد. تیرهای Beam3، Beam6 و Beam9، در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1، به ترتیب ۲۶،۲۲، ۳۲،۳۳ و ۲۱،۶۹ درصد باعث کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر شده‌اند.

در نمودار ۴-۸ منحنی نیرو-تغییرمکان، جدول ۴-۵ تغییرمکان نهایی و نمودار ۴-۹ درصد تقویت تیرهای Beam4 و Beam7 و Beam10 که با میله‌های GFRP با زاویه‌ی نصب ۴۵ درجه تقویت برشی شده‌اند در مقایسه با تیر Beam1 نشان داده شده است.



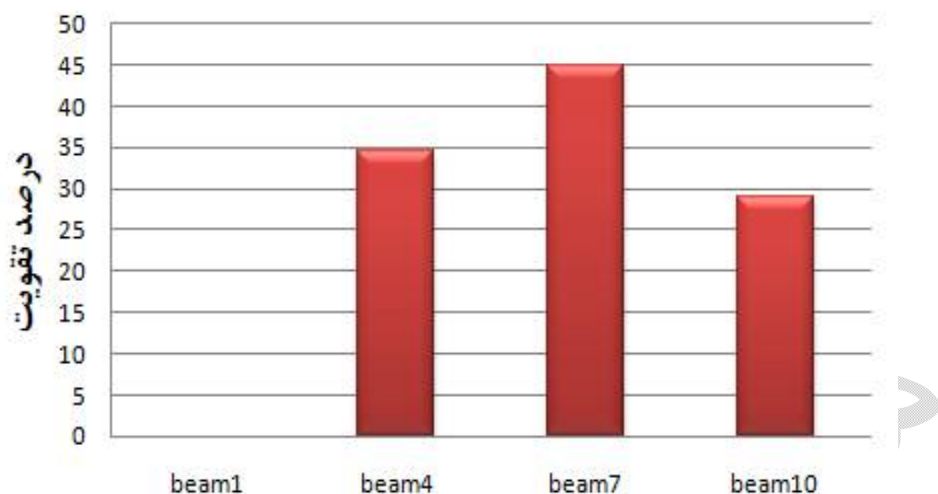
نمودار ۴-۸ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرهای Beam4 و Beam7 و Beam10 با زاویه نصب ۴۵

درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1

جدول ۴-۵ مقایسه تیرهای Beam4 و Beam7 و Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP و تیر

بدون تقویت Beam1

نام تیر	تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر (mm)	درصد کاهش تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر (/.)
Beam1	۲۲,۳۱	-
Beam4	۱۴,۶۱	۳۴,۵۱
Beam7	۱۲,۳	۴۴,۸۶
Bram10	۱۵,۸۲	۲۹,۰۹



نمودار ۹-۴ درصد تقویت تیرهای Beam4 و Beam7 و Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1

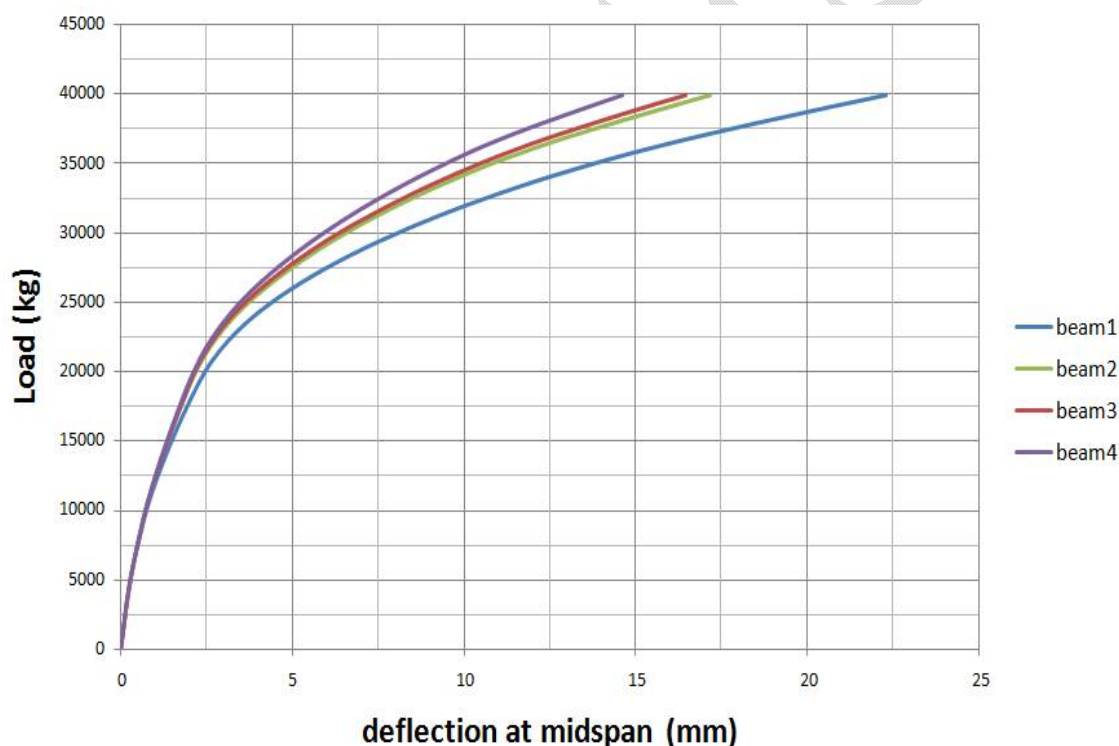
نتایج مدل‌سازی تیرهای تقویت شده‌ی برشی با میله‌های GFRP با زاویه نصب ۴۵ درجه، در جدول ۵-۴ و نمودارهای ۸-۳ و ۹-۳ نشان داده شده است. تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر Beam4 با نصب ۱۶ عدد میله‌ی GFRP با فاصله‌ی ۹۰ میلی‌متر، مقدار ۱۴,۶۱ میلی‌متر، تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر Beam7 با تقویت ۳۲ عدد میله‌ی GFRP با فاصله‌ی نصب ۴۵ میلی‌متر، مقدار ۱۲,۳ میلی‌متر و تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر Beam10 با تقویت ۱۲ عدد میله‌ی GFRP و با فاصله‌ی نصب ۱۵۰ میلی‌متر، مقدار ۱۵,۸۲ میلی‌متر، بدست آمد. تیرهای Beam4، Beam7 و Beam10، به ترتیب ۳۴,۵۱، ۴۴,۸۶ و ۲۹,۰۹ درصد تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر را کاهش داده‌اند.

با استفاده از نتایج مدل‌سازی مشخص شد که در تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM، با مقدار برابر GFRP و زاویه‌ی نصب یکسان، استفاده از میله‌ی GFRP با قطر کوچکتر و با فاصله‌ی کمتر، باعث کاهش تغییر مکان تیر و در نتیجه کارایی بهتر می‌شود.

۲-۷-۴ بررسی زاویه‌ی نصب میله‌ی GFRP در تقویت برشی تیر به روش NSM

در این بخش تاثیر زاویه‌ی نصب میله‌های GFRP، با تعداد و فاصله‌ی یکسان بین میله‌ی GFRP، در تقویت برشی تیر بتن مسلح بررسی می‌گردد تا آرایش بهینه نصب مصالح FRP در تقویت برشی تیر بتن مسلح را ارزیابی شود.

نمودار ۴-۱۰ منحنی نیرو-تغییر مکان، جدول ۴-۶ تغییر مکان نهایی و نمودار ۴-۱۱ درصد تقویت تیرهای Beam2 و Beam3 و Beam4 که با نصب ۱۶ عدد میله‌ی GFRP با فاصله‌ی ۹۰ میلیمتر که به ترتیب با زاویه‌ی نصب ۹۰، ۶۰ و ۴۵ تقویت برشی شده‌اند را در مقایسه با تیر Beam1 نشان می‌دهد.

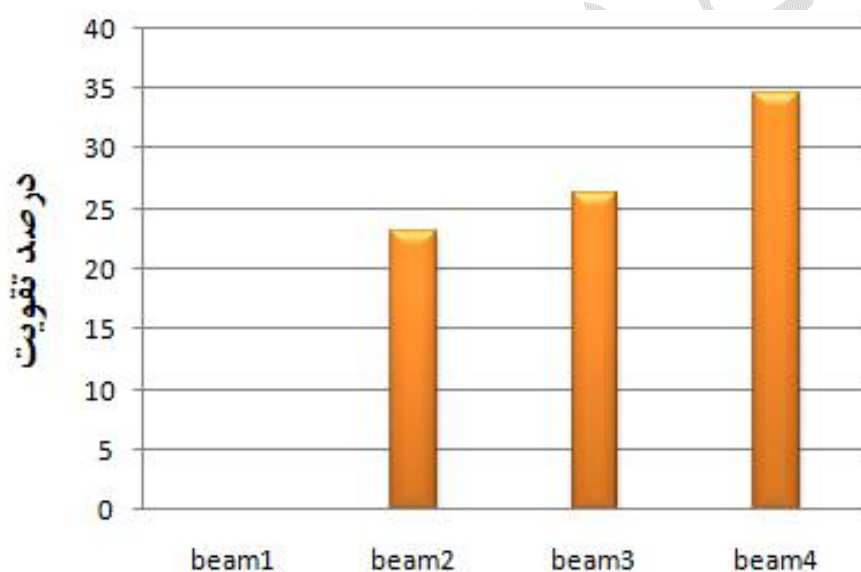


نمودار ۴-۱۰ منحنی نیرو-تغییر مکان تیرهای Beam2 با زاویه نصب ۹۰ درجه، Beam3 با زاویه نصب ۶۰ درجه و Beam4 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1

جدول ۴-۶ مقایسه تیرهای Beam2 با زاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam3 با زاویه نصب ۶۰ درجه و

Beam4 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP با تیر بدون تقویت Beam1

نام تیر	تغییر مکان وسط دهانه ی تیر (mm)	درصد کاهش تغییر مکان وسط دهانه ی تیر (/.)
Beam1	۲۲,۳۱	-
Beam2	۱۷,۱۷	۲۳,۰۳
Beam3	۱۶,۴۶	۲۶,۲۲
Bram4	۱۴,۶۱	۳۴,۵۱



نمودار ۴-۱۱ درصد تقویت تیرهای Beam2 با زاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam3 با زاویه نصب ۶۰ درجه

و Beam4 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1

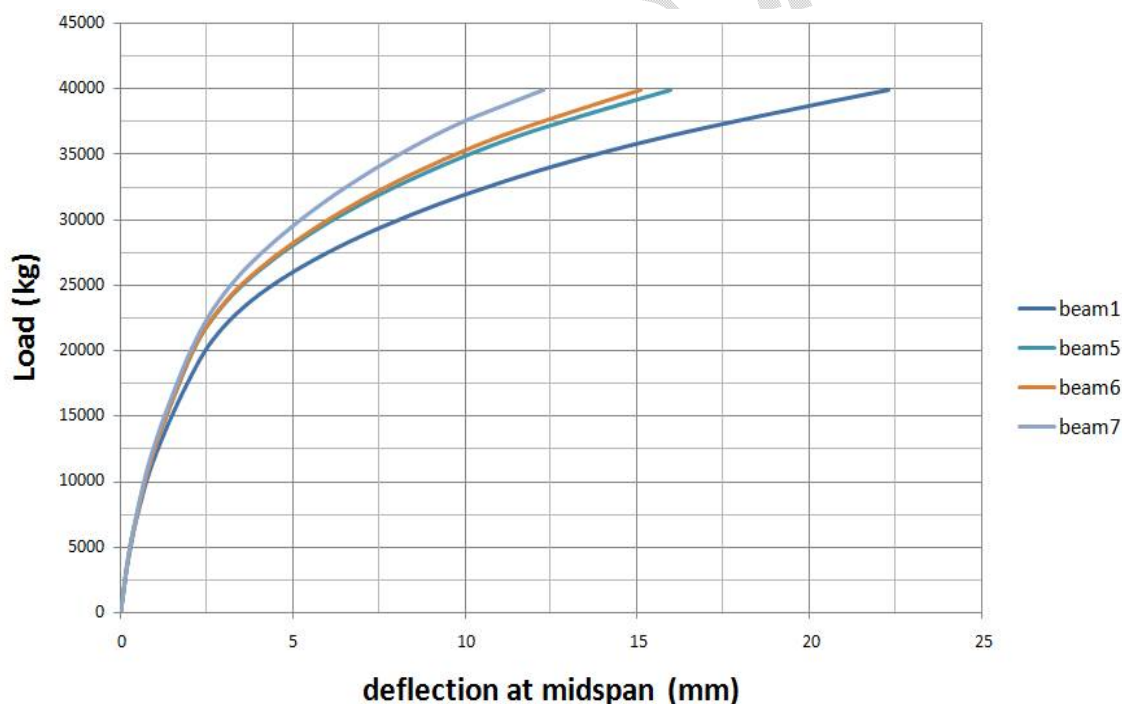
در جدول ۴-۶ و نمودارهای ۳-۱۰ و ۳-۱۱، نتایج مدل سازی تیرهای تقویت شده ی برشی با

میله های GFRP با تعداد و فاصله ی نصب یکسان بین میله ی GFRP و با زوایای نصب متفاوت نشان

داده شده است. تغییر مکان وسط دهانه ی تیر Beam2 با زاویه ی نصب ۹۰ درجه ی GFRP، مقدار

۱۷,۱۷ میلیمتر، تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر Beam3 با زاویه‌ی نصب ۶۰ درجه‌ی GFRP، مقدار ۱۶,۴۶ میلیمتر و تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر Beam4 با زاویه‌ی نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP، مقدار ۱۴,۶۱ میلیمتر، ثبت گردید. در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1، تیرهای Beam2، Beam3 و Beam4، به ترتیب ۲۳,۰۳، ۲۶,۲۲ و ۳۴,۵۱ درصد باعث کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر شده است.

در نمودار ۱۲-۴ منحنی نیرو-تغییرمکان، جدول ۴-۷ تغییرمکان نهایی و نمودار ۴-۱۳ درصد تقویت تیرهای Beam5 و Beam6 و Beam7 که با میله‌های GFRP با نصب ۳۲ عدد میله‌ی GFRP با فاصله‌ی ۴۵ میلیمتر، که به ترتیب با زاویه‌ی نصب ۹۰، ۶۰ و ۴۵ تقویت برشی شده‌اند؛ در مقایسه با تیر Beam1 ارائه شده است.

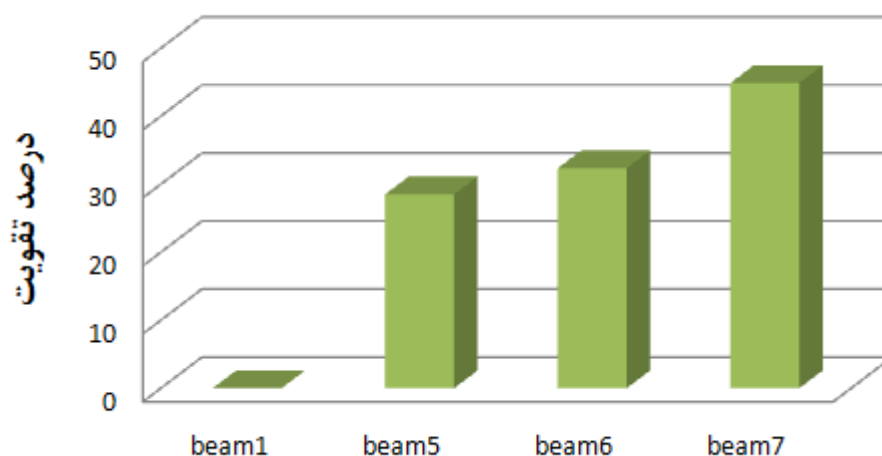


نمودار ۴-۱۲ منحنی نیرو-تغییرمکان تیرهای Beam5 با زاویه نصب ۹۰ درجه، Beam6 با زاویه نصب ۶۰ درجه و Beam7 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1

جدول ۷-۴ مقایسه تیرهای Beam5 بازاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam6 بازاویه نصب ۶۰ درجه و

Beam7 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1

نام تیر	تغییر مکان وسط دهانه ی تیر (mm)	درصد کاهش تغییر مکان وسط دهانه ی تیر (/.)
Beam1	۲۲,۳۱	-
Beam5	۱۵,۹۵	۲۸,۵
Beam6	۱۵,۰۹	۳۲,۳۳
Bram7	۱۲,۳	۴۴,۸۶



نمودار ۴-۱۳ درصد کاهش تغییر مکان وسط دهانه ی Beam5 بازاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam6

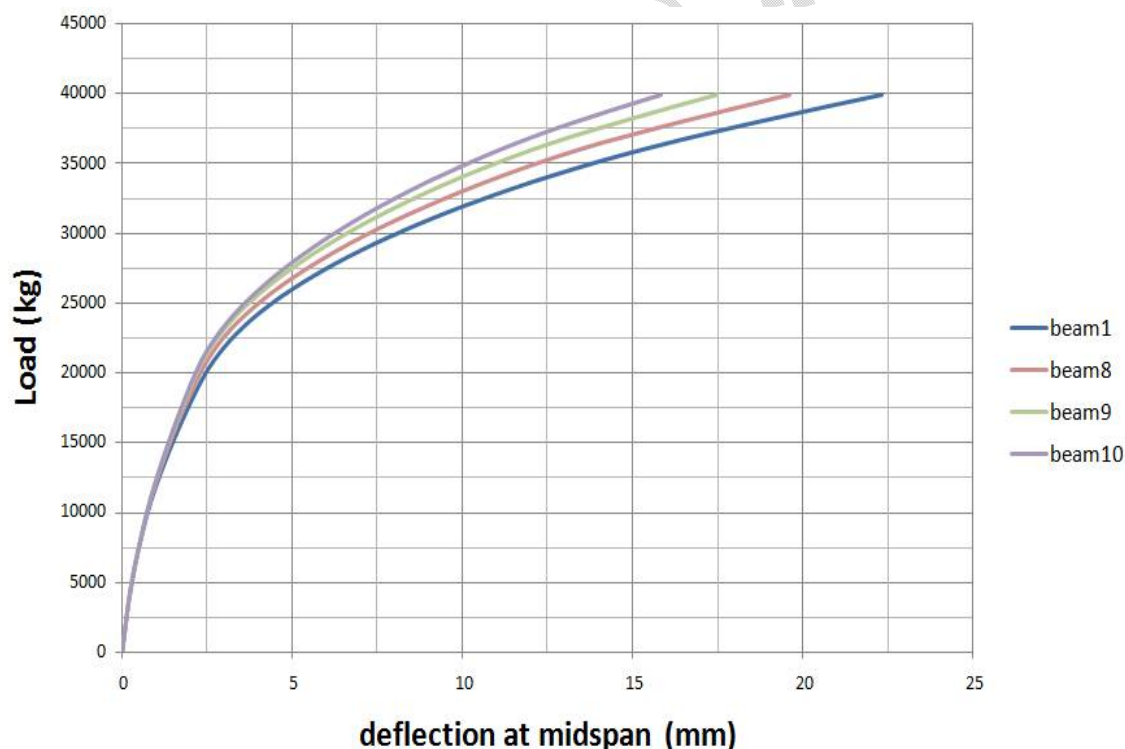
بازاویه نصب ۶۰ درجه و Beam7 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP و در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1

جدول ۷-۴ و نمودارهای ۴-۱۲ و ۴-۱۳، نتایج مدل سازی تیرهای تقویت شده ی برشی با

میله های GFRP با تعداد و فاصله ی نصب یکسان بین میله ی GFRP و با زوایای نصب متفاوت را ارائه

داده است. تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر Beam5 با زاویه‌ی نصب ۹۰ درجه‌ی GFRP، مقدار ۱۵,۹۵ میلی‌متر ثبت شد. همچنین تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر Beam6 با زاویه‌ی نصب ۶۰ درجه‌ی GFRP، مقدار ۱۵,۰۹ میلی‌متر و تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر Beam7 با زاویه‌ی نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP، مقدار ۱۲,۳ میلی‌متر، بدست آمد. نتایج نشان داد که تیرهای Beam5، Beam6 و Beam7، به ترتیب ۲۸,۵، ۳۲,۳۳ و ۴۴,۸۶ درصد باعث کاهش تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیر شده است.

نمودار ۴-۱۴ منحنی نیرو-تغییرمکان، جدول ۴-۸ تغییرمکان نهایی و نمودار ۴-۱۵ درصد تقویت تیرهای Beam8 و Beam9 و Beam10 که با میله‌های GFRP با نصب ۱۲ عدد میله‌ی GFRP با فاصله‌ی ۱۵۰ میلی‌متر، که به ترتیب با زاویه‌ی نصب ۹۰، ۶۰ و ۴۵ تقویت برشی شده‌اند را در مقایسه با تیر Beam1 ارائه می‌کند.

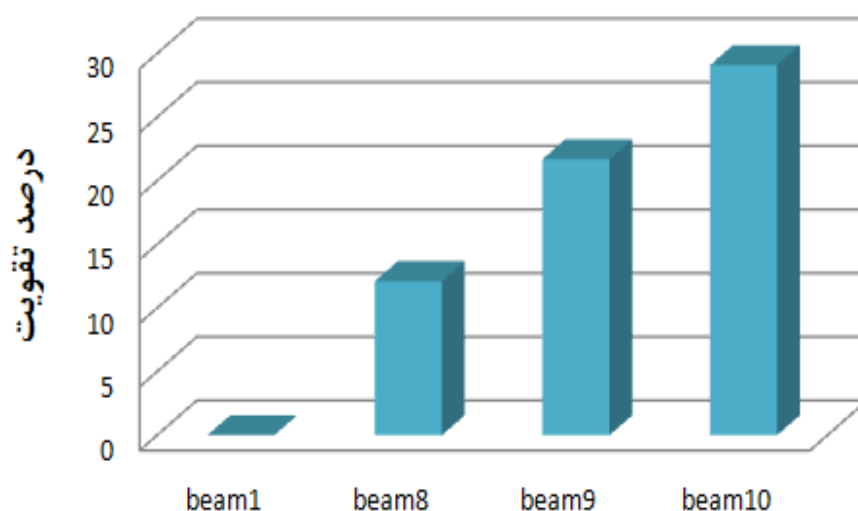


نمودار ۴-۱۴ منحنی نیرو-تغییرمکان تیرهای Beam8 با زاویه نصب ۹۰ درجه، Beam9 با زاویه نصب ۶۰ درجه و Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1

جدول ۴-۸ مقایسه تیرهای Beam8 با زاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam9 با زاویه نصب ۶۰ درجه و

Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP و تیر بدون تقویت Beam1

نام تیر	تغییر مکان وسط دهانه ی تیر (mm)	درصد کاهش تغییر مکان وسط دهانه ی تیر (%)
Beam1	۲۲,۳۱	-
Beam8	۱۹,۶۱	۱۲,۱
Beam9	۱۷,۴۷	۲۱,۶۹
Bram10	۱۵,۸۲	۲۹,۰۹



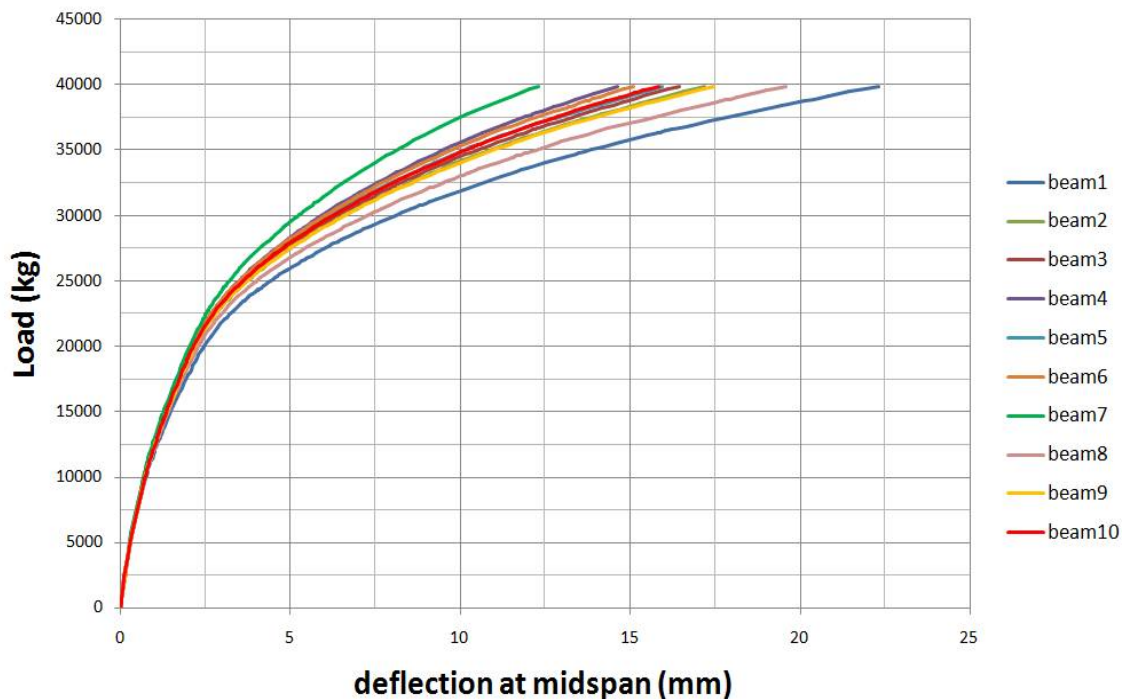
نمودار ۴-۱۵ درصد تقویت تیرهای Beam8 با زاویه نصب ۹۰ درجه ، Beam9 با زاویه نصب ۶۰ درجه

و Beam10 با زاویه نصب ۴۵ درجه ی GFRP در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1

همانطور که در جدول ۴-۸ و نمودارهای ۴-۱۴ و ۴-۱۵، نتایج مدل سازی تیرهای تقویت شده ی برشی با میله های GFRP با تعداد و فاصله ی نصب یکسان بین میله ی GFRP و با زوایای نصب متفاوت نشان داده شده است؛ تغییر مکان وسط دهانه ی تیر Beam8 با زاویه ی نصب ۹۰ درجه ی

GFRP، مقدار ۱۹،۶۱ میلی‌متر، تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر Beam9 با زاویه‌ی نصب ۶۰ درجه‌ی GFRP، مقدار ۱۷،۴۷ میلی‌متر و تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر Beam10 با زاویه‌ی نصب ۴۵ درجه‌ی GFRP، مقدار ۱۵،۸۲ میلی‌متر، ثبت شد. در مقایسه با تیر بدون تقویت Beam1، تیرهای Beam8، Beam9 و Beam10، به ترتیب ۱۲،۱، ۲۶،۶۹ و ۲۹،۰۹ درصد باعث کاهش تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر شده است.

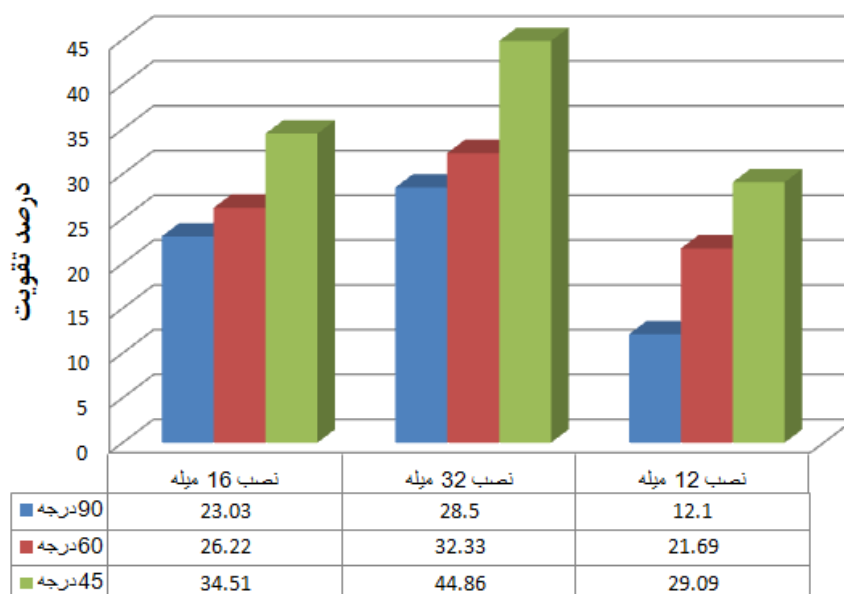
با استفاده از نتایج مدل‌سازی مشخص شد که در تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM، با مقدار برابر GFRP و با تعداد و فاصله‌ی نصب یکسان، قرارگیری میله‌ی GFRP در زاویه‌ی ۴۵ درجه بیشترین تاثیر بر کارایی تیر را نسبت به قرارگیری میله‌ی GFRP در زاویه‌ی ۶۰ و ۹۰ درجه دارد. همچنین مشخص گردید نصب میله‌ی GFRP با زاویه‌ی ۶۰ درجه بیشتر از ۹۰ درجه تاثیر دارد. در نمودار ۴-۱۶ منحنی نیرو-تغییر مکان کلیه‌ی تیرهای مدل‌سازی شده، در جدول ۴-۹ تغییر مکان و درصد تقویت کلیه‌ی تیرهای تقویت شده با تیر بدون تقویت Beam1 و نمودار ۴-۱۷، درصد تقویت کلیه‌ی تیرهای تقویت شده در مقایسه با هم، نشان داده شده است.



نمودار ۴-۱۶ منحنی نیرو-تغییر مکان کلیه‌ی تیرهای مدل‌سازی شده

جدول ۴-۹ مقایسه کلیه تیرهای تقویت شده با تیر بدون تقویت Beam1

نام تیر	تغییر مکان وسط دهانه تیر (mm)	درصد کاهش تغییر مکان وسط دهانه تیر (%)
Beam1	۲۲,۳۱	-
Beam2	۱۷,۱۷	۲۳,۰۳
Beam3	۱۶,۴۶	۲۶,۲۲
Beam4	۱۴,۶۱	۳۴,۵۱
Beam5	۱۵,۹۵	۲۸,۵
Beam6	۱۵,۰۹	۳۲,۳۳
Beam7	۱۲,۳	۴۴,۸۶
Beam8	۱۹,۶۱	۱۲,۱
Beam9	۱۷,۴۷	۲۱,۶۹
Beam10	۱۵,۸۲	۲۹,۰۹



نمودار ۴-۱۷ درصد تقویت کلیه تیرهای تقویت شده در مقایسه با هم

همانطور که در جدول ۴-۹ و نمودار ۴-۱۶ و ۴-۱۷، نتایج مدل سازی کلیه تیرهای نشان داده شده است؛ تیر Beam7 که با آرایش نصب ۳۲ عدد میله ی GFRP با فاصله ی ۴۵ میلی متر و با زاویه ی نصب ۴۵ درجه تقویت برشی شد؛ بیشترین کارایی را نسبت به انواع دیگر آرایش میله ی GFRP دارد.

۴-۸ نتیجه گیری

مدل سازی عددی تیرهای بتن مسلح تقویت شده در برش با روش NSM با نرم افزار Abaqus انجام شد. ابتدا نمودار نیرو-تغییر مکان تیر بدون تقویت آزمایش شده ی CB با تیر بدون تقویت مدل سازی شده ی CBA مقایسه گردید. پس از اطمینان از صحت مدل سازی، ۹ تیر بتن مسلح تقویت شده در برش به روش NSM و با آرایش مختلف میله های GFRP و یک تیر بدون تقویت، مدل سازی شد تا آرایش بهینه ی نصب میلگرد GFRP در مقاوم سازی برشی تیرهای بتن مسلح با روش تعبیه در نزدیک سطح ارزیابی شود. مقدار استفاده ی میلگرد GFRP در تیرها یکسان می باشد. محاسبه ی ظرفیت برشی GFRP که در جدول ۳-۲ ارائه شده است نیز نتایج مدل سازی را تایید می نماید. از این مدل سازی نتایج زیر بدست آمد:

۱- در بررسی تاثیر زاویه ی نصب میله ی GFRP؛ مشخص شد که تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM با تعداد برابر و فاصله ی نصب یکسان میله ی GFRP، آرایش میله ها با زاویه ی ۴۵ درجه، بیشترین تاثیر را نسبت به زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه دارد.

۲- همچنین مشخص گردید که با مقدار برابر GFRP و فاصله ی نصب یکسان، آرایش میلگردهای GFRP با زاویه ی ۶۰ درجه بیشتر از ۹۰ درجه تاثیر دارد.

۳- بررسی تاثیر تعداد و فاصله ی نصب میله ی GFRP نشان داد که در تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM با زاویه ی نصب یکسان میله ی GFRP، استفاده از میله با ابعاد کوچکتر و با فاصله ی کمتر، تاثیر بیشتری بر کارایی تیر تقویت شده دارد.

۴- تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر Beam7 که با نصب ۳۲ عدد میله‌ی GFRP با فاصله‌ی ۴۵ میلی‌متر و با زاویه‌ی نصب ۴۵ درجه تقویت برشی شد؛ ۱۲,۳ میلی‌متر و تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر بدون تقویت Beam1؛ ۲۲,۳۱ میلی‌متر ثبت شد. در مقایسه با تیر کنترل Beam1؛ تیر Beam7 حدود ۴۴,۸۶ درصد باعث کاهش تغییر مکان وسط دهانه تیر شده است که بیشترین درصد تقویت ثبت شده می‌باشد.

فصل پنجم

نتیجه گیری

۵-۱ نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از مدل سازی، انجام آزمایش؛ یکسان می باشند و یکدیگر را تصدیق می نمایند. در ادامه نتایج مدل سازی عددی و نتایج آزمایش آورده خواهند شد.

۱- نتایج آزمایشات نشان داد که تیر تقویت شده ی NSMIL10 کارایی بهتری از دو تیر دیگر دارد. تیر NSMIL10 در مقایسه با تیر NSMV10 و تیر NSMV7، به ترتیب باعث افزایش ۶۴,۳ و ۴۲,۲ درصد در ظرفیت باربری گردید.

۲- با مقایسه ی تیرهای NSMIL10 و NSMV10 مشخص گردید که با مقدار برابر GFRP و فاصله ی نصب یکسان، کاربرد میلگردهای GFRP با زاویه ی ۶۰ درجه بیشتر از ۹۰ درجه تاثیر دارد.

۳- ظرفیت باربری تیر NSMV7 نسبت به تیر NSMV10، ۱۵,۶ درصد افزایش یافت. با مقایسه ی تیرهای NSMV7 و NSMV10 مشخص شد که با مقدار برابر GFRP و زاویه ی نصب یکسان، استفاده از میلگرد با قطر کوچکتر و با فاصله ی کمتر، تاثیر بیشتری در باری نهایی تیر تقویت شده دارد.

۴- در همه ی تیرها، گسیختگی برشی بوسیله ترک قطری برشی مشاهده شد. تیرها با لغزیدن میلگردهای GFRP و کنده شدن پوشش چسب از سطح شیار، با ایجاد ترک های قطری در بتن گسیخته شد. این نوع گسیختگی برای تیرهای مقاوم سازی برشی شده به روش NSM، رایج می باشد. بهتر است فاصله ی بین میله های GFRP به گونه ای انتخاب گردد که اجرای آن مشکل نباشد.

۵- مدل سازی تیر آزمایش شده ی NSMV7 با نرم افزار اجزاء محدود Abaqus نیز انجام گرفت. مقایسه ی تیرهای مدل سازی شده و آزمایش شده ی NSMV7 نشان داده که نحوه ی گسترش ترک و نوع ترک خوردن در تیر مدل سازی شده، شباهت زیادی به تیر آزمایش شده ی NSMV7 دارد.

۶- نتایج مدل سازی نشان داد که در تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM با تعداد برابر و فاصله ی نصب یکسان میله ی GFRP، آرایش میله ها با زاویه ی ۴۵ درجه، بیشترین تاثیر را نسبت به زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه و نیز آرایش میله های GFRP با زاویه ی ۶۰ درجه بیشتر از ۹۰ درجه تاثیر دارد.

۷- با استفاده از نتایج مدل سازی نشان داده شد که در تقویت برشی تیر بتن مسلح به روش NSM با زاویه ی نصب یکسان میله ی GFRP، استفاده از میله با ابعاد کوچکتر و با فاصله ی کمتر، تاثیر بیشتری بر کارایی تیر تقویت شده دارد. در مقایسه با تیر کنترل Beam1؛ تیر Beam7 که با نصب ۳۲ عدد میله ی GFRP با فاصله ی ۴۵ میلی متر و با زاویه ی نصب ۴۵ درجه تقویت برشی شد؛ حدود ۴۴٫۸۶ درصد باعث کاهش تغییر مکان وسط دهانه تیر شده است که بیشترین درصد تقویت ثبت شده می باشد.

منابع و مراجع

۱- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، ۱۳۸۵، راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP. نشریه شماره ۳۴۵

- 1- ACI Committee 440, 2006. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. *ACI 440.1R-06*, American Concrete Institute, Farmington Hills
- 2- Bianco, V., Barros, J. and Monti, G. 2006. Shear Strengthening of RC Beams by Means of NSM Laminates. *Experimental Evidence and Predictive Models, Report 06-DEC/E-18*
- 3- De Lorenzis, L. and Nanni, A. 2001a. Near Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber Reinforced Polymer Rods. *ACI Structure J*, No. 98 - S6, p. 60 - 68.
- 4- De Lorenzis, L. and Nanni, A. 2001b. Characterization of FRP Rods as Near-Surface Mounted Reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 5, p. 114-121.
- 5- Barro, J. and Dias, S. 2003. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Laminate Strips of CFRP. *Proceedings of the International Conference Composites in Constructions - CCC2003, Cosenza, Italy, 16-19 September*, p. 289-294.
- 6- Barros, J. and Dias, S. 2005. Shear Strengthening of RC Beams with Near-Surface-Mounted CFRP Laminates. *7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRP7RCS), Kansas, USA*, p. 230-47, 807-824.
- 7- Wenwei, W. and Guo, Z. 2006. Experimental Study and Analysis of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates under Sustaining Load. *International journal of solids and structures*, ISSN 0020-7683, Vol. 43, No. 6, p. 1372-1387.
- 8- Rizzo, A. and De Lorenzis, L. 2007. Behavior and Capacity of RC Beams Strengthened in Shear with NSM FRP Reinforcement. *Construction and Building Materials*, p. 1555-1567.

- 9- Barros, J. and Dias, S. 2009. Influence of the Percentage of Steel Stirrups in the Effectiveness of the NSM Laminates Shear Strengthening Technique Isise. *FRPRCS-9 Sydney, Australia ,University of Minho, Portugal*.
- 10- El Hacha, R. and Wagner, M. 2009. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Near-Surface Mounted CFRP Strips. *FRPRCS-9 Sydney, Australia*.
- 11- Khaldoun, N. R. and Hatem, A. R. 2011. Tests on Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear Using Near Surface Mounted CFRP and Steel Bars. *Engineering Structures*, p. 53-62
- 12- Kobraei, M., Jumaat, M. Z. and Shafigh, P. 2011. an Experimental Study on Shear Reinforcement in RC Beams Using CFRP Bars. *Scientific Research and Essays*, Vol. 6, No. 16, p. 3447-3460.
- 13- Barros, J. and Dias, S. 2012. Experimental Behaviour of RC Beams Shear Strengthened with NSM CFRP Laminates. <http://onlinelibrary.wiley.com>, Vol. 48, Issue 1, p. 88–100.
- 14- Wiwatrojanagul, P., Na Ayudhya, B. I. and Sahamitmongkol, R. 2012. NSM FRP Shear Strengthening of RC Beams with Internal Stirrups. *Thammasat International Journal of Science and Technology*, Vol. 17, No. 1.
- 15- Sharaky, I. A., Torres, L., Baena, M. and Miàs, C. 2013. an Experimental Study of Different Factors Affecting the Bond of NSM FRP Bars in Concrete. *Composite Structures*, Vol. 99, p. 350–365.
- 16- Barros, J. and Dias, S. 2013. Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear with NSM CFRP Laminates - Assessment of Influencing Parameters. *ISISE - Comunicações a Conferências Internacionais*
- ۱۸- حاجی هاشمی، علی، مستوفی نژاد، داود، و ازهری، مجتبی، بررسی رفتار تیرهای بتن آرمه تقویت شده با مصالح FRP به روش NSM بر اساس نتایج آزمایشگاهی و بسط روابط تحلیلی، مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، اردیبهشت ۱۳۸۸.
- 17- Hajihashemi, A., Mostofinejad, D. and Azhari, M. 2011. Investigation of RC Beams Strengthened with Prestressed NSM CFRP Laminates. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 15, No. 6, p. 887–895.

- 18- Raj, S. D. and Surumi, R.S. 2012. Behaviour of Various Types of Glass Fibre Reinforced Polymer on Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol .5, No. 1, p. 160-168.
- 19- Abaqus Analysis User's Manual(6.11).
- 20- Mander, J. B., Priestly, M. J. N. and Park, R.1988. Theoretical Stress-Strain Model for confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- ۲۳- وزارت مسکن و شهرسازی کشور، معاونت امور مسکن و ساختمان، دفتر امور مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۸، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان طرح و اجرای ساختمانهای بتن آرمه.
- 21- Nanni, A., Di Ludovico, M. and Parretti, R.2004. Shear Strengthening of a PC Bridge Girder with NSM CFR Prectangular Bars. *Advances in Structural Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 97-109.

Abstract

The application of FRP materials have been increased which are used for shear strengthening of reinforced concrete beams in recent years. In addition of conventional of FRP sheets that are placed on the concrete surface, much research on near-surface installation method (NSM) has been conducted. In one part of this thesis, experimental tests on reinforced concrete beams which are strengthen in shear with NSM methods were conducted based on the GFRP materials. The experimental results were evaluated in terms of the ultimate load capacity and failure modes. The results reveal that with same size and spacing of GFRP bars, the configuration of GFRP bars with slope 60 degree is more efficient than 90 degree. On the other hands, results show with same amount of GFRP bars area and same slope, utilizing of GFRP bars with smaller size and closer spacing are more efficient to reach higher level of ultimate shear capacity of strengthen beams. In the other part of this thesis, numerical modeling of reinforced concrete beams strengthened in shear with GFRP based on NSM techniques are performed, and modeling results were compared. In conventional methods for modeling, the behavior of the adhesion between concrete and steel, as well as concrete cracking behavior can be modeled with simplified assumptions. It is observed that the use of NSM method with same number and installation distance of GFRP rods, configuration of rods with 45 degree are most efficiency in compare to 60 and 90 degrees. Besides, the results show, the configuration of rods with 60 degree is more efficient than 90 degree. The results reveal that with same angel of installation of GFRP bars, usage of smaller size of rods and smaller distance of installation are more efficient in compare to usage of bigger size and large distance of installation

Keywords: shear Strengthening, Reinforced concrete beam, near surface mounted, GFRP



Institute for high education

Faculty of Technical

A Thesis Presented for the Degree of Master
of Science Civil Engineering /Art in Structural of Civil Engineering

Subject

**Optimization of orientation of FRP material for shear strengthening of
concrete reinforcement beams with near surface mounted method**

By

Ebrahim Mozayyan Bazkiyae

Supervisor

Dr. Hamid Reza Khoshnoud

Advisor

Eng. Shahin Charkhtab Moghaddam

March 2015