

بررسی تاثیر FRP بر عملکرد سازه های بتنی

حسین چمن کار^{۱*}، جلیل سلامی^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه خلیج فارس بوشهر. (مدیر شهرسازی و معماری شهرداری بندر بوشهر)

۲- کارشناس ارشد رشته جغرافیا و برنامه ریزی شهری. (کارشناس شهرسازی حوزه معاونت شهرسازی و معماری شهرداری بوشهر)

چکیده

سازه های بتنی موجود به دلایل مختلفی نظیر خطاهای طراحی و اجرا، افزایش بارهای بهره برداری، تغییر کاربری، خوردگی آرماتورها و یا آسیب های ناشی از زلزله و عوامل محیطی، در بسیاری از موارد نیازمند مقاوم سازی و بهسازی می باشند. در سال های اخیر، استفاده از مصالح پلیمری مسلح به الیاف (FRP) به عنوان یک روش نوین، سبک، با مقاومت بالا و اجرای نسبتاً آسان، توجه گسترده ای را در تقویت و ترمیم سازه های بتنی به خود جلب کرده است. با این حال، عملکرد مناسب این سیستم ها به شدت وابسته به کیفیت پیوند بین FRP و بتن، آماده سازی سطح، نوع مهار انتهایی و نحوه اجرا می باشد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر استفاده از ورق های FRP بر رفتار سازه های اعضای بتن آرمه، به ویژه تیرهای عمیق دارای بازشو، و ارزیابی نقش این سیستم در بهبود ظرفیت باربری، سختی و کنترل ترک خوردگی اعضا در مقایسه با نمونه های فاقد تقویت است. در این تحقیق، تحلیل عددی غیرخطی با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS انجام شده است. جهت مدل سازی بتن از المان SOLID ۶۵ با در نظر گرفتن قابلیت ترک خوردگی و خردشدگی، برای آرماتورهای فولادی از المان LINK ۸ و برای ورق های FRP از المان پوسته ای لایه ای SHELL ۱۸۱ استفاده گردید. مدل ها تحت بارگذاری تدریجی قرار گرفته و رفتار تنش-کرنش، نحوه توزیع تنش های اصلی، الگوی ترک خوردگی و نمودار بار-تغییر مکان مورد بررسی قرار گرفت. به منظور اطمینان از صحت مدل سازی عددی، نتایج با داده های آزمایشگاهی موجود مقایسه و کالیبره شدند. نتایج تحقیق نشان می دهد که استفاده از ورق های FRP موجب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری، تأخیر در شروع ترک خوردگی و بهبود عملکرد غیرخطی تیرهای بتن آرمه می شود. همچنین، جهت گیری مناسب الیاف، به ویژه الیاف مایل با زاویه ۴۵ درجه، نقش مهمی در افزایش مقاومت برشی اعضا دارد. در نهایت، می توان نتیجه گرفت که تقویت سازه های بتنی با FRP، در صورت طراحی و اجرای صحیح، روشی مؤثر و قابل اعتماد برای ارتقای عملکرد و افزایش دوام سازه ها محسوب می شود.

واژگان کلیدی: FRP، سازه های بتنی، مقاوم سازی، اتصال بتن و FRP، تحلیل اجزای محدود

توجه به کیفیت پیوند بین مسلح کننده های FRP و بتن برای مؤثر واقع شدن تکنیک مقاوم سازی بسیار حیاتی می باشد. قبل از بکاربردن سیستم FRP باید از تراز کیفیت سطح بتن اطمینان حاصل کرد. محل حفره ها باید به کمک اپوکسی مناسب پوشیده و مکانهای مرتفع باید همسطح گردند. جهت مطمئن شدن از پیوند کافی نیاز به یک سری تحقیقات برای مشخصات بتن می باشد. جهت تعیین کفایت سطح بتن آماده شده برای عملکرد FRP از یک اندیس زبری استفاده می شود. یکی از این روش ها استفاده از پروفیل های سطحی بتن^۱ (CSP) است که توسط انستیتوی ملی تعمیرات بتن^۲ (ICIR) فراهم شده است. این پروفیل ها دارای نتایج مشابه درجات زبری است که منظور عملکرد پیچش ها و آسترهای بالاتر از ۶ میلیمتر ضخامت مطالعه شده است.

هر پروفیل دارای یک درجه (CSP) بوده که از ۱ (تقریباً صاف) تا ۹ (خیلی زبر) درجه بندی شده است .

مطالعات گذشته نشان می دهد که زبری سطح بتن فاکتوری کلیدی بوده که می تواند بر مشخصات پیوند بین اپوکسی و بتن اثر بگذارد. قبل از نصب سیستم های FRP سطح روی بتن برای پاک شدن گرد و خاک و آلودگی، شن پاشی می شود. توجه به این نکته لازم است که عمل گسیختگی ممکن است با فراهم بودن

شرط زبری وجود داشته باشد. این مورد زمانی اتفاق می افتد که سطح بتن دارای مقاومت ناکافی بوده و مسبب یک گسیختگی زود هنگام گردد. درزهای کوچک را با فشار توسط اپوکسی پر می کنند. درزهای بزرگ را ابتدا بصورت اره ای بریده و پس از آن با اپوکسی پر می شوند. وجود برخی از محدودیت ها نظیر ملاحظات فنی مثل غلظت اپوکسی یا ملاحظات ساختاری و اقتصادی سبب به وجود آمدن سه روش شده است.

ورقه های فیبری معمولاً از رل هایی بسته بندی شده است که ممکن است دارای صدها فوت طول باشند. به دلایل سازه ای و هندسی ممکن است به وصل کردن ورقه ها نیاز باشد. بعنوان مثال در مواردی که دور یک ستون FRP پیچیده می شود، نیاز به اطمینان از اتصال لایه ها جهت محصور شدگی و پیوستگی اجتناب ناپذیر است. بطور کلی طول اورلپ ها بستگی به نوع فیبرها، سختی ترکیبات کامپوزیتی، نوع و ضخامت رزین ها دارد. همپوشانی کافی اتصالات سبب فراهم آوری ظرفیت کامل مواد کامپوزیتی و اطمینان از مقاومت سیستم می شود.

کاربرد میله های تعبیه شده نزدیک به سطح FRP روش جالب برای افزایش مقاومت خمشی و برشی بتن مسلح معیوب می باشد. این تکنیک زمانی عملی است که مهار میلگردهای تعبیه شده در مجاورت عضو ممکن باشد. علاوه بر این کاربرد میله های NSM FRP به عملیات آماده سازی سطح نیاز ندارد. در موارد بخصوص کاربرد میله های NSM FRP دارای کارایی بالاتری از ورقه های پیوندی FRP می باشد. بخصوص مواقعی که مهار انتهایی تقویت های FRP نیاز به یک طراحی اساسی دارند یا نصب ورقه ها شامل یک عملیات وسیع آماده سازی سطح باشد. نصب میله های NSM FRP بوسیله شیار زدن بروی سطح بتن انجام می شود. نصب تقویت ها بصورت سنتی موازی با مسلح کننده های موجود می باشد. شیارهای بوجود آمده ممکن است دارای سطح مقطع مربع شکل با ابعادی مساوی با میلگردهای بعلاوه ۱/۸ اینچ در هر طرف برای تلورانس نصب می باشد. شیار زدن بروی سطح بتن به صورت دو برش اره ای است که بوسیله

^۱ Concrete Surface Profiles

^۲ International Concrete Institute Repair



ابزار و تکنولوژی متداول بروی سطح بتن زده می شود. دو طبقه برشگر با عمقی معین و با فاصله ای مساوی با عرض شیار از هم قرار داده می شود. در اثر خرد شدن بتن بین دو برشگر شیار بوجود می آید. برای نصب میله های NSM FRP هر شیار در ابتدا توسط ملاتی با غلظت بالا مانند اپوکسی بصورت نیمه پر می شود. این ملات باید با سیستم FRP سازگاری داشته باشد. غلظت بالای ملات سبب تسهیل عملیات بخصوص جهت کارهای بالا سری می گردد.

یک میله FRP در داخل شیار قرار گرفته و به آسانی در محلش فشار داده می شود. این عمل سبب می شود که اپوکسی به محیط میله نفوذ کرده و بصورت پوششی روی جدارها را بپوشاند. همچنین میله ها می تواند به وسیله گوه هایی با فاصله مناسب در محل خود قرار گرفته و بعد توسط ملاتی مشابه پر شوند و با سطح بتن همسطح گردند.

مبانی نظری

آماده سازی سطح

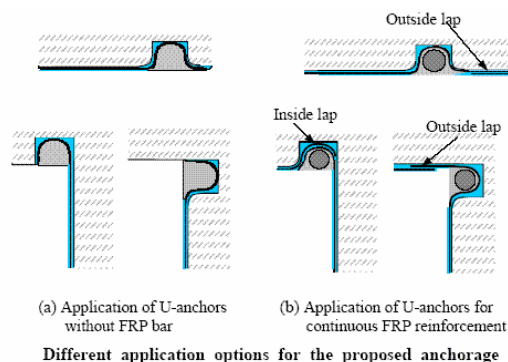
تمیز بودن شیار، عملکرد پوشش آستری و مقاومت بتن همگی فاکتورهایی هستند که می توانند بر خصوصیات پیوند بین بتن و چسب اپوکسی اثر بگذارند. آماده سازی سطح یکی از پارامترهای بسیار مهم میباشد. به دلیل اینکه تنش کششی بوسیله تنش های مماسی از بتن به میله های FRP درون چسب انتقال داده می شود.

نوع میله ها

پارامترهایی از میلگرد که بر عملکرد سیستم اثر می گذارد ممکن است شامل مواردی چون قطر میله، نوع FRP و شرایط سطح باشد. مقاومت پیوند و مکانیزم گسیختگی پیوند بصورت ویژه با شرایط سطح میله ها ارتباط دارد

ابعاد شیار

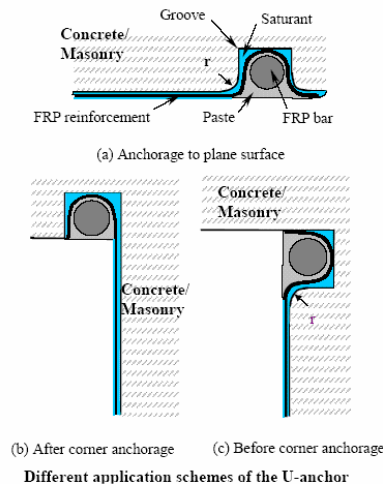
افزایش عمق شیار ممکن است مقاومت را افزایش داده، البته به شرط اینکه از گسیخته شدن چسب اپوکسی جلوگیری شود. با توجه به تحقیقات انجام گرفته حداقل ابعاد شیار برابر با ابعاد میله های FRP بعلاوه ۰٫۲۵ اینچ مطلوب می باشد.



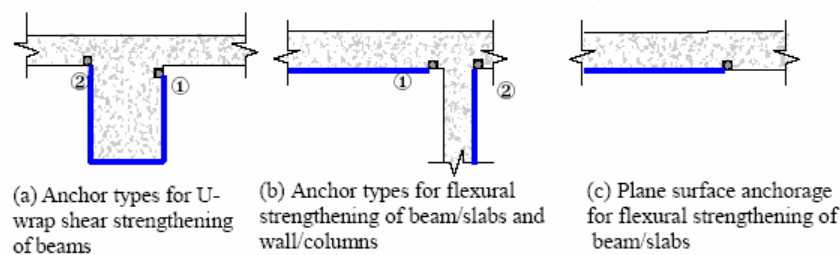


شکل ۱ مهارانتهایی U شکل با پوشش و یا بدون میلگرد FRP در حالت های مختلف

با توجه به شکل ۱ می بینیم که هم پوشانی ورقه FRP می تواند داخل یا خارج از شیار انجام شود و در مهار انتهایی شکل در صورت لزوم از میلگرد NSM FRP نیز برای تقویت بیشتر استفاده می شود.

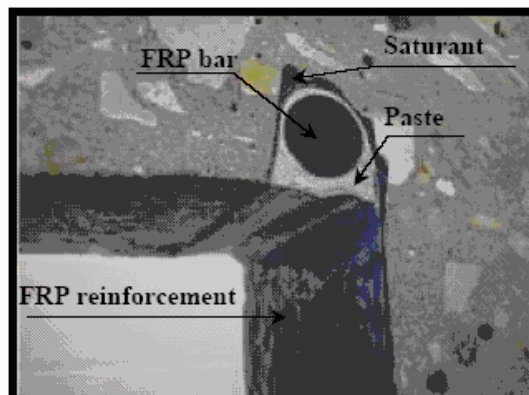


شکل ۲-حالت های مختلف مهار انتهایی U شکل



شکل ۳ حالت های مختلف مهار انتهایی ورقه های FRP در تیر، ستون یا دال بتن آرمه

با توجه به شکل های ۱ تا ۳ به این نتیجه می رسیم که یکی از روش های کنترل محل قطع پوشش ها و ورقه های FRP بدون استفاده از طول مازاد بر محل قطع تئوری و عملی برای جلوگیری از گسیختگی های عدم پیوند استفاده از همان تکنیک شیار زنی و استفاده از میلگردهای FRP نزدیک به سطح است.



شکل ۴ جزئیات مقطع عرضی مربوط به مهار U شکل انتهایی به کمک میلگرد نصب شده در نزدیک سطح FRP

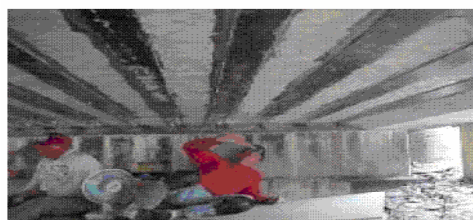


شکل ۵ کاربرد بست مکانیکی برای اتصال ورقه FRP در تقویت خمشی به تیر بتن آرمه

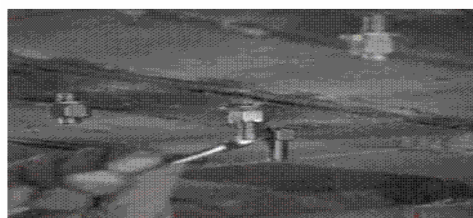
گاهی اوقات برای مهار انتهایی FRP از بست مکانیکی U شکل ورقه یا دور پیچ مطابق شکل ۴ و یا انکربولت و پیچ مطابق شکل ۵ استفاده می شود.



Installation of anchors نصب کردن مهارها



Driving anchors into slab فرو بردن انکرها در دال بتن آرمه

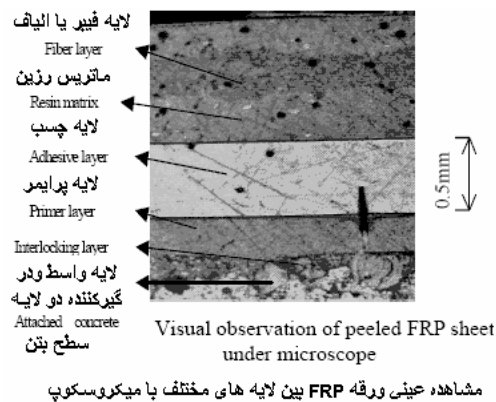


Tightening of anchors محکم کردن انکر یا مهارها



(b) Bolted CFRP Plates

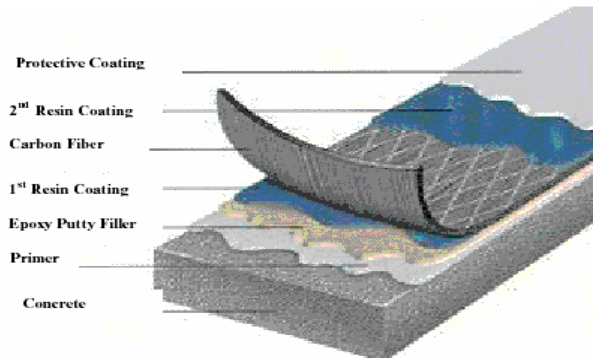
شکل ۶ کاربرد مهار و پیچ برای اتصال ورقه های CFRP



شکل ۷- جزئیات لایه FRP و چسب زیر میکروسکوپ

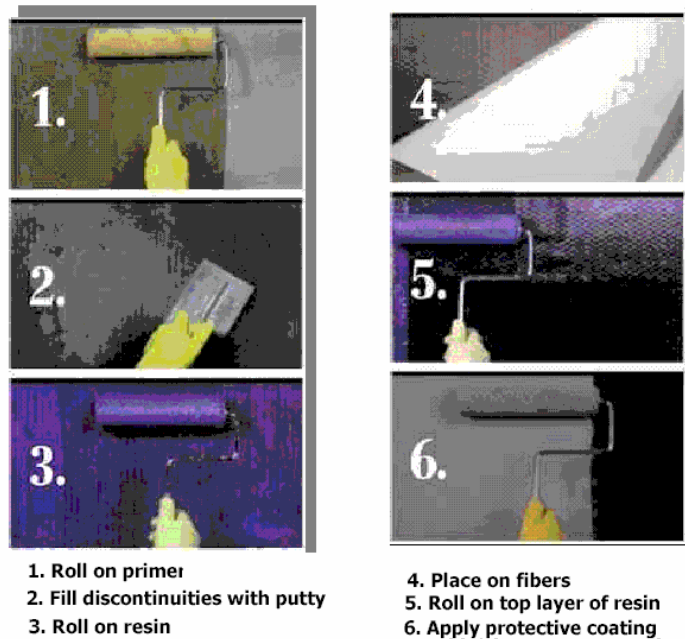
مراحل نصب ورقه FRP

با توجه به شکل ۸ می بینید که ابتدا یک لایه پرایمر بر روی سطح بتن کشیده ، سپس بتونه و پرکننده اپوکسی را بر روی آن کشیده و لایه پوشش رزین یا چسب را کشیده ، سپس ورقه فیبر کربنی را چسبانده ، بر روی آن یک لایه پوشش چسب کشیده و در نهایت پوشش محافظ وجود دارد.



شکل ۸- جزئیات مراحل نصب ورقه FRP بر روی سطح بتن

Installation



شکل ۹- جزئیات نصب ورقه FRP

مطابق شکل ۱۲ مراحل عبارتند از:

- ۱- مالیدن پرایمر یا لایه اولیه و آستری
- ۲- پر کردن ناپیوستگی ها و خلل و فرج با بتونه
- ۳- مالیدن رزین یا چسب
- ۴- قرار دادن ورقه های FRP در محل مورد نظر
- ۵- مالیدن لایه فوقانی یا چسب
- ۶- بکار بردن پوشش محافظ

مراحل نصب به طور اصولی مطابق شکل ۱۳ به ترتیب عبارتند از:

۱- آماده سازی سازه : قبل از هر تقویت با ورقه ها بایستی بتن تخریب شده و آرماتورهای خورده شده و ترکهای اصلی با تزریق بتن ترمیم شود

۲- آماده سازی سطح : پس از تعمیر سازه آسیب دیده، سطح آن کاملاً صاف شده و نا منظمی ها و زوایای تند و تیز گوشه ها بوسیله ماسه پاشی Sand Blast ، ماله، فشار آب ، Water Jet یا ساب کاملاً گرد می شود.



- ۳- **بکار بردن لایه آستری یا پرایمر :** برای افزایش چسبندگی و جلوگیری از جدایش ورقه FRP از لایه چسب بین بتن و ورقه، با غلتک یک لایه اپوکسی با لزجت کم به طور موضعی روی سطح مورد نظر به عنوان پرایمر می مالند.
- ۴- **بتونه کردن :** یک لایه چسب با ویسکوزیته بالا برای پر کردن خلل و فرج و فرورفتگیهای در محل های مورد نیاز بکار برده می شود.
- ۵- **بریدن ورقه :** بر روی یک سطح تمیز و آماده که عاری از هر گونه آلودگی، چسب و ناصافی است ورقه FRP مطابق مشخصات و جزئیات ارائه شده بریده می شود.
- ۶- **اشباع کردن ورقه :** در پروژ ههای بزرگ و حجیم ورق هها با دستگاههای گرداننده خاص در کارخانه اشباع می شوند و لایه اپوکسی یا ماتریس رزین به آن اضافه م ی شود و فقط کافی است در محل مورد نظر چسبانده شود ولی در کارهای کوچکتر و کم حجم تر در محل رزین روی سطح مورد نظر مالیده شده سپس ورقه خشک و بدون چسب بر روی سطح بتن چسبانده می شود.
- ۷- **بکاربردن ورقه :** ورقه را با دقت روی سطح هموار و بدون هیچ گونه آلودگی، حباب هوای محبوس به صورت کاملاً صاف و مستقیم دقیق می چسبانند.
- ۸- **نظارت برکنترل کیفیت :** در زمان عمل آوری ۲ تا ۶ ساعت بسته به شرایط حاکم ورقه ها چک و کنترل می شوند تا هیچ گونه حباب هوا بین لایه FRP و بتن حبس نشده باشد و خم شدگی یا بیرون زدگی (Sagging) وجود نداشته باشد و ناظرهای تربیت شد های برای کنترل کیفیت ورقه های FRP استفاده می شود.
- ۹- **اطمینان از کیفیت :** گزارش های کنترل کیفیت تهیه شده و به خوبی نگهداری می شوند تا اطمینان از ترمیم و تعمیر موفقیت آمیز عضو سازه ای حاصل شود.
- ۱۰- **لایه رویین :** پس از عمل آوری و نظارت بر کیفیت، ورقه های FRP برای نیاز به حفاظت کمتر و نگهداری حفظ زیبایی و معماری با یک لایه بتن رویین یا ماد های دیگر پوشانده می شوند.



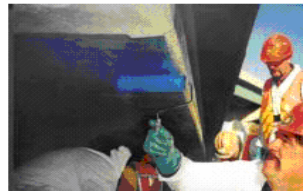
(a) Overall View



(b) Surface Sandblasting



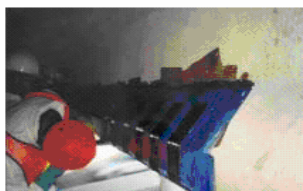
(c) Application of Putty



(d) Application of Saturant



(e) Manual Lay-up of CFRP Sheet

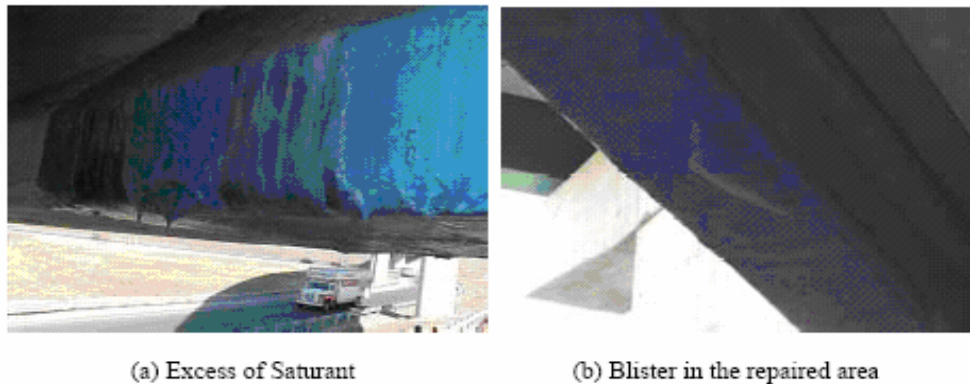


(f) Strips Manual Lay-up

شکل ۱۰- جزئیات تقویت تیر اصلی تابلیه پل با FRP

با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می شود که مراحل نصب عبارت است از :

- ۱- بازنگری کلی ۲- ماسه پاشی بر روی سطح برای از بین بردن آلودگی ها ۳- بتونه کردن ناصافی ها و فرورفتگی ها ۴- بکار بردن لایه چسب اولیه و اشباع کننده به کمک غلتک ۵- نصب در محل به صورت دستی CFRP ورقه ۶- نوارها و باریک ههای نصب شده به صورت دستی برای مهار بیشتر



شکل ۱۱: خرابی حاصل شده ۱- بر اثر استفاده بیش از حد چسب یا اشباع کننده
 ۲- تاول زدن و باد کردن ناحیه تعمیر شده

روش تحقیق

بررسی رفتار سازه های مرکب به دلیل شرایط خاص ناپیوستگی ها، رفتار های غیر همسان، غیر همگن و غیر خطی آنها بسیار پیچیده می باشد. لذا انجام چنین بررسی لزوم استفاده از برنامه های آنالیز عددی جامع با قابلیت های بالا را ایجاب می کند. در این پژوهش از برنامه ANSYS نگارش ۱۲ استفاده شده است که با بهره گیری از روش های اجزای محدود، برای تحلیل و طراحی سیستم های مهندسی به کار می رود.

جهت ساختن یک مدل المان محدود، خصوصاً یک مدل ۳ بعدی کاملاً غیرخطی، در نرم افزار ANSYS نیاز به بررسی بسیاری از جوانب می باشد. جهت بررسی این موارد در این بخش سعی می گردد مختصری در مورد روند کلی تحلیل در نرم افزار مطالبی آورده شود، سپس به بررسی المان های مدل، مشخصات آنها، هندسه و آرایش مدل، بررسی چگونگی مدل سازی مصالح، معادلات سازگاری، نوع آنالیز، بارگذاری و شرایط تکیه گاهی، تحلیل غیرخطی، نحوه اعمال بارگذاری و زمان مورد نیاز برای اجرای برنامه و نحوه مدل سازی معرفی می گردد.

روند کلی تحلیل در نرم افزار ANSYS

روند تحلیل در نرم افزار ANSYS دارای سه مرحله اصلی است که عبارت است:

مرحله پیش پردازش، مرحله پردازش و مرحله بعد از پردازش

مرحله پیش پردازش

تعیین نوع المان ها

از مهمترین انواع المان های سازه ای که در این نرم افزار می توان مدل سازی کرد به شرح زیر است:

المان حجمی: المان، سه بعدی و به صورت ۲۰، ۱۰، ۸، ۴ گره ای و لایه ای وجود دارد.



المان میله : درحالت های دوبعدی و سه بعدی.

المان تیر : در حالت های دوبعدی و سه بعدی به صورت ارتجاعی و پلاستیک.

المان صفحه ای : در حالت دوبعدی به صورت ۴ یا ۸ گرهی .

المان پوسته ای : با ویژگی ارتجاعی یا پلاستیک و به صورت لایه ای یا همگن با ۳ و ۴ و ۸ گره.

المان پوسته ای ضخیم : در حالت سه بعدی با ویژگی ارتجاعی یا پلاستیک به صورت لایه ای یا همگن.

المان اتصالی : در حالت دوبعدی و سه بعدی .

درجات آزادی المان های سازه ای فوق به صورت انتقالی یا دورانی می باشد.

خواص مصالح و ثابت های حقیقی

خواص مصالح شامل خواص خطی و غیرخطی می شود. خواص خطی شامل مدول ارتجاعی، ضریب پواسون، وزن مخصوص و ضریب انبساط حرارتی می باشد. همچنین خواص غیرخطی مصالح شامل پلاستیسیته، هایپرالاستیسیته، خزش، تورم، ویسکوالاستیک می باشد که حالت پلاستیسیته شامل رفتارهای دوخطی، چند خطی، غیرهمسانی، مدل دراگر-پراگر و مدل بتنی می شود. در مدل بتنی پارامترهایی مانند ضریب انتقال برش برای ترک های بسته، ضریب انتقال برش برای ترک های باز، مقاومت فشاری تک محوره بتن، مقاومت کششی تک محوره بتن و ... تعریف می شود.

مرحله پردازش

در این مرحله بارهای اعمالی بر سازه معرفی شده و آنالیز توسط برنامه انجام می شود. نوع آنالیز می تواند استاتیکی، دینامیکی، مودال و ... باشد.

انواع بارهای سازه ای

اصطلاح بار در ANSYS شامل شرایط مرزی و بارهای اعمال شده داخلی و خارجی به مدل ها می باشد. بارهای سازه ای اعمالی به پنج دسته تقسیم می شوند:

الف - بارهای قیدی : بارهای قیدی شامل مقادیر معینی درجات آزادی در بعضی نقاط مدل در همان امتداد درجات آزادی می باشد. چنانچه بارهای قیدی کمتر از حداقل تعداد مورد نیاز برای یک سازه تعریف شود، سازه ناپایدار خواهد شد. در آنالیز سازه ها دو نوع درجه آزادی انتقالی و دورانی داریم.

ب - بارهای متمرکز : این بارها معمولاً شامل نیروهای متمرکز و ممان های متمرکز خارجی اعمال شده در گره های سازه می باشد. این بارها تنها روی نقاط اصلی (کلیدی) و گره ها قابل تعریف هستند.

ج - بارهای سطحی : این بارها شامل نیروهای فشاری بر روی سطوح خارجی مدل می باشد و مقدار مثبت آن به سمت وجه مثبت المان (به صورت فشاری) می باشد. بارهای سطحی در روش المان بندی خودکار ساخته می شوند و در این حالت قابل استفاده هستند.



د - بارهای حجمی : این نوع از بارها، بارهای اعمال شده به تمام قسمت های مدل می باشند . در سازه ها این بارها عمدتاً ناشی از خزش ، تورم و کرنش های حرارتی می باشند.

و - بارهای اینرسی : اگرچه این نوع بارها بیشتر در آنالیز دینامیکی استفاده می شوند ، ولی در آنالیز استاتیکی نیز وزن به عنوان یکی از بارهای اینرسی در نظر گرفته می شود . برای اعمال تأثیر وزن به عنوان یکی از نیروی اینرسی بایستی شتابی معادل $g = 9.806 \text{ m/sec}^2$ در امتداد قائم داده شود تا در نتیجه آن نیرویی معادل mg نیوتن به جسم اثر کند . در این حالت لازم است وزن مخصوص مصالح در مرحله قبل داده شده باشد.

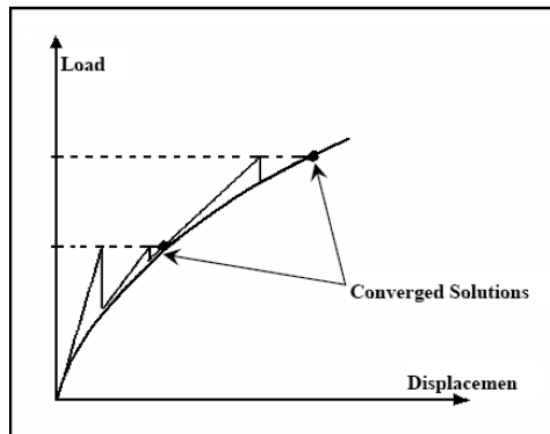
نحوه اعمال بار گذاری

در نرم افزار ANSYS جهت اعمال بار غیرخطی به سازه از دو روش اتوماتیک و دستی استفاده می گردد . در روش دستی فواصل گام های اعمال بار به صورت مساوی و توسط کاربر معرفی می شود . اما در روش اتوماتیک بر پایه سوابق قبلی مدل، هندسه و آرایش آن نرخ افزایش بار به سازه متغیر می باشد . در روش فوق در صورتی که نرخ همگرایی مدل یکنواخت باشد فاصله گام های اعمال بار تا بالاترین حد ممکن بالا می رود اما بر خلاف آن اگر نرخ همگرایی ناگهانی باشد فاصله بین گام های بارگذاری کاهش می یابد.

تحلیل غیر خطی

در تحلیل غیرخطی کل باری که قرار است به سازه وارد گردد، به تعداد مشخصی قسمت تقسیم می گردد که هر قسمت یک مرحله بارگذاری نام دارد . در هریک از این گام ها پس از اعمال نمودن بار به تیر، ماتریس سختی تیر تشکیل می گردد تا تغییرات غیرخطی موجود در سختی مدل را در هر گام منعکس نماید. نرم افزار ANSYS برای تحلیل از روش نیوتن-رابسون استفاده می نماید . در روش فوق در انتهای هر گام نیاز به تأمین همگرایی تیر می باشد . شکل (۱-۵) عملکرد روش نیوتن رابسون را در یک مدل یک درجه آزادی با دو گام افزایش بار نشان می دهد.

در ابتدای هرگام نرم افزار ANSYS بار نامتعادل را حساب می نماید. بار فوق در واقع تفاوت بار اعمال شده به سازه و بار محاسبه شده از تنش موجود در مدل می باشد . سپس اگر شرایط همگرایی تعریف شده برای نرم افزار تامین گردید، نرم افزار به سراغ گام بعدی بارگذاری می رود و در غیر این صورت در نرم افزار عملیات سعی و خطا ادامه می یابد تا زمانی که راه حل همگرا گردد.



شکل ۱۲ بررسی عملکرد روش نیوتون رابسون

مرحله بعد از پردازش

در این مرحله می توان نتایج حاصل از آنالیز از جمله مقدار تنش، تغییر مکان بحرانی و ناحیه ای که آنها اتفاق می افتند را تعیین کرد و مورد بررسی و مطالعه قرار داد.

المان های منتخب و خصوصیات آنها

نرم افزار المان محدود ANSYS نگارش ۱۲ دارای المان های متعدد می باشد، که این نرم افزار را برای مدل سازی انواع سیستم های سازه ای قادر می سازد . انتخاب المان ها بر اساس نیاز مسأله صورت می گیرد و به عهده کاربر می باشد . در ادامه به ذکر اجمالی خصوصیات المان های $Solid^{40}$, $Link^8$, $Sell^{181}$ و $Solid^{65}$ و معادلات سازگاری که در این پژوهش استفاده شده است اکتفاء می گردد.

مدل سازی بتن - استفاده از المان $SOLID^{65}$

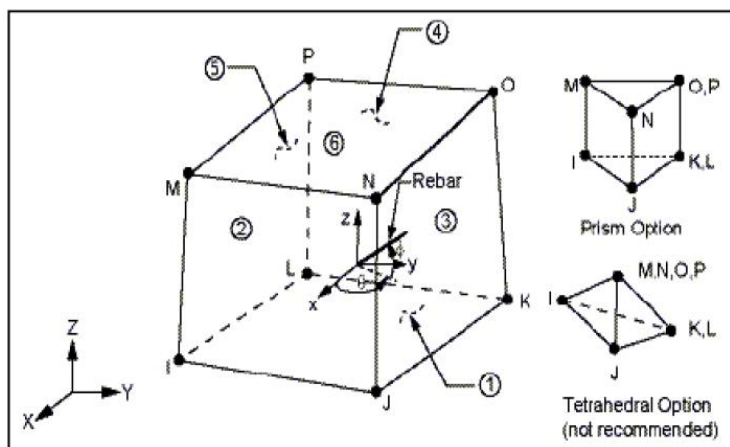
المان $Solid^{65}$ برای مدل سازی اجزای سه بعدی بتن مسلح یا غیرمسلح به کار می رود . این المان قابلیت ترک خوردگی در هنگام اعمال تنش های کششی و همچنین قابلیت خردشدگی در هنگام اعمال تنش های فشاری را دارد . از این المان می توان برای مدل کردن اجزای بتنی با یا بدون آرماتور استفاده کرد . علاوه براین می توان از این المان برای مدل کردن کامپوزیت های مسلح نظیر فایبرگلاس و یا در مهندسی پی از آن برای مدل کردن رفتار سنگ استفاده کرد . این المان ، سه بعدی و دارای هشت گره می باشد که هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی U_x , U_y , U_z است . خصوصیات این المان نظیر یک المان معمولی است، تنها مشخصه این المان خصوصیات غیرخطی و قابلیت ترک خوردگی و خردشدگی در سه جهت عمود بر هم و همچنین قابلیت مدل کردن تغییر شکل های پلاستیک و خزش می باشد . در این المان حداکثر تا سه المان مسلح کننده می توان تعریف کرد . در قسمت های بعدی داده های ورودی، خروجی و همچنین برخی از فرضیات و محدودیت های این المان آورده شده است:



یافته های پژوهش

داده های ورودی

المان Solid 65 با هشت گره تعریف می شود، و مصالح المان ایزوتروپیک می باشد. المان دارای یک مصالح برای کل المان و سه مصالح برای تقویت کننده ها می باشد مشخصات تقویت کننده ها شامل نوع مصالح، نسبت حجمی و همچنین جهت آنها می باشد، نسبت حجمی تعریف شده برای تقویت ها عبارت است از نسبت حجم تقویت ها به حجم کل المان و جهت آنها توسط دو زاویه با واحد درجه نسبت به مبداء مختصات سیستم مشخص می گردد. اگر مشخصات تقویت کننده ها وارد نشود، از قابلیت تقویت کنندگی این اعضاء به طور کامل صرف نظر می شود. در شکل (۵-۲) هندسه، گره ها و سیستم مختصات موجود در المان Solid 65 نشان داده شده است.



شکل ۱۳ مشخصات المان Solid 65

خصوصیات دیگر بتن نظیر ضرایب انتقال برش برای ترک های بسته و باز، حداکثر تنش های کششی و فشاری قابل تحمل و سایر موارد در قسمت خصوصیات مصالح وارد می شوند. ضریب انتقال برش بین صفر تا یک متغیر است. عدد صفر معرف ترک نرم می باشد، در این حالت کل مقاومت برشی از بتن می رود. عدد یک معرف ترک زبر است. در این حالت علیرغم وجود ترک در عضو کل تنش برشی منتقل می شود.

لازم به ذکر است فقدان اطلاعات موجود در جدول باعث عدم فعال شدن خاصیت ترک خوردگی و خردشدگی بتن می شود. اگر مقادیر c^1 تا c^4 وارد شوند، ولی مقادیر c^5 تا c^8 وارد نشوند، مقادیر پیش فرض در برنامه ANSYS در نظر گرفته می شود. پارامتر c^9 ضریب آزاد شدن تنش در هنگام وقوع ترک در بتن می باشد. لازم به ذکر است که پنج پارامتر ورودی f_t , f_c , f_{cb} , f_1 , f_2 پارامترهای تعیین سطح شکست در بتن می باشند.

جدول ۱ مشخصات مصالح برای بتن



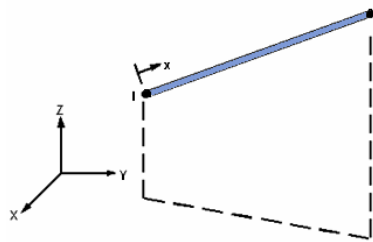
خصوصیات مصالح	علامت اختصاری	نایبها
دما	T	C0
ضریب انتقال تنش برشی برای ترک های باز	b_t	C1
ضریب انتقال تنش برشی برای ترک های بسته	a_t	C2
مقاومت کششی یک محوره بتن	f_t	C3
مقاومت فشاری یک محوره بتن	f_c	C4
مقاومت فشاری دو محوره بتن	f_{cb}	C5
تنش فشاری سه محوره برای محاسبه ثابت های C7 و C8	σ_{ah}	C6
مقاومت فشاری دو محوره بتن تحت تنش های سه محوره (ثابت C6)	f_1	C7
مقاومت فشاری یک محوره بتن تحت تنش های سه محوره (ثابت C6)	f_2	C8
ضریب سختی برای حالت ترک خورده اگر $Keyopt(7) = 1$	T_c	C9

داده های خروجی

خروجی های این المان به دو فرم قابل حصول است : ۱- تغییر مکان های گرهی ۲- تنش ها، کرنش ها و همچنین در فرم ترک خوردگی و جهات تنش های حاصل در المان نشان داده شده است. جهت تنش های خروجی موازی محورهای المان می باشند. اگر قابلیت ترک خوردگی در المان فعال باشد، تنش های خروجی در نقاط انتگرال گیری نشان داده خواهند شد.

میلگردها و خاموت ها - استفاده از المان ^۸LINK

یکی دیگر از المان های مورد استفاده برای مدل کردن تیرها المان یک بعدی ^۸Link می باشد. این المان المانی است ۲ گره ای که هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی می باشد. انواع بارهای جرمی، حرارتی، گسترده و متمرکز را می توان به آن اعمال نمود. المان ^۸Link دارای خواص پلاستیسیته، خزش، تغییر شکل های بزرگ، کرنش های بزرگ و سخت شدگی تنش می باشد. نکته قابل توجه این است که این المان قابلیت انتقال بارهای خمشی را دارا نمی باشد و فرض بر این است که تنش به صورت یکنواخت در تمام طول المان توزیع می گردد. در این پژوهش از این المان جهت مدل سازی کلیه آرماتورها استفاده شده است. هندسه و موقعیت گره های المان فوق همراه دستگاه مختصات در شکل (۵-۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۴- هندسه، موقعیت گره ها و دستگاه مختصات المان Link^۸

خلاصه ای از اطلاعات این المان در جدول ۲- ارائه شده است.

جدول ۲-اطلاعات ورودی المان

نام المان	LINK8
گره های المان	I, J
درجه آزادی هر گره	U _x , U _y , U _z
مقادیر ثابت المان	AREA, ISTRN
خصوصیات مصالح	EX, ALPX, DENS, DAMP
بارهای سطحی	NONE
بارهای حجمی	Fluences: F(I), F(J) , Temperature: T(I), T(J)
خواص ویژه المان	Plasticity, Creep, Swelling, Stress Stiffening, Large deflection, Birth and Death

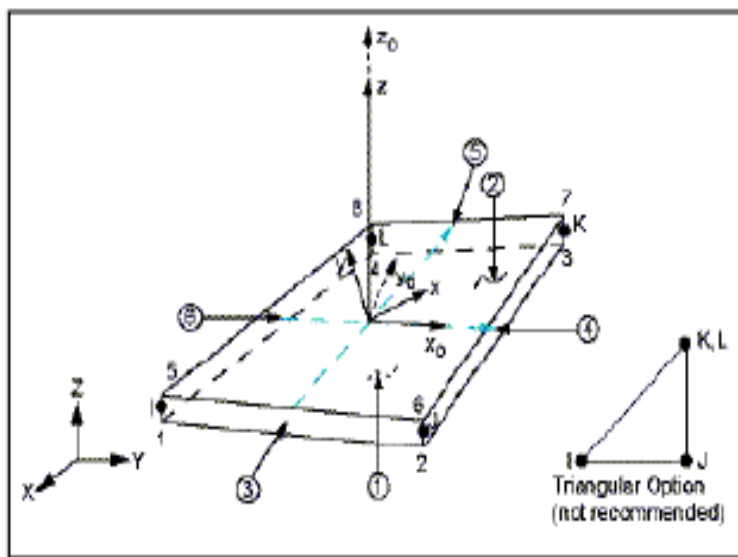
مدل سازی ورق های FRP استفاده از المان Shell^{۸۱}

جهت مدل کردن ورق های FRP از المان Shell^{۸۱} که یک المان پوسته ای لایه ای سه بعدی چهار گره ای است که هر گره دارای شش درجه آزادی است که سه درجه آزادی انتقالی، جابجایی در راستای X، Y و Z و سه درجه آزادی دورانی، چرخش حول محورهای X، Y و Z را شامل می شود و مدل سازی تا ۲۵۵ لایه در این المان مجاز است. در شکل (۵-۴)، محل قرارگیری گره ها، هندسه و محور مختصات این المان نشان داده شده است. در این المان در صورتی که شماره گره های K و L را یکسان بدهیم به صورت المان مثلی می شود. بنابراین از میان المان های مورد استفاده جهت مدل سازی کامپوزی تنها، تنها المانی است که دارای چهار گره در صفحه بوده و توانایی تبادل صحیح نیرو بین بتن و ورق FRP را دارد.



این المان توسط چهار گره ، تعداد لایه ها ، ضخامت لایه ها ، زاویه قرارگیری الیاف و خواص ارتوتروپیک ماده مشخص می گردد. خواص مصالح هر لایه می تواند در صفحه المان ارتوتروپ باشد و خاصیت ماده هر لایه با شماره مصالح آن تعیین می گردد . هر لایه می تواند دارای ضخامت متغیر باشد و تغییرات ضخامت با توجه به ضخامت هایی که برای نقاط مختلف المان داده می شود می تواند متغیر دو خطی باشد . این المان قابلیت اعمال تمامی خواص خطی و غیرخطی به علاوه کرنش های کراندار را دارا می باشد، اطلاعات مربوط به لایه ها توسط سطح مقطع پوسته ای به جای مقادیر ثابت وارد می شود.

سطح مقطع المان پوسته ای بیانگر هندسه المان در صفحه ای به موازات صفحه X-Y المان است. هر لایه المان می تواند در نوع ماده، ضخامت، جهت(نسبت به محور X المانی) و تعداد نقاط انتگرال گیری تغییر کند.



شکل ۱۵- شکل هنسی، موقعیت گره ها المان shell ۱۸۱ تنش های داخلی المان لایه ای

معرفی مصالح

در نرم افزار ANSYS جهت مدل نمودن مصالح از دو روش خطی و غیرخطی استفاده می گردد. جهت کارتحقیقاتی و مدل دقیق نه تنها نیاز به بررسی هندسه مدل به صورت غیرخطی می باشد، بلکه مصالح مدل نیز باید به صورت غیرخطی تعریف گردند.

در نرم افزار ANSYS جهت ایجاد مصالح غیرخطی از روش مضاعف استفاده می گردد، و این بدان معنی است که ابتدا مصالح به صورت خطی تعریف شده سپس حالت غیرخطی آنها معرفی می گردند. جهت انجام این مهم نخست باید مشخصات خطی مصالح مانند وزن مخصوص ، مدول ارتجاعی خطی، ضریب پواسون، و ... را تعریف نمود. سپس با انتخاب نوع صحیح غیرخطی مصالح با توجه به حالت های غیرخطی موجود در کتابخانه نرم افزار مدل مصالح را به غیرخطی تبدیل کرد. در این نرم افزار برای تقسیم بندی مصالح به صورت خطی و غیرخطی، مصالح به دو گروه مهم ایزوتروپیک و اورتوتروپیک نیز تقسیم بندی می گردند. مشخصات اولیه (حالت خطی) که برای این مصالح می تواند تعریف گردد شامل،



مدول ارتجاعی، وزن مخصوص، ضریب تغییر طول حرارتی، ضریب پواسون، مدول برشی، ضریب انتقال حرارتی و گرمای ویژه می باشد، که این موارد فوق می توانند به صورت ایزوتروپیک و اورتوتروپیک تعریف گردند. در مدل سازی غیرخطی مصالح، امکان تعریف تمامی مصالح با خصوصیات متغیر نسبت به درجه حرارت در نرم افزار ANSYS وجود دارد. به گونه ای که به طور مثال بتوان در بتن در هر حرارتی مقاومت، مدول ارتجاعی و سایر مشخصات را تعریف کرده و در واقع با یک ماتریس دو بعدی، مشخصات مصالح تابع درجه حرارت را به نرم افزار معرفی نمود. اما در این پروژه با توجه به انجام آزمایشات در دمای تقریباً ثابت مشخصات مصالح تنها در یک دمای ثابت معرفی می گردد.

بررسی صحت مدلسازی عددی

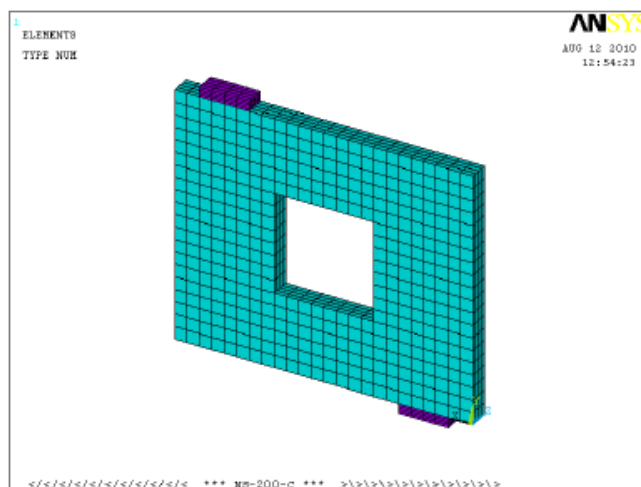
مدلسازی عددی باید به صورتی صحیح صورت گیرد تا بتواند تا حد امکان معرف ویژگی های واقعی سیستم تحت بررسی باشد و با بهره گیری از آن بتوان پیش بینی درستی از رفتار سیستم مذکور داشت. بدین منظور در این پروژه برای دستیابی به این هدف دو مدل تیر عمیق با بازشو یکی بدون تقویت و دیگری با تقویت CFRP منطبق بر تیرهای آزمایش خواهد شد.

مدلسازی تیر در ANSYS

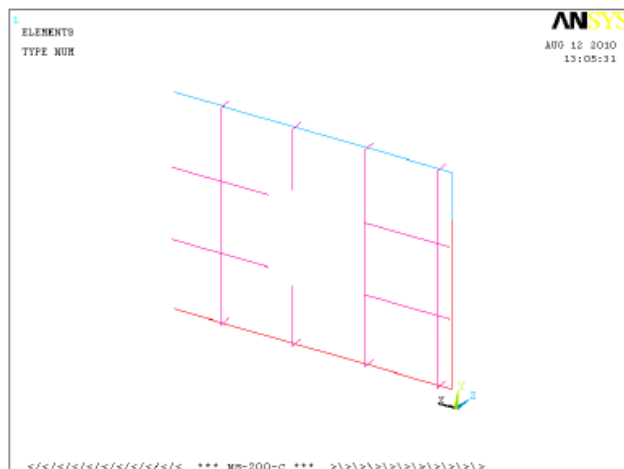
بدلیل وجود تقارن در تیر تنها یک چهارم آن مدل می گردد و شرایط مرزی به این دلیل در صفحات تقارن اعمال می شود. همانطور که در راهنمای برنامه آمده است باید در صفحات تقارن جابجایی عمود بر صفحه و دوران درون صفحه بسته شود. مدل کردن یک چهارم تیر باعث کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل و فضای مورد نیاز برای ذخیره اطلاعات می شود.

مش بندی مدل

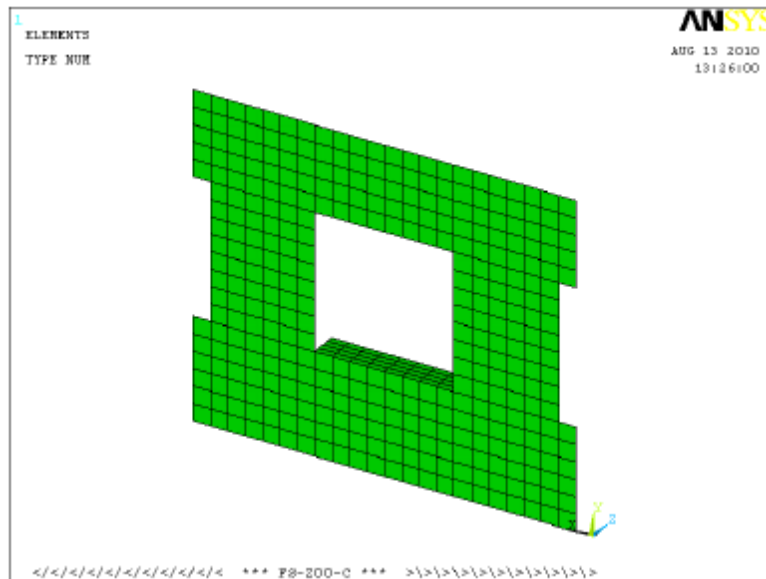
پس از ساخت مدل به صورت هندسی باید مصالح و نوع المان ها و ضرایب ثابت ۲ مربوط به آن ها به مدل هندسی ساخته شده اختصاص یابد که این عمل ضمن مش بندی مدل صورت خواهد گرفت. ابتدا مش بندی احجام هندسی بتنی با اختصاص المان Solid⁶⁵ و مصالح بتن صورت می گیرد، جهت دستیابی به نتایج مناسب و همچنین وجود آرماتورها در مدل، مش بندی احجام مزبور به صورت دستی با المان های مکعبی و با توجه به محل قرارگیری خطوط هندسی (آرماتورهای فولادی) انجام میشود. سپس مش بندی صفحات فلزی با استفاده از المان Solid⁴⁵ و مصالح فولادی انجام می گیرد. در مرحله بعد مش بندی خطوط هندسی با اختصاص المان Link⁸ و مصالح فولادی و ضرایب ثابت مربوطه انجام میگردد، مش بندی این خطوط باید به صورت سازگار با مش بندی انجام گرفته برای قسمت بتنی انجام گیرد، تا مشارکت بخش های مجاور به نحو مناسبی برقرار گردد. به عبارت دیگر تقسیم بندی آرماتورها در امتداد طولشان به گونه ای باشد که گره های المان های Link⁸ و Solid⁶⁵ بر هم منطبق شوند. در تیر دوم که تقویت CFRP نیز وجود دارد، المان های صفحات CFRP به گونه ای قرار داده می شوند که گره های آن ها منطبق بر گره های المان های بتنی قرار گیرد. شکل (۵-۵) مش بندی صفحات تکیه گاهی و بتن، شکل (۵-۶) مش بندی آرماتور و شکل (۵-۷) مش بندی صفحات CFRP را نشان می دهد.



شکل ۱۶ مش بندی صفحات تکیه گاهی و بتن



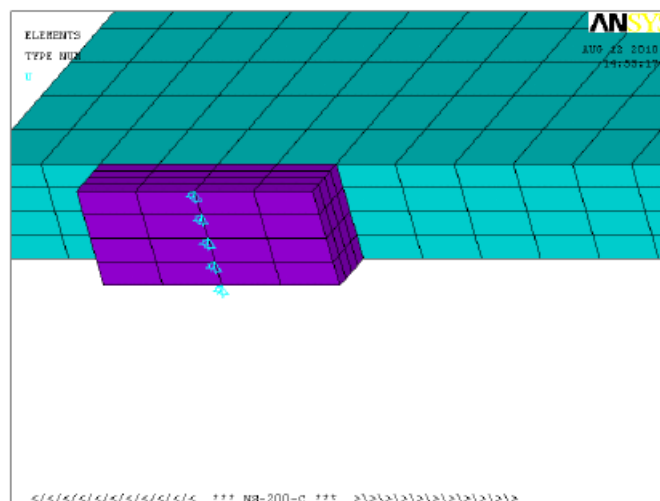
شکل ۱۷ مش بندی آرماتور



شکل ۱۸ مش بندی صفحات CFRP

اعمال شرایط مرزی و بارگذاری

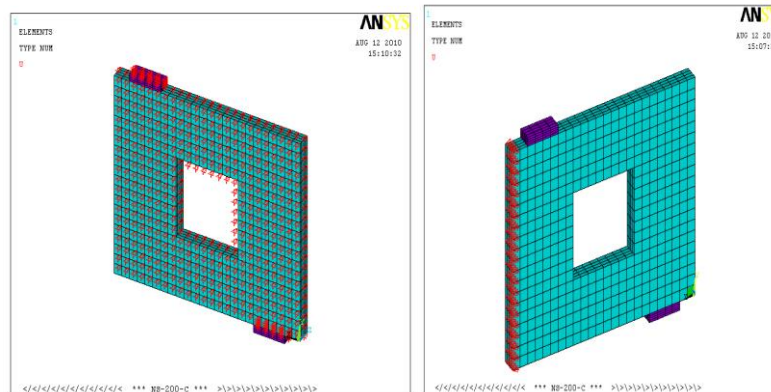
پس از ساخت هندسه مدل نوبت به اعمال شرایط مرزی می رسد. مطابق نمونه های آزمایشگاهی شرایط تکیه گاه ساده به مدل اعمال می شود. جهت انجام این کار درجات آزادی جابجایی گره های مربوطه در ۲ جهت عمودی و افقی مقید شدند. شکل (۵-۸) نشان دهنده قید تکیه گاهی می باشد.



شکل ۱۹ قیود تکیه گاهی



علاوه بر قیود فوق به علت استفاده از تقارن و مدل کردن صرفاً یک چهارم تیر باید در صفحات تقارن نیز تیر را مقید کنیم. جهت انجام این کار جابجایی عمود بر صفحه و دوران درون صفحه را می بندیم. در شکل (۵-۹) قیود مربوط به تقارن را مشاهده می کنید.



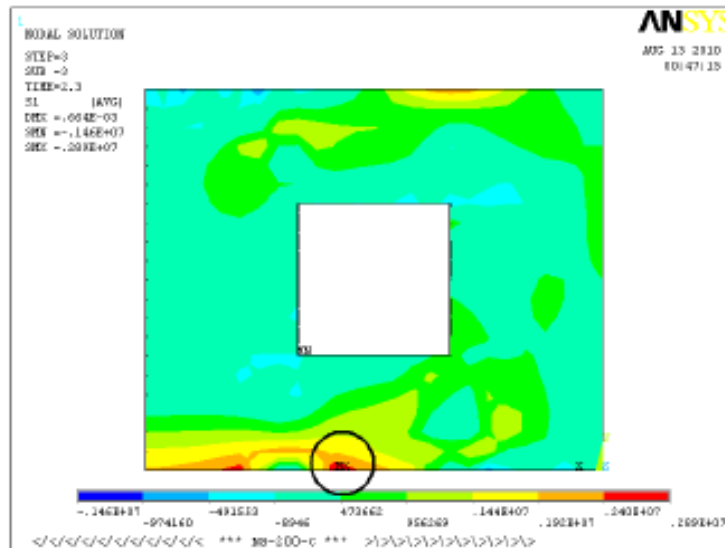
شکل ۲۰ قیود مربوط به تقارن

بارگذاری به صورت تغییر مکان و در راستای قائم، بر گره های واقع بر روی خط وسط صفحه اعمال بار و به تدریج در طول زمان، به مدل المان محدود اعمال می شود. زمانی که به بار نهایی تیر نزدیک می شویم بارگذاری بسیار کند و آرام انجام می گیرد.

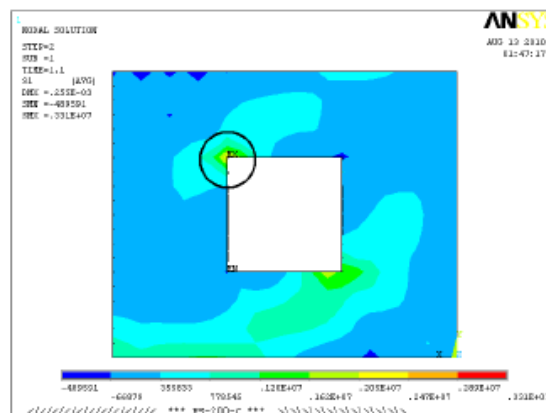
نحوه آنالیز و معیار همگرایی

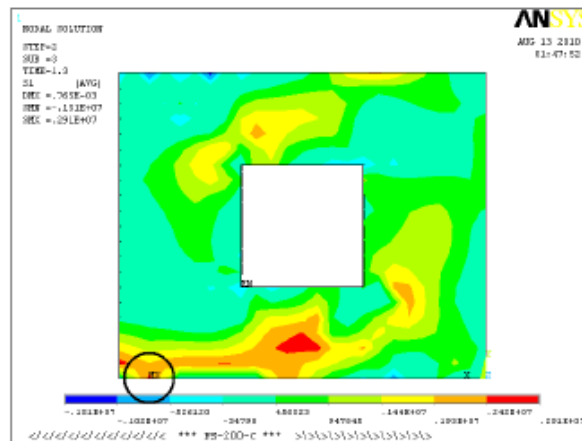
اعمال بار به مدل باید به صورت تابعی از زمان صورت گیرد که در ادامه به تشریح تنظیمات صورت گرفته برای این تحلیل پرداخته می شود.

با توجه به اینکه تحلیل به صورت گام به گام متناظر با گام های زمانی بارگذاری معرفی شده به نرم افزار صورت می گیرد، در صورتی که در هر مرحله همگرایی صورت نگیرد، به طور خودکار آن گام زمانی نصف می شود و تحلیل تکرار می گردد. در صورت تکرار عدم همگرایی دوباره گام زمانی قبلی نصف می شود و عملیات تکرار می گردد. این فرآیند آن قدر تکرار می گردد که یا تحلیل همگرا گردد یا اینکه مقدار گام زمانی به مقداری که توسط کاربر به عنوان حداقل گام زمانی معرفی شده برسد، که در اینصورت عملیات تحلیل متوقف خواهد شد. جهت تحلیل از روش نیوتن رافسون کامل استفاده شده است. از آنجا که بارگذاری بر مبنای زمان داده شده است، زمان انتهایی بارگذاری زمان پایان تحلیل در نظر گرفته شده است. زمان بارگذاری در نظر گرفته شده ۱۰ ثانیه است که زمان مربوط برای هر مرحله بارگذاری ۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. در ابتدای تحلیل که رفتار مصالح خطی است، زمان برای ریز بارگذاری ۰/۱ ثانیه و در انتها که وارد فاز غیرخطی می شویم ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است.



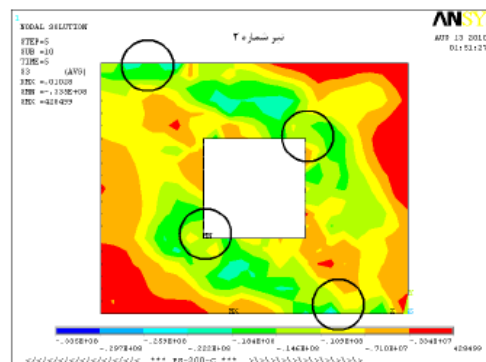
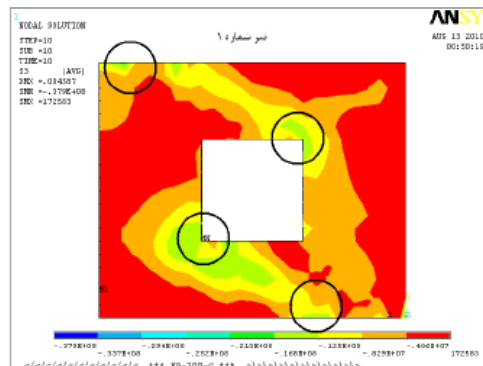
شکل ۲۱ کانتور تنش بیشینه برای تیر شماره ۱ (فاقد تقویت)





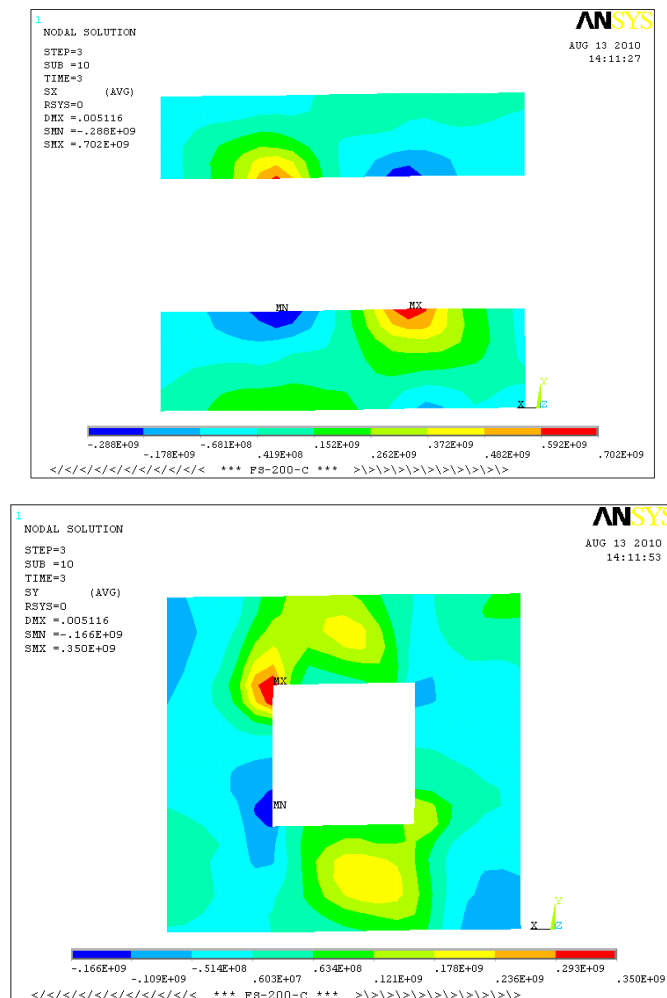
شکل ۲۲ کانتور تنش بیشینه برای تیر شماره ۲ (دارای تقویت)

کانتور اصلی تنش کمینه برای تیر ۱ و ۲ در شکل ۲۲ آمده است. همانطور که در شکل دیده می شود برای هر دو تیر گوشه های صفحات اعمال بار، صفحات تکیه گاهی و گوشه هایی از بازو دارای بیشترین تنش فشاری می باشند.



شکل ۲۳ کانتور تنش کمینه برای تیر شماره ۲ و ۱

برای تیر شماره ۲ کانتور برای صفحات CFRP در جهت الیاف در شکل ۲۳ آورده شده است.



شکل ۲۴ کانتور تنش صفحات CFRP در جهت الیاف

نحوه گسترش ترک

ترک خوردگی در تیرها در مکان هایی رخ می دهد که تنش کششی بیش از تنش کششی قابل تحمل بتن باشد. در شکل (۵-۱۴) اولین ترک ها برای هر دو تیر به نمایش گذاشته شده اند. همانطور که مشاهده می شود اولین ترک ها ترک های برشی می باشند. مقدار بار ترک خوردگی در تیر اول که فاقد تقویت است برابر ۳۳KN است. مقدار بار ترک خوردگی در تیر شماره ۲ که دارای تقویت است ۴۲ KN است که افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه فاقد تقویت دارد.

نتیجه گیری

نمودار بار تغییر مکان تیرهای عمیق دارای ۲ ناحیه اصلی می باشد. ناحیه اول تا قبل از ایجاد ترک های خمشی که رفتار تیر تقریباً خطی است و روند افزایش بار در مقابل تغییر مکان ثابت است. ناحیه دوم بعد از ایجاد ترک های خمشی اتفاق



می افتد که سختی تیر شروع به کاهش کرده و افزایش بار روند کاهشی به خود می گیرد. حضور صفحات FRP آغاز مرحله غیر خطی را به تعویق می اندازد.

در استفاده از الیاف به صورت تک لایه و صرفاً در یک جهت استفاده از الیاف مایل با زاویه ۴۵ درجه بهترین عملکرد در افزایش ظرفیت باربری تیر را دارند.

به طور کلی استفاده از FRP در تیرهای با نسبت دهانه به عمق کمتر، افزایش بیشتری نسبت به تیرهای با نسبت دهانه به عمق بیشتر دارند.

ایجاد بازشو علاوه بر کاهش ظرفیت باربری تیرها، سختی تیرها را نیز کاهش می دهد که این کاهش سختی در تیرهای با نسبت دهانه به عمق کمتر بیشتر از تیرهای با دهانه به عمق بیشتر است.

در مقایسه الیاف در دو جهت افقی و قائم، عملکرد الیاف در جهت افقی در تیرهای با نسبت دهانه به عمق کمتر بهتر از الیاف در جهت قائم و در تیرهای با نسبت دهانه به عمق بیشتر عملکرد الیاف قائم بهتر می باشد.

منابع

- ۱-Building co requirements for structural concrete (ACI ۳۱۸-۰۲), ۲۰۰۲.
- ۲-Arabzadeh, A.(۱۹۹۲). "Reinforced concrete fixed-ended deep beams and multi span". University of Dundee, Civil Engineering Department, PhD THESIS, Secemder, ۳۰۰p
- ۳-Park.P. & Paulay.T. "Reinforced Concrete Structures". New York : Jon Wiely & Sons, ۱۹۷۵
- ۴-James G. Macgregor."Reinforced Concrete Mechanics and Design. Chapter ۱۸ "Discontinuity Regions, Corbels, Deep Beam, and Joint". Thired edition. ۱۹۹۷. prentice-hall international, Inc.
- ۵-Bedard, Claude, "Composite Reinforcing Bars: Assessing Their Use in Concrete,"Concrete International, ۱۹۹۲, pp. ۵۵-۵۹.
- ۶-Mahmoud T. and Tedesco W., "Deflection of Concrete Beams Strengthened Fiber Reinforced Polymer (FRP) Plates", ACI Structural Journal, Sep-Oct ۲۰۰۰: pp. ۶۷۹-۶۸۸
- ۷- ارزیابی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح ترمیم و تقویت شده با ورق های CFRP ابوالفضل عربزاده و مهدی میرزایی ، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز
- ۸-Nanni,A Khalifa, A. and,Belarbi,B., "shear performance of RC Members strengthened with Externally Bonded FRP wraps". Proc., ۱۲th world conference on earthquake Engineering, jan ۳۰-Feb ۰۴, ۲۰۰۰, Auckland, Newzeland, pp.۳۰۵-۳۱۵.
- ۹-Upadhyay A., Kalyanaraman V. (۲۰۰۳). Simplified analysis of FRP box-girders. J. Composite Struct., Elsevier, ۵۹, ۲۱۷-۲۵.
- ۱۰-Khalifa, A., Gold, W.J., Nanni, A., and Aziz, M.I. ۱۹۹۸. "Contribution ofexternally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members."ASCE Journal of composites for Construction, ۲: ۱۹۵-۲۰۲.



- ۱۱-Tarek Alkhradji and Antonio Nanni "Surface Bonded FRP Reinforcement for Strengthening/Repair of Structural Reinforced Concrete" center for Infrastructure Engineering Students (CIES) University of Missouri-Rolla ۲۲۳ Engineering Lab ۱۸۷۰ Miner Circle Rolla, MO ۶۵۴۰۹-۰۷۱۰- ICRI-NRCC Workshop, Baltimore, MD, Oct, ۳۰, ۱۹۹۹, ۱۹ pp
- ۱۲-Gustavo Tumialan, Paola Serra, Antonio Nanni, Abdeldjelil Belarbi, "Concrete Cover Delamination in RC Beams Strengthened with FRP Sheets "SP ۱۸۸ ACI Journal, ۴th
- ۱۳-International Symposium on FRP Reinforced Concrete Structures Nov ۱۹۹۹ pp ۷۲۵-۷۳۵