

گروه عمران

عنوان:

بررسی تحلیل غیرخطی و مدل سازی عددی تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو تقویت شده با FRP توسط نرم افزار اجزاء محدود

چکیده

در این مطالعه به ارزیابی و مقایسه تحلیل غیرخطی و عددی تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو بدون مقاوم سازی با تیرهای عمیق بتنی دارای بازشو مقاوم شده با ورق های FRP و تیرهای عمیق بتن مسلح بدون بازشو توسط نرم افزار اجزاء محدود Abaqus پرداخته شده است. با استفاده از روش اجزاء محدود غیر خطی، ۹ نمونه تیر عمیق با تکیه گاه های ساده تحت بار متمرکز مدل سازی و میزان اثر بخشی ورق های FRP بر مقاومت نهایی تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور از یک نمونه تیر عمیق بتن مسلح بدون بازشو به عنوان تیر شاهد و ۴ تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو (دایره ای و مربعی) بدون تقویت و ۴ نمونه تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو (دایره ای و مربعی) تقویت شده با ورقه های FRP استفاده شده است. تقویت توسط ورقه های FRP، دورتادور بازشوها، در بالا بردن ظرفیت تیرهای عمیق بتن مسلح بسیار موثر بوده است. مدل سازی اجزاء محدود نمونه ها با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود Abaqus انجام شده است.

کلید واژه ها: تیر عمیق، بتن مسلح، بازشو، اجزاء محدود، FRP، تحلیل غیرخطی.

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه.....	۱
۱-۱- تیر عمیق.....	۳
۲-۱- بازشوی جان.....	۴
۳-۱- اهمیت این مطالعه.....	۴
۴-۱- هدف این مطالعه.....	۵
فصل دوم تیر عمیق بتن مسلح.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۲-۲- بتن.....	۸
۱-۲-۲- رفتار فشاری بتن.....	۸
۲-۲-۲- محصوریت در بتن به وسیله خاموت.....	۹
۳-۲-۲- مدل کنت و پارک.....	۱۰
۴-۲-۲- نسبت پواسون.....	۱۱
۳-۲- فولاد مسلح کننده بتن.....	۱۱
۴-۲- الیاف مقاوم پلیمری.....	۱۲
۱-۴-۲- الیاف.....	۱۴
۲-۴-۲- ماتریس.....	۱۴
۳-۴-۲- مزایای FRP.....	۱۵
۴-۴-۲- معایب FRP.....	۱۶
۵-۲- تیر عمیق بتن مسلح.....	۱۶
۱-۵-۲- تیر عمیق بتن مسلح با بازشو.....	۱۷

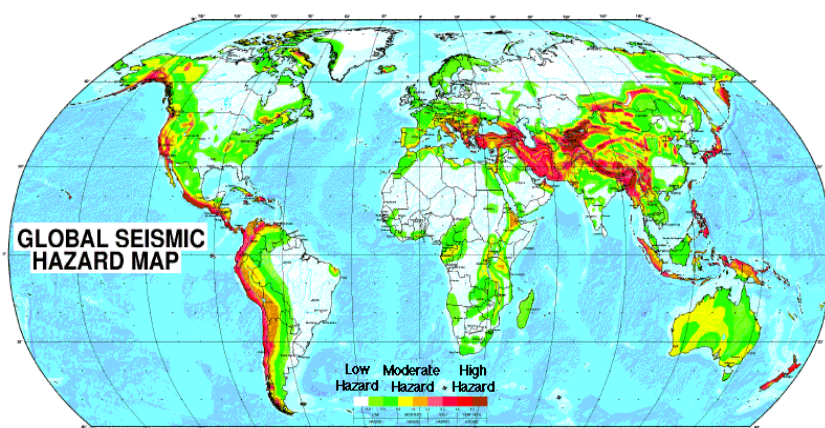
۱۸	مقاوم سازی تیر عمیق بتن مسلح دارای باز شو	۲-۵-۲
۲۰	تاریخچه مطالعات پیشین	۲-۶
۲۸	فصل سوم مدلسازی	
۲۹	مقدمه	۳-۱
۳۰	مدل سازی تیر بتنی	۳-۲
۳۰	مدل سازی آسیب	۳-۲-۱
۳۱	آسیب اولیه	۳-۳
۳۲	معیار حداکثر تنش اسمی	۳-۴
۳۲	معیار حداکثر کرنش اسمی	۳-۵
۳۲	ضابطه تنش اسمی درجه دوم	۳-۶
۳۲	ضابطه کرنش اسمی درجه دوم	۳-۷
۳۲	رشد آسیب	۳-۸
۳۳	بررسی مدل رفتار اصطکاکی (Contact)	۳-۹
۳۳	استفاده از مدل اصطکاکی اولیه (Coulomb)	۳-۱۰
۳۴	استفاده از مدل پیش فرض	۳-۱۱
۳۵	تعیین تابع اصطکاک جنبشی و ایستائی	۳-۱۲
۳۵	استفاده از محدودیت تنش برشی انتخابی	۳-۱۲-۱
۳۶	رابطه های فشار-تماس بسیار نزدیک	۳-۱۲-۲
۳۶	استفاده از رابطه تماس سخت	۳-۱۲-۳
۳۷	استفاده از ارتباط تماسی «سخت» اصلاح شده در تحلیل استاندارد	۳-۱۲-۴
۳۷	بررسی مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن (CDP)	۳-۱۲-۵
۳۹	صحت سنجی مدل	۳-۱۳

۳۹	 ۱۴-۳-هندسه مدل
۳۹	 ۱-۱۴-۳ - مشخصات هندسی تیر عمیق
۴۰	 ۲-۱۴-۳ - خواص مصالح
۴۱	 ۳-۱۴-۳ - مدل سازی تیر شاهد
۴۱	 ۱-۳-۱۴-۳ - مدل سازی بتن مسلح
۴۱	 ۲-۳-۱۴-۳ - مدل سازی میلگردها
۴۲	 ۳-۳-۱۴-۳ - مدل سازی ورق های CFRP
۴۲	 ۴-۳-۱۴-۳ - تعریف بارگذاری
۴۲	 ۵-۳-۱۴-۳ - شرایط تکیه گاهی
۴۲	 ۶-۳-۱۴-۳ - مش بندی
۴۳	 ۷-۳-۱۴-۳ - نتایج تحلیل
۴۳	 ۸-۳-۱۴-۳ - مدل تقویت شده
۴۳	 ۹-۳-۱۴-۳ - روش تقویت تیر بتنی عمیق
۴۳	 ۱۰-۳-۱۴-۳ - مشخصات CFRP
۴۴	 فصل چهارم تحلیل
۴۵	 ۱-۴ - تیر عمیق بتن مسلح (تیر شاهد)
۴۹	 ۲-۴ - تیر عمیق بتن مسلح با بازشو
۴۹	 ۱-۲-۴ - تیر عمیق بتن مسلح با بازشو مربعی
۴۹	 ۱-۱-۲-۴ - تیر عمیق بتن مسلح با باز شوی مربعی با ابعاد ۱۵۰ mm
۵۴	 ۲-۱-۲-۴ - تیر عمیق بتن مسلح با باز شوی مربعی با ابعاد ۲۰۰ mm
۵۸	 ۲-۲-۴ - تیر عمیق بتن مسلح با باز شوی دایره ای
۵۸	 ۱-۲-۲-۴ - تیر عمیق بتن مسلح با بازشوی دایره ای با قطر ۱۵۰ mm

- ۶۳..... ۲۰۰ mm با قطر دایره ای با مسلح با بازشوی CFRP دایره ای - ۲-۲-۲-۴
- ۶۷..... CFRP با مسلح با بازشوی تقویت شده با CFRP - ۳-۴
- ۶۷..... CFRP با مسلح با بازشوی تقویت شده با CFRP با بازشوی مربعی - ۱-۳-۴
- ۶۸..... ۱۵۰ mm با ابعاد CFRP با مسلح با بازشوی تقویت شده با CFRP با بازشوی مربعی - ۱-۱-۳-۴
- ۷۱..... ۱۵۰ mm با ابعاد CFRP با مسلح با بازشوی تقویت شده با CFRP با بازشوی مربعی - ۲-۱-۳-۴
- ۷۴..... CFRP با مسلح با بازشو دایره ای تقویت شده با CFRP - ۲-۳-۴
- ۷۴..... ۱۵۰ mm با قطر دایره ای تقویت شده با CFRP با بازشوی دایره ای - ۱-۲-۳-۴
- ۷۸..... ۲۰۰ mm با قطر دایره ای تقویت شده با CFRP با بازشوی دایره ای - ۲-۲-۳-۴
- ۸۲..... مقایسه تیر عمیق بتنی ساده و تیرهای عمیق بتنی دارای بازشو - ۴-۴
- ۸۳..... CFRP با مسلح با بازشو و تقویت شده با CFRP مقایسه تیر بتنی عمیق با بازشو - ۵-۴
- ۸۴..... مقایسه کلی نمونه ها - ۶-۴
- ۸۵..... فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات
- ۸۶..... نتایج - ۱-۵
- ۸۷..... پیشنهادات - ۲-۵
- ۸۹..... منابع

فصل اول مقدمه

ایران از نظر لرزه خیزی در منطقه فعال جهان قرار دارد و به گواهی اطلاعات مستند علمی و مشاهدات اخیر از خطر پذیرترین مناطق جهان محسوب می شود. در این راستا یکی از برنامه های دولت و مردم برای کاهش خطر پذیری کشور در برابر زلزله، برنامه مطالعه و اجرای مقاوم سازی ساختمان های دولتی مهم، تأسیسات زیر بنایی و شریان های حیاتی کشور است. موفقیت در مقاوم سازی لرزه ای به عنوان جزئی از بهسازی لرزه ای منوط به بهره بردن از فنون و مهارت های نوین مقاوم سازی است. در میان این نوآوری ها، الیاف مقاوم شده با پلیمر^۱ از جایگاه ویژه ای برخوردار است.



شکل ۱-۱: نقشه خطرپذیری لرزه ای جهانی [۲۵]

در این میان، تیرهای عمیق بتن آرمه بطور گسترده در ساختمان های بلند مرتبه، مخازن، سیلوهای مستطیلی، دیافراگم های کف، دیوارهای برشی، دال ها و شاهتیرهای انتقال در سازه های دریایی و فونداسیون ها، دیوارهای پناهگاه های زیرزمینی و همپنین در دیوارهای باربر ساختمان ها و غیره مورد استفاده قرار گرفته شده است. وجود بازشوهای جان فراوان در این گونه تیرها، جهت ایجاد دسترسی مانند درب ها و پنجره ها و یا جهت عبور تأسیسات اصلی مانند لوله های تهویه، آب، برق، فاضلاب، کولر و غیره مورد نیاز است.

از سوی دیگر، رفتار اعضای سازه ای بتن مسلح در طول بارگذاری برای بهبود ایمنی و کارایی سازه بسیار مهم است. روش های مختلفی برای بدست آوردن پاسخ اعضای سازه ای تاکنون به کار برده شده است. مطالعات آزمایشگاهی به عنوان روشی برای آنالیز المان های سازه ای به طور گسترده ای به کار رفته اند. اگرچه این روش نتایجی به دست می دهد که تا حد زیادی منطبق بر واقعیات است،

^۱ FRP

اما بسیار وقت گیر و پرهزینه است. استفاده از روش آنالیز اجزاء محدود برای مطالعه ی اعضای سازه ای، یکی دیگر از روش هایی است که امروزه به کار می رود. در گذشته مطالعات اولیه در این زمینه با توجه به امکانات سخت افزاری و نرم افزاری ضعیف وقت گیر بود. اما در سال های اخیر استفاده از آنالیز اجزاء محدود^۱ به علت پیشرفت دانش و بالا رفتن ظرفیت سخت افزاری و نرم افزاری، افزایش یافته است. استفاده از نرم افزارهای رایانه ای برای مدل کردن این المان ها بسیار با صرفه تر و سریع تر است.

داده های به دست آمده از یک آنالیز المان محدود مفید نخواهد بود، مگر آن که گام های لازم برای فهمیدن این که درون مدل ایجاد شده نرم افزار چه می گذرد، برداشته شود. همچنین باید کنترل های لازم در نقاط کلیدی برای اطمینان از خروجی نرم افزار انجام شود.

۱-۱- تیر عمیق

تیر عمیق^۲ تیری است که عمقش قابل مقایسه با طولش باشد. بعضی از تیرهای بتن مسلح به نسبت دهانه ی شان دارای ارتفاع بزرگتر از معمول می باشند. در این تیرها نیروهای خارجی و واکنش های تکیه گاهی در صفحه ی عضو قرار دارند و یک حالت تنش صفحه ای در بتن به وجود می آید، به چنین تیرهایی تیر عمیق می گویند.

طراحی این تیرها به حد کافی توسط آیین نامه های ملی پوشش داده نشده است؛ برای مثال آیین نامه ی فعلی بریتانیا B 8110 صریحاً بیان می دارد که "برای طراحی تیرهای عمیق باید به نشریات تخصصی مراجعه شود." آیین نامه های مهمی که تا حدودی در مورد تیرهای عمیق بحث کرده اند، عبارتند از آیین نامه ی ACI و CIRIA Guide 2 که البته راهنمای شماره ۲ CIRIA اطلاعات جامع تری در اختیار می گذارد و به طور مشابه پیش نویس Eurocod EC/2 بیان می کند "این کد در مورد تیرهای عمیق به کار نمی رود". آیین نامه های طراحی مهم عبارتند از: آیین نامه ی ACI (امریکا)، آیین نامه ی CAN-A23.3-M84 (کانادا) و آیین نامه ی CIRIA GUIDE 2. از این میان تنها CIRIA GUIDE 2 دارای توصیه های نسبتاً جامعی می باشد.

^۱ Finite Element Analysis

^۲ Deep Beam

۲-۱- بازشوی جان

غالباً جهت آسان کردن اجرای سرویس های اساسی مثل مجراها، کانال های هوا، دسترسی به کابل های شبکه های الکتریکی و رایانه ای، تاسیسات مکانیکی یا حتی رفت و آمد از اتاقی به اتاق دیگر، در جان تیرهای عمیق بتن مسلح بازشوهایی را اجرا می کنند.

عوامل موثر بر رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشوی جان^۱

- نسبت دهانه به عمق
- سطح مقطع تیر (مقطع مستطیلی، T شکل و ...)
- مقدار و محل آرماتور طولی
- مقدار و نوع آرماتورگذاری جان
- خواص بتن و فولاد
- نسبت دهانه ی برش خالص به عمق تیر
- نوع بار و محل آن
- اندازه، شکل، محل بازشو و ...

۳-۱- اهمیت این مطالعه

تیرهای عمیق بتن آرمه بطور معمول در ساختمان های بلند مرتبه، سازه های دریایی و ساحلی، شاهتیرهای انتقال دهنده، برخی دیوارها و سرشمع ها استفاده می شود. وجود بازشوهایی در جان تیر در بعضی از تیرهای عمیق به سبب ایجاد دسترسی مانند درب ها و پنجره ها یا به سبب نیازهای تاسیساتی و معماری و یا به سبب تغییر در کاربری ساختمان اجتناب ناپذیر است که این امر موجب کاهش ظرفیت عضو می گردد، بنابراین می بایستی برای خطر چنین وضعی، چند راه حل ایمن ارائه گردد. تا به امروز، مطالعات محدودی بر روی رفتار و مقاومت تیرهای عمیق بتن آرمه دارای بازشو در مقالات گزارش شده است. نتیجه ای که از این مطالعات بدست آمده این است که، وجود بازشو موجب کاهش قابل توجه مقاومت تیر عمیق بتن مسلح می گردد. در مواقعی که وجود این چنین بازشوهایی اجتناب ناپذیر است، می بایست راهکارهای مناسبی جهت تقویت تیر و جبران کاهش مقاومت پیش بینی گردد. روش های مختلفی جهت ترمیم و تقویت تیرهای عمیق وجود دارد که استفاده از الیاف های پلیمری مرکب معروف به FRP در تقویت تیرهای بتن مسلح معمولی بطور کاملاً گسترده ای

^۱ Reinforced Concrete Deep Beam with Web Openings

توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج این تحقیقات بیانگر تاثیر چشمگیر کاربرد ورق های FRP در افزایش مقاومت تیرهای بتن مسلح بوده است. با وجود تحقیقات گسترده در زمینه تیرهای کم عمق بتن مسلح، در مورد تقویت تیرهای عمیق بتن مسلح فعالیت های تحقیقی کمی انجام شده است. در این رابطه نظریات مختلفی از محققین مبنی بر تاثیر و یا عدم تاثیر ورق های FRP در افزایش مقاومت نهایی تیرهای عمیق بیان گردیده است.

۴-۱- هدف این مطالعه

هدف از این مطالعه بررسی تحلیل غیر خطی و عددی تیرهای عمیق بتن آرمه دارای بازشو تقویت شده توسط CFRP می باشد. در این مطالعه، آزمایش خمش یک نقطه ای مدل سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است و جهت مدل سازی و مطالعه دقیق عددی از نرم افزار قوی اجزاء محدود Abaqus استفاده گردیده است.

در این تحقیق پس از بررسی انواع تحلیل های خطی و غیر خطی و تعیین نقاط ضعف و قوت هر کدام از روش های تحلیل، روش های پیشرفته آنالیز استاتیکی غیر خطی مورد بررسی قرار می گیرد. در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود غیر خطی، ۹ نمونه تیر عمیق با تکیه گاه های ساده تحت بار متمرکز، مدل سازی و میزان اثر بخشی CFRP بر مقاومت نهایی تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور از یک نمونه تیر عمیق بتن مسلح بدون بازشو به عنوان تیر شاهد، ۴ تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو دایره ای و مربعی بدون تقویت و ۴ نمونه تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو دایره ای و مربعی تقویت شده با ورقه های CFRP به صورت دورپیچ U استفاده شده است. در این مطالعه نمونه های دارای بازشو تا حد شکست بارگذاری می شوند و اثر افزایش مقاومت در تیرهای عمیق دارای بازشو که توسط CFRP تقویت شده اند، بررسی می شود.

در این نمونه ها در محل اعمال بار از یک صفحه فولادی به ابعاد $150 \times 50 \times 10$ میلی متر در بالای نمونه و برای اعمال بار تکیه گاهی از دو ورق فولادی به ابعاد $150 \times 50 \times 10$ در دو انتهای پایین نمونه استفاده شده است.

هدف بعدی که در فصل ۲ آمده است، بررسی رفتار این نمونه ها می باشد. در فصل ۳ ابتدا تیر شاهد منطبق بر تیر آزمایش شده محمد پناهی و همکاران [۴] در بسته نرم افزاری مربوطه ساخته و تحلیل و نتایج با آزمایش مقایسه می شود؛ تا مشخص شود که پیش بینی نرم افزار از رفتار این تیر تا چه حد با نتیجه نمونه آزمایشگاهی انطباق دارد. پس از آن مدل صحت سنجی می شود تا نزدیک به

نتایج نمونه آزمایشگاهی شویم که در این فصل بطور کامل به این موضوع خواهیم پرداخت. در فصل ۴
نتایج تحلیل این تیرها بررسی خواهد شد و در فصل ۵ نتایج و پیشنهادات ارائه خواهد شد.

مناجم پارس پژوه

فصل دوم تیر عمیق بتن مسلح

۱-۲- مقدمه

تیرهای عمیق از جمله اعضای سازه های بتنی هستند که در ساختمان های بلند، دیوارهای مخازن سیلوهای مستطیلی، دیافراگم کف، دیوارهای برشی، دال ها، سکوهای دریایی، سدها، پل ها و غیره کاربرد دارند.

۲-۲- بتن

مشخصات بتن بسته به مواد مورد استفاده در ساخت بتن، روش ساخت و نحوه محصور ساختن آن متفاوت است. این نکته بسیار مهم است که بدانیم بتن ماده ای غیر الاستیک، غیرخطی و غیر همگن است که مشخصات نسبتاً یکتواختی دارد و برای طراحی بتن باید این مشخصات به طور کامل شناخته شود، که در ذیل به معرفی آنها پرداخته می شود.

۱-۲-۲ رفتار فشاری بتن

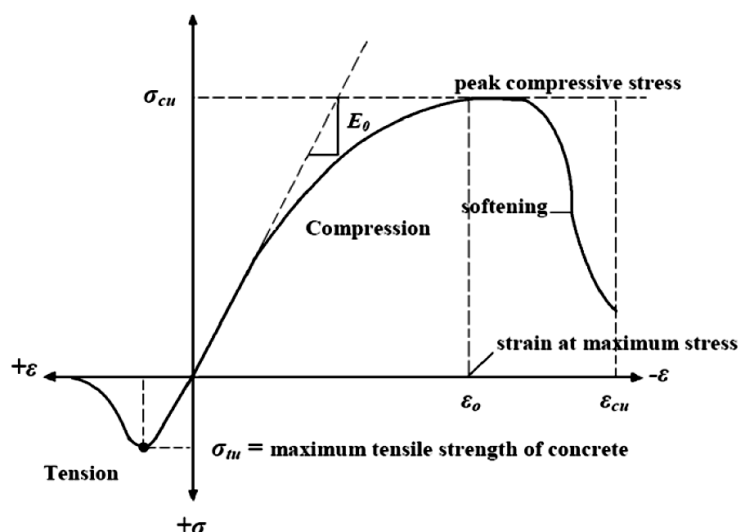
رفتار و عملکرد یک سازه به نمودار تنش - کرنش موادی که سازه از آن ساخته شده است وابستگی دارد. از آنجا که بتن معمولاً در فشار مورد استفاده قرار می گیرد به همین دلیل مقاومت فشاری آن اهمیت زیادی دارد. بنابراین معمولاً وقتی از مقاومت بتن صحبت می شود، منظور مقاومت فشاری تک محوره ی ۲۸ روزه ی بتن می باشد.

منحنی نوعی تنش - کرنش بتن تحت فشار تک محوره در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که تغییر شکل بتن تحت تنش فشاری تک محوره به صورت غیر خطی است؛ به صورتی که هرچه بتن تحت تنش فشاری بالاتری قرار گیرد، رفتار غیرخطی آن بیشتر آشکار می گردد. رفتار غیرخطی بتن تحت تنش های فشاری ناشی از تشکیل تدریجی ریز ترک ها^۱ در آن است؛ به طوری که هرچه تنش افزایش یابد، مقدار ریز ترک ها نیز افزایش خواهد یافت [۶].

کرنش نظیر تنش حداکثر f'_c که با ϵ_0 نمایش داده می شود، برای بتن های با مقاومت پایین تا بتن های با مقاومت بالا ممکن است در محدوده ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۰۰۳ متغیر باشد اگرچه مقدار ϵ_0 برای بتن های با مقاومت معمولی حدود ۰/۰۰۲ در نظر گرفته می شود. کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن که با ϵ_{cu} نمایش داده می شود، برای انواع بتن بیشتر از ۰/۰۰۳ خواهد بود شایان ذکر است با

^۱ Micro cracks

افزایش مقاومت فشاری بتن، کرنش نهایی شکست کاهش یافته و به عبارت دیگر، رفتار بتن تحت فشار تردتر می شود.



شکل ۱-۲: دیاگرام نوعی تنش - کرنش بتن تحت بار تک محوره [۷]

۲-۲-۲- محصوریت در بتن به وسیله خاموت

در عمل، محصوریت در بتن معمولاً توسط آرماتورگذاری جانبی ایجاد می شود که این آرماتور جانبی یا به صورت خاموت های مستطیلی می باشد و یا به صورت خاموت های مارپیچی. رابطه تنش - کرنش بتن در حالت محصور کاملاً متفاوت از حالت غیر محصور است و این موضوع سال ها است که به عنوان یک موضوع تحقیقاتی در بین محققان مطرح می باشد. در سطوح پایین تنش، زمانی که بار به صورت محوری اعمال می شود، آرماتورهای جانبی تنش های کمی را تحمل می کنند و اثر چندانی ندارند، زیرا اثر محصوریت این آرماتورها به صورت غیرانفعالی^۱ است.

تنش در آرماتور های جانبی با افزایش بار محوری افزایش می یابد. بتن قسمت پوششی^۲ در نزدیکی کرنش نهایی بتن غیر محصور شروع به ریختن و پوسته شدن می کند. بعد از این نقطه بتن داخل آرماتورهای جانبی به صورت هسته بتنی عمل کرده شروع به انبساط می کند. در حالی که آرماتورهای جانبی مانع از این انبساط می شوند. بنابراین تنش ها در هسته بتن دیگر به صورت تک محوره نیستند بلکه به علت فشار محصوریت حالت تنش سه محوره رخ می دهد.

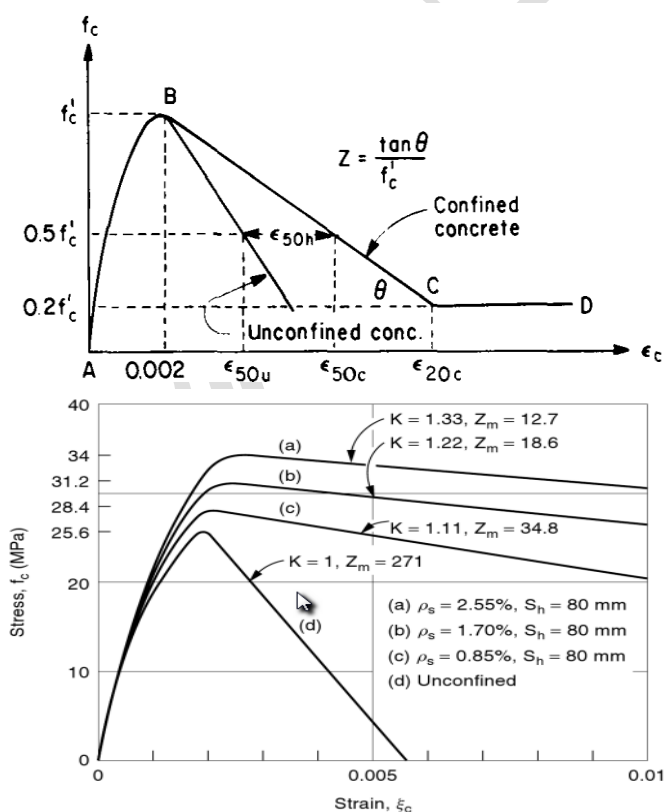
^۱ Passive Confinement

^۲ Cover

۳-۲-۲ مدل کنت و پارک

کنت^۱ و پارک^۲ مدل تنش - کرنشی را برای بتن محصور در سال ۱۹۷۱ ارائه کردند که از دو قسمت متفاوت تشکیل شده بود. قسمت صعودی نمودار توسط یک سهمی (درجه ۲) معرفی شده بود که فولاد محصور کننده هیچ نقشی در تنش حداکثر و کرنش بتن نداشت. این فرض باعث می شد که خاموت هیچ نقشی تا رسیدن به تنش و کرنش بیشینه نداشته باشد. منظور از تنش و کرنش بیشینه، مقاومت فشاری استوانه ای بتن، f'_c می باشد. قسمت نزولی از یک خط راست تشکیل شده است که تا $0.2f'_c$ کاهش می یابد و بعد با تنش ثابت $0.2f'_c$ به صورت افقی حرکت می کند. شیب خط نزولی توسط دو متغیر ϵ_{50h} و ϵ_{50u} تعیین می شود.

مدل کنت و پارک در مراحل بعدی اصلاح گردید و اثر محصوریت جانبی در قسمت بالا رونده منحنی لحاظ شد. در مدل اصلاح شده پارک، تنش و کرنش بیشینه افزایش داده شد. قسمت پایین رونده منحنی نیز اصلاح گردید، چرا که نقطه ابتدایی آن جابجا شده بود. مدل به نام مدل اصلاح شده کنت و پارک شناخته شده است. این دو نمودار در شکل (۲-۲) نشان داده شده است [۴].



شکل ۲-۲: منحنی اصلی و اصلاح شده بتن محصور شده [۱]

^۱ Kent

^۲ Park

۲-۲-۴ - نسبت پواسون

وقتی که یک نمونه استوانه ای بتنی تحت فشار قرار می گیرد، همزمان با کوتاه شدن طول نمونه و ایجاد کرنش های فشاری محوری، نمونه در جهت جانبی افزایش حجم پیدا می کند. نسبت کرنش های جانبی به کرنش های فشاری محوری به عنوان نسبت پواسون^۱ خوانده می شود. معمولاً نسبت پواسون در محدوده ۰/۱ تا ۰/۳ قرار دارد، براساس مطالعات صورت گرفته می توان نسبت پواسون برای بتن برابر با ۰/۲ فرض نمود.

۲-۳ - فولاد مسلح کننده بتن

تنش کششی پایین بتن می تواند محدودیت های زیادی در کاربرد بتن در سازه های مهندسی ایجاد کند و این در صورتی است که بتن به تنهایی مورد استفاده قرار بگیرد. چرا که اکثر اعضای بتنی باید مقابل برش و خمش مقاومت کنند که این دو تنش کششی نیز ایجاد می کنند.

با اضافه کردن آرماتور شکل پذیر با مقاومت بالا می توان بتن را تبدیل به ماده ای کرد که علاوه بر مقاومت فشاری بالا، از توانایی های فولاد نیز در کشش استفاده می کند. البته راه های دیگری هم به جز فولاد برای مسلح کردن بتن وجود دارد مانند استفاده از پلیمرها. می توان از فولاد نیز در شکل های دیگری به جز آرماتور جهت مسلح کردن بتن استفاده نمود. مسلح کردن بتن به وسیله فولاد نه تنها شکل پذیری و سختی بتن مسلح را افزایش می دهد بلکه اثرات خزش و آبرفتگی بتن را کاهش می دهد و عرض ترک ها را پایین می آورد. به طور کلی سه روش برای بیان رابطه تنش - کرنش فولاد مسلح کننده بتن وجود دارد. در ابتدا یک قسمت خطی وجود دارد که یک خط راست با شیب مدول الاستیسیته فولاد، مبدا را به تنش تسلیم، f_y می رساند که این مدول الاستیسیته حدوداً ۲۰۰ GPa می باشد. بعد از این مرحله فولاد وارد قسمت سخت شوندگی^۲ می شوند که این قسمت تا مرحله رسیدن به مقاومت حداکثر ادامه دارد.

در این حالت که تقریب الاستو پلاستیک است، در آن از افزایش تنش در قسمت سخت شوندگی صرف نظر می شود و تنش تسلیم f_{ye} را به عنوان مقاومت نهایی فرض می کند. ACI318-02 [۶] نیز این تقریب را ذکر می کند و استفاده از آن را پیشنهاد می کند.

^۱ Poison's ratio

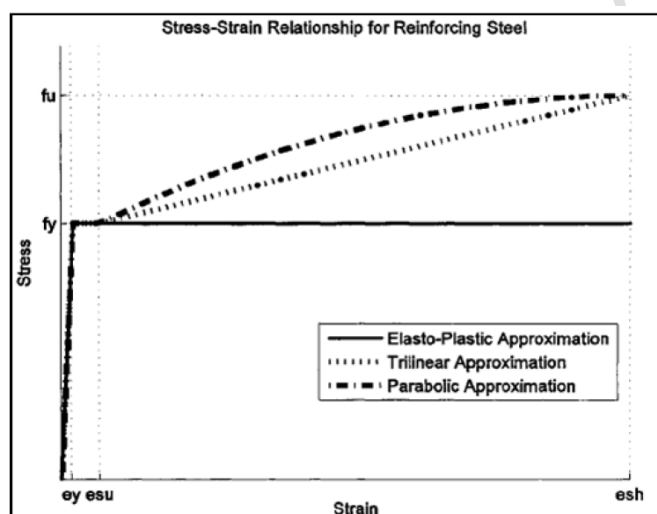
^۲ Strain hardening

در تقریب سه خطی فرض می شود که سخت شوندگی تا نقطه بیشینه به صورت خطی باشد. شیب این خط به وسیله روش درون یابی خطی بین تنش بیشینه بدست می آید که این دو نیز توسط آزمایش فولاد تعیین می گردند.

در تقریب سهموی، قسمت سخت شوندگی توسط یک معادله سهموی (درجه ۲) بیان می شود که این سهمی به خصوصیات کرنش فولاد، در مواد مختلف فولادی بستگی دارد. مثلاً برای فولاد ۶۰ (grade 60 steel) قسمت سخت شوندگی توسط معادله زیر بیان می گردد که در آن $\epsilon_{sh} = 0.008$ و $\epsilon_{sh} = 0.12$ که ϵ_{sh} میزان کرنش در مکانی است که سخت شوندگی آغاز می شود و ϵ_{sh} میزان کرنش نهایی است که فولاد به آن می رسد.

$$f_s = f_{ys} \left[1.5 - 0.5 \left(\frac{0.12 - \epsilon_s}{0.112} \right)^2 \right] \quad (3-2)$$

شکل (۳-۲) نمودارهای این سه تقریب را برای تنش - کرنش فولاد مسلح کننده نشان می دهد.



شکل ۳-۲: رابطه تنش - کرنش برای فولاد مسلح کننده [۷]

۴-۲ - الیاف مقاوم پلیمری^۱

به یک ماده مرکب و کامپوزیتی اطلاق می شود که از فیبر و رزین تشکیل شده است (شکل ۴-۲).

الیاف غیر فلزی پرمقاوم، مانند الیاف کربن، شیشه و آرامید، احاطه شده در یک ماتریس پلیمری، برای تقویت بتن از خود پتانسیل خوبی نشان داده اند. الیاف مقاوم پلیمری به اشکال مختلف میلگرد،

^۱ Fiber Reinforced Polymer (FRP)

شبکه، کابل، طناب، تاندون، ورق و انواع پروفیل های ساختمانی موجود می باشند که معمولاً به عنوان FRP شناخته می شوند. با وجود پیشرفت های اخیر در این زمینه، تاکنون تحقیقات بی شماری از دیدگاه های متفاوت کاربرد سازه ای آن در مقالات متعددی گزارش شده است. از FRP ها برای تقویت سازه ای سازه ها مورد استفاده قرار گرفته شده است [۲].

مهمترین زمینه ای که FRP می تواند در آن نقش بزرگی ایفا کند، در خصوص مقاوم سازی و بهسازی سازه های ضعیف و ناکارای موجود به ویژه سازه های بتن مسلح می باشد که هنوز دارای کاربری هستند. با توجه به خاصیت وزن کم، مقاومت فوق العاده بالا و مقاومت کششی و برشی بالا، FRP یک ماده ی مناسب برای بهسازی سازه ای می باشد.

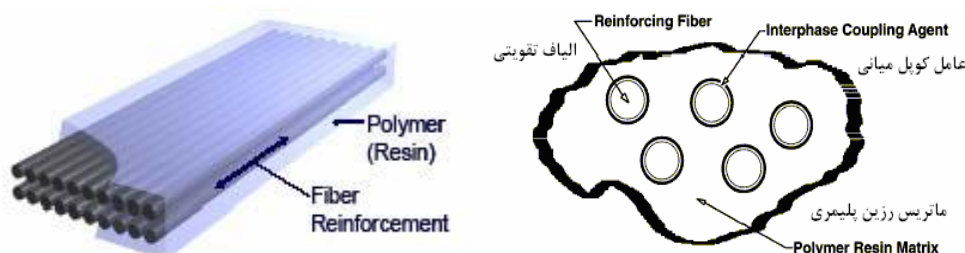
به طور کلی عملکرد یک کامپوزیت بستگی به:

- مواد سازنده آن
- نسبت مواد سازنده آن
- ظرفیت باربری فیبر یا الیاف تقویتی و نحوه ی قرارگیری آنها
- رفتار توأم سازنده با یکدیگر و ... دارد.

به طور معمول، یک ماده کامپوزیت را به صورت مخلوطی فیزیکی درمقیاس ماکروسکوپی از دو یا چند ماده مختلف تعریف می کنند که این مواد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده اند و مرز مشخصی را با یکدیگر تشکیل می دهند. در کامپوزیت ها، دونا حیه ی متمایز زیر وجود دارد (شکل ۲-۴ و ۲-۵):

- فاز پیوسته (ماتریس یا رزین)
- فاز ناپیوسته (تقویت کننده یا الیاف)

در یک کامپوزیت، به طور کلی الیاف، عضو بار پذیر اصلی سازه هستند، در حالی ماتریس (رزین) آنها را در محل و آرایش مطلوب نگه داشته است و به عنوان یک محیط منتقل کننده ی بار بین الیاف عمل می کند، به علاوه آنها را از آسیب های محیطی در اثر افزایش دما یا رطوبت حفظ می کند.



شکل ۲-۴: اجزای تشکیل دهنده FRP [۱]

۲-۴-۱ - الیاف

از موادی کاملاً الاستیک - شکننده و بسیار مقاوم ساخته می شود. قطر این الیاف بسته به جنس بین ۵ تا ۲۵ میکرون است. الیاف ها امروزه در شکل ها - اندازه ها و جنس های گوناگون موجود است. عملکرد فیبر تقویتی تحت تأثیر:

۱. جهت قرار گیری الیاف
 ۲. طول فیبر
 ۳. شکل آن
 ۴. ترکیب آن با ماتریس و رزین و چسبندگی بین آن دو
 ۵. جنس الیاف
- نام کامپوزیت ساخته شده با هر یک از این مواد با حرف اول نام ماده تشکیل دهنده الیاف شروع می شود. فایبر ممکن است از شیشه، کربن، آرامید و یا وینیلون باشد که در این صورت محصولات کامپوزیت مربوطه به ترتیب به نام های GFRP ، CFRP و AFRP شناخته می شود.

۲-۴-۲ - ماتریس

رزین به کار رفته به صورت یک محیط چسباننده برای نگهداری الیاف در کنار مقاومت پایی که دارد نقش چندان مهمی در خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته شده بر عهده ندارد. علاوه بر نگهداری الیاف در کنار هم رزین موجود در کامپوزیت به عنوان عامل محافظت الیاف در برابر عوامل محیطی و همچنین عامل توزیع تنش روی وجه ورق کامپوزیت نیز عمل می کند.

در یک نگاه، نقش اصلی ماتریس (رزین) عبارت است از:

۱. انتقال برش از فیبر تقویتی به ماده مجاور
۲. محافظت از فیبر در برابر شرایط محیطی
۳. جلوگیری از خسارت مکانیکی وارده
۴. کنترل کمانش موضعی فیبر تحت فشار

۲-۴-۳ - مزایای FRP

مصالح FRP معمولاً مقاومت کششی بسیار بالایی دارند که از مقاومت کششی مصالح فولادی به مراتب بیشتر است. مقاومت کششی بالای ورق های FRP کاربرد آنها را برای مقاوم سازی انواع المان های سازه ای، خصوصاً برای سازه های بتنی بسیار مناسب نموده است. مقاومت کششی ورق های FRP اساساً به مقاومت کششی، نسبت حجمی، اندازه و سطح مقطع الیاف به کار رفته در آنها بستگی دارد. مقاومت کششی ورق های CFRP به طور معمول MPa ۱۱۰۰ تا ۲۲۰۰ می باشد و حتی در بعضی موارد، مقاومت های بالاتر از MPa ۳۰۰۰ نیز گزارش شده است. همچنین مدول الاستیسیته ورق های CFRP غالباً در محدوده قابل قبولی قرار دارد؛ اگرچه اصولاً کمتر از مدول الاستیسیته ورق های فولاد است. مدول الاستیسیته ورق های FRP ساخته شده از الیاف کربن، شیشه و آرامید به ترتیب در محدوده GPa ۱۰۰ تا ۱۵۰، GPa ۴۵ و GPa ۶۰ می باشد.

وزن مخصوص ورق های FRP به مراتب کمتر از وزن مخصوص ورق های فولادی است؛ به عنوان نمونه وزن مخصوص ورق های CFRP بین ۱/۵ - ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب و وزن مخصوص فولاد ۷/۹ گرم بر سانتی متر مکعب است که این نشان می دهد که وزن مخصوص ورق های CFRP در حدود یک سوم وزن مخصوص ورق های فولادی است. نسبت بالای مقاومت به وزن در ورق های CFRP از مزایای عمده آنها در کاربردهای آنها به عنوان مسلح کننده بتن محسوب می شود.

با توجه به این ویژگی ها، وزن کم FRP موجب شده است که جابجایی و نصب آن بطور کلی آسان تر از فولاد باشد. این ویژگی ها بخصوص وقتی که عملیات نصب در موقعیت های مقید شده اتمام می یابد، مهم می باشند. کاربرد صفحه یا ورقه مواد FRP مانند نصب کاغذ دیواری است. مواد الیاف کامپوزیتی در طول های زیادی موجود می باشند در حالی که، طول ورقه فولادی معمولاً تا ۶ متر محدود است.

اگر الیاف و رزین ها به درستی انتخاب شوند و به درستی نگهداری شوند، دوام بسیار خوبی از خود نشان می دهند. اگر آنها در محل نصب صدمه ببینند، به آسانی می توان آن ها را با اضافه کردن لایه اضافی تعمیر نمود. استفاده از کامپوزیت های الیافی عمدتاً موجب افزایش وزن و ابعاد اعضا نمی شود. این پارامترهای مختلف در ترکیب با هم نهایتاً موجب افزایش سرعت و آسانی فرایند مقاوم سازی می شود. در همین رابطه برآورد شده است که در حدود ۹۰ درصد بازار مقاوم سازی ها در سوئیس با استفاده از روش تقویت با CFRP انجام می شود که به دلیل همین پارامتر کاهش هزینه ها می باشد. به طور کلی می توان مزایای سیستم FRP را به ترتیب زیر بیان نمود:

- بالا بودن مقاومت در مقابل نیروهای خمشی و برشی.
- سبکی و بالا بودن نسبت مقاومت به وزن.
- بالا بودن دوام و پایداری.
- ظرفیت جذب ارتعاشات.
- مقاوم در برابر ضربه.
- مقاوم در برابر رطوبت.
- شفافیت درمقابل اشعه ماوراء بنفش.
- انعطاف پذیری کاربرد برای سطوح در شکل‌های مختلف.
- مقاومت بالا در برابر خستگی و تغییرات دوره ای درجه حرارت.
- مدول الاستیسیته بالا با توزیع تنش بهینه در تغییر شکل یکسان.
- عایق بودن در محیط‌های مغناطیسی و الکتریکی.
- مقاوم در مقابل خوردگی و عوامل شیمیایی مانند اسیدها و بازها.
- سازگاری با انواع سیستم‌های ایمنی درمقابل حریق.

۲-۴-۴- معایب FRP

مهمترین عیب یا ضعف تقویت خارجی سازه‌ها توسط FRP ها، صدمات آتش سوزی، عمدی یا اتفاقی می باشد که می بایستی مقاوم سازی در برابر این صدمات حفاظت شود. یکی از معایب قابل توجه و اساسی استفاده از FRP برای مقاوم سازی قیمت بالای مصالح آن است. با این حال، مقایسه‌ها می بایستی براساس فرآیند کامل مقاوم سازی باشد که در موارد مشخصی هزینه آن کمتر از ورقه‌های فولادی می باشد. نهایتاً، مشکل اساسی نبود استاندارد و آیین نامه قابل قبول می باشد.

۲-۵- تیر عمیق بتن مسلح

تیرهای عمیق بتنی دارای کاربردهای مفید زیادی به ویژه در ساختمان‌های بلند، پی‌ها و سازه‌های دریایی می باشند. براساس آیین نامه ی ACI318-02 [۳]، تیر عمیق به عضوی اطلاق می شود که در یک وجه بارگذاری شده باشد و در وجه مقابل روی تکیه گاه قرار گرفته باشد، به صورتی که بتوان المان‌های فشاری در عضو بین بارها و تکیه گاه‌ها در نظر گرفت. به علاوه تیر از یکی از شرایط زیر برخوردار باشد:

۱. دهانه های آزاد تیر (l_n) کوچکتر یا مساوی چهار برابر عمق کلی تیر (h) باشد:

$$l_n \leq 4h \quad (۱-۲)$$

۲. بر روی تیر، بارهای متمرکزی در محدوده ی دو برابر عمق تیر از وجه تکیه گاه وارد شده باشد.

لازم به ذکر است که تعریف ACI318-02 از تیر عمیق، نسبت به نسخه های قبلی آیین نامه متفاوت است. در نسخه های قبلی آیین نامه به جای ارضای یکی از شروط ۱ یا ۲، شرط نسبت دهانه به ارتفاع کوچکتر یا مساوی ۵ قید شده بود [۷].

۲-۵-۱- تیر عمیق بتن مسلح با بازشو

اغلب وجود بازشوها در تیرهای عمیق بتن مسلح به سبب نیازهای معماری و یا عبور لوله های تاسیسات و غیره اجتناب ناپذیر است (شکل ۲-۱۵).

بازشوها اغلب مانع انتقال بار توسط جزء فشاری بتن^۱ می شوند و موجب کاهش شدیدی در مقاومت و کارایی تیرهای عمیق می شوند. به علت تمرکز تنش بالا ترک های زیادی در بالا و پایین بازشوها ایجاد می شوند. این ترک ها، به علت کرنش های عرضی زیاد، کاهش مقاومت موثر بتن را در پی خواهند داشت. همین امر سبب می گردد که برای جبران کاهش مقاومت و جلوگیری از بروز ترک و خرابی در تیر عمیق بتن مسلح، آن ها با روش های موجود مقاوم سازی، ترمیم نمود. از این رو، یکی از روش هایی که معمولاً در این رابطه توصیه می شود استفاده از روش تقویت FRP می باشد که اخیراً در زمینه مقاوم سازی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۸].



شکل ۲-۵: تیر عمیق همراه با بازشو [۸]

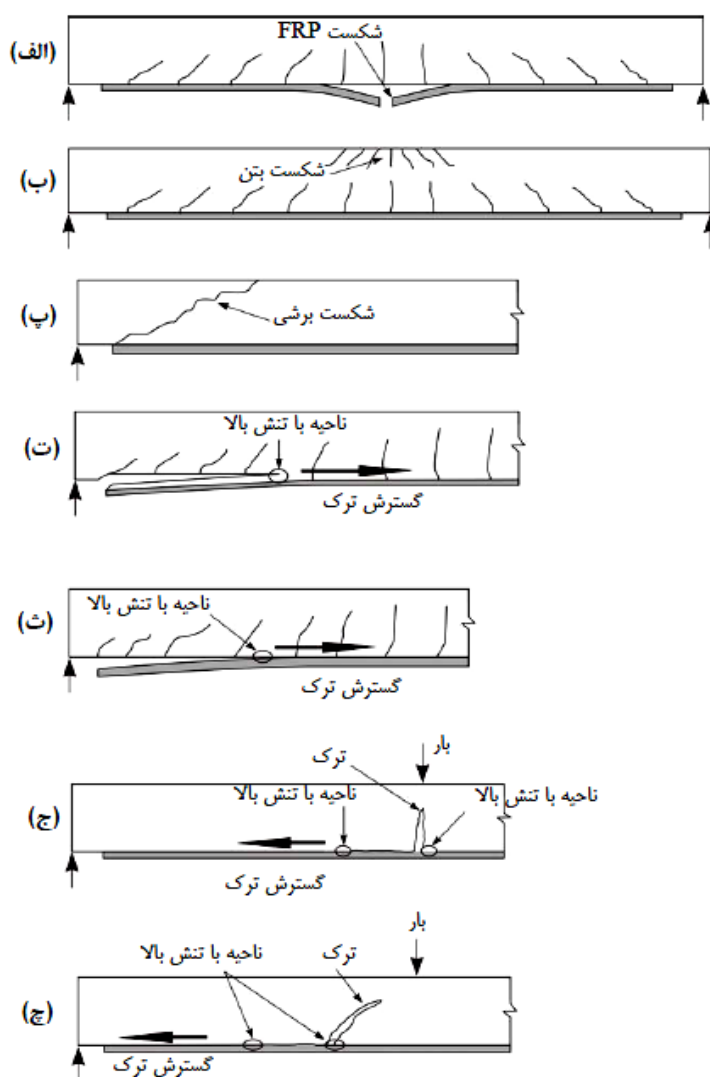
¹ Concrete Strut

۲-۵-۲ - مقاوم سازی تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو

با کاهش مقاومت و بروز ترک و خرابی در تیر عمیق بتن مسلح، به دلیل وجود بازشوها، استفاده از روشی مناسب جهت ترمیم و مقاوم سازی تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو بسیار ضروری است. در این میان استفاده از روشی که بهترین عملکرد را در مواردی همچون افزایش ظرفیت خمشی و برشی تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو، مقرون به صرفه بودن، سرعت اجرا، دوام و سایر پارامترهای موثر را داشته باشد، در میان سایر روش های مقاوم سازی بسیار حائز اهمیت می باشد.

برای بهسازی و تقویت تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو، ورق های FRP به دلیل مقاومت بالا، انعطاف پذیری خوب در شرایط اجرایی مختلف و عدم ایجاد تغییر فیزیکی زیاد در شکل و ابعاد عضو، گزینه ی بسیار مناسبی جهت استفاده در ترمیم و تقویت تیرهای بتن مسلح دارای بازشو به شمار می رود.

در تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو اتصال ورق FRP به ناحیه کششی بتن به طوری که راستای الیاف آن در جهت طولی یک عضو خمشی باشد، باعث افزایش مقاومت خمشی عضو می شود. به طور کلی مودهای گسیختگی عضو بتن مسلح تقویت شده در خمش با تقویت کننده های FRP چسبیده از خارج عضو، می تواند به حالت های ذیل تقسیم شود:



شکل ۲-۶: مودهای گسیختگی تیر بتنی تقویت شده با ورق FRP [۳]

(الف) گسیختگی FRP (ب) خرد شدن بتن فشاری
(پ) گسیختگی برشی (ت) ورقه شدن پوشش بتن
(ث) جدایش در فصل مشترک FRP و بتن در انتها
(ج) جدایش در فصل مشترک ناشی از ترک خمشی
(چ) جدایش در فصل مشترک ناشی از ترک برشی

استفاده از ورق های FRP به عنوان رکابی های خارجی، به منظور افزایش مقاومت برشی مقاطع بتن آرمه می باشد. در این روش صفحات FRP به وجوه جانبی تیر چسبانده می شود به طوری که راستای الیاف عمود بر محور طولی تیر یا مایل باشد. برای داشتن رکابی خارجی U شکل، ورق های FRP بصورت ممتد روی دو وجه جانبی و زیر تیر نصب می شود که این امر سبب بهبود مهارت تقویت خمشی FRP نیز می گردد. برای افزایش کارایی تقویت های برشی، تامین مهار انتهایی لازم است. به

طور مثال در حالتی که طول مهاری محدود باشد، با تعبیه نوارهای طولی اضافی به انتهای رکابی های U شکل مهار انتهایی تامین شده است. به منظور پرهیز از گسیختگی رکابی های FRP در اثر تمرکز تنش در گوشه های مقطع تیر، این گوشه ها باید به شعاع حداقل ۳۵ میلیمتر گرد شوند [۳].

۲-۶- تاریخچه مطالعات پیشین

مرور مطالعات و تحقیقات گذشته نشان می دهد که تحقیقات اولیه اغلب روی رفتار الاستیک تیرهای عمیق استوار بوده است. البته امروزه مطالعات الاستیک می تواند به آسانی با استفاده از تکنیک های اختلاف محدود^۱ و اجزاء محدود انجام شود. اما عیب مهم مطالعات الاستیک استفاده از فرض معمول حاکم بودن قانون هوک بر مواد ایزوتروپیک می باشد، به همین دلیل این مطالعات جهت اهداف طراحی کمک مناسبی به ما نمی کنند.

Ramana و همکاران [۹] بر روی "رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با CFRPC با درجات مختلف مقاوم سازی" مطالعه ای را انجام دادند. در این مطالعه به بررسی نتایج آزمایشگاهی و مطالعات تحلیلی تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح به روش چسباندن خارجی ورق های پرمقاومت و سبک CFRP در ناحیه کششی تیر پرداخته اند. در این آزمایش به بررسی ۴ نمونه تیر، ۳ نمونه تیر با مقادیر مختلف تقویت CFRPC با تغییر در عرض ورق ها و یک نمونه تیر بدون تقویت با CFRPC به روش بارگذاری ۴ نقطه ای در دهانه برش ۹۰۰mm مورد بررسی پرداخته شده است. در این مطالعه بیشترین افزایش در اولین ترک و لنگرهای نهایی در حدود ۱۵۰ تا ۲۳۰ درصد است. در این تحقیق افزایش سختی تیرهای تقویت شده قابل توجه بوده و در حدود ۱۱۰ درصد می باشد.

Mansur و همکاران [۱۰] روی "تقویت برشی تیرهای عمیق بتن آرمه با استفاده از روش های مطمئن FRP خارجی" مطالعاتی را انجام دادند که در این مطالعه ۶ تیر عمیق بتنی جهت آزمایش تا مرحله گسیختگی، ساخته و پرداخته شد. یکی از این تیرها با توجه به شرایط اولیه خود و بدون تقویت مورد آزمایش قرار گرفته شد تا به عنوان مرجع به کار گرفته شود. مابقی نمونه ها بعد از مقاوم سازی با پیچیدن ورق های CFRP بصورت نواری و رشته ای مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش ها نشان داده اند که استفاده از روش مطمئن FRP موجب کاهش رشد ترک های قطری بحرانی می شود و همچنین باعث بالا رفتن ظرفیت تحمل بار تیر می شود.

Obaidat و همکاران [۱۱] "بهسازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از ورق های کامپوزیت" را مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی به منظور بررسی رفتار سازه ای تیرهای

^۱ Finite Difference

بتن مسلح کاملاً آسیب دیده بهسازی شده توسط ورق های CFRP را در ناحیه برشی یا در ناحیه خمشی نشان می دهد. استفاده ورق های CFRP به روش چسباندن خارجی سبب افزایش حداکثر بار می شود. افزایش حداکثر بار نمونه های بهسازی شده در حدود ۲۳ درصد برای تقویت برشی و بین ۷-۳۳ درصد برای تقویت خمشی به دست آمده است، همچنین تقویت سبب تغییر مود شکست به شکست ترد می شود. از طرفی تقویت تیرها سبب کاهش عرض ترک در مقایسه با تیر کنترل می شود. نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که افزایش طول ورق های CFRP در ناحیه خمشی سبب افزایش کارایی ترمیم و افزایش مقاومت بتن می شود. نتایج این مطالعه نشان می دهد که مود شکست اصلی، جداسازی ورق CFRP از سطح بتن است که تاثیر تقویت را کاهش می دهد.

Pannirselvam و همکاران [۱۲] "مدل تقویت تیر بتن مسلح دارای تقویت FRP به روش خارجی" را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه تحقیقی رفتار سازه ای تیرهای بتن مسلح دارای تقویت های FRP به روش چسباندن خارجی را ارزیابی می نماید و در این مطالعه ۳ نسبت فولاد متفاوت با ۲ نوع GFRP مختلف و ۲ نوع ضخامت در هر نوع GFRP استفاده شده است و جمعاً ۱۵ نمونه تیر مستطیلی به طول ۳ متر برای این مطالعه ساخته شده است. ۳ نمونه تیر به عنوان تیر کنترل و مابقی نمونه ها با استفاده از ورق های GFRP تقویت شده اند. نتایج این مطالعه نشان می دهد که تیرهای تقویت شده با صفحات GFRP عملکرد بهتری را نشان می دهند. مقاومت خمشی و شکل پذیری با افزایش ضخامت ورق های GFRP به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. افزایش مقدار بارهای ترک اولیه برای ورق های Woven Roving GFRP به ضخامت ۳mm بیش از ۸۸/۸۹ درصد و برای ورق های WRGFRP به ضخامت ۵mm در حدود ۱۰۰ درصد است و افزایش شکل پذیری در تیرهای تقویت شده با ورق های WRGFRP به ضخامت ۵mm در حدود ۵۶/۰۱ درصد و ۶۴/۶۹ درصد است. تغییر شکل های ناشی از ایجاد اولین ترک ها در ناحیه کششی تیرها برای ورق های GFRP بسیار بالاتر است و بیشترین کاهش بار ترک اولیه برای ورق های به ضخامت ۳mm بیش از ۵۰/۵۹ درصد و برای ورق های به ضخامت ۵mm بیش از ۵۸/۵۹ درصد است. بارهای تسلیم به سبب چسباندن ورق های GFRP به طور قابل توجهی افزایش می یابد. افزایش سطح بدست آمده توسط ورق های WRGFRP بسیار بیشتر از ورق های Chopped Strand Mat GFRP می باشد. افزایش بار تسلیم برای ورق های CSMGFRP با ضخامت ۳mm بیش از ۴۰ درصد و برای CSMGFRP با ضخامت ۵mm بیش از ۱۲۸/۵۷ درصد، برای ورق های WRGFRP با ضخامت ۳mm بیش از ۱۰۳/۳۳ درصد و برای WRGFRP با ضخامت ۵mm بیش از ۲۰۰ درصد می باشد. مقادیر تغییر شکل تسلیم تیرهای تقویت شده با GFRP در مقایسه با تیرهای کنترل بسیار کمتر است به

طوری که میزان کاهش تغییرشکل تسلیم برای تیرهای تقویت شده با ورق های GFRP به ضخامت ۳mm بین ۷/۹۹ - ۲۸/۰۳ درصد و برای تیرهای تقویت شده با ورق های GFRP به ضخامت ۵mm از ۵/۱۹ درصد تا ۲۸/۵۴ درصد می باشد. میزان افزایش بار نهایی برای تیرهای تقویت شده با ورق های CSMGFRP به ضخامت ۳mm بین ۲۸/۵۷ - ۴۰ درصد و برای تیرهای تقویت شده با ورق های CSMGFRP به ضخامت ۵mm بین ۲۸/۵۷ - ۱۲۸/۵۷ درصد می باشد. در رابطه با بار نهایی، نتایج تقویت تیرها با استفاده از WRGFRP در مقایسه با CSMGFRP بسیار بهتر است. به طوری که میزان افزایش مقاومت نهایی برای تیرهای تقویت شده با ورق های WRGFRP به ضخامت ۳mm بین ۴۲/۸۶ - ۱۰۳/۳۳ درصد و برای تیرهای تقویت شده با ورق های WRGFRP به ضخامت ۵mm بین ۶۰ - ۲۰۰ درصد است.

جهانگیری و خالو [۲] در مورد "بررسی رفتار تیرهای عمیق بتنی مسلح دارای بازشو جان با استفاده از آنالیز اجزاء محدود" مطالعه ای را انجام دادند که در آن هدف بررسی و ارزیابی استفاده از روش آنالیز اجزاء محدود برای آنالیز تیرهای پیوسته بتن مسلح عمیق دارای بازشو در جان بود. نتایج آن نشان داده است که با افزایش اندازه بازشو مقاومت برشی تیرها کاهش می یابد. مقدار این کاهش برابر ۱۵ درصد برای بازشوهای مربعی و ۲۰ درصد برای بازشوهای دایروی می باشد. با تبدیل بازشوها به دایروی مقاومت نهایی تیرها بین ۲ تا ۱۳ درصد افزایش می یابد که بیشترین افزایش مقاومت برای تیرهای دارای بازشو بزرگ در دهانه برش داخلی است. بازشوهای دایروی دارای شکل پذیری بزرگتر از بازشو مربعی می باشند که در حدود ۲ تا ۱۶ درصد است.

Park و همکاران [۱۳] روی "روش فشار - کشش^۱ برای اعضای بتن آرمه عمیق تقویت شده با CFRP" کار کردند. روش STM برای تحلیل تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت شده با CFRP، هنگامی که ورق CFRP مانند یک تنش کششی اضافی عمل می کند، استفاده می شود. در این تحقیق با استفاده از روش STM، طراحی و تحلیلی کاربردی برای اعضای بتن آرمه عمیق تقویت شده با ورق های CFRP ارائه شده است. در مجموع نتایج آزمایش ۱۷ تیر عمیق آزمایشگاهی با نتایج روش STM مقایسه شد و دیده شد که روش STM بهترین تطابق را با نتایج آزمایش بدست می دهد.

El Maaddawy and Sherif [۱۴] مطالعه ای در رابطه با "استفاده از کامپوزیت های FRP در مقاوم سازی برشی تیرهای عمیق بتن آرمه دارای بازشو" انجام دادند. این مقاله نتایج یک کار تحقیقی روی ارزیابی پتانسیل استفاده از ورق های CFRP خارجی (سطحی) به عنوان یک راه حل مقاوم سازی جهت افزایش مقاومت تیرهای عمیق بتن آرمه دارای بازشو را نشان می دهد. در این مطالعه ۱۳

^۱ Strut-and-Tie Method

تیر عمیق دارای بازشو ساخته شد و تحت بارگذاری ۴ نقطه ای^۱ مورد آزمایش قرار گرفته شد. نمونه آزمایش دارای دو بازشوی دایره ای، هریک در ناحیه برشی، که به صورت متقارن در دو انتهای دهانه برشی تیر است، می باشد. پارامترها شامل اندازه بازشو، موقعیت و مقدار ورقه های CFRP می شود. پاسخ سازه ای تیرهای عمیق دارای بازشو عمدتاً به درجه انقطاع مسیر طبیعی بار بستگی دارد. استفاده از CFRP خارجی جهت تقویت برشی در اطراف بازشوها در جهت بالا بردن مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن آرمه بسیار مفید واقع شده است. افزایش مقاومت به سبب استفاده از ورق های CFRP، ۳۵ تا ۷۳ درصد است. در مقابل باتوجه به نتایج آزمایش، یک روش تحلیل برای پیش بینی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن آرمه ی شامل بازشوهای تقویت شده با ورق های CFRP مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفته شد.

Dash [۱۵] به بررسی "تقویت تیرهای بتن مسلح با استفاده از GFRP" پرداخت. در این تحقیق آزمایشگاهی به بررسی رفتار خمشی و برشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورق های GFRP پرداخته شده است. این آزمایش شامل ۲ گروه از تیرهای بتن مسلح، گروه یک، شامل ۳ نمونه تیر دارای ضعف در خمش و گروه دو، شامل ۳ نمونه تیر دارای ضعف در برش است. با توجه به نتایج آزمایش ها و مقادیر مقاومت محاسبه شده در گروه یک، ترک ها خمشی اولیه در تیر تقویت شده از زیر (تیر شماره ۲) در مقدار بارهای زیاد ظاهر می شود و ظرفیت نهایی تحمل بار در تیر دوم ۳۳ درصد بیشتر از تیر شاهد (تیر شماره یک) می باشد. مقدار بار در ترک اولیه با تقویت تیر از ناحیه زیر تیر مانند تقویت از دو طرف تیر روند رو به افزایشی دارد و ظرفیت نهایی تحمل بار تیر تقویت شده از دو طرف (تیر شماره ۳) ۴۳ درصد بیشتر از تیر شماره یک و ۷ درصد بیشتر از تیر شماره ۲ می باشد. در گروه ۲، تیر شاهد (تیر شماره یک)، همانطور که قبلاً ذکر شد به سبب ضعف در برش، دچار شکست برشی شد. پس از تقویت ناحیه برشی تیر (تیر شماره ۲)، با افزایش بار، ترک های اولیه در ناحیه خمشی تیر پدید آمدند و ترک ها به سمت تار خنثی حرکت و رشد کردند. در نهایت همانطور که پیش بینی می شد شکست نهایی، شکست خمشی بود که نشان می دهد ورق های GFRP سبب افزایش مقاومت برشی تیر می شوند و ظرفیت نهایی تحمل بار تیر را ۳۱ درصد بیشتر از تیر شاهد است. اما وقتی که تیر به روش دورپیچ U در ناحیه برشی (تیر شماره ۳) تقویت شود، ظرفیت نهایی تحمل بار تیر در مقایسه با تیر شماره یک ۴۸ درصد و در مقایسه با تیر شماره دو ۱۳ درصد افزایش می یابد.

^۱ Four-point

پناهی و عربزاده [۴] بر روی " پارامترهای موثر بر تقویت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح با استفاده از ورق های FRP" مطالعه ای را انجام دادند. در این تحقیق، تاثیر تعداد لایه ها و چگونگی آرایش ورق CFRP، بر ظرفیت بار نهایی و تغییر مکان وسط دهانه نسبت به بار اعمالی تیرهای عمیق بتن مسلح که به صورت خارجی با ورق های CFRP تقویت شده بودند، مورد بررسی تحلیلی قرار گرفت. برای این منظور ۱۴ نمونه شامل دو نمونه ی کنترلی و ۱۲ نمونه تقویت شده، در نرم افزار تحلیل غیرخطی شدند. نتایج حاصل شده نشان داده است که استفاده از ورق های CFRP با تعداد لایه ها و آرایش های مختلف سبب افزایش بار نهایی تا میزان ۱۲۵ درصد در برخی از نمونه ها شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از این تحقیق پوشش تیر عمیق در ناحیه دهانه برشی به صورت دورپیچ، بیشترین افزایش را در ظرفیت بار نهایی داشته است. تقویت به صورت عمود بر جهت ترک ها به صورت نواری نسبت به تقویت به صورت عمود بر جهت ترک ها به صورت صفحه ای به میزان ۱۹ درصد افزایش ظرفیت باربری از خود نشان داده است.

Mohammadhassani و همکاران [۱۶] راجع به "مود های شکست و قابلیت سرویس تیرهای عمیق بتنی پر مقاومت خود متراکم شونده" مطالعه ای را انجام دادند. هدف اصلی از این مطالعه ساده کردن تشخیص و پیش بینی شکست تیر عمیق با توجه به میزان تغییرات درصد میلگردهای کششی و تقویت جان بود. ۶ تیر عمیق بتنی پرمقاومت خود متراکم شونده^۱ تا مرحله ی گسیختگی و شکست تحت آزمایش قرار داده شدند. تنش روی سطح بتن در ناحیه وسط دهانه، میلگرد کششی و ناحیه فشاری بتن اندازه گیری شد. بار به صورت افزایشی اعمال شد و در هر افزایش بار ترک های جدید، عرض ترک ها و مسیر انتشار آنها مشاهده شد. نتایج به طور واضح نشان داد که، در شرایط محدود نهایی، توزیع تنش روی سطح بتن در وسط دهانه زیاد سهمی وار نیست. در تیرهای عمیق قبل از رسیدن به نقطه گسیختگی نهایی تارهای خنثی متعددی بدست آمده بود. به دلیل افزایش بار، تعداد تارهای خنثی کاهش و در بار نقطه گسیختگی تنها یک تار خنثی^۲ وجود خواهد داشت. اگر میلگردهای تقویت کششی طولی^۳ کمتر از مقداری که آیین نامه ی ACI توصیه کرده باشد، گسیختگی تیرهای عمیق بصورت خمشی است. به دلیل افزایش میلگرد کششی، گسیختگی به شکل خرد شدن بتن در نواحی گره ای به وضوح قابل مشاهده است. اولین ترک خمشی در وسط دهانه همیشه عمودی است که معمولاً در ۲۵ تا ۴۲ درصد حداکثر بار رخ می دهد. طول ترک در حدود

^۱ High Strength Self-Compacting Concrete

^۲ Neutral Axis

^۳ Longitudinal Tensile Steel Reinforcement

۰/۲۴ تا ۰/۶ برابر ارتفاع مقطع است. افزایش درصد میلگرد کششی همان طور که سبب افزایش تعداد ترک ها می شود، موجب کاهش طول ترک ها و عرض آن ها می شود.

Shafiq و همکاران [۱۷] بر روی "تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح دارای بازشو با ورق های CFRP" بررسی را انجام دادند. این تحقیق تقویت تیرهای بتن مسلح با بازشوی مربع در ناحیه خمشی را توسط ورق های CFRP را بررسی می نماید. تمامی ۵ نمونه تا حد شکست تحت بارگذاری ۴ نقطه ای آزمایش شده بودند تا رفتار سازه ای مانند: مسیر ترک ها، حالت شکست، بار نهایی و نمودار بار- تغییر مکان را بررسی نمایند. نتایج آزمایش نشان داد که بازشو بزرگ در خمش ظرفیت و سختی تیر را کاهش می دهد؛ و تغییر شکل و بروز ترک را افزایش می دهد. وضعیت تقویت هر تیر تقویت نشده براساس مسیر ترک احتمالی طراحی شده بود. وجود بازشو مربعی بزرگ در تیر بتن مسلح، سختی و مقاومت تیر به ترتیب ۱۹ درصد و ۴۸ درصد کاهش می یابد. همچنین در حالت های تغییرشکل، وجود بازشوی دایره ای در ناحیه خمشی تغییر شکل تیر را در مقایسه با تیر ساده بیشتر از ۳۰ درصد افزایش می دهد. وجود ورق های CFRP در اطراف بازشوهای بزرگ در ناحیه خمشی موجب کاهش قابل توجه ترک های تشکیل شده در اطراف بازشو می شود و همچنین موجب کاهش تغییرشکل تیر در حدود ۶۱ درصد در نوع بازشوی مربعی می شود.

Alsaegh [۱۸] بر روی "تاثیر شکل و محل بازشو بر روی مقاومت سازه ای تیرهای عمیق بتن مسلح با بازشو" تحقیقی را انجام داد. در این تحقیق اثرات شکل و محل بازشو بر روی رفتار سازه ای تیرهای عمیق بتن مسلح با بازشو، با ثابت نگه داشتن اندازه بازشو مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی از نرم افزار اجزاء محدود جهت انجام تحلیل اجزاء محدود غیرخطی استفاده شد. مقاومت نهایی بدست آمده از نرم افزار اجزاء محدود تیر عمیق بتن مسلح با بازشو در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کمتر از ۲۰ درصد اختلاف را نشان داد. این بررسی نشان داد که محل بازشو نسبت به شکل بازشو تاثیر بیشتری بر مقاومت سازه ای دارد، به طوری که قرارگیری بازشوها نزدیک گوشه های بالایی تیر عمیق می تواند مقاومت را دو برابر نماید. همچنین بازشو مستطیلی باریک (با جهت طول در راستای افقی) در مقایسه با بازشو مستطیلی بزرگ مقاومت سازه ای تیر عمیق را ۴۰ درصد کمتر کاهش می دهد.

Sayed و همکاران [۱۹] بر روی "مدل سازی ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با صفحات FRP بر پایه شبیه سازی اجزاء محدود" انجام دادند. در این مقاله، تحلیل اجزاء محدود سه بعدی به منظور مطالعه تاثیر متغیرهای جدید بر روی ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورق های FRP انجام دادند. در این مطالعه ۵۵ نمونه با در نظر گرفتن اثر عرض تیر، مقاومت

بتن، نسبت دهانه به عمق برش، ضخامت FRP و روش تقویت (دورپیچ کامل، دورپیچ U و چسباندن طرفین) مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که متغیرهای موجود در تحلیل موجب کرنش ثانویه در بالا و پایین تیرها می شود. همچنین نتایج نشان دادند که مدل پیشنهادی می تواند ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورق های FRP را با دقت بالاتری به ترتیب برای چسباندن طرفین ۱۸/۹ درصد، دورپیچ U ۱۷ درصد و دورپیچ کامل ۱۸/۳ درصد نسبت به مدل های موجود محاسبه کند. Jayajothi و همکاران [۲۰] در مورد موضوع "تحلیل اجزاء محدود تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP با استفاده از ANSYS" مطالعه ای را انجام دادند. در این مطالعه از تحلیل اجزاء محدود غیرخطی برای شبیه سازی رفتار حالت های شکست تیرهای بتن مسلح تقویت شده در ناحیه برشی و خمشی با استفاده از ورق های FRP استفاده شده است. در این مطالعه ۴ نوع تیر در نرم افزار ANSYS مدل سازی شده است، ۲ نمونه تیر به عنوان تیر شاهد فاقد FRP و ۲ نمونه تیر توسط ورق های CFRP، اولین تیر بتن مسلح به صورت ورق ساده در ناحیه کششی تیر بتن مسلح و دومین تیر بتن مسلح به صورت دور پیچ U تقویت شده اند. در این مطالعه روابط بار- تغییرشکل تا لحظه ی شکست و مسیرهای ترک به حاصل با نتایج آزمایشگاهی موجود در مقالات مقایسه شده است. نمودارهای بار- تغییرشکل به دست آمده از مطالعات عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط Jeyasehar و همکاران [۲۱] و Ibrahim و همکاران [۲۲] داشته است. به طوری که اگر ورق های CFRP به درستی در ناحیه کششی تیرهای بتن مسلح نصب شوند، مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در این مطالعه اولین نمونه تیر تقویت شده بین ۱۸ تا ۲۰ درصد افزایش مقاومت خمشی را برای تقویت تک لایه نشان می دهد. ظرفیت تحمل بار دومین نمونه تیر بتن مسلحی که با استفاده از یک لایه CFRP دورپیچ U تقویت شده بیشتر از دومین تیر شاهد است. دومین تیر بتن مسلح تقویت شده با ورق های CFRP بین ۷۶ تا ۸۲ درصد افزایش مقاومت خمشی را برای تقویت تک لایه نشان داده است. در این مطالعه نشان داده شده است که حل عددی جهت محاسبه و تخمین مقاومت تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورق های FRP در مقایسه با محاسبات آزمایشگاهی بسیار ساده، ارزان و سریع است. همچنین حالت های کلی مدل های اجزاء محدود تطابق خوبی را با مشاهدات و اطلاعات بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهد.

Kachlakev [۲۳] مطالعه ای روی "تحلیل اجزاء محدود و تایید مدل تیرهای بتن مسلح دارای ضعف برشی تقویت شده با ورق های GFRP" انجام داد. در این مطالعه وی به بررسی و مقایسه ۲ نمونه تیر بتن مسلح، یک نمونه تیر بتن مسلح فاقد میلگرد برشی و یک نمونه تیر بتن مسلح تقویت

شده با ورق های GFRP در دو طرف تیر پرداخته است. در این مطالعه معلوم شده است که حالات کلی مدل های اجزاء محدود تطابق خوبی با مشاهدات و اطلاعات بدست آمده از نمونه های آزمایشگاهی دارد. اضافه نمودن تقویت GFRP به تیر کنترل، رفتار واقعی تیر و مدل را از شکست برشی اتفاقی نزدیک دو انتهای تیر به شکست خمشی ناشی از تسلیم میلگرد در وسط دهانه تغییر می دهد. تقویت برشی، ظرفیت تحمل بار را برای تیر آزمایشگاهی به اندازه ۴۵ درصد و برای مدل اجزاء محدود به اندازه ۱۵ درصد افزایش می دهد.

با توجه به مطالعات و بررسی های صورت گرفته در محدوده تیرهای عمیق بتن مسلح، تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو، تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP، و تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو تقویت شده با FRP، مشاهده می شود که تعداد زیادی از مقالات و پایان نامه های موجود در این زمینه ها به صورت آزمایشگاهی بوده است و مطالعات تحقیقی و عددی در رابطه با این موضوعات بسیار محدود است. و نیز این نکته قابل توجه است که در بیشتر مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته، تنها به یک موضوع تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP و تیرهای عمیق بتن مسلح و تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت شده با FRP و نیز در برخی موارد چند موضوع تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو، تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو تقویت شده با FRP مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در برخی مطالعات، نتایج بدست آمده از روش استفاده شده دقیق نبوده و نیاز به اصلاح دارد. از طرفی، با توجه به آزمایشگاهی بودن بسیاری از مطالعات صورت گرفته در زمینه های یاد شده، اگرچه که تا حد زیادی منطبق بر واقعیات است، اما بسیار وقت گیر و پرهزینه می باشند. از این رو، استفاده از روش آنالیز اجزاء محدود برای مطالعه ی اعضای سازه ای، بسیار با صرفه تر، دقیق تر و سریع تر است.

فصل سوم مدل سازی

۳-۱- مقدمه

با بسط و توسعه شیمی آلی در سال ۱۸۴۷، برزیلوس شیمیدان سوئدی اولین رزین ها را تهیه نمود و در سال ۱۹۰۹ توسط کبالت، رزینی دیگر ساخته شد. در سال ۱۹۳۰ دانشمندان به فکر استفاده از مواد تقویت کننده افتاده و مفهوم جدید مواد مرکب را پایه گذاری کردند. در سال ۱۹۴۲ پلی استر تقویت شده با الیاف شیشه، ۱۹۴۶ مواد مرکب اپوکسی، ۱۹۶۲ پلاستیک های تقویت شده با الیاف کربن و شیشه و در سال ۱۹۷۵ مواد مرکبی از الیاف آرامید گرافیک ساخته شد. در حال حاضر نیز علاوه بر پیشرفت های جدید و ساخت مواد مرکب متنوع، این مواد کاربردهای وسیعی در صنعت پیدا نموده و تدریجا جایگزین مواد قدیمی شده اند.

در سال های اخیر استفاده از پوشش های الیاف تقویتی پلیمری (FRP) در کارهای مقاوم سازی سازه های موجود بسیار مورد توجه محققان و مهندسان قرار گرفته است و مطالعات علمی بر روی این موضوع انجام شده و می شود. روش های سنتی تقویت اعضای بتنی به دلیل مشکل بودن اجراء، زیاد شدن وزن و سختی سازه، زمانبر بودن و متوقف شدن کاربری سازه مناسب نیستند. از آنجایی که الیاف تقویتی پلیمری تا نقطه گسیختگی رفتار کاملاً الاستیک خطی دارند و از طرفی مقاومت نهایی و کرنش حد الاستیک آنها نسبت به فولاد بسیار بیشتر است، از آنها برای مقاوم سازی اجزای سازه های بتنی استفاده می شود. تحقیقات انجام شده نشان می دهد در منحنی تنش کرنش بتن پس از آنکه عضو به حداکثر تنش می رسد مقاومت کاهش پیدا می کند، اما اگر از FRP استفاده شود شیب قسمت دوم منحنی نیز مثبت می گردد و با افزایش مقدار الیاف پلیمری مقاومت هم بیشتر می شود. مواد کامپوزیت پلیمری ترکیبی از دو ماده الیاف و رزین می باشند که در آنها الیاف عامل ایجاد مقاومت و رزین عامل ایجاد پیوستگی و یکپارچگی الیاف و همچنین عامل توزیع و انتقال یکنواخت بار به الیاف می باشند. رزین برای محافظت از الیاف و اتصال آنها به سطح انتقال نیرو از سازه به الیاف، استفاده می شود.

۳-۲- مدل سازی تیر بتنی

۳-۲-۱- مدل سازی آسیب

در نرم افزار آباکوس برای در نظر گرفتن خرابی مصالح سه نوع ترک خوردگی قابل مدل سازی است که باید در بخش خواص مصالح تعریف شود:

- مدل ترک خوردگی موضعی بتن^۱

- مدل ترک خوردگی ترد بتن^۲

- مدل خرابی پلاستیک بتن^۳

نرم افزار در مدل خرابی پلاستیک دو فرض اصلی در مکانیزم گسیختگی در نظر می گیرد؛ ترک خوردگی کششی و خردشدگی و در مدل استاندارد و در مدل صریح، هر دو امکان مدل سازی آسیب و خرابی تدریجی را در لایه های چسبنده فراهم می آورند که این واکنش برحسب کشش جدایی تعریف می گردد. در تحلیل نوع صریح امکان مدل سازی آسیب و تخریب تدریجی برای عناصر چسبنده با مواد معمولی و متعارف فراهم شده است. آسیب واکنش کشش جدایی در چارچوب عمومی مشابهی که برای مواد متعارف و معمولی نیز بکار می روند، تعریف می گردد. این چارچوب عمومی امکان ترکیب مکانیسم های متعدد آسیب که همزمان بر روی یک ماده عمل می کنند را فراهم می آورد. هر مکانیسم تخریب، از ۳ بخش تشکیل می گردد: معیار خسارت اولیه، قانون افزایش خسارت (رشد آسیب) و تفکیک (حذف) عناصر در صورت آسیب کامل. در حالی که این چارچوب کلی برای واکنش کشش جدایی و مواد متعارف نیز مشابه است، بسیاری از جزئیات در رابطه با چگونگی تعریف مواد مختلف متفاوت می باشند. جزئیات مدل سازی خسارت در واکنش کشش جدایی در زیر ارائه شده اند. واکنش اولیه عنصر چسبنده همانطور که در بالا شرح داده شده خطی می باشد. به هر حال، هنگامی که معیار خسارت اولیه مشاهده گردد، آسیب دیدگی مواد مطابق با قانون تکامل آسیب (خسارت) که برای کاربر تعریف شده است، به وقوع می پیوندد. شکل ۳-۱ یک نمونه از واکنش کشش جدایی، با مکانیسم شکست^۴ را نشان می دهد. اگر معیار خسارت اولیه بدون در نظر گرفتن مدل تکامل خسارت مرتبط با آن تعیین گردد، نرم افزار معیار خسارت اولیه را تنها برای

^۱ Smeared Crack Concrete Model

^۲ Brittle Crack Concrete Model

^۳ Concrete Damage Plasticity Model

^۴ Failure Mechanism

اهداف خروجی ارزیابی می کند و هیچ تاثیر بر واکنش ماده چسبنده نخواهد داشت (به بیان دیگر هیچ آسیبی رخ نمی دهد) [۵].



شکل ۳-۱: واکنش کششی-جدایی [۵]

۳-۳- آسیب اولیه

همان طور که از نامش پیداست، آسیب اولیه به افت اولیه پاسخ مواد اشاره می کند. فرایند تخریب هنگامی آغاز می شود که فشارها یا تنش های موجود بتوانند برخی از معیارهای تعیین شده برای آسیب اولیه را برآورده سازند. برخی از معیارهای آسیب اولیه در زیر شرح داده شده اند. هر کدام از این معیارهای آسیب اولیه یک متغیر خروجی دارند که نشان می دهند آن معیار رعایت شده است. مقدار ۱ یا بیشتر نشان می دهد که معیار آسیب اولیه لحاظ شده است. معیارهای آسیب اولیه که قانون تکمیل آسیب مرتبط با خود را ندارند، تنها می توانند بر روی خروجی تاثیر بگذارند. در نتیجه می توان از این معیارها برای ارزیابی گرایش مواد به آسیب دیدن بدون مدل سازی فرایند آسیب استفاده نمود.

در بحث زیر t_n^0 و t_s^0 و t_t^0 حد نهایی فشارهای ظاهری را در زمانی که تغییر شکل عمود بر سطح میانی است و یا در امتداد برش اول یا دوم قرار دارد نشان می دهد و به همین ترتیب ε_n^0 و ε_s^0 و ε_t^0 نیز حد نهایی کرنش ظاهری، هنگامی که تغییر شکل عمود بر سطح میانی است و یا در امتداد برش اول یا دوم قرار دارد را نشان می دهد. هنگامی که ضخامت ترکیبی اولیه $T_0=1$ باشد، مؤلفه های کششی ظاهری برابر با مؤلفه های مرتبط در جالجائی نسبی δ_n و δ_s و δ_t بین قسمت های فوقانی و تحتانی لایه چسبنده می باشند. علائم $< >$ که در بحث زیر مورد استفاده قرار گرفته است، کروشه ماکالی (Macaulay Bracket) را با مفهوم معمولی خود نشان می دهند. کروشه ماکالی نشان می دهد که تغییر شکل یا تنش فشاری خالص منجر به شروع آسیب نمی گردد [۲۴].

۳-۴- معیار حداکثر تنش اسمی

این گونه فرض می شود که هنگامی نرخ تنش اسمی به ۱ برسد، آسیب شروع می شود این معیار بدین شکل نشان داده می شود [۲۴]:

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (1-3)$$

۳-۵- معیار حداکثر کرنش اسمی

این گونه فرض می شود که هنگامی نرخ کرنش اسمی به ۱ برسد، آسیب شروع می شود این معیار بدین شکل نشان داده می شود [۲۴]:

$$\max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0}, \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right\} \quad (2-3)$$

۳-۶- ضابطه تنش اسمی درجه دوم

این گونه فرض می شود که آسیب زمانی آغاز می شود که یک تابع برهم کنش درجه دوم وابسته به نرخ تنش اسمی به عدد یک برسد. این ضابطه مانند زیر نشان داده می شود [۲۴]:

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0} \right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0} \right)^2 = 1 \quad (3-3)$$

۳-۷- ضابطه کرنش اسمی درجه دوم

این گونه فرض می شود که آسیب زمانی آغاز می شود که یک عملکرد برهم کنش درجه دوم وابسته به نسبت کششی اسمی به عدد یک برسد. این ضابطه مانند زیر نشان داده می شود [۲۴]:

$$\left(\frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right)^2 = 1 \quad (4-3)$$

۳-۸- رشد آسیب

قانون رشد آسیب بیانگر نرخ افت میزان سختی مواد است. چارچوب کلی بیانگر تغییر تدریجی آسیب در مواد حجم است.

متغیر اسکالر آسیب، D نشانگر آسیب کلی در مواد است و مجموع اثرات تمام مکانیسم های فعال را در بر می گیرد. این متغیر در ابتدا مقدار صفر دارد. اگر سیر تکاملی آسیب مدل سازی شود، پس از

آسیب اولیه، متغیر D از صفر تا یک متغیر خواهد بود. اجرای تنش مدل کشش-جدایی بر طبق فرمول زیر تحت تاثیر قرار می گیرند:

$$t_n = \begin{cases} (1-D)t_n & , t_n \geq 0 \\ \bar{t}_n & , \text{ (در غیر اینصورت (بدون آسیب در سختی فشاری))} \end{cases} \quad (5-3)$$

$$t_s = (1-D)\bar{t}_s \quad (6-3)$$

$$t_t = (1-D)\bar{t}_t \quad (7-3)$$

جائی که $\bar{t}_t$ ، $\bar{t}_s$ و $\bar{t}_n$ اجزای تنش باشند [۲۴].

به منظور توضیح رشد آسیب در ترکیب تغییر شکل نرمال و برش در سراسر سطوح میانی، بسیار مفید خواهد بود که یک تغییر مکان مؤثر مانند زیر معرفی شود [۲۴]:

$$\delta_m = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2} \quad (8-4)$$

۳-۹- بررسی مدل رفتار اصطکاکی (Contact)

وقتی سطوح با هم در تماس می باشند، معمولاً برش را همانند نیروهای عادی در بین سطوح خود انتقال می دهند. میان این دو جزء بصورت کلی ارتباط وجود دارد. این ارتباط که با نام اصطکاک میان اجسام در حال تماس شناخته شده می باشد، معمولاً به عنوان تنش های موجود در سطح از آن ها یاد می شود [۲۴].

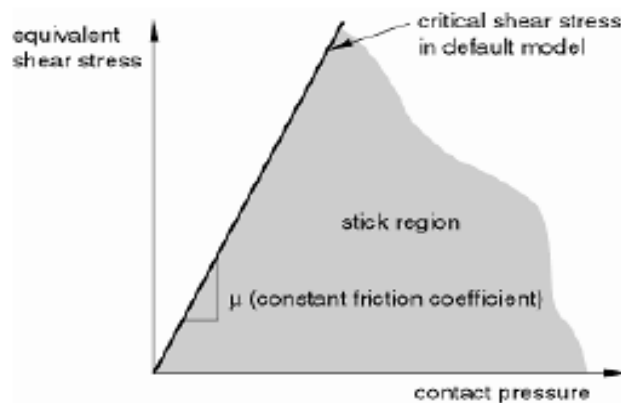
۳-۱۰- استفاده از مدل اصطکاکی اولیه (Coulomb)

مفهوم اصلی مدل اصطکاکی Coulomb حداکثر اصطکاک مجاز (برش) عرضی می باشد تا فشار تماس بین بدنه های تماس برقرار نماید. در شکل اولیه مدل اصطکاکی Coulomb دو سطح تماس می توانند فشار برشی را تا دامنه اصلی سطوح حتی پیش از شروع لغزش منتقل کنند. در مدل اصطکاکی Coulomb تنش برشی بحرانی، τ_{crit} چنان تعریف می شود که در آن لغزش سطوح با شکستن بخشی از فشار تماسی میان سطوح $\tau_{crit} = \mu p$ شروع می شود. محاسبات لغزش / چسبناکی تعیین کننده زمان انتقال یک قسمت از، چسبناک به لغزش یا از لغزش به چسبناک می باشد. μ همان تابع اصطکاک است. مساحت ناحیه مقطع پیش فرض در تحلیل نوع استاندارد برابر ۱ می باشد [۲۴].

مدل اصطکاکی اولیه μ را در همه جهات (اصطکاک ایزوتروپیک) به یک میزان در نظر می گیرد. در همانند سازی سه بعدی دو جزء قائم فشار وجود دارد τ_1 و τ_2 . این اجزا در جهات لغزش و برای سطوح تماس با عناصر تماس عمل می کنند.

نرم افزار دو جزء فشار برشی را ترکیب و به یک (فشار برش برابر) تبدیل می کند. $\bar{\tau}$ برای محاسبه لغزش/چسبندگی. جایی که $\bar{\tau} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}$ می باشد. علاوه بر آن نرم افزار دو جزء سرعت لغزش را نیز به یک نرخ لغزش برابر $\dot{\gamma}_{eq} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2}$ تبدیل می کند. شکل ۳-۲ محاسبات لغزش/چسبندگی برای فضای فشار برش تماس را همراه با نقطه انتقال از پیوستگی به لغزندگی یک سطح تعریف می کند.

در مدل پیش فرض، اصطکاک به عنوان تابع نرخ لغزش برابر و فشار تماسی معرفی می شود. همچنین می توان مستقیماً اصطکاک جنبشی و ایستایی را تعیین نمود [۲۴].



شکل ۳-۲: نواحی لغزشی برای مدل اصطکاک اولیه Coulomb [۲۴]

۳-۱۱- استفاده از مدل پیش فرض

در مدل پیش فرض کارایی اصطکاک مستقیماً بصورت زیر تعیین می شود:

$$\mu = \mu(\dot{\gamma}_{eq}, p, \bar{\theta}, \bar{f}^{\alpha}) \quad (9-3)$$

که در این رابطه $\dot{\gamma}_{eq}$ نرخ لغزش معادل، p فشار تماسی و $\bar{\theta} = \frac{1}{2}(\theta_A + \theta_B)$ دمای متوسط در نقطه تماس و $\bar{f}^{\alpha} = \frac{1}{2}(f_A^{\alpha} + f_B^{\alpha})$ متغیر متوسط از پیش تعیین شده در نقطه تماس θ_A ، θ_B ، f_A^{α} و f_B^{α} هستند و متغیرهای از پیش تعیین شده در نقاط A و B در روی سطح می باشند.

تابع اصطکاک می تواند به عواملی همچون نرخ لغزش فشاری تماسی، دما و متغیرهای میدانی وابسته باشند. بطور پیش فرض، فرض بر این است که کارایی های اصطکاک به متغیرهای میدانی وابسته نیست.

کارایی اصطکاک می تواند با هر گونه ارزش غیر منفی هماهنگ باشد. کارایی اصطکاک صفر به این معنی است که هیچ نیروی برشی گسترش نخواهد یافت و سطوح تماس برای لغزش آزاد می شوند [۲۴].

۳-۱۲- تعیین تابع اصطکاک جنبشی و ایستائی

داده های تجربی نشان می دهند که تابع اصطکاک که با شروع لغزش مخالفت می کند از شرایط چسبندگی یا تابع اصطکاک که با لغزش مخالفت می کند متفاوت است. عامل اول معمولاً با نام تابع اصطکاک ایستا و عامل بعدی با نام تابع اصطکاک جنبشی شناخته می شوند. به طور معمول تابع اصطکاک ایستا بیشتر از جنبشی است. انتقال از اصطکاک ایستا به جنبشی با مقدار داده شده به نرخ های لغزش متوسط تشریح می شود. در این مدل توابع اصطکاک جنبشی و ایستا می توانند توابعی از فشار تماسی، دما و متغیرهای میدانی باشد.

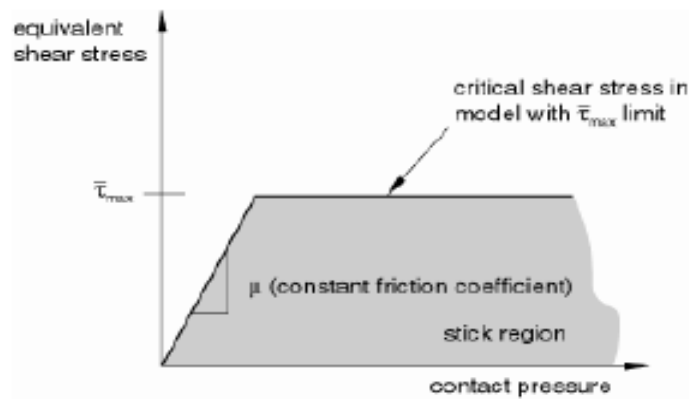
نرم افزار همچنین مدلی را برای تعیین مستقیم تابع اصطکاک جنبشی و ایستائی فراهم می آورد. در این مدل فرض بر این است که نزول تابع اصطکاک بصورت نمائی از ارزش ایستا به جنبشی طبق فرمول زیر می باشد.

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k)e^{-d_c \dot{\gamma}_{eq}} \quad (۴-۱)$$

که از آن μ_k تابع اصطکاک جنبشی μ_s اصطکاک ایستا، d_c تابع نزولی تعریف شده توسط کاربر و $\dot{\gamma}_{eq}$ نرخ لغزش است. این مدل می تواند فقط با اصطکاک ایزوتروپیک به کار گرفته شود و به فشار تماس، دما و متغیرهای میدانی وابسته نمی باشد [۲۴].

۳-۱۲-۱- استفاده از محدودیت تنش برشی انتخابی

می توان یک محدودیت تنش برشی معادل انتخابی تعیین شود، $\bar{T}_{max}$ ، بنابراین صرفنظر از دامنه فشار تماسی، لغزش در صورتی اتفاق خواهد افتاد که دامنه فشار هم ارز به مقدار که در شکل ۳-۳ مشخص است برسد.



شکل ۳-۳: نواحی لغزش برای مدل اصطکاک به همراه حد فشار [۲۴]

این حد تنش برشی معمولاً در مواردی مطرح می شوند که فشار تماسی بسیار زیاد می شود [۲۴].

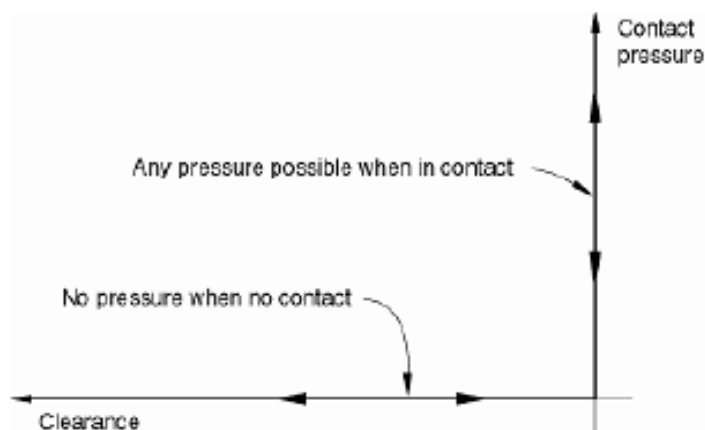
۳-۱۲-۲- رابطه های فشار-تماس بسیار نزدیک

در نرم افزار رابطه های فشار از طریق تماس بسیار نزدیک می تواند بعنوان یک مدل تماس مورد استفاده قرار گیرد [۱۴].

۳-۱۲-۳- استفاده از رابطه تماس سخت

در نرم افزار رابطه های فشار از طریق تماس بسیار نزدیک می تواند به عنوان یک مدل تماسی مورد استفاده قرار گیرد [۲۴].

رایج ترین ارتباط فشار-تماسی در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است. با این وجود بسته به روش اجرای به کار گرفته شده. شرایط نقوذی صفر ممکن است بصورت یکباره به وجود بیاید. وقتی سطوح با هم تماس می یابند. هر گونه فشار سطح می تواند میان آن ها انتقال پیدا کند، اگر فشار تماس تا صفر کاهش یابد، سطوح از یکدیگر جدا می شوند. سطوح جدا شده از یکدیگر، در زمانی که فضای خالی میان آن ها تا صفر کاهش می یابد، مجدداً با یکدیگر تماس پیدا می کنند [۲۴].



شکل ۳-۴: رابطه بین فشار- تماس عمودی [۲۴]

۳-۱۲-۴- استفاده از ارتباط تماسی «سخت» اصلاح شده در تحلیل استاندارد

در تحلیل استاندارد می توان یک ارتباط فشار-تماسی اصلاح شده را بر پایه گام به گام تعیین نمود. همچنین می توان، ارتباط تماسی سخت که بطور پیش فرض موجود است را برای رسیدن به نقاط «n» بر روی سطح تا حد Overclose با یک فاصله معین h_{max} و پیش از انتقال فشار تماس تعیین نمود. اگر Overclosure بیشتر از h_{max} شود، شرایط تماس از حال «باز» به حالت «بسته» تغییر یافته، برآمدگی پیرو نیز به سطح اصلی بازگشته و تماس «سخت» بوجود می آید. همچنین می توان «ارتباط پیش فرض» را تعیین و اصلاح نمود تا به سطح اجازه داده شود که فشار تماسی «کشش» را تا یک مقدار خاص P_{max} و بیش از جدا شدن آن ها انتقال دهد [۲۴].

۳-۱۲-۵- بررسی مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن (CDP)

معیار گسیختگی در محدوده پلاستیک ماده تحت تنش های ترکیبی بیان می شود. این معیار به دو دسته عمده براساس پاسخگویی ماده به فشار هیدرواستاتیک تقسیم بندی می شود. در اکثر مواد، رفتار شکل پذیر با نام وابسته به فشار هیدرواستاتیک شناخته می شوند و مواد غیر فلزی مانند خاک، سنگ ها و بتن از این دسته بوده و وابسته به فشار هستند.

حالت پلاستیسیته میزان آسیب به بتن یکی از مدل های ترکیبی می باشد که توسط کاجانوف (Kachanov) ارائه شد و تکمیل بیشتر آن توسط رایوتنوف (Rabotnov) و سایرین انجام گرفت، معادله ترکیبی مواد توسط کمیت اسکالر ایزوتروپیک میزان آسیب شکل زیر را می دهد [۲۴]:

$$\sigma = (1 - d) D_o^{sl} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = D_o^{sl} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (۱۱-۳)$$

در این فرمول σ عامل تنش کاچی (Cauchy) می باشد، d سنجش گر میزان افت سختی متغیر می باشد، به همین ترتیب، ε تانسور کرنش، D^{el} سختی الاستیک اولیه (آسیب نرسیده) مواد می باشد، در حالیکه $D_o^{el} = (1 - d)D^{el}$ بعنوان تانسور میزان سختی الاستیک افت کرده می باشد. تانسور تنش مؤثر بشرح زیر تعریف شده است:

$$\bar{\sigma} = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (12-3)$$

در این فرمول ε^{pl} کرنش پلاستیک می باشد. در فرمول بندی لازم است که تغییرات میزان افت مد نظر قرار گیرد.

$$d = d(\bar{\sigma}, \varepsilon^{pl}) \quad (13-3)$$

یک سری از تانسورهای تنش $\bar{\sigma}$ و سخت شدگی (نرم شدگی) متغیرها ε^{pl} در مدل CDP حاکم می شود، میزان افت سختی در ابتدا ایزوتروپیک می باشد و بعنوان متغیر افت d_c در منطقه فشار و متغیر d_t در منطقه کشش تعریف گردیده است. بنابراین در نهایت تانسور تنش کاچی وابسته به تانسور تنش مؤثر $\bar{\sigma}$ از بین پارامتراسکالر افت $(1-d)$ می باشد:

$$\sigma = (1 - d)\bar{\sigma} \quad (14-3)$$

وضعیت آسیب در حالت کشش و فشار بطور مستقل به دو نوع متغیرهای سختی تقسیم بندی می شوند، ε_c^{pl} و ε_t^{pl} ، که به ترتیب به معادل کرنش پلاستیک در حالت کشش و فشار عطف می شود. تکامل متغیرهای سخت شدگی توسط عبارت داده شده زیر می باشد:

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_c^{pl} \\ \dot{\varepsilon}_t^{pl} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad \dot{\varepsilon}^{pl} = h(\bar{\sigma}, \varepsilon^{pl}) \cdot \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (15-3)$$

ترک خوردگی (کشش) و خرد شدگی (فشار) نشان داده شده در بتن با افزایش مقادیر سخت کننده ها (نرم کننده ها) متغیر می باشد. این متغیرها میزان رشد حاصله در سطح جاری شدگی و افت های ایجاد شده در میزان سختی الاستیکی را کنترل می نماید. تابع جاری شدگی فاصله یک سطح در حالت تنش را با وضعیت شکست یا میزان آسیب مشخص می نماید:

$$F(\bar{\sigma}, \varepsilon^{pl}) \leq 0 \quad (16-3)$$

جریان پلاستیک بوسیله تابع پتانسیل جریان $G(\bar{\sigma})$ براساس فرمول زیر کنترل می شود:

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = \dot{\lambda} \frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}} \quad (17-3)$$

تابع پتانسیل پلاستیک G نیز در فاصله تنش مؤثر تعریف گردیده است.

۳-۱۳- صحت سنجی مدل

برای تایید درستی مدل نرم افزار، یک مدل آزمایشگاهی مورد بررسی و مدل سازی قرار گرفت. در زیر به شرح مدل تایید شده می پردازیم. مدل سازی تیر بتنی با نرم افزار آباکوس نسخه 6.10 انجام شده است.

مدل آزمایشگاهی که برای تایید مدل سازی استفاده شده است، محمد پناهی و همکاران بر روی مدل آزمایشگاهی تیر بتنی پژوهش کرده اند [۴].

۳-۱۴- هندسه مدل

۳-۱۴-۱- مشخصات هندسی تیر عمیق

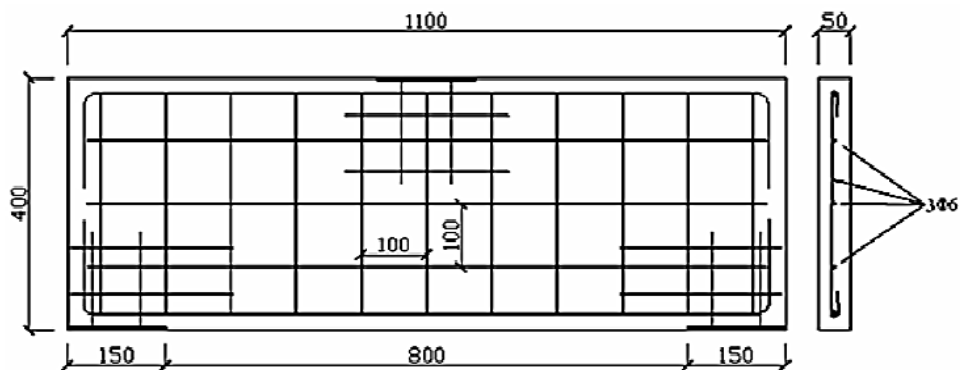
در این تحقیق تیر عمیق بتن مسلح مورد نظر دارای طول ۱۱۰۰mm، ارتفاع (عمق) ۴۰۰mm و عرض ۵۰mm می باشند؛ با توجه به اینکه دو تکیه گاه به طول ۱۵۰mm در دو انتهای تیر قرار گرفته است لذا دهانه موثر تیر ۸۰۰mm خواهد و نسبت دهانه به عمق تیرها برابر ۲ می باشد. تمام تیرها به صورت نقطه ای و از بالای تیر در وسط دهانه بارگذاری شده اند و در جدول ۳-۱ میلگردهای مورد استفاده در نمونه ها آورده شده است، میلگردهای جان تیر همگی به قطر ۶mm و به صورت شبکه های عمودی به فاصله ۱۰۰mm از یکدیگر که جزییات آن در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است.

• مشخصات هندسی تیر شاهد:

$$\begin{aligned} L &= 1100 \text{ (mm)} \\ h &= 400 \text{ (mm)} \\ b &= 50 \text{ (mm)} \\ L_e &= 800 \text{ (mm)} \\ (L/h) &= 2 \end{aligned}$$

جدول ۳-۱: مشخصات مصالح نمونه در آزمایشگاه و نرم افزار آباکوس [۴]

تیر	میلگردهای اصلی بالا		میلگردهای اصلی پایین			میلگردهای جان			
	تعداد و نوع	f_y N/mm ²	تعداد و نوع	F_y N/mm ²	E_s kN/mm ²	تعداد و نوع افقی	تعداد و نوع عمودی	f_y N/mm ²	E_s kN/mm ²
شاهد	۶Φ۱	۳۳۵	۱۶Φ۱	۳۳۵	۲۰۰	۶Φ۳	۶Φ۱۱	۳۳۵	۲۰۰



شکل ۳-۵: جزییات آرماتور گذاری نمونه در آزمایشگاه و نرم افزار آباکوس [۴]

۳-۱۴-۲- خواص مصالح

- مشخصات فولاد مصرفی

$$E_s = 200000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$F_y = 335 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\nu = 0.3$$

- مشخصات مصالح بتن

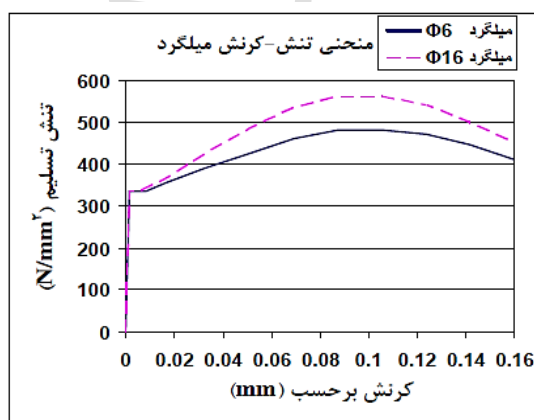
$$f'_c = 45 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$E_c = 31900 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

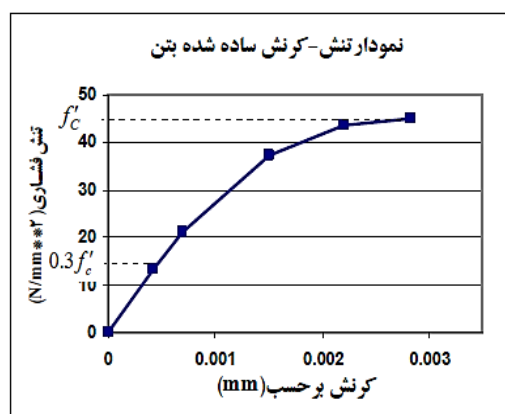
$$f_t = 4.16 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\nu = 0.2$$

نمودارهای تنش - کرنش مصالح در شکل ۳-۶ نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۶: نمودار تنش-کرنش مصالح در آزمایشگاه و آباکوس [۴]

۳-۱۴-۳- مدل سازی تیر شاهد

برای هر یک از مدل های ساخته شده در نرم افزار یک اسم انتخاب شده است، که این اسم بیان گر کلیه مشخصات مدل تیر می باشد. برای مدل ساده تیر عمیق بتن مسلح^۱ نام Control Beam انتخاب شده است. برای تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی مربعی به ابعاد ۱۵۰ mm نام Sq-150، برای تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی مربعی به ابعاد ۲۰۰ mm نام Sq-200، برای تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی دایره ای به قطر ۱۵۰ mm نام C-150، برای تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی دایره ای به قطر ۲۰۰ mm نام C-200، برای تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی مربعی تقویت شده با ورق CFRP به ابعاد ۱۵۰ mm نام CFRP-Sq-150، برای تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی مربعی تقویت شده با ورق CFRP به ابعاد ۲۰۰ mm نام CFRP-Sq-200، برای تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی دایره ای تقویت شده با ورق CFRP به قطر ۱۵۰ mm نام CFRP-C-150، برای تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی دایره ای تقویت شده با ورق CFRP به قطر ۲۰۰ mm نام CFRP-C-200، انتخاب شده است.

۳-۱۴-۳-۱- مدل سازی بتن مسلح

نرم افزار سه مدل برای رفتار بتن در نظر گرفته است؛ مدل پخش ترک در بتن، مدل ترک برای بتن و مدل بتن پلاستیک آسیب دیده. مدلی که تا حدود بسیاری رفتار واقعی بتن را شبیه سازی می کند، مدل بتن پلاستیک آسیب دیده می باشد که توانایی بررسی بتن مسلح تحت بارگذاری های مختلف (دوره ای و یکنواخت) را دارد و نیز با توجه به معرفی نمودار های بتن در کشش و فشار، بطور کامل تری رفتار بتن را در نظر گرفته است. با توجه به مدل سازی سه بعدی، به منظور اختصاص المانی که رفتار بتن را در این حالت تامین کند، می توان از المان های سه بعدی هشت گره ای C3D8 که از خانواده المان Solid می باشد، استفاده نمود. پسوند R برای کاهش نقاط انتگرال گیری استفاده شده تا مدت زمان اجرای برنامه کاهش یابد.

۳-۱۴-۳-۲- مدل سازی میلگردها

برای مدل سازی میلگردها می توان از المان Beam استفاده کرد که برای این منظور از المان B31 استفاده شده است که یک المان خطی دو گره ای می باشد و برای ترسیم آنها از Wire استفاده می

^۱ تیر شاهد

کنیم. میلگردها نیز در داخل تیر بتنی ابتدا جایگذاری شده و سپس برای مدول تماسی بین بتن و میلگرد از روش مدفون که یکی از ویژگی های تعریف میلگرد در بتن می باشد استفاده شده است. در این مرحله از ماژول Interaction استفاده می کنیم که به وسیله آن نوع تماس بین دو سطح و ... را می توان تعریف نمود.

۳-۱۴-۳-۳ مدل سازی ورق های CFRP

برای مدل کردن FRP از المان S4R که از خانواده المان های Shell می باشد، استفاده شده است. المان پوسته چهار گرهی چند منظوره قابلیت کاهش دادن نقاط انتگرال گیری برای به حداقل رساندن محاسبات و در نتیجه کاهش زمان آنالیز را دارا می باشد. از آنجایی که اثر برش عرضی در این المان لحاظ شده است. می توان برای مدل های با ساختار باریک و ضخیم از آن استفاده نمود. برای چسباندن CFRP به بتن از قید Contact در نرم افزار آباکوس استفاده می کنیم.

۳-۱۴-۳-۴ تعریف بارگذاری

برای بار گذاری به صورت متمرکز از یک لوله استفاده شده است که در بالای تیر بتنی قرار داده شده است. بار به صورت متمرکز بر روی نمونه وارد می شود.

۳-۱۴-۳-۵ شرایط تکیه گاهی

با توجه به نمونه هر دو تکیه گاه از نوع ساده می باشد که دو شرط مرزی یکسان است که باید به مدل اعمال شود. که برای تعریف این شرایط مرزی از ماژول Load و قسمت Displacement استفاده می شود. با توجه به شرایط مرزی تیر در دو سمت، با استفاده از شرایط تکیه گاهی درجات آزادی تغییر مکانی تیر را بسته و فقط امکان دوران تیر می باشد و به عبارتی دو انتهای تیر دارای تکیه گاه غلتکی می باشد.

۳-۱۴-۳-۶ مش بندی

برای مش بندی به ماژول Mesh رفته و برای تعیین نوع Mesh به قسمت Mesh Control رفته و مش بندی منظم را انتخاب می کنیم که شکل المان از نوع Hex و Technique آن از نوع Structured می باشد.

۳-۱۴-۷- نتایج تحلیل

برای تحلیل مدل از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده است.

۳-۱۴-۸- مدل تقویت شده

پس از بررسی صحت مدل آزمایشگاهی، که به صورت تقویت نشده مورد بررسی قرار گرفت، سعی داریم که در این مطالعه، مدل را با ورق CFRP تقویت کرده و مشخصات مکانیکی تیر بتنی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳-۱۴-۹- روش تقویت تیر بتنی عمیق

مدل تیر بتنی عمیق تقویت نشده با مشخصات ذکر شده، با الیاف پلیمری کربن تقویت می کنیم. برای تقویت تیر بتنی یک لایه CFRP در دو طرف تیر بتنی بکار می بریم.

۳-۱۴-۱۰- مشخصات CFRP

برای مقاوم سازی و تقویت تیر بتنی عمیق از ورق های با الیاف کربنی تک جهته (FRP Uni Directional) با ضخامت ۱/۷۶ mm استفاده شده است. مشخصات CFRP در جدول ۳-۲ و ارائه شده است.

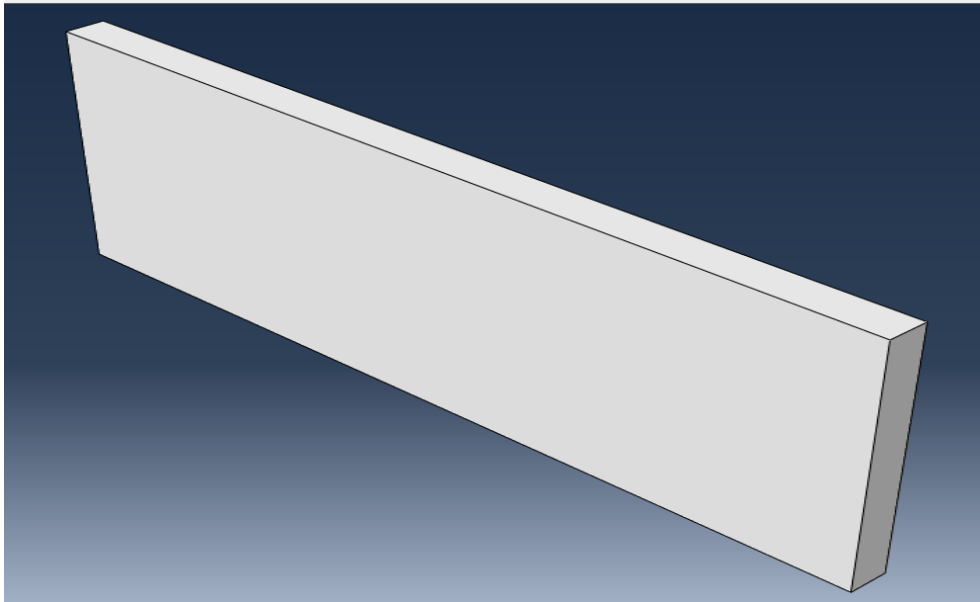
جدول ۳-۲: مشخصات CFRP استفاده شده در نرم افزار آباکوس [۴]

E_1 (N/mm ²)	E_2 (N/mm ²)	ν_{12}	G_{12} (N/mm ²)	G_{13} (N/mm ²)	G_{23} (N/mm ²)
۲۳۰۰۰۰	۱۷۸۶۰	۰/۳	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
مقاومت کششی طولی (N/mm ²)	مقاومت فشاری طولی (N/mm ²)	مقاومت کششی عرضی (N/mm ²)	مقاومت فشاری عرضی (N/mm ²)	مقاومت برشی طولی (N/mm ²)	مقاومت برشی عرضی (N/mm ²)
۳۴۵۰	۲۷۶۰	۱۳۳	۵۳۶	۱۱۷/۴	۱۱۷/۴

فصل چهارم تحلیل

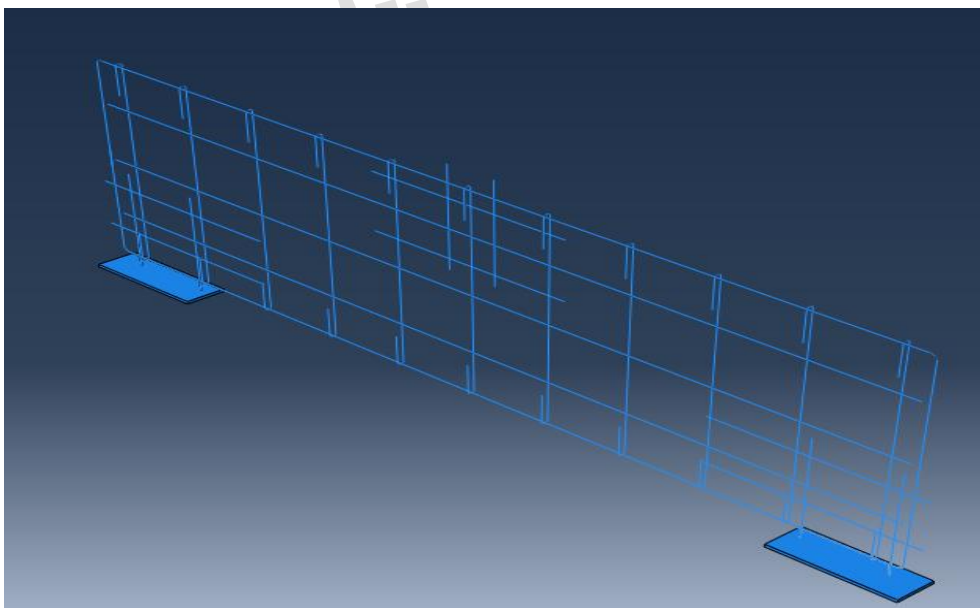
۱-۴- تیر عمیق بتن مسلح (تیر شاهد)

تیر عمیق بتن مسلح مورد نظر، مدل آزمایشگاهی است که توسط محمد پناهی و همکاران مورد پژوهش قرار گرفته شده است. در شکل ۱-۴ مدل بتن تعریف شده نمایش داده شده است.



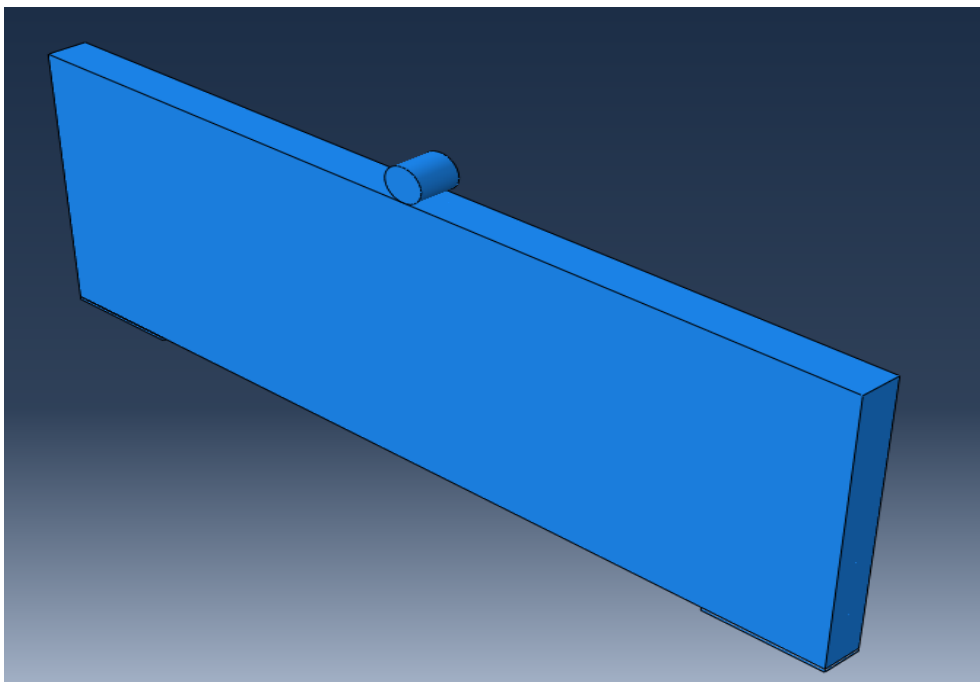
شکل ۱-۴: مدل بتن نمونه Control Beam در نرم افزار آباکوس

در شکل ۲-۴ نحوه ی میلگرد گذاری در داخل تیر بتنی در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



شکل ۲-۴: نحوه ی میلگرد گذاری در نمونه Control Beam

در شکل ۳-۴ مدل کامل شده تیر شاهد در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



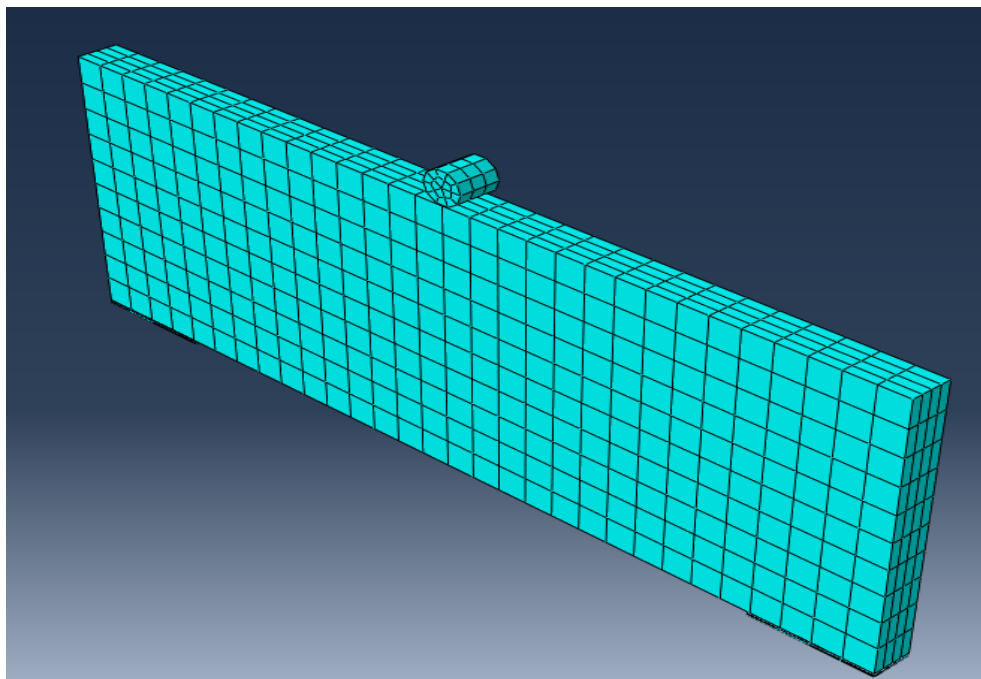
شکل ۳-۴: مدل کامل نمونه Control Beam در نرم افزار آباکوس

در شکل ۴-۴ مدل آزمایشگاهی این تیر نمایش داده شده است.



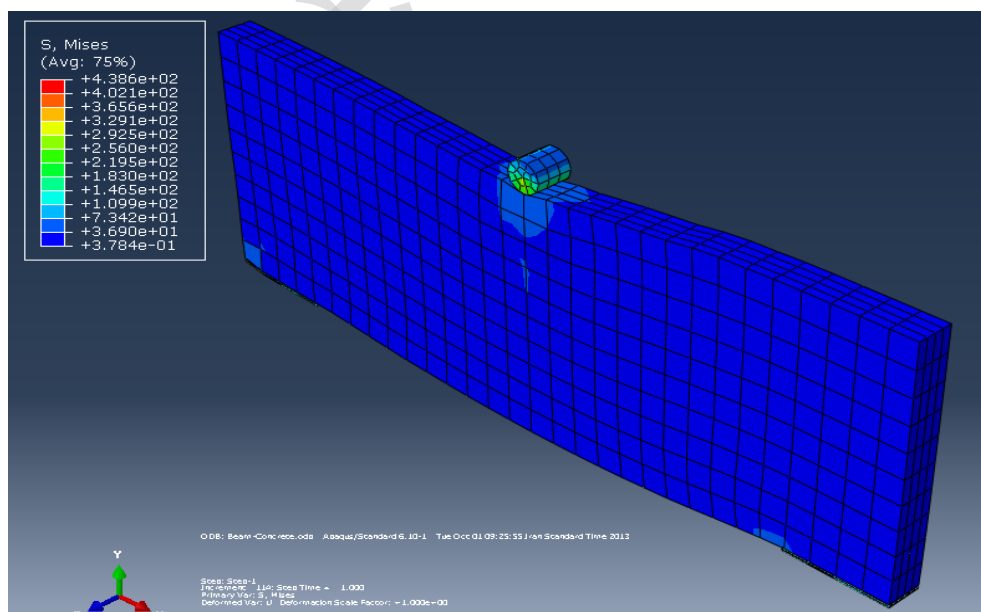
شکل ۴-۴: مدل آزمایشگاهی نمونه Control Beam [۴]

نحوه ی مش بندی نمونه در نرم افزار آباکوس در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است.



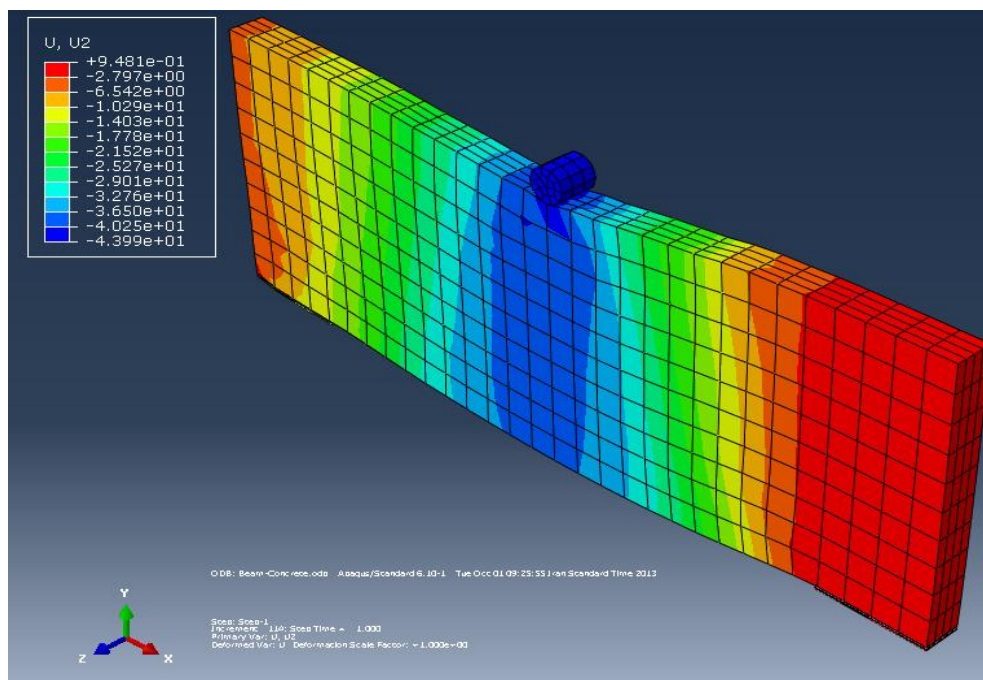
شکل ۴-۵: مدل مش بندی نمونه Control Beam در نرم افزار آباکوس

تنش ایجاد شده در تیر شاهد در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که در محل بارگذاری و در محل تکیه گاه ها تمرکز تنش وجود دارد.



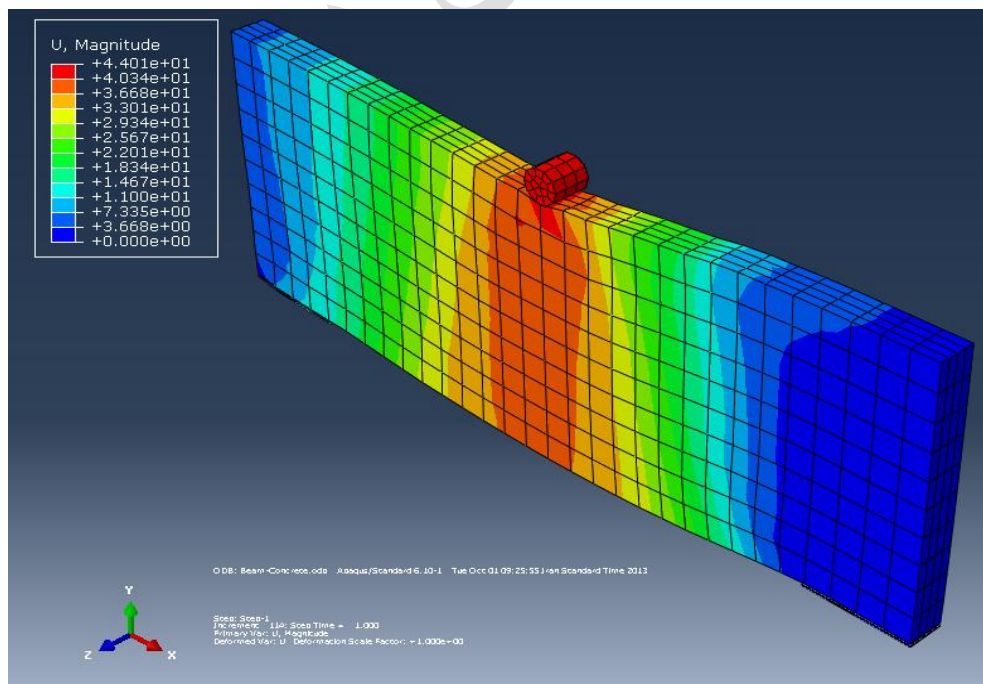
شکل ۴-۶: تنش ایجاد شده در نمونه Control Beam در نرم افزار آباکوس

تغییر مکان در راستای Y تیر شاهد در شکل ۷-۴ نشان داده شده است.



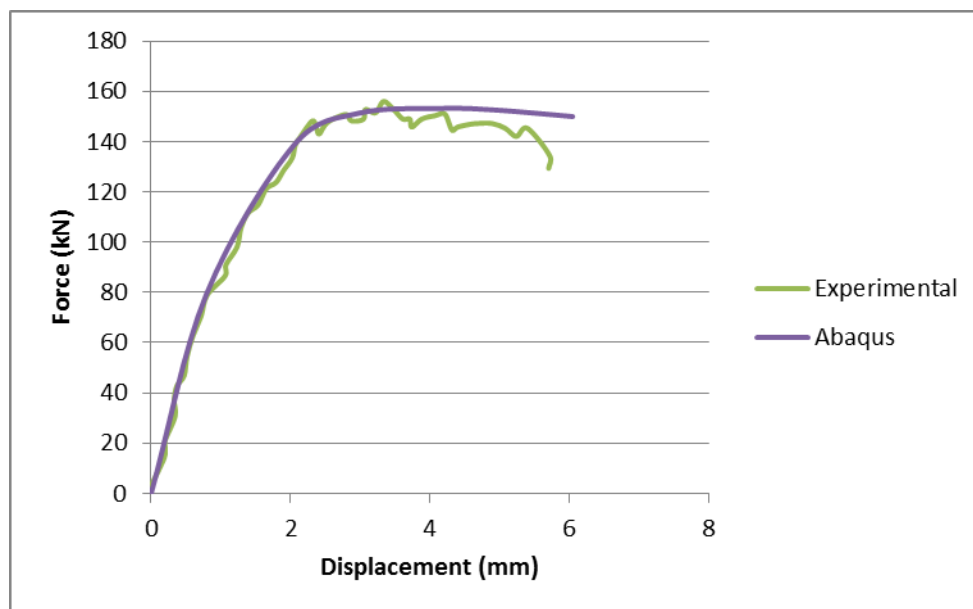
شکل ۷-۴: تغییر مکان در راستای Y نمونه Control Beam

تغییر مکان کلی تیر شاهد در نرم افزار آباکوس در شکل ۸-۴ نمایش داده شده است.



شکل ۸-۴: تغییر مکان کلی نمونه Control Beam

نمودار بار تغییر مکان تیر شاهد در نمونه آزمایشگاهی و مدل آباکوس در شکل ۹-۴ با هم مقایسه شده اند.



شکل ۹-۴: نمودار بار- تغییر مکان نمونه Control Beam

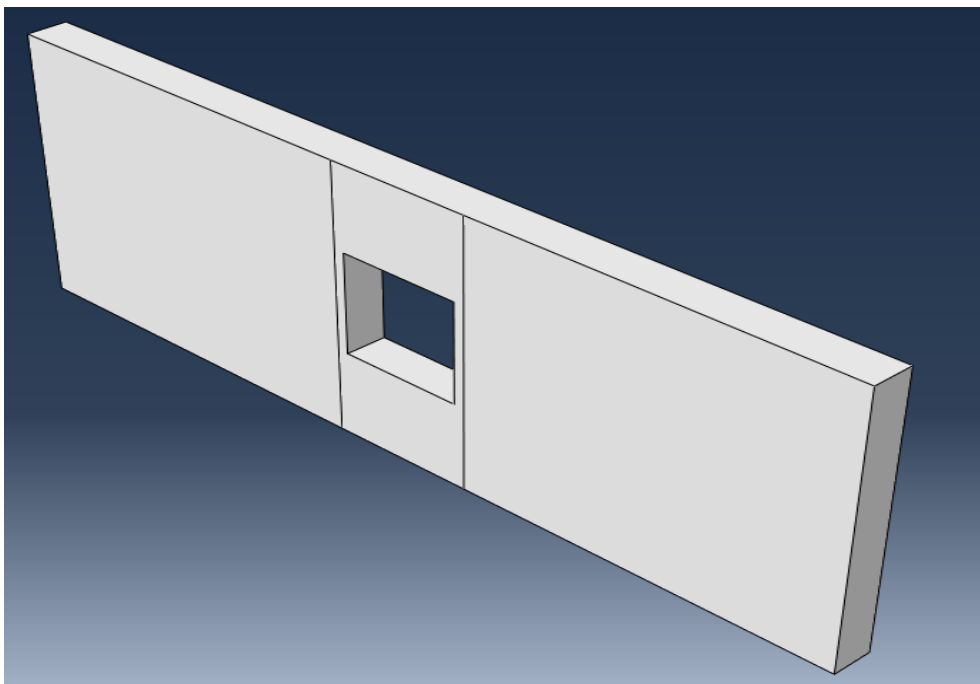
۲-۴- تیر عمیق بتن مسلح با بازشو

۱-۲-۴- تیر عمیق بتن مسلح با بازشو مربعی

در این مطالعه در وسط تیر عمیق بتن مسلح یک نوع بازشوی مربعی با دو اندازه متفاوت در نظر گرفته شده است. ابعاد این بازشو برابر با 150×150 mm و 200×200 mm می باشد. که در ذیل به شرح آن خواهیم پرداخت.

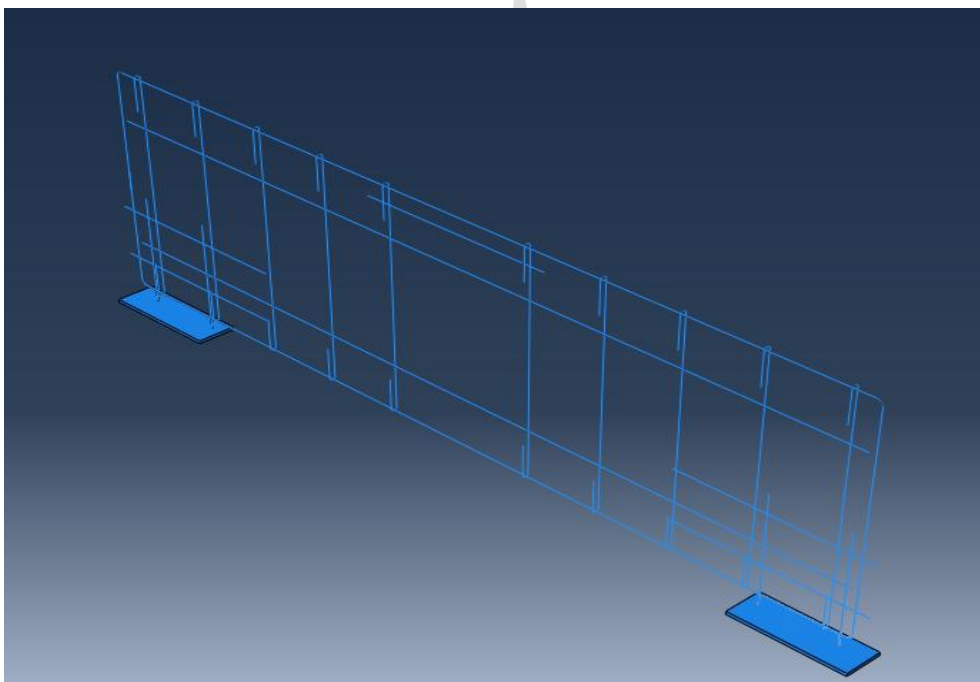
۱-۱-۲-۴- تیر عمیق بتن مسلح با باز شوی مربعی با ابعاد 150 mm

در مرکز تیر بتنی یک باز شو مربعی به 150 mm قرار داده شده است که با نام Sq-150 شناخته می شود. در شکل ۱۰-۴ مدل بتن تعریف شده نمایش داده شده است.



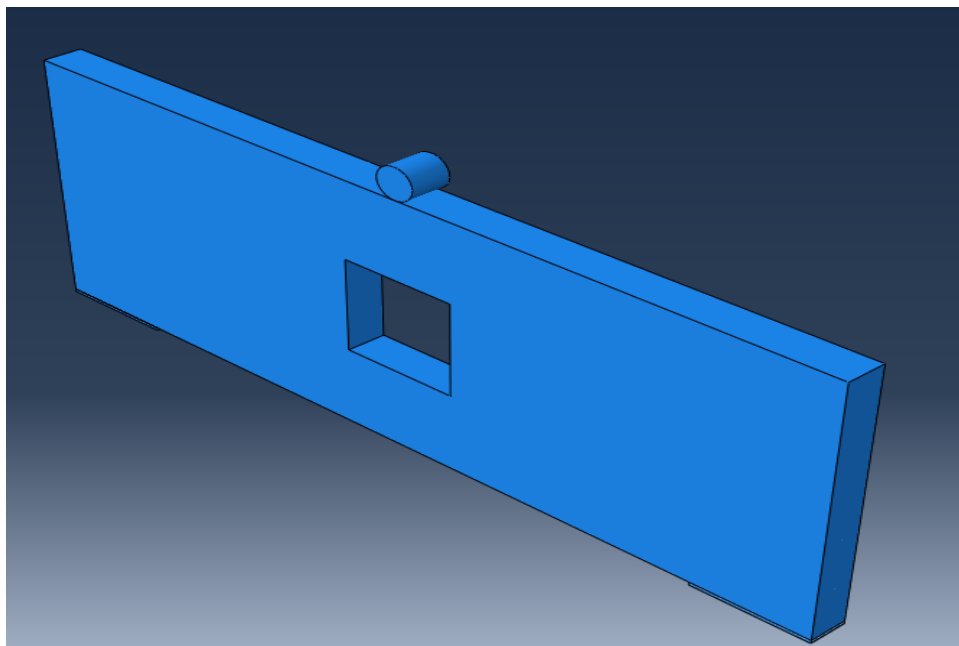
شکل ۴-۱۰: مدل آباکوس نمونه Sq-150

در شکل ۴-۱۱ نحوه ی میلگرد گذاری در داخل نمونه Sq-150 در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



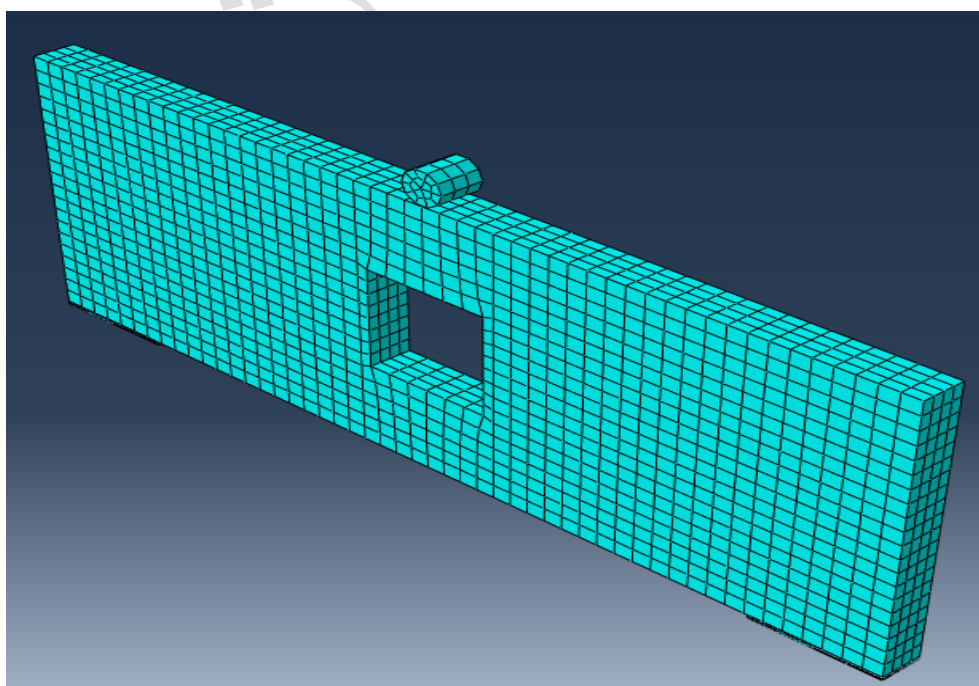
شکل ۴-۱۱: نحوه ی میلگرد گذاری نمونه Sq-150

در شکل ۱۲-۴ مدل کامل شده تیر بتنی در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



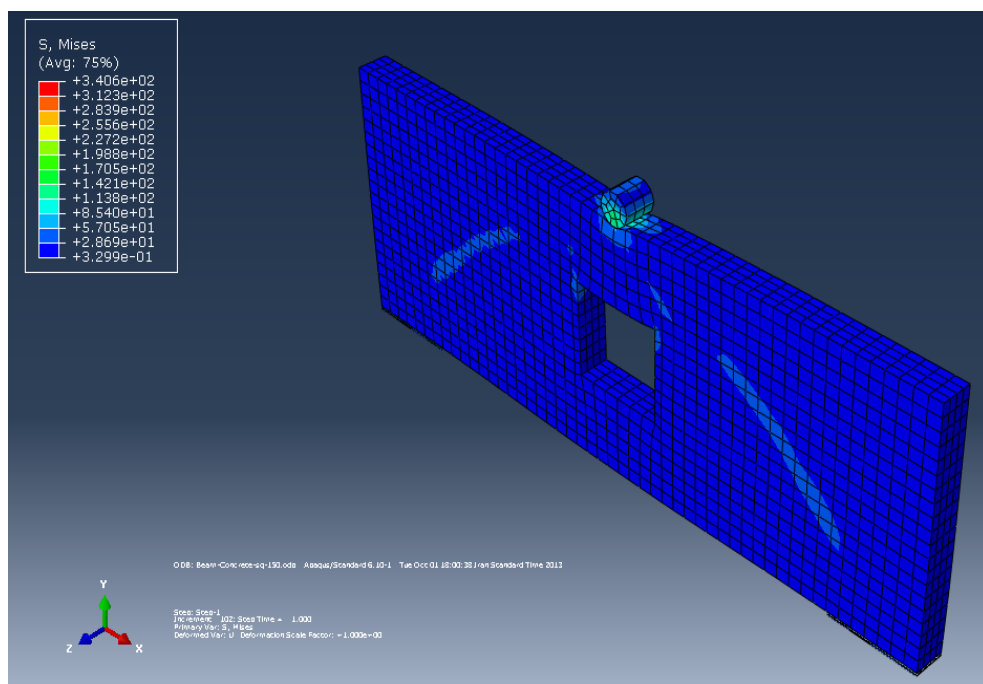
شکل ۱۲-۴: مدل کامل شده نمونه Sq-150

نحوه ی مش بندی نمونه در نرم افزار آباکوس در شکل ۱۳-۴ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است نوع مش بندی منظم است.



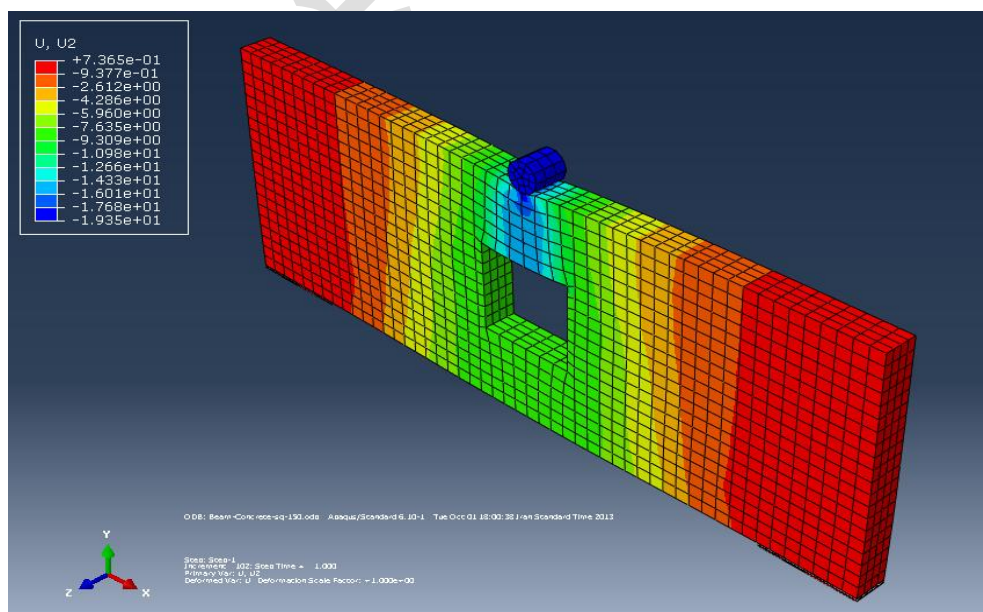
شکل ۱۳-۴: مدل مش بندی نمونه Sq-150

برای تحلیل مدل از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. پس از تحلیل مدل نتایج زیر مشاهده شد. تنش ایجاد شده در نمونه Sq-150 در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.



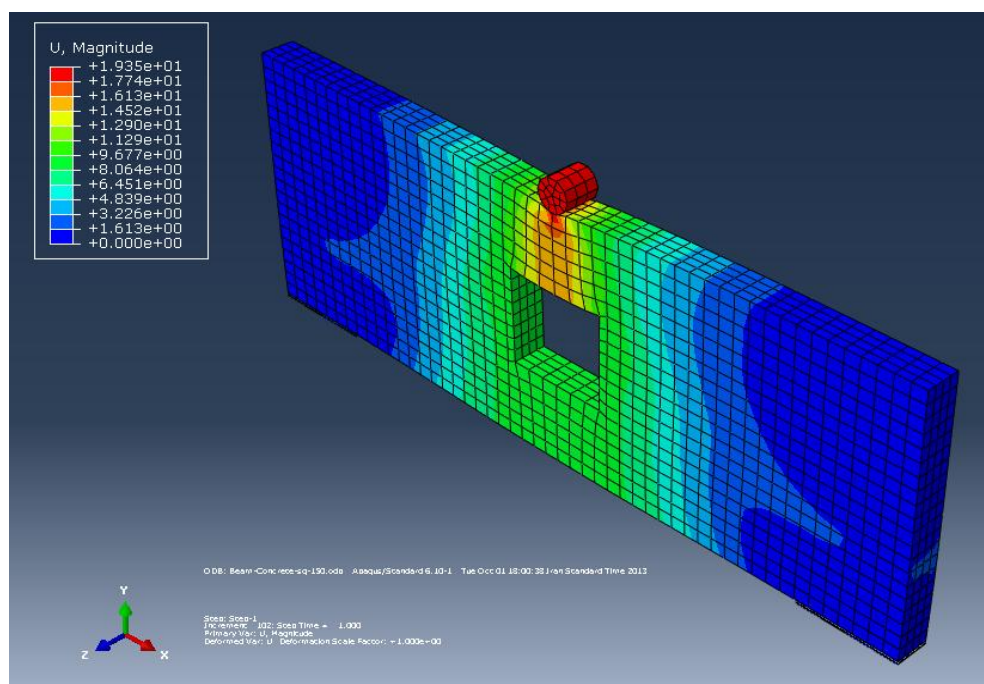
شکل ۴-۱۴: تنش ایجاد شده در نمونه Sq-150

تغییر مکان در راستای Y در نمونه Sq-150 در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.



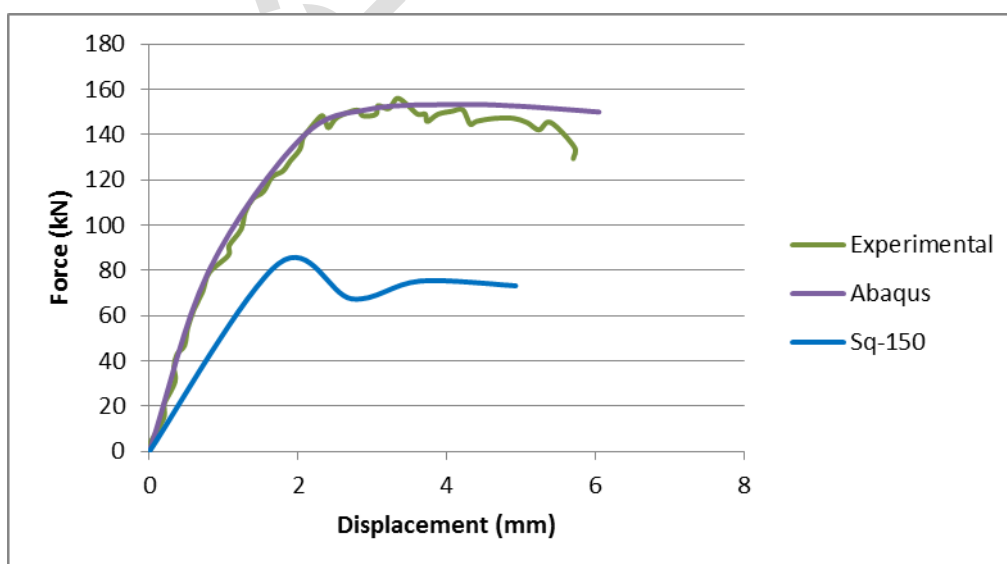
شکل ۴-۱۵: تغییر مکان در راستای Y نمونه Sq-150

تغییر مکان کلی نمونه Sq-150 در شکل ۱۶-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۶-۴: تغییر مکان کلی نمونه Sq-150

نمودار بار-تغییر مکان تیر در نمونه آزمایشگاهی و مدل آباکوس در شکل ۱۷-۴ نشان داده شده است.

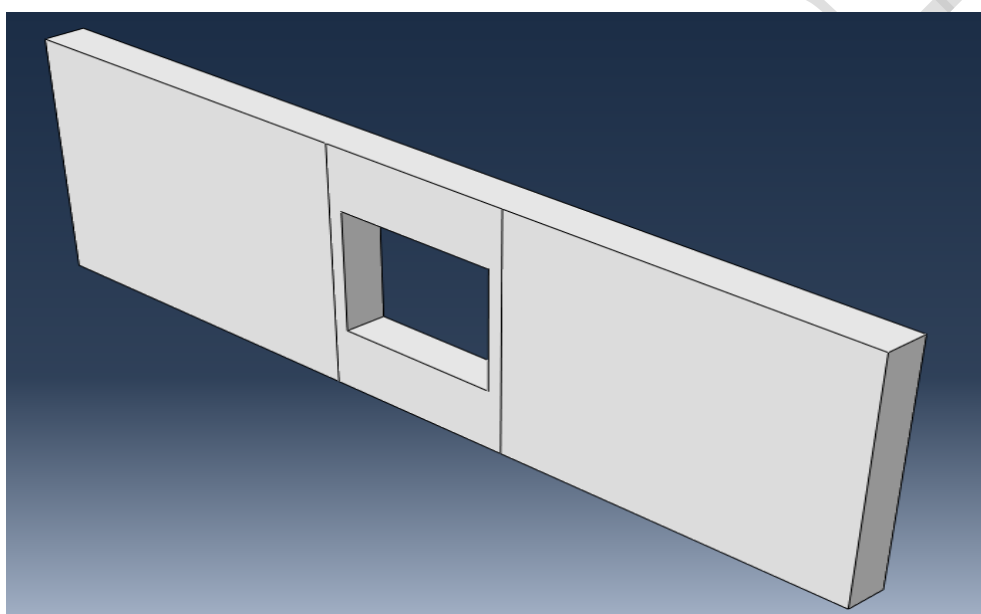


شکل ۱۷-۴: نمودار بار-تغییر مکان نمونه Sq-150

همانطور که مشاهده می شود، وجود باز شو سبب کاهش ظرفیت باربری تیر شاهد شده است و در ظرفیت نهایی تحمل بار نمونه Sq-200 در حدود ۸۳ kN می باشد. و نتایج نشان می دهد که ایجاد باز شو سبب کاهش ظرفیت باربری نمونه خواهد شد.

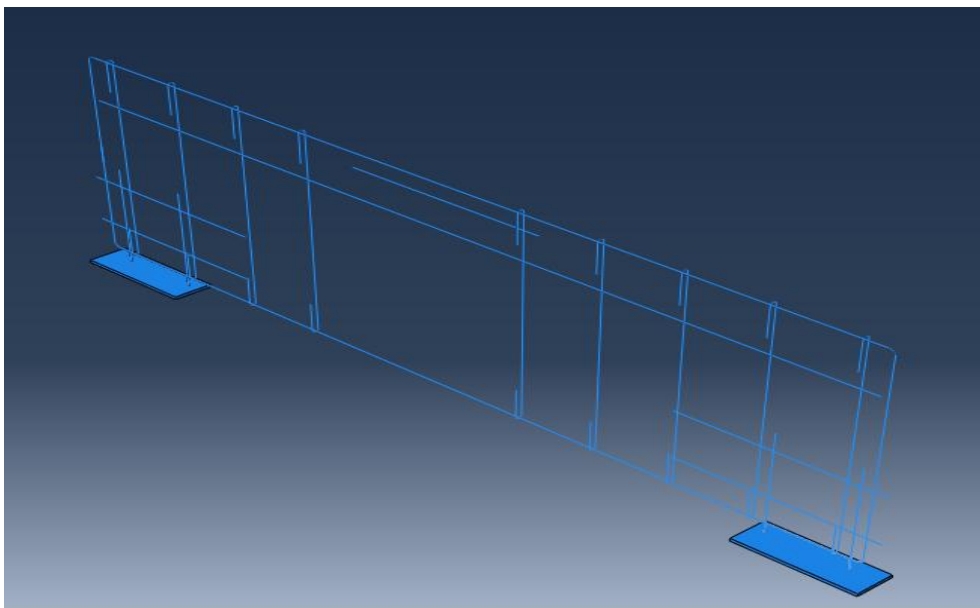
۲-۱-۲-۴- تیر عمیق بتن مسلح با باز شوی مربعی با ابعاد ۲۰۰ mm

در مرکز تیر بتنی یک باز شو مربعی به ۲۰۰ mm قرار داده شده است که با نام Sq-200 شناخته می شود. در شکل ۱۸-۴ مدل بتن تعریف شده نمایش داده شده است.



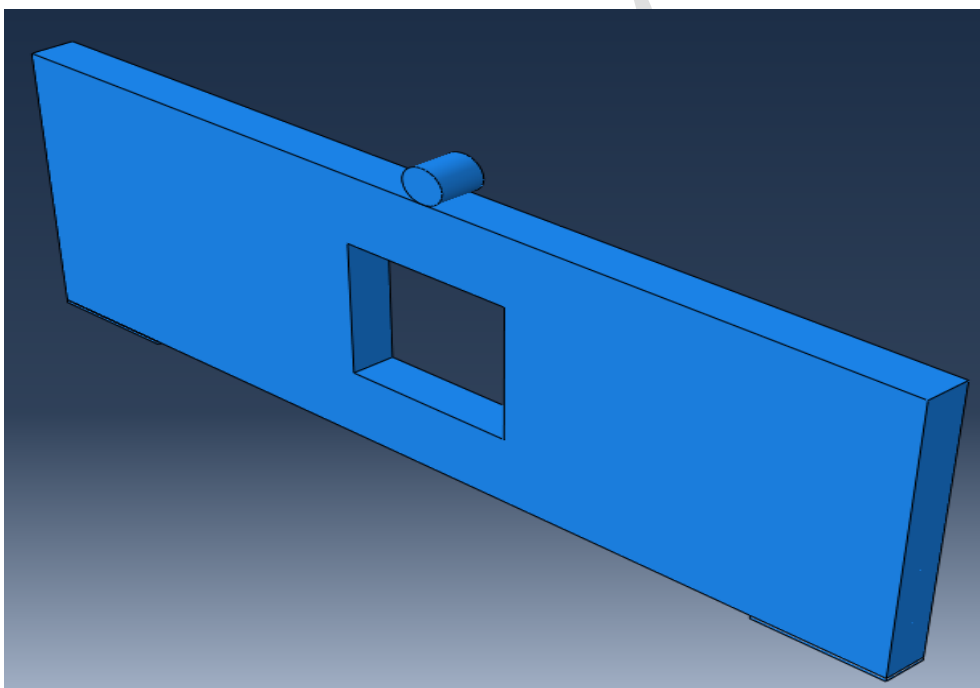
شکل ۱۸-۴: مدل آباکوس نمونه Sq-200

در شکل ۱۹-۴ نحوه ی میلگرد گذاری در داخل تیر بتنی نمایش داده شده است.



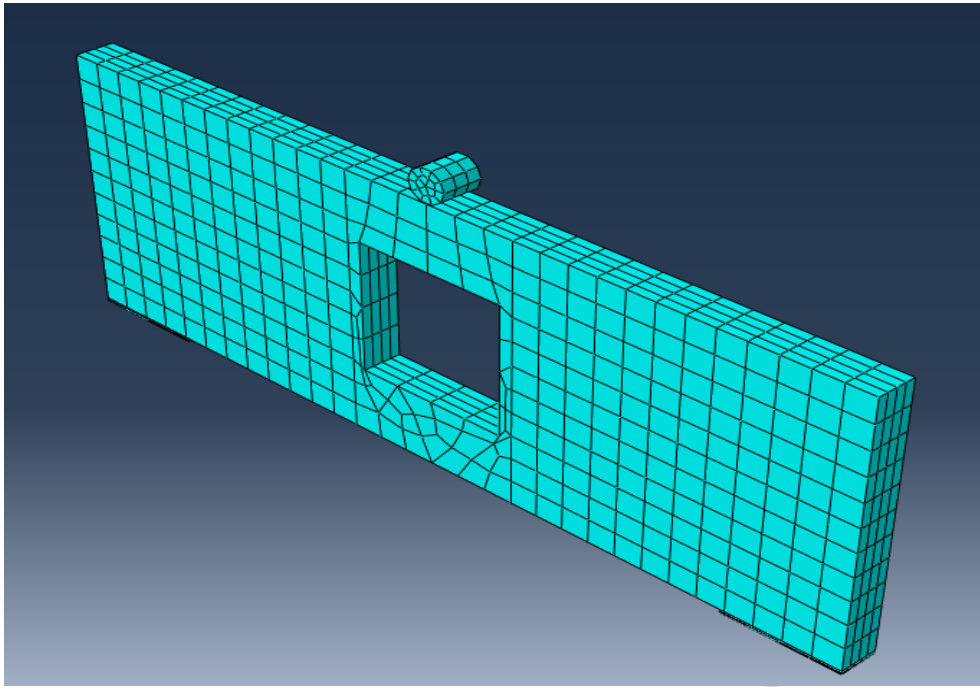
شکل ۴-۱۹: نحوه ی میلگرد گذاری نمونه Sq-200

در شکل ۴-۲۰ مدل کامل شده تیر بتنی در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



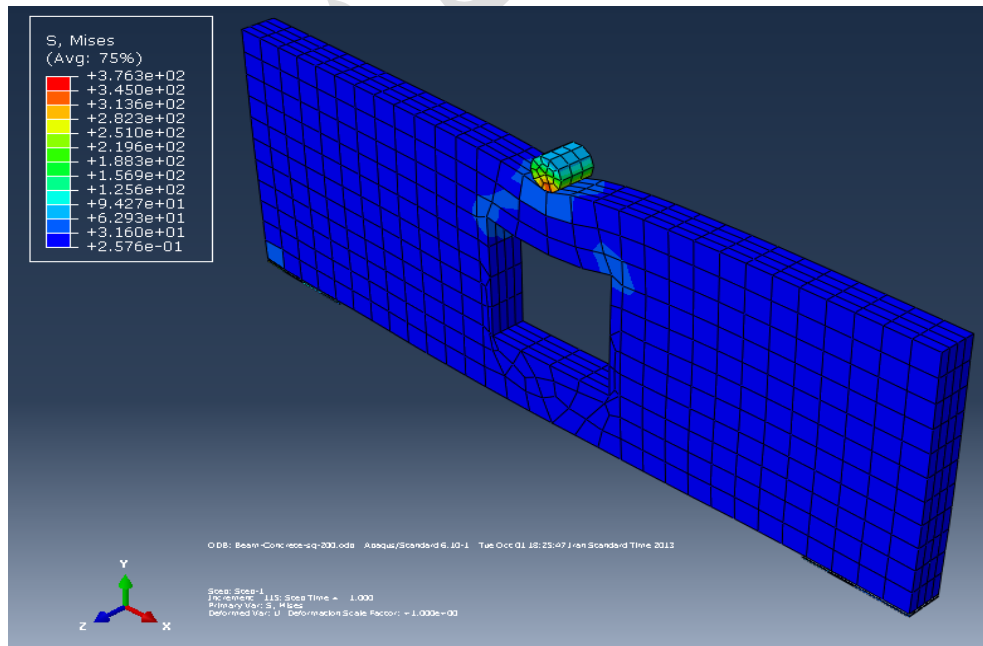
شکل ۴-۲۰: مدل کامل نمونه Sq-200

نحوه ی مش بندی نمونه Sq-200 در نرم افزار آباکوس در شکل ۴-۲۱ نمایش داده شده است.



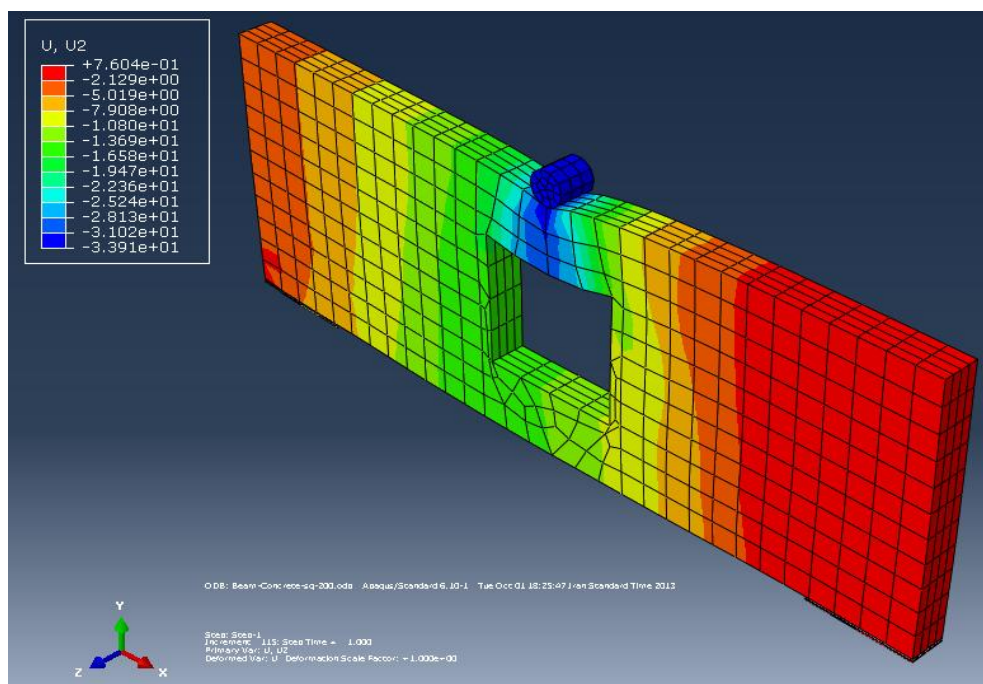
شکل ۴-۲۱: مدل مش بندی شده نمونه Sq-200

برای تحلیل مدل از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. پس از تحلیل مدل نتایج زیر مشاهده شد. تنش ایجاد شده در نمونه Sq-200 در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که در گوشه های باز شو تمرکز تنش بیشتر است.



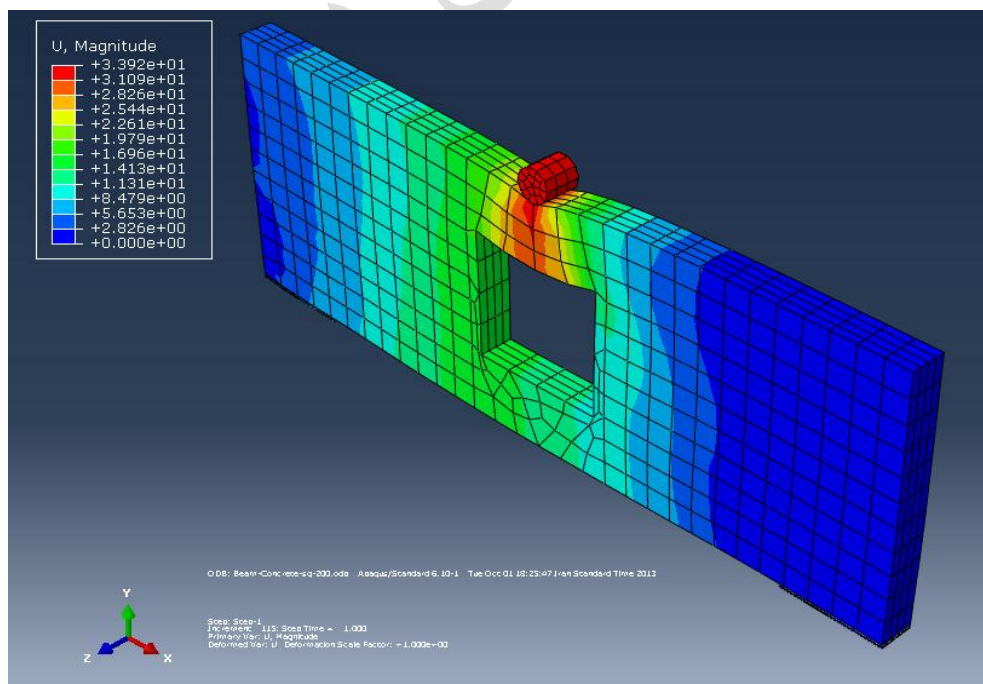
شکل ۴-۲۲: تنش ایجاد شده در نمونه Sq-200

در شکل ۴-۲۳ تغییر مکان در راستای Y در نمونه Sq-200 نشان داده شده است.



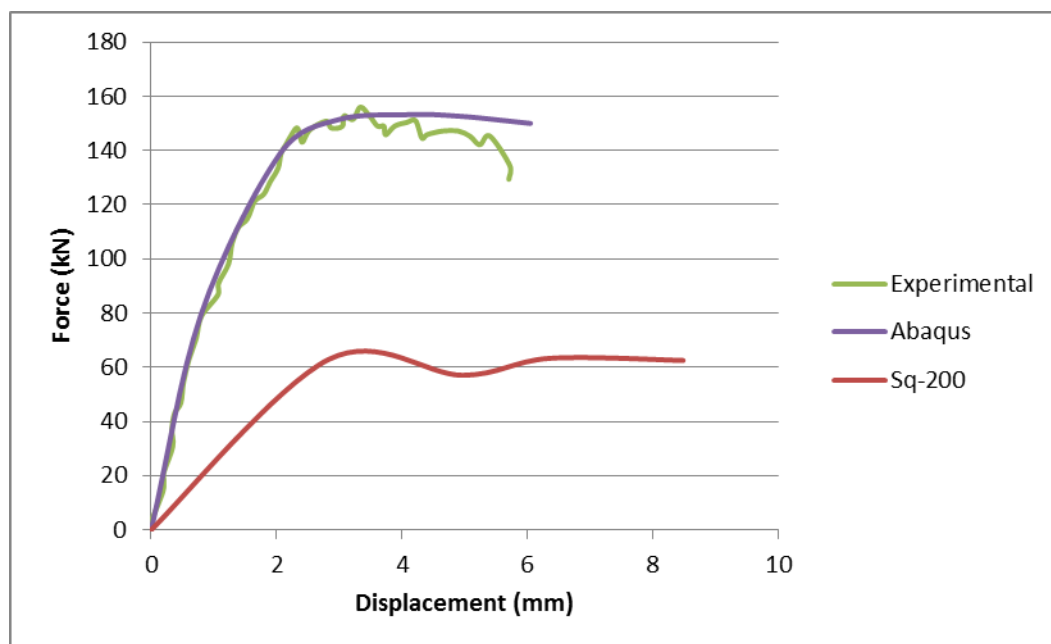
شکل ۴-۲۳: تغییر مکان در راستای Y نمونه Sq-200

در شکل ۴-۲۴ تغییر مکان کلی نمونه Sq-200 نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۴: تغییر مکان کلی نمونه Sq-200

نمودار بار-تغییر مکان تیر در نمونه آزمایشگاهی و مدل آباکوس نمونه Sq-200 در شکل ۴-۲۵ با هم مقایسه شده اند.



شکل ۴-۲۵: نمودار بار-تغییر مکان نمونه Sq-200

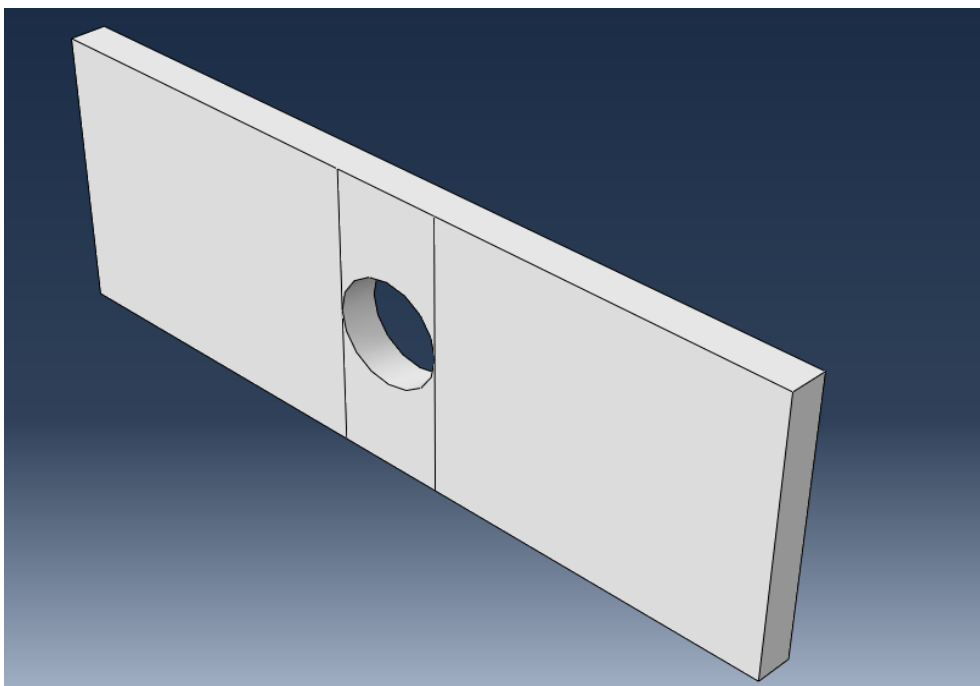
نتایج نشان می دهد که افزایش ابعاد بازشو تاثیر زیادی در کاهش ظرفیت باربری تیر عمیق بتن مسلح دارد. همانطور که مشاهده می شود، وجود بازشو سبب کاهش ظرفیت باربری تیر شاهد شده است و در ظرفیت نهایی تحمل بار نمونه Sq-200 در حدود ۶۳ kN می باشد.

۴-۲-۲- تیر عمیق بتن مسلح با بازشوی دایره ای

علاوه بر بازشو مربعی در این مطالعه یک نوع بازشوی دایره ای با ابعاد متفاوت نیز در نظر گرفته شده است. ابعاد بازشوی دایره ای نیز با قطر ۱۵۰ mm و ۲۰۰ mm در مرکز تیر بتنی عمیق می باشد.

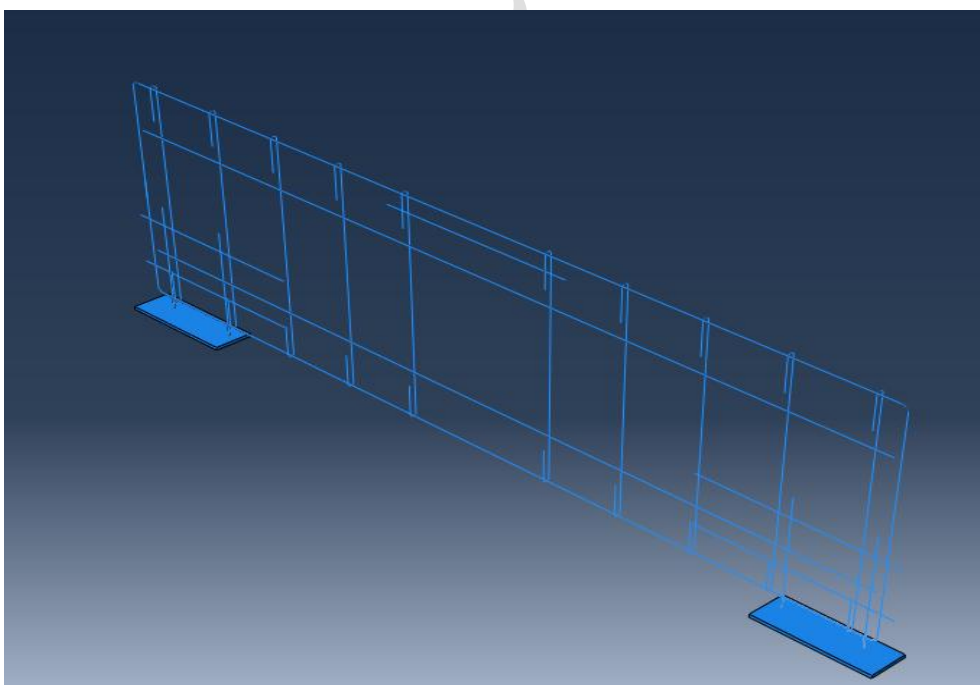
۴-۲-۲-۱- تیر عمیق بتن مسلح با بازشوی دایره ای با قطر ۱۵۰ mm

در مرکز تیر بتنی یک باز شو دایره ای به قطر ۱۵۰ mm قرار داده شده است که با نام C-150 شناخته می شود. در شکل ۴-۲۶ مدل بتن تعریف شده نمایش داده شده است.



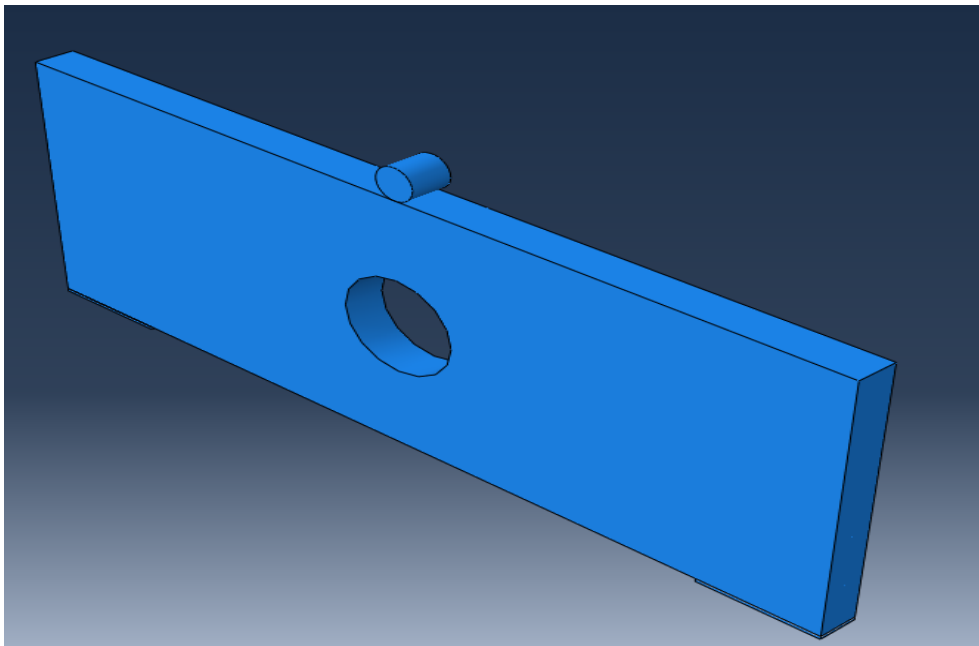
شکل ۴-۲۶: مدل آباکوس نمونه C-150

در شکل ۴-۲۷ نحوه ی میلگرد گذاری در داخل نمونه C-150 در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



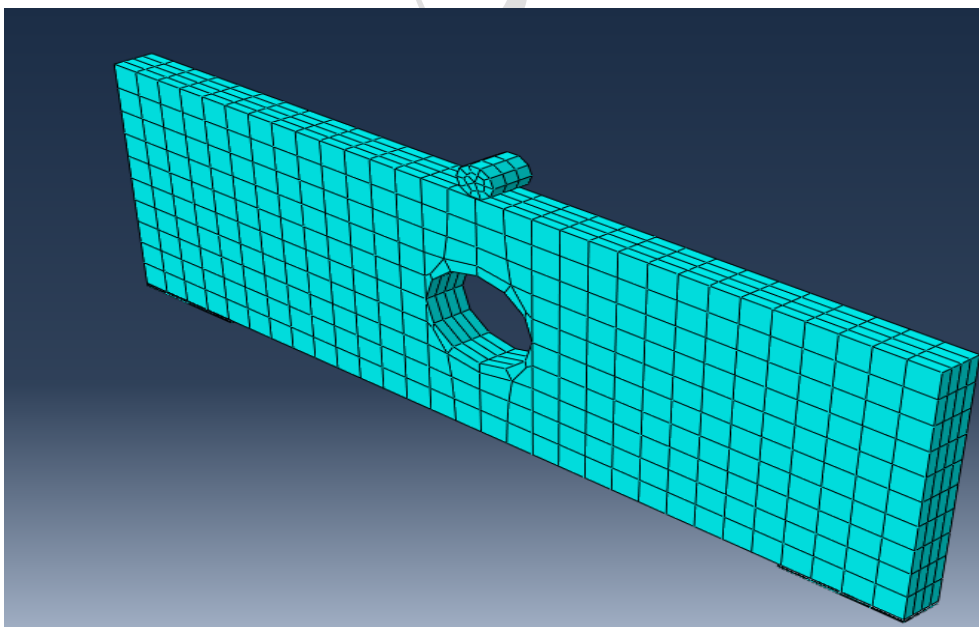
شکل ۴-۲۷: نحوه ی میلگرد گذاری نمونه C-150

در شکل ۲۸-۴ مدل کامل شده تیر بتنی در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



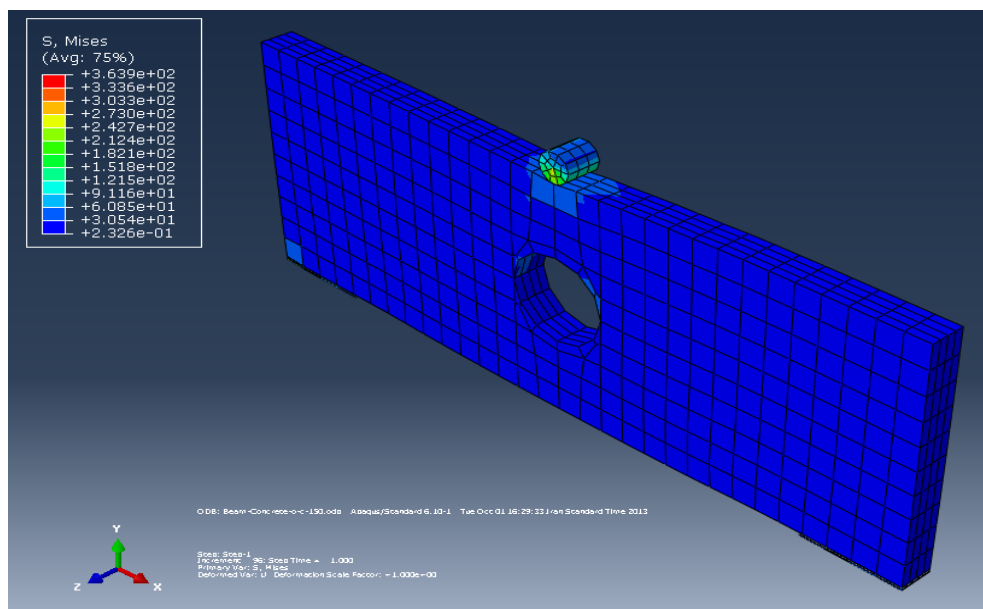
شکل ۲۸-۴: مدل کامل شده نمونه C-150

نحوه ی مش بندی نمونه در نرم افزار آباکوس در شکل ۲۹-۴ نمایش داده شده است.



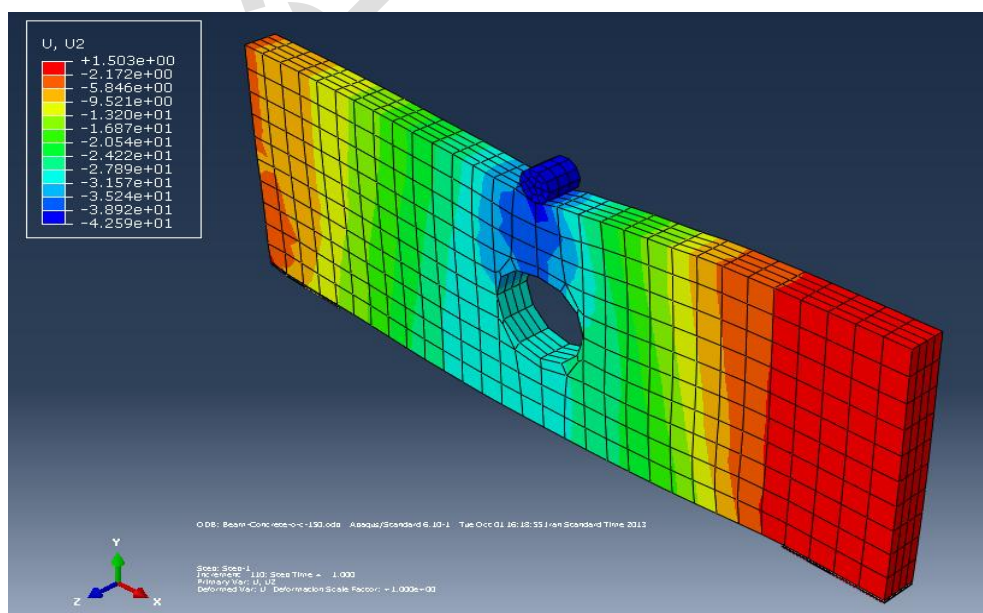
شکل ۲۹-۴: مدل مش بندی نمونه C-150

برای تحلیل مدل از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. پس از تحلیل مدل نتایج زیر مشاهده شد. تنش ایجاد شده در تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی مربعی در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است.



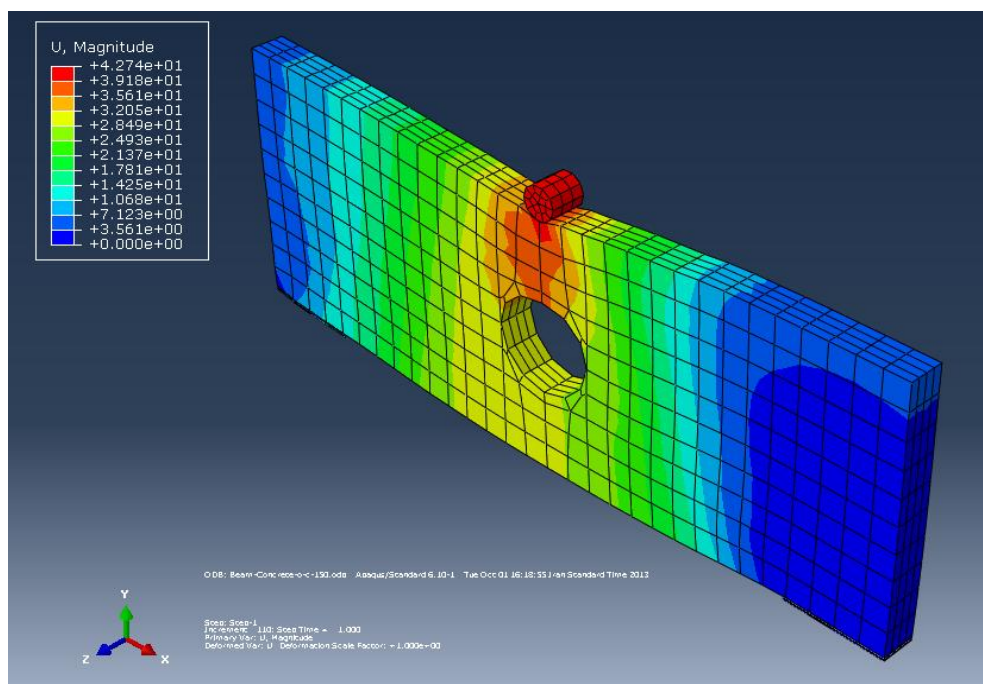
شکل ۴-۳۰: تنش ایجاد شده در نمونه C-150

در شکل ۴-۳۱ تغییر مکان در راستای Y نمونه C-150 به نشان داده شده است.



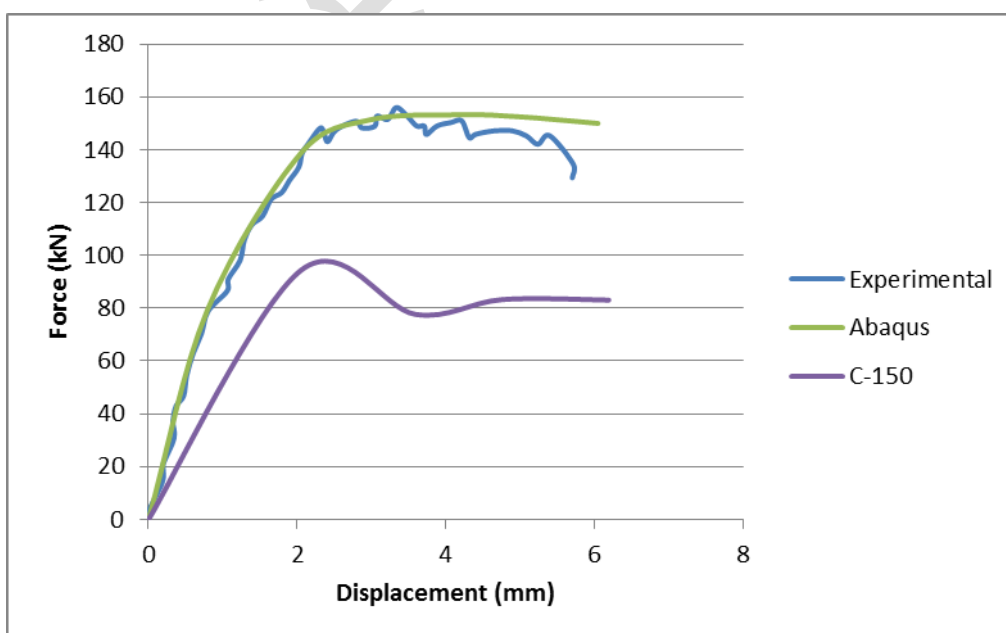
شکل ۴-۳۱: تغییر مکان در راستای Y نمونه C-150

در شکل ۴-۳۲ تغییر مکان کلی نمونه C-150 نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۲ تغییر مکان کلی نمونه C-150

نمودار بار تغییر مکان تیر در نمونه آزمایشگاهی و مدل آباکوس در شکل ۴-۳۳ با هم مقایسه شده اند.

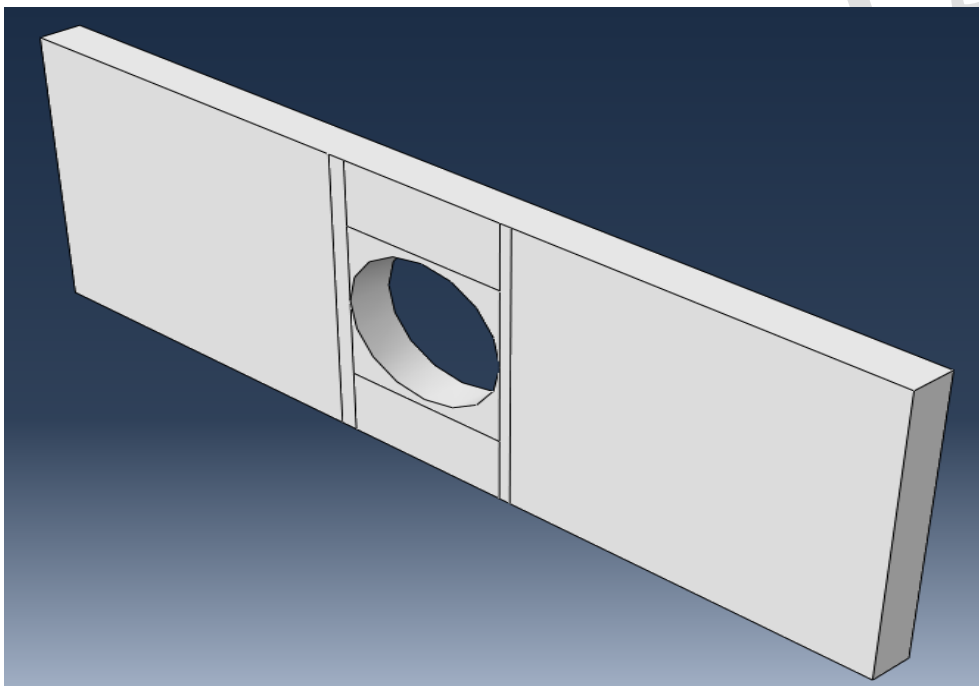


شکل ۴-۳۳: نمودار بار-تغییر مکان نمونه C-150

همانطور که مشاهده می شود، وجود باز شو سبب کاهش ظرفیت باربری تیر شاهد شده است و در ظرفیت نهایی تحمل بار نمونه C-150 در حدود ۹۴ kN می باشد.

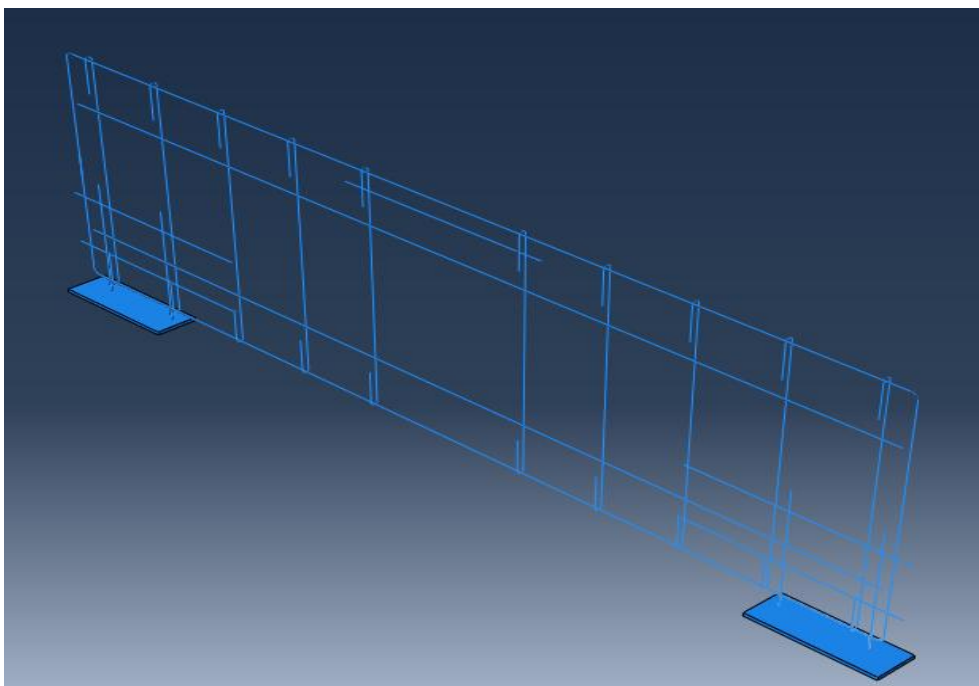
۲-۲-۲-۴- تیر عمیق بتن مسلح با بازشوی دایره ای با قطر ۲۰۰ mm

در مرکز تیر بتنی یک باز شو دایره ای به قطر ۲۰۰ mm قرار داده شده است که با نام C-200 شناخته می شود. در شکل ۳۴-۴ مدل تیر بتنی تعریف شده نمایش داده شده است.



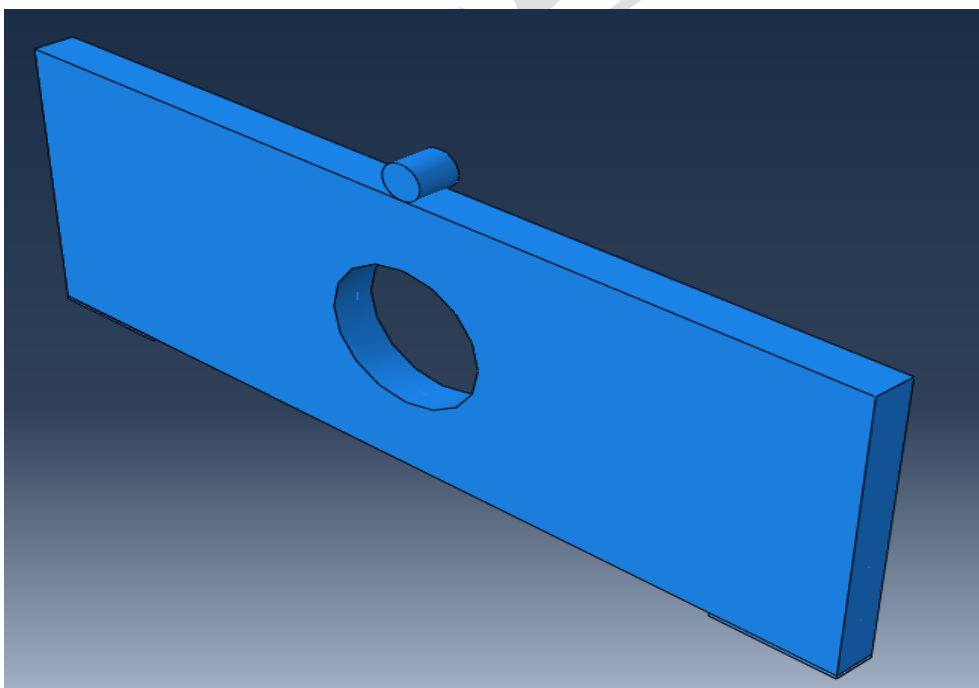
شکل ۳۴-۴: مدل آباکوس نمونه C-200

در شکل ۳۵-۴ نحوه ی میلگرد گذاری نمونه C-200 در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



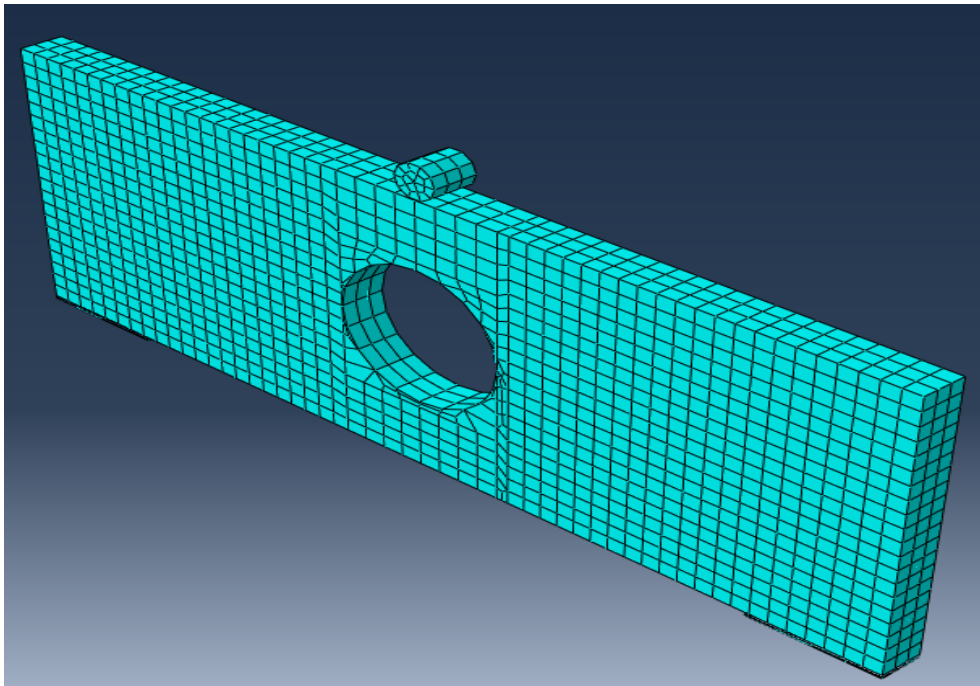
شکل ۴-۳۵: نحوه ی میلگرد گذاری نمونه C-200

در شکل ۴-۳۶ مدل کامل شده نمونه C-200 در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



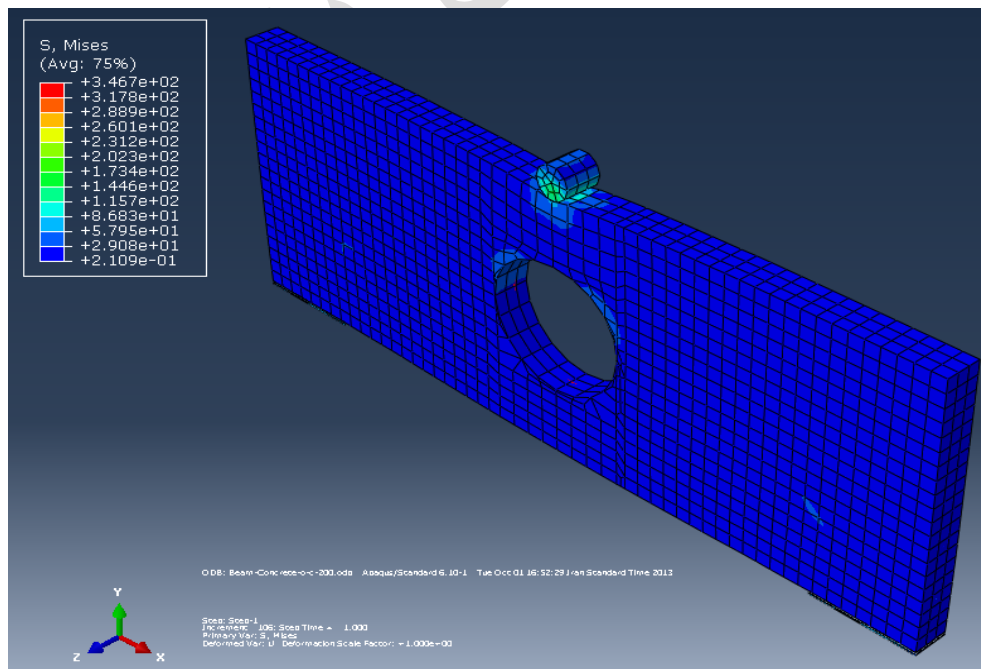
شکل ۴-۳۶: مدل کامل شده نمونه C-200

نحوه ی مش بندی نمونه در نرم افزار آباکوس در شکل ۴-۳۷ نمایش داده شده است.



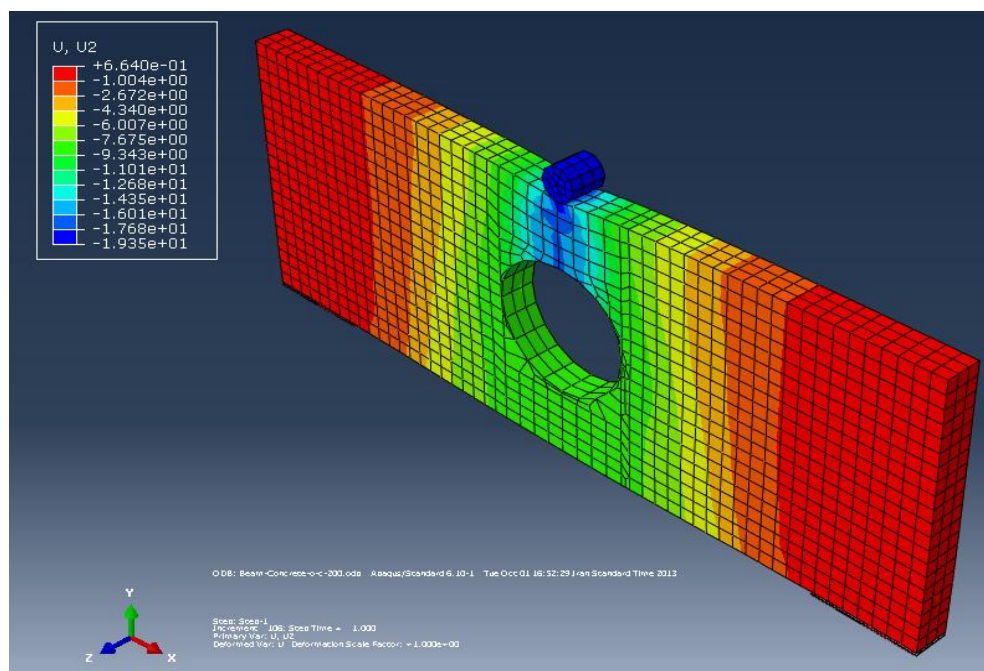
شکل ۴-۳۷: مدل مش بندی نمونه C-200

برای تحلیل مدل از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. پس از تحلیل مدل نتایج زیر مشاهده شد. تنش ایجاد شده در نمونه C-200 در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است.



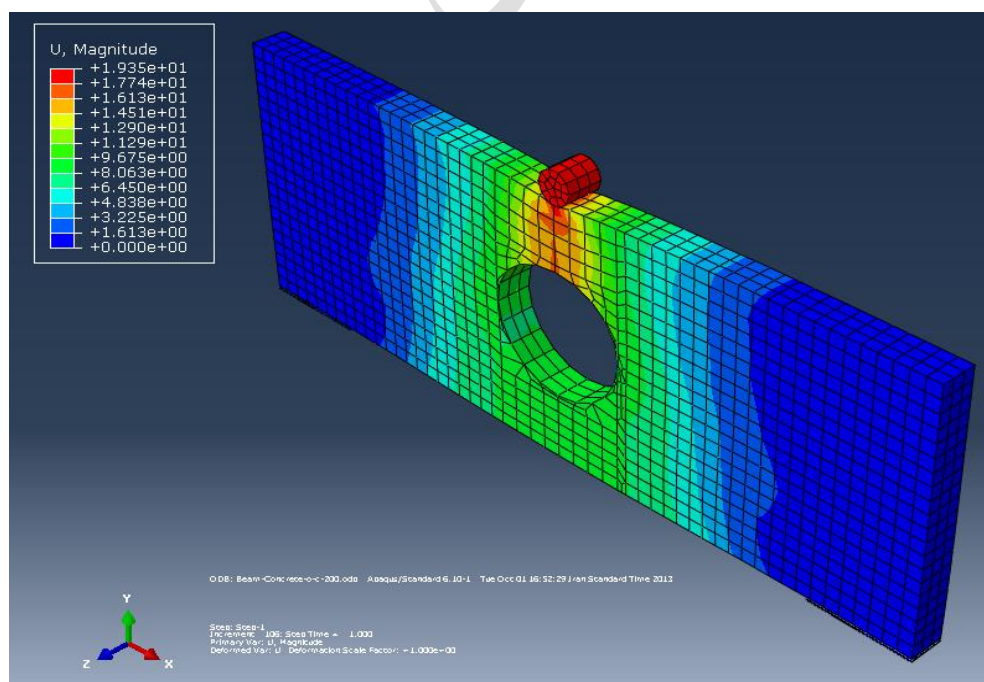
شکل ۴-۳۸: تنش ایجاد شده در نمونه C-200

تغییر مکان در راستای Y در نمونه C-200 در شکل ۴-۳۹ نشان داده شده است.



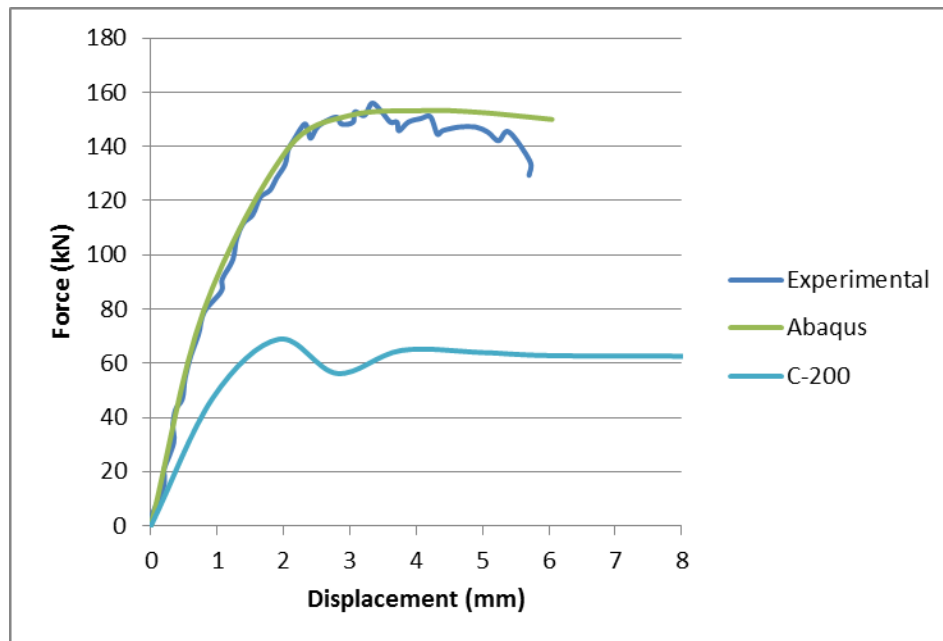
شکل ۴-۳۹: تغییر مکان در راستای Y نمونه C-200

تغییر مکان کلی نمونه C-200 در شکل ۴-۴۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۰: تغییر مکان کلی نمونه C-200

نمودار بار- تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی و مدل آباکوس در شکل ۴-۴۱ با هم مقایسه شده اند.



شکل ۴-۴۱: نمودار بار-تغییر مکان نمونه C-200

نتایج نشان می دهد که افزایش ابعاد بازشو تاثیر زیادی در کاهش ظرفیت باربری تیر عمیق بتن مسلح دارد. همانطور که در نمودار مشاهده می شود، وجود بازشو سبب کاهش ظرفیت باربری تیر شاهد شده است و در ظرفیت نهایی تحمل بار نمونه C-200 در حدود ۶۹ kN می باشد.

۴-۳- تیر عمیق بتن مسلح با بازشوی تقویت شده با CFRP

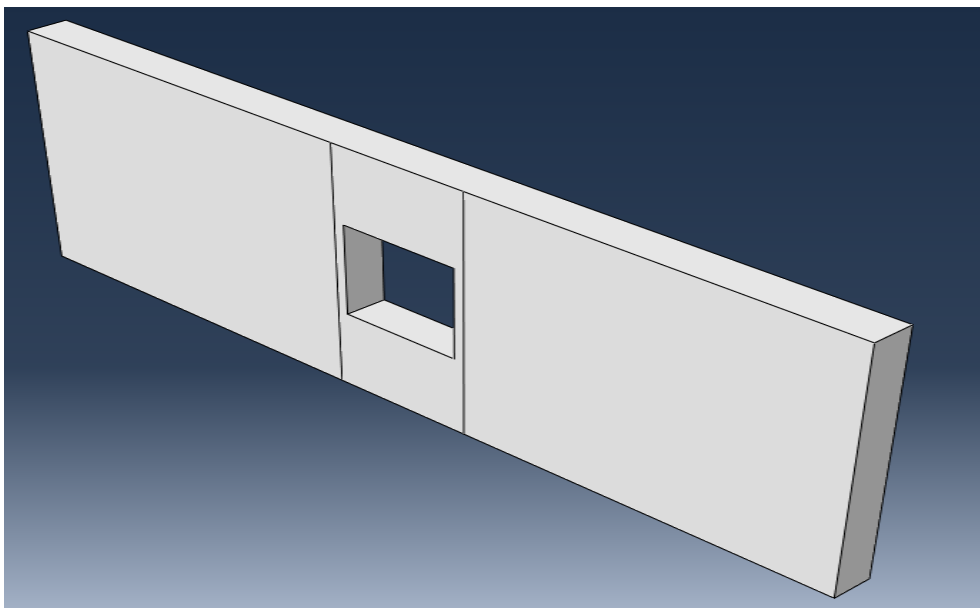
در این بخش برای بررسی میزان تاثیر نوع بازشو و نیز میزان تاثیر ورق CFRP بر روی انواع نمونه ها، به بررسی عددی انواع نمونه ها پرداخته می شود تا میزان اثر و میزان بهبود عملکرد نمونه های مورد نظر مورد مطالعه قرار گیرد.

۴-۳-۱- تیر عمیق بتن مسلح تقویت شده با CFRP با بازشوی مربعی

برای میزان اثر ورق CFRP بر تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی مربعی، یک لایه ورق CFRP با مشخصات ذکر شده در دورتادور بازشو به شکل U استفاده شده است. برای بررسی بیشتر اثر تقویت از دو نمونه استفاده شده است.

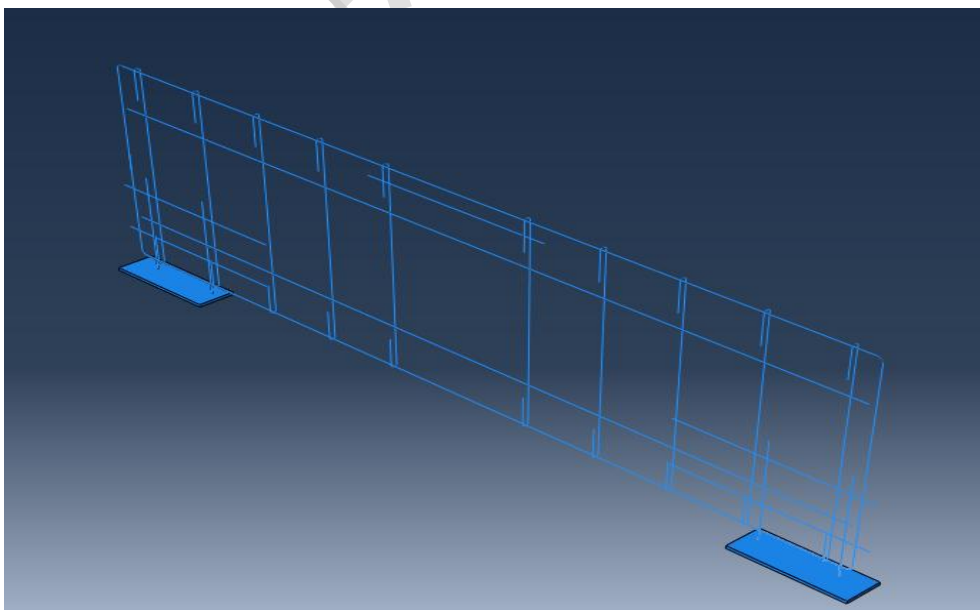
۴-۳-۱-۱- تیر با بازشوی مربعی تقویت شده با CFRP با ابعاد ۱۵۰ mm

در این رابطه، از نمونه Sq-150 استفاده می شود که در بخش قبل به بررسی عملکرد آن بدون وجود تقویت پرداختیم. در این مطالعه برای این نمونه نام CFRP-Sq-150 انتخاب شده است که در شکل ۴-۴۲ مدل بتن تعریف شده نمایش داده شده است.



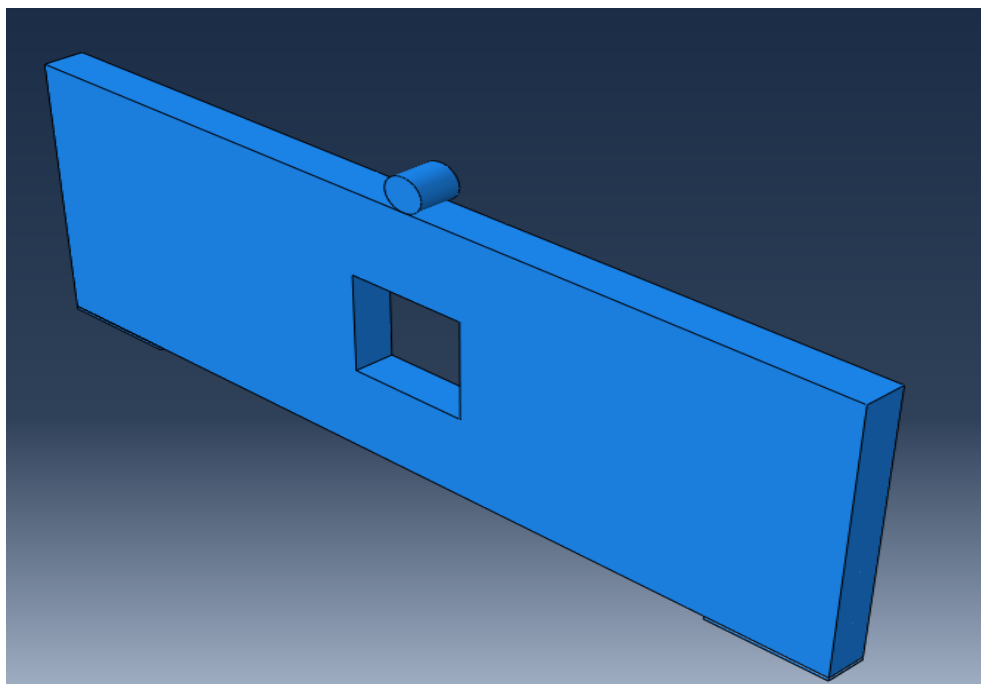
شکل ۴-۴۲: مدل نمونه CFRP-Sq-150

در شکل ۴-۴۳ نحوه ی میلگرد گذاری نمونه CFRP-Sq-150 نمایش داده شده است.



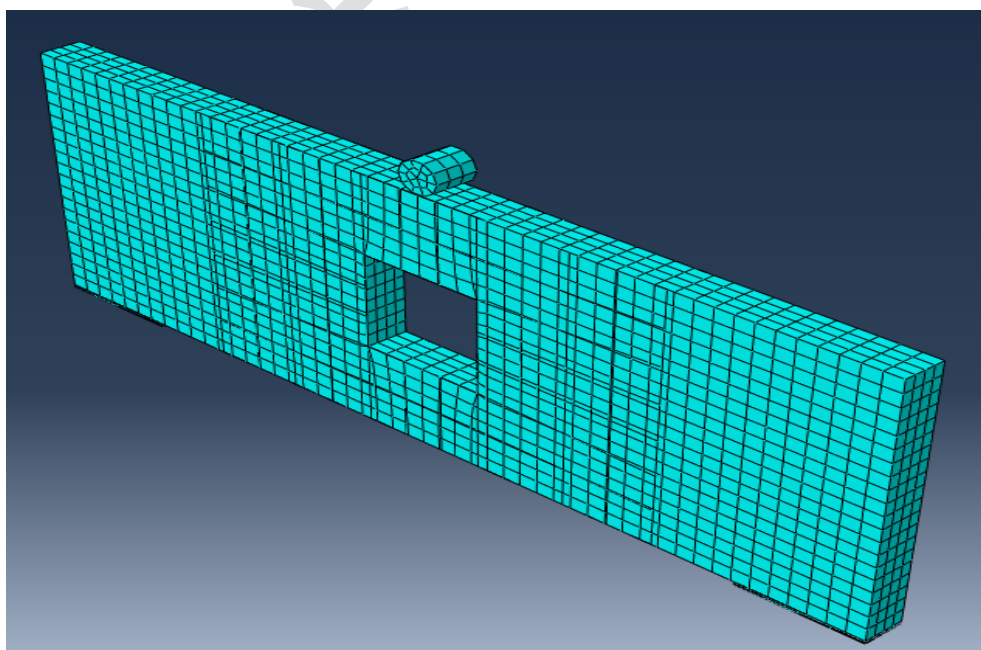
شکل ۴-۴۳: نحوه ی میلگرد گذاری نمونه CFRP-Sq-150

در شکل ۴-۴۴ مدل کامل شده نمونه CFRP-Sq-150 در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



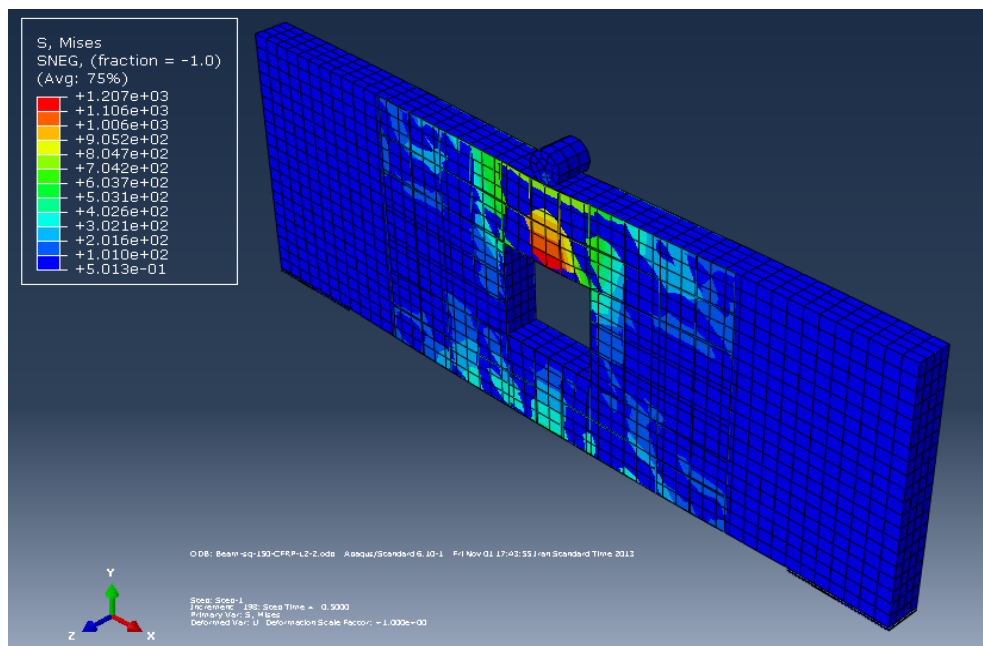
شکل ۴-۴۴: مدل کامل شده نمونه CFRP-Sq-150

نحوه ی مش بندی نمونه در نرم افزار آباکوس در شکل ۴-۴۵ نمایش داده شده است.



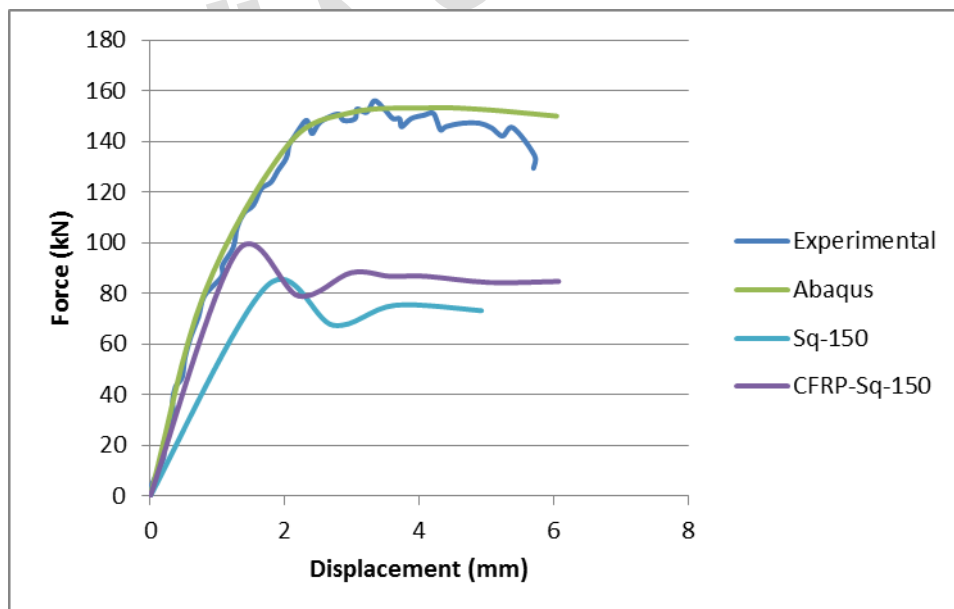
شکل ۴-۴۵: مدل مش بندی نمونه CFRP-Sq-150

برای تحلیل مدل از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. پس از تحلیل مدل نتایج زیر مشاهده شد. تنش ایجاد شده در نمونه CFRP-Sq-150 در شکل ۴-۴۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۶: تنش ایجاد شده در نمونه CFRP-Sq-150

نمودار بار-تغییر مکان نمونه CFRP-Sq-150 در شکل ۴-۴۷ نمایش داده شده است.

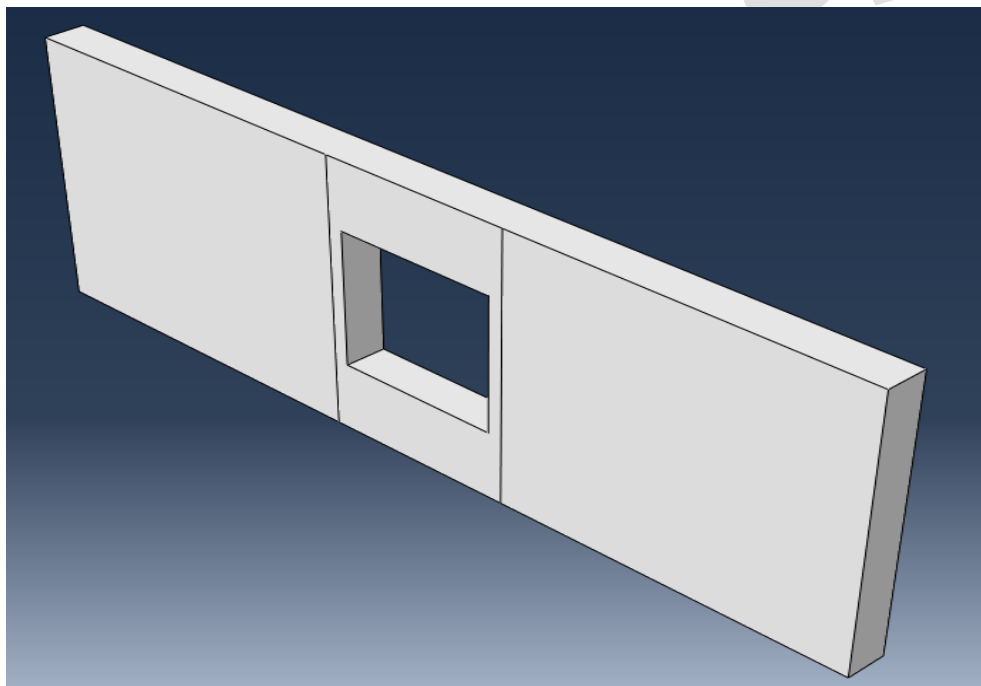


شکل ۴-۴۷: نمودار بار-تغییر مکان نمونه CFRP-Sq-150

نتایج نشان می دهد که با وجود اینکه وجود بازشو موجب کاهش ظرفیت باربری نمونه شده است، ورق CFRP تا حدودی این کاهش را جبران نموده و موجب افزایش ظرفیت باربری تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو شده است که در این نمونه مشاهده می شود که تیر در حالت تقویت شده بار در حدود ۹۶ kN را تحمل می کند.

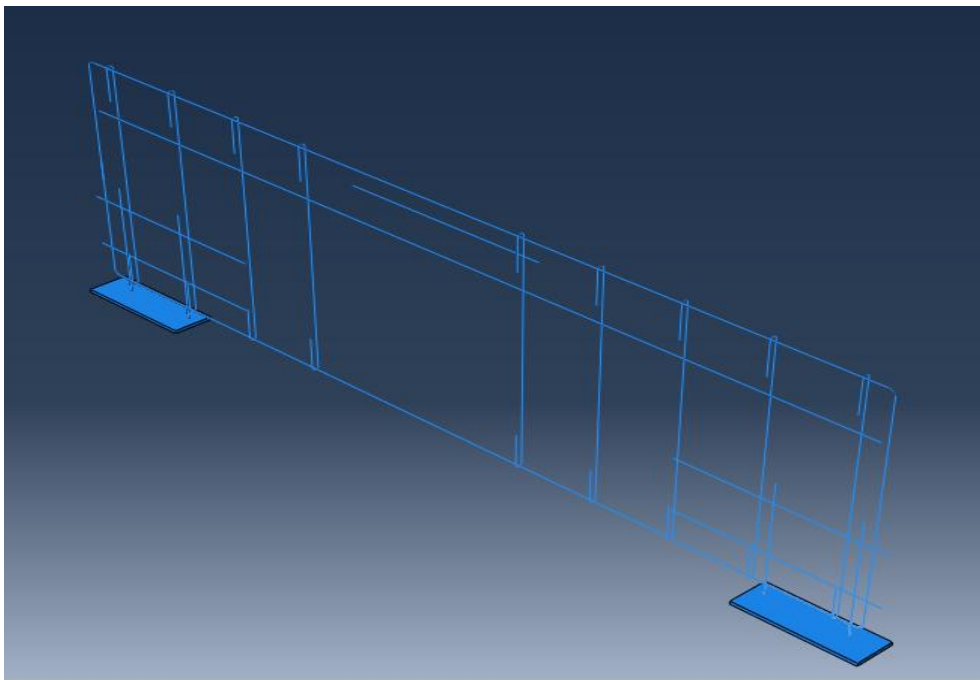
۴-۳-۱-۲- تیر با بازشوی مربعی تقویت شده با CFRP با ابعاد ۱۵۰ mm

در این مورد از نمونه Sq-200 استفاده می شود که در بخش قبل به بررسی عملکرد آن بدون وجود تقویت پرداختیم. در این مطالعه برای این نمونه نام CFRP-Sq-200 انتخاب شده است که در شکل ۴-۴۸ مدل بتن تعریف شده نمایش داده شده است.



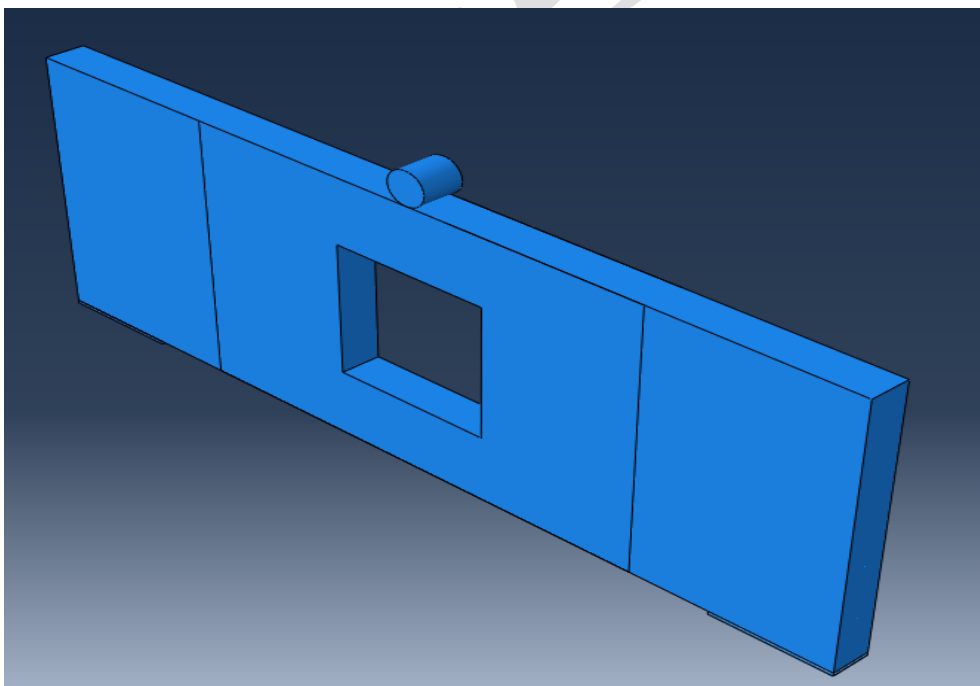
شکل ۴-۴۸: مدل آباکوس نمونه CFRP-Sq-200

در شکل ۴-۴۹ نحوه ی میلگرد گذاری در نمونه CFRP-Sq-200 در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



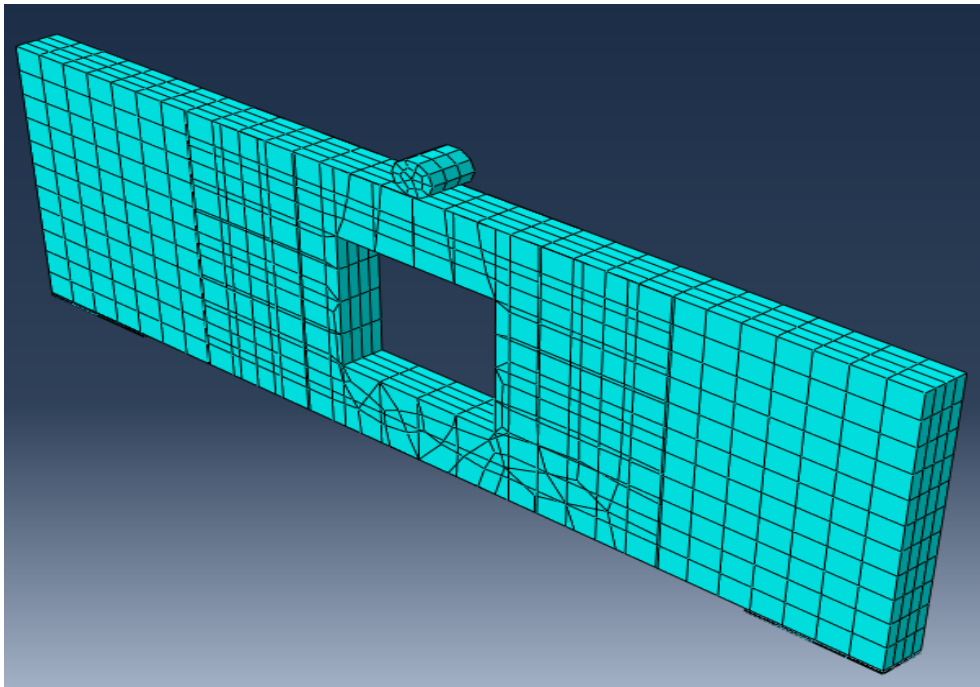
شکل ۴-۴۹: میلگردگذاری نمونه CFRP-Sq-200

در شکل ۴-۵۰ مدل کامل شده تیر بتنی در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



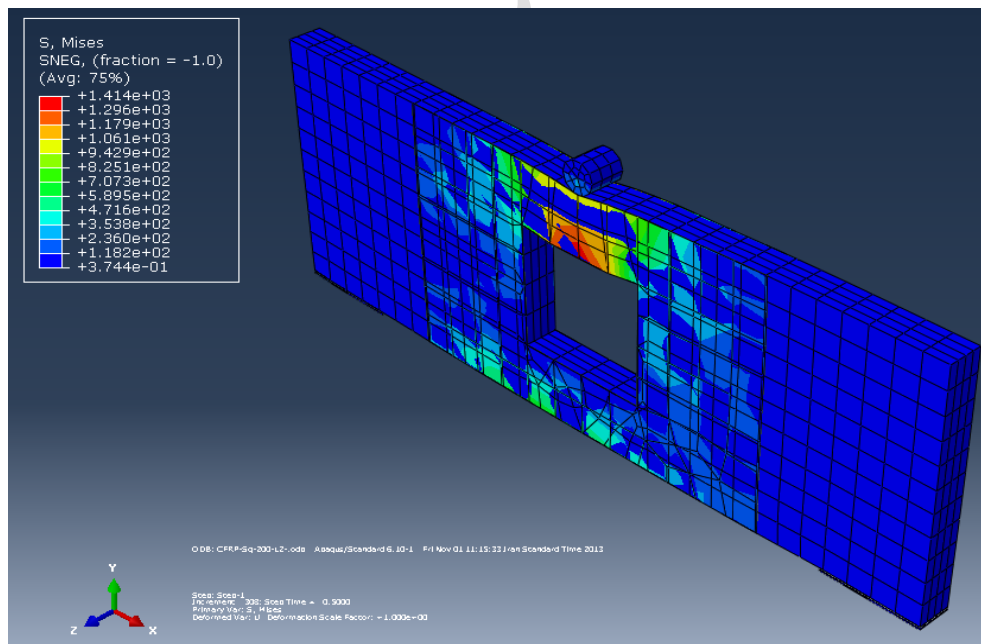
شکل ۴-۵۰: مدل کامل شده نمونه CFRP-Sq-200

نحوه ی مش بندی نمونه در نرم افزار آباکوس در شکل ۴-۵۱ نمایش داده شده است.



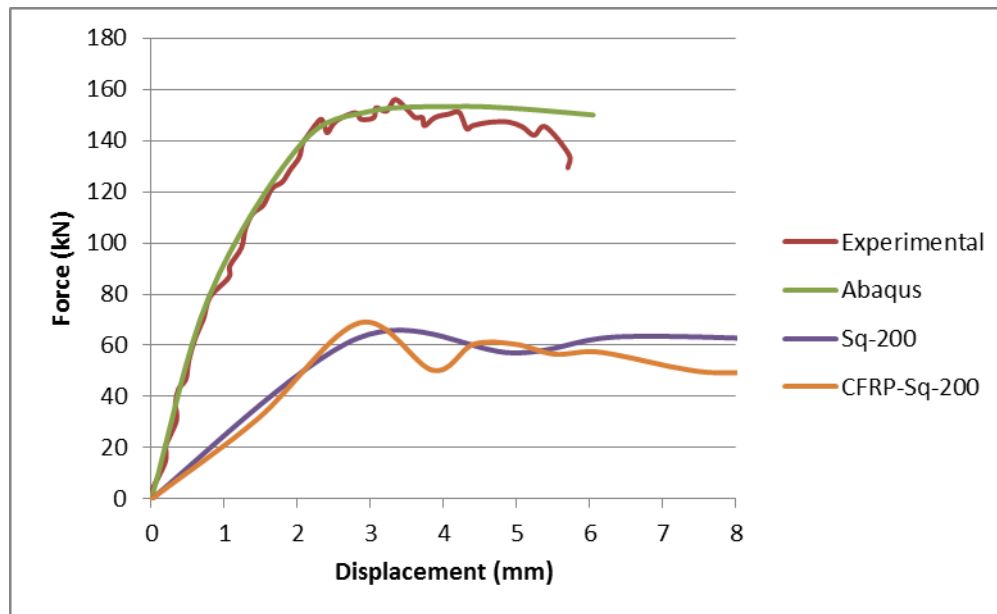
شکل ۴-۵۱: مدل مش بندی نمونه CFRP-Sq-200

برای تحلیل مدل از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. پس از تحلیل مدل نتایج زیر مشاهده شد. تنش ایجاد شده در نمونه CFRP-Sq-200 در شکل ۴-۵۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵۲: تنش ایجاد شده در نمونه CFRP-Sq-200

نمودار بار-تغییر مکان نمونه CFRP-Sq-200 در مدل آباکوس در شکل ۴-۵۳ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۵۳: نمودار بار-تغییر مکان نمونه CFRP-Sq-200

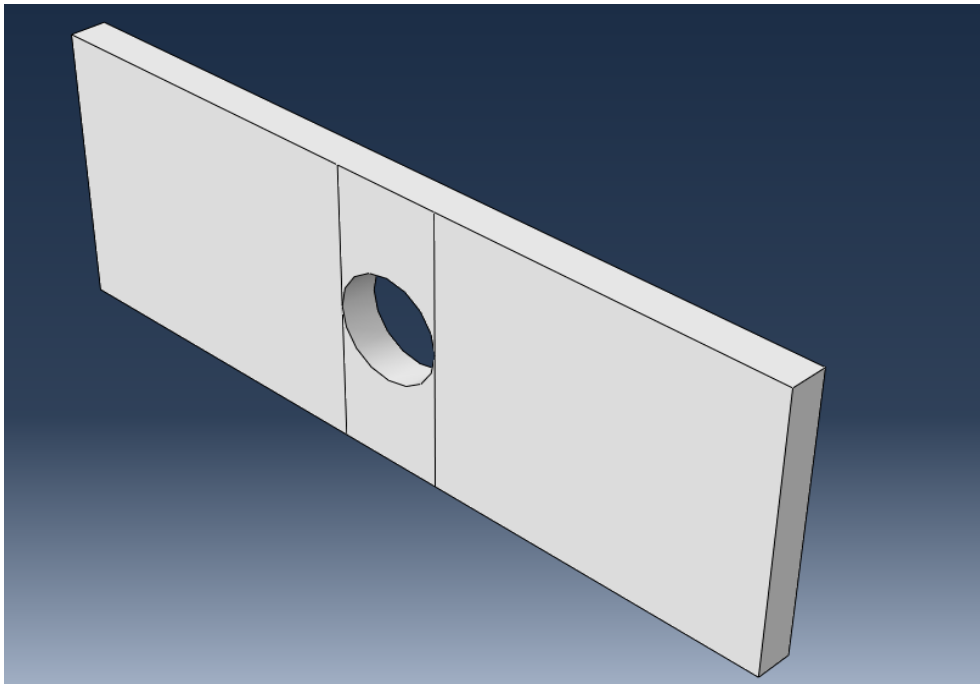
با توجه به نتایج می توان گفت که با وجود اینکه وجود بازشو موجب کاهش ظرفیت باربری نمونه شده است، ورق CFRP تا حدودی این کاهش را جبران نموده و موجب افزایش ظرفیت باربری تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو شده است که در این نمونه، تیر در حالت تقویت شده بار در حدود ۶۸ kN را تحمل می کند.

۴-۳-۲- تیر عمیق بتن مسلح با بازشو دایره ای تقویت شده با CFRP

برای میزان اثر ورق CFRP بر تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشوی دایره ای، یک لایه ورق CFRP با مشخصات ذکر شده در دورتادور بازشو به شکل U استفاده شده است. برای بررسی بیشتر اثر تقویت از دو نمونه دایره ای استفاده شده است.

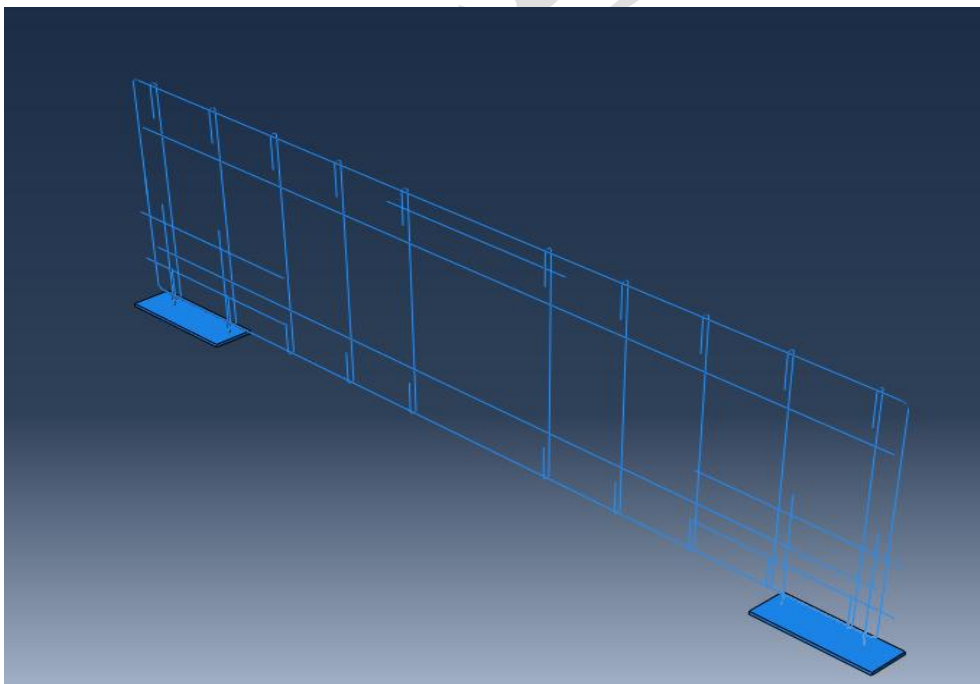
۴-۳-۲-۱- تیر با بازشوی دایره ای تقویت شده با CFRP با قطر ۱۵۰ mm

در این بخش از نمونه C-150، که در بخش قبل بدون تقویت مورد بررسی قرار گرفت استفاده شده است. در این مطالعه برای این نمونه نام CFRP-C-150 انتخاب شده است که در شکل ۴-۵۴ مدل بتن تعریف شده نمایش داده شده است.



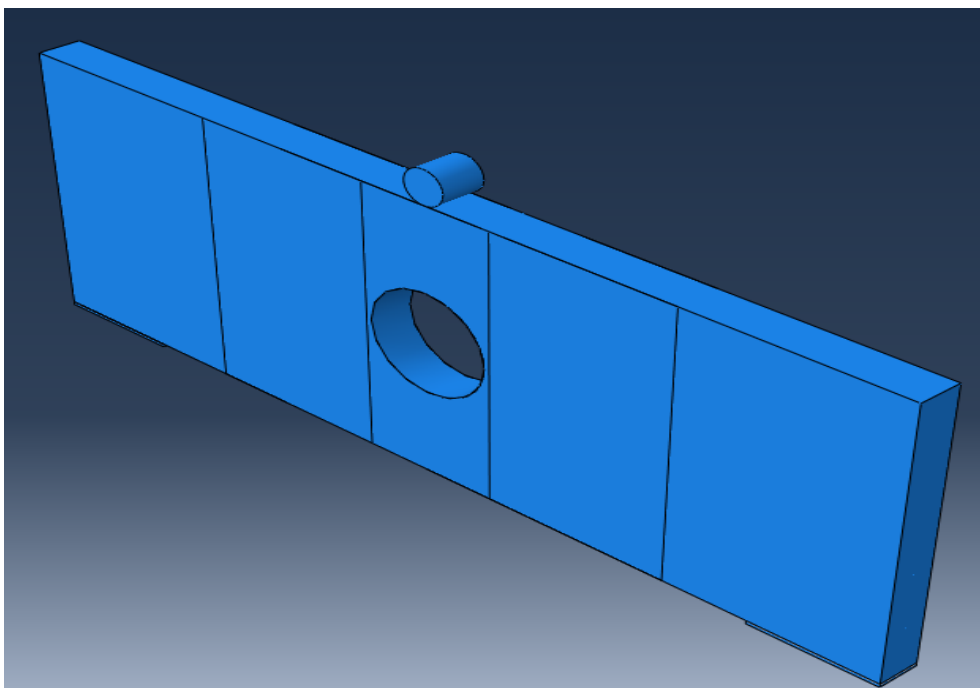
شکل ۴-۵۴: مدل آباکوس نمونه CFRP-C-150

در شکل ۴-۵۵ نحوه ی میلگرد گذاری نمونه CFRP-C-150 نمایش داده شده است.



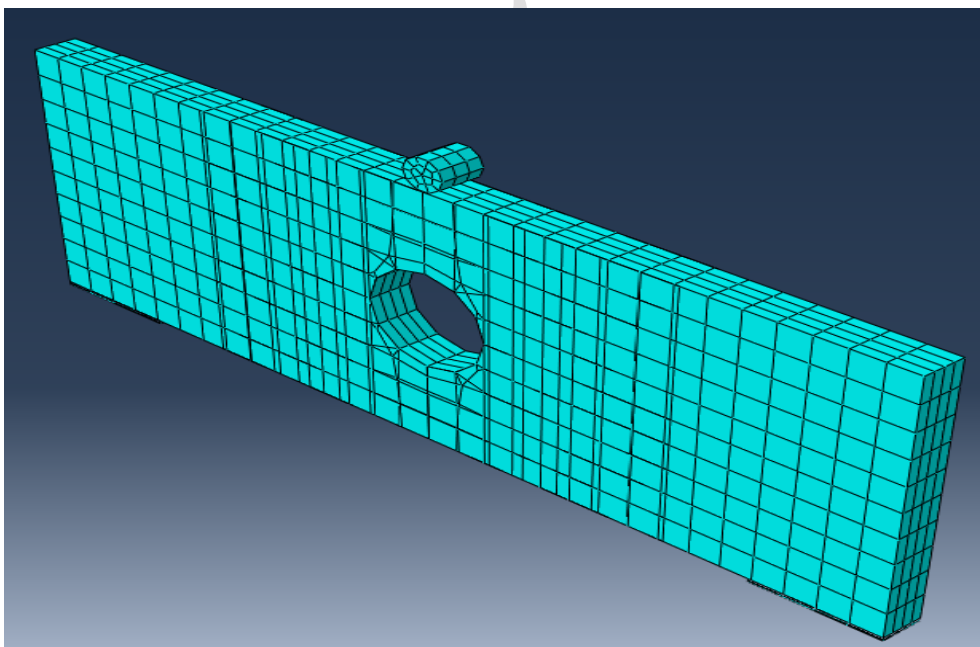
شکل ۴-۵۵: نحوه ی میلگرد گذاری نمونه CFRP-C-150

در شکل ۴-۵۶ مدل کامل شده تیر بتنی در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



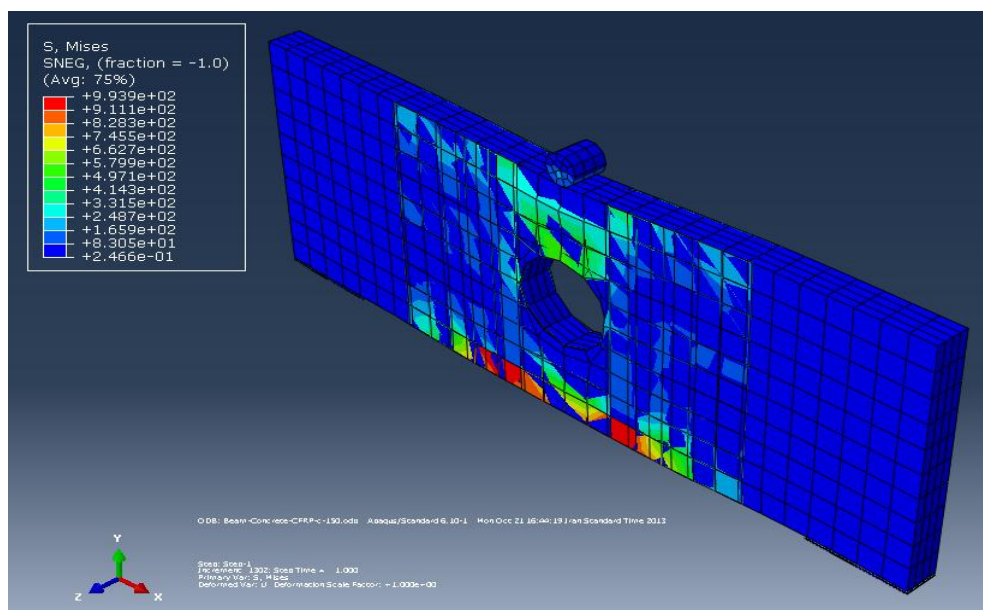
شکل ۴-۵۶: مدل کامل شده نمونه CFRP-C-150

نحوه ی مش بندی نمونه در نرم افزار آباکوس در شکل ۴-۵۷ نمایش داده شده است.



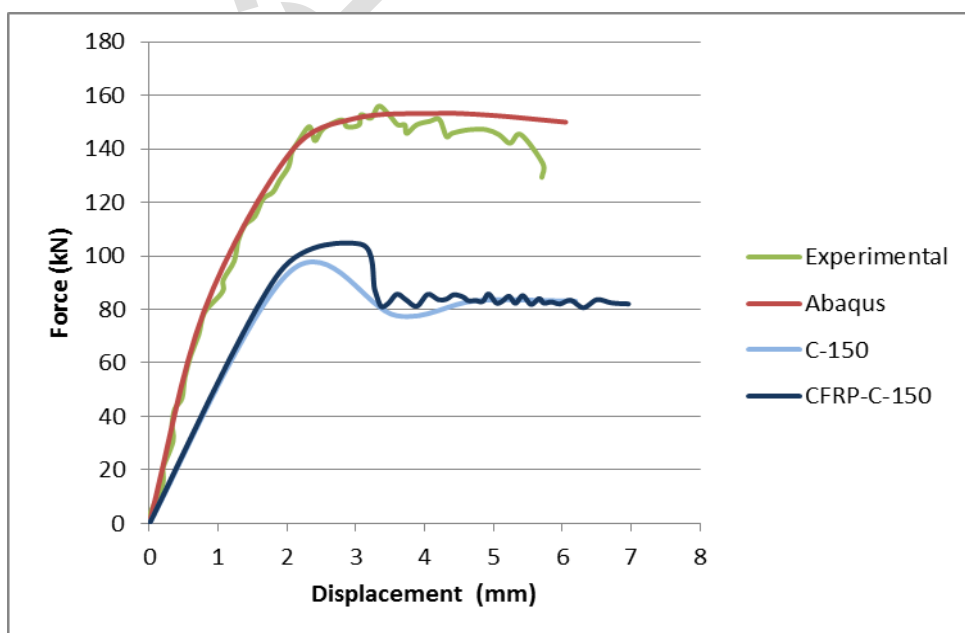
شکل ۴-۵۷: مدل مش بندی نمونه CFRP-C-150

برای تحلیل مدل از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. پس از تحلیل مدل نتایج زیر مشاهده شد. تنش ایجاد شده در نمونه CFRP-C-150 در شکل ۴-۵۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵۸: تنش ایجاد شده در نمونه CFRP-C-150

نمودار بار-تغییر مکان نمونه CFRP-C-150 در مدل آباکوس در شکل ۴-۵۹ نمایش داده شده است.

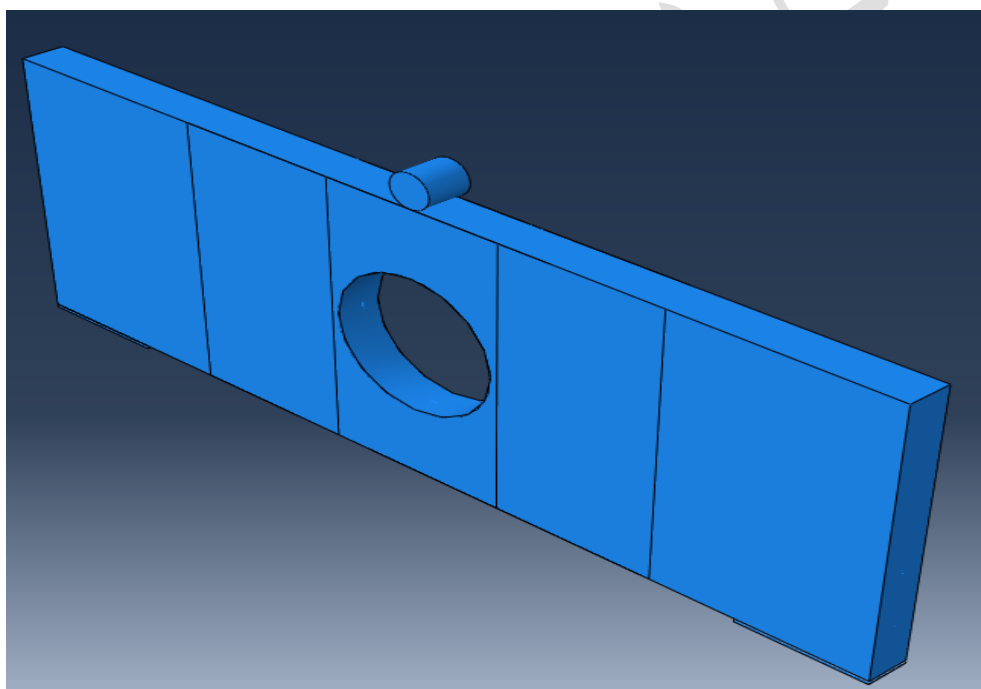


شکل ۴-۵۹: نمودار بار-تغییر مکان نمونه CFRP-C-150

نتایج نشان می دهد که با وجود اینکه وجود بازشو موجب کاهش ظرفیت باربری نمونه شده است، ورق CFRP تا حدودی این کاهش را جبران نموده و موجب افزایش ظرفیت باربری تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو شده است که در این نمونه مشاهده می شود که تیر در حالت تقویت شده بار در حدود ۱۰۴ kN را تحمل می کند.

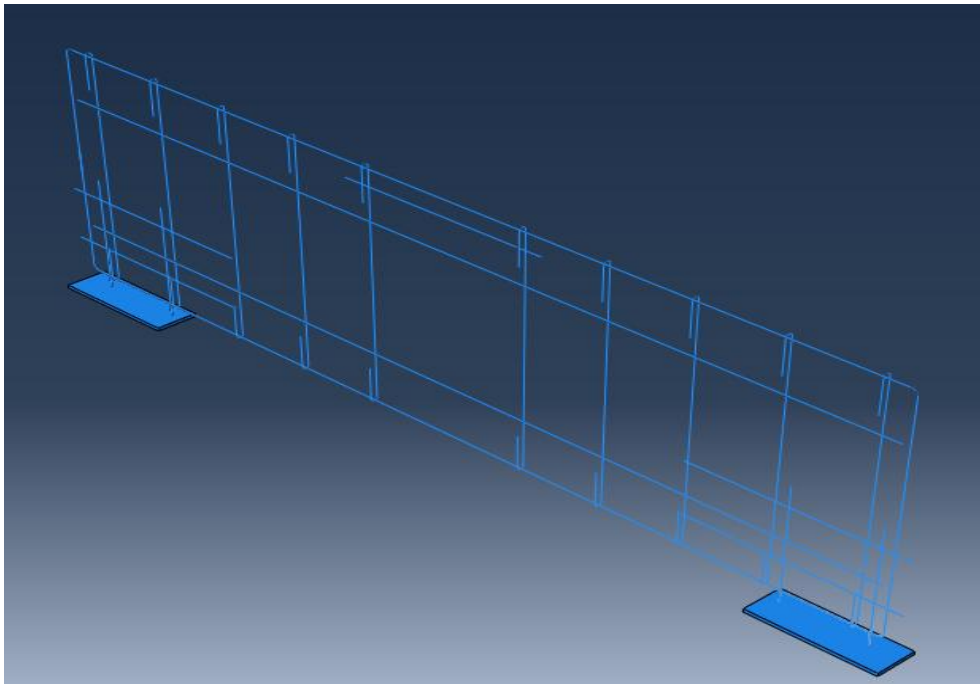
۴-۳-۲- تیر با بازشوی دایره ای تقویت شده با CFRP با قطر ۲۰۰ mm

در این بخش از نمونه Sq-200، که در بخش قبل بدون تقویت مورد بررسی قرار گرفت استفاده شده است. در این مطالعه برای این نمونه نام CFRP-C-200 انتخاب شده است که در شکل ۴-۶۰ مدل بتن تعریف شده نمایش داده شده است.



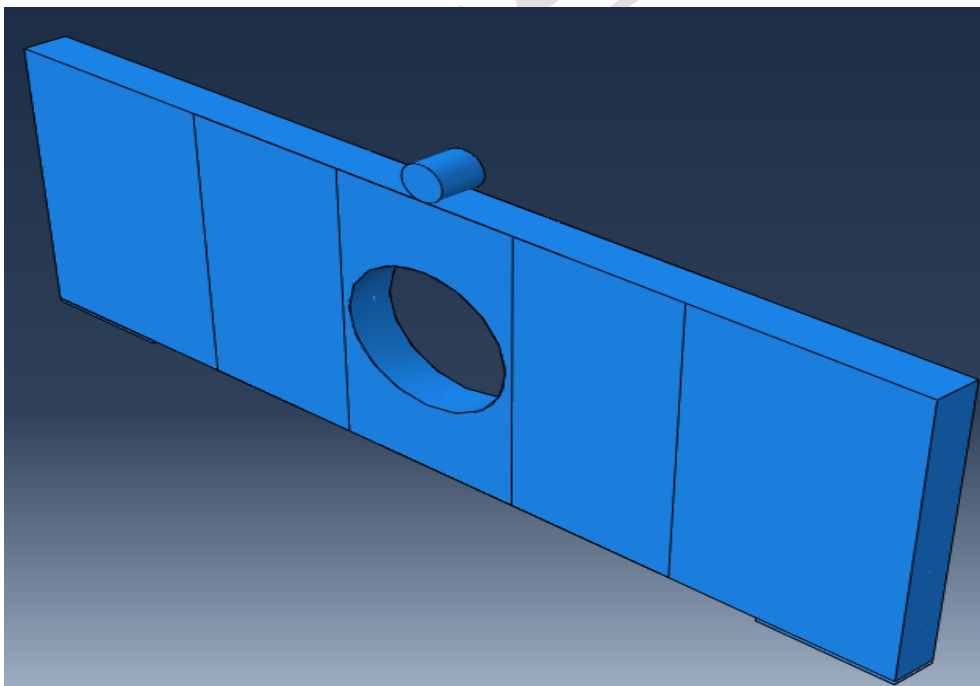
شکل ۴-۶۰: مدل نمونه CFRP-C-200

در شکل ۴-۶۱ نحوه ی میلگرد گذاری در داخل نمونه CFRP-C-200 نمایش داده شده است.



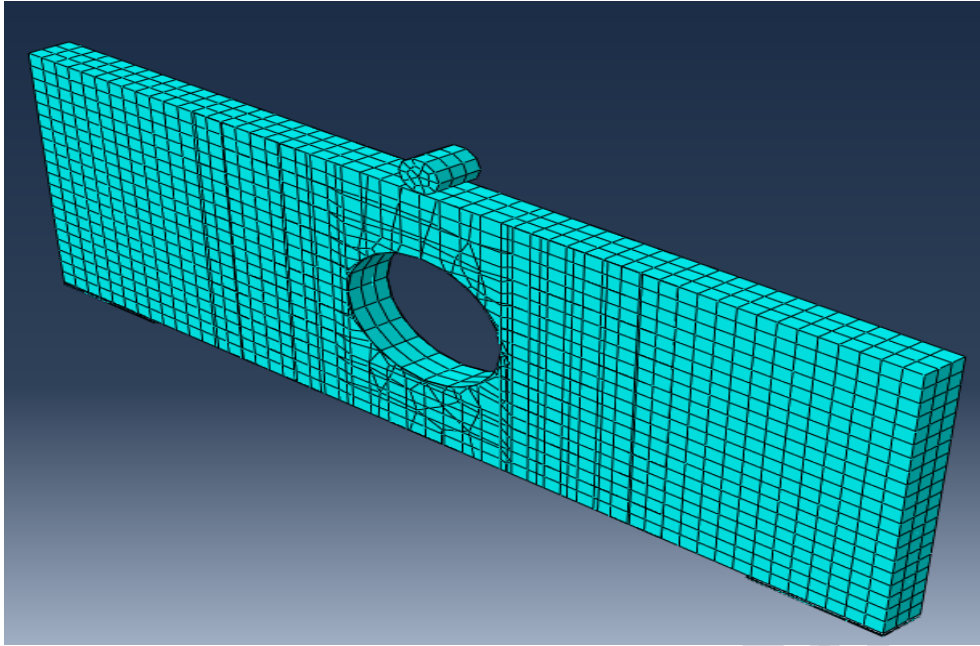
شکل ۴-۶۱: نحوه ی میلگرد گذاری نمونه CFRP-C-200

در شکل ۴-۶۲ مدل کامل شده تیر بتنی در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.



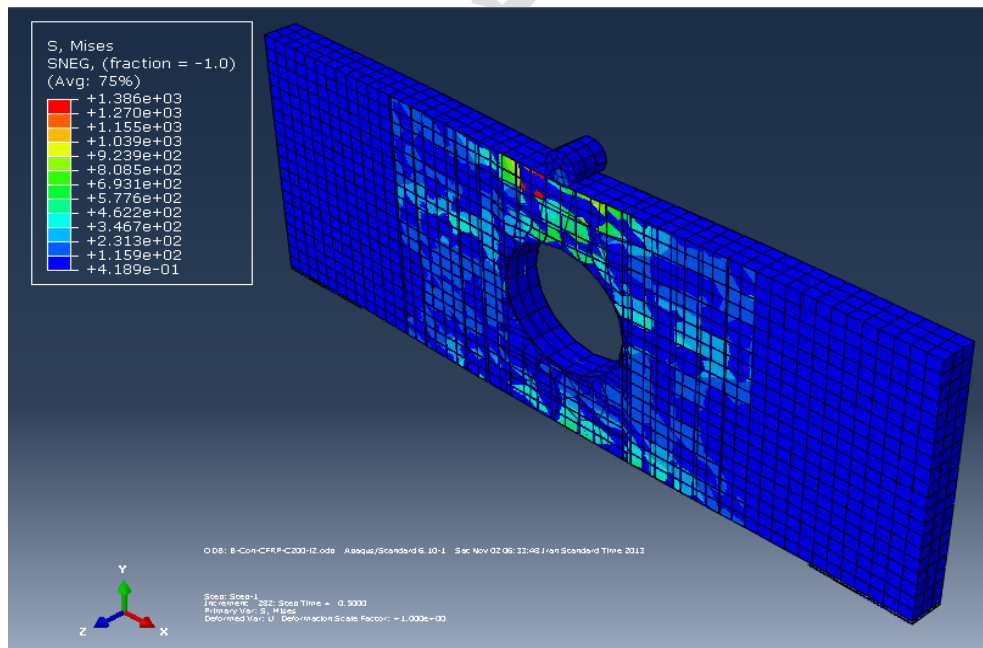
شکل ۴-۶۲: مدل کامل شده نمونه CFRP-C-200

نحوه ی مش بندی نمونه CFRP-C-200 در شکل ۴-۶۳ نمایش داده شده است.



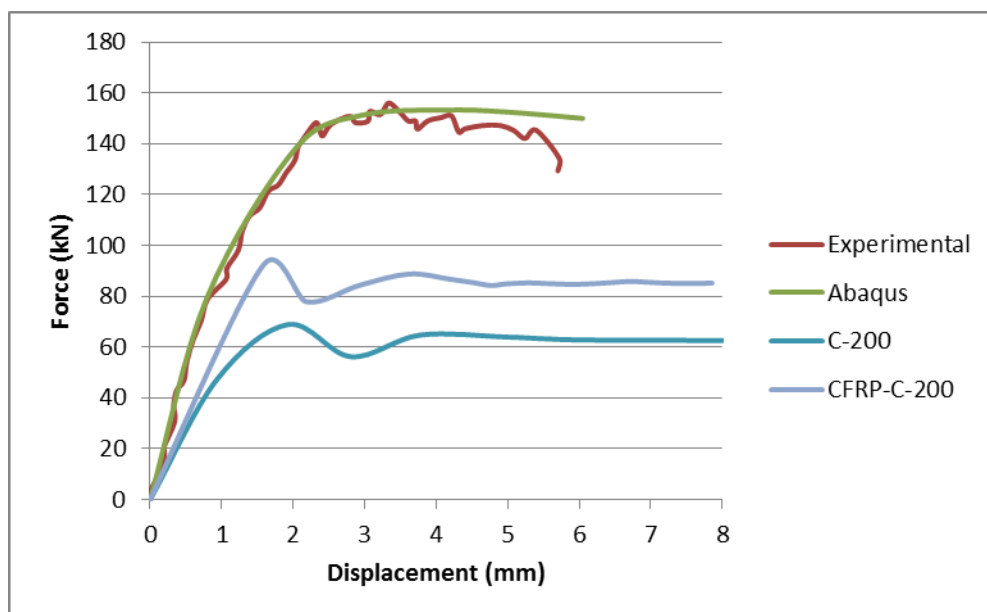
شکل ۴-۶۳: مدل مش بندی نمونه CFRP-C-200

برای تحلیل مدل از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. پس از تحلیل مدل نتایج زیر مشاهده شد. تنش ایجاد شده در نمونه CFRP-C-200 در شکل ۴-۶۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶۴: تنش ایجاد شده نمونه CFRP-C-200

نمودار بار-تغییر مکان نمونه CFRP-C-200 در مدل آباکوس در شکل ۴-۶۵ نمایش داده شده است.

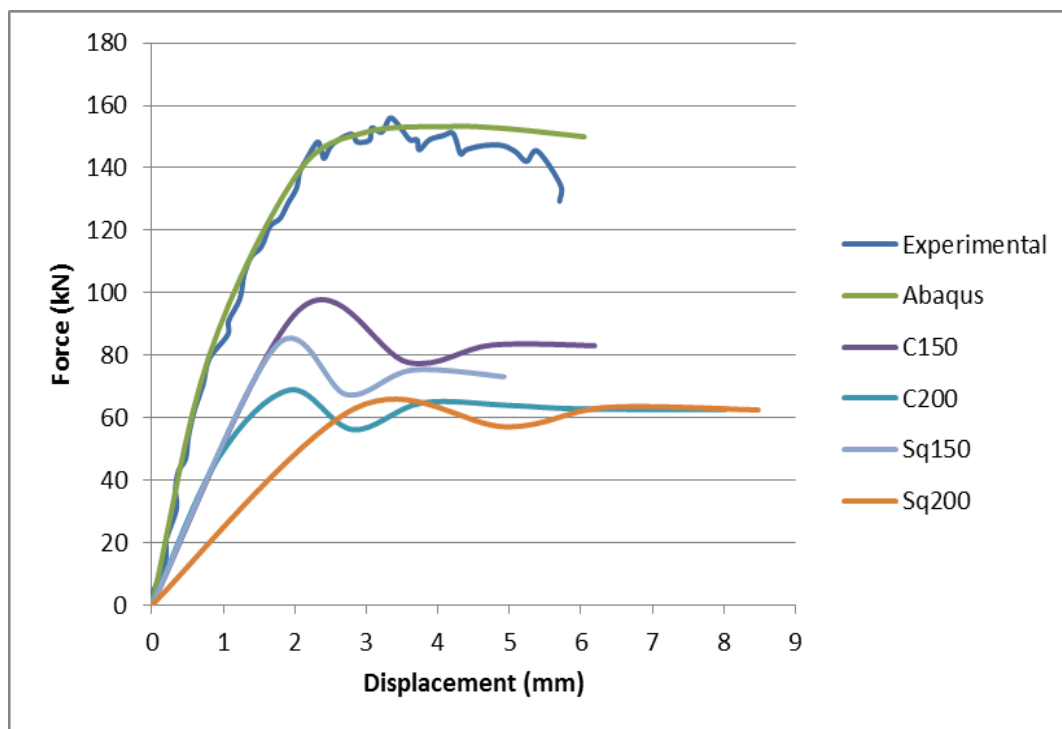


شکل ۴-۶۵: نمودار بار-تغییر مکان نمونه CFRP-C-200

نتایج نشان می دهد که با وجود اینکه وجود بازشو موجب کاهش ظرفیت باربری نمونه شده است، ورق CFRP تا حدودی این کاهش را جبران نموده و موجب افزایش ظرفیت باربری تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو شده است که در این نمونه مشاهده می شود که تیر در حالت تقویت شده بار در حدود ۹۲ kN را تحمل می کند.

۴-۴ - مقایسه تیر عمیق بتنی ساده و تیرهای عمیق بتنی دارای بازشو

در نمودار ۴-۶۶ تیر عمیق بتن مسلح ساده بدون بازشو و تیر بتن مسلح با بازشوی مربعی و بازشوی دایره ای نمایش داده شده است.

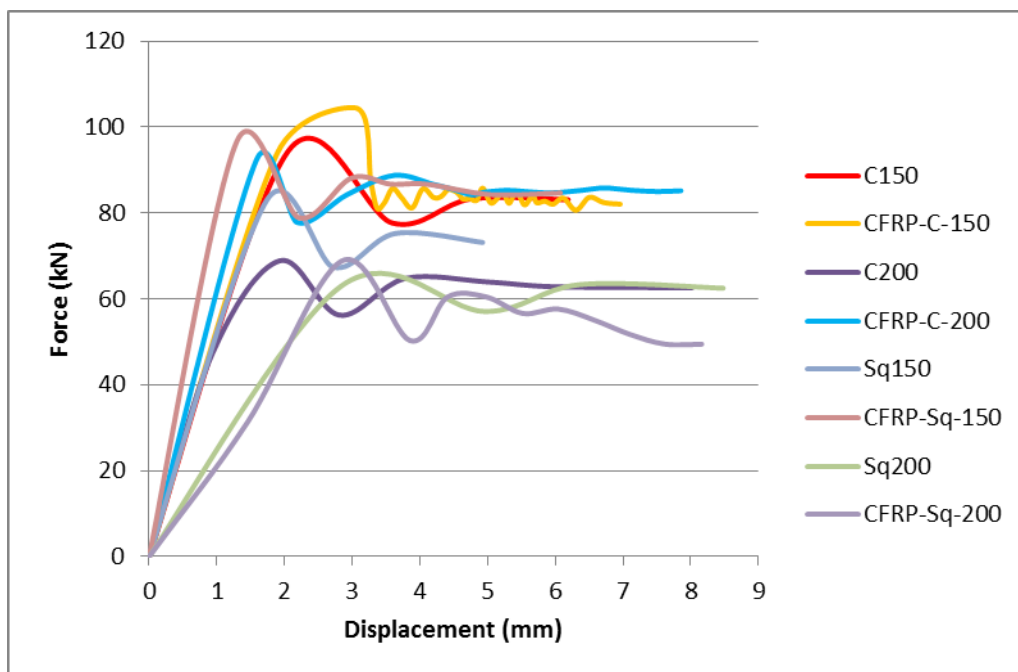


شکل ۴-۶۶: نمودار مقایسه بار-تغییر مکان تیر عمیق بتنی ساده و تیرهای عمیق با بازشو

با توجه به نتایج تحلیل در نمودارها، مشاهده می شود که تیر شاهد تقریباً نیروی ۱۵۳ kN، نمونه C-150 مقدار ۹۴ kN، نمونه Sq-150 مقدار نیروی ۸۳ kN، نمونه C-200 مقدار نیروی ۶۸ kN و نمونه Sq-200 مقدار نیروی ۶۲ kN را تحمل کرده اند. با توجه به مقادیر این نتایج، نمونه C-150 نسبت به تیر شاهد ۳۸ درصد و نمونه Sq-150 نسبت به تیر شاهد ۴۵ درصد و نمونه C-200 نسبت به تیر شاهد ۵۳ درصد و نمونه Sq-200 نسبت به تیر شاهد ۵۵ درصد کاهش ظرفیت داشته اند.

۴-۵- مقایسه تیر بتنی عمیق با بازشو و تقویت شده با CFRP

در شکل ۴-۶۷ نمودار بار-تغییر مکان نمونه هایی با بازشو و تقویت شده با CFRP نمایش داده شده است.

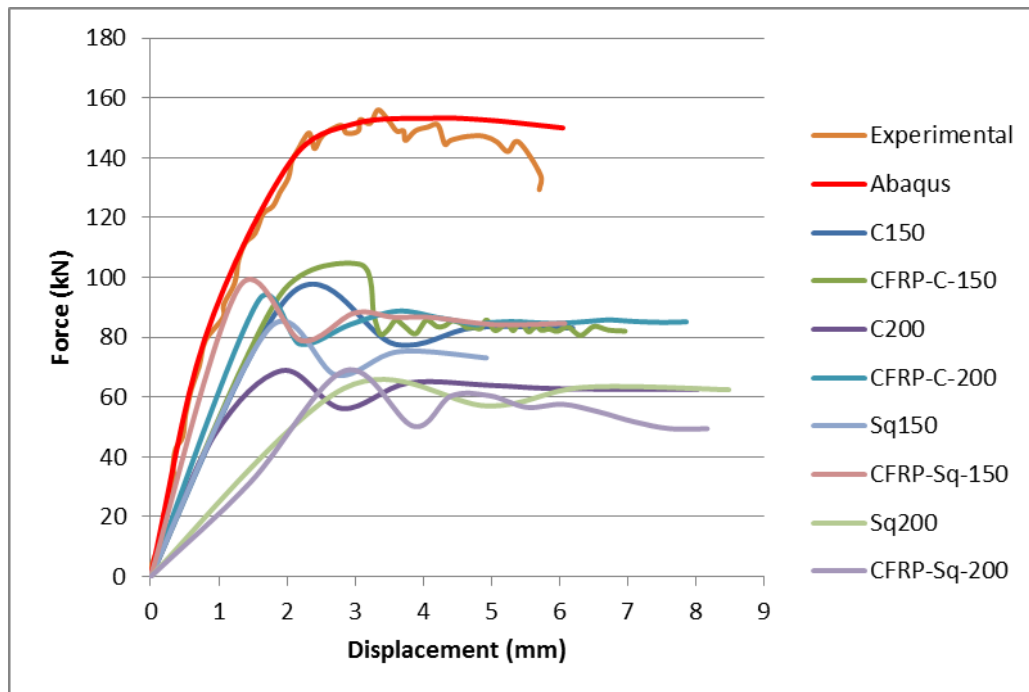


شکل ۴-۶۷: نمودار بار تغییر مکان نمونه های با بازشو و تقویت شده با CFRP

مقادیر به دست آمده از نتایج تحلیل و مقایسه آن ها نشان می دهد که نمونه CFRP-C-150 نسبت به حالت بدون تقویت آن ۹/۶ درصد و نمونه CFRP-Sq-150 نسبت به حالت بدون تقویت آن ۱۳/۵ درصد و نمونه CFRP-C-200 نسبت به حالت بدون تقویت آن ۲۶ درصد و نمونه CFRP-Sq-200 نسبت به حالت بدون تقویت آن ۹ درصد افزایش ظرفیت داشته اند. در نگاهی کلی تر نتایج نشان می دهد که اثر ورق CFRP در تقویت تیرهای عمیق بتن مسلح با بازشوی دایره ای بیشتر بوده و عملکرد بهتری نسبت به بازشوی مربعی دارند.

۴-۶- مقایسه کلی نمونه ها

در شکل ۴-۶۸ نمودار تیر بتنی عمیق با بازشو بدون تقویت و تقویت شده با CFRP نمایش داده شده است.



شکل ۴-۶۸: نمودار مقایسه بار-تغییر مکان کل نمونه ها

فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتایج

در این تحقیق، تیر بتنی عمیق با بازشو بدون تقویت و همراه با تقویت CFRP مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی رفتار تیر مدل آزمایشگاهی تیر بتنی عمیق با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل سازی شده و نتایج آزمایشگاهی و مدل نرم افزای با استفاده از نرم افزار آباکوس با تقریب بسیار نزدیک به هم شبیه سازی شدند. بعد از تایید مدل با نرم افزار آباکوس در داخل تیر بتنی بازشوهایی به صورت مربع و دایره ای در مرکز تیر بتنی عمیق قرار داده شد. برای هر کدام از بازشوها دو اندازه ی متفاوت ۱۵۰ و ۲۰۰ میلیمتر مورد مطالعه قرار گرفت که در ادامه به مقایسه و شرح و تفسیر نتایج پرداخته می شود:

۱- تیر های عمیق بتن مسلح با بازشوی دایره ای عملکرد بهتری را نسبت به تیر عمیق بتن مسلح با بازشوی مربعی از خود نشان داده است.

۲- معمولاً ضعف نمونه ها به دلیل ترک بین وجه داخلی تکیه گاه و ناحیه تحت فشار در زیر محل بارگذاری است. پس از تقویت به سبب اثر محصور کنندگی ورق CFRP پخش و رشد ترک در مقایسه با حالت بدون تقویت با افزایش بار کاهش می یابد، طوری که بارهای بزرگتری را برای نفوذ ترک بحرانی به قسمت فوقانی نمونه ها نیاز می باشد، و این امر سبب افزایش بار نهایی می شود.

۳- نمودارهای تیر تقویت شده با یک لایه ورق CFRP نزدیک به نمونه های بدون تقویت می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که استفاده از یک لایه ورق CFRP تاثیر کمی در افزایش ظرفیت باربری داشته و جهت افزایش ظرفیت باربری تا رسیدن به میزان ظرفیت باربری لازم، جهت برطرف نمودن ضعف تیر عمیق بتن مسلح دارای بازشو، می بایست از تعداد لایه های CFRP بیشتر و با ضخامت های بیشتر استفاده نمود. افزایش لایه های ورق تا اندازه معینی سبب کنترل بهتر رشد ترک ها شده و ظرفیت باربری نمونه ها را افزایش می دهد.

۴- همچنین نتایج نشان می دهد که چسباندن ورق CFRP در نمونه ها موجب افزایش سختی نمونه ها خواهد شد که این موضوع سبب کاهش تغییر مکان تیر می شود و در صورت استفاده از تعداد لایه های بیشتر، تغییر مکان نمونه ها به طور قابل ملاحظه ای کاهش خواهد یافت.

۵- با تغییر ابعاد بازشو دایره ای و مربعی تاثیر کمی در باربری تیر بتنی عمیق مشاهده می شود. یکی از مواردی که به نظر موجب کاهش تاثیر ابعاد در ظرفیت باربری تیر بتنی عمیق شده است، مقدار کم این تفاوت می باشد و تفاوت اندازه بازشوها تنها ۵ سانتیمتر می باشد.

۶- در مورد نوع بازشوها می توان نتیجه گرفت که عملکرد بازشوهای دایره ای بهتر از بازشوهای مربعی بوده و توزیع تنش در گوشه های بازشوی مربعی به مراتب بیشتر از سایر نقاط بازشو می باشد و در گوشه ها تمرکز تنش بیشتر است. در حالی که، در بازشو های دایره ای توزیع تنش در تمامی بازشو یکسان است.

۷- در مورد نمونه های تقویت شده با CFRP با استفاده از نمودارها مشاهده می شود که افزایش کمی از مقاومت و شکل پذیری در تیر عمیق بتن مسلح با بازشو ایجاد می کند، و دلیل این تعداد لایه های استفاده شده در این مطالعه است که تنها یک لایه مورد استفاده قرار گرفته است.

۵-۲- پیشنهادات

برای بررسی های بیشتر و بهبود در رفتار تیر بتنی پیشنهاداتی ارائه می شود، که در زیر به چند مورد از آن اشاره می شود:

۱- برای بررسی رفتار تیر بتنی عمیق با بازشو و بدون تقویت بر روی تاثیر ابعاد بازشوی مربعی و دایره ای با ابعاد متفاوت بدون تقویت کار شود.

۲- علاوه بر به کار بردن باز شو در مرکز تیر بتنی می توان در نقاط دیگر تیر بتنی باز شو قرار داد و تاثیر آن را مورد مطالعه قرار داد.

۳- در مطالعه فوق آزمایش خمش یک نقطه ای مدل سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است، می توان از آزمایش دو نقطه ای و مدل سازی آن با نرم افزار برای مطالعه مورد بررسی قرار داد.

۴- در تقویت تیر بتنی عمیق با CFRP ابعاد آن را مورد مطالعه قرار داده و تاثیر اندازه ی CFRP بر روی افزایش مقاوت تیر بتنی عمیق مورد مطالعه قرار گیرد.

۵- تعداد لایه های تقویتی CFRP را می توان مورد مطالعه قرار داد. در این پروژه CFRP به کار برده شده در یک لایه به کار برده شده است.

منابع
پارس پروژه

منابع

- [۱] ایمان الیاسیان، "بررسی تقویت برشی تیر بتن آرمه با ورقه به روش اجزای محدود وبه صورت پارامتریک FRP" پایان نامه کارشناسی ارشد سازه دانشگاه یزد بهار ۱۳۸۴.
- [۲] محمد پناهی درچه و ابوالفضل عربزاده "پارامترهای موثر بر تقویت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح با استفاده از ورق های FRP" هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت ۱۳۸۸، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
- [۳] راهنمای روش ها و شیوه های بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود و جزئیات اجرایی، نشریه ۵۲۴ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.
- [۴] ولی جهانگیری و علیرضا خالو "بررسی رفتار تیرهای عمیق بتنی مسلح دارای بازشوی جان با استفاده از آنالیز اجزاء محدود" پنجمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت ۱۳۸۹، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- [۵] کامل ترین مرجع کاربردی ABAQUS، جلد اول، مهندس سهیل سروش نیا، مهندس نیما بهشتیان، نگارنده دانش، چاپ چهارم ۱۳۹۲.
- [6] D. Kachlakev, T. Miller, S. Yim, K. Chansawat, and T. Potisuk, "Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates", *Final Report SPR 316, Oregon Department of Transportation & Federal Highway Administration, USA*, 2001.
- [7] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI318R-02).
- [8] K. G. Hemanth, "Experimental and numerical studies on behavior of FRP strengthened deep beams with openings", *MSc thesis, Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Rourkela*, 2012.
- [9] V.P.V. Ramana, T. Kant, S.E. Morton, P.K. Dutta, A. Mukherjee, Y.M. Desai, "Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening", *Elsevier Journal, Composites: Part B 31 (2000) 461- 470*.
- [10] M.R.Islam, M.A.Mansur, M.Maalej, "Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems", *Department of Civil Engineering, Chittagong University of Engineering and Technology, Bangladesh, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore*, 2005.
- [11] Y.T. Obaidat, S. Heyden, O. Dahlblom, G. Abu-Farsakh and Y. Abdel-Jawad, "Retrofitting of Reinforced Concrete Beams using Composite Laminates", *Master Thesis, Jordan University of Science and Technology*. 2007.
- [12] N. Pannirselvam, P.N. Raghunath and K. Suguna, "Strength Modeling of Reinforced Concrete Beam with Externally Bonded Fiber Reinforcement Polymer

Reinforcement", *American J. of Engineering and Applied Sciences* 1 (3): 192-199, 2008.

[13] Sangdon Park, Riyad S. Aboutaha, "Strut-and-Tie Method (STM) for CFRP Strengthened Deep RC Members", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2009.

[14] Tamer El Maaddawy and Sayed Sherif, "FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings", *Structural Engineering Dept., Al-Wasl Al-Gadeed Consultants, Dubai, United Arab Emirates*, 2009.

[15] N. Dash, "Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Glass Fiber Reinforced Polymer Composite", *Department of Civil Engineering NIT Rourkela - 769008*, 2009.

[16] Mohammad Mohammadhassani, MohdZaminJumaat, Ashraf Ashour and Mohameed Jameel, "Failure modes and serviceability of high strength self-compacting concrete deep beams", *Department of Civil Engineering, University of Malaya, Malaysia, Department of Civil Engineering, University of Bradford, UK*, 2011.

[17] S.C. Chin, N. Shafiq and M.F. Nuruddin "Strengthening of RC Beams Containing Large Opening at Flexure with CFRP laminates", *World Academy of Science, Engineering and Technology* 60 2011.

[18] Haider M. Alsaeq, "Effects of Opening Shape and Location on the Structural Strength of R.C. Deep Beams with Openings", *World Academy of Science, Engineering and Technology* 78 2013

[19] Sayed, A., Wang, X., and Wu, Z. (2013). "Modeling of Shear Capacity of RC Beams Strengthened with FRP Sheets Based on FE Simulation." *J. Compos. Constr.*, 17(5), 687–701.

[20] P. Jayajothi,* R. Kumutha and K. Vijai, "Finite element analysis of FRP strengthened RC beams using ANSYS", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)* Vol. 14, No. 4 (2013) Pages 631-642.

[21] R. Balamuralikrishnan, C.A. Jeyasehar, "Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Fabrics", *The Open Civil Engineering Journal*, 3(2009) 102-9.

[22] A.M. Ibrahim, M.S. Mahmood, "Finite element modeling of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates", *European Journal of Scientific Research*, No. 4, 30 (2009) 526-41.

[23] Damian I. Kachlakev, "Finite Element Analysis and Model Validation of Shear Deficient Reinforced Concrete Beams Strengthened With GFRP Laminates", *United States Department of Transportation, Federal Highway Administration*.

[24] ABAQUS Theory Manual, version 6.10, Hibbitt Karlson & Sorensen, Inc 2011.

[25] Global Seismic Hazard Program, Ria Novosti, 2011.

Abstract

This study investigates and compares numerical and nonlinear analysis of Reinforced Concrete deep beams with opening, RC deep beams with opening strengthened by FRP and RC deep beams without opening by ABAQUS FE software. By using nonlinear FEM, 9 specimens of RC deep beams with simple support under intensive load are modelled and the affection of FRP laminate to ultimate strength of RC deep beams with opening are studied. To this purpose, use one sepeciment of RC deep beam as control beam, 4 specimens of RC deep beams with opening (circular and square) without strengthening and 4 specimens of RC deep beams with opening (circular and square) strengthened by FRP laminates.

Therefore strengthening by FRP laminates around the openings, to increase the capacity of RC deep beams are so effective. FE modelling of the specimens is done with ABAQUS FE software.

Keywords: Deep Beams, Reinforced Concrete, Opening, Finite Element, FRP, Nonlinear Analysis.