ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

زمان پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۳/۲۷ شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

بررسی رفتار تیرهای عمیق دوسرگیردار

ابوالفضل عرب‌زاده[۱]، بهداد راسخ[۲]

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی غیر انتفاعی-غیر دولتی بنیان

چکیده

به‌طورکلی تیرهای عمیق کاربرد فراوانی به‌عنوان شاه‌تیرهای حمال و سرپوش شمع‌ها و همچنین در دیوار ساختمان‌های بلند دارند. تیر عمیق بتنی مسلح مطابق تعریفی که در آیین‌نامه‌ها و مقالات مختلف آمده است به تیری گفته می‌شود دارای نسبت دهانه خالص به عمق کل کمتر از ۲/۵ برای دهانه‌های پیوسته و ۱/۲۵ برای دهانه‌های ساده می‌باشد. با توجه به نوع تکیه‌گاه تیرهای عمیق (تیرهای عمیق دوسر ساده، دوسرگیردار و پیوسته)، رفتار و شکست حاکم بر هریک از آن‌ها متفاوت است. با توجه به اهمیت و کاربرد تیرهای عمیق دوسرگیردار، در این تحقیق رفتار خمشی و برشی این‌گونه تیرها تحت اثر مقادیر مختلف بار ثقلی متمرکز در وسط دهانه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای بررسی شکست‌های رخ داده تحت اثر بارهای برشی و خمشی و نیز بررسی تأثیر آرایش میلگردها تعداد دو نمونه تیر عمیق بتنی متفاوت تحت اثر مقادیر متفاوت بار توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس[۱] مدل‌سازی شده‌اند. مشخص شد که برای یک‌بار ثابت میزان تغییرمکان تیرعمیق دوسرگیردار نسبت به تیر عمیق ساده کمتر می‌باشد. میزان تغییرمکان در بعد قائم در تماس با تکیه‌گاه صفر می‌باشد. مکانیزم شکست در تیر عمیق دوسرگیردار شبیه به تیر عمیق ساده بوده با این تفاوت که ترک‌های ایجاد شده برشی به تکیه-گاه‌ها نزدیک‌تر شده و ترک‌ها نسبت به افق با زاویه بزرگ‌تری اتفاق افتاده است. همچنین مشاهده گردید که میزان ترک‌های ایجادشده اطراف آرماتورهای لاغر بزرگ‌تر است و تراکم میلگرد باعث کاهش میزان و تعداد ترک‌ها می‌گردد.

کلمات کلیدی: تیر عمیق مسلح، روش‌های اجزاء محدود، تیر عمیق دوسرگیردار

[۱] Abaqus

۱- مقدمه

تیرهای عمیق ازجمله اعضای سازه‌های بتنی هستند که در ساختمان‌های بلند، دیوارهای مخازن سیلوهای مستطیلی، دیافراگم کف، دیوارهای برشی، دال‌ها، سکوهای دریایی، سدها، پل‌ها و غیره کاربرد دارند. تیرهای عمیق به لحاظ تکیه‌گاهی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- تیرهای عمیق دوسر ساده
- تیرهای عمیق دوسرگیردار
- تیرهای عمیق پیوسته

رفتار و شکست حاکم بر هریک از آن‌ها با توجه به نوع تکیه‌گاهشان متفاوت است. بررسی و شناسایی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح نیز به‌عنوان یکی از اعضای مهم سازه‌ای با نسبت دهانه ارتفاع کوچک یکی از متداول‌ترین موضوعات مهم در زمینه سازه‌های بتن مسلح است. با توجه به تحقیقات و نتایج آزمایش‌هایی مشاهده می‌شود تیرهای عمیق دوسرگیردار دارای مقاومت و پایداری بیشتری نسبت به تیرهای عمیق دوسر ساده و پیوسته هست. با بررسی‌های انجام‌گرفته و نتایج حاصل از آن، پدیده شکست در این‌گونه تیرها به‌صورت‌های خمشی-برشی- موضعی هست. درترهای عمیق دوسرگیردار فروپاشی خمشی کامل مشاهده نشده و فروپاشی به‌صورت ترکیبی از خمش و برش بوده است. بررسی رفتار غیرخطی سازه‌ها به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری و تعیین سطح عملکرد سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. به دلیل ابعاد تیرهای عمیق و همچنین محدودیت هزینه و زمان و پیچیدگی اعمال شرایط مرزی در آزمایشگاه بهتر است از نرم‌افزار تحلیل غیرخطی استفاده شود.

تیرهای عمیق بتن مسلح به‌طورمعمول در ساختمان‌های بلندمرتبه، سازه‌های دریایی و ساحلی، شاه‌تیرهای انتقال‌دهنده، برخی دیوارها و سر شمع‌ها استفاده می‌شود. بررسی و شناسایی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح نیز به‌عنوان یکی از اعضای مهم سازه‌ای با نسبت دهانه به ارتفاع کوچک یکی از متداول‌ترین موضوعات مهم درزمینه‌ی سازه‌های بتن مسلح است. در تیرهای عمیق، بسته به نسبت عمق مؤثر به دهانه برشی و مساحت آرماتور برش جان درصورتی‌که آرماتور با طول کافی استفاده شده باشد، مقاومت نهایی به‌طورکلی به‌وسیله نیروی برشی کنترل می‌شود. با توجه به نتایج تجربی به‌دست‌آمده این اعضاء معمولاً در مودهای مختلفی دچار گسیختگی می‌شوند که به علت تغییرپذیری در گسیختگی، تعیین مقاومت برشی و شناسایی چگونگی گسیختگی آن‌ها از پیچیدگی بالایی برخوردار است.

به‌طورکلی تحقیق بر روی تیرهای عمیق از ۸۷ سال پیش شروع‌شده و تاکنون مطالعات گوناگون در رابطه با تیرهای عمیق صورت گرفته ولیکن مطالعات روی تیرهای عمیق دوسرگیردار اندک بوده و صرفاً توسط دکتر عرب زاده صورت گرفته است. لذا بررسی رفتار تیرهای عمیق دوسرگیردار نیاز به مطالعات بیشتر و تکمیل مطالعات قبلی دارد. در این تحقیق ابتدا به تحلیل تیرهای عمیق بتنی با ابعاد مختلف تحت اثر بار متمرکز پرداخته شده است، سپس با مدل‌سازی چندین نمونه از این تیرها در نرم‌افزار آباکوس، مکانیزم‌های شکست[۱] و ایجاد ترک[۲] با انواع مختلف آرایش میلگرد مورد بررسی واقع‌شده است.

هدف از این مطالعه بررسی تحلیل غیرخطی و عددی تیرهای عمیق دوسرگیردار بتن مسلح تحت اثر بار متمرکز در وسط دهانه است. در این مطالعه، تیرهای عمیق تحت بار موردنظر قرارگرفته و در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌اند و نتایج به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار گرفته است.

---

[۱] Failure Mechanism

[۲] Crack

۲- تاریخچه مطالعات پیشین

مرور مطالعات و تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که تحقیقات اولیه اغلب روی رفتار الاستیک تیرهای عمیق استوار بوده است. البته امروزه مطالعات الاستیک می‌تواند به‌آسانی با استفاده از فن‌های اختلاف محدود[۱] و اجزاء محدود انجام شود؛ اما عیب مهم مطالعات الاستیک استفاده از فرض معمول حاکم بودن قانون هوک بر مواد ایزوتروپیک می‌باشد، به همین دلیل این مطالعات جهت اهداف طراحی کمک مناسبی به ما نمی‌کنند.

Ramana و همکاران در سال ۲۰۰۰ بر روی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده با CFRPC با درجات مختلف مقاوم‌سازی» مطالعه‌ای را انجام دادند. در این مطالعه به بررسی نتایج آزمایشگاهی و مطالعات تحلیلی تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح به روش چسباندن خارجی ورق‌های پر مقاومت و سبک CFRP در ناحیه کششی تیر پرداخته‌اند. Mansur و همکاران در سال ۲۰۰۵ روی تقویت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح با استفاده از روش‌های 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 قرارگرفته شد تا به‌عنوان مرجع به کار گرفته شود

Obaidat و همکاران در سال ۲۰۰۷ بهسازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از ورق‌های کامپوزیت را مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی به‌منظور بررسی رفتار سازه‌ای تیرهای بتن مسلح کاملاً آسیب‌دیده بهسازی شده توسط ورق‌های CFRP[۲] را در ناحیه برشی یا در ناحیه خمشی نشان می‌دهد.

Pannirselvam و همکاران در سال ۲۰۰۸ مدل تقویت تیر بتن مسلح دارای تقویت FRP به روش خارجی را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه تحقیقی رفتار سازه‌ای تیرهای بتن مسلح دارای تقویت‌های FRP به روش چسباندن خارجی را ارزیابی می‌نماید و در این مطالعه ۳ نسبت فولاد متفاوت با ۲ نوع GFRP مختلف و ۲ نوع ضخامت در هر نوع GFRP[۳] استفاده شده است و جمعاً ۱۵ نمونه تیر مستطیلی به طول ۳ متر برای این مطالعه ساخته‌شده است

جهانگیری و خالو در سال ۱۳۸۹ در مورد بررسی رفتار تیرهای عمیق بتنی مسلح دارای گشودگی جان با استفاده از آنالیز اجزاء محدود» مطالعه‌ای را انجام دادند که در آن هدف بررسی و ارزیابی استفاده از روش آنالیز اجزاء محدود برای آنالیز تیرهای پیوسته بتن مسلح عمیق دارای گشودگی در جان بود. نتایج آن نشان داده است که با افزایش اندازه گشودگی مقاومت برشی تیرها کاهش می‌یابد.

Park و همکاران در سال ۲۰۰۹ روی روش فشار ـ کشش۴ برای اعضای بتن مسلح عمیق تقویت‌شده با CFRP کارکردند. روش STM برای تحلیل تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت‌شده با CFRP، هنگامی‌که ورق CFRP مانند یک تنش کششی

---

[۱] Finite Difference

[۲] Carbon Fiber Reinforced Polymer

[۳] Glass Fiber Reinforced Polymer

[۴] Strut-and-Tie Method

اضافی عمل می‌کند، استفاده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از روش STM، طراحی و تحلیلی کاربردی برای اعضای بتن مسلح عمیق تقویت‌شده با ورق‌های CFRP ارائه شده است. درمجموع نتایج آزمایش ۱۷ تیر عمیق آزمایشگاهی با نتایج روش STM مقایسه شد و دیده شد که روش STM بهترین تطابق را با نتایج آزمایش به دست می‌دهد.

El Maaddawy and Sherif در سال ۲۰۰۹ مطالعه‌ای در رابطه با استفاده از کامپوزیت‌های FRP در مقاوم‌سازی برشی تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو انجام دادند. این مقاله نتایج یک کار تحقیقی روی ارزیابی پتانسیل استفاده از ورق‌های CFRP خارجی (سطحی) به‌عنوان یک راه‌حل مقاوم‌سازی جهت افزایش مقاومت تیرهای عمیق بتن مسلح دارای گشودگی را نشان می‌دهد.

Dash در سال ۲۰۰۹ به بررسی تقویت تیرهای بتن مسلح با استفاده از GFRP پرداخت. در این تحقیق آزمایشگاهی به بررسی رفتار خمشی و برشی تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده با ورق‌های GFRP پرداخته‌شده 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 دربرش است.

پناهی و عرب زاده در سال ۱۳۸۸ بر روی پارامترهای مؤثر بر تقویت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح با استفاده از ورق‌های FRP" مطالعه‌ای را انجام دادند. در این تحقیق، تأثیر تعداد لایه‌ها و چگونگی آرایش ورق CFRP، بر ظرفیت بار نهایی و تغییر مکان وسط دهانه نسبت به بار اعمالی تیرهای عمیق بتن مسلح که به‌صورت خارجی با ورق‌های CFRP تقویت‌شده بودند، مورد بررسی تحلیلی قرار گرفت.

Mohammadhassani و همکاران در سال ۲۰۱۱ راجع به مودهای شکست و قابلیت سرویس تیرهای عمیق بتنی پر مقاومت خود متراکم شونده مطالعه‌ای را انجام دادند. هدف اصلی از این مطالعه ساده کردن تشخیص و پیش‌بینی شکست تیر عمیق با توجه به میزان تغییرات درصد میلگردهای کششی و تقویت جان بود.

Shafiq و همکاران در سال ۲۰۱۱ بر روی تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح دوسر ساده دارای گشودگی با ورق‌های CFRP بررسی را انجام دادند. این تحقیق تقویت تیرهای بتن مسلح با گشودگی مربع در ناحیه خمشی را توسط ورق‌های CFRP را بررسی می‌نماید. Alsaeq در سال ۲۰۱۳ بر روی تأثیر شکل و محل گشودگی بر روی مقاومت سازه‌ای تیرهای عمیق بتن مسلح دوسر ساده با گشودگی تحقیقی را انجام داد. در این تحقیق اثرات شکل و محل گشودگی بر روی رفتار سازه‌ای تیرهای عمیق بتن مسلح با گشودگی، با ثابت نگه‌داشتن اندازه گشودگی مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی از نرم‌افزار اجزاء محدود جهت انجام تحلیل اجزاء محدود غیرخطی استفاده شد. مقاومت نهایی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار اجزاء محدود تیر عمیق بتن مسلح با گشودگی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کمتر از ۲۰ درصد اختلاف را نشان داد.

Sayed و همکاران در سال ۲۰۱۳ بر روی مدل‌سازی ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح دوسر ساده تقویت‌شده با صفحات FRP بر پایه شبیه‌سازی اجزاء محدود انجام دادند. در این مقاله، تحلیل اجزاء محدود سه‌بعدی به‌منظور مطالعه تأثیر متغیرهای جدید بر روی ظرفیت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده با ورق‌های FRP انجام دادند.

Jayajothi و همکاران در سال ۲۰۱۳ در مورد موضوع تحلیل اجزاء محدود تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده با FRP با استفاده از ANSYS مطالعه‌ای را انجام دادند. در این مطالعه از تحلیل اجزاء محدود غیرخطی برای شبیه‌سازی رفتار حالت‌های شکست تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده در ناحیه برشی و خمشی با استفاده از ورق‌های FRP استفاده‌شده است.

Kachlakev در سال ۲۰۰۹ مطالعه‌ای روی تحلیل اجزاء محدود و تائید مدل تیرهای بتن مسلح دو سر ساده دارای ضعف برشی تقویت‌شده با ورق‌های 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 تقویت‌شده با ورق‌های GFRP در دو طرف تیر پرداخته است. در این مطالعه معلوم شده است که حالات کلی مدل‌های اجزاء محدود تطابق خوبی با مشاهدات و اطلاعات به‌دست‌آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی دارد.

شمس و عرب زاده در سال ۱۳۸۰ نیز آزمایش‌هایی روی تیرهای عمیق دو سر ساده با بتن سبک انجام داده و روشی را جهت تحلیل پیشنهاد دادند .همچنین مشاهده نمودند که برای تیرهای ساخته‌شده از بتن با مصالح دانه‌ای سبک، بار ترک‌خوردگی مایل، بیشتر از بتن با مصالح دانه‌ای کاملاً سبک است و این اشاره دارد به این مطلب که مقاومت ترک‌خوردگی مایل تیرهای عمیق با کاهش چگالی بتن کاهش می‌یابد و همچنین مقاومت ترک‌خوردگی تیر با بتن سبک کمتر از تیر با بتن معمولی است.

Yang آزمایش‌هایی روی ۱۶ تیر عمیق با بتن سبک انجام دادند. بعضی از نمونه‌ها از بتن سبک با ماسه ساخته‌شده بودند و بقیه از بتن سبک با دانه‌های سبک ساخته‌شده بودند. نسبت دهانه‌ی برشی به عمق از ۰.۵ تا ۱، عمق مقطع از mm ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ متغیر، عرض تیر mm ۱۶۰ و فاصله بین بارهای متمرکز ۵۰۰mm بود. آزمایش‌ها نشان دادند که تأثیر اندازه ارتفاع در تیرهای عمیق سبک بسیار بیشتر از تیرهای عمیق با بتن معمولی است.

Taylor در سال ۲۰۱۰ نشان داده است که ۵۰ درصد نیروی برشی اعمالی در تیرهای غیر عمیق از طریق قفل‌شدگی سنگ‌دانه‌ها منتقل می‌شود. قفل‌شدگی سنگ‌دانه‌ها و مقاومت سنگ‌دانه‌ها وابسته به شکل آن‌ها، اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها و مقاومت آن‌هاست.

Ashraf F.Ashour و Keun-Hyeok Yang در سال ۱۹۷۰ روی ظرفیت قفل‌شدگی تیرهای عمیق با بتن سبک و با دهانه پیوسته مطالعه نمودند.

Yu و Bazant در سال ۲۰۱۰ نشان دادند که خاموت‌ها چه اندک و چه زیاد نمی‌توانند مانع تأثیر اندازه به‌طور کامل شوند، اگرچه می‌توان عرض ترک‌ها را کم کنند و به‌این‌ترتیب اثر اندازه را کاهش دهند.

به‌منظور کمتر نمودن اثر اندازه در طراحی تیرهای عمیق به روش خرپایی، مطالعاتی توسط Tan، Chang و Zhang صورت گرفت.

عرب زاده و همکاران در سال ۲۰۰۹ یک روش جدید بر مبنای روش خرپا برای تعیین ظرفیت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح دوسر ساده و ضریب ایمنی برای بتن با در نظر گرفتن اثر آرماتور جان پیشنهاد کردند.

عرب زاده و همکاران در سال ۲۰۰۹ به‌منظور بررسی اثر اندازه در تیرهای عمیق دو سر ساده آزمایش‌هایی انجام دادند که نتایج نشان داد هرچه ارتفاع تیر زیاد شود روش خرپا جواب‌های غیر محافظه‌کارانه‌تری می‌دهد.

تحقیقات انجام شده درباره‌ی ترمیم و تقویت تیرهای بتنی عمیق به‌عنوان اعضای سازه‌ای بسیار اندک است [۲۶]. عرب زاده و ماهان‌پور در یک مقاله در سال ۱۳۸۹به ارزیابی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح دوسرگیردار در دو حالت ترمیم و تقویت‌شده با الیاف پلیمری مرکب پرداختند.

در سال ۲۰۱۷ عرب‌زاده و حیزاجی در یک کار آزمایشگاهی به مطالعه مکانیزم شکست تیرهای عمیق دوسرگیردار مسلح تحت بارهای چرخه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که مکانیزم شکست در این نوع تیرها کاملاً از حالتی که تیر تحت بار یکنواخت است، متفاوت می‌باشد.

۳- نرم‌افزار آباکوس

جهت تحلیل تیرهای موردبررسی در این تحقیق از نرم‌افزار قوی المان محدود[۱] آباکوس استفاده شده است. نرم‌افزار آباکوس یک نرم‌افزار با روش اجزای محدود است که در زمینه تحلیل و مدل‌سازی بسیار قدرتمند هست. ABAQUS قابلیت‌های گسترده‌ای را برای شبیه‌سازی در کاربردهای خطی و غیرخطی فراهم می‌کند. مسائلی که دارای اجزای متعدد و مصالح مختلف هستند را می‌توان با تعریف هندسه هر جز و اختصاص دادن مصالح تشکیل‌دهنده آن و سپس تعریف اندرکنش بین این اجزا شبیه‌سازی کرد. در تحلیل‌های غیرخطی ABAQUS به‌صورت خودکار نمو بار و رواداری همگرایی مناسب را انتخاب و به‌طور پیوسته در طول تحلیل این پارامترها را تنظیم می‌کند تا از به دست آمدن نتایج دقیق اطمینان حاصل شود [۲۸].

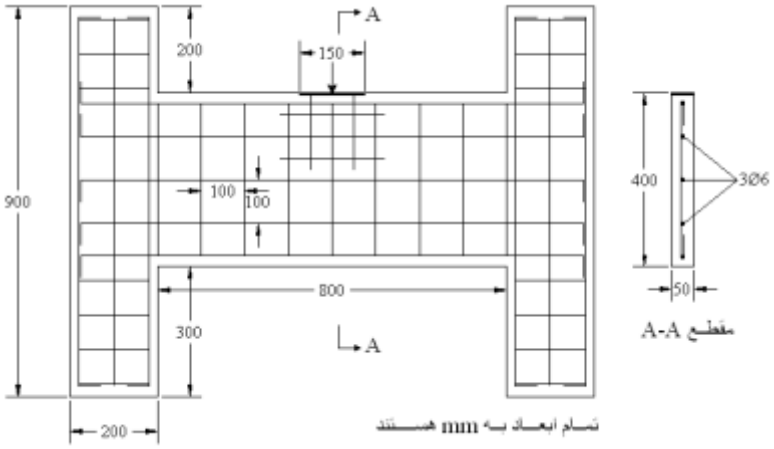
۴- مدل‌سازی تیرهای عمیق

۴-۱- صحت‌سنجی مدل‌سازی

برای تائید درستی مدل نرم‌افزار، یک مدل آزمایشگاهی موردبررسی و مدل‌سازی قرار گرفت. مدل‌سازی تیر بتنی با نرم‌افزار آباکوس نسخه 6.17 انجام‌شده است. مدل آزمایشگاهی که برای تائید مدل‌سازی استفاده‌شده است، یک تیر عمیق دوسرگیردار مسلح بتنی (B1) هست که توسط عرب‌زاده و مهان‌پور در تحقیقی با عنوان "مطالعات آزمایشگاهی اثر ورق‌هایCFRP بر مقاومت برشی تیرهای عمق دوسرگیردار" در آزمایشگاه ساخته و نتایج آن کسب شده است [۲۶].

در این تحقیق تیر عمیق بتن مسلح دوسرگیردار موردنظر دارای طول ۱۲۰۰mm، ارتفاع (عمق) ۴۰۰mm و عرض ۵۰mm می‌باشند؛ با توجه به اینکه دو تکیه‌گاه به طول ۲۰۰mm در دو انتهای تیر قرارگرفته است لذا دهانه مؤثر تیر ۸۰۰mm خواهد و نسبت دهانه به عمق تیرها برابر ۲ می‌باشد. تمام تیرها به‌صورت نقطه‌ای و از بالای تیر در وسط دهانه بارگذاری شده‌اند و در جدول ۱ میلگردهای مورد استفاده در نمونه‌ها آورده شده است، میلگردهای جان تیر همگی به قطر ۶mm و به‌صورت شبکه‌های عمودی به فاصله ۱۰۰mm از یکدیگر که جزییات آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

[۱] Finit Element Method



شکل شماره (۱) : جزییات آرماتور گذاری نمونه در آزمایشگاه و نرم‌افزار آباکوس [۲۶]

در جدول (۱) مشخصات آرماتورهای مورد استفاده در تیرشاهد آورده شده است:

$f_c'=36\ (N/mm^2)$

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

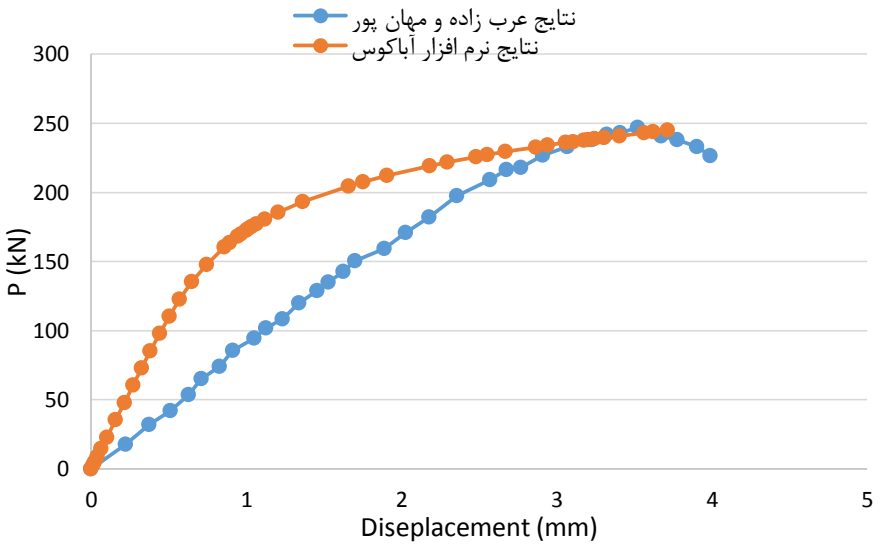
$f_t=3.2\ (N/mm^2)$

$\upsilon=0.2$

جدول شماره (۱) مشخصات آرماتورهای مورد استفاده در نمونه در آزمایشگاه [۲۶]

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
B1	12Φ1	307	18Φ1	320	200	6Φ3	6Φ11	312	200

پس از انجام مدل‌سازی تیر عمیق با مشخصات ارائه‌شده تغییر مکان‌ها و تغییرهای به وجود آمده از نرم‌افزار استخراج شده است. تغییرمکان تیر تحت اثر بار نقطه‌ای متمرکز برای تیر شاهد مدل‌سازی شده از نرم‌افزار استخراج شده و با نتایج آزمایشگاهی عرب زاده و مهان‌پور [۲۶]. در نمودار شکل ۲ مقایسه شده است. با توجه به نمودار مذکور می‌توان به این نتیجه رسید که تیر مدل‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی همخوانی داشته و این‌رو می‌تواند برای ادامه تحقیقات و مطالعه تیر عمیق دوسرگیردار مورداستفاده قرار گیرد.



شکل شماره (۲) :نمودار تغییرمان تیر شاهد تحت بار نقطه‌ای متمرکز

۴-۲- مدل‌سازی تیر عمیق دوسرگیردار

پس از اطمینان از صحت مدل معرفی شده در نرم‌افزار آباکوس، تیر مطابق خصوصیات زیر مورد به حالت دوسرگیردار مدل شد. در این حالت مطابق شکل ۴ تکیه‌گاه‌ها جابجا شده و تمام درجات آزادی در دوسر تیر بسته شده‌اند. پس از بستن تمامی درجات آزادی[۱] مربوطه به دو تکیه‌گاه، دو بعد ابتدا و انتهای تیر به تکیه‌گاه‌ها گره خورده و بدین ترتیب گیرداری مدنظر مدل می‌گردد. تمامی خصوصیات تیر عمیق دوسرگیردار در سایر موارد و نحوه اعمال بار مشابه با تیر عمیق ساده می‌باشد.

تیر عمیق بتن مسلح موردنظر دارای طول ۱۱۰۰mm، ارتفاع (عمق) ۴۰۰mm و عرض ۱۰۰mm می‌باشند؛ تمام تیرها به‌صورت نقطه‌ای و از بالای تیر در وسط دهانه بارگذاری شده‌اند و در جدول ۴-۲ میلگردهای مورداستفاده در نمونه‌ها آورده شده است، میلگردهای جان تیر همگی به قطر ۶mm و به‌صورت شبکه‌های عمودی به فاصله ۱۰۰mm از یکدیگر که جزییات آن در شکل ۳ نمایش داده شده است.

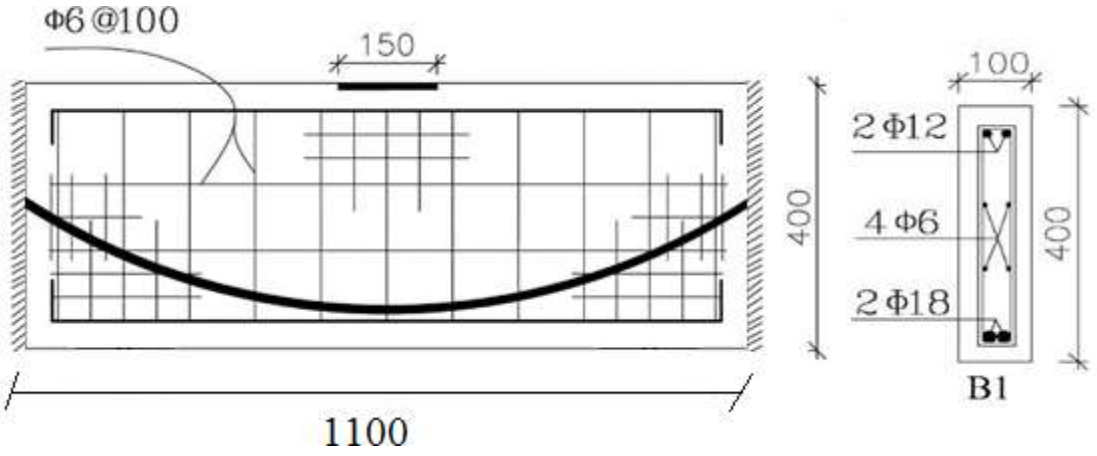
جدول شماره (۲) : مشخصات مصالح نمونه نرم‌افزار آباکوس [۳۹]

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	12Φ2	348	18Φ2	274	200	6Φ4	4Φ11	88.6	200

[۱] Freedom Degrees

شکل شماره (۳) : جزییات آرماتور گذاری نمونه در آزمایشگاه و نرم‌افزار آباکوس

مشخصات فولاد و بتن مصرفی بصورت زیر می‌باشند.



E_s=200000 (N/mm^2)

F_y=335 (N/mm^2)

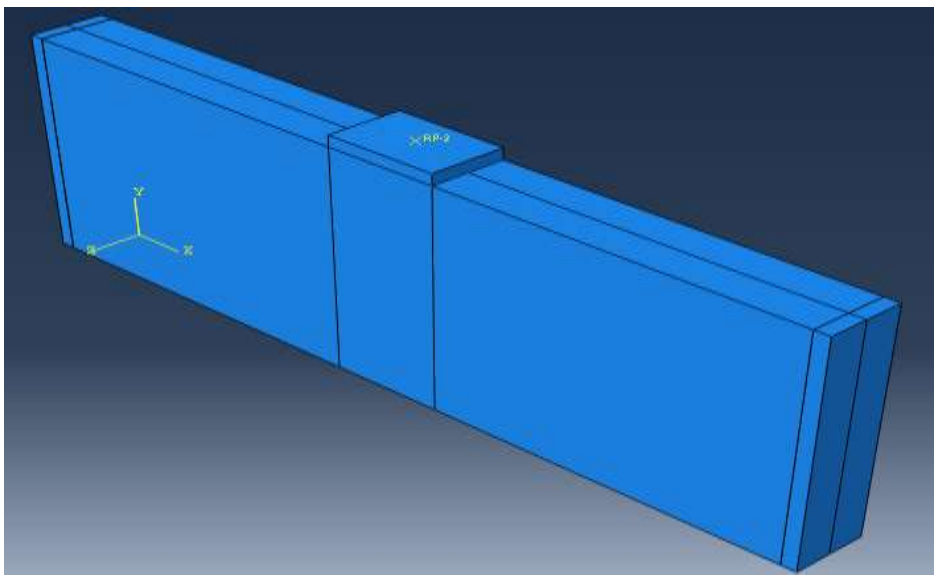
υ=0.3

f_c'=40 (N/mm^2)

E_c=31900 (N/mm^2)

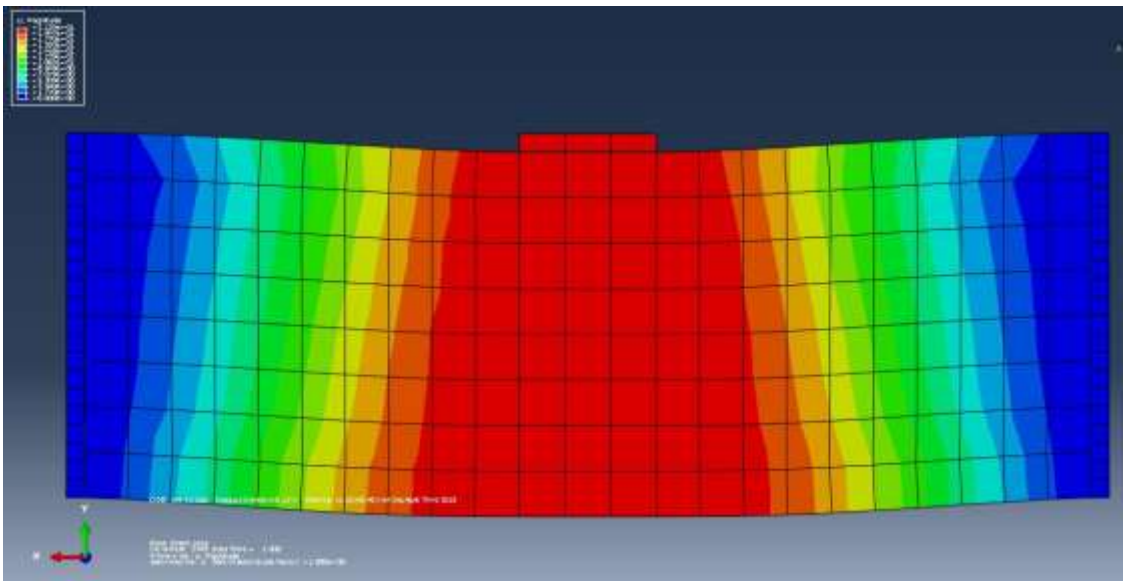
f_t=4.16 (N/mm^2)

υ=0.2



شکل شماره (۴) : مدل تیر عمیق دوسرگیردار

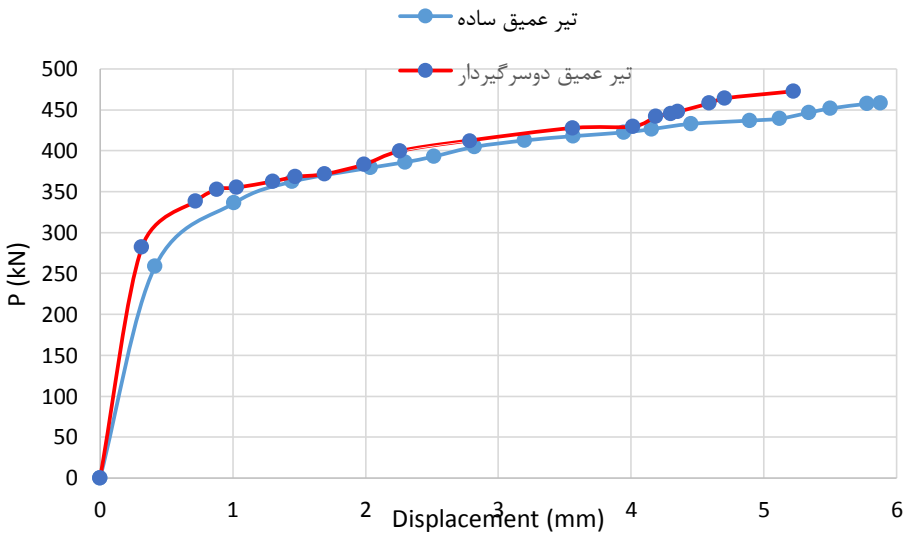
پس از انجام مدل‌سازی تیر عمیق دوسرگیردار با مشخصات ارائه‌شده تغییر مکان‌ها[1] و تغییرهای به وجود آمده از نرم‌افزار به دست آمد. در شکل شماره ۵ تغییرهای ایجادشده در اثر اعمال بار نقطه‌ای آورده شده است. مشاهده می‌گردد که حداکثر تغییرمان حادث‌شده در وسط دهانه تیر و محل اعمال بار برای بار ۴۷/۲ تن با میزان mm ۵/۲۲۲۲ اتفاق افتاده و حداقل تغییر مکان یعنی صفر mm در محل تکیه‌گاه رخداده است.



شکل شماره (۵) : تغییر مکان‌های ایجادشده در اثر اعمال بار نقطه‌ای در تیر عمیق دوسرگیردار شماره ۱

با توجه به نمودار شکل شماره ۶ مشاهده می‌شود که برای یک بار ثابت میزان تغییر مکان تیر عمیق دوسرگیردار نسبت به تیر عمیق ساده کمتر می‌باشد. میزان تغییر مکان در بعد قائم در تماس با تکیه‌گاه صفر می‌باشد.

[1] Displacement



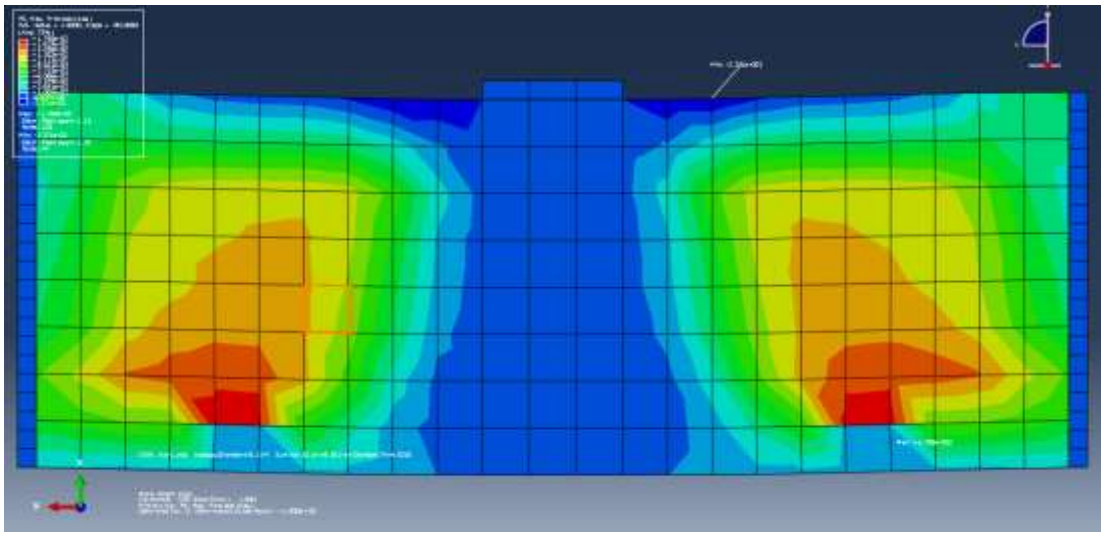
شکل شماره (۶) : نمودار تغییرمکان-نیروی اعمالی برای تیر عمیق ساده و دوسرگیردار

در شکل شماره ۷ و ۸ مکانیزم شکست تیر عمیق دوسرگیردار با توجه در کرنش‌های[۱] به وجود آمده در اثر اعمال بار در تیر بتنی میلگردهای مورداستفاده نشان داده‌شده است. مکانیزم شکست در این نوع تیر نیز شبیه به تیر عمیق ساده بوده با این تفاوت که ترک‌های ایجادشده به تکیه‌گاه‌ها نزدیک‌تر شده و ترک‌ها نسبت به افق با زاویه بزرگ‌تری اتفاق افتاده است. در تیر عمیق ساده در نواحی بالای تیر در ابتدا و انتهای تیر کرنش قابل‌توجهی ایجاد نگردید درحالی‌که در تیر دوسرگیردار در این نواحی کرنش ایجاد شده است. در تیر ساده ترک‌ها به مرکز تیر نزدیک‌تر بوده ولی در تیر دوسرگیردار این‌گونه نیست. در جدول زیر برای بار ۴۶/۷ تن، میزان جابجایی ایجادشده در تیرهای مورد بررسی آورده شده است.

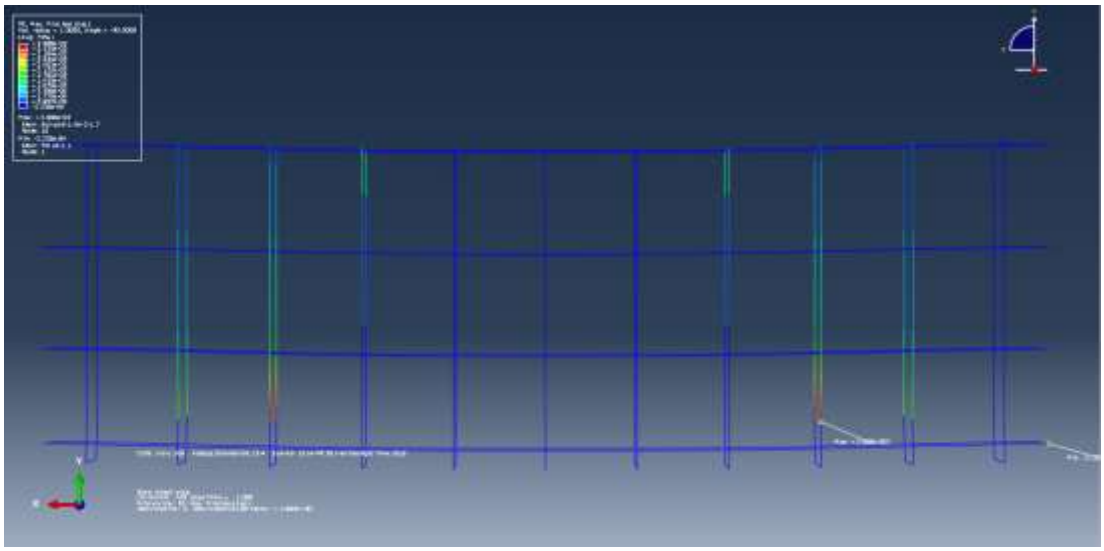
جدول شماره (۲) : مقایسه میزان جابجایی برای بار ۴۶.۷ تن

ردیف	نوع تیر	جابجایی (mm)
۱	تیر عمیق ساده (آزمایشگاهی)	۶/۰۴
۲	تیر عمیق ساده (مدل‌سازی شده)	۵/۹۹
۳	تیر عمیق دوسرگیردار (مدل‌سازی شده)	۴/۷۲

[۱] Strain



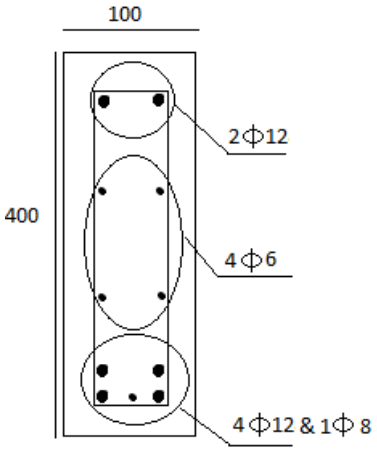
شکل شماره (۷) : مکانیزم شکست در تیر عمیق دوسرگیردار شماره ۱



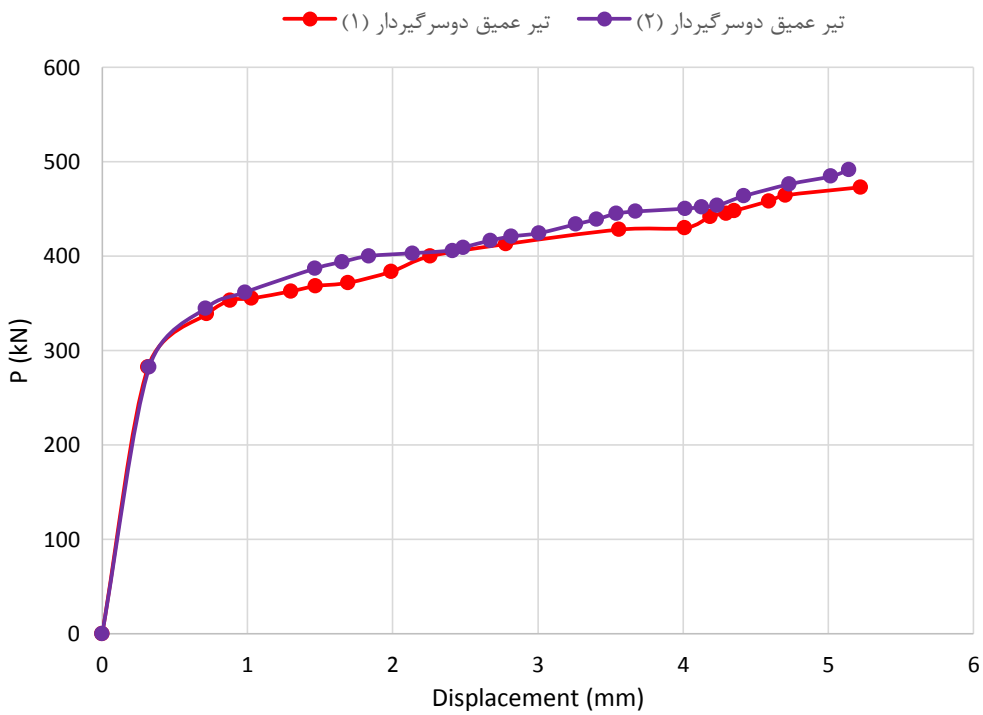
شکل شماره (۸) : حداکثر کرنش‌های ایجادشده در آرماتورهای موجود در تیر عمیق دوسرگیردار شماره ۱

پس از مدل‌سازی تیر دوسرگیردار به بررسی تأثیر نوع و تعداد آرماتورها پرداخته‌شده است. در مدل موردتحقیق همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است میلگردهای طولی در قسمت پایین جان عبارت‌اند از دو میلگرد نمره ۱۸. برای بررسی تأثیر تعداد و آرایش میلگردها، بجای آرماتورهای نمره ۱۸، چهار آرماتور نمره ۱۲ و یک آرماتور نمره ۸ جایگزین شده و در همان شرایط یکسان تیر دوسرگیردار تحلیل‌شده و نتایج مدنظر به دست آمدند. مقطع معادل در شکل ۹ نشان داده شده است. در شکل ۱۰ نمودار تغییر مکان در مقابل بار اعمالی برای دو نوع تیر دوسرگیردار ترسیم شده است. تیر عمیق دوسرگیردار (۱) نشان‌دهنده تیر با آرماتورهای نمره ۱۸ بوده و تیر عمیق دوسرگیردار (۲) نشان‌دهنده مقطع معادل با ۴ آرماتور نمره ۱۲ و ۸ می‌باشد. در شکل ۱۱ تیر تغییر شکل یافته نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که میزان ترک‌های ایجادشده در ردیف پایین آرماتور ۱۲ مربوطه به تیر شماره ۲ بیشتر از تیر شماره ۱ بوده ولی در ناحیه بالاتر میزان

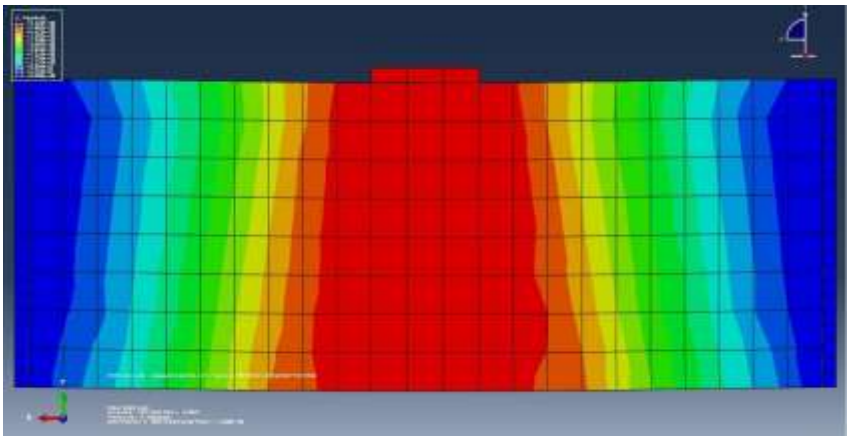
ترک‌ها کمتر می‌باشد. این امر نشان‌دهنده این است که هرچه تراکم آرماتور بیشتر بوده میزان ترک کمتر می‌باشد همچنین برای قطرهای بزرگ‌تر ترک‌های کمتری رخ خواهد داد.



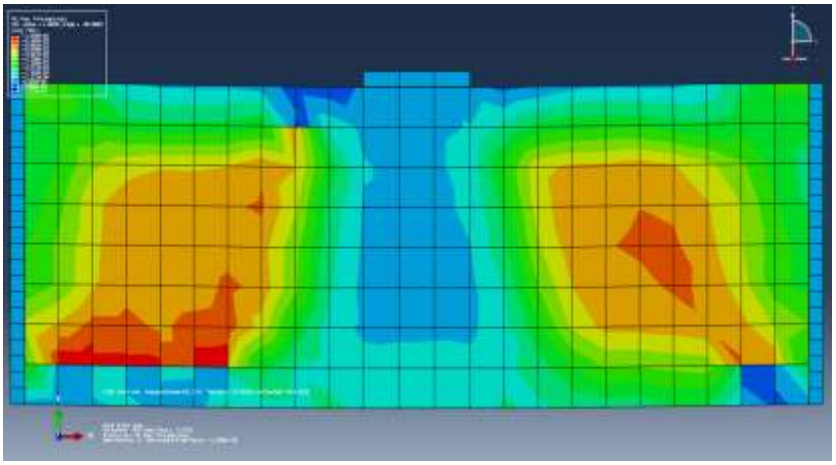
شکل شماره (۹) : مقطع معادل تیر عمیق دوسرگیردار (۲)



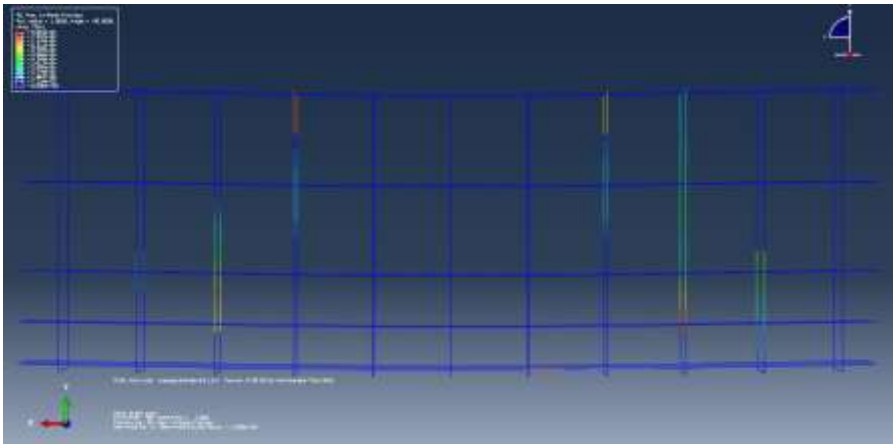
شکل شماره (۱۰) : نمودار تغییرمکان-بار عمالی برای دو تیر با دو مقطع متفاوت



شکل شماره (۱۱) : تغییر مکان‌های ایجادشده در اثر اعمال بار نقطه‌ای در تیر عمیق دوسرگیردار شماره ۲



شکل شماره (۱۲) : مکانیزم شکست در تیر عمیق دوسرگیردار شماره ۲



شکل شماره (۱۳) : حداکثر کرنش‌های ایجادشده در آرماتورهای موجود در تیر عمیق دوسرگیردار شماره ۲

۵- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه به بررسی تیرهای عمیق دوسرگیردار با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. پس از صحت سنجی و معرفی تیرهای مدنظر، مدل‌سازی صورت گرفته و نتایج زیر حاصل شدند.

- بررسی‌ها نشان دهنده رابطه خطی مستقیم مابین نیروی متمرکز اعمالی و لنگر ایجاد شده در محل تکیه‌گاه می‌باشند. همچنین معادلات تعادل نشان دهنده این است که در وسط دهانه تیر دوسرگیردار در هنگام اعمال بار نقطه‌ای هیچ لنگری ایجاد نمی‌شود.
- پس از انجام مدل‌سازی تیر عمیق دوسرگیردار مشاهده می‌گردد که حداکثر تغییر مکان حادث‌شده در وسط دهانه تیر و محل اعمال بار برای بار ۴۷.۲ تن با میزان ۵.۲۲۲۲ mm اتفاق افتاده است.
- مشخص شد که برای یک بار ثابت میزان تغییر مکان تیر عمیق دوسرگیردار نسبت به تیر عمیق ساده کمتر می‌باشد. میزان تغییر مکان در بعد قائم در تماس با تکیه‌گاه صفر می‌باشد.
- مکانیزم شکست در تیر عمیق دوسرگیردار شبیه به تیر عمیق ساده بوده با این تفاوت که ترک‌های ایجادشده برشی به تکیه‌گاه‌ها نزدیک‌تر شده و ترک‌ها نسبت به افق با زاویه بزرگ‌تری اتفاق افتاده است.
- در تیر عمیق ساده در نواحی بالای تیر در ابتدا و انتهای تیر کرنش قابل‌توجهی ایجاد نگردید درحالی‌که در تیر دوسرگیردار در این نواحی کرنش ایجاد شده است.
- در تیر ساده ترک‌های به وجود آمده به مرکز تیر نزدیک‌تر بوده ولی در تیر دوسرگیردار این‌گونه نیست.
- مشاهده گردید که میزان ترک‌های ایجاد شده اطراف آرماتورهای لاغر بزرگ‌تر است.
- تراکم میلگرد باعث کاهش میزان و تعداد ترک‌ها می‌گردد.

مراجع

۱. ابوالفضل عرب زاده، اصغر امانی داشله، "ایرج محمودزاده کنی، مطالعه آزمایشگاهی تیرهای عمیق بتن مسلح پیش‌تنیده و مقاوم شده با CFRP،" مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، دوره پانزدهم، ۱۳۹۴.

۲. ابولفضل عرب‌زاده، هاشم مهان‌پور، "مطالعات آزمایشگاهی اثر ورق‌های CFRP بر مقاومت برشی تیرهای عمیق دوسرگیردار، مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۲، ۱۳۸۹.

۳. بهروز شمس، "مقاومت نهایی و رفتار تیرهای عمیق با بتن سبک تحت تأثیر بارگذاری متمرکز از بالا،" پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۰.

۴. کامل‌ترین مرجع کاربردی ABAQUS، جلد اول، مهندس سهیل سروش نیا، مهندس نیما بهشتیان، نگارنده دانش، چاپ چهارم ۱۳۹۲.

۵. محمد پناهی درچه و ابوالفضل عرب زاده، "پارامترهای مؤثر بر تقویت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح با استفاده از ورق‌های FRP"هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت ۱۳۸۸، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۶. ولی جهانگیری و علیرضا خالو، "بررسی رفتار تیرهای عمیق بتنی مسلح دارای بازشوی جان با استفاده از آنالیز اجزاء محدود،" پنجمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت ۱۳۸۹، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

7. Arabzadeh, A., Hizaji, R.(2017). *Failure Mechanism in Fixed-Ended Reinforced Concrete Deep Beams under Cyclic Load*, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol. 11, No. 4.

8. Azabzadeh, A. Rahaie, A.R. and Aghayari, R (2009). *A simple strut and tie model for prediction of ultimate shear strength of RC deep beams*, International Journal of Civil Engineering, Vol. 7, Issue 3. pp. 141-153.
9. A.M. Ibrahim, M.S. Mahmood. (2009). *Finite element modeling of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates*, European Journal of Scientific Research, No. 4, 30, 526-41.
10. 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.
11. Haider M. Alsaeq. (2013). *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.
12. Keun-Hyeok Yang. (2010). *tests on lightweight concrete deep beams*," ACI Structural Journal, Vol. 107, No. 6, pp. 663-670.
13. Keun-Hyeok Yang, Ashraf F.Ashour. (2010). *Aggregate interlock in lightweight concrete countinous deep beams*, Journal on Engineering Structure, doi:10.1016/j.engstruct.
14. M.R.Islam, M.A.Mansur, M.Maalej. (2005). *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.
15. Mohammad Mohammadhassani, MohdZaminJumaat, Ashraf Ashour and Mohameed Jameel. (2011). *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.
16. N. Dash. (2009). *Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Glass Fiber Reinforced Polymer Composite*, Department of Civil Engineering NIT Rourkela – 769008.
17. N. Pannirselvam, P.N. Raghunath and K. Suguna. (2008), *Strength Modeling of Reinforced Concrete Beam with Externally Bonded Fiber Reinforcement Polymer Reinforcement*", American J. of Engineering and Applied Sciences 1 (3): 192-199.
18. P. Jayajothi, R. Kumutha and K. Vijai. (2011). *Finite element analysis of FRP strengthened RC beams using ANSYS*, Asian Journal of Civil Engineering (BHRC) Vol. 14, No. 4, Pages 631-642.
19. Qiang Yu, Bazant Z.P.Hon M.ASCE. (2011). *Can stirrups suppress size effect on shear strength of RC beams?* Journal of Structural Engineering, Vol. 137, No. 5, pp. 607-617.
20. R. Balamuralikrishnan, C.A. Jeyasehar. (2009), *Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Fabrics*, The Open Civil Engineering Journal, 3102-9.
21. Sangdon Park, Riyad S. Aboutaha. (2009). *Strut-and-Tie Method (STM) for CFRP Strengthened Deep RC Members*, Journal of Structural Engineering, ASCE.
22. Tamer El Maaddawy and Sayed Sherif. (2009). *FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings*, Structural Engineering Dept. Al-Wasl Al-Gadeed Consultants, Dubai, United Arab Emirates.

23. S.C. Chin, N. Shafiq and M.F. Nuruddin. (2011), *Strengthening of RC Beams Containing Large Opening at Flexure with CFRP laminates*", World Academy of Science, Engineering and Technology 60.
24. 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), 687–70.
25. Tahylor. HPJ. (1970). *Investigation on forces carried across cracks in reinforced concrete beams in shear by interlock of aggregate*, Cement and concrete Association, TRA 42.447, p. 22.
26. Tan K.H. and cheng G.H. (2006). *Size effect on Shear Strength of deep beams*: Investigation with strut and tie model, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 5, pp.685-673.
27. V.P.V. Ramana, T. Kant, S.E. Morton, P.K. Dutta, A. Mukherjee, Y.M. Desai. (2000). *Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening*, Elsevier Journal, Composites: Part B 31, 461- 470.
28. Y.T. Obaidat, S. Heyden, O. Dahlblom, G. Abu-Farsakh and Y. Abdel-Jawad. (2007), *Retrofitting of Reinforced Concrete Beams using Composite Laminates*, Master Thesis, Jordan University of Science and Technology.
29. Zhang N. and Tan K.H. (2009). "*Effects of support setlement on continous deep beams and STM modeling, Journal of Engineering Structure*, doi:10.1016/j.engstruct.