

امکان ایجاد بازشوهای عرضی در جان تیرهای بتنی پل‌ها

علی شاهینی، دانشجوی دکترا گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
ابوذر میرزاخانی*، استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
بنت‌الهدی جعفری، کارشناس ارشد گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

Email: aboozar.mirzakhani@iau-shahrood.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۴ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

چکیده

استفاده از بازشوهای عرضی در تیرهای بتن مسلح پل‌ها جهت عبور تأسیسات می‌تواند منجر به کاهش ارتفاع عرشه پل و در نتیجه باعث کاهش ارتفاع کلی و لنگر وارده به فونداسیون و نیز افزایش ارتفاع مؤثر زیرگذر پل‌ها شود. از طرفی، استفاده از بازشو در تیرها باعث تمرکز تنش در نقاط بحرانی حول بازشو، کاهش ظرفیت باربری تیر و در نتیجه تغییر شکل و خیز زیاد و بازتوزیع نیروها در سایر اعضا خواهد شد. در این پژوهش، به بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح پل‌ها که دارای بازشوهای عرضی مدور در جان هستند، با استفاده از روش اجزای محدود پرداخته شده و با توجه به به‌کارگیری نرم‌افزار آباکوس، از نتایج آزمایشگاهی نمونه تیر بتنی ۲۸ روزه دارای بازشو، جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی استفاده شده است. برای بارگذاری تیرهای نمونه در این آزمایش، از دو بار متمرکز و متقارن که به فاصله‌ی ۴۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار دارند، به‌صورت افزاینده استفاده شده است. پس از بررسی صحت مدل‌سازی و مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی، مشخص شد که نتایج مدل‌سازی اجزای محدود تطابق خوبی با اطلاعات آزمایشگاهی دارد. پارامترهایی همچون ابعاد بازشوی مدور در جان تیر، موقعیت نسبی بازشوی مدور در ارتفاع و طول تیر، چیدمان آرمان‌تور جان و تأثیر غلاف فولادی پیشنهادی در محل بازشو از جمله مواردی است که در مدل‌سازی‌ها مطالعه شده است. نتایج بیانگر آن است که وجود همزمان خاموت‌های کوچک در بالا و پایین بازشو و خاموت‌های مایل اطراف بازشو باعث افزایش بار نهایی تیر سوراخ‌دار تا نزدیکی بار نهایی تیر توپر شده و استفاده از غلاف فولادی پیشنهادی در محل بازشو سبب افزایش ظرفیت باربری تیر تا حدود ۳۰٪ شده است. بنابراین، در مقایسه با ظرفیت تیر بدون بازشو، تنها ۳٪ اختلاف نشان داده است. لذا، با اعمال تدابیر مناسب، به‌ویژه با استفاده از غلاف فولادی با ضخامت‌های پیشنهادی در محل بازشو، و حتی در حالت بازشدگی دوگانه، می‌توان بدون نگرانی از کاهش باربری، سوراخ‌های عرضی در تیرها ایجاد کرد و از مزایای آن بهره برد.

واژه‌های کلیدی: بازشوهای عرضی مدور، تیر بتن مسلح، چیدمان آرمان‌تور جان، غلاف فولادی

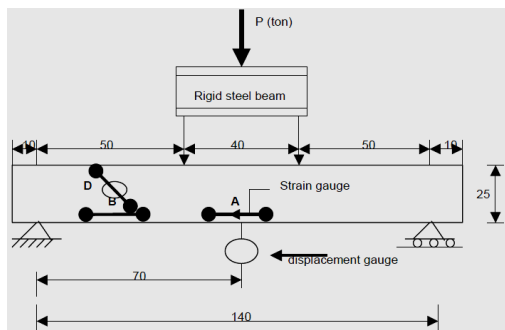
۱. مقدمه

همکاران (۱۹۶۷) نشان داده شده که با افزایش اندازه‌ی بازشوها، رفتار تیر به رفتار خرپای ویران‌دیل تبدیل شده است. طبق تحقیقات و آزمایش‌های منصور و همکاران (۱۹۸۵) که در دانشگاه ملی سنگاپور انجام شده و بیشترین میزان تحقیقات روی تیرهای دارای بازشو به وسیله‌ی آنها صورت گرفته است، بازشوهایی که به شکل دایره، مربع و یا نزدیک به مربع بوده و قطر یا عمق آنها کمتر از ۴۰٪ ارتفاع کلی مقطع عرضی تیر باشد، تحت عنوان بازشوهای کوچک طبقه‌بندی گردیده‌اند. در چنین حالتی، عملکرد تیری بیشتر حاکم می‌باشد، هر چند که تعبیه بازشو در جان تیر سبب نوعی ناپیوستگی و اختلال در توزیع نرمال تنش‌ها شده و باعث تمرکز تنش و متعاقب آن ایجاد ترک حول بازشو گردیده است. بنابراین، باید آرماتور مناسب و به مقدار کافی حول بازشو تعبیه گردد تا عرض ترک‌ها را در محدوده‌های قابل تحمل تیر محدود نموده و از شکست احتمالی و نابهنگام تیر جلوگیری شود. توندران و شانموگام (۱۹۹۲) بار کماتش جانبی بحرانی تیرهای مستطیلی لاغر با بازشو در امتداد محور تیرها را بررسی کردند. تیرهای کنسول و تیرهای با تکیه‌گاه ساده در نظر گرفته شدند. بارهای بحرانی به صورت عددی با استفاده از روش انرژی ارزیابی و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شدند. همچنین، رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح دو سر ساده دارای بازشو با استفاده از روش اجزای محدود توسط زهره‌وند (۲۰۱۱) مورد بررسی قرار گرفته است. تیرهای دارای بازشدگی بزرگتر، مقاومت کمتری نشان داده و محل بازشو تأثیر زیادی روی رفتار و مقاومت نهایی تیرها نداشته است. بیشترین تأثیر روی رفتار و بار نهایی با تغییر چیدمان آرماتور جان ایجاد شده که به ترتیب چیدمان مورب، شبکه‌ای، قائم و افقی منجر به افزایش بیشتر بار نهایی شده است.

در این بین، یکی از راه‌های جبران کاستی پدید آمده از جانب سوراخ ایجاد شده، آرماتورگذاری خاص در اطراف سوراخ همچون مدل‌های منصور و همکاران

استفاده از بازشوهای عرضی در عرشه پل‌ها و طاق بتنی زیرگذرها جهت عبور کانال‌ها و تأسیسات مختلف منجر به کاهش در ارتفاع کلی سازه و باعث کاهش کل بار اعمالی به فونداسیون می‌گردد. تحقیقات در مورد تیرهای دارای بازشو به‌طور عمده از سال ۱۹۶۰ شروع شده و بیشترین حجم تحقیقات و اطلاعات به‌دست آمده در مورد تیرهای بتنی مسلح دارای بازشوهای بزرگ مستطیلی است. تحقیقات آزمایشگاهی محدودی نیز برای بررسی رفتار برشی و خمشی تیرها انجام شده و بیشتر این موارد مربوط به تیرهای T شکل، تحت شرایط بارگذاری خاص و با پارامترهای محدود بوده است. در این بین، تیرهای عمیق معمولاً بیشتر مورد توجه بوده‌اند؛ اگرچه هنوز آیین‌نامه دقیقی جهت طراحی تیرهای عمیق بتن مسلح با وجود بازشو شکل نگرفته است (محمد و همکاران، ۲۰۱۴). در یکی از اولین کارها روی تیرهای با بازشو، رفتار تیرهای بتنی مسلح با بازشوهای بزرگ مستطیلی در جان مطالعه شده است. در این مطالعه، اعضای بالا و پایین بازشو در تیرهای با بازشوی بزرگ مثل یک پانل عمل کرده و نقاط عطف در نقطه میانی اعضای وتری تشکیل شده است. آن‌ها فرض کردند که برش اعمال شده به نسبت سطح مقطع اعضای وتری بالا و پایین توزیع شده است (ناصر و همکاران، ۱۹۶۷). بسیاری از محققین، اصطلاح بازشوی کوچک و بازشوی بزرگ را به‌کار برده‌اند، بدون اینکه تعریف دقیق و مشخصی از آن داشته باشند (سامس و کورلی، ۱۹۷۴). برخی از محققین، بازشوهای مدوری را که قطر آنها از ۰/۲۵ عمق جان تیر بیشتر باشد، تحت عنوان بازشوهای بزرگ طبقه‌بندی نمودند. بر اساس این معیار، طبقه‌بندی بازشوها به صورت کوچک یا بزرگ، به نحوه‌ی بارگذاری تیر نیز بستگی داشته است. به‌طور مشابه، اگر یک تیر تحت تأثیر ترکیبی از برش و خمش قرار بگیرد، طبق تحقیقات پرنتراس (۱۹۶۸)، منصور و همکاران (۱۹۸۵) و ناصر و

به منظور اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از نرم-افزار المان محدود و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی، از تیرهای بتن مسلح با بازشوهای مدور کوچک که توسط رحیمی و همکاران (۲۰۰۴) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند (شکل ۱) استفاده شده و این نمونه‌ها توسط نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است.



شکل ۱. ابعاد و نحوه بارگذاری تیر مدل‌سازی شده جهت صحت‌سنجی (رحیمی و همکاران، ۲۰۰۴)

طول تیرهای مورد آزمایش ۱۶۰ سانتی‌متر بوده که روی تکیه‌گاه‌هایی با دهانه ۱۴۰ سانتی‌متری مورد بارگذاری و آزمایش قرار گرفتند. عرض مقطع این تیرها ۱۲/۵ سانتی‌متر، عمق مؤثر ۲۱/۷ سانتی‌متر و فاصله‌ی تار فشاری از میلگردهای فشاری ۳/۳ سانتی‌متر است. برای میلگردهای کششی از دو عدد میلگرد با قطر ۱۴ میلی‌متر و برای میلگردهای فشاری از دو عدد میلگرد با قطر ۶ میلی‌متر استفاده شده است. خاموت‌ها نیز دارای قطر ۶ میلی‌متر است که در فواصل ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. برای بارگذاری از دو بار متمرکز و متقارن که به فاصله‌ی ۴۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند استفاده شده است. به این ترتیب، مقدار دهانه‌ی برش برابر با ۵۰ سانتی‌متر و نسبت طول دهانه-ی برشی به عمق مؤثر برابر با ۲/۳ است که این مقدار، تیرهای مورد نظر را در رده‌ی تیرهای کوتاه قرار می‌دهد. طراحی سازه‌ای و انتخاب مقدار و نحوه‌ی آرایش میلگردهای خمشی و برشی این تیرها به گونه‌ای انجام شده است که تیر مزبور تقریباً به صورت هم‌زمان به

(۱۹۸۵) بوده و راه دیگر، استفاده از بتن با مقاومت بیشتر و استفاده از افزودنی‌ها است (پاچیده و همکاران، ۲۰۲۰). در مورد بارگذاری آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌ها نیز در بخش زیادی از پژوهش‌ها، بار استاتیک یا بار افزایشی در نظر بوده و در برخی کارها هم بار سیکلی در تیرهای بتنی توخالی مورد آزمایش قرار گرفته است (جبار و همکاران، ۲۰۱۶). در مورد سنجش اثر بازشو، بیشتر خمش تیر مورد توجه بوده است؛ اگرچه در محدود کارهایی به پیچش در تیرهای بازشودار نیز توجه شده است (عبدالکریم و عبدالسلام، ۲۰۲۰). برای جبران کاستی‌های پدید آمده در اثر سوراخ‌ها نیز علاوه بر پیشنهاد آرماتورگذاری متفاوت در ناحیه باز شدگی در جان تیرها، که در کارهای قبلی به آنها اشاره شد، تقویت تیر سوراخدار با کمک FRP نیز پیشنهاد شده است (هاویله و همکاران، ۲۰۱۲).

در این پژوهش، به بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح پل‌های دارای بازشوهای افقی مدور در جان، با استفاده از روش اجزای محدود پرداخته شده است. برای مدل‌سازی نمونه‌ها از نرم‌افزار آباکوس (آباکوس، ۲۰۱۲) استفاده شده و به عنوان نوآوری نسبت به پژوهش‌های گذشته، پارامترهای ابعاد بازشوی دایره‌ای، موقعیت نسبی بازشو در تیر (در ارتفاع و طول تیر)، چیدمان آرماتور جان و تأثیر غلاف فولادی پیشنهادی در داخل بازشو، جهت جبران اثر سوراخ شدگی تیر بتنی، بر ظرفیت مقطع بررسی شده است. با این تحقیق، و در محدوده مورد مطالعه، حداکثر ابعاد و بهترین موقعیت قرارگیری بازشوی مدور پیشنهاد شده است. به طوری که حداقل کاهش ظرفیت باربری تیر رخ دهد و به باربری تیر آسیب جدی وارد نشود.

۲. سنجش میزان دقت مدل‌سازی المان محدود

گام با نمو ۱ تن و پس از آن تا لحظه‌ی گسیختگی با نمو ۰/۵ تن و با سرعت متوسط ۳۰ ثانیه در هر گام تا بار نهایی وارد گردیده است. در هر مرحله، علاوه بر ثبت مقادیر بار، کرنش‌ها، خیز مرکز تیر و ترک‌های ایجاد شده همراه با مقدار بار اعمالی نیز ثبت شده است (رحیمی و همکاران، ۲۰۰۴).

گسیختگی خمشی و برشی برسد (رحیمی و همکاران، ۲۰۰۴).

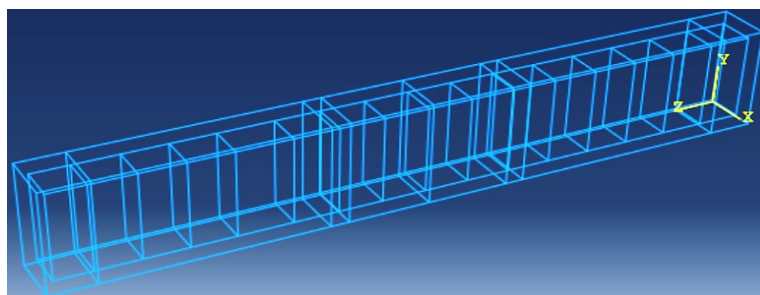
آزمایش تیر پس از گذشت ۲۸ روز از تاریخ بتن-ریزی و با در نظر داشتن مقاومت ۳۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای بتن انجام گرفته است. مشخصات فولاد به‌کار رفته در تیرها نیز در جدول ۱ ارائه شده است. بار کل از لحظه‌ی بارگذاری تا بار ۹ تن در هر

جدول ۱. مشخصات فولاد به‌کار رفته به عنوان میلگرد در تیرهای بتنی

مشخصات مصالح	قطر (mm)	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	ضریب ارتجاعی (10^5 MPa)
میلگردهای کششی	۱۴	۴۵۰	۶۰۰	۲
میلگردهای فشاری و خاموت‌ها	۶	۲۵۰	۴۳۵	۲

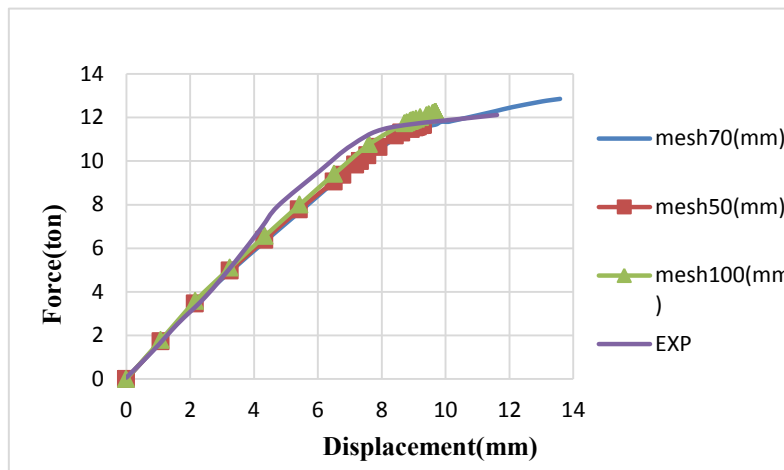
در این پژوهش، از مدل آسیب‌دیدگی پلاستیک برای شبیه‌سازی رفتار بتن استفاده شده است. همچنین، برای مدل‌سازی بتن از المان C3D8R استفاده شده است. این المان لاگرانژی از نوع Solid، ۸ گرهی، تابع شکل آن درجه یک و در هر گره دارای سه درجه آزادی است. در صورت استفاده از این المان، پاسخ‌ها دارای دقت مناسبی بوده و در عین حال، سرعت رسیدن به نتایج به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد. f_{b0}/f_{c0} نسبت حداکثر تنش فشاری در حالت دومحوره به حداکثر تنش فشاری در حالت تک‌محوره بتن است. این نسبت به صورت پیش‌فرض برنامه برابر ۱/۱۶ می‌باشد و در این تحقیق نیز همین مقدار مورد استفاده قرار گرفته است. در نرم‌افزار Abaqus، برای مدل کردن خاصیت پلاستیسیته بتن از تابع پتانسیل جریان پلاستیک یا تابع هیپربولیک دراگر پراگر استفاده شده که به پارامترهای ϵ (خروج از مرکزیت) و Ψ (زاویه اتساع) وابسته است. در این پژوهش، مقادیر مذکور به ترتیب برابر ۰/۱ و

۳۰/۵ درجه معرفی شده‌اند. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای خروج از مرکزیت ممکن است در شرایطی که محصورشدگی سازه کم است منجر به واگرایی در تحلیل شود. در مدل نرم‌افزاری، آرماتورهای طولی و عرضی با المان خرپایی T3D2 با دو گره و سه درجه آزادی در هر گره مدل‌سازی شده است. این المان فقط قابلیت تحمل نیروی محوری را دارد. به‌منظور بررسی همگرایی مدل و تشخیص اندازه مش-بندی مناسب برای مدل‌سازی، تحلیل حساسیت و همگرایی برای تیر بتن مسلح مورد آزمایش با ابعاد شکل ۱ و با اندازه مش ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متر انجام شده که نمایی از مدل نرم‌افزاری آن در شکل ۲ و نتایج مربوطه در شکل ۳ آمده است. نتایج حاصل از نرم‌افزار المان محدود آباکوس تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. البته نرم‌افزارهای المان محدود گاه سازه را نسبت به حالت واقعی سخت‌تر مدل می‌کنند و وجود درصدی از خطا اجتناب‌ناپذیر می‌نماید.



امکان ایجاد بازشوهای عرضی در جان تیرهای بتنی پل‌ها

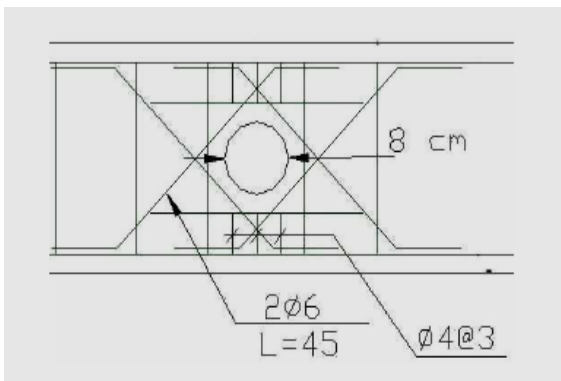
شکل ۲. نمایی از میلگردهای تیر مدل شده در نرم‌افزار آباکوس



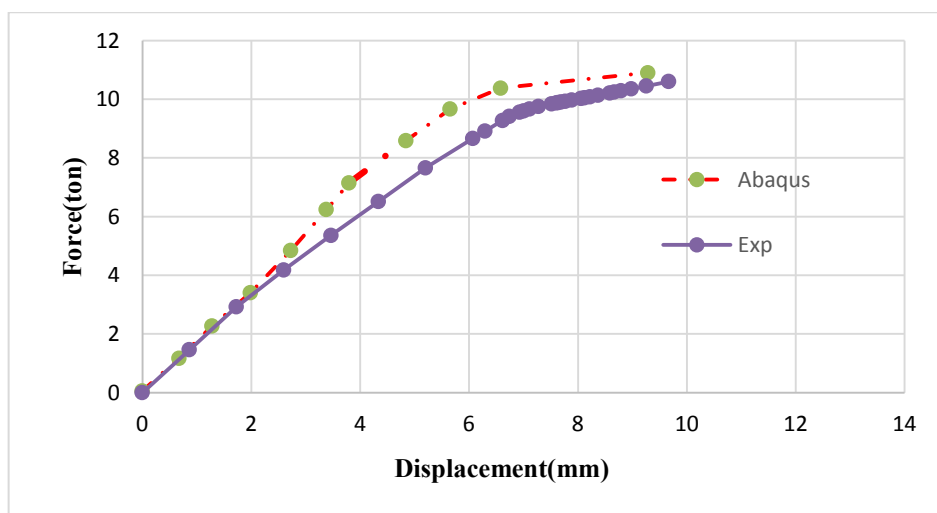
شکل ۳. تأثیر مش‌بندی در میزان همگرایی مدل نرم‌افزاری با نمونه آزمایشگاهی (صحت‌سنجی نمونه اول)

ND8X15-S (شکل ۴) و مدل‌سازی در آباکوس، میزان تطابق نتایج، با هدف صحت‌سنجی، در شکل ۵ ارائه گردیده است.

جهت بررسی دقیق‌تر، مدل آزمایشگاهی دیگری دارای بازشو، در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از تکیه‌گاه در نظر گرفته شده است (امیری و همکاران، ۲۰۰۴). در این کار آزمایشگاهی، با استفاده از مدلی به‌نام



شکل ۴. مدل آزمایشگاهی راستی‌آزمایی دوم (امیری و همکاران، ۲۰۰۴)



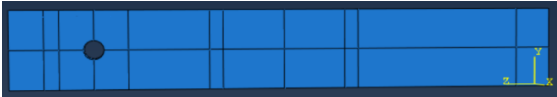
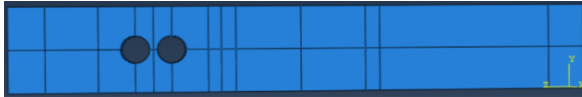
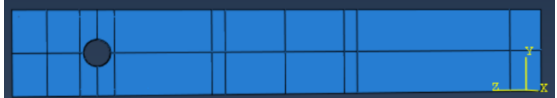
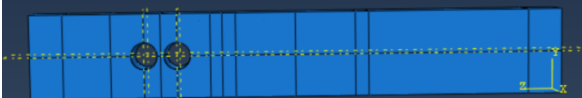
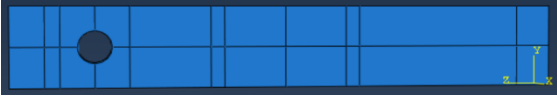

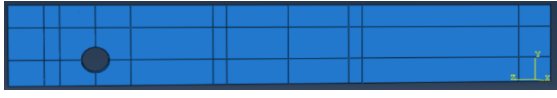



شکل ۵. نتایج صحت‌سنجی نمونه دوم

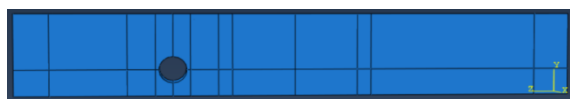
۳. مدل‌سازی

مقطع بررسی شده است. با توجه به به‌کارگیری تیرها در حالت دوسر مفصل در اکثر پل‌ها، مدل‌های تیر دو سر ساده (مفصل) و برای شبیه‌سازی تیرهای ممتد در برخی پل‌ها حالت دوسر گیردار مدل‌سازی شده و در ادامه نتایج این تحلیل‌ها ارائه شده است.

با استفاده از مدل‌سازی به روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس، تأثیر پارامترهای مختلف، از جمله ابعاد بازشوی دایره‌ای، موقعیت نسبی بازشو در تیر، چیدمان آرماتور جان و تأثیر غلاف فولادی پیشنهادی جاگذاری شده در داخل بازشو بر ظرفیت

جدول ۲. جزئیات نمونه‌های مدل‌شده در نرم‌افزار

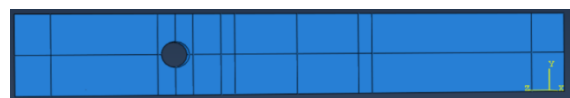
	
D6X14.4-H12.5 مدل ۹-	D8X24.4 V D8X35 مدل ۱-
	
D8X14.4-H12.5 مدل ۱۰-	D8X24.4 V D8X35-GHALAF0.8cm مدل ۲-
	
D10X14.4-H12.5 مدل ۱۱-	D8X35-s مدل ۳-
	
D8X14.4-H8 مدل ۱۲-	D8X35-d مدل ۴-
	
D8X14.4-H17 مدل ۱۳-	D8X35-sd مدل ۵-



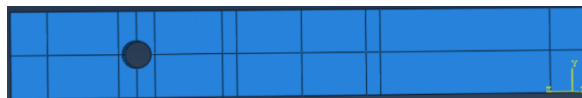
۱۴- مدل D8X35-H8



۶- مدل D10X14.4-H12.5-GHALAF1.0cm



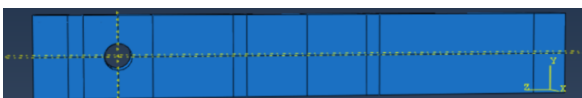
۱۵- مدل D8X35-H12.5



۷- مدل D8X24.4-H12.5



۱۶- مدل D8X35-H17



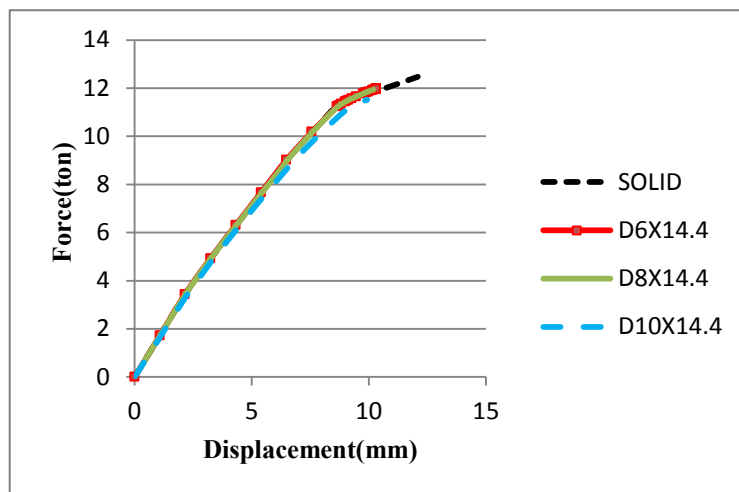
۸- مدل D8X14.4-H12.5-GHALAF1.0cm

آزمایشگاهی که در صحت‌سنجی معرفی شد، در نظر گرفته شده و مقاومت بتن ۳۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌باشد. در نمودارهای رفتاری ارائه شده نیز نتایج مربوط به تیر بدون بازشو با عبارت SOLID نشان داده شده است.

۳-۱. بررسی تأثیر ابعاد بازشوی دایره‌ای بر ظرفیت مقطع

برای بررسی تأثیر پارامتر ابعاد بازشوی دایره‌ای، سه نمونه تیر دارای بازشوی دایره‌ای به قطرهای ۶، ۸ و ۱۰ سانتی‌متر در نرم‌افزار آباکوس مدل شده و نتایج تحلیل برای هر نمونه به صورت منحنی نیرو- تغییرمکان ارائه شده است. با توجه به نمودار نیرو- تغییرمکان برای بازشوها با سه قطر متفاوت و مدل بدون بازشو، می‌شود دریافت که وجود بازشو باعث کاهش ظرفیت مقطع شده و همچنین نمودار نیرو- تغییرمکان مدل با قطر بازشوی ۶ و ۸ سانتی‌متر بر هم منطبقند و تغییر محسوسی حاصل نشده است. ولی در نمودار مربوط به مدل با قطر بازشوی ۱۰ سانتی‌متر، ظرفیت باربری پایین‌تر آمده و کاهش ظرفیت مقطع نسبت به دو نمونه قبلی بیشتر است. کاهش ظرفیت مقطع با افزایش قطر بازشو در شکل ۶ قابل مشاهده است.

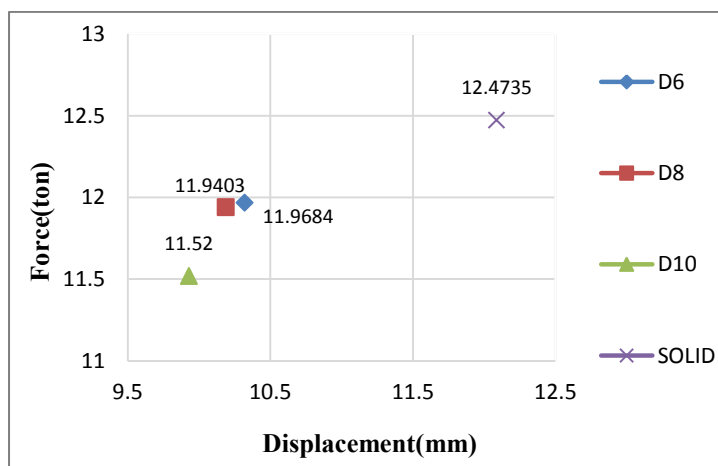
نام‌گذاری نمونه‌های مدل شده در نرم‌افزار آباکوس به این ترتیب است که عدد بعد از حرف D نشان‌دهنده قطر بازشو بر حسب سانتی‌متر و عددی که بعد از X قرار گرفته، نشان‌دهنده فاصله مرکز بازشو دایره‌ای از نزدیک‌ترین تکیه‌گاه بر حسب سانتی‌متر است. عدد بعد از حرف H نیز نشان‌دهنده فاصله عمودی مرکز بازشوی دایره‌ای از لبه‌ی پایینی تیر مدل شده می‌باشد. حرف s نشان‌دهنده وجود خاموت‌های کوچک در بالا و پایین بازشو و حرف d نشان‌دهنده وجود آرماتور قطری حول بازشو است. عدد بعد از GHALAF هم ضخامت غلاف فولادی را نشان داده است. به عنوان مثال، علامت اختصاری D8X14.4-H12.5-GHALAF0.5 معرف نمونه‌ی مدل شده دارای بازشو به قطر ۸ سانتی‌متر، فاصله‌ی مرکز بازشو از نزدیک‌ترین تکیه‌گاه ۱۴/۴ سانتی‌متر، فاصله مرکز بازشو از لبه‌ی پایینی تیر ۱۲/۵ سانتی‌متر و غلاف فولادی داخل بازشو با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر می‌باشد. غلاف فولادی پیشنهادی در محل بازشو و قبل از بتن‌ریزی قرار می‌گیرد و برای اتصال بتن و غلاف فولادی از میلگردهایی استفاده شده که یک سر آن‌ها به غلاف جوش داده شده و سر دیگر در بتن قرار می‌گیرد. در جدول ۲، جزئیات نمونه‌های مدل شده در نرم‌افزار با ذکر نام، آورده شده است. ویژگی‌های بتن و فولاد همانند تیر بتن مسلح



شکل ۶. نمودار تأثیر قطر بازشو بر ظرفیت مقطع تیر

حدود ۱۰٪ می‌رسد. این مقدار کاهش ظرفیت با وجود یک سوراخ ۱۰ سانتی متری و بدون تدابیر دیگر، بسیار کمتر از حد انتظار است که البته مرتبط با نوع بارگذاری نیز می‌باشد.

با مقایسه نقاط شکست در شکل ۷، مشاهده می‌شود که در هر سه نمونه، بار نهایی و حداکثر تغییر مکان نسبت به تیر بدون بازشو کاهش یافته است که در مدل با قطر بازشوی ۱۰ سانتی متر این کاهش باربری به



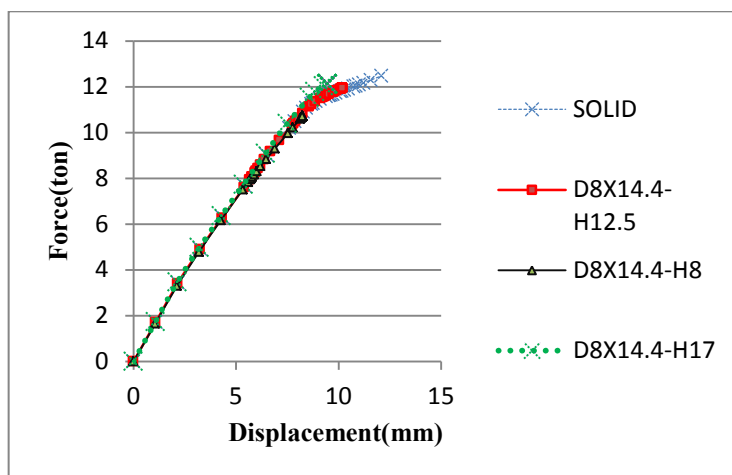
شکل ۷. مقایسه نقاط شکست در بررسی تأثیر قطر بازشو بر ظرفیت مقطع تیر

صورت نمودار نیرو-تغییر مکان ارائه شده است. با توجه به نمودار نیرو-تغییر مکان شکل ۸ برای سه مدل مذکور درمی‌یابیم که هر چه فاصله مرکز بازشو از لبه پایینی تیر بیشتر باشد، ظرفیت مقطع بیشتر است. به طوری که این مقدار از مدل H17 تا H8 به اندازه ۱۲٪ کاهش ظرفیت نشان می‌دهد. یکی از دلایل این امر، تأثیر حذف تارهای کششی در ناحیه الاستوپلاستیک منحنی رفتاری است. در حالی که در محدوده خطی بتن، ناحیه فشاری جبران ضعف کششی را می‌کند.

۲-۳. بررسی تأثیر موقعیت بازشو در ارتفاع

تیر بر ظرفیت مقطع

برای بررسی تأثیر پارامتر موقعیت بازشو در ارتفاع تیر، سه مدل با قطر بازشوی ۸ سانتی متر در نظر گرفته شده که فاصله مرکز بازشوی دایره‌ای به ترتیب ۸، ۱۲/۵ و ۱۷ سانتی متر از لبه پایینی تیر و فاصله‌ی مرکز همه‌ی این بازشوها از نزدیک‌ترین تکیه‌گاه ۱۴/۴ سانتی متر در طول تیر است. نتایج تحلیل مدل‌ها در نرم‌افزار آباکوس به

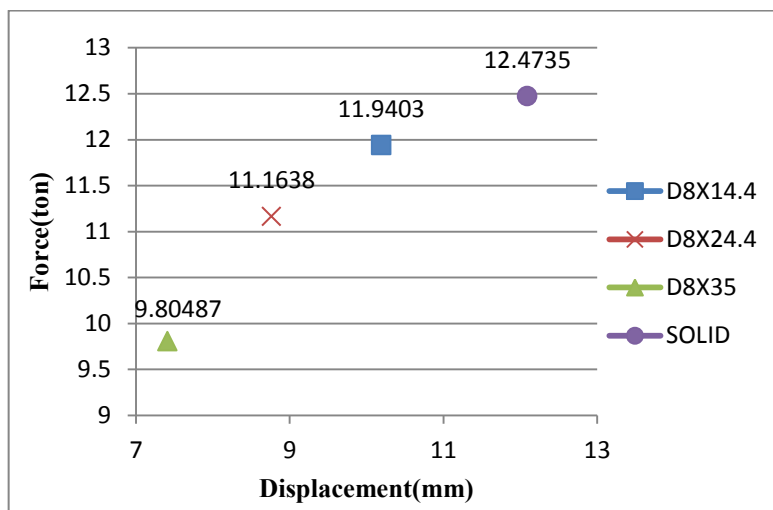


شکل ۸. نمودار تأثیر ارتفاع بازشو بر ظرفیت مقطع تیر

قرار دارد، در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده و نتایج تحلیل به صورت نمودار نیرو- تغییر مکان در شکل ۹ ارائه شده است (مرکز بازشوها در فاصله ۱۲/۵ سانتی متری از لبه ی پایین تیر می باشد).

۳-۳. بررسی تأثیر موقعیت بازشو در طول تیر بر ظرفیت مقطع

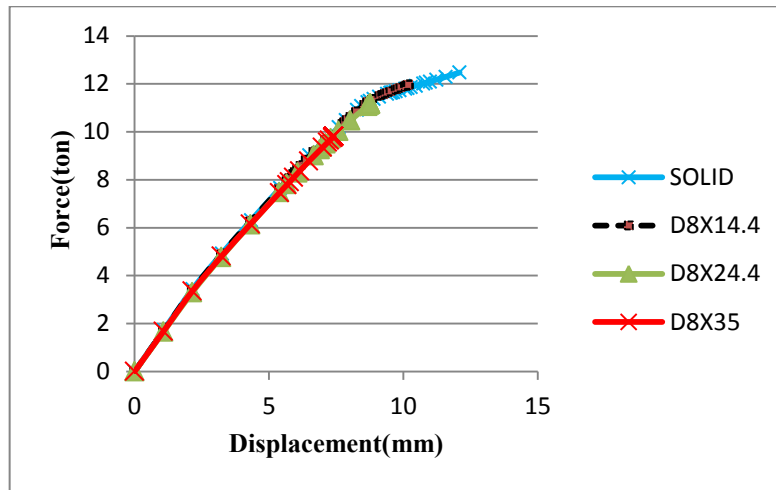
برای بررسی تأثیر پارامتر موقعیت بازشو در طول تیر، مدل هایی دارای بازشوی دایره ای با قطر ۸ سانتی متر که مرکز بازشو در فواصل مختلف از نزدیک ترین تکیه گاه



شکل ۹. تأثیر موقعیت بازشو در طول تیر بر ظرفیت مقطع تیر

رسان به برش قلمداد می شود، ولیکن کاهش ظرفیت یاد شده که با فاصله گرفتن از تکیه گاه افزایش یافته است. نشان از تأثیر بیشتر بازشو بر ظرفیت خمشی می باشد. همچنین، مشخص می شود که در این نوع تیر هنوز عملکرد تیری حاکم است.

با توجه به ظرفیت باربری در نمودار نیرو- تغییر مکان شکل ۱۰ و سطح زیر نمودار برای سه مدل مذکور، درمی یابیم که با دور شدن از تکیه گاه، ظرفیت مقطع و انرژی جذب شده ۸ و ۱۶ درصد کاسته شده است. بنابراین، گرچه بازشدگی در جان تیر و آسیب-



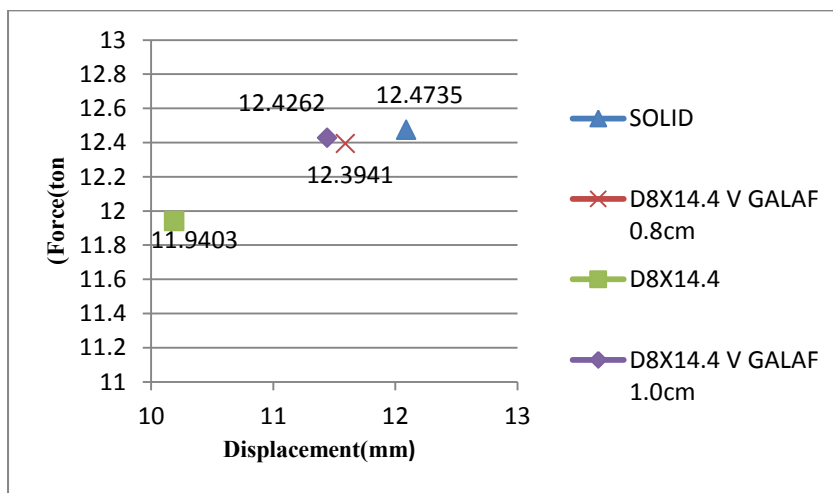
شکل ۱۰. نمودار تأثیر پارامتر موقعیت بازشو از تکیه‌گاه تیر بر ظرفیت مقطع تیر

ظرفیت مقطع مؤثر است. با مقایسه نقاط شکست مدل D8X14.4 و مدل‌های دارای غلاف فولادی، مشاهده می‌شود که با استفاده از غلاف فولادی با ضخامت مناسب، ظرفیت مقطع به ظرفیت مقطع تیر بدون بازشو نزدیک می‌شود و در شرایط بارگذاری حاضر، نسبت به تیر بدون بازشو تنها ۳٪ کمتر خواهد بود. این جبران کاستی توسط غلاف فولادی، با توجه به انتقال بردارهای نیرویی از یک سمت بازشو به سمت دیگر و مهار آرماتورها در طرفین غلاف، طبیعی بوده و ظرفیت این انتقال نیرو به مقاومت استوانه فولادی وابسته است.

۳-۴. بررسی تأثیر غلاف فولادی پیشنهادی در

محل بازشو بر ظرفیت مقطع

برای بررسی تأثیر ضخامت غلاف فولادی بر ظرفیت کاهش یافته مقطع و با فرض جبران ضعف ناشی از ایجاد بازشو، مدل D8X14.4-H12.5-GHALAF0.8 (ضخامت غلاف فولادی ۰/۸ سانتی‌متر) و مدل D8X14.4-H12.5-GALAF1.0 (ضخامت غلاف فولادی ۱ سانتی‌متر) را در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی نموده و نتایج تحلیل به صورت نمودار نیرو- تغییر مکان در شکل ۱۱ ارائه شده است. استفاده از غلاف فولادی پیشنهادی که در محل بازشو مدل شده، در افزایش

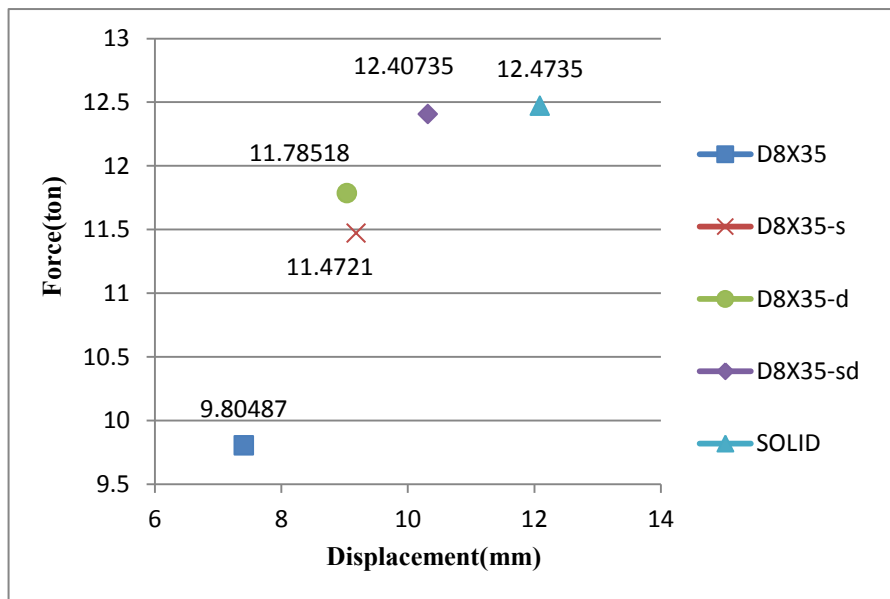


شکل ۱۱. مقایسه نقاط شکست مدل D8X14.4 در حالت بدون غلاف و با غلاف

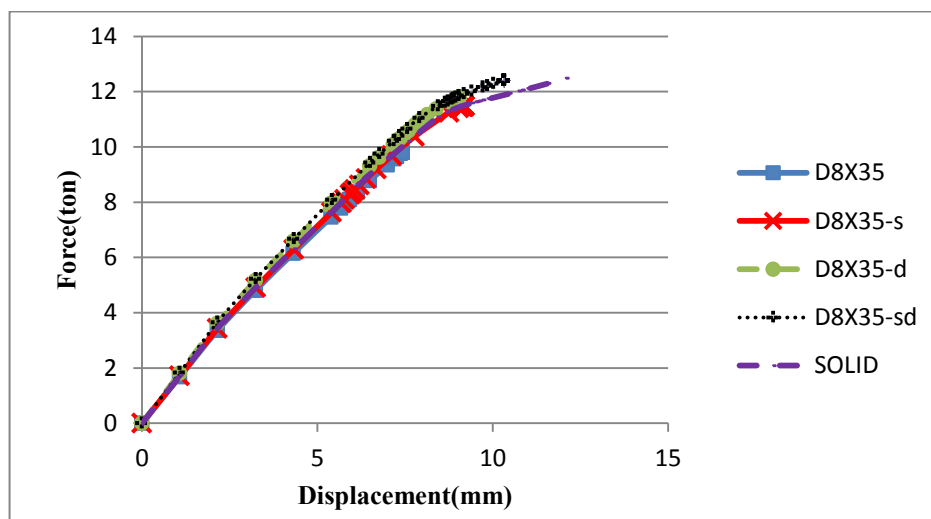
نتایج در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. نمودارها گویای افزایش ظرفیت مقطع تیر و انرژی جذب شده در مدل ترکیبی است و نشان‌دهنده آن است که خاموت‌های کوچک و میلگردهای قطری باید همزمان در اطراف بازشو قرار بگیرند. در این حالت نیز با کاهش ظرفیت بیشتر از ۳٪ روبرو نخواهیم بود. انتقال نیرو در این مدل‌ها به مقاومت میلگردهای فولادی اضافی وابسته است و توانسته همچون غلاف فولادی نقش ایفا نماید. در واقع، این روش، با اتصال صحیح با آرماتورهای اصلی توانسته است نوعی غلاف بتن مسلح در اطراف سوراخ‌ها ایجاد کند.

۳-۵. بررسی تأثیر چیدمان آرماتور جان بر ظرفیت مقطع تیر

جهت انجام نوعی مقایسه و بررسی ایده‌هایی که در کارهای قبلی جهت رفع نواقص ناشی از سوراخ‌شدگی تیر پیشنهاد شده بوده، مدل‌سازی انواعی از آرماتورگذاری نیز در مدل‌ها گنجانیده شده است. همانطور که در مدل‌های با غلاف در جدول ۲ مشخص است، برای حالتی که مرکز بازشو در فاصله ۳۵ سانتی‌متری از نزدیک‌ترین تکیه‌گاه قرار دارد، خاموت‌های کوچک در بالا و پایین بازشو، آرماتور قطری حول بازشو و ترکیب دو حالت، مدل‌سازی شده و تفاوت



شکل ۱۲. مقایسه نقاط شکست جهت بررسی تأثیر چیدمان آرماتور جان بر ظرفیت مقطع تیر

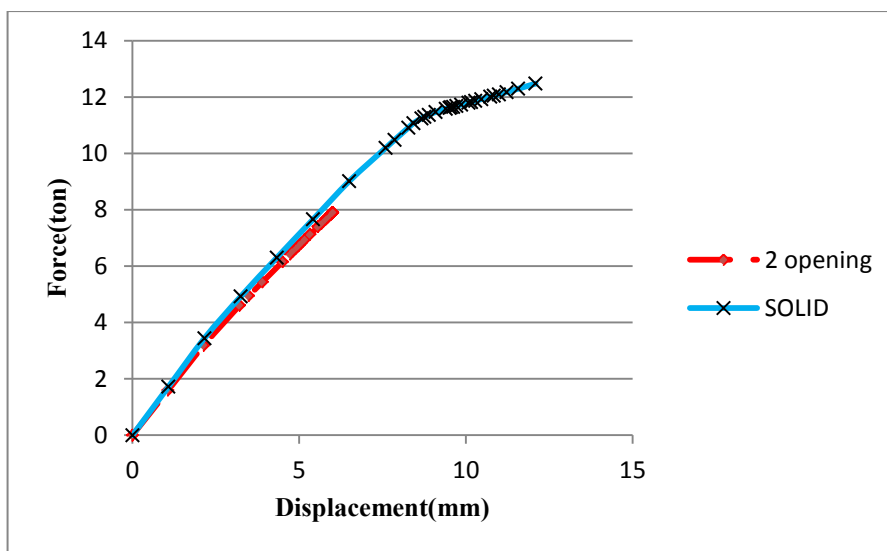


شکل ۱۳. ارزیابی تأثیر چیدمان آرماتور جان بر ظرفیت مقطع تیر

با ایجاد دو بازشوی کنار هم با قطر ۸ سانتی‌متر، ظرفیت مقطع کاهش قابل توجهی و تا ۴۰٪ نشان می‌دهد که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. در واقع، با گسترش بازشو، توان انتقال نیرو از زوایای قطری به زوایای بزرگتر رفته و نوعی ناپایداری پدید می‌آید.

۳-۶. نمودار نیرو- تغییرمکان دو بازشوی

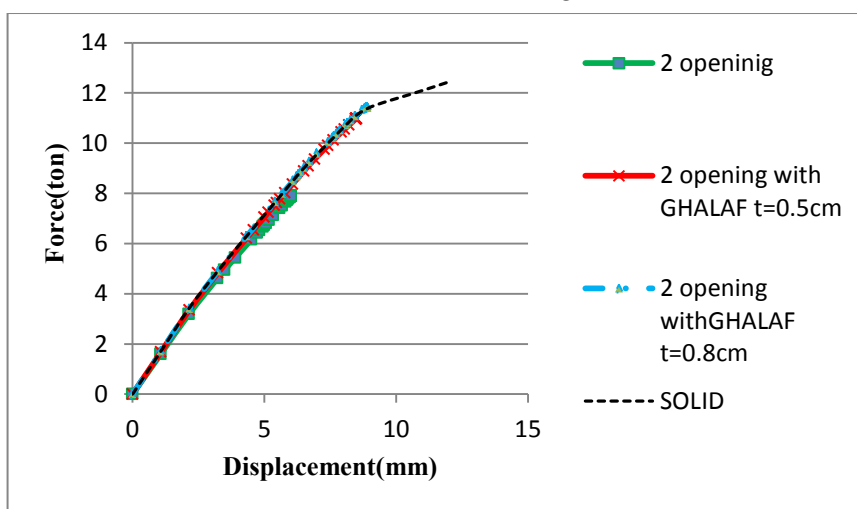
کنار هم



شکل ۱۴. نمودار نیرو- تغییرمکان دو بازشوی کنار هم با قطر ۸ سانتی‌متر و تیر بدون بازشو

مقدار ظرفیت باربری مقطع را تا میزان ۹٪ کمتر از تیر بدون بازشو افزایش می‌دهد. در اینجا نیز وظیفه انتقال نیرو توسط ساختار استوانه‌ای غلاف که متصل به آرماتورها شده انجام شده است و توانسته تا حد مطلوبی ظرفیت باربری را حفظ نماید.

تأثیر غلاف فولادی پیشنهادی در محل بازشو در مدل با دو بازشوی کنار هم نیز بررسی گردید و نتایج تحلیل با نرم‌افزار در قالب نمودار نیرو- تغییرمکان در شکل ۱۵ ارائه شده است که حاکی از جبران ضعف ناشی از ایجاد بازشو توسط غلاف فولادی می‌باشد و



شکل ۱۵. نمودار نیرو- تغییر مکان (تأثیر غلاف فولادی در محل بازشو)

بار شکست و انرژی جذب شده‌ی مدل‌های تیر با تکیه-گاه دوسر مفصل در جدول ۳ و برای تیر با تکیه‌گاه دوسر گیردار در جدول ۴ آمده است. در این جداول، با تنوع بیشتری مدل‌ها و نتایج تحلیلی آنها ارائه شده است.

۳-۷. بار شکست و انرژی جذب شده مدل‌ها با تکیه‌گاه دوسر مفصل و تکیه‌گاه دوسر گیردار

جدول ۳. بار شکست و انرژی جذب شده‌ی مدل‌ها (در حالت دوسر مفصل)

نام مدل	بار شکست (ton)	درصد کاهش بار شکست مدل‌ها نسبت به تیر SOLID	انرژی جذب شده
SOLID	12.50	-	75.50
D6X14.4-H12.5	11.96	4.00	61.75
D8X14.4-H12.5	11.94	4.20	60.70
D8X14.4-H8	10.71	14.11	44.17
D8X14.4-H17	12.13	2.70	57.42
D10X14.4-H12.5	11.52	7.60	57.20
D10X14.4-H12.5-GALAF 1.0cm	12.47	3.05	78.82
D8X24.4-H12.5	11.16	10.50	48.90
D8X35-H12.5	9.80	21.00	36.32
D8X35-H8	11.06	11.30	50.62
D8X35-H17	11.20	10.20	47.90
D8X14.4-H12.5-GALAF 0.5cm	12.02	3.60	61.94
D8X14.4-H12.5-GALAF 0.8cm	12.39	0.60	71.83
D8X14.4-H12.5-GALAF 1.0cm	12.43	0.40	72.00
D8X35-H12.5-s	11.47	8.00	52.69
D8X35-H12.5-d	11.79	5.50	53.63
D8X35-H12.5-sd	12.41	0.40	64.03
D8X24.4 V D8X35	7.90	36.70	23.72
D8X24.4 V D8X35-GALAF 0.5 cm	10.97	12.00	46.50
D8X24.4 V D8X35-GALAF 0.8 cm	11.43	8.30	50.86

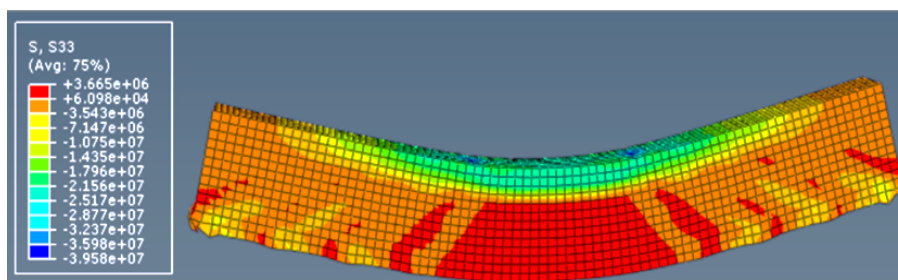
جدول ۴. بار شکست و انرژی جذب شده‌ی مدل‌ها (در حالت دو سر گیردار)

نام مدل	بار شکست (ton)	درصد کاهش بار شکست مدل‌ها نسبت به تیر SOLID	انرژی جذب شده
SOLID	14.60	-	63.50
D6X14.4-H12.5	14.26	2.30	61.70
D8X14.4-H12.5	13.72	6.00	61.00
D8X24.4-H12.5	14.38	1.50	65.00
D8X35-H12.5	11.30	22.00	38.10
D8X35-H8	11.76	19.00	43.80
D8X35-H17	9.96	32.00	27.90
D8X14.4-H12.5-GALAF 0.8cm	14.59	0.07	61.37
D8X14.4-H12.5-GALAF 1.0cm	14.83	0.02	63.91
D8X35-H12.5-sd	14.84	0.06	64.18
D8X24.4 V D8X35	11.19	23.30	40.80
D8X24.4 V D8X35-GALAF 0.5 cm	12.20	16.40	44.60
D8X24.4 V D8X35-GALAF 0.8 cm	13.50	7.50	54.41

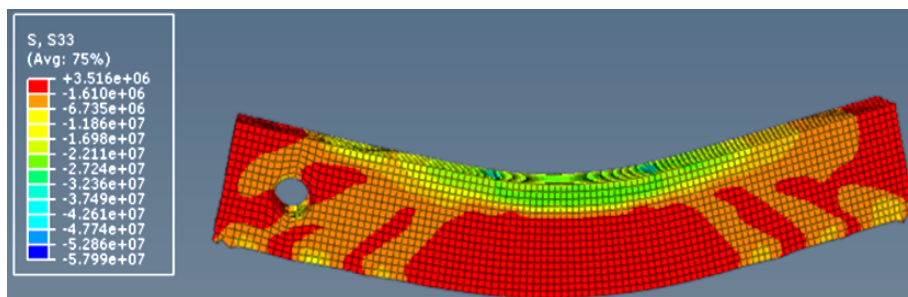
۳-۸. نمایش نمونه کانتور تنش

یه عنوان نمونه، یکی از کانتورهای تنش برای مدل بدون بازشو (SOLID)، مدل دارای بازشوی D8X14.4-H12.5 و مدل دارای غلاف فولادی D8X14.4-H12.5 opening with GHALAF t=1.0cm در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کانتور توزیع تنش و مقادیر آن در مدل دارای غلاف در محل بازشو (شکل ۱۸) به مدل تیر بدون بازشو (شکل ۱۶) بسیار نزدیک شده است.

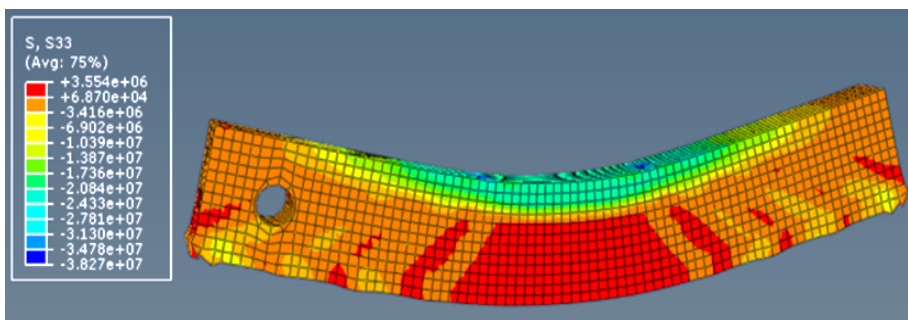
یکی از مهمترین نتایج مجموعه مدل‌های ارائه شده در جداول آن است که در مدل‌های دارای غلاف فلزی با یک سانتی‌متر ضخامت، سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان یا انرژی جذب شده، به تراز تیر بدون بازشو نزدیک شده است. این امر حکایت از امکان ایجاد بازشو با تدابیر طراحی شده دارد. البته جهت تعمیم نتایج به حالت عمومی‌تر در تیرهای پل، نیاز به مدل‌سازی با انواع ضروری دیگر بارگذاری، نظیر بارهای لرزه‌ای و ترافیکی متحرک و تعیین ضخامت لازم جهت جایگزینی غلاف فلزی می‌باشد.



شکل ۱۶. کانتور تنش مدل بدون بازشو



شکل ۱۷. کانتور تنش مدل D8X14.4-H12.5



شکل ۱۸. کانتور تنش مدل D8X14.4-H12.5-GHALAF 1.0cm

۴. نتیجه گیری

مجموعه مدل‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با ایجاد بازشو، بار شکست و انرژی جذب شده (سطح زیر نمودار نیرو- تغییرمکان) به اندازه قابل توجهی کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش قطر بازشو متناسب است. این کاهش بار شکست در مدل‌های ساخته شده، که شامل بازشو با قطر ۸ تا ۱۰ سانتی‌متری است، در حالت دوسر مفصل ۴ تا ۱۵ درصد است. کاهش انرژی جذب شده نیز ۱۸ تا ۵۰ درصد می‌باشد. وقتی بازشو در راستای محور طولی تیر و نزدیک بار متمرکز باشد، کاهش بار شکست و انرژی جذب شده بیش از دو برابر حالتی است که بازشو وجود ندارد و این نتیجه با توجه به کانتورهای تنش متناظر با تخریب حتمی تیر، به‌ویژه در هنگام بروز بارگذاری‌های ویژه نظیر زلزله، است. این مقادیر کاهش ظرفیت، با تدابیر پیشنهادی نظیر جای‌گذاری غلاف فلزی با ضخامت مناسب، برطرف شده است. غلاف فولادی پیشنهادی که با مشخصات فولاد فشاری در محل بازشو مدل‌سازی شده، باعث افزایش بار شکست و انرژی جذب شده‌ی مدل شده است. در واقع، این استوانه فولادی با ضخامت‌های بیش از ۰/۸ سانتی‌متر، ضعف ناشی از ایجاد بازشو را جبران کرده و در شرایط بارگذاری انجام شده، نسبت به تیر بدون بازشو، تنها ۳٪ کمتر ظرفیت نشان داده است.

در این پژوهش، تدبیری که در کارهای گذشته مورد استفاده و توصیه بوده نیز در مدل‌سازی لحاظ شده است. به این ترتیب که با قرار دادن میلگردهای طولی

اضافه و خاموت‌های کوچک در بالا و پایین بازشو، ظرفیت مقطع تنها ۶٪ کمتر از تیر بدون بازشو به دست آمده است. این امر در مدل D8X35-S مشهود است. قرارگیری خاموت‌های مایل در اطراف بازشو نیز باعث افزایش بار شکست تا میزان ۹۶٪ ظرفیت تیر بدون بازشو و درصد انرژی جذب شده تا اندازه ۹۱٪ تیر بدون بازشو است. همچنین، ترکیب خاموت‌های کوچک بالا و پایین بازشو و خاموت‌های مایل اطراف بازشو، ظرفیت مقطع را مطابق مدل‌ها تا حدود تیر بدون بازشو افزایش می‌دهد.

در حالتی که دو بازشو کنار هم و با فاصله خیلی کم قرار دارند، بار شکست و انرژی جذب شده کاهش بیشتری نشان می‌دهد. به طوری که بر طبق اطلاعات جداول ۳ و ۴ در مدل با دو بازشو در فاصله‌ی در حدود ۲۵ و ۳۵ سانتی‌متری از تکیه‌گاه، شاهد کاهش ۳۶/۷ درصدی بار شکست و کاهش ۶۸/۵۰ درصدی انرژی جذب شده برای مدل دوسر مفصل هستیم. مقدار این کاهش برای مدل دوسر گیردار با دو بازشو به ترتیب ۲۳/۳۰ و ۳۵/۷۰ درصد می‌باشد. در واقع، با ظهور بازشوها، نتایج عملکردی نشان می‌دهد که نمی‌توان به درستی از ظرفیت غیرخطی تیر استفاده کرد و پیش از ورود به آن مرحله، شکست اتفاق می‌افتد.

در نتیجه، با اعمال روش مناسب، به‌ویژه با استفاده از غلاف فولادی با ضخامت‌های پیشنهادی در محل بازشو، و حتی در حالت بازشدگی دوگانه، می‌توان بدون نگرانی از کاهش باربری، سوراخ‌های عرضی در تیرها ایجاد کرد و از مزایای آن بهره برد.

۵. مراجع

- ABAQUS 6.12. 2012. Simulia Inc., Providence, RI.
- Abdel-Kareem, A. A. and Abd El Salam, A. M. 2020. "Experimental and analytical investigation of reinforced concrete beams with large web opening under pure torsion". *Int. J. Adv. Eng. Manag. Sci.*, 6(1): 18-33.
- Amiri, J. V. and ALibygie, M. 2004. "Effect of small circular opening on the shear and flexural behavior and ultimate strength of reinforced concrete beams using normal and high strength concrete". *The 13th World Conference on Earthquake Engineering*.

- Jabbar, S., Hejazi, F. and Mahmud, H. M. 2016. "Effect of an opening on reinforced concrete hollow beam web under torsional, flexural, and cyclic loadings". *Lat. Am. J. Solids Struct.*, 13: 1576-1595.
- Mansur, M. A. 1998. "Effect of openings on the behaviour and strength of R/C beams in shear". *Cement Concrete Comp.*, 20(6): 477-486.
- Mansur, M. A., Tan, K. H. and Lee, S. 1985. "Design method for reinforced concrete beams with large openings". *ACI J.*, 82(4): 517-524.
- Mohamed, A. R., Shoukry, M. S. and Saeed, J. M. 2014. "Prediction of the behavior of reinforced concrete deep beams with web openings using the finite element method". *Alexandria Eng. J.*, 53(2): 329-339.
- Nasser, K. W., Acavalos, A. and Daniel, H. R. 1967. "Behavior and design of large openings in reinforced concrete beams". *ACI Struct. J.*, 64(3): 25-33.
- Pachideh, G., Gholhaki, M. and Moshtagh, A. 2020. "Experimental study on mechanical strength of porous concrete pavement containing pozzolans". *Adv. Civ. Eng. Mater.*, 9(1): 38-52.
- Prentzas, E. G. 1968. "Behaviour and reinforcement of concrete beams with large rectangular apertures". PhD Thesis, University of Sheffield, U.K.
- Rahimi, M., Vaseghi Amiri, J. and Hosseinalibeigi, M. 2004. "Experimental investigation of the effect of circular openings on shear and flexural behavior of reinforced concrete beams". *J. School Eng.*, 16(1): 37-52. (In Persian).
- Hawileh, R. A., El-Maaddawy, T. A. and Naser, M. Z. 2012. "Nonlinear finite element modeling of concrete deep beams with openings strengthened with externally-bonded composites". *Mater. Design*, 42: 378-387.
- Somes, N. F. and Corley, W. G. 1974. "Circular openings in webs of continuous beams". *ACI J.*, 42: 359-398.
- Thevendran, V. and Shanmugam, N. E. (1992). Lateral buckling of narrow rectangular beams containing openings. *Comput. Struct.*, 43(2): 247-254.
- Zohreh Vand, M. J. 2011. "Numerical investigation of deep beams". MSc. Thesis, Tarbiat Modares University. (In Persian).