

## بررسی اثر شدت محصورشدگی فعال بر روی رفتار خمشی مقاطع مرکب لوله‌ای پر شده با بتن

م. نقی‌پور<sup>۱</sup>، م. نعمتی<sup>۲</sup>، ج. جلالی مسلم<sup>۳</sup>، م. نعمت زاده<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه، دانشگاه نوشیروانی بابل

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

<sup>۴</sup> استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران

نویسنده مسئول: م. نقی‌پور، m-naghi@nit.ac.ir

### چکیده

هدف از این تحقیق بررسی اثر شدت فشار اولیه اعمالی بر روی هسته بتنی تر نمونه‌های مرکب لوله‌ای پر شده با بتن و رفتار خمشی مقاطع مرکب می‌باشد. در این تحقیق، رفتار خمشی ۱۲ نمونه به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند. پارامترهای متغیر اصلی در این تحقیق عبارتند از: نسبت قطر به ضخامت لوله (۲۰، ۳۰ و ۶۰)، شدت فشار اولیه اعمالی (بدون فشار، کم، متوسط و زیاد) و نوع محصورشدگی (فعال و منفعل). در نهایت ظرفیت خمشی، میزان انرژی جذب شده، انعطاف‌پذیری، مود شکست و ترک‌های ایجاد شده در لحظه شکست در هسته بتنی تعیین شده‌اند. نتایج حاصله داد که استفاده از محصورشدگی فعال ایجاد شده بوسیله اعمال فشار اولیه بالا، در نمونه‌های نازک‌تر مناسب‌تر از نمونه‌های ضخیم‌تر می‌باشد. بعلاوه می‌توان نتیجه گرفت در نمونه‌های با  $D/t=20$ ، اعمال فشار اولیه اثر مطلوبی بر روی رفتار خمشی نمونه‌ها نخواهد داشت. همچنین اعمال فشار بر روی نمونه‌هایی با  $D/t$  برابر ۶۰ و ۳۰، سبب بهبود رفتار خمشی نمونه نسبت به نمونه‌هایی با محصورشدگی منفعل می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** محصورشدگی فعال، رفتار خمشی، انرژی جذب شده، پیش تنیدگی، مقاطع مرکب لوله‌ای پر شده با بتن، بتن تر، فشار اولیه

### ۱- مقدمه

مقاطع نسبت به مقاطع فولادی و بتنی تنها می‌باشد، زیرا محصور نمودن بتن بوسیله لوله فولادی، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن محصور شده و در نهایت افزایش ظرفیت باربری این مقاطع تحت بار محوری می‌گردد. رفتار خمشی مقاطع مرکب توسط محققین بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است [۸-۱ و ۹-۱۲]. کانگ و همکاران، یک مقطع مرکب بتن و فولاد جدید برای استفاده در شاه‌تیرهای پل پیشنهاد دادند که هزینه جوشکاری و بتن‌ریزی در آن به مراتب کمتر است. نتایج بررسی‌های کانگ و همکاران، نشان داد که شاه‌تیرهای لوله‌ای فولادی پر شده با بتن، انعطاف‌پذیری خوبی داشته و مقاومت خود را تا پایان بارگذاری حفظ می‌کنند.

تحقیقات انجام شده توسط تومی و ساکینو، لو و کندی و کیلپاتریک و رانگان، در زمینه رفتار خمشی مقاطع مرکب، بیانگر انعطاف‌پذیری قابل ملاحظه این مقاطع بوده است.

مقاطع مرکب لوله‌ای پر شده با بتن، به طور گسترده‌ای در صنعت ساختمان‌سازی و پل‌سازی استفاده شده است. تحقیقات بسیاری رفتار سازه‌ای برتر مقاطع مرکب در مقایسه با اعضا بتن مسلح یا فولادی را نشان دادند. عملکرد مرکب بتن و فولاد، بدین گونه است که مقاومت فشاری بتن بدلیل محصورشدگی بتن بوسیله لوله محصورکننده، افزایش یافته و کماتش لوله محصورکننده بدلیل حضور هسته بتنی، به تأخیر می‌افتد. علاوه بر مزیت سازه‌ای فوق، این نوع مقاطع دارای مزایای دیگری شامل تغییرشکل انعطاف‌پذیر، مقاومت لرزه‌ای بالا و میرایی مناسب، نیز می‌باشند.

رفتار ستون‌ها و تیر- ستون‌های مرکب به طور وسیعی در گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیقات بر روی رفتار ستون‌ها، بیانگر افزایش قابل ملاحظه ظرفیت باربری این

الگوی ترک و اندازه آن به میزان زیادی وابسته به لغزش میان بتن و لوله می‌باشد [۳].

نعمت زاده و نقی پور در تحقیقات خود، با اعمال فشار اولیه بر روی بتن تر هسته مقاطع مرکب، سبب تغییر نوع محصورشدگی از حالت منفعل به فعال شدند [۹-۱۱]. نتایج حاصل حاکی از افزایش پارامترهایی نظیر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری بتن در اثر محصورشدگی فعال می‌باشد [۹-۱۱].

نقی پور و همکاران [۱۲]، به بررسی عوامل مؤثر بر رفتار خمشی تیرهای مرکب پر شده با بتن پرداخته و نتیجه گرفتند که محصورشدگی فعال با اینکه تأثیری در مود شکست نمونه ندارد با این حال سبب کاهش میزان و شدت خردشدگی بتن در ناحیه فشاری و وسعت ناحیه ترک خورده و عمق ترک در ناحیه کششی نمونه می‌گردد. بعلاوه نتایج تحقیقاتشان نشان داد که محصورشدگی فعال هسته بتنی، بهترین بازدهی را در مقطعی با نسبت  $D/t=30$  و مقاومت فشاری پایین هسته بتنی دارد. در این مقطع، میزان انرژی جذب شده و ظرفیت خمشی مقطع به طور همزمان افزایش می‌یابد.

در این تحقیق، اثر شدت فشار اولیه اعمالی برای ایجاد محصورشدگی فعال هسته بتنی بر روی رفتار خمشی مقاطع لوله‌ای فولادی به صورت آزمایشگاهی، تحت بارگذاری استاتیکی و به صورت سه نقطه‌ای، بررسی شده است. مطالعه حاضر به بررسی اثر پارامترهایی نظیر شدت فشارهای اولیه اعمالی و نسبت  $D/t$  نمونه‌ها پرداخته است. در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده، ظرفیت خمشی، میزان انرژی جذب شده، مود شکست و نحوه ترک‌خوردگی بتن در لحظه شکست با در نظر گرفتن پارامترهای ذکر شده مورد مقایسه قرار گرفته است.

#### ۱- بررسی آزمایشگاهی

هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر میزان فشار اولیه اعمالی بر روی رفتار تیرهای مرکب می‌باشد. بدین منظور ۱۲ نمونه مرکب با انتهای مفصلی که شامل مقادیر متفاوت فشار اولیه اعمالی بوده، به صورت آزمایشگاهی بررسی شده‌اند. در بخش‌های بعدی شرح مفصلی از دستگاه پیش‌تنی‌دگی، نمونه‌های آزمایش، مصالح استفاده شده و روش انجام آزمایش آورده شده است.

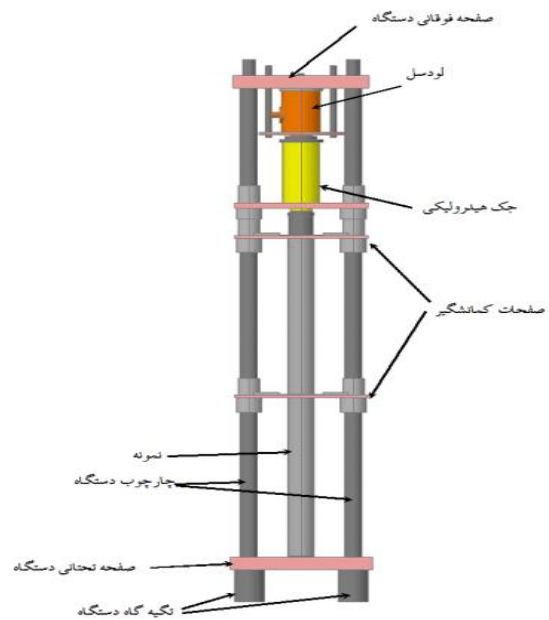
همچنین هسته بتنی این مقاطع موجب تغییر مود شکست لوله در ناحیه فشاری، از کمانش روبه داخل به کمانش روبه خارج، در بار وارده به مراتب بزرگتری، می‌گردد. لازم به ذکر است که نتایج تحقیقات پروبست و همکاران [۱] و پرایون و بوئمه، نشان داد که برای لوله‌های بسیار نازک، بدلیل کمانش موضعی دیواره‌های لوله، محصورشدگی کافی برای توسعه ظرفیت پلاستیک بتن فراهم نمی‌شود. بر مبنای نتایج تحقیقات گذشته، هرچند میزان بار محوری که در آن لوله فولادی شروع به تأمین محصورشدگی برای بتن می‌نماید، ناشناخته است؛ اما مشخص شده است که مقطع دایره‌ای مؤثرترین شکل مقطع این اعضا، به ویژه برای ستون‌های با نسبت  $L/D$  کم، می‌باشد. همچنین کیپاتریک برای مشاهده انتقال کامل بار، بدون لغزش بین لوله فولادی و هسته بتنی، نسبت دهانه برشی  $2.7$  را پیشنهاد داده است. از آنجا که تفاوت محسوسی بین مقادیر توصیه شده برای نسبت  $D/t$  بر مبنای آیین‌نامه‌های مختلف نظیر [AI, BS 5400, EC4, LRFD-AISC] وجود داشته است، الچالاکانی و همکاران [۶]، به بررسی رفتار خمشی نمونه‌های مرکب با نسبت‌های مختلف  $D/t$  پرداختند. نتایج تحقیقات [۶]، نشان داده است که برای نسبت‌های  $D/t$  کمتر از  $40$ ، هسته بتنی مانع از کمانش موضعی لوله می‌گردد. در حالی که برای مقادیر  $110 < D/t < 74$ ، موج‌های پلاستیک متعددی در محدوده غیرالاستیک نمونه‌ها تشکیل شده است. همچنین مقدار نسبت  $D/t$  پلاستیک برابر با  $112$  می‌باشد.

برای اولین بار، از مفهوم پس‌تنیدگی هسته بتنی مقاطع مرکب، در ساخت پل قوسی در آئوروا استفاده شده است [۲]. تووان [۵] و دنگ [۲]، به بررسی اثر پس‌تنیدگی در رفتار خمشی مقاطع پرداخته‌اند. در این تحقیقات برای پس‌تنیدگی هسته بتنی کابلی با مقاومت بالا در داخل لوله فولادی تعبیه شده، سپس در داخل لوله بتن منبسط‌شونده پمپ شده و پس از سخت شدن بتن، با کشیدن کابل، یک نیروی فشاری در هسته بتنی ایجاد شده است [۲]. نتایج تحقیقات تووان و دنگ [۲] و [۵]، حاکی از افزایش قابل ملاحظه ظرفیت خمشی مقطع، در اثر اعمال نیروی پس‌تنیدگی به هسته بتنی می‌باشد.

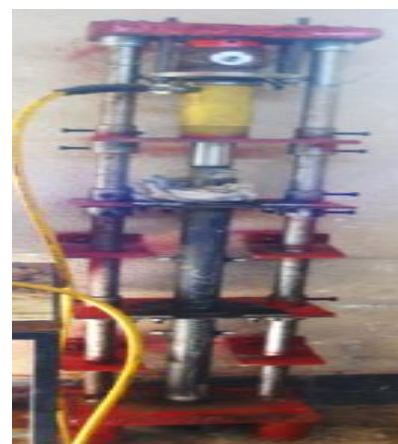
شاوکات و همکاران [۳]، به بررسی رفتار خمشی مقاطع مرکب با لوله‌های مستطیلی فولادی و اف آر پی با نسبت‌های مختلف دهانه برشی پرداخته و الگوی ترک، مود شکست و مقاومت این مقاطع را آزمایش نمودند. نتایج بررسی‌ها، با در نظر گرفتن دهانه برش بحرانی برای هر دو جنس لوله، بیانگر آن است که

۱-۲- دستگاه پیش‌تنیدگی

برای اعمال مقادیر مختلف فشار اولیه بر روی نمونه و ایجاد محصورشدگی فعال، دستگاهی تحت عنوان دستگاه پیش‌تنیدگی طراحی و ساخته شد (شکل (۱)). عملکرد دستگاه به گونه‌ای است که نمونه‌ی مرکب لوله‌ای حاوی بتن تر، در داخل دستگاه قرار گرفته و از طرف دستگاه به آن فشار وارد می‌شود. میزان فشار وارد قابل اندازه‌گیری و تنظیم شدن است. در اثر اعمال فشار توسط دستگاه، آب اضافی نمونه از محل‌هایی که در نمونه در نظر گرفته شده است، تخلیه می‌شود. این اعمال فشار اولیه بر روی نمونه‌ها منجر به تغییر نوع محصورشدگی هسته بتنی می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱- دستگاه پیش‌تنیدگی (الف) ترسیم شده در اتوکد (ب) ساخته شده در آزمایشگاه

دستگاه پیش‌تنیدگی به گونه‌ای طراحی شده است که در هر لحظه تنها قادر به اعمال فشار بر روی یک نمونه می‌باشد. در قسمت فوقانی دستگاه یک جک هیدرولیکی تعبیه شده است که فشار از طریق آن بر روی المان فوقانی استوانه‌ای شکل و سپس به هسته بتنی نمونه وارد می‌شود. این فشار در طول نمونه منتقل شده و منجر به خروج آب اضافی (آبی که برای هیدراتاسیون مورد استفاده قرار نمی‌گیرد) بتن تر می‌گردد. به منظور خروج این آب اضافی، شیرهایی در طول نمونه برای خروج آب در نظر گرفته شده است. همچنین آب قادر خواهد بود از فاصله اندکی که بین المان‌های فوقانی و تحتانی دستگاه با نمونه وجود دارد، خارج گردد. بر روی شیرهای موجود، از فیلترهای ویژه‌ای استفاده شده است. عملکرد فیلتر به گونه‌ای است که فقط آب قادر به خروج از آن باشد. همچنین فاصله بین المان‌های فوقانی و تحتانی دستگاه با نمونه به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که امکان خروج سایر ذرات بتن وجود نداشته باشد. شکل (۲)، آب خارج شده از شیرها و آب جمع شده بر روی صفحه پایینی دستگاه پیش‌تنیدگی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، آب خارج شده خالص می‌باشد. خالص بودن آب خارج شده از نمونه‌ها، تأییدی بر کارایی مناسب فیلترهای طراحی شده و فاصله در نظر گرفته شده، می‌باشد.



(ب)

(الف)

شکل ۲- (الف) آب خارج شده از شیرها (ب) آب جمع شده بر روی صفحه پایینی دستگاه پیش‌تنیدگی

فشار وارده توسط جک بر روی نمونه تا جایی ادامه دارد که آبی از نمونه خارج نشود. سپس نمونه از دستگاه پیش‌تنیدگی خارج می‌گردد. تخلیه آب اضافی ممکن است بین ۱۵ تا ۲۵

برابر ۹۰۰ و ۶۶۰ میلیمتر می‌باشد. نمونه‌ها در دو گروه تقسیم‌بندی شدند. در گروه اول، نمونه‌های با محصورشدگی فعال و در گروه دوم، نمونه‌های با محصورشدگی منفعل قرار گرفته‌اند. گروه اول به سه زیر گروه تقسیم شده است. مقدار فشار اعمال شده در هر زیر گروه متفاوت می‌باشد. فشار اعمال شده بر روی نمونه به صورت تابعی از مقاومت تسلیم لوله فولادی انتخاب شده است. در هر زیرگروه، سه نمونه با نسبت‌های مختلف  $D/t$  وجود دارد. از آن جایی که قطر خارجی کلیه نمونه‌ها برابر ۶۰ میلیمتر می‌باشد، لذا تغییر نسبت  $D/t$  آن‌ها به دلیل تغییر در ضخامت جداره لوله فولادی رخ می‌دهد. مقاومت فشاری هسته بتنی در کلیه نمونه‌ها ثابت و برابر ۱۵ مگاپاسکال می‌باشد. در جدول (۱) جزئیات کلیه نمونه‌ها آورده شده است.

## ۲-۲- نمونه‌ها

در این تحقیق، ۱۲ نمونه به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. طول خالص و طول دهانه کلیه نمونه‌ها به ترتیب

جدول ۱- جزئیات نمونه‌ها

t mm	شدت فشار اولیه وارده	نام نمونه	نوع محصورشدگی
۱		T1-0.8P	
۲	زیاد	T2-0.8P	
۳		T3-0.8P	
۱		T1-0.4P	
۲	متوسط	T2-0.4P	فعال
۳		T3-0.4P	
۱		T1-0.2P	
۲	کم	T2-0.2P	
۳		T3-0.2P	
۱		T1-NP	
۲	بدون فشار اولیه	T2-NP	منفعل
۳		T3-NP	

این قسمت شامل یک حرف و یک عدد می‌باشد که در مجموع میزان فشار وارد بر نمونه را به صورت درصدی از نیرویی که سبب تسلیم لوله فولادی می‌شود، بیان می‌کنند. اما در نمونه‌های منفعل، قسمت دوم از دو حرف تشکیل شده است که نشان‌دهنده عدم وجود فشار بر روی این نمونه می‌باشد. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، برای هر زیر گروه، سه ضخامت مختلف ۱، ۲ و ۳ میلیمتر برای جداره لوله فولادی در نظر گرفته شده است.

همانطور که در جدول (۱) ملاحظه می‌شود نامگذاری هر نمونه از دو قسمت تشکیل شده است. نامگذاری به گونه‌ای صورت گرفته است که معرف میزان فشار اولیه اعمالی بر روی نمونه و ضخامت جداره لوله فولادی هر نمونه باشد. قسمت اول نام هر نمونه، شامل یک حرف و یک عدد می‌باشد. حرف T، بیانگر ضخامت جداره لوله فولادی می‌باشد. عدد موجود در قسمت دوم، ضخامت جداره لوله موردنظر را نشان می‌دهد. قسمت دوم نام نمونه‌ها در هر گروه متفاوت است. در گروه نمونه‌های فعال،

شرایط محیط به مدت ۲۸ روز نگهداری شدند تا برای آزمایش خمشی آماده شوند. لازم به ذکر است که همزمان با بتن ریزی نمونه‌ها، به منظور تعیین مقاومت فشاری هسته بتنی، ۵ نمونه مکعبی نیز تهیه می‌شود. این نمونه‌های مکعبی، بعد از دو روز از قالب خارج شده و در شرایط اشباع عمل‌آوری می‌گردند. همزمان با تست خمشی نمونه‌های مرکب، نمونه‌های مکعبی نیز تحت آزمایش فشاری قرار می‌گیرند.

### ۲-۳- مصالح

مقاطع مرکب لوله‌ای پر شده با بتن متشکل از پوسته فولادی و هسته بتنی می‌باشند که در این بخش به هرکدام از این مصالح به طور مفصل پرداخته شده است.

طرح اختلاط بتن استفاده شده در این تحقیق بر مبنای استاندارد بتن آمریکا [۱۴] صورت گرفته است. قطر بزرگترین سنگدانه استفاده شده در این طرح اختلاط، ۹.۵ میلیمتر می‌باشد. از ماسه بادی با مدول نرمی ۲.۸۸ به عنوان ریزدانه استفاده شده است. سیمان پرتلند تیپ II و آب، سایر مواد تشکیل دهنده بتن می‌باشند. در این طرح اختلاط از هیچ ماده افزودنی استفاده نشده است تا عملکرد محصورشدگی و اثر مقادیر مختلف فشار بر روی شرایط محصورشدگی، تحت تأثیر قرار نگیرد. جدول (۳) سهم مصالح استفاده شده در طرح اختلاط بتن را نشان می‌دهد.

جدول ۳- اجزا تشکیل دهنده بتن در یک مترمکعب بتن ریزی

W/C	مقاومت فشاری بتن					MPa
	اسلامپ	آب	سیمان	ماسه	شن	
	cm	kg	kg	kg	kg	
۰.۸	۸-۱۰	۲۲	۲۸۱.۲۵	۱۱۱۷.	۶۶۱.۱	۱۵
		۵		۵۷	۸	

در این تحقیق از لوله‌های فولادی موجود در بازار استفاده شده است. به دلیل محدودیت موجود در دستگاه یونیورسال (آزمایش خمش)، قطر کلیه نمونه‌ها برابر ۶۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. ضخامت جداره لوله‌ها به ترتیب عبارتند از: ۱، ۲ و ۳ میلیمتر. به منظور تعیین مقاومت تسلیم و نهایی لوله‌ها، مطابق استاندارد ASTM A۳۷۰-۱۰ [۱۵]، نمونه‌های دمبلی شکلی از هر لوله تهیه شده و تحت آزمایش کششی قرار گرفتند. در جدول (۴) مقاومت تسلیم و نهایی هر لوله آورده شده است.

تغییر در ضخامت جداره لوله‌های فولادی به منظور دستیابی به تأثیر نسبت D/t در رفتار خمشی نمونه‌ها بوده است.

در جدول (۲)، مساحت فولاد و بتن و درصد فولاد برای هر نمونه محاسبه و ذکر شده است. آیین نامه AISC manual sec ۲I.a، حداقل مقدار فولاد در مقاطع مرکب را برابر ۱ درصد توصیه نموده است [۱۳]. مشاهده می‌شود که درصد فولاد در نمونه‌های مورد بررسی حداقل مقدار توصیه شده توسط آیین‌نامه را برآورده می‌کند. همچنین آیین‌نامه فوق [۱۳]، محدوده استاتیکی نسبت D/t برای مقاطع دایره‌ای لوله‌ای پر شده با بتن را به صورت معادله (۱) مشخص نموده است.

$$\left(\frac{D}{t}\right)_{limit,static} = \sqrt{\frac{\lambda E_s}{\sigma_y}} \quad (1)$$

مقادیر محدوده پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه فوق [۱۳]، در جدول (۲) محاسبه شده است. مشاهده می‌شود که نسبت‌های D/t هر نمونه کمتر از حداکثر مقدار پیشنهادی توسط آیین نامه فوق می‌باشد.

جدول ۲- درصد فولاد و نسبت‌های قطر به ضخامت نمونه‌ها

D/t	ضخامت D/t	تنش تسلیم لوله MPa	S <sub>conc</sub> mm <sup>۲</sup>	S <sub>st</sub> mm <sup>۲</sup>	درصد فولاد %	محدوده آیین نامه
۶۰	۱	۲۷۰	۲۷۳۳.۹۷	۹۳.۵	۳.۳۱	۷۶.۹۸
۳۰	۲	۴۳۵	۲۶۴۲.۰۸	۱۸۵.۴	۶.۵۶	۶۰.۶۵
۲۰	۳	۳۸۰	۲۵۵۱.۷۶	۲۷۵.۷	۹.۷۵	۶۴.۸۹

در نمونه‌های با محصورشدگی فعال، برای خروج آب اضافی بتن تر، در فواصل ۱/۳ از طول نمونه، دو شیر در هر مقطع تعبیه شده است. لذا مادامی که نمونه در دستگاه پیش‌تنیدگی قرار می‌گیرد، قادر به تخلیه آب اضافی از این شیرها خواهد بود.

در تمامی نمونه‌ها، بتن‌ریزی در حالت ایستاده صورت گرفته است. در نمونه‌های گروه اول، بتن‌ریزی بدون هیچ تراکم و ویراسیونی صورت گرفته است. سپس نمونه در دستگاه پیش‌تنیدگی قرار داده شده است. اما در نمونه‌های گروه دوم، بتن‌ریزی در سه لایه و تراکم هر لایه صورت گرفته است. در نهایت، دو انتهای لوله بوسیله نایلون بسته شده تا از تبخیر رطوبت نمونه‌ها جلوگیری شود. نمونه‌ها به صورت ایستاده در

همگی در یک تراز و در وسط نمونه قرار بگیرند. آزمایش تا جایی ادامه دارد که در منحنی بار- تغییرمکان وسط دهانه نمونه، افت شدیدی در بار رخ دهد.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی

در ادامه نتایج بدست آمده و مشاهدات حاصله در چند بخش ارائه شده‌اند. بخش اول مربوط به رفتار و نوع شکست نمونه‌ها می‌باشد. در بخش دوم، نحوه ترک‌خوردگی بتن در لحظه شکست نمونه بحث و بررسی شده است. در بخش سوم، میزان ظرفیت نهایی و انرژی جذب شده نمونه‌ها محاسبه شده‌اند.

#### ۳-۱- رفتار و مود شکست نمونه‌ها

تیرهای مرکب رفتار نسبتاً انعطاف پذیری از خود نشان دادند. بعلاوه آزمایش به صورت ملایم و در وضعیت کنترل شده‌ای انجام شد. همچنین شکست نمونه‌ها به صورت تدریجی رخ داده است. ضمن این‌که هیچ نشانه و صدای واضحی در حین شکست، ایجاد نشده است. شکل (۴)، مود شکست کلیه نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۴- مود شکست کلیه نمونه‌ها (الف)  $t=1\text{ mm}$  (ب)  $t=2\text{ mm}$

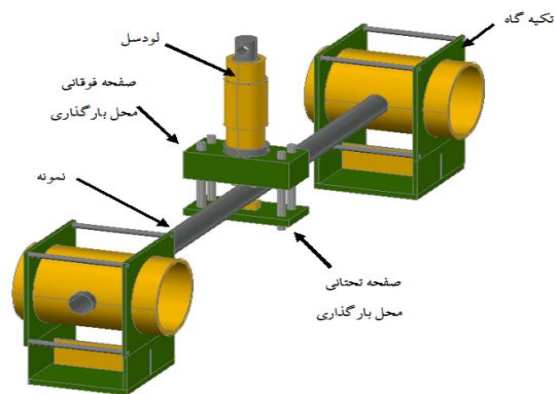
(ج)  $t=3\text{ mm}$

### جدول ۴- مقاومت تسلیم و جاری شدن لوله‌های فولادی

تنش تسلیم	تنش نهایی	ضخامت لوله
Mpa	Mpa	mm
۳۰۵	۲۷۰	۱
۵۰۰	۴۳۵	۲
۴۲۰	۳۸۰	۳

#### ۲-۴- روش انجام آزمایش

شروع آزمایش با قرار دادن و نصب تکیه گاه‌های طراحی شده بر روی تیر صلب می‌باشد. سپس، نمونه موردنظر در محل قرار گرفته و صفحات فوقانی و تحتانی محل بارگذاری و تجهیزات وابسته به آن در محل مورد نظر محکم می‌گردند. کلیه نمونه‌ها تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای به صورت استاتیکی قرار می‌گیرند. آزمایش با استفاده از دستگاه یونیورسال STM150 و به روش کنترل تغییرمکان و با سرعت  $2\text{ mm/min}$  انجام می‌شود. میزان بار وارده و تغییر مکان وسط دهانه در فواصل زمانی مشخص توسط رایانه متصل به دستگاه ثبت می‌شود. شکل (۳)، نمای کلی نمونه قرار گرفته شده در دستگاه را به همراه تجهیزات الحاقی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمونه تحت بار به همراه تجهیزات الحاقی، شماتیک نمونه در دستگاه یونیورسال

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، طراحی تکیه‌گاه‌ها به گونه‌ای است که دو انتهای نمونه رفتار مفصلی داشته باشد. بعلاوه، به منظور جلوگیری از تمرکز تنش در محل اعمال بار، یک سری قطعات الحاقی نیم دایره‌ای شکل در زیر صفحات فوقانی و تحتانی بارگذاری، طراحی و تعبیه شده‌اند. بار وارده از طریق صفحه فوقانی به قطعه نیم دایره‌ای و از آنجا به نمونه وارد می‌شود. نمونه‌های فعال که در آن‌ها شیر تعبیه شده است به گونه‌ای در دستگاه قرار می‌گیرند که شیرهای تعبیه شده

در ادامه بتن ترک خورده ناحیه کششی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.



شکل ۵- مود شکست کلیه نمونه‌ها (الف)  $t=1\text{ mm}$ ، (ب)  $t=2\text{ mm}$ ، (ج)  $t=3\text{ mm}$

همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، نوع محصورشدگی در میزان خردشدگی بتن ناحیه فشاری مؤثر بوده است. اگر نمونه با محصورشدگی منفعل را به عنوان نمونه مرجع در نظر بگیریم، مشاهده می‌شود که میزان خردشدگی بتن در این نمونه، بیشتر از نمونه‌های با محصورشدگی فعال می‌باشد. همچنین، ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان فشار اعمالی بر روی نمونه، شدت خردشدگی بتن کاهش یافته است. نتایج فوق برای تمامی مقادیر نسبت  $D/t$  صادق است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که شدت خردشدگی بتن مستقل از نسبت  $D/t$  می‌باشد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که شدت خردشدگی بتن در ناحیه فشاری رابطه معکوس با شدت فشار اولیه اعمالی بر روی نمونه دارد.

با توجه به شکل (۵)، ملاحظه می‌شود که بدلیل عملکرد مرکب بین دو جنس مصالح بتن و فولاد، بتن در ناحیه کششی به قلوه سنگ تبدیل نشده است و در لایه‌های مختلفی شکسته شده است. بعلاوه، با توجه به شکل (۵) می‌توان اثر پارامترهای

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، کلیه نمونه‌ها در ناحیه فشاری دچار کمناش موضعی شده‌اند. بدلیل کمناش موضعی لوله در ناحیه فشاری، موج‌هایی در قسمت فوقانی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. شدت و تعداد موج‌های تشکیل شده در این ناحیه بستگی به میزان فشار اولیه اعمالی و نسبت قطر به ضخامت نمونه دارد. بعلاوه در ناحیه کششی، شکست همراه با پارگی لوله بوده است. تنها در نمونه  $S15-T3-0.8p$ ، شکست نمونه به دلیل کمناش موضعی لوله در ناحیه فشاری بوده است. در سایر نمونه‌ها، شکست بدلیل پارگی لوله در ناحیه کششی همزمان با کمناش موضعی لوله در ناحیه فشاری بوده است.

نکته قابل توجه دیگر این است که با کاهش نسبت  $D/t$ ، شدت و تعداد موج‌های بوجود آمده در قسمت فوقانی کاهش می‌یابد. کاهش شدت کمناش موضعی لوله در ناحیه فوقانی، در تمامی حالات فشار اعمالی (بدون فشار یا با شدت‌های متفاوت فشار اعمال شده) مشاهده می‌شود. مشابه همین نتیجه را می‌توان برای عمق و عرض پارگی لوله در ناحیه کششی گرفت. همچنین، برای نسبت قطر به ضخامت ۲۰، افزایش میزان فشار اولیه اعمالی بر روی نمونه‌ها سبب کاهش میزان پارگی لوله در ناحیه کششی می‌گردد، به گونه‌ای که در نمونه با فشار اعمالی زیاد، ترکی در لوله مشاهده نمی‌شود. در ضمن برای حالتی که نسبت قطر به ضخامت لوله برابر ۳۰ می‌باشد، اعمال فشار اولیه باعث کاهش میزان پارگی لوله در ناحیه کششی شده است. بالاخره برای حالتی که نسبت قطر به ضخامت برابر ۶۰ می‌باشد، نحوه پارگی لوله با میزان فشار اعمال شده رابطه مستقیمی ندارد.

### ۳-۲- الگوی ترک خوردگی نمونه‌ها

پس از آزمایش خمشی نمونه‌ها، لوله فولادی در دو ناحیه فشاری و کششی، به صورت جزئی بریده می‌شود تا بتوان نحوه گسترش ترک هسته بتنی در لحظه شکست نمونه را بررسی نمود. بدین وسیله، خردشدگی بتن در ناحیه فشاری و توزیع ترک‌ها در ناحیه کششی آشکار می‌گردد. شکل (۵)، هسته بتنی را در دو ناحیه فشاری و کششی پس از آزمایش نشان می‌دهد. تصاویر نشان داده شده برای هر نمونه، از دو قسمت تشکیل شده است. شکل بالایی، تصویر هسته بتنی خردشده‌ی ناحیه فوقانی و شکل پایینی، تصویر بتن ترک خورده‌ی ناحیه تحتانی را نشان می‌دهد. در اینجا، ابتدا بتن خردشده ناحیه فشاری و

شده نمونه‌های هر سه گروه یکسان نمی‌باشد. در نتیجه نمی‌توان روند مشخصی در مورد نحوه این تغییرات بدست آورد. به طور مثال، در گروه اول ( $D/t = 20$ )، بیشترین میزان لنگر خمشی و انرژی جذب شده به ترتیب مربوط به نمونه‌های بدون فشار اولیه و با فشار اعمالی متوسط می‌باشد، در حالی که در گروه دوم ( $D/t = 30$ )، با اینکه بیشترین ظرفیت خمشی در نمونه‌ای با فشار اعمالی بالا رخ داده است، اما بیشترین میزان انرژی جذب شده متعلق به نمونه‌ای می‌باشد که شدت فشار اعمال شده بر روی آن کم می‌باشد. بنابراین انتخاب بهترین میزان فشار وارده با توجه به هر دو عامل ظرفیت خمشی و میزان انرژی جذب شده، امکان‌پذیر است. در بخش بعدی که به بحث و بررسی نتایج پرداخته شده است به طور مفصل به این مورد پرداخته شده است.

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش به بحث و بررسی نتایج بدست آمده پرداخته شده است. به منظور بررسی اثر میزان فشار اعمالی و نسبت  $D/t$  بر روی رفتار خمشی نمونه‌های مرکب، این عوامل در دو زیربخش مجزا مورد مطالعه قرار گرفتند. در ادامه به طور مفصل به تشریح اثرات پارامترهای ذکر شده پرداخته شده است.

#### ۴-۱- بررسی اثرات ناشی از میزان فشار اولیه اعمالی

در این بخش به بررسی تأثیر میزان فشار اولیه اعمالی بر روی رفتار، ظرفیت خمشی و میزان انرژی جذب شده نمونه‌ها، پرداخته شده است. بدین منظور، نمونه‌ها در سه گروه دسته بندی شدند. در هر گروه میزان نسبت  $D/t$  ثابت است. در هر گروه میزان فشار اولیه اعمالی بر روی نمونه‌ها متفاوت است. نمونه مرجع در هر گروه نمونه‌ای است که در هنگام ساخت، تحت هیچ فشار اولیه‌ای نبوده است، لذا شرایط محصورشدگی ایجاد شده در این نمونه، از نوع منفعل بوده است. شکل (۶) نمودار بار- تغییرمکان وسط دهانه را برای نمونه‌ها نشان می‌دهد. به منظور مقایسه رفتار نمونه‌ها، این نمودارها به گونه‌ای ترسیم شده‌اند که در هر شکل تمامی متغیرها یکسان بوده و فقط میزان فشار اولیه اعمال شده بر روی نمونه‌ها، متفاوت می‌باشد. شکل (۶-الف و ب و ج) به ترتیب مربوط به نمونه‌های با ضخامت ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر می‌باشند.

مختلف بر روی نوع، عمق و شدت ترک‌های ناحیه کششی را بررسی نمود. از مقایسه تصاویر مربوط به نمونه‌های با محصورشدگی منفعل با نمونه‌هایی که تحت شدت‌های متفاوتی از فشار اولیه می‌باشند، می‌توان به تأثیر اعمال فشار و شدت آن بر روی نوع و شدت ترک پی برد. در نمونه‌های با محصورشدگی فعال (برای شدت‌های متفاوت از فشار)، در منطقه وسیع‌تری از بتن، ترک خوردگی رخ داده است. ترک‌های بوجود آمده در تمامی نمونه‌ها عمیق می‌باشند. نسبت  $D/t$ ، پارامتر دیگری است که اثرش بر روی نحوه گسترش و توزیع ترک‌ها، بررسی می‌گردد. مشاهده می‌شود که نسبت  $D/t$  نمونه، تأثیری در شدت، وسعت و عمق ترک خوردگی هسته بتنی ندارد.

#### ۳-۳- ظرفیت خمشی و انرژی جذب شده

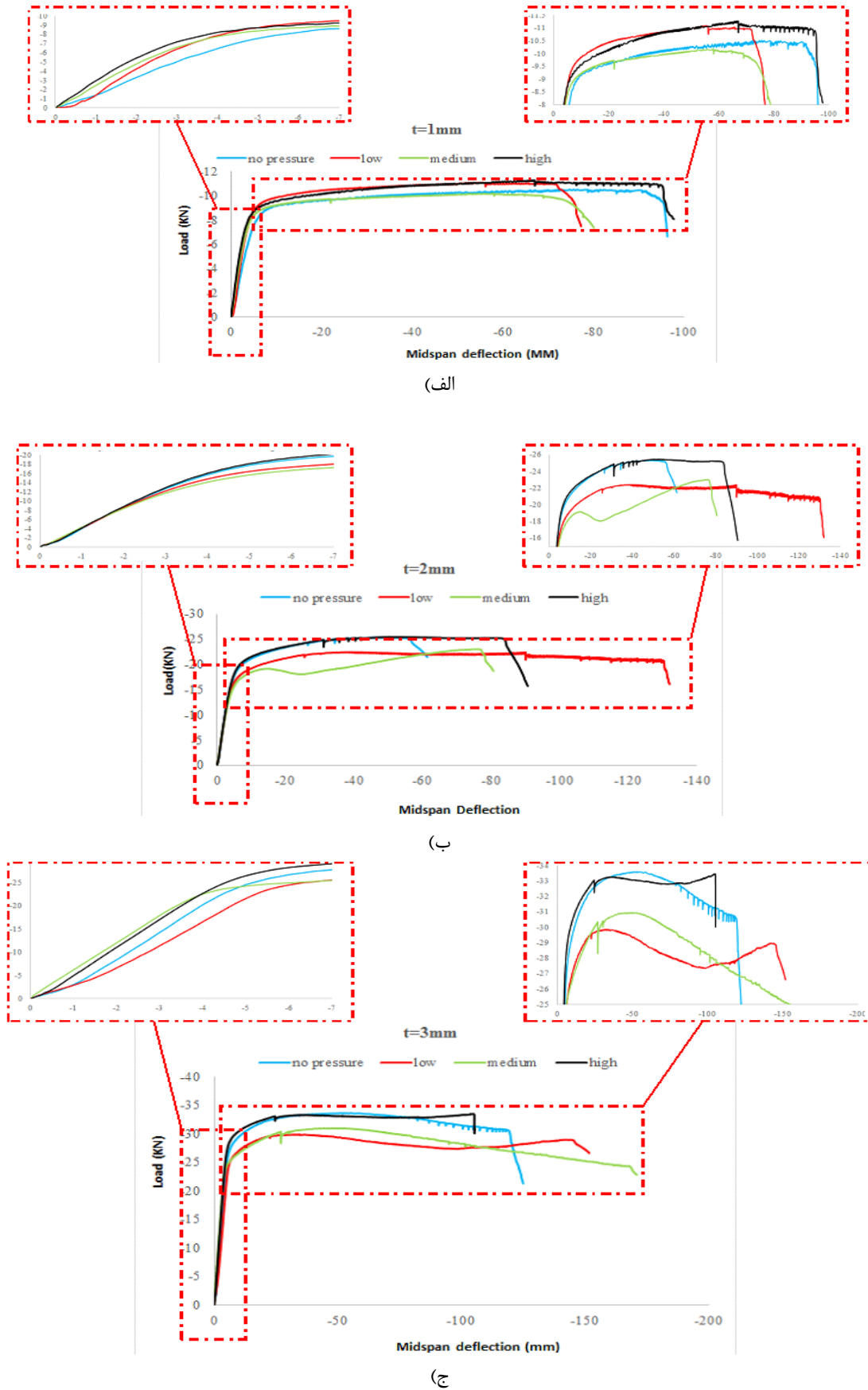
می‌دانیم میان حداکثر بار وارد بر تیر و لنگر خمشی نهایی آن رابطه مستقیم وجود دارد. از طرفی انرژی جذب شده نمونه برابر سطح زیر نمودار بار- تغییرمکان آن می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، میزان بار نهایی، لنگر خمشی نهایی و میزان انرژی جذب شده هر نمونه تعیین شده است (جدول (۵)).

جدول ۵- ظرفیت خمشی نمونه‌ها

نام نمونه	شدت فشار اولیه اعمالی	$E_{exp}$ KN.m	$M_{exp}$ KN.m	$P_{exp}$ KN
<b><math>D/t=20</math></b>				
T <sup>3</sup> -NP	بدون فشار	3885	5.54	33.6
T <sup>3</sup> -0.2P	کم	4210.145	5.18	31.37
T <sup>3</sup> -0.4P	متوسط	4729.85	5.11	30.95
T <sup>3</sup> -0.8P	زیاد	3348.49	5.52	33.47
<b><math>D/t=30</math></b>				
T <sup>2</sup> -NP	بدون فشار	1390.93	4.18	25.31
T <sup>2</sup> -0.2P	کم	2773.08	3.7	22.40
T <sup>2</sup> -0.4P	متوسط	1572.67	3.8	23.01
T <sup>2</sup> -0.8P	زیاد	2115.65	4.2	25.44
<b><math>D/t=60</math></b>				
T <sup>1</sup> -NP	بدون فشار	933.93	1.73	10.51
T <sup>1</sup> -0.2P	کم	755.2	1.83	11.09
T <sup>1</sup> -0.4P	متوسط	922.81	1.68	10.18
T <sup>1</sup> -0.8P	زیاد	1015.09	1.86	11.28

با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول (۵)، می‌توان نتیجه گرفت که نحوه تغییر در میزان لنگر خمشی و انرژی جذب





شکل ۶- نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه الف ( ضخامت ۱ میلیمتر ب) ضخامت ۲ میلیمتر ج) ضخامت ۳ میلیمتر

کمانش موضعی ایجاد شده در ناحیه فشاری لوله فولادی، افت مقاومت در نمودار بار- تغییرمکان این نمونه رخ می‌دهد. بنابراین رفتار این نمونه در ناحیه پلاستیک، متفاوت با سایر نمونه‌ها می‌باشد. در ضمن از مقایسه تغییرشکل نهایی رخ داده در نمونه‌ها مشاهده می‌شود که نمونه با فشار اولیه کم و نمونه مرجع به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان تغییرشکل نهایی می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انعطاف‌پذیری نمونه‌ها با اعمال فشار اولیه بر روی آن‌ها افزایش می‌یابد.

در گروه با نسبت  $D/t=20$ ، سختی الاستیک کلیه نمونه‌ها برابر می‌باشند. در ناحیه پلاستیک مشاهده می‌شود که سختی نمونه‌ها کاهش شدیدی پیدا می‌کند. در نمودار بار- تغییرمکان مربوط به نمونه‌های با فشار اعمالی بالا و پایین، سخت شدگی مجدداً مشاهده می‌شود. همچنین از مقایسه تغییرشکل‌های نهایی رخ داده در نمونه‌ها، می‌توان گفت که نمونه با فشار اولیه اعمالی بالا، دارای کمترین میزان بیشینه تغییرمکان می‌باشد، در حالی که میزان بیشینه تغییر شکل وسط دهانه در سایر نمونه‌ها با افزایش میزان فشاراعمالی، رابطه مستقیم دارد.

برای تعیین نحوه تغییر در میزان لنگر خمشی و انرژی جذب شده در اثر اعمال فشار اولیه بر روی نمونه و میزان آن، درصد تغییر در ظرفیت خمشی و انرژی جذب شده نمونه‌های مختلف هر گروه نسبت به نمونه مرجع، محاسبه گردید. در جدول (۶)، گروه‌بندی نمونه‌ها و میزان تغییر در میزان لنگر خمشی و انرژی جذب شده، آورده شده است.

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، کلیه نمونه‌ها رفتار انعطاف‌پذیری دارند. به منظور مقایسه اثر میزان فشار اولیه اعمالی بر روی نمونه‌ها، نمونه‌های هر گروه به صورت مجزا با هم مقایسه می‌شوند.

در گروه با نسبت  $D/t=60$ ، افزایش میزان فشار اعمالی سبب افزایش سختی الاستیک در نمونه‌ها شده است به گونه‌ایی که نمونه مرجع (نمونه با محصورشدگی منفعل) و نمونه با بیشترین میزان فشار اولیه اعمالی (high) به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار سختی الاستیک را دارا می‌باشند. همچنین مشاهده می‌شود که میزان سختی الاستیک نمونه، با افزایش میزان فشار اولیه اعمالی، افزایش می‌یابد. بعلاوه، ملاحظه می‌شود که اعمال فشار اولیه سبب افزایش سختی پلاستیک نمونه‌ها می‌شود، در حالی که میزان فشار اعمالی بر روی سختی پلاستیک نمونه‌ها اثرگذار نمی‌باشد. در ضمن، در این گروه، در فشارهای اولیه پایین و متوسط، نمونه‌ها دارای تغییرشکل پایین‌تری نسبت به نمونه مرجع می‌باشند، ولی با افزایش میزان فشار اولیه (فشار اولیه بالا)، تغییرشکل نهایی نمونه بیشتر از نمونه مرجع می‌گردد.

در گروه با نسبت  $D/t=30$ ، افزایش میزان فشار اعمالی تغییری در سختی الاستیک نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند و سختی کلیه نمونه‌ها (با و بدون فشار اولیه) با هم برابر می‌باشند. با توجه به شکل (۶)، می‌توان نتیجه گرفت که بجز نمونه با فشار اولیه متوسط، در سایر نمونه‌ها، میزان سختی پلاستیک نمونه‌ها با هم برابر می‌باشند. در نمونه با فشار اولیه متوسط، بدلیل

جدول ۶- ظرفیت خمشی نمونه‌ها

تغییرات $E_{exp}$	تغییرات $M_{exp}$	مرجع	نام نمونه	گروه
%	%			
-	-	آری	T3-NP	$D/t=20$
۸.۳۷	-۶.۶۲۵	خیر	T3-۰.۲P	
۲۱.۷۵	-۷.۸۷	خیر	T3-۰.۴P	
-۱۳.۸۱	-۰.۳۸۳	خیر	T3-۰.۸P	
-	-	آری	T2-NP	$D/t=30$
۹۹.۳۷	-۱۱.۵	خیر	T2-۰.۲P	
۱۳.۰۷	-۹.۱	خیر	T2-۰.۴P	
۵۲.۱	۰.۵۱	خیر	T2-۰.۸P	
-	-	آری	T1-NP	$D/t=60$
-۱۹.۱۴	۵.۵	خیر	T1-۰.۲P	
-۱.۱۹	-۳.۱۵	خیر	T1-۰.۴P	
۸.۶۹	۷.۲۷	خیر	T1-۰.۸P	

اعمالی بالا بوده است. همچنین با بررسی نحوه تغییر در میزان انرژی جذب شده، می‌توان مشاهده نمود که اعمال فشار اولیه کم و متوسط بر روی نمونه‌ها منجر به کاهش میزان انرژی جذب شده، می‌گردد. این کاهش با افزایش میزان فشار اعمالی، کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. بعلاوه اعمال فشار اولیه زیاد بر روی نمونه، منجر به افزایش ۸.۷ درصدی انرژی جذب شده نمونه شده است. در مجموع می‌توان چنین نتیجه گرفت که برای نمونه‌های گروه سوم، بهترین عملکرد متعلق به نمونه‌ای می‌باشد که تحت فشار اعمالی زیاد می‌باشد زیرا ظرفیت خمشی و میزان انرژی جذب شده آن توأماف افزایش می‌یابد.

در نهایت می‌توان چنین نتیجه گرفت که اعمال فشار بر روی نمونه‌هایی با نسبت قطر به ضخامت لوله ۶۰ و ۳۰ سبب بهبود عملکرد آن نسبت به نمونه‌هایی می‌گردد که در آن‌ها شرایط محصورشدگی منفعل فراهم شده است. در مجموع می‌توان استنباط کرد که استفاده از محصورشدگی فعال ایجاد شده بوسیله اعمال فشار اولیه بالا، در نمونه‌های نازک‌تر مناسب‌تر از نمونه‌های ضخیم‌تر می‌باشد.

#### ۴-۲- بررسی اثرات ناشی از ضخامت لوله فولادی

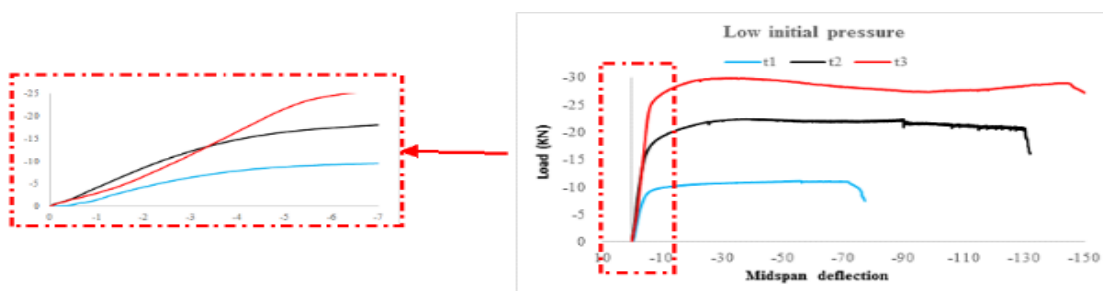
به منظور بررسی اثر نسبت  $D/t$  بر روی رفتار خمشی نمونه‌ها، کلیه نمونه‌ها در چهار گروه قرار گرفتند. ملاک گروه‌بندی نمونه‌ها شدت فشار اولیه اعمالی نمونه بوده است. هر گروه شامل سه نمونه با مقادیر متفاوت نسبت  $D/t$  می‌باشد. نمودار بار- تغییرمکان وسط دهانه نمونه‌های هر گروه در یک دستگاه ترسیم شده‌اند تا بهتر بتوان نتایج حاصله را با هم مقایسه نمود. شکل (۷)، این نمودارها را نشان می‌دهد. به منظور بررسی اثر نسبت  $D/t$  بر روی سختی الاستیک نمونه‌ها، قسمت ابتدایی نمودارها درشت‌نمایی شده‌اند ( شکل (۷)).

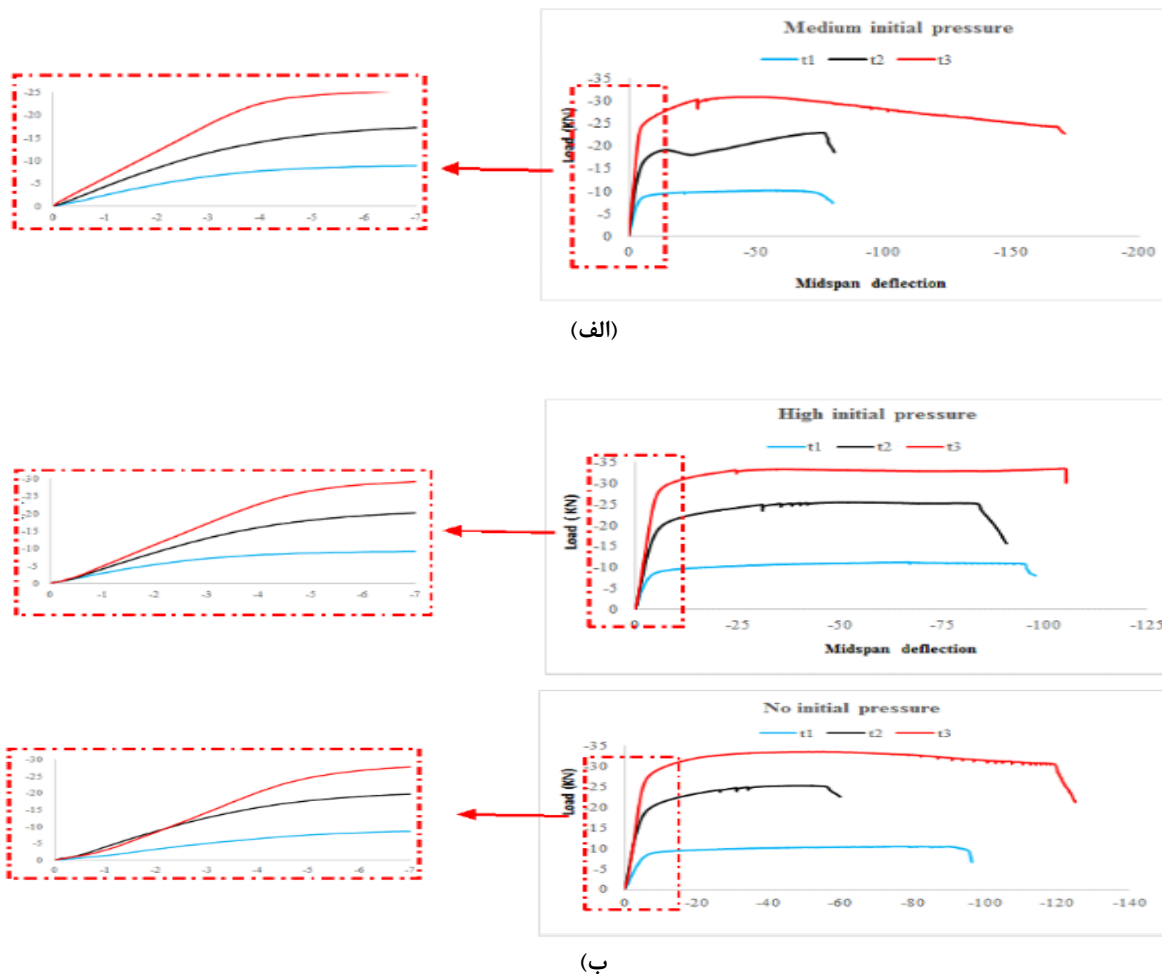
همانطور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، در گروه اول ( $D/t=20$ ) اعمال فشار اولیه سبب کاهش ظرفیت خمشی نمونه‌ها می‌گردد. در حالی که میزان انرژی جذب شده توسط نمونه برای حالتی که فشار اعمالی کم و متوسط می‌باشد به تدریج ۸ و ۲۲ درصد افزایش یافته است و تنها در نمونه‌ای که میزان فشار اعمالی زیاد است، میزان انرژی جذب شده کمتر از نمونه مرجع می‌باشد. با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که اعمال فشار اولیه بر روی این گروه از نمونه‌ها اثر مطلوبی بر روی رفتار خمشی آن‌ها نخواهد داشت.

در گروه دوم ( $D/t=30$ )، اعمال فشار اولیه باعث کاهش در ظرفیت خمشی نمونه‌ها می‌گردد. میزان کاهش در ظرفیت خمشی نمونه‌ها با افزایش فشار اولیه اعمالی کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در نمونه با بیشترین میزان فشار اعمالی، افزایش ۰.۵ درصدی ظرفیت خمشی مشاهده شده است. همچنین ملاحظه می‌شود که اعمال فشار اولیه سبب افزایش در میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها می‌گردد. با اینکه بیشترین میزان انرژی جذب شده مربوط به نمونه با فشار اعمالی شده کم می‌باشد، اما چون در این نمونه ظرفیت خمشی بیشترین میزان کاهش را دارد، لذا استفاده از کمینه فشار بر روی نمونه‌های این گروه مناسب نیست. با توجه به نتیجه بدست آمده، برای حالتی که  $D/t=30$  می‌باشد، اعمال فشار بیشینه سبب عملکرد بهتری برای نمونه می‌گردد.

زیرا علاوه بر اینکه ظرفیت خمشی نمونه ۰.۵ درصد افزایش می‌یابد، میزان انرژی جذب شده نیز به میزان ۵۲ درصد افزایش می‌یابد.

در گروه سوم، ( $D/t=60$ )، اعمال فشار اولیه با مقادیر کم و زیاد سبب افزایش ظرفیت خمشی نمونه‌ها شده است در حالی که با اعمال فشار متوسط بر روی نمونه، ظرفیت خمشی آن حدود ۳ درصد کاهش می‌یابد. در ضمن بیشترین میزان افزایش ظرفیت خمشی نمونه متعلق نمونه‌ای می‌باشد که تحت فشار





(الف)

(ب)

شکل ۷- نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه الف ( نمونه های فعال ب) نمونه های منفعل

با بررسی نحوه تغییرات سختی پلاستیک در تمامی نمونه‌ها، ملاحظه می‌شود که بیشترین مقدار سختی پلاستیک در تمامی گروه‌ها متعلق به نمونه‌های با نسبت  $D/t=30$  می‌باشد. در نمونه‌های با نسبت  $D/t=20$ ، سختی پلاستیک منفی می‌باشد. اما در دو نمونه با فشار اعمالی کم و زیاد، مشاهده سخت‌شدگی مجدد در رفتار نمونه رخ می‌دهد. برای نسبت‌های قطر به ضخامت ۳۰ و ۶۰، سختی پلاستیک نمونه‌ها مستقل از شدت فشار اولیه اعمالی بر روی نمونه می‌باشد. برای بررسی اثر تغییرات  $D/t$  بر روی رفتار خمشی نمونه‌ها، نمونه‌های با  $D/t=60$  به عنوان نمونه‌های مرجع در نظر گرفته شدند. درصد تغییر در میزان لنگر خمشی و انرژی جذب شده برای سایر نمونه‌ها نسبت به این نمونه‌ها محاسبه شده است. جدول (۷)، درصد تغییر در میزان لنگر خمشی و انرژی جذب شده، آورده شده است.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت  $D/t$ ، ظرفیت باربری نمونه‌ها به طور محسوسی افزایش پیدا می‌کند. افزایش ظرفیت باربری مستقل از میزان فشار اولیه اعمالی بر روی نمونه می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در نمونه‌های با فشار اولیه کم و متوسط برای نسبت  $D/t$  پایین، نمونه رفتار انعطاف‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد. بعلاوه، مشاهده می‌شود که در نمونه‌های با محصورشدگی منفعل، وقتی که نسبت  $D/t=30$  باشد، رفتار نمونه تردتر از نمونه‌های دیگر است. همچنین رفتار نمونه  $T2-0.4P$  متفاوت با سایر نمونه‌هاست. تفاوت رفتار این نمونه، ناشی از شکست موضعی نمونه در ناحیه فشاری می‌باشد. همانطور که نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه این نمونه مشاهده می‌شود، این نمونه پس از شکست موضعی (که توسط کاهش در سختی ناحیه پلاستیک نشان داده شده است)، سعی در برقراری وضعیت تعادل می‌کند، بعد از رسیدن به وضعیت تعادل، مجدداً دچار سخت‌شدگی شده و قادر به تحمل بار می‌باشد.

جدول ۷- ظرفیت خمشی، انرژی جذب شده و درصد تغییرات آن‌ها

گروه	t mm	نام نمونه	مرجع	تغییرات $E_{exp}$ %	تغییرات $M_{exp}$ %
بدون فشار	۳	T۳-NP	خیر	۳۱۶	۲۱۹.۵۴
	۲	T۲-NP	خیر	۴۸.۹۳	۱۴۰.۷۴
	۱	T۱-NP	آری	-	-
فشار کم	۳	T۳-۰.۲P	خیر	۴۵۷.۴۸	۱۸۲.۸۲
	۲	T۲-۰.۲P	خیر	۲۶۷.۲	۱۰۱.۹۶
	۱	T۱-۰.۲P	آری	-	-
فشار متوسط	۳	T۳-۰.۴P	خیر	۴۱۲.۵۵	۲۰۳.۹۴
	۲	T۲-۰.۴P	خیر	۷۰.۴۲	۱۲۵.۹۴
	۱	T۱-۰.۴P	آری	-	-
فشار زیاد	۳	T۳-۰.۸P	خیر	۲۲۹.۸۷	۱۹۶.۷۳
	۲	T۲-۰.۸P	خیر	۱۰۸.۴۲	۱۲۵.۵۶
	۱	T۱-۰.۸P	آری	-	-

همانطور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، رابطه معکوسی میان میزان انرژی جذب شده و ظرفیت خمشی نمونه با نسبت  $D/t$  وجود دارد. با کاهش نسبت  $D/t$ ، افزایش چشمگیری در ظرفیت خمشی و میزان انرژی جذب شده نمونه رخ می‌دهد. این افزایش قابل ملاحظه ظرفیت خمشی در نمونه با محصورشدگی منفعل، بیشترین میزان خود (۲۲۰٪) را دارد. همچنین حداکثر میزان انرژی جذب شده بدلیل کاهش نسبت  $D/t$  در گروه فشار کم مشاهده می‌شود که برابر ۴۵۸٪ می‌باشد.

بعلاوه، می‌توان مشاهده نمود که با تغییر در نسبت  $D/t$  می‌توان لنگر خمشی و میزان انرژی جذب شده را حداکثر تا ۲۲۰ و ۴۵۷ درصد افزایش داد. همچنین حداقل میزان افزایش در ظرفیت خمشی و انرژی جذب شده برای حالتی است که نسبت  $D/t$  از ۶۰ به ۳۰ می‌رسد و به ترتیب برابر با ۱۰۲ و ۴۹ درصد می‌باشد. این بدان معناست که تغییر در میزان نسبت  $D/t$ ، نقش بسزایی در تغییر مقدار لنگر خمشی و میزان انرژی جذب شده می‌گذارد.

## ۵- نتیجه گیری

به منظور بررسی اثر شدت فشار اولیه اعمالی بر روی رفتار خمشی مقاطع مرکب لوله‌ای پر شده با بتن، ۱۲ نمونه با مقطع مرکب دایره‌ای به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند.

پس از آزمایش قسمت‌های از لوله فولادی در ناحیه فشاری و کششی بریده شدند تا در نحوه خردشدگی و ترک‌خوردگی هسته بتنی قابل بررسی باشد. در نهایت، پس از بررسی‌های صورت گرفته، مشاهده شد که این نمونه‌ها دارای رفتار انعطاف‌پذیری هستند. شکست در کلیه نمونه‌ها به صورت پارگی لوله در ناحیه کششی و کمانش موضعی لوله در ناحیه فشاری بوده است. رابطه مستقیمی میان نسبت  $D/t$  و شدت و تعداد موج‌های بوجود آمده در قسمت فوقانی لوله وجود دارد. در حالتی که  $D/t=۲۰$  باشد، افزایش میزان فشار اولیه اعمالی بر روی نمونه‌ها سبب کاهش میزان پارگی لوله در ناحیه کششی می‌گردد. برای  $D/t=۳۰$ ، اعمال فشار اولیه باعث کاهش میزان پارگی لوله در ناحیه کششی شده است. هسته بتنی در محل کمانش موضعی لوله، دچار خردشدگی شده است. ضمن اینکه میزان خردشدگی بتن در نمونه با محصورشدگی منفعل، بیشتر از نمونه‌های با محصورشدگی فعال (تحت شدت‌های مختلف فشار اولیه) می‌باشد. افزایش میزان فشار اعمالی بر روی نمونه، سبب کاهش شدت خردشدگی هسته بتنی شده است. بعلاوه در نمونه‌های با محصورشدگی فعال (برای شدت‌های متفاوت از فشار)، ترک‌های عمیق در منطقه وسیع‌تری از هسته بتنی، رخ داده است. در حالی که نسبت  $D/t$ ، تأثیری در شدت، وسعت و عمق ترک‌خوردگی هسته بتنی نمی‌گذارد.

همچنین مشاهده می‌شود که برای نسبت‌های بالای  $D/t$ ، افزایش میزان فشار اولیه اعمالی سبب افزایش سختی الاستیک نمونه می‌گردد در حالی که به طور مثال در نمونه‌های با نسبت  $D/t=۳۰$ ، سختی الاستیک کلیه نمونه‌ها برابر می‌باشد.

بعلاوه می‌توان نتیجه گرفت در نمونه‌های با  $D/t=۲۰$ ، اعمال فشار اولیه اثر مطلوبی بر روی رفتار خمشی نمونه‌ها نخواهد داشت. اعمال فشار بر روی نمونه‌هایی با  $D/t$  برابر ۶۰ و ۳۰، سبب بهبود عملکرد نمونه نسبت به نمونه‌هایی با محصورشدگی منفعل می‌گردد. در مجموع می‌توان استنباط کرد که استفاده از محصورشدگی فعال ایجاد شده بوسیله اعمال فشار اولیه بالا، در نمونه‌های نازکتر مناسبتر از نمونه‌های ضخیم‌تر می‌باشد.

## ۶- منابع

[1] Probst, A.D., Kang, T.H.K., Ramseyer Ch., Kim, U., ۲۰۱۰, Composite Flexural Behavior of Full-Scale Concrete-Filled Tubes without Axial

Constructional Steel Research ۶۰, ۳۱۳-۳۷.

[9]. Nematzadeh, M., Naghipour, M., ۲۰۱۲, Compressing fresh concrete technique and the effect of excess water content on physical-mechanical properties of compressed concrete, Materials and Design, ۳۷, pp. ۲۵۶-۲۶۷.

[10] Nematzadeh, M., Naghipour, M., ۲۰۱۲, Compressive strength and modulus of elasticity of freshly compressed concrete, Construction and Building Materials ۳۴, pp. ۴۷۶-۴۸۵.

[11] Naghipour, M., Nematzadeh, M., Jalali, J., Salari, A., Nemati, S.T., ۲۰۱۵, Hardened density of freshly compressed concrete and its effect on mechanical properties, European journal of environment and civil engineering, Vol. ۱۹, pp. ۷۳۳-۷۵۵.

[12] Naghipour, M., Nemati, M., Jalali, J., Nematzadeh, M., Assessment of parameters affecting the flexural behavior of CFST beams, under subscription.

[13] American Institute of Steel Construction, Steel construction manual, ۲۰۰۵, ۱۳<sup>th</sup> Ed., Chicago.

[14] Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, ۲۰۰۰, ACI manual of concrete practice, part ۱, Michigan American concrete institute, P. ۳۸.

[15] Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ۲۰۱۰, ASTM International, West Conshohocken.

Loads, Journal of Structural Engineering, Vol. ۱۴۰, pp. ۱-۱۲.

[2] Deng, Y., Tuan, C.Y., Zhou, Q., Xiao, Y., ۲۰۱۱, Flexural strength analysis of non-post-tensioned and post-tensioned concrete-filled circular steel tubes, Journal of Constructional Steel Research, Vol. ۶۷, pp. ۱۹۲-۲۰۲.

[3] Shawkat, W., Fahmy, W., Fam, A., ۲۰۰۸, Cracking patterns and strength of CFT beams under different moment gradients, Composite Structures Vol. ۸۴, pp. ۱۵۹-۱۶۶.

[4] Mei, H., Kiiouisis, P.D., Ehsani, M.R., Saadatmanesh, H., ۲۰۰۱, Confinement effects on high strength concrete, ACI structure journal, Vol. ۹۸, pp. ۵۴۸-۵۵۳

[5] Christopher, Y., Tuan, M., ۲۰۰۸, Flexural Behavior of Nonposttensioned and Posttensioned Concrete-filled Circular Steel Tubes, Journal of Structural Engineering, ۱۰۵۷-۶۰.

[6] Elchalakani, M., Zhao, X.L., Grzebieta, R.H., ۲۰۰۱, Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending, Journal of Constructional Steel Research ۵۷, ۱۱۴۱-۶۸.

[7] Han, L.H., Lu, H., Yao, G.H., Liao, F.Y., ۲۰۰۶, Further study on the flexural behavior of concrete-filled steel tubes, Journal of Constructional Steel Research ۶۲, pp. ۵۵۴-۵۶۵.

[8] Han, L.H., ۲۰۰۴, Flexural Behavior of Concrete-Filled Steel Tubes, Journal of