

# اثر فشار بیرونی بر مقاومت نهایی محوری لوله های کوتاه فولادی پر شده با بتن

محسن محمدنژاد شورکایی<sup>۱</sup>، مرتضی نقی پور<sup>۲\*</sup>، مهدی نعمت زاده<sup>۳</sup>، مجید الیاسی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل،

۲- استاد، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل،

۳- دانشیار، دانشکده عمران دانشگاه مازندران، بابلسر،

۴- دانشیار، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل،

\*m-naghi@nit.ac.ir

تاریخ پذیرش [۱۳۹۷/۱۲/۲۲]

تاریخ دریافت [۱۳۹۷/۰۵/۱۹]

## چکیده

لوله های فولادی پر شده با بتن امروزه به صورت گسترده ای در بسیاری از سازه ها مورد استفاده قرار گرفته اند. در این نوع مقاطع کماتش موضعی رو به بیرون سبب افت در میزان محصورشدگی، شکل پذیری و مقاومت نهایی خواهد شد. در این مقاله سعی شده است با انجام مطالعات آزمایشگاهی اثر فشار جانبی را در بهبود رفتار لوله های فولادی پر شده با بتن (*CFT*) ارزیابی نماید و امکان استفاده از این نوع مقاطع مرکب را در ساخت و مقاوم سازی سازه های دریایی مورد بررسی قرار دهد. به همین منظور دستگاه اعمال فشار جانبی توسط مولفین طراحی و اثر پارامترهایی نظیر فشار جانبی، مقاومت بتن و نسبت قطر به ضخامت (*D/t*) لوله های فولادی مورد مطالعه قرار گرفتند. کلیه نمونه ها دارای قطر ثابت ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۲۵۰ میلی متر بوده و با بتن معمولی پر شده اند. با توجه به تاثیر مثبت فشار جانبی روی مقاومت نهایی نسبت قطر به ضخامت در برخی از نمونه ها بیش از مقادیر پیشنهاد شده در آیین نامه ها در نظر گرفته شدند. نتایج آزمایشگاهی با روابط ارائه شده در آیین نامه های یوروکد ۴ و آیین نامه *AISC* مقایسه شدند. نتایج آزمایش ها بیانگر اثر قابل توجه فشار جانبی روی مقاومت نهایی نمونه های *CFT* بوده است. میزان افزایش مقاومت نهایی در اثر فشار خارجی ۵۰ بار برای ضخامت های ۱/۲ و ۰/۵ میلی متر به ترتیب برابر با ۱/۸۵، ۱/۸۸ و ۱/۹۱ بدست آمده است. رفتاری مشابه برای نمونه های با مقاومت بتن ۳۰ مگاپاسکال نیز مشاهده می شود به گونه ای که افزایش فشار جانبی به میزان ۵۰ بار سبب افزایش مقاومت نهایی به میزان ۱/۶۸ و ۱/۷۳ برابر مقاومت نمونه های بدون فشار جانبی برای ضخامت های ۲ و یک میلی متر شده است.

**واژگان کلیدی:** لوله فولادی پر شده با بتن، فشار بیرونی، محصورشدگی، کماتش موضعی، مقاومت نهایی، بتن، فولاد

گرفته اند. سیستم لوله فولادی پر شده از بتن یکی از سیستم های کامپوزیتی است که با موفقیت استفاده شده و بسیاری از پژوهش ها از مقاومت بالا، سختی، انعطاف پذیری و مقاومت لرزه ای بهتر سیستم یاد کرده اند. مزیت اصلی *CFT*

## ۱- مقدمه

در سال های اخیر، مواد کامپوزیت به دلیل مزایای آن به طور گسترده ای در طراحی ستون های بتنی مورد استفاده قرار

فولادی ضخیم پر شده با بتن در سازه‌های متعارف مانند ساختمان‌های بلند و پل‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. جیاکومولیس و لام ۱۵ نمونه آزمایشگاهی با مقاومت‌های مختلف و نسبت قطر به ضخامت بین ۲۲/۹ تا ۳۰/۵ را مورد آزمایش قرار داده و نتایج به دست آمده را با آیین‌نامه‌های موجود مقایسه کردند [7]. البته بررسی اثر استفاده از مقادیر بالاتر و پایین‌تر از محدودیت‌های پیشنهادی آیین‌نامه‌ها توسط بهشتی اول صورت گرفت. وی با مدلسازی عددی روابط آیین‌نامه‌ای را بررسی و پیشنهادهای برای بهبود این روابط ارائه نمود [8].

یانگ و الوبادی لوله‌های فولادی مقاومت بالای پر شده با بتن را که بصورت سرد نورد شده‌اند را مورد آزمایش قرار دادند. مقاومت بتن در نمونه‌ها بین ۴۰ تا ۸۰ مگاپاسکال و تنش تسلیم فولاد معادل ۵۳۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شد در حالیکه نسبت قطر به ضخامت لوله‌ها برابر با ۲۵/۷ و ۵۵/۸ انتخاب شدند. آنها دو روش متفاوت تعیین مقاومت فولاد را بررسی و نتایج آزمایش را با آیین‌نامه‌های رایج استرالیایی و آمریکایی برای طراحی سازه‌های ساخته شده با فولادهای سرد نورد شده مقایسه نمودند. طبق بررسی‌های صورت گرفته استفاده از مقاومت لوله‌های فولادی در مقایسه با استفاده از مقاومت ورق‌های فولادی در محاسبات ظرفیت نهایی ستون‌ها نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌کند [9].

با وجود محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای اوشی و همکاران تلاش کردند تا استفاده از  $D/t$  های بالا (۲۲۰) را مورد بررسی قرار دهند اما در نهایت به این نتیجه رسیدند که در  $D/t$  های بالا بعلت کماتش موضعی رو به بیرون زود هنگام فولاد امکان استفاده از بیشینه ظرفیت محصورکنندگی فولاد برای بتن هسته وجود ندارد [10]. برای رفع این نقیصه گانش و همکاران پیشنهاد استفاده از نوارهای دورپیچ FRP برای افزایش محصورکنندگی فولاد را مطرح نمودند. نوارهای دورپیچ با فواصل مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند و نتیجه گرفتند استفاده از نوارهای FRP به فواصل ۳۰ میلی متر سبب افزایش مقاومت نهایی به میزان ۳۰ درصد خواهد شد [11].

این است که لوله فولادی و بتن هسته در این سیستم می‌توانند تا حد زیادی نقاط ضعف یکدیگر را خنثی کنند. بتن محصور نشده پس از حداکثر مقاومت آن به علت شکل پذیری پایین دچار گسیختگی ترد می‌شود. مقاومت فولاد نیز بعد از کماتش موضعی به شدت کاهش پیدا می‌کند. با ترکیب این دو ماده، لوله فولادی نه تنها مقاومت محوری را تامین می‌کند بلکه با ایجاد حصار جانبی از شکست ترد بتن جلوگیری می‌کند. از طرفی بتن نیز از کماتش رو به داخل ورق فولادی جلوگیری می‌کند و می‌تواند در افت ناگهانی مقاومت ناشی از کماتش موضعی محلی تاخیر ایجاد کند. شکل (۱) رفتار ساختاری یک ستون CFT را نشان می‌دهد. از طرفی در این سیستم لوله‌های فولادی می‌توانند به عنوان قالب در کارهای ساختمانی استفاده شوند. در اعضای تحت بار فشاری ستون‌های لوله‌ای دایره‌ای شکل نسبت به سایر مقاطع عرضی، در یک سطح مقطع یکسان، سختی خمشی بالایی را در همه جهات دارند. پر کردن لوله با بتن مقاومت نهایی عضو را بدون افزایش قابل توجه در هزینه‌ها بالا می‌برد [1,2].

مزایای اشاره شده این مقاطع مرکب، سبب شده است تا لوله‌های فولادی پر شده با بتن امروزه در سازه‌های بلند [3]، تونل‌های زیرزمینی [4]، پل‌ها [5] و برج‌های بلند [6] استفاده شوند.

شکل ۱. رفتار سازه‌ای ستون‌های پر شده با بتن

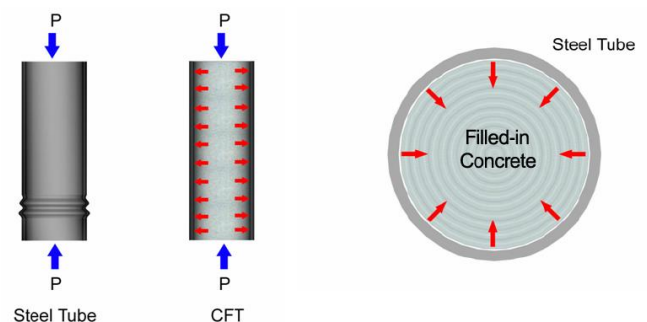


Fig. 1. Structural behavior of CFT column system

مطالعات آزمایشگاهی بسیاری برای بررسی رفتار لوله‌های فولادی پر شده با بتن انجام شده است. مروری بر این مطالعات نشان می‌دهد که بیشتر پژوهشگران رفتار لوله‌های

در بیشتر پژوهش‌های انجام شده از  $D/t$  های بالاتر از مقادیر آیین‌نامه‌ای بعلت بروز کماتش موضعی استفاده نشده است در حالیکه در صورت استفاده از لوله‌های CFT در سازه‌های دریایی نظیر سکوه‌های ثابت دریایی فشار آب اطراف لوله می‌تواند بروز کماتش موضعی را به تاخیر بیندازد که این امر استفاده از مقاطع با  $D/t$  بالا را میسر می‌نماید. پس این پژوهش یک روش محصور کنندگی جدید را بررسی خواهد کرد که در واقعیت وجود دارد ولیکن اثر آن نادیده گرفته می‌شود.

## ۲- مطالعات آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات نمونه‌ها

برای بررسی اثر فشار دورگیر روی رفتار لوله‌های فولادی ۱۵ سری آزمایش با مقاومت بتن و ضخامت جدار متفاوت تحت فشارهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. لوله‌های فولادی به قطر ۱۰۰ میلی متر از ورق هایی به ضخامت ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر به صورت نورد سرد ساخته شدند. به منظور کاهش آثار انتهایی و اطمینان از اینکه لوله‌ها به اندازه کافی کوتاه هستند که آثار لاغری در آنها تاثیر گذار نباشد طول نمونه‌ها برابر با ۲۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

برخی از پژوهشگران نیز تلاش کردند تا تاثیر افزایش مقاومت بتن هسته را بر ظرفیت نهایی این ستون‌ها بررسی نمایند. نعمت‌زاده و همکاران با اعمال فشار بر بتن تر و خروج آب اضافی بتن علاوه بر اینکه مقاومت و مدول الاستیسیته بتن هسته را بهبود دادند موجب ایجاد محصور کنندگی اولیه در لوله فولادی شدند [12,13].

امروزه بسیاری از سازه‌های دریایی مانند سکوه‌های ثابت دریایی و مونوپایل‌ها از لوله‌های فولادی ساخته می‌شوند که به علت قرارگیری اعضا در اعماق زیاد فشار بیرونی ناشی از هیدرواستاتیک آب به آنها اعمال می‌شود. احتمال کماتش موضعی این سازه‌ها بدلیل فشار بیرونی زیاد ناشی از آب بسیار زیاد است [14]. در صورت استفاده از لوله‌های فولادی پر شده با بتن در این نوع سازه‌ها به علت فشار خارجی امکان افزایش میزان محصورشدگی بتن هسته وجود خواهد داشت که این امر امکان استفاده از مقاطع با نسبت قطر به ضخامت بالاتر را فراهم می‌کند. به تازگی استفاده از این سیستم مرکب در ژاپن برای مقاوم‌سازی سازه‌های دریایی ساخته شده با لوله‌های فولادی توخالی که در اثر زلزله دچار آسیب شدند نیز گزارش شده است. در این مطالعه لوله‌های فولادی با کماتش موضعی شدید با بتن پر شدند. نتایج بیانگر افزایش ۱/۵ برابری مقاومت نهایی نسبت به لوله‌های توخالی بوده است [15].

جدول ۱. مشخصات نمونه‌ها

Sample ID	L(mm)	D(mm)	$t_{st}$ (mm)	$f_c$ (Mpa)	$f_y$ (MPa)	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	Pressure (bar)
C15P0R50	253	103	2	12.1	213.02	7697.69	634.60	0
C15P50R50	249	102.3	2	12.1	213.02	7589.22	630.20	50
C15P0R100	253	101.5	1	12.1	223.3	7775.64	315.73	0
C15P50R100	255	101.6	1	12.1	223.3	7791.28	316.04	50
C15P0R200	254	101.5	0.5	12.1	218.2	7932.72	158.65	0
C15P50R200	255	98	0.5	12.1	218.2	7389.81	153.15	50
C15P100R200	252	101	0.5	12.1	218.2	7853.98	157.87	100
C15P150R200	252	101	0.5	12.1	218.2	7853.98	157.87	150
C30P0R50	252	102.1	2	33.09	213.02	7558.37	628.95	0
C30P50R50	247	102.4	2	33.09	213.02	7604.66	630.83	50
C30P0R100	252	101.3	1	33.09	223.3	7744.41	315.10	0
C30P50R100	251	100.7	1	33.09	223.3	7651.11	313.22	50
C45P0R200	252	102.1	0.5	42.1	218.2	8027.72	159.59	0
C45P100R200	247	102.4	0.5	42.1	218.2	8075.43	160.06	105
C45P150R200	252	101.3	0.5	42.1	218.2	7901.18	158.34	140

Table 1. Specimens' properties

شکل ۲. گسیختگی نمونه‌ها با جوش کاربیت- سمت چپ) از محل جوش، سمت راست) از فلز پایه



Fig. 2. Failure of specimen- Left: welding failure, right: metal failure

شکل ۳. عملکرد نمونه‌های ساخته شده با جوش آرگن



Fig. 3. Behavior of welded tube by argon welding

مشخصات کلیه نمونه‌ها در جدول شماره (۱) ارائه شده است. نمونه‌ها بگونه‌ای نامگذاری شدند که معرف مقاومت بتن، فشار بیرونی و نسبت قطر به ضخامت لوله فولادی باشند. بعنوان نمونه C15P50R100 بیانگر نمونه‌ای با مقاومت بتن هسته ۱۵ مگاپاسکال (C15) با فشار خارجی ۵۰ بار (P50) و نسبت قطر به ضخامت ۱۰۰ (R100) است. کلیه آزمایش‌ها در مرکز تحقیقات سازه و زلزله دانشگاه نوشیروانی بابل صورت پذیرفت.

### ۲-۲- انتخاب نوع جوش

با توجه به ضخامت پایین ورق‌های مورد استفاده، روش‌های مختلف اتصال مانند جوش آرگن، CO<sub>2</sub>، جوش کاربیت، اتصال با پرچ و ذوب نقطه‌ای برای ساخت لوله‌ها بکار گرفته شدند. به منظور انتخاب جوش مناسب، در مرحله اول نمونه‌های فولادی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر با بتن پر شدند و توسط جک بتن شکن معمولی تحت بار محوری قرار گرفتند تا عملکرد جوش تحت بار زیاد مشخص شود. با توجه به عدم گسیختگی نمونه‌ها از محل اتصال در جوش‌های کاربیت و آرگن در مرحله بعد نمونه‌های بیشتری با این دو نوع جوش ساخته و با بتن با مقاومت بالاتر پر شدند. در نمونه جوش شده با کاربیت تحت اثر بار محوری، همان‌گونه که در شکل (۲) مشهود است گسیختگی از محل جوش و گسیختگی در فلز پایه مشاهده شد.

برخلاف لوله‌های جوش شده با کاربیت، لوله‌های ساخته شده با جوش آرگن در اثر بار محوری، با وجود تغییر شکل محوری بالا، هیچگونه گسیختگی در مقاطع پر شده با بتن مشاهده نشد. همان‌گونه که در شکل (۳) مشهود است تغییر شکل جانبی زیاد لوله فولادی سبب گسیختگی لوله‌ها از محل جوش نشده است. پس با توجه به نتایج فوق و عملکرد مناسب‌تر در نهایت جوش آرگن برای ساخت لوله‌ها بکار گرفته شد.

۳-۲- مشخصات بتن

بتن‌های با مقاومت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ مگاپاسکال با استفاده از مصالح رایج با شرایط اختلاط و عمل آوری عادی ساخته شدند. طرح‌های اختلاط بر مبنای آیین‌نامه ACI و قبل از انجام آزمایش‌های اصلی تهیه شدند. برای تعیین مقاومت دقیق بتن حین ساخت نمونه‌های اصلی از هر طرح اختلاط شش نمونه مکعبی و سه نمونه استوانه‌ای اخذ شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه میانگین نمونه‌های اخذ شده برابر با ۱۴/۲، ۱/۲۹ و ۷/۴۳ مگاپاسکال برای بتن‌های با مقاومت مشخصه ۱۵، ۳۰ و ۴۵ بوده است. به منظور تعیین مدول الاستیسیته بتن نیز از هر سری آزمایش سه نمونه استوانه‌ای ۱۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر گرفته شد. طرح اختلاط بتن و نتایج آزمایش‌های انجام شده روی بتن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. طرح اختلاط بتن‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ مگاپاسکال

Nominal concrete strength (Mpa)	Water/Cement ratio	Mix proportions (to weight of cement)		
		Cement	Fine aggr.	Coarse aggr.
C15	0.80	1.0	5.44	2.74
C30	0.41	1.0	2.22	1.39
C45	0.32	1.0	1.57	1.11

Table 2. 15, 30 and 45 MPa concrete mix design

۴-۲- مشخصات فولاد

به منظور تعیین مقاومت نهایی فولاد مطابق با آیین‌نامه ASTM از ورق‌های بکار رفته آزمایش مقاومت کششی بعمل آمد. با توجه به نمودار تنش کرنش مدول یانگ اولیه و حد تسلیم نمونه‌ها از روش کرنش ۲ درصد بدست آمد.

۴-۵- دستگاه آزمایش

به منظور اعمال فشار همه جانبه دستگاهی توسط مولفان به گونه‌ای طراحی شد که قابلیت اعمال فشار دورگیر و محوری را به صورت همزمان داشته باشد. دستگاه قابلیت انجام آزمایش روی نمونه‌های به قطر تا ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و فشار جانبی تا ۳۰۰ بار (۳۰ مگاپاسکال) را دارد. نمایی از دستگاه ساخته شده در شکل (۴) نمایش داده شده است. برای انجام آزمایش پس از قرار گرفتن نمونه در داخل دستگاه، روغن وارد مخزن شده و سپس قطعه‌ای پیستون مانند که به یک جک فشاری متصل است وارد مخزن می‌شود.

شکل ۴. دستگاه آزمایش

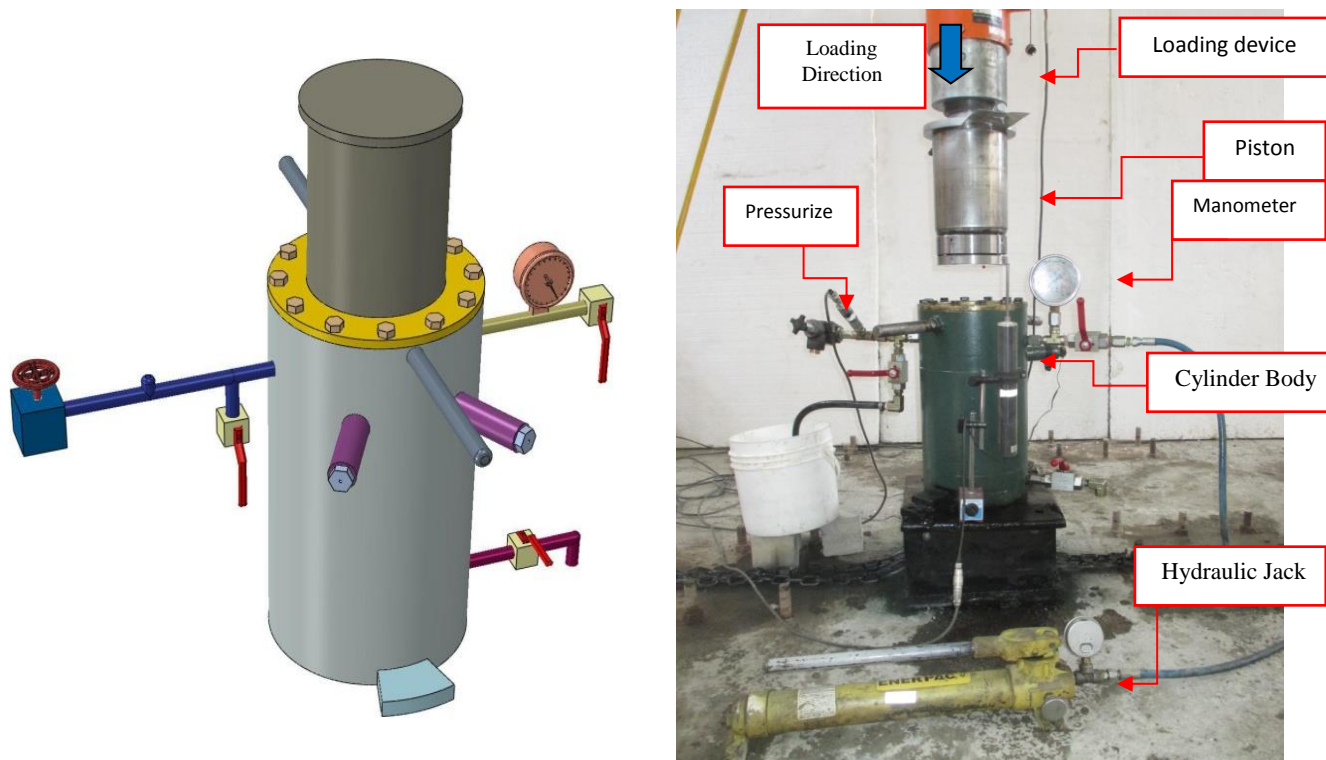


Fig. 4. Test set-up

طولی و عرضی در روی جدار خارجی و در وسط نمونه‌ها نصب شدند (شکل ۵). بمنظور عایق بودن کرنش سنج‌ها نوار آب‌بند SB Tape روی کرنش سنج‌ها نصب شدند. میزان فشار روغن داخل مخزن با نصب یک عدد عقربه فشار سنج در مسیر جریان قرائت می‌شدند. البته برای ثبت میزان فشار لحظه‌ای داخل مخزن، یک فشارسنج در مسیر قرار داده شد. کلیه تجهیزات و ابزار دقیق بکار رفته ساخت شرکت TML ژاپن بوده است.

### ۳- آیین‌نامه‌های طراحی

مقاومت محوری نهایی لوله‌های فولادی پر شده با بتن بدون فشار جانبی با آیین‌نامه یوروکد ۴ [16] و آیین‌نامه آمریکایی AISC [17] مقایسه شدند. در محاسبه مقاومت طرح ضرایب اطمینان مربوط به مصالح برابر با یک در نظر گرفته شد. یوروکد ۴ ضوابط مربوط به طراحی ستون‌های فولادی پر شده با بتن مسلح و غیرمسلح را ارائه می‌دهد. این استاندارد اثر محصورشدگی بتن توسط فولاد پیرامونی را با اعمال ضرایب افزایشی در مقاومت محوری بتن هسته در نظر می‌گیرد در حالیکه استاندارد AISC نه تنها این اثر را نادیده می‌گیرد بلکه ضریب کاهش ۰/۹۵ را برای ستون‌های دایره‌ای در مقاومت محوری بتن هسته اعمال می‌کند. یوروکد ۴ رابطه (۱) را برای ستون‌های دایره‌ای پر شده با بتن پیشنهاد می‌کند:

$$N_{EC4} = A_s f_y \eta_2 + A_c f_c (1 + \eta_1 \frac{t}{D} \frac{f_y}{f_c}) \quad (1)$$

که  $A_s$  مقطع عرضی لوله فولادی،  $A_c$  سطح مقطع بتن هسته،  $\eta_1$  و  $\eta_2$  به ترتیب ضرایب مربوط به محصورشدگی بتن و فولاد هستند که به صورت رابطه (۲) بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 0.25(3 + 2\lambda) \leq 1 \\ \eta_2 &= 4.9 - 18.5\lambda + 17\lambda^2 \end{aligned} \quad (2)$$

استاندارد AISC اثر کمناش موضعی فولاد را با تقسیم‌بندی مقطع فولادی به سه حالت فشرده، غیرفشرده و لاغر در محاسبات لحاظ می‌کند. مطابق با استاندارد مذکور در

پکینگ‌های ۵ تکه V شکل پس از ورود پیستون به داخل مخزن بصورت کامل مجموعه را آب بند می‌نماید. به منظور کنترل فشار یک شیر فشار شکن در مسیر جریان قرار داده شده است تا در صورت افزایش فشار در اثر پایین آمدن پیستون، فشار داخل مجموعه ثابت بماند. پس از قرارگرفتن پیستون روی سطح نمونه‌ها، فشار اولیه داخل دستگاه به وسیله یک پمپ هیدرولیک به میزان مورد نیاز به نمونه‌ها اعمال می‌شود. برای اطمینان از اعمال بار به صورت قائم یک فک خود ردیف شو به انتهای پیستون متصل شده است (شکل ۴).

شکل ۵. محل نصب کرنش سنج و جابه‌جایی سنج روی نمونه- نمودار بار به کرنش طولی و عرضی

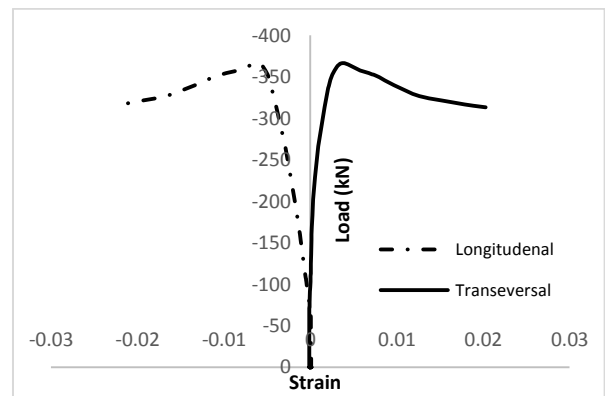
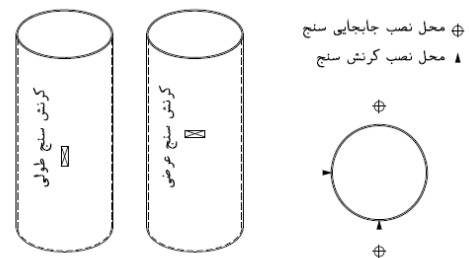


Fig. 5. Location of strain gauges and LVDTs on the specimens

### ۲-۶- تجهیزات و ابزار دقیق

دو عدد جابه‌جایی سنج LVDT به صورت قطری در هر طرف دستگاه به منظور پایش تغییرشکل کلی نمونه‌ها قرار داده شدند که تغییر مکان محوری از میانگین اعداد قرائت شده بدست آمدند. دو کرنش سنج در وسط نمونه‌ها به صورت

با توجه به رابطه فوق مقاطع لاغر تا حد تنش کماتش موضعی بحرانی  $f_{cr}$  لوله فولادی و  $0.7f_c$  بتن هسته محدود می‌شوند.

#### ۴- نتایج و بررسی آزمایش‌ها

در این بخش به مقایسه نمونه‌های فولادی پر شده با بتن تحت فشار بیرونی می‌پردازیم. پارامترهایی مانند بار تغییر مکان، مودهای شکست و عملکرد درزهای جوش شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل (۶) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های بدون اعمال فشار خارجی نمایش داده شده است. همان‌گونه که در نمودار مشاهده می‌شود رفتار کلیه نمونه‌ها تقریباً مشابه با یکدیگر است بگونه‌ای که نمونه‌ها پس از رسیدن به بیشینه ظرفیت با افزایش تغییر شکل و با افت کم مقاومت همراه هستند.

شکل ۶. نمودار بار- جابه‌جایی نمونه‌های بدون فشار با بتن ۱۵ مگاپاسکال و ضخامت‌های فولاد متفاوت

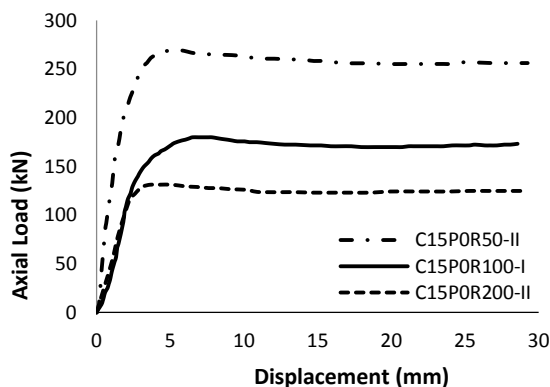


Fig. 6. Load-axial deformation curves, without external pressure, 15 MPa concrete

مود شکست مورد انتظار در نمونه‌های بدون فشار خارجی به صورت تسلیم فولاد و خرد شدگی بتن است که در کلیه نمونه‌های بدون فشار خارجی با ضخامت‌های متفاوت این رفتار مشاهده شده است.

ستون‌های با ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر به عنوان ستون‌های کوتاه شناخته می‌شوند که سازوکار شکست این نوع ستون‌ها خردشدگی بتن به همراه کماتش موضعی فولادی است. شکل مودهای گسیختگی نمونه‌های با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و

صورتیکه نسبت قطر به ضخامت لوله کمتر از  $\lambda_p = \frac{0.15E_s}{f_y}$  باشد مقطع فشرده و اگر بزرگتر از  $\lambda_p$  و کوچکتر از  $\lambda_r = \frac{0.19E_s}{f_y}$  باشد مقطع غیرفشرده است. در نهایت مقطع لاغر است اگر نسبت قطر به ضخامت بیش از  $\lambda_r$  باشد.

ظرفیت فشاری اسمی مقطع فشرده  $P_{no}$ ، برابر با طبقه‌بندی فوق برای مقطع فشرده برابر است با مقاومت پلاستیک مقطع مرکب:

$$P_{no} = P_p \quad (3)$$

و مقاومت پلاستیک مقطع برابر است با:

$$P_p = A_s f_y + C_2 A_c f_c \quad (4)$$

که ضریب  $C_2$  برای مقاطع مرکب دایره‌ای برابر با ۰/۹۵ است. در واقع زمانی فولاد به تنش تسلیم می‌رسد که تنش در بتن به ۰/۹۵ مقاومت مشخصه می‌رسد.

برای مقاطع غیرفشرده ظرفیت فشاری اسمی مقطع برابر است با:

$$P_{no} = P_p - \frac{P_p - P_y}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (5)$$

که  $P_y$  تنش تسلیم مقطع مرکب و برابر است با

$$P_y = A_s f_y + 0.7 A_c f_c \quad (6)$$

در نهایت برای مقاطع لاغر ظرفیت فشاری اسمی مقطع برابر است با:

$$P_{no} = A_s f_{cr} + 0.7 A_c f_c \quad (7)$$

در رابطه (۷)،  $f_{cr}$  تنش کماتش موضعی بحرانی مقاطع مرکب دایره‌ای است که به صورت زیر بدست می‌آید:

$$f_{cr} = \frac{0.72 f_y}{\left( \left( \frac{D}{t} \right) \frac{f_y}{E_s} \right)^{0.2}} \quad (8)$$

در برخی از نمونه‌ها گسیختگی از محل جوش پس از رسیدن نمودار به بیشینه ظرفیت باربری، که به صورت افت ناگهانی در نمودار قابل ردیابی هستند، مشاهده شده است. البته نمونه‌هایی که قبل از رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری از محل جوش دچار گسیختگی شدند از نتایج آزمایش‌ها حذف شدند. طبق پژوهش‌های صورت گرفته به وسیله پژوهشگران گسیختگی جوش از محل درزها اثر بسیار کمی روی ظرفیت باربری ستون‌های کوتاه دارد [18]. با توجه به رفتار نمونه‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که گسیختگی از محل جوش تاثیر چندانی در ظرفیت نهایی ستون‌های فولادی کوتاه ندارد. برای ستون‌های فولادی کوتاه تنش‌های حلقوی تاثیر قابل توجهی روی گسیختگی از محل جوش دارند. در مراحل اولیه بارگذاری محوری نمونه‌های CFT بعلت اختلاف ضریب پواسون بتن و فولاد، جدایشی بین جدار لوله و بتن بوجود می‌آید که با افزایش بار کرنش‌های طولی به مقادیر بحرانی می‌رسند و بتن به جدار فولادی می‌رسد. پس از این مرحله با افزایش بار تنش حلقوی در لوله فولادی بوجود می‌آید و بتن یک تنش سه محوره را تجربه می‌کند. با توجه به اینکه لوله‌های بکار رفته از جوش دادن ورق‌های فولادی ساخته شدند امکان ایجاد ترک‌های ناشی از سرد شدن ناگهانی در ناحیه جوش وجود دارد. وجود این نقیصه و ضعف در لوله فولادی به همراه وجود تنش‌های حلقوی سبب بروز گسیختگی برخی از نمونه‌ها از محل درز شده است. البته همان‌گونه که پیشتر اشاره شد گسیختگی‌هایی از محل درز پس از تسلیم سایر مقاطع لوله فولادی رخ داده‌اند پس در تعیین بیشینه ظرفیت باربری تاثیر گذار نبوده‌اند.

در شکل (۹) نمودارهای بار قائم- جابه‌جایی برای نمونه‌های با مقاومت هسته بتنی ۱۵ و ۳۰ مگاپاسکال تحت فشار خارجی صفر و ۵۰ بار ارائه شده است. سایر نتایج آزمایش برای بتن‌های با مقاومت ۳۰ و ۴۵ مگاپاسکال در جدول (۳) ارائه شده است. با مقایسه این نمودارها مشاهده می‌شود که فشار جانبی سبب افزایش مقاومت نهایی کلیه نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های بدون فشار می‌شود و با

مقاومت بتن ۱۵ مگاپاسکال با فشار خارجی صفر و ۵۰ بار در شکل‌های (۷ و ۸) نمایش داده شده است. بطور کلی دو مود کلی گسیختگی مشاهده شده است: مود شکست برشی بتن که کمانش رو به بیرون پوسته فولادی در بالا و وسط نمونه‌ها رخ می‌دهد و دیگری خردشدگی بتن که با اتساع پوسته فولادی در وسط نمونه مشهود است. برای نمونه‌های بدون فشار خارجی کمانش موضعی به همراه خردشدگی بتن در کلیه نمونه‌ها مشاهده شد (شکل ۷). اما در نمونه‌های با اعمال فشار خارجی شکست برشی در بتن به روشنی قابل مشاهده نیست و از طرفی کمانش‌های موضعی فولاد در سطح گسترده‌تر و با تعداد بیشتری رخ داده است. در این نمونه‌ها اثری از خردشدگی ناگهانی بتن مشاهده نمی‌شود که در اثر فشار بیرونی است (شکل ۸).

شکل ۷. شکل مود گسیختگی نمونه‌ها (بتن ۱۵ مگاپاسکال، فشار صفر و

قطر به ضخامت ۱۰۰)

C15P0R100

Side view

Back side

Front view



Fig. 7. Failure mode of column without external pressure, 15 MPa concrete,  $D/t=100$

شکل ۸. شکل مود گسیختگی نمونه‌ها (بتن ۱۵ مگاپاسکال، فشار ۵۰ بار و

قطر به ضخامت ۱۰۰)

C15P50R100

Side view

Back side

Front view



Fig. 8. Failure mode of column, 50 bar external pressure, 15 MPa concrete,  $D/t=100$



به عبارتی فشار بیرونی محصورکنندگی بیشتری را برای لوله‌های نازک فراهم می‌کند. میزان افزایش مقاومت در اثر فشار خارجی ۵۰ بار برای ضخامت های ۲، ۱ و ۰/۵ میلی متر به ترتیب برابر با ۱/۸۵، ۱/۸۸ و ۱/۹۱ بدست آمده است. رفتاری مشابه برای نمونه‌های با مقاومت بتن ۳۰ مگاپاسکال نیز مشاهده می‌شود به گونه‌ای که افزایش فشار جانبی به میزان ۵۰ بار سبب افزایش مقاومت نهایی به میزان ۱/۶۸ و ۱/۷۳ برابر مقاومت نمونه‌های بدون فشار جانبی برای ضخامت‌های ۲ و یک میلی‌متر شده است.

تاثیر تغییر نسبت قطر به ضخامت در مقاومت نمونه ها و شکل پذیری آنها در نمودارهای بار قائم-جابجایی ارائه شده در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.

شکل ۱۰. نمودار بار جابجایی نمونه (بتن ۱۵ مگاپاسکال، فشار ۵۰ بار و قطر به ضخامت ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰)

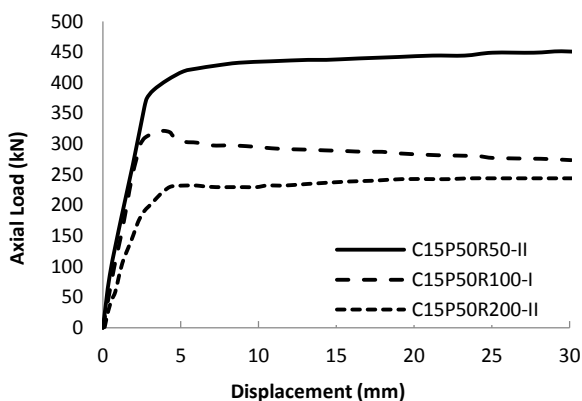


Fig.10. Load-axial deformation curves, 50 bar external pressure, 150 MPa concrete, D/t 50 , 100 , 200

شکل ۱۱. نمودار بار جابجایی نمونه‌ها (بتن ۳۰ و ۱۵ مگاپاسکال، فشار ۵۰ بار و قطر به ضخامت ۱۰۰)

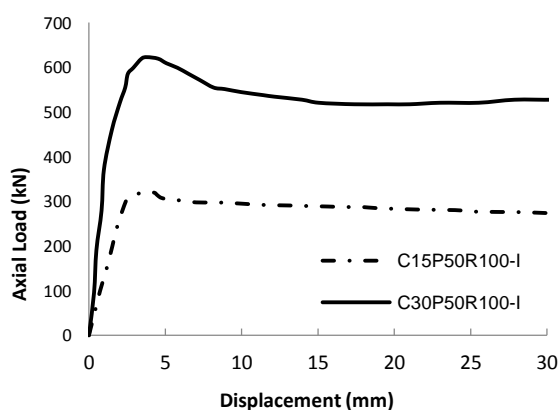


Fig. 11. Load-axial deformation curves, 50 bar external pressure, 30 MPa concrete, D/t 100

کاهش ضخامت لوله‌ها فشار بیرونی اثر بیشتری روی ظرفیت نهایی دارد.

شکل ۹. نمودار بار جابجایی نمونه‌ها (بتن ۱۵ و ۳۰ مگاپاسکال، فشار صفر و ۵۰ بار و قطر به ضخامت ۵۰ و ۱۰۰)

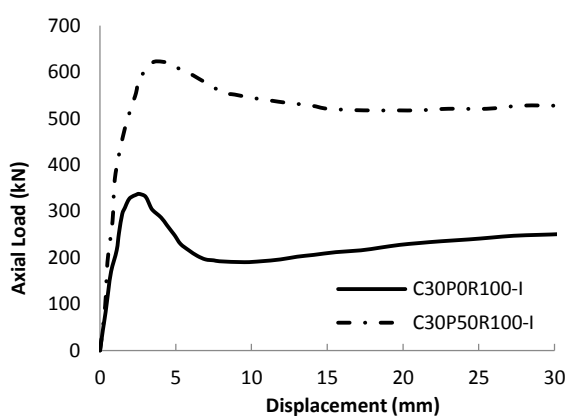
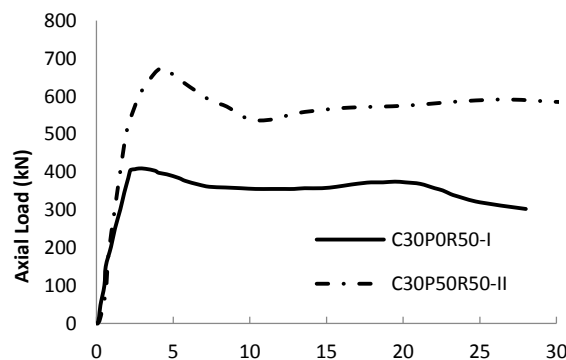
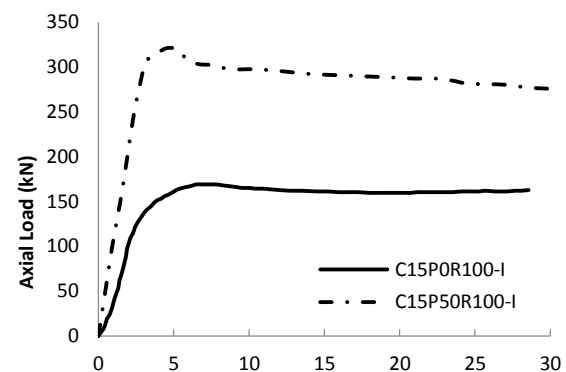
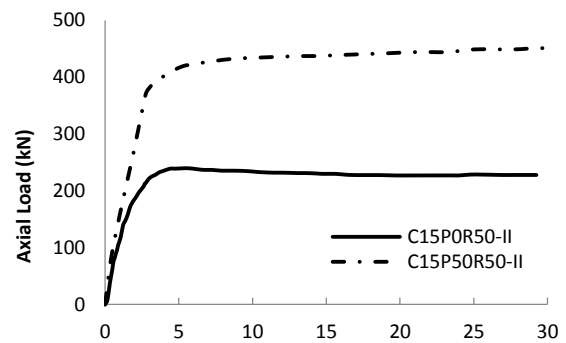


Fig. 9. Load-axial deformation curves, 0&50 bar external pressure, 15&30 MPa concrete, D/t 50 &100

کنندگی فولاد بر بتن هسته در نظر گرفته می شود. در یور کد ۴ بهبود مقاومت بتن با اعمال ضریب  $\frac{t}{D} \frac{f_y}{f_c}$  و  $1 + \eta_1$  در روابط محاسباتی لحاظ می شود. با توجه به اینکه فشار خارجی به نوعی سبب افزایش محصور شونده بتن می شود می توان با اعمال ضریب افزایشی در روابط ارائه شده در آیین نامه رابطه ای بین فشار خارجی و بار نهایی ارائه داد. به همین منظور در جدول (۴) مقدار  $\eta_1$  ضریب محصور شدگی بتن و مقاومت محاسباتی و ضریب محصور شدگی بدست آمده از آزمایش های ارائه شده است. در ستون آخر جدول نسبت محصور شدگی بتن آزمایشگاهی به آیین نامه ای برای نمونه های با اعمال فشار خارجی محاسبه شده است. همان گونه که از این نسبت ها مشخص است میزان تاثیر فشار خارجی بر نمونه های با ضخامت کمتر بیشتر است.

شکل (۱۱) نمودار بار جابجایی برای دو نمونه مشابه با بتن های با مقاومت ۱۵ و ۳۰ مگاپاسکال را نشان می دهد.

### ۵- مقایسه با یورکد ۴ و آیین نامه AISC

مقایسه مقاومت نمونه های آزمایشگاهی با مقاومت طرح آیین نامه های AISC و یورکد ۴ در جدول (۳) صورت گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده می توان مشاهده نمود که بار نهایی محاسبه شده طبق آیین نامه AISC با نتایج آزمایشگاهی هماهنگی مناسبی دارد. در بیشتر نمونه ها مقاومت نهایی تقریباً ۶ درصد بیشتر از بار محاسباتی بوده است. نتایج مشابهی برای مقاطع مستطیلی سرد نورد شده بر شده با بتن در پژوهش های یانگ و الوبادی [7] بدست آمده است. برخلاف آیین نامه AISC در یورکد ۴ اثر محصور

جدول ۳. مقایسه نتایج آزمایش با آیین نامه ها

Sample ID	Conf. Fac.(ζ)	Pressure (bar)	N <sub>test</sub> (kN)	N <sub>EC4</sub> (kN)	$\frac{N_{test}}{N_{EC4}}$	N <sub>AISC</sub> (kN)	$\frac{N_{test}}{N_{AISC}}$
C15P0R50-I	1.45	0	235.73	320.36	0.74	223.66	1.05
C15P0R50-II	1.45	0	235.13	320.47	0.73	223.66	1.05
C15P50R50-I	1.46	50	436.70	317.68	1.37	221.48	1.85
C15P50R50-II	1.46	50	433.42	318.02	1.36	222.10	1.84
C15P0R100-I	0.75	0	165.91	213.80	0.78	159.88	1.04
C15P50R100-I	0.75	50	314.90	214.00	1.47	160.13	1.90
C15P50R100-II	0.76	50	309.02	210.68	1.47	157.39	1.86
C15P0R200-I	0.36	0	132.73	155.08	0.86	125.80	1.06
C15P0R200-II	0.36	0	128.76	152.52	0.84	123.66	1.04
C15P50R200-I	0.37	50	247.52	146.15	1.69	118.36	1.92
C15P50R200-II	0.36	50	243.19	152.52	1.59	123.66	1.89
C15P100R200-I	0.36	100	315.88	153.86	2.05	124.73	2.38
C15P100R200-II	0.36	100	332.56	155.18	2.14	125.80	2.51
C15P150R200-I	0.36	150	409.08	153.86	2.66	124.73	3.08
C15P150R200-II	0.36	150	412.20	152.52	2.70	123.66	3.33
C30P0R50-I	0.54	0	396.32	466.77	0.85	371.58	1.07
C30P0R50-II	0.53	0	392.11	468.43	0.84	372.81	1.05
C30P50R50-I	0.53	50	667.57	469.75	1.42	373.43	1.68
C30P50R50-II	0.53	50	662.18	470.17	1.41	374.67	1.67
C30P0R100-I	0.27	0	330.60	369.52	0.89	313.81	1.05
C30P0R100-II	0.27	0	344.43	369.52	0.93	313.81	1.10
C30P50R100-I	0.28	50	601.06	365.72	1.64	310.46	1.75
C30P50R100-II	0.27	50	588.11	370.33	1.59	314.37	1.71
C45P0R200-I	0.10	0	380.77	392.39	0.97	355.89	1.07
C45P0R200-II	0.10	0	370.80	390.19	0.95	353.89	1.05
C45P100R200-I	0.10	105	641.42	394.83	1.62	357.90	1.68
C45P100R200-II	0.10	105	614.01	395.92	1.55	359.25	1.61
C45P150R200-I	0.10	140	713.87	386.55	1.85	350.56	1.87
C45P150R200-II	0.10	140	700.15	382.24	1.83	346.58	1.84
C45P150R200-III	0.10	140	704.78	387.37	1.82	351.22	1.85

Table 3. Comparison of test result via design codes

جدول ۴. ضریب محصورشدگی بتن در آیین نامه EC4

Sample ID	$\eta_1$	$\eta_2$	$EF_{EC4}$	$N_{pl}(kN)$	$N_{test}$	$EF_{test}$	$\frac{EF_{test}}{EF_{EC4}}$
C15P0R50-I	3.821	0.781	2.306	320.36	235.73	1.40	-
C15P0R50-II	3.825	0.781	2.308	320.47	235.13	1.39	-
C15P50R50-I	3.830	0.781	2.318	317.68	436.70	3.61	1.56
C15P50R50-II	3.812	0.781	2.309	318.02	433.42	3.56	1.54
C15P0R100-I	3.774	0.782	1.686	213.80	165.91	1.18	-
C15P50R100-I	3.767	0.783	1.684	214.00	314.90	2.75	1.64
C15P50R100-II	3.772	0.782	1.693	210.68	309.02	2.76	1.63
C15P0R200-I	3.752	0.783	1.333	155.08	132.73	1.10	-
C15P0R200-II	3.741	0.783	1.336	152.52	128.76	1.08	-
C15P50R200-I	3.710	0.784	1.341	146.15	247.52	2.47	1.85
C15P50R200-II	3.741	0.783	1.336	152.52	243.19	2.30	1.72

EF: Enhancement Factor

Table 4. Concrete Enhancement factor in EC4

ضخامت ۰/۵ میلی متر ۱۵ درصد بیش از نمونه‌های با ضخامت ۲ میلی متر است.

- با افزایش مقاومت بتن هسته اثر فشار خارجی روی افزایش مقاومت نهایی کاهش پیدا کرده و شکل پذیری نمونه ها نیز کاهش می یابد.
- آیین نامه یوروکد ۴ پیش بینی غیرمحافظة کارانه‌ای برای لوله‌های فولادی نورد سرد دارد و آیین نامه AISC محاسبات محافظه کارانه تری را ارائه می دهد.

### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از همکاری مرکز تحقیقات سازه و زلزله دانشگاه صنعتی بابل کمال سپاسگزاری را دارند.

### References

- [1] Lai, M.H., Ho, J.C.M. 2014. Confinement effect of ring-confined concrete filled steel tube columns under uni-axial load, *Engineering Structures*, 67, 123–141.
- [2] Han L, Li, W. Bjorhovde, R. 2014. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. *Journal of Constructional Steel Research*, 211-228
- [3] Abed, F., Al Hamaydeh, M., Abdalla, S. 2014. Experimental and numerical investigations of the compressive behaviour of concrete filled steel tubes

### ۶- نتیجه گیری

این مقاله یافته های حاصل از انجام آزمایش روی لوله های فولادی پر شده با بتن تحت فشار بیرونی را ارائه داده است. آزمایش ها روی نمونه های فولادی دایره ای شکل که تحت بار محوری و فشار بیرونی همزمان قرار داشتند صورت گرفت. نسبت قطر به ضخامت نمونه ها بین ۵۰ تا ۲۰۰، مقاومت بتن بین ۱۵ تا ۴۵ مگاپاسکال و فشار خارجی از صفر تا ۱۵۰ بار متغیر بوده است. نتایج آزمایش با مقاومت های طرح در آیین نامه AISC و یوروکد ۴ برای لوله های فولادی پر شده با بتن دایره ای مقایسه شدند. با توجه به آزمایش های انجام گرفته نتایج به شرح ذیل بدست آمده است:

- فشار بیرونی به علت افزایش محصور کنندگی بتن هسته و جلوگیری و به تاخیر انداختن کمانش موضعی رو به بیرون لوله فولادی سبب افزایش مقاومت نهایی، شکل پذیری و سختی نمونه ها شده است. با افزایش فشار به میزان ۵۰ بار مقاومت نهایی نمونه ها حداقل ۶۸ درصد افزایش یافته است.
- با افزایش ضخامت لوله ها اثر فشار خارجی به علت کاهش اثر محصور کنندگی کاهش می یابد. در فشار خارجی برابر با ۵۰ بار تاثیر افزایش مقاومت نهایی برای نمونه های با

- [11] Sundararaja, M.C. Prabhu, G. 2012. Experimental study on CFST members strengthened by CFRP composites under compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 72, 75-83
- [12] Nematzadeh, M. Naghipour, M. 2012. Compressive strength and modulus of elasticity of freshly compressed concrete, *Construction and Building Materials*, 34, 476-485
- [13] Nematzadeh, M. Salari, A. Ghadami, J. Naghipour, M. 2016. Stress-strain behavior of freshly compressed concrete under axial compression with a practical equation, *Construction and Building Materials*, 115, 402-423
- [14] Karamanos and S.A., Tassoulas J., 1995. Effects of external pressure on capacity of tubular beam-columns, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 121(11), 1620.
- [15] Kawabata, Y, Ohya, Y. Kato, E, Iwanami, M. 2017. Experimental study on effectiveness of retrofitting via normal strength concrete filling on damaged circular steel tubes subjected to axial and horizontal loads. *Construction and Building Materials*, 154, 1-9
- [16] EN 1994-1-1 Eurocode 4.(2004). Design of Composite Steel and Concrete Structures- Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, in: CEN, Brussels.
- [17] AISC360-10. 2010. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois.
- [18] Ekmekyapar, T. 2016. Experimental performance of concrete filled welded steel tube columns. *Journal of Constructional Steel research*, 117. 175-184
- (CFSTs). *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 429-439.
- [4] Chang, X., Luo X., Zhu C., Tang C., 2014. Analysis of circular concrete-filled steel tube (CFT) support in high ground stress conditions. *Tunnel Underground .Space Technology*, 43, 41-48.
- [5] Brown, N.K., Kowalsky, M.J., Nau, J.M., 2015. Impact of D/t on seismic behaviour of reinforced concrete filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 107, 111-123.
- [6] Xu F., Chen J., Jin W.L., 2014. Experimental investigation of thin-walled concrete-filled steel tube columns with reinforced lattice angle. *Thin-Walled Structure*, 84, 59-67.
- [7] Young, B. Ellobody, E. 2006. Experimental investigation of concrete-filled cold-formed high strength stainless steel tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 62, 484-492.
- [8] Beheshti-Aval B. 2012 "Strength evaluation of concrete-filled steel tubes subjected to axial-flexural loading by ACI and AISC-LRFD codes along with three dimensional nonlinear analysis", *International Journal of Civil Engineering*, 10(4), 280-290.
- [9] Giakoumelis, G., Lam, D. 2004. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 60, 1049-1068
- [10] O'Shea, M. Bridge, R. 2000. Design Of Circular Thin-Walled Concrete Filled Steel Tubes. *Journal of Structural Engineering*, 1295-1303.

## Effect of External Pressure on Axial Ultimate Capacity of Concrete Filled Steel Tube Stub Column

Mohsen Mohammadnejad<sup>1</sup>, Morteza Naghipour<sup>2</sup>, Mahdi Nematzadeh<sup>3</sup>, Majid Elyasi<sup>4</sup>

1- PhD Student, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Associated Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

4- Associated Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

\*m-naghi@nit.ac.ir

### ABSTRACT:

Concrete -filled steel tube are widely used today in many civil engineering structures. The advantage of steel members is their high tensile strength and ductility and, on the other hand, concrete members have high compressive strength. Composite members combine steel and concrete, which have positive properties of both materials. In members under compressive loading, circular tube columns, for a given cross section area, have the large uniform bending strength in all directions in comparison to other cross-sections. Filling the pipe with concrete will increase the ultimate strength of the member without significantly increasing costs. On the other hand, the concrete in the tube delays the local buckling of the pipe wall. In this type of section, the outward buckling will reduce the amount of confinement, ductility and ultimate strength.

Subsea and offshore marine structures are mainly made of hollow steel circular sections, where water pressure reduces their load carrying capacity. By converting these sections to concrete filled tube, external pressure can improve the behavior by increasing the confinement. This paper tries to investigate the effect of external pressure on the ultimate strength of CFT, so that the use of this kind of composite sections in construction and retrofitting of marine structures would be investigated. This paper tried to evaluate the effect of lateral pressure on improving the behavior of concrete-filled steel tubes (CFT) by conducting laboratory studies. For this purpose, tri-axial testing set up, with capability of 400 bars pressure, was designed and constructed by the authors. Parameters such as lateral pressure, concrete strength and diameter to thickness ratio ( $D/t$ ) of steel tube were tested.

Concrete with strength of 15 to 45 MPa was cast in pipes of 0.5 to 2 mm thickness and subjected to axial loading under external pressure between 0 and 150 bars. All specimens have a constant diameter of 100 mm and a height of 250 mm and are filled with ordinary concrete. All specimens have a diameter of 100 mm and a height of 250 mm and are filled with normal concrete. To evaluate effect of lateral pressure on the final strength, the ratio of  $d$  Parameters such as ultimate strength and failure mode of specimens along with their displacement load diagrams were investigated. Diameter to thickness in some samples was considered higher than the values proposed in the standards. Experimental tests results were compared with the relationships presented in the Eurocode 4 and AISC standards.

According to the calculations, the AISC standard result in conservative numbers compared to the EC4 standard for the ultimate strength of the specimen. External pressure has increased the loading capacity, as well as the ductility of the specimens by preventing the buckling and sudden crushing of the core concrete. Increase in load carrying capacity due to external pressure was up to 91% in some specimen. The effect of increasing on ultimate strength on the lower thickness specimens was significant. In conclusion, results of the experiments showed a significant effect of lateral pressure on the final strength of the CFT with normal concrete.

**Keywords:** Concrete Filled Steel Tube (CFT), External Pressure, Confinement, Local Buckling, Concrete, Steel