

بررسی تحلیلی مقاومت فشاری اتصالات T شکل پرسیده با بتن تحت بارگذاری استاتیکی

محمد حسن اسفندیاری^۱، سید محمدرضا حسینی^{۲*}، مسعود محمودآبادی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه دولتی قم، قم

۲- دانشجویی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه دولتی قم، قم

* بابل، صندوق پستی ۴۷۱۴۸۷۳۱۱۳، smr.hasani@stu.nit.ac.ir

چکیده

امروزه به کارگیری ستون‌های مرکب در پروژه‌های عمرانی بیش‌تر از گذشته مورد توجه قرار گرفته است. میزان استفاده از ستون‌های مرکب در ساخت فرودگاه‌ها، استادیوم‌های ورزشی، سکوها، دریایی و نفتی بیش از پروژه‌های دیگر می‌باشد. با توجه به این که در طول مدت بهره‌برداری از پروژه‌های مذکور احتمال وقوع حوادثی مانند برخورد کشتی با سازه، طوفان شدید در سکوها، دریایی و یا مواردی مثل آتش سوزی و انفجار در تمام پروژه‌ها، می‌باشد و همچنین از طرفی دیگر، اهمیت بالایی که این سازه‌ها دارند، ایجاب می‌کند تا پژوهشگران تحقیقات بیش‌تری در خصوص ارائه راه‌کارهایی برای افزایش مقاومت ستون‌های مرکب در سازه‌ها، ارائه دهند تا سازه بتواند در برابر حوادث فوق مقاومت بیش‌تری از خود نشان دهد. در این تحقیق سعی شده است با مدل‌سازی نمونه‌هایی با پارامترهای مختلف در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS تأثیر تغییر متغیرهایی مانند پارامترهای هندسی، مقاومت فشاری بتن و نوع سطح مقطع اعضاء؛ بر مقاومت و استحکام ستون‌های مرکب در برابر بار استاتیکی مشخص شود. پس از مدل‌سازی نمونه‌ها و تحلیل و پردازش نتایج مشخص شد که استفاده از سطح مقطع مربع در ستون‌های مرکب و همچنین افزایش مقاومت فشاری بتن مورد استفاده در این اعضاء، تأثیر مثبتی بر عملکرد اعضاء مرکب خواهد داشت و این دو مورد، مقاومت در برابر بار استاتیکی را به ترتیب ۱۹٪ و ۱۰٪ بهبود می‌بخشند. همچنین کاهش نسبت عرض به ضخامت (b/t)، استحکام و مقاومت اتصالات را افزایش داده و ظرفیت باربری اتصال را بهبود می‌بخشد.

واژگان کلیدی

اتصالات T شکل، مقاومت فشاری، مقاطع فولادی پرسیده با بتن، بارگذاری استاتیکی

Analytical investigation of compressive strength of T-joints filled with concrete under static loading

M.H. Esfandiari, S.M.R. Hasani, M. Mahmoudabadi

Abstract

Nowadays, the use of composite columns in construction projects is more attention than in the past. The use of composite columns in the construction of airports, sports stadiums, marine and oil platforms is more than other projects. Due to the fact that during the operation of the mentioned projects, the possibility of incidents such as; Collision of a ship with a structure, a severe storm, in marine platforms or things like fire and explosion in all projects, and also on the other hand, the high importance of these structures requires researchers to research provide more about providing solutions to increase the resistance of composite columns in structures so that the structure can show more resistance against the above incidents. In this research, it has been tried by modeling samples with different parameters in the Abaqus finite element software, the effect of changing variables such as; Geometrical parameters, compressive strength of concrete and type of cross section of members; Determine the strength of composite columns against static load. After modeling the samples and analyzing and processing the results, it was found that; The use of square cross section in composite columns and also increasing the compressive strength of concrete used in these members will have a positive effect on the performance of composite members and these two items improve the resistance to static load by 19% and 10% respectively. to forgive Also, reducing the ratio of width to thickness (b/t) increases the strength and resistance of joints and improves the bearing capacity of the joint.

Keywords

T-joints, compressive strength, steel sections filled with concrete, static loading

بتن و فولاد هر دو مصالحی هستند که امروزه در پروژه‌های عمرانی به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و معایب و محاسن آن‌ها تا حد زیادی شناخته شده می‌باشد.

اجزاء اصلی تشکیل دهنده بتن به راحتی و با هزینه کم قابل تهیه بوده و پس از اختلاط به علت حالت خمیری که پیدا می‌کند، می‌توان آن را در قالب‌هایی که هندسه‌های گوناگونی دارند، جای داد و بدین وسیله اجزایی با هندسه‌های متفاوت را ایجاد کرد. بتن دارای سختی بالا و مقاومت خوبی در برابر آتش می‌باشد.

فولاد نیز جزء مصالحی است که مقاومت بالا و شکل پذیری مناسبی دارد، نصب قطعات فلزی سرعت زیادی دارند، این موضوع باعث می‌شود ساخت سازه‌های فولادی در مدت زمان کم‌تری نسبت به سازه‌های بتنی صورت گیرد. فولاد ذاتاً در برابر عواملی مثل آتش‌سوزی می‌شود، مقاومت و استحکام سازه به شدت مورد تهدید قرار می‌گیرد.

فرودگاه‌ها، ایستگاه‌های قطار، استادیوم‌های ورزشی و سازه‌هایی که در پالایشگاه‌ها، میادین گازی و عملیات‌های دریایی مربوط به کشف و استخراج نفت ساخته می‌شوند، بسیار حائز اهمیت می‌باشند زیرا در برخی از این سازه‌ها جمعیت زیادی حضور دارند و بروز حادثه در آن‌ها تلفات زیادی را به دنبال خواهد داشت و برخی دیگر از این سازه‌ها به گونه‌ای هستند که عملکرد و فعالیتشان می‌تواند تاثیر بسیار زیادی بر چرخه اقتصادی یک جامعه داشته باشد. امروزه با گسترش آگاهی از فواید و مزایای ستون‌های مرکب، اغلب ستون‌های به کار رفته در این نوع سازه‌ها از نوع مرکب می‌باشند. ستون‌های مرکب عمدتاً به دو گروه ستون‌های فولادی مدفون شده در بتن و ستون‌های فولادی پر شده با بتن تقسیم می‌شوند. در این میان ستون‌های فولادی پر شده در مقایسه با ستون‌های فولادی مدفون در بتن دارای مزایایی از قبیل عدم نیاز به قالب‌بندی و میلگردگذاری، اثر محصورکنندگی فولاد بر بتن، شکل‌پذیری و جذب انرژی بالا، کاهش افت و خزش بتن، سرعت ساخت بالا و ظرفیت باربری مناسب بتن هستند و همچنین لوله‌ی فولادی با توجه به قرارگرفتن در پیرامون مقطع، بیش‌ترین سختی و مقاومت خمشی را ایجاد می‌نماید [۱]. به دلیل موارد فوق در سال‌های اخیر محققین، توجه بیشتری به این نوع مقاطع داشته‌اند و به منظور بهبود رفتار این

ستون‌ها راه‌کارهای متفاوتی را پیشنهاد کرده‌اند. امروزه گستره‌ی استفاده از این ستون‌ها به قدری وسیع است که حتی فراتر از مرزهای مهندسی عمران، در صنایعی هم‌چون صنعت معدن نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

ستون‌های مرکب اغلب در اشکال دایره‌ای اجرا می‌گردند. دلیل اصلی این موضوع این نکته است که مقطع دایره‌ای محصورشدگی بیش‌تری را نسبت به مقاطع دیگر در بتن هسته ایجاد می‌کنند. این مهم سبب گردیده که مقطع دایره‌ای نسبت به مقاطع دیگر در ستون‌های مرکب بیش‌تر مورد استفاده قرار گیرند. اما در بعضی از مواقع استفاده از مقاطع دایره‌ای غیر ممکن خواهد شد و استفاده از اشکال خاص از جمله مقطع مربع و مستطیل و مقاطع با اشکال Y و X شکل در بعضی از قسمت‌های ساختمانی اجتناب ناپذیر است [۳]. اعضای فولادی با مقطع توخالی دایره‌ای (CHS) و مربعی (SHS) امروزه به طور گسترده‌ای در سازه‌هایی مثل سکوها ثابت و شناور دریایی و خرپاهای با دهانه‌های بلند و فضایی (سازه‌های فضاکار)، ایستگاه‌های راه‌آهن، ترمینال‌ها، فرودگاه‌ها و استادیوم‌های ورزشی استفاده می‌شوند.

۲- تحقیقات پیشین

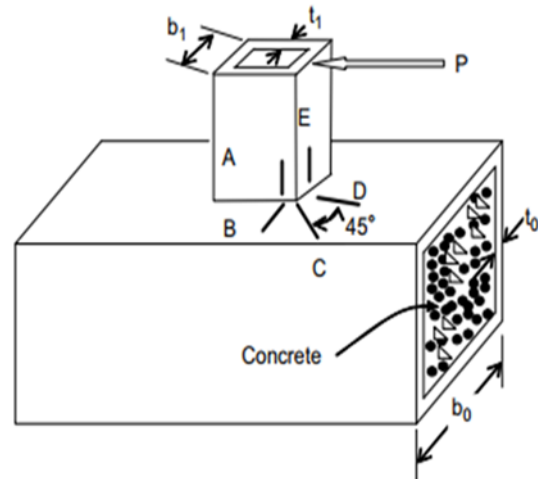
مردی شقاقی و همکارانش [۳] به بررسی عملکرد ستون‌های مرکب پرداختند. در این تحقیق، اثر تعدادی از پارامترهای مؤثر در رفتار ستون‌های مرکب از جمله نسبت طول به بعد مقطع عرضی (L/D)، نسبت بعد مقطع به ضخامت جداره فولاد (D/t) و شکل مقطع عرضی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی این ستون‌ها، ۱۲ نمونه ستون با مقیاس حدود ۱:۳ ساخته شده و تحت بار محوری فشاری توأم با بار جانبی تا انهدام کامل ستون آزمایش شده است. آن‌ها در تحقیقات خود از سه نوع سطح مقطع دایره، مربع و هشت ضلعی، که یک بار با سخت‌کننده تقویت شدند و در مرتبه‌ی بعدی بدون سخت‌کننده مورد آزمایش قرار گرفتند.

در پایان به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های با سخت‌کننده عملکرد بهتری از خود نشان داده و سخت‌کننده‌ها نقش مهمی را ایفا کرده و منجر به افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی بیش‌تری شده‌اند.

هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که سطح مقطع دایره، عملکرد بهتری داشته و جذب انرژی بیش‌تری را منجر می‌شود.



مشیری^۱ و همکارانش [۴] یک اتصال T شکل با مقطع مربع را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها شش نمونه را با نسبت‌های مختلف هندسی تهیه کردند و سه پارامتر γ و τ و β را برای هر نمونه تعیین نمودند که در آن؛ $\beta = \frac{b_1}{b_0}$ و $\tau = \frac{t_1}{t_0}$ و $\gamma = \frac{b_0}{t_0}$ می‌باشد، پارامترهای t_0 ، b_0 و t_1 و b_1 مربوط به مشخصات هندسی عضو اصلی^۲ و فرعی^۳ نمونه‌ها می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمونه‌ی مورد آزمایش همراه با پارامترهای هندسی

این شش نمونه یک بار به صورت توخالی و بدون بتن مورد بررسی قرار گرفتند و بار دیگر از بتن با مقاومت فشاری ۵۰ MPa برای عضو اصلی استفاده شد و در پایان نتایج نهایی آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. آزمایشات اولیه‌ی آن‌ها نشان‌دهنده‌ی این موضوع بود که محلی از اتصال دو عضو اصلی و فرعی که تحت کشش قرار می‌گیرد ضعیف‌تر عمل کرده و ترک خوردگی در اثر اعمال بار از این ناحیه آغاز شده و از محل جوش دو عضو گسترش می‌یابد. آن‌ها برای اندازه‌گیری کرنش در نقاط C، B و D از کرنش‌سنج‌ها استفاده کردند و کرنش‌های اندازه‌گیری شده را به وسیله‌ی رابطه‌ی $1.1E\epsilon$ به تنش تبدیل نمودند.

نصیریایی و همکارانش [۵] تحقیقاتی روی اتصالات T و Y شکل انجام دادند. آن‌ها در این تحقیقات هشت نمونه را مورد بررسی قرار دادند و هر دو عضو اصلی و فرعی اتصال را به صورت توخالی نگاه داشتند و برای تقویت اتصال در چهار نمونه

1 Mashiri
2 Chord
3 Brace
4 ABAQUS

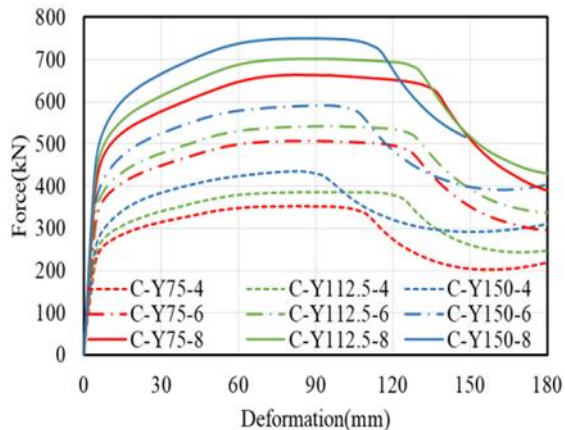
از ورق تقویت استفاده کردند و چهار نمونه‌ی دیگر را بدون ورق تقویت بررسی کرده و در پایان با یک دیگر مقایسه نمودند. آن‌ها برای آنالیز این نمونه‌ها از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس^۴ استفاده کردند. در این مطالعه برای مدل‌سازی نمونه‌ها در نرم‌افزار از دو نوع المان SOLID و SHELL استفاده شده است. چهار مورد از نمونه‌ها با استفاده از المان SOLID و چهار مورد دیگر، که اتصالات تقویت‌نشده بودند، توسط المان SHELL مدل شدند. در این تحقیق تنش تسلیم عضو اصلی، فرعی و ورق تقویت به ترتیب ۳۰۰، ۴۶۴ و 300 N/mm^2 می‌باشد. مدول یانگ^۵ و نسبت پواسون^۶ فولاد استفاده شده نیز به ترتیب ۲۰۴ و 0.3 GPa در نظر گرفته شده است.

نتایج تحقیقات آن‌ها این موضوع را نشان می‌دهد که نسبت قطر به ضخامت عضو فرعی به قطر به ضخامت عضو اصلی تاثیر قابل توجهی بر مقاومت نهایی و مودهای شکست نمونه‌های تقویت‌شده در مقایسه با نمونه‌های تقویت‌نشده خواهند گذاشت و استحکام نهایی اتصال T/Y شکل تقویت‌شده با ورق تحت بار فشاری محوری می‌تواند تا ۲۷۰٪ مقدار متناظر در اتصال تقویت‌نشده باشد. افزایش طول و ضخامت ورق تقویت، باعث بهبود استحکام اتصال می‌شود ولی طول ورق نسبت به ضخامت آن تاثیر بیش‌تری روی افزایش مقاومت خواهد گذاشت. زیاد شدن زاویه عضو فرعی نسبت به افق، مقاومت نهایی عضو را افزایش می‌دهد ولی این افزایش زاویه بهبود مقاومت اتصال را بسیار آهسته افزایش می‌دهد.

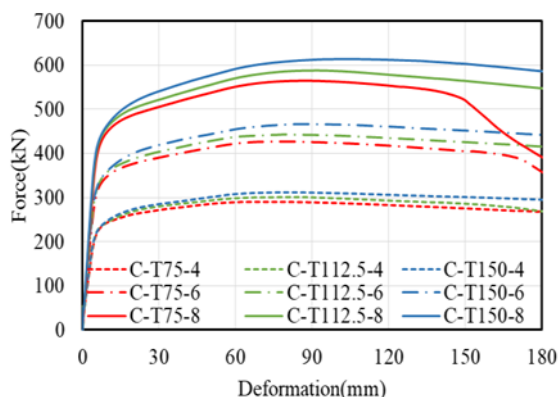
نقی پور و همکاران [۶] در تحقیقی به مطالعه عددی اتصالات مرکب T و Y شکل با مقطع مربع پرداختند. در این پژوهش ۱۸ نمونه اتصال Y و ۱۸ اتصال T با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل‌سازی گردید. آن‌ها پارامترهای بتن پرکننده عضو اصلی، نسبت عرض به ضخامت عضو فرعی و زاویه اتصال عضو فرعی به اصلی را متغیر قرار دادند. پارامتر عرض مقطع عضو فرعی ۱۵۰، ۱۱۲/۵ و ۷۵ mm و ضخامت مقطع آن ۴، ۶ و ۸ mm و مقاومت فشاری مکعبی بتن ۵۰ MPa در نظر گرفته شده است. در این نمونه‌ها ابعاد عضو اصلی $150 \times 200 \text{ mm}$ و ضخامت آن ۸ mm است، ابعاد عضو اصلی ثابت نگه داشته شده

⁵ Young's modulus
⁶ Poisson's ratio

تقویت شده با بتن بر روی شاخص‌های مقاومت و شکل‌پذیری اتصال به ترتیب $18/73$ و $39/58$ حاصل شد و مود شکست در حالت توخالی بودن عضو اصلی به صورت کماتش موضعی و دندان‌شدن و در حالت تقویت شده با بتن به صورت کماتش موضعی حاصل شد.



شکل ۴- مقایسه رفتار نیرو-تغییر شکل نمونه‌های اتصالات Y و T شکل پر شده با بتن

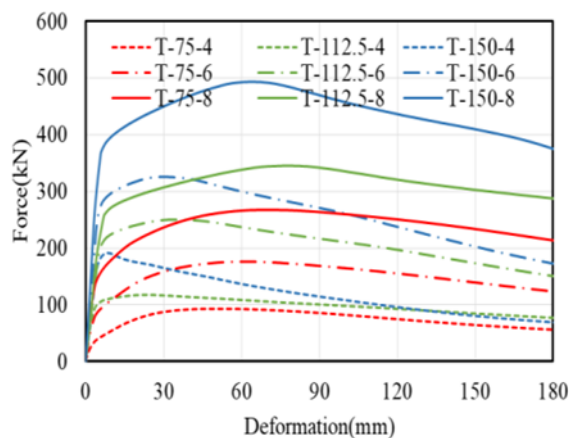


شکل ۵- مقایسه رفتار نیرو-تغییر شکل نمونه‌های اتصالات Y و T شکل پر شده با بتن

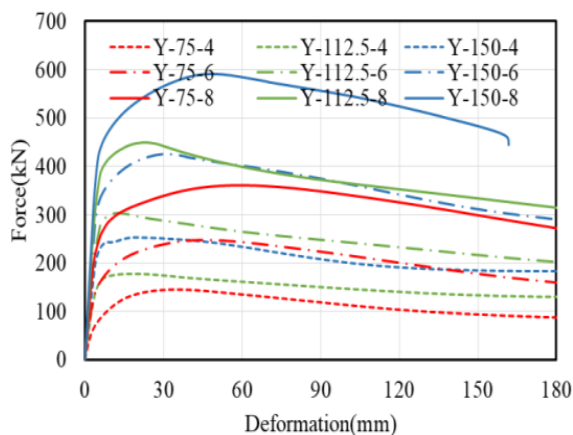
۳- صحت سنجی

استفاده از روش‌های عملی و آزمایشگاهی در بررسی پدیده‌های علمی، مستلزم استفاده از منابع مالی و انسانی زیادی می‌باشد که استفاده از این روش را برای عموم محققان محدود می‌کند. روش‌های عددی رویکردهای جایگزینی می‌باشند که دو چالش عنوان شده را تا حد بسیار زیادی حل می‌کنند. باید از طریق

است ولی ابعاد عضو فرعی در سه حالت 150 ، $112/5$ و 75 mm مورد بررسی قرار گرفته است. نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۲) و (۳) حداکثر نیروی وارد شده به همراه تغییر مکان متناظر آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مقایسه رفتار نیرو-تغییر شکل نمونه‌های اتصالات Y و T شکل توخالی



شکل ۳- مقایسه رفتار نیرو-تغییر شکل نمونه‌های اتصالات Y و T شکل توخالی

همان‌طور که در نمودار شکل‌های (۴) و (۵) مشخص است در هر دو اتصال T و Y شکل باعث افزایش نیرو و ظرفیت باربری اتصال می‌گردد.

نتایج تحقیقات آن‌ها نشان‌دهنده این موضوع است که تاثیر تغییرات در ابعاد مقطع مربعی در عضو فرعی از 150 به $112/5$ و 75 mm در حالت بدون بتن بر روی شاخص‌های مقاومت و شکل‌پذیری اتصال به ترتیب $42/95$ و $42/81$ درصد و در حالت

مقایسه‌ی عملکرد نمونه‌ها در نرم‌افزار با آزمایش‌های عملی سایر پژوهشگران به صحت مدل‌سازی‌های انجام‌شده رسید [۷]. در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی، روش‌های عددی پاسخ‌های متنوعی از خود نشان خواهند داد که بسته به شرایط مختلف اعم از میزان و نوع عناصر مش‌بندی، تعریف صحیح رفتار مصالح، نوع اعمال بار و شرایط مرزی و سایر ملزومات، متفاوت خواهد بود. به همین دلیل، بایستی مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزارهای اجزاء محدود توسط پاسخ‌های نمونه‌ی آزمایشگاهی صحت‌سنجی شود تا ارزش این مدل‌سازی روشن گردد. شاید انطباق کامل میان پاسخ‌های نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی مشکل باشد ولی هر چه پاسخ‌ها به هم‌دیگر نزدیک‌تر باشد، نشان از توانایی مدل اجزاء محدود در شبیه‌سازی شرایط آزمایشگاهی بوده که اطمینان محققین را برای استفاده از آن در بررسی رفتار سازه‌ها، جلب خواهد کرد.

۳-۱- تحلیل استاتیکی

برای بررسی درستی و صحت مدل‌سازی نمونه‌ها، یک نمونه اتصال مرکب T شکل که تحت آزمایش عملی قرار گرفته با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل شده و نتایج آن با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. نمونه آزمایشگاهی مورد نظر برای صحت‌سنجی، از پژوهش چنگ و همکاران [۸] تحت عنوان رفتار اتصالات T شکل جوش داده‌شده و پرشده با بتن در پل‌های خرابایی فولادی انتخاب گردیده است. چنگ و همکاران [۸] در این پژوهش عملی ۶ نمونه با مشخصات هندسی متفاوت را بررسی کردند که برای صحت‌سنجی، مدل TA-1 انتخاب گردید. مدل انتخابی دارای مقطع عضو اصلی به عرض ۱۵۰ mm و به ارتفاع ۲۰۰ mm و مقطع عضو فرعی به عرض ۱۵۰ mm و به ارتفاع ۱۵۰ mm می‌باشد. طول نمونه‌های عضو اصلی ۱۵۴۰ mm و عضو فرعی ۶۵۰ mm است. نمونه‌هایی که در نرم‌افزار آباکوس مدل شد، مشخصات مصالح منطبق با مدل آزمایشگاهی می‌باشد، در مدل آزمایشگاهی مقاومت مشخصه بتن ۵۰ MPa بوده و برای مشخصات فولاد آن از تنش تسلیم ۲۸۰ MPa، تنش نهایی ۵۲۸ MPa، مدول یانگ ۲۰۱۰۰۰ MPa و ضریب پواسون ۰/۳ استفاده شده است.

در پایان با توجه به این که نمودار جابجایی عمودی بر حسب نیروی محوری اعمالی بر عضو فرعی، در هر دو نمونه‌ی

آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌شده، که در شکل (۶) نشان داده شده است، مطابقت خوبی با هم دارند لذا می‌توان گفت که مدل عددی اتصال T شکل، رفتار نسبتاً مشابهی با مدل آزمایشگاهی دارد و در نتیجه با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان به خوبی رفتار اتصال مرکب T شکل را پیش‌بینی کرد.

۴- نمونه‌های مدل‌سازی شده

مدل‌سازی بتن مورد استفاده در اعضای مرکب در پاسخ صحیح نرم‌افزار تاثیر بسیاری داشته و انتخاب مدل بتن از اساسی‌ترین بخش تحلیل در نرم‌افزار می‌باشد [۹].

نرم‌افزار آباکوس شامل سه محصول اصلی Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit, و Abaqus/CF می‌باشد [۱۰].

معرفی Abaqus/Standard: اصلی‌ترین محصول این نرم‌افزار می‌باشد که قابلیت تحلیل‌های خطی و غیرخطی استاتیکی، حرارتی و غیره را دارد.

معرفی Abaqus/CFD: محصولی برای تحلیل دینامیکی سیالات می‌باشد و می‌تواند طیف وسیعی از مسائل سیالات تراکم‌ناپذیر شامل جریان‌های لایه‌ای و آشفته، جریان‌های همرفتی حرارتی و تغییر فرم مش‌بندی را انجام دهد [۱۱].

معرفی Abaqus/Explicit: محصولی از این نرم‌افزار با قابلیت انجام تحلیل‌های خاص دینامیکی خطی و غیرخطی مانند تحلیل‌های انفجار و ضربه بوده و هم‌چنین برای مسائل غیرخطی پیشرفته شامل تغییر شرایط تماس در مسائل شکل‌دهی بسیار مناسب می‌باشد [۱۲].

در این تحقیق برای بررسی اتصال T شکل پرشده با بتن، نمونه‌ها به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند؛ در گروه اول، ۱۲ نمونه با سطح مقطع دایره و در گروه دوم، ۱۲ نمونه با سطح مقطع مربع در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل‌سازی می‌شوند. در جدول (۱) مشخصات هندسی نمونه‌های مورد بررسی به همراه رده مقاومت فشاری بتن و سطح مقطع نمونه‌ها بیان شده است.

در نمونه‌ها برای اعضای فولادی مقاطع، از تنش تسلیم و مدول الاستیسیته^۱ ۳۶۰ و ۲۱۰۰۰۰ MPa استفاده شده و هم‌چنین چگالی، کرنش پلاستیک^۲ و ضریب پواسون آن نیز به ترتیب ۷۸۵۰ kg/m³، ۰/۲ و ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

¹ Elastic Modulus

² Plastic Strain



برای مقاطع بتنی اعضا نیز، مقدار $0/2$ و 2400 kg/m^3 برای ضریب پواسون و چگالی نمونه‌ها استفاده شده و همچنین مدول الاستیسیته بتن با مقاومت فشاری 30 و 40 MPa نیز به ترتیب 26070 و 30103 MPa انتخاب گردیده است.

در این مدل برای اعمال اثر اندرکنش بین فولاد و بتن از المان‌های رابط استفاده شده است. ضریب اصطکاک کولمب^۱ بین دو سطح فولاد و بتن که در تماس با یک دیگر می‌باشند طبق فرمول البوی و یانگ^۲ [۱۳] برابر $0/25$ در نظر گرفته شده است. برای اعمال بارگذاری بر نمونه‌ها در نرم‌افزار، بار محوری به میزان 2000 kN بر عضو فرعی و باری به میزان 500 kN بر عضو اصلی اتصال اعمال شده است و همچنین دو سمت عضو اصلی سازه به صورت تکیه‌گاه ساده در نظر گرفته می‌شود. برای مشخص شدن تاثیر کلی وجود بتن در اتصال T شکل ابتدا در مدل‌های با سطح مقطع دایره، یک نمونه با نسبت b/t ثابت که نمونه‌ی شماره‌ی یک بوده و مشخصات آن در جدول (۱) ذکر شده است در سه حالت مختلف ذیل مدل شده و بررسی می‌گردد.

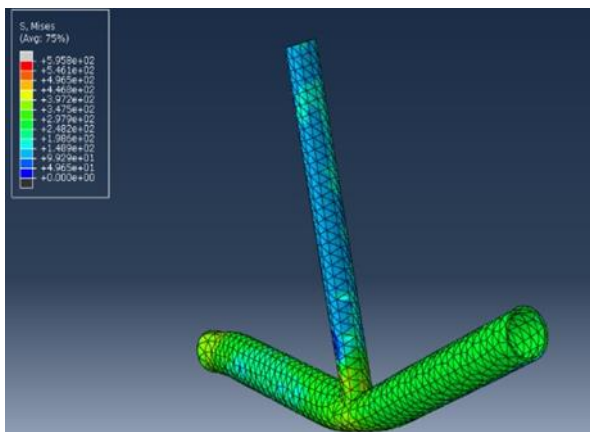
حالت اول (C150-10): عضوهای اصلی و فرعی به صورت توخالی و بدون بتن در نظر گرفته می‌شوند.

حالت دوم (C₁150-10): عضو اصلی به صورت پر شده با بتن و عضو فرعی به صورت توخالی و بدون بتن مدل می‌شوند.

حالت سوم (C₂150-10): از بتن در هر دو عضو اصلی و فرعی اتصال استفاده می‌شود.

در این مرحله، نتایج مدل‌های فوق با یک دیگر مقایسه شده و تاثیر وجود و عدم وجود بتن در عضوهای اصلی و فرعی اتصال مشخص می‌گردد. در حالتی که اتصال T شکل بدون بتن در هر دو عضو اصلی و فرعی باشد، این اتصال که به صورت توخالی بوده مطابق شکل (۸) با افزایش تدریجی بار وارده، عضو فرعی دچار کماتش کلی شده و همچنین فشار بسیار زیادی در محل اتصال هر دو عضو ایجاد می‌گردد که باعث تغییر شکل و جمع‌شدگی این ناحیه می‌شود، در نهایت اتصال در این حالت به

سمت گسیختگی حرکت می‌کند. در این حالت ظرفیت باربری اتصال کاهش پیدا می‌کند و حداکثر نیرویی که اتصال T شکل قادر به تحمل آن است، $1064/89 \text{ kN}$ می‌باشد، اما در ادامه وقتی عضو اصلی اتصال T شکل از بتن با مقاومت فشاری 30 MPa پر می‌شود، بتن باعث بهبود مقاومت اتصال می‌شود و در این حالت فشار بالایی که به محل اتصال عضو فرعی و اصلی وارد می‌شود، توسط بتن عضو اصلی تحمل شده و این نکته همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، از تغییر شکل و جمع‌شدگی این ناحیه به خوبی جلوگیری می‌کند، در این حالت عضو فرعی اتصال دچار کماتش شدیدی می‌شود که این موضوع در نهایت به گسیختگی اتصال منجر می‌شود، در این حالت حداکثر نیروی قابل تحمل برای اتصال به $1408/85 \text{ kN}$ افزایش می‌یابد، اما در آخر هنگامی که از بتن با همان مقاومت فشاری 30 MPa در هر دو عضو اصلی و فرعی اتصال استفاده شود، عضو فرعی اتصال که تحت بار محوری می‌باشد، همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، دچار کماتش شده و نمونه در ناحیه‌ی اتصال دو عضو فرعی و اصلی تغییر مکان پیدا می‌کند در این حالت ظرفیت باربری اتصال به خوبی افزایش پیدا می‌کند و همچنین حداکثر نیروی قابل تحمل اتصال T شکل به $1868/32 \text{ kN}$ افزایش می‌یابد.



شکل ۸- رفتار تغییر شکل یافته‌ی اتصال T شکل مدل C150-10

² Ellobody & Young

¹ Coulomb Friction Coefficient

جدول ۱- نمایش مشخصات کامل نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش

	نسبت قطر به ضخامت	ضخامت عضو اصلی	قطر عضو فرعی	نسبت قطر به ضخامت	ضخامت عضو اصلی	قطر عضو اصلی	مقاومت فشاری بتن	سطح مقطع
C ₂ 150-10-30	۱۵	۱۰	۱۵۰	۲۰	۱۰	۲۰۰	۳۰	دایره
C ₂ 150-8-30	۱۸/۷۵	۸	۱۵۰	۲۵	۸	۲۰۰	۳۰	دایره
C ₂ 150-6-30	۲۵	۶	۱۵۰	۳۳/۳۳	۶	۲۰۰	۳۰	دایره
C ₂ 75-10-30	۷/۵	۱۰	۷۵	۱۵	۱۰	۱۵۰	۳۰	دایره
C ₂ 75-8-30	۹/۳۷۵	۸	۷۵	۱۸/۷۵	۸	۱۵۰	۳۰	دایره
C ₂ 75-6-30	۱۲/۵	۶	۷۵	۲۵	۶	۱۵۰	۳۰	دایره
C ₂ 150-10-40	۱۵	۱۰	۱۵۰	۲۰	۱۰	۲۰۰	۴۰	دایره
C ₂ 150-8-40	۱۸/۷۵	۸	۱۵۰	۲۵	۸	۲۰۰	۴۰	دایره
C ₂ 150-6-40	۲۵	۶	۱۵۰	۳۳/۳۳	۶	۲۰۰	۴۰	دایره
C ₂ 75-10-40	۷/۵	۱۰	۷۵	۱۵	۱۰	۱۵۰	۴۰	دایره
C ₂ 75-8-40	۹/۳۷۵	۸	۷۵	۱۸/۷۵	۸	۱۵۰	۴۰	دایره
C ₂ 75-6-40	۱۲/۵	۶	۷۵	۲۵	۶	۱۵۰	۴۰	دایره
S ₂ 150-10-30	۱۵	۱۰	۱۵۰	۲۰	۱۰	۲۰۰	۳۰	مربع
S ₂ 150-8-30	۱۸/۷۵	۸	۱۵۰	۲۵	۸	۲۰۰	۳۰	مربع
S ₂ 150-6-30	۲۵	۶	۱۵۰	۳۳/۳۳	۶	۲۰۰	۳۰	مربع
S ₂ 75-10-30	۷/۵	۱۰	۷۵	۱۵	۱۰	۱۵۰	۳۰	مربع
S ₂ 75-8-30	۹/۳۷۵	۸	۷۵	۱۸/۷۵	۸	۱۵۰	۳۰	مربع
S ₂ 75-6-30	۱۲/۵	۶	۷۵	۲۵	۶	۱۵۰	۳۰	مربع
S ₂ 150-10-40	۱۵	۱۰	۱۵۰	۲۰	۱۰	۲۰۰	۴۰	مربع
S ₂ 150-8-40	۱۸/۷۵	۸	۱۵۰	۲۵	۸	۲۰۰	۴۰	مربع
S ₂ 150-6-40	۲۵	۶	۱۵۰	۳۳/۳۳	۶	۲۰۰	۴۰	مربع
S ₂ 75-10-40	۷/۵	۱۰	۷۵	۱۵	۱۰	۱۵۰	۴۰	مربع
S ₂ T75-8-40	۹/۳۷۵	۸	۷۵	۱۸/۷۵	۸	۱۵۰	۴۰	مربع
S ₂ 75-6-40	۱۲/۵	۶	۷۵	۲۵	۶	۱۵۰	۴۰	مربع

وجود بتن باعث افزایش استحکام نمونه‌ها و مقاومت بیش تر

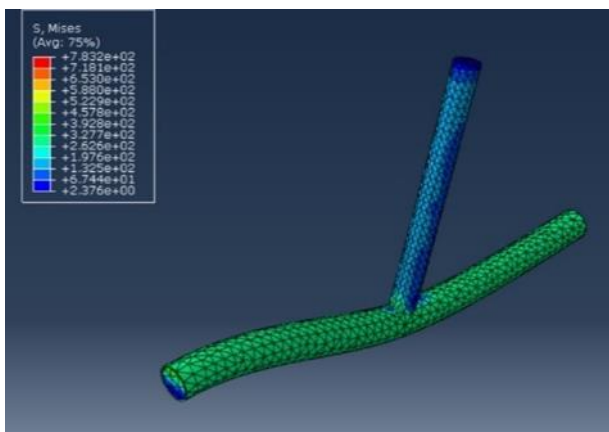
در شکل (۱۱) نمودار نیرو-تغییر مکان مدل‌های C150-10

اتصال T شکل می‌گردد، همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده

، C2150-10، C1150-10. نمایش داده شده است.



شده است، حداکثر تغییر مکان نمونهی T150-10، $76/74$ mm بوده و پس از آن نمونه گسیخته می شود اما در نمونهی C₁T150-10، بتن باعث بهبود استحکام نمونه شده و حداکثر تغییر مکان اتصال به $85/74$ mm افزایش می یابد، نکتهی قابل توجه در نمونهی C₂T150-10 این است که، با وجود این که اتصال نیروی بیشتری را تحمل می کند ولی سازه استحکام بیشتری از خود نشان داده و تا تغییر مکان $94/74$ mm مقاومت خود را حفظ می کند.



شکل ۱۰- رفتار تغییر شکل یافتهی اتصال T شکل مدل

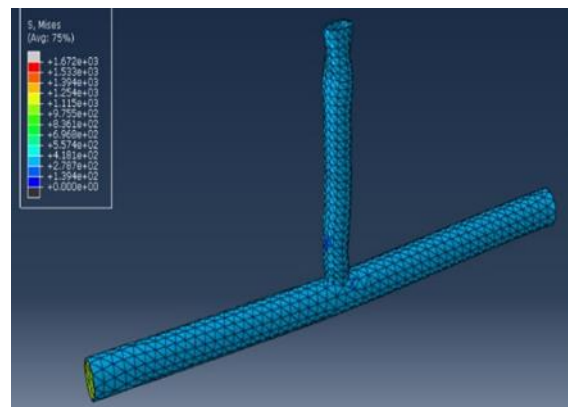
C₂150-10

شکل ۹- رفتار تغییر شکل یافتهی اتصال T شکل مدل C1150

اکنون که تاثیر وجود بتن در اعضای اتصال T شکل، مورد بررسی قرار گرفت، با سطح مقطع دایره ۶ نمونه، با نسبت های مختلف عرض به ضخامت b/t ، به صورتی که در هر دو عضو اصلی و فرعی آن بتن با مقاومت فشاری 30 MPa پر شده باشد، مدل می گردد و تاثیر تغییر پارامترهای هندسی عضوهای اصلی و فرعی در اتصال مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای مشخص شدن تاثیر پارامترهای هندسی، ابتدا قطر دایره را به صورت ثابت، 150 mm انتخاب می کنیم و ضخامت لولهی فولادی را در سه عدد 10 ، 8 و 6 mm متغیر در نظر می گیریم و سه نمونه با این مشخصات مدل می کنیم و در ادامه سه نمونهی دیگر را به صورتی که قطر آن در عدد 75 mm ثابت باشد و ضخامت لولهی فولادی همانند سه مدل قبلی 10 ، 8 و 6 mm در نظر گرفته شده باشد، مدل می کنیم. مدل های C₂150-10-30، C₂150-8-30 و

شکل ۱۰- رفتار تغییر شکل یافتهی اتصال T شکل مدل C₂150-10

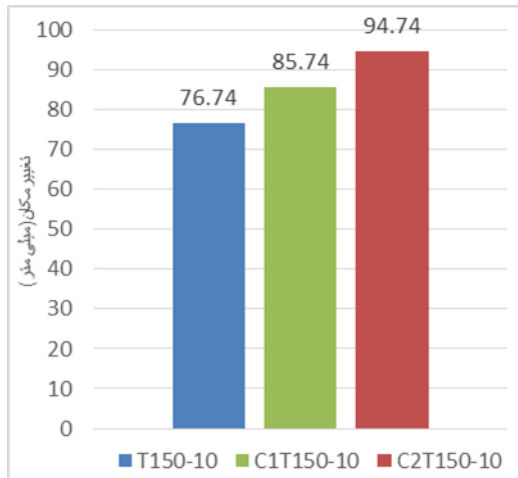
بررسی نمودار شکل های (۱۳) و (۱۴) نشان می دهد که کاهش نسبت b/t تاثیر مثبتی بر اتصال داشته و باعث افزایش مقاومت اتصال T شکل در برابر بار وارده می گردد. کاهش نسبت b/t با کاهش ضخامت فولاد مصرفی ارتباط عکس دارد، چرا که با کاهش ضخامت فولاد، نسبت b/t افزایش یافته و این افزایش تاثیر منفی بر عملکرد اتصال داشته و این کاهش ضخامت فولادی به میزان 2 mm قدرت محصورشدگی بتن توسط فولاد را افزایش می دهد و در مدل C₂150-8-30 و C₂150-10-30 حداکثر بار قابل تحمل $790/25$ به مقدار $1584/63$ kN افزایش می یابد. این مدل پس از رسیدن به حداکثر بار خود، رفتار مناسب تری از خود نشان داده و با شیب ملایم تری نسبت به مدل قبلی به سمت ناپایداری حرکت می کند، ولی با افزایش ضخامت



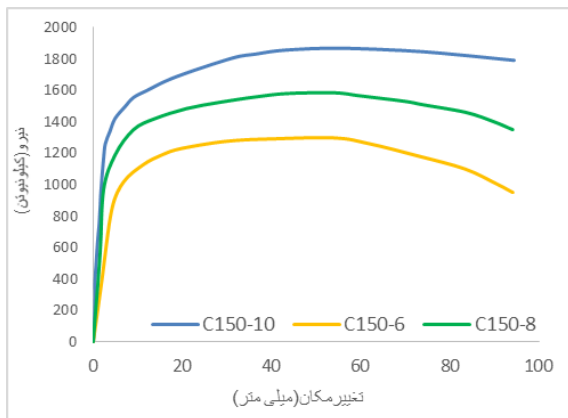
شکل ۹- رفتار تغییر شکل یافتهی اتصال T شکل مدل C1150

سال سی ام - شماره ی سی و هشتم - زمستان ۱۴۰۰

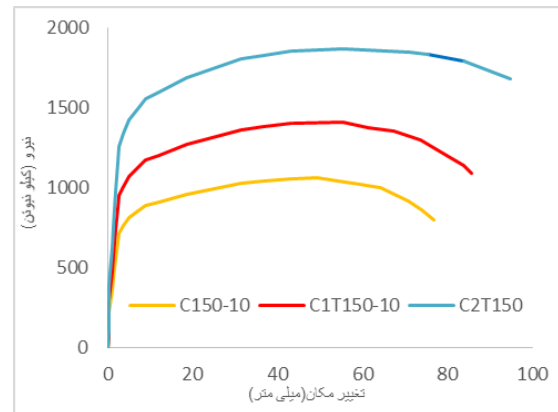
جداره‌ی فولادی به میزان ۴ mm. نسبت b/t به حداقل مقدار خود در نمونه‌ها یعنی عدد ۱۵ برای نمونه‌ها با قطر ۱۵۰ mm و عدد ۷/۵ برای نمونه‌های با قطر ۷۵ mm می‌رسد، در این نمونه به علت افزایش میزان و قدرت محصورشدگی بتن، ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش یافته و حداکثر بار قابل تحمل توسط مدل C2150-10-30 و C275-10-30 به ترتیب به عدد ۱۸۶۸/۲۴ و ۹۰۵/۵۶ kN می‌رسد و نمونه پس از رسیدن به حداکثر نیروی قابل تحمل خود مقاومت خود را تا حدودی حفظ کرده و سپس با شیب بسیار آرامی به سمت ناپایداری حرکت می‌کند. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص است، بررسی ۶ نمونه‌ی فوق با دقت در نمودارهای نیرو-تغییرمکان آنها نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که افزایش قطر از عدد ۷۵ mm به مقدار دو برابر آن یعنی عدد ۱۵۰ mm باعث تقویت اتصال T شکل شده و ظرفیت باربری آن را به میزان قابل توجهی



شکل ۱۲- مقایسه‌ی حداکثر تغییرمکان نمونه‌های T150-10، C1T150-10 و C2T150-10



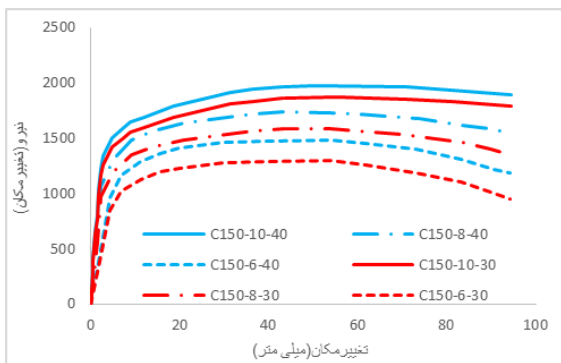
شکل ۱۳- مقایسه‌ی رفتار مدل‌های با قطر ۱۵۰ mm تحت بار محوری



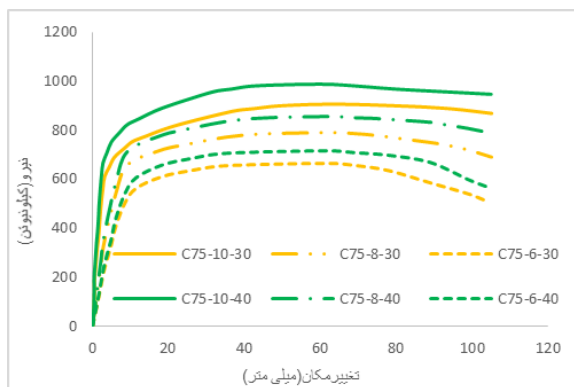
شکل ۱۱- مقایسه‌ی نمودار نیرو-تغییرمکان مدل‌های C150-10، C1T150-10 و C2T150-10 با یک دیگر

تجزیه‌ی نمودار شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که افزایش رده مقاومت فشاری بتن موجود در عضوهای اصلی و فرعی از ۳۰ به ۴۰ MPa، منجر به بهبود افزایش ظرفیت باربری اتصال T شکل شده و حداکثر بار قابل تحمل توسط اتصال را افزایش می‌دهد، به طوری که حداکثر بار قابل تحمل توسط مدل‌های C-150-10-40، C150-8-40 و

افزایش می‌دهد و همچنین در هر یک از قطرهای ۱۵۰ و ۷۵ mm، افزایش ضخامت فولاد علاوه بر بهبود ظرفیت باربری، منجر به مقاومت بیش‌تر و حفظ بهتر استحکام اتصال شده و اثر محصورشدگی بتن را نیز افزایش می‌دهد. تاثیر افزایش ضخامت فولاد در نمونه‌های با قطر ۷۵ mm به طور میانگین ۱۶/۵٪ می‌باشد، اما در نمونه‌های با قطر ۱۵۰ mm این تاثیر بیش‌تر بوده

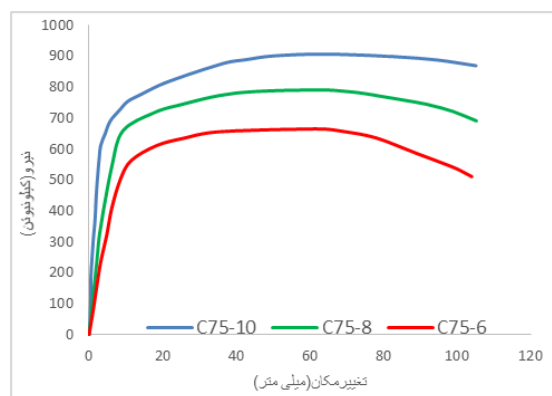


شکل ۱۶- مقایسه‌ی تاثیر بتن با مقاومت ۳۰ MPa و بتن با مقاومت ۴۰ MPa در ظرفیت باربری اتصال



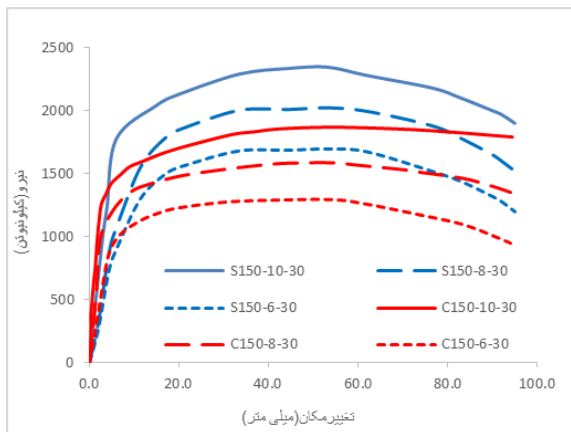
شکل ۱۷- مقایسه‌ی تاثیر بتن با مقاومت ۳۰ MPa و بتن با مقاومت ۴۰ MPa در ظرفیت باربری اتصال

C150-6-40 به ترتیب ۱۹۶۴، ۱۷۳۷ و ۱۴۸۰ kN می‌باشد. این امر نشان دهنده‌ی این است که ظرفیت باربری اتصال نمونه‌ها حدوداً نسبت به مدل‌های مشابه قبلی به ترتیب ۶، ۱۰ و ۱۴ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین حداکثر بار قابل تحمل توسط مدل‌های C75-10-40، C75-8-40 و C75-6-40 به ترتیب ۷۱۷/۳۱، ۸۵۳/۲ و ۹۸۷/۲۳ kN می‌باشد، این امر نشان‌دهنده‌ی این است که ظرفیت باربری نمونه‌ها با بتن ۴۰ MPa حدوداً نسبت به مدل‌های مشابه قبلی که دارای بتن ۳۰ MPa بودند به ترتیب ۱۰، ۸ و ۸ درصد افزایش پیدا کرده است.

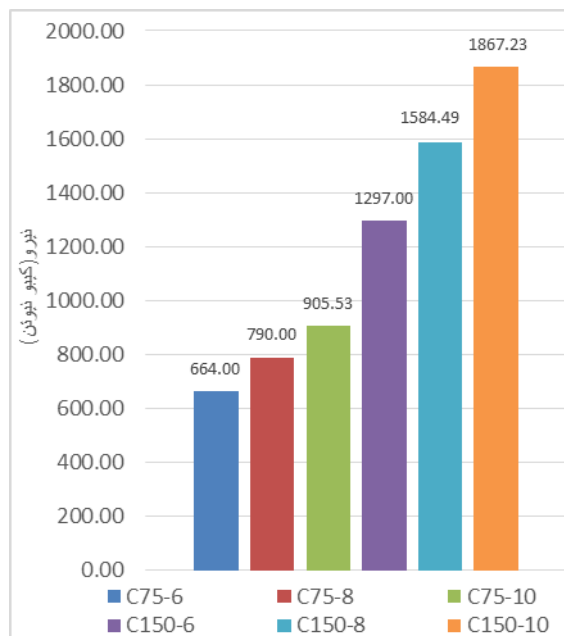


شکل ۱۴- مقایسه‌ی رفتار مدل‌های یا قطر ۷۵ mm تحت بار

محوری



شکل ۱۸- مقایسه‌ی نمودارهای نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها با سطح مقطع دایره و مربع

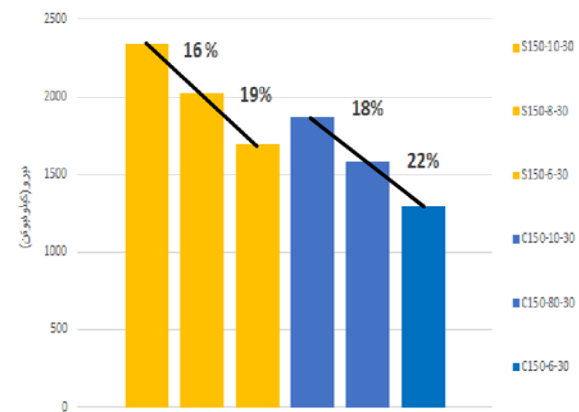


شکل ۱۵- مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ها با بتن ۳۰ MPa با یک دیگر

در مرحله‌ی بعدی برای تعیین میزان تاثیر سطح مقطع در مقاومت و ظرفیت باربری اتصال T شکل، تمام موارد بالا با سطح



مقطع مربع مطابق با مشخصات جدول (۱) نیز تکرار می‌شوند. بررسی نمودارهای شکل (۱۸) نشان می‌دهد که سطح مقطع مربع، تاثیر مثبتی بر اتصال داشته و باعث افزایش مقاومت اتصال T شکل در برابر بار محوری می‌گردد، طوری که حداکثر بار قابل تحمل توسط مدل S150-6-30، 3/1699 kN بوده و این مدل در مقایسه با نمونه‌های با سطح مقطع دایره بهتر عمل کرده و از مدل C150-8-30 ظرفیتی بالاتر دارد، اما با افزایش ضخامت جداری فولادی به میزان ۲ mm در مدل S150-8-30 حداکثر بار قابل تحمل توسط مدل به مقدار ۲۰۲۳ kN افزایش یافته و در مقایسه با نمونه‌های با سطح مقطع دایره، منجر به افزایش مقاومت اتصال شده و از مدل C150-10-30 ظرفیتی باربری بیشتری دارد و در آخر وقتی ضخامت جداری فولادی در سطح مقطع مربع، ۴ mm افزایش می‌یابد ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش یافته و حداکثر بار قابل تحمل توسط مدل S150-10-30 به عد ۲۳۴۶/۳ kN می‌رسد که این مقدار در مقایسه با مدل‌های دایره‌ای بسیار قوی‌تر بوده و مقاومت اتصال T شکل را به صورت چشمگیری افزایش می‌دهد.



شکل ۱۹- مقایسه‌ی افزایش بار وارده بر اتصال در مدل‌های با سطح مقطع مربع و دایره

بررسی نمودارهای نیرو-تغییر مکان مطابق شکل (۱۹) این موضوع را نشان می‌دهد که مدل‌های با سطح مقطع مربع اگرچه سطح مقطع مربع باعث افزایش ظرفیت باربری شده و حداکثر بار

قابل تحمل اتصال را بیش‌تر می‌کند ولی مدل‌های S-150-6-30، S150-8-30 و S150-10-30 بعد از رسیدن به حداکثر بار خود با سرعت و شیب نسبتاً بیش‌تری نسبت به مدل‌های مشابه با سطح مقطع دایره، به سمت ناپایداری حرکت می‌کنند، این موضوع که در مدل‌های S510-8-30 و S150-10-30 مشهودتر بوده و استحکام اتصال T شکل در آن‌ها متزلزل‌تر می‌باشد، به این علت می‌باشد که در سطح مقطع دایره، بتن به شکل بهتر و مناسب‌تری توسط فولاد محصور می‌شود که این موضوع به کنترل پایداری اتصال و حفظ بهتر استحکام اتصال T شکل پس از آن که به حداکثر بار قابل تحمل خود می‌رسد و اتصال می‌خواهد به سمت ناپایداری حرکت کند، کمک شایانی می‌کند. طوری که در نمونه‌های با سطح مقطع دایره، نمودار نیرو-تغییر مکان، پس از رسیدن به اوج خود با شیب کم‌تر و ملایم‌تری کاهش پیدا می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مطالعات عددی بر روی مقاومت و استحکام اتصال T شکل در برابر بار استاتیکی صورت گرفت. در حالت اعمال بار استاتیکی مطالعه‌ی پارامتریک کاملی انجام شد که نتایج آن مطابق ذیل می‌باشد:

- ۱- استفاده از بتن در هر دو عضو اصلی و فرعی اتصال T شکل باعث بهبود استحکام نمونه شده و ۴۳٪ مقاومت اتصال را افزایش می‌دهد.
- ۲- کاهش نسبت b/t تاثیر مثبتی بر اتصال داشته و باعث افزایش مقاومت اتصال T شکل در برابر بار وارده می‌گردد. کاهش نسبت b/t ارتباط عکسی با ضخامت فولاد مصرفی در نمونه‌ها دارد، با کاهش ضخامت فولاد، نسبت b/t افزایش یافته و این افزایش عملکرد اتصال را تضعیف کرده و مقاومت نمونه را کاهش خواهد داد.
- ۳- در سطح مقطع دایره وقتی قطر نمونه ۱۵۰ mm است، کاهش ضخامت فولاد، منجر به کاهش سهم فولاد در تحمل بار وارده شده است، که این امر باعث می‌شود بتن نقش بیش‌تری را کاهش خواهد داد.

۳- در سطح مقطع دایره وقتی قطر نمونه ۱۵۰ mm است، کاهش ضخامت فولاد، منجر به کاهش سهم فولاد در تحمل بار وارده شده است، که این امر باعث می‌شود بتن نقش بیش‌تری را

"Design guide for concrete-filled hollow section columns", Verlag TÜVRheinland, Cologne, Germany, 1995.

[۳] مرادی شقاقی، ط. و ناطق الهی، ف. (۱۳۸۹)، "بررسی آزمایشگاهی ستون‌های مرکب"، نشریه‌ی مهندسی عمران، دوره ۲۱، شماره ۲، ص ۴۱-۵۸.

[4] Mashiri, F.R. and Zhao, X.L. (2010), "Square Hollow Section (SHS) T-joints with Concrete Filled Chords Subjected to in-Plane Fatigue Loading in the Brace", Thin-Walled Structures, Vol. 48, No. 2, pp. 150-158.

[5] Nassiraei, H., Lotfollahi-Yaghin, M.A. and Ahmadi, H. (2016), "Static Strength of Collar Plate Reinforced Tubular T/Y-joints under Brace Compressive Loading", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 119, pp. 39-49.

[۶] نقی پور، م.، مهدی‌زاده، م.، محمدابراهیم زاده سپاسگزار، ص. (۱۳۹۹). "بررسی اثر سخت کننده و بتن پر کننده در رفتار خمشی اتصالات لوله ای مرکب T و Y شکل"، فصلنامه دریا فنون.

[7] Park, H.S., Kwon, B., Shin, Y., Kim, Y., Hong, T. and Choi, S.W. (2013), "Cost and CO2 emission optimization of steel reinforced concrete columns in high-rise buildings," Energies, vol. 6, pp. 5609-5624.

[8] Cheng, B., Xiang, S., Zuo, W. and Nianguan, T. (2018), "Behavior concrete-filled welded integral T-joint in steel truss bridges", Engineering Structures, Vol. 166, pp. 16-30.

[9] ASCCS, "Concrete filled steel tubes_A comparison of international codes and practices", 1997.

[۱۰] سروش‌نیا سهیل، بهشتیان نیما، ۱۳۹۵، کامل ترین مرجع کاربردی ABAQUS (سطح مقدماتی)، انتشارات نگارنده دانش، تهران، چاپ ششم.

[۱۱] ساعدی داریان امیر، بهرامپور حسام‌الدین، عرب زاده حمید، ۱۳۹۰، راهنمای جامع نرم افزار ABAQUS، انتشارات انگیزه، تهران، چاپ اول.

[12] "Abaqus Theory Manual", Version 6.11, 2011.

[13] Ellobody, E., Young, B. and Lam, D. (2006), "Behaviour of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, pp. 706-715.

در حفظ استحکام اتصال ایفا کند. هم‌چنین با کم شدن ضخامت فولاد، قدرت محصورکننده‌ی فولاد بر بتن کاهش یافته و در ادامه‌ی بارگذاری، بتن در اثر افزایش بار وارده دچار گسیختگی خواهد شد.

۴- در سطح مقطع دایره هنگامی که قطر به ۷۵ mm کاهش می‌یابد، اعضای اتصال T شکل که تحت بار محوری قرار دارند، در اثر افزایش بار وارده دچار کمانش کلی شده و در ادامه بارگذاری به سمت ناپایداری حرکت می‌کنند.

۵- تقویت رده مقاومت فشاری بتن تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد اتصال T شکل داشته و منجر به بهبود مقاومت نمونه خواهد شد، به طوری که تقویت بتن و افزایش مقاومت فشاری آن، از ۳۰ تا ۴۰ MPa به طور میانگین ۱۰٪ استحکام و مقاومت اتصال T شکل را افزایش می‌دهد.

۶- در سطح مقطع مربع قدرت محصورکننده‌ی فولاد بر بتن کاهش می‌یابد، لذا در این سطح مقطع نمونه‌ها پس رسیدن به حداکثر مقاومت خود با سرعت بیش‌تر و شیب تندتری در نمودار نیرو-تغییر مکان به سمت ناپایداری حرکت می‌کنند ولی در سطح مقطع دایره، قدرت فولاد در محصور کردن بتن بیش‌تر می‌باشد، که این موضوع باعث بهبود استحکام نمونه در طول مدت بارگذاری می‌شود.

۷- استفاده از سطح مقطع مربع در حالت مشابه یعنی حالتی که طول اضلاع نمونه برابر با قطر دایره باشد، باعث تقویت مقاومت اتصال می‌شود. اثر این نوع سطح مقطع، در نمونه‌هایی با طولی برابر با ۷۵ mm، به طور میانگین برابر با ۱۶/۵٪ است و در طولی برابر با ۱۵۰ mm به طور میانگین ۲۲٪ منجر به بهبود مقاومت و استحکام اتصال T شکل خواهد شد.

۶- مراجع

[1] Brett, C.T., Gourley, C., Jerome, P.H.S. and Hajjar, F. (2001), "A synopsis of studies of the monotonic and cyclic behavior of concrete-filled steel tube beam-columns", Structural Engineering Report, No. ST-01-8.

[2] Bergmann, R., Dutta, D., Matsui, C. and Meisma, C.,

