

بررسی عملکرد لرزه‌ای جوش نفوذی ناقص در وصله ستون‌های مقاطع قوطی شکل

افشین احمدی^۱، فرید حیدریان^۲، سیامک اپیکچی^{۳*}، علیرضا رضائیان^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-زلزله، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

۴- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

*تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، epackachis@aut.ac.ir

چکیده

اتصال مستقیم وصله ستون‌ها با استفاده از جوش نفوذی ناقص با درصد نفوذ بین ۴۰٪ تا ۶۰٪ ضخامت مقطع ستون تا قبل از زلزله نورتریج و کوبه رایج بود. با آشکارشدن ضعف اتصالات جوشی تیر به ستون بعد از زلزله نورتریج و اتصالات جوشی وصله ستون‌ها بعد از زلزله کوبه، جزئیات طراحی و دستورالعمل اجرایی جدید به آیین‌نامه اضافه شد و استفاده از جوش نفوذی ناقص در سازه‌های قاب خمشی ممنوع شد (AISC 341-10) و طراحان ملزم به استفاده از جوش نفوذی کامل بودند. با مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام‌شده بر روی جوش نفوذی ناقص با درصد نفوذ بالاتر در مقاطع I شکل، امکان استفاده از جوش نفوذی ناقص با درصد نفوذ ۸۵٪ در آیین‌نامه تأیید شد (AISC 341-16). تمام مطالعات گذشته بر روی رفتار جوش نفوذی ناقص در مقاطع I شکل صورت گرفته بود؛ در این مطالعه یک مدل عددی سه‌بعدی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس به منظور بررسی رفتار وصله ستون‌ها شبیه‌سازی شده است و شکست و گسترش آسیب در ناحیه متأثر از حرارت با استفاده از روش آسیب نرم مشاهده شده است. با اطمینان از عملکرد مدل اجزای محدود، ۳۳ نمونه ستون قوطی شکل مدل‌سازی شده و تأثیر پارامترهایی همچون درصد جوش نفوذی، ضخامت و ابعاد مقطع ستون بر روی رفتار وصله ستون مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی

ستون قوطی شکل، نرم‌افزار آباکوس، وصله ستون، جوش نفوذی ناقص، جوش نفوذی کامل

Investigating the seismic performance of PJP groove welding in box-shaped column splices

A. Ahmadi, F. Heydariyan, S. Epackachi, A. Rezaiyan

Abstract

The direct connection of column splices using partial joint penetration groove welds with a penetration percentage between 40% - 60% of the thickness of the column section was common until the Northridge and Kobe earthquakes. With the poor performance of beam-to-column welding connections after the Northridge earthquake and column splice welding connections after the Kobe earthquake, new design details and executive instructions were added to the regulations and the use of partial joint penetration (PJP) welding in moment frame structures was prohibited and designers were required to use complete joint penetration (CJP) welding (AISC 341-10). With experimental and numerical studies conducted on PJP welding with a higher penetration percentage in I-shaped sections, the possibility of using PJP welds with a penetration percentage of 85% was confirmed in the regulations (AISC 341-16). All previous studies were conducted on the behavior of PJP groove welds in I-shaped sections. In this study, a 3D finite element numerical model was simulated in Abaqus software in order to investigate the behavior of the column splice and the failure and spread of damage in the Heat Affected Zone (HAZ). By ensuring the proper performance of the finite element model, 33 box-shaped column splices have been modeled, and the effects of parameters such as penetration weld percentage, column thickness and cross-sectional dimensions on the column splice behavior has been evaluated.

Keywords

Box-shaped Column, ABAQUS Software, Column Splice, Partial Joint Penetration (PJP), Complete Joint Penetration (CJP)

۱- مقدمه

در سازه‌های فلزی به منظور اتصال دو مقطع ستون در ارتفاع به یکدیگر از وصله ستون‌ها استفاده می‌شود. وصله ستون‌ها در سازه‌های متوسط و بلندمرتبه به دو دلیل رایج است:

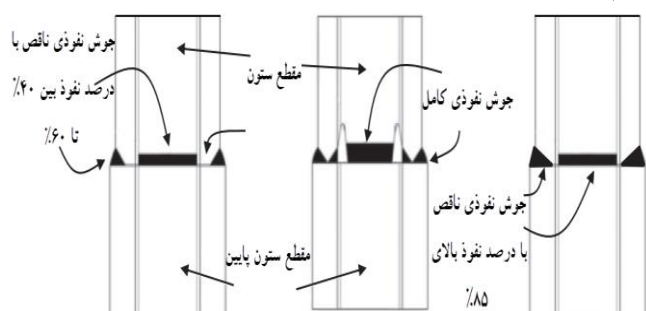
- نیاز به استفاده از مقاطع کوچک‌تر با کاهش تقاضا و افزایش ارتفاع سازه.
- طولانی بودن مقاطع و حمل و نقل دشوار آن‌ها و در نتیجه تقسیم کردن آن‌ها به طول‌های کوچک‌تر.

بعد از زلزله نورتریج^۱ (سال ۱۹۹۴، کالیفرنیا)، اتصالات جوشی تیر به ستون به دلیل ضعف جزئیات اجرایی، ضعف مصالح موجود از جمله جوش و همچنین ایجاد نیروها و رفتاری متفاوت در اتصالات که تا قبل از آن پیش‌بینی نشده بود، مستعد شکست و خرابی بود [۱]. ضعف این گونه اتصالات از جمله اتصالات جوشی مستقیم ستون‌ها با استفاده از جوش نفوذی ناقص با نفوذ ۴۰٪ تا ۶۰٪ بعد از زلزله کوبه^۲ نیز تکرار شد. بدین دلیل مطالعات عددی و آزمایشگاهی بیش‌تر [۲ و ۳] بر روی رفتار اتصالات جوشی صورت پذیرفت و ضوابط جدید به آیین‌نامه اضافه شد و استفاده از جوش نفوذی ناقص ممنوع شد (AISC 341-10) [۴] و طراحان ملزم به استفاده از جوش نفوذی کامل شدند. امکان استفاده از جوش نفوذی ناقص به دلیل مشکلات استفاده از جوش نفوذی کامل همانند سختی و هزینه‌های زیاد اجرایی، نیاز به استفاده از ورق پستی به منظور اطمینان از نفوذ کامل جوش، ایجاد سوراخ دسترسی و افزایش احتمال ایجاد ضعف در صورت برداشته نشدن ورق پستی، استفاده از مصالح جوش بیش‌تر و در نتیجه آن، نیاز به تمیزکاری بین هر پاس جوش، همچنین حرارت بیش‌تر ایجاد شده ناشی از فرآیند جوشکاری که منجر به ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)^۳ بحرانی‌تر و افزایش احتمال شکست خواهد شد، بار دیگر مورد مطالعه قرار گرفت. در نتیجه، امکان استفاده از جوش نفوذی ناقص این بار با درصد نفوذ بیش‌تر و مصالح با مقاومت بالاتر و با انجام آزمایشات دقیق در آیین‌نامه مؤسسه سازه‌های فولادی آمریکا، تأیید شده است (AISC 341-16) [۵].

۲- مطالعات پیشین

مطالعات جوش نفوذی ناقص در وصله ستون‌ها را می‌توان به سه بازه زمانی قبل و بعد از زلزله نورتریج و مدت‌ها بعد از زلزله نورتریج تقسیم‌بندی کرد. قبل از زلزله نورتریج اتصال مستقیم

ستون‌ها با استفاده از جوش نفوذی ناقص با درصد نفوذ بین ۴۰٪ تا ۶۰٪ رایج بود (شکل (۱)). اولین مطالعات آزمایشگاهی قبل از زلزله نورتریج توسط پوپوف^۴ و استفان^۵ [۶] و برونو^۶ و مهین [۷] انجام شد.



شکل ۱- استفاده از جوش نفوذی کامل و ناقص در محل وصله ستون‌ها از گذشته تا امروز

پوپوف و استفان ۷ ستون با مقطع یکسان ($W14 \times 320$) دارای جوش نفوذی کامل و ناقص با درصد نفوذهای متفاوت را مورد آزمایش قرار دادند. در این مطالعه طول نمونه ستون ۲ متر در نظر گرفته شده بود که دو مقطع یکسان در وسط نمونه ستون به یکدیگر جوش شده‌اند. دو انتهای مقطع ستون‌ها تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای قرار گرفته است. مطابق نتایج آزمایشگاهی پوپوف و استفان، بارگذاری چرخه‌ای تأثیر کمی بر روی مقاومت نهایی وصله ستون‌ها داشت اما نمونه‌های با جوش نفوذی ناقص شکل‌پذیری کمی داشتند [۶].

برونو و مهین [۷] دو نمونه ستون با مقاطع متفاوت یکی با استفاده از جوش نفوذی کامل (مقطع $W14 \times 370$ متصل به مقطع $W14 \times 426$) و دیگری جوش نفوذی ناقص با درصد نفوذ ۵۰٪ (مقطع $W14 \times 665$ متصل به مقطع $W14 \times 500$) را تحت یک بارگذاری چهارمحوره بدون در نظر گرفتن اثرات برش مورد آزمایش قرار دادند. نمونه با جوش نفوذی کامل، رفتار شکل‌پذیر داشت ولی نمونه با جوش نفوذی ناقص قبل از این که مقطع کوچک‌تر به ظرفیت خمشی خود برسد، شکست. مطابق با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده و عملکرد ضعیف وصله ستون‌ها با جوش نفوذی ناقص بعد از زلزله نورتریج، استفاده از این نوع وصله ستون‌ها، در آیین‌نامه ممنوع شد [۳].

ناتایاساکل^۷ [۸] نمونه‌های آزمایشگاهی برونو و مهین را با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس^۸ بررسی و

^۴ Popov

^۵ Stephen

^۶ Bruneau

^۷ Nuttayasakul

^۸ ABAQUS Software

^۱ Northridge

^۲ Kobe

^۳ Heat Affected Zone

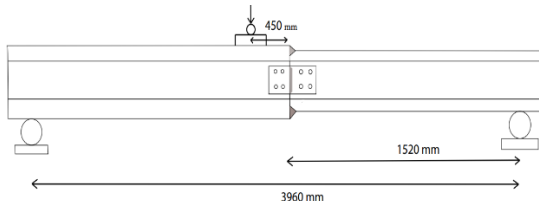


مشاهده کرد در صورت افزایش میزان درصد نفوذ جوش، نمونه با جوش نفوذی ناقص عملکرد بهتری داشت.

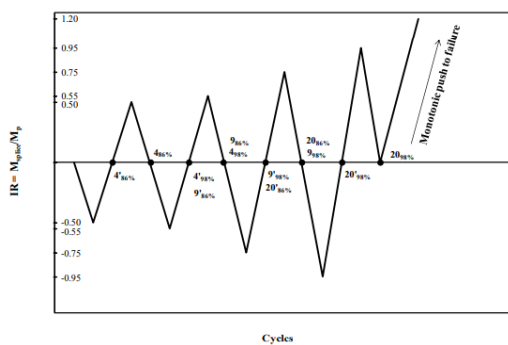
شن^۱ و سابول^۲ [۹] سازه‌های معرفی شده توسط ساختمان‌های گروه SAC (گوپتا^۳ و کراوینکلر^۴) [۳] که شامل سازه‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب برای بررسی رفتار سازه‌های کوتاه مرتبه، متوسط و بلند مرتبه بود را به منظور تعیین میزان تقاضا در وصله ستون‌ها شامل تعیین میزان دوران پلاستیک، نیروی محوری، لنگر خمشی و اندرکنش نیروی محوری-لنگر خمشی (IR)^۵ که در مطالعات رفتار ستون اهمیت دارد انتخاب کردند. این سازه‌ها را در نرم‌افزار اپنسیس^۶ مدل کرده‌اند با این تفاوت که به جای مدل‌سازی سازه ۳ طبقه یک سازه ۴ طبقه مدل‌سازی کرده‌اند تا بتوانند وصله ستون را در طبقه سوم در نظر بگیرند. شن و سابول در نهایت به این نتیجه رسیده‌اند که میزان لنگر خمشی در هنگامی که دوران پلاستیک وصله ستون کمتر از ۰/۰۴ رادیان باشد، بین ۶۰٪ تا ۸۰٪ ظرفیت خمشی پلاستیک مقطع کوچک‌تر است و زمانی که دوران پلاستیک وصله ستون بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۷ رادیان باشد، لنگر خمشی در محل وصله ستون بین ۸۰٪ تا ۹۰٪ ظرفیت خمشی پلاستیک مقطع کوچک‌تر است. لنگر خمشی زیاد ایجاد شده در وصله ستون ناشی از انحنای یکسان ایجاد شده در ستون‌ها است که در مودهای بالاتر در سازه ایجاد شده است. این انحنای یکسان در سازه ۴ و ۹ طبقه کمتر اتفاق افتاده است ولی در سازه ۲۰ طبقه، میزان تاثیر آن بیشتر است و باعث ایجاد لنگر خمشی زیاد در محل وصله ستون‌ها می‌شود.

مطالعات دقیق‌تر در این زمینه توسط شاول^۷ و کانوینده^۸ [۱۰] انجام شد که شامل مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی چهار نمونه از مقاطع ستون‌ها بود. مطابق جدول (۱) پنج نمونه ستون قوطی شکل دارای مقاطع مختلف به صورت مستقیم به یکدیگر جوش شده‌اند که دو نمونه ستون با هدف به دست آمدن میزان خطای آزمایشگاهی دو بار آزمایش شده است (نمونه ستون 24A&B). آن‌ها با هدف ایجاد یک پروتکل بارگذاری برای تعیین رفتار جوش در مطالعات آزمایشگاهی، بار دیگر سازه‌های ۴، ۹ و ۲۰ طبقه را تحت بار لرزه‌ای تحلیل کرده و میزان اندرکنش نیروی محوری-لنگر خمشی در محل وصله ستون‌ها را به دست آوردند.

مدل آزمایشگاهی و منحنی بارگذاری این آزمایش‌ها در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. علاوه بر این موارد، برای اطمینان از عملکرد وصله‌های ستون، نمونه‌های آزمایشگاهی به وسیله نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس در یک مدل‌سازی دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل‌سازی تنها بال‌های مقاطع I شکل، تحت نیروی کششی، آنالیز شده و برای تعیین رفتار شکست از روش انتگرال-جی استفاده شده است. با انجام این آزمایش‌ها و مطالعات عددی، امکان استفاده از جوش نفوذی ناقص در وصله ستون‌ها با درصد نفوذ بالای ۸۰٪ تأیید (شکل (۱)) و در آیین‌نامه مؤسسه سازه‌های فولادی آمریکا، نکات و دستورالعمل‌های طراحی آن وارد شد [۵].



شکل ۲- مدل آزمایشگاهی شاول و کانوینده [۱۰]



شکل ۳- پروتکل بارگذاری مطالعات آزمایشگاهی شاول و کانوینده [۱۰]

۳- صحت‌سنجی مدل عددی

یک مدل سه‌بعدی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس به منظور بررسی عملکرد جوش نفوذی در وصله ستون‌ها شبیه‌سازی شده است. دو مقطع ستون به یکدیگر جوش شده‌اند و در یک بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای، بار چرخه‌ای به نمونه اعمال شده

¹ Shen

² Sabul

³ Gupta

⁴ Krawinkler

⁵ Ratio force-moment Interaction

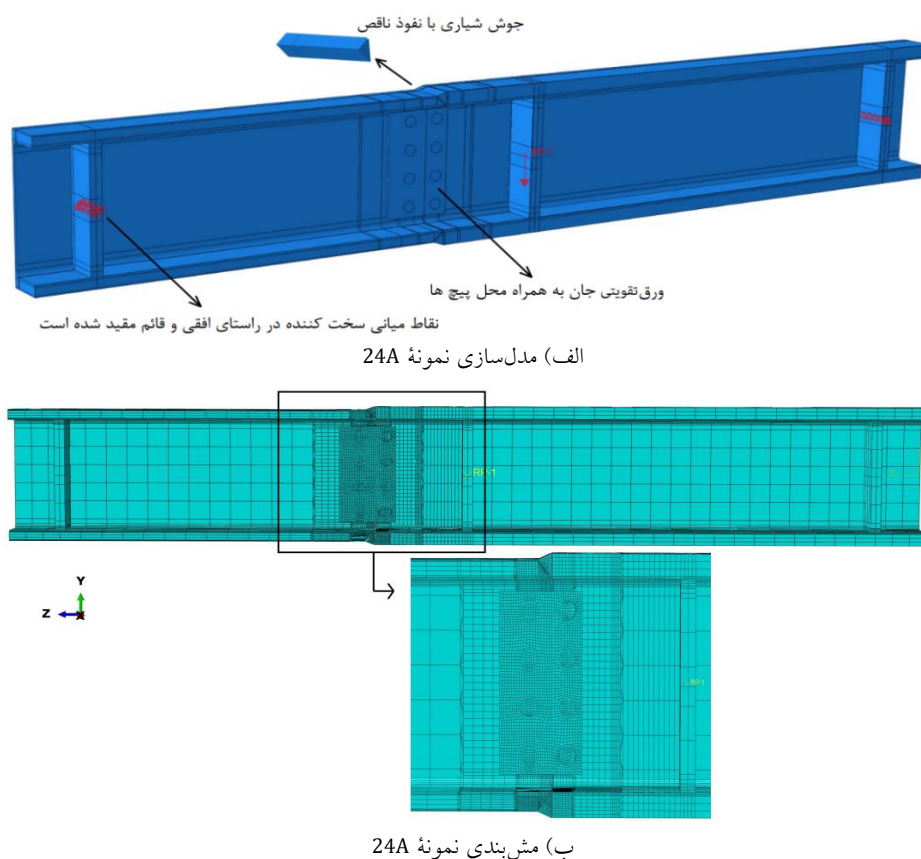
⁶ Opensees

⁷ Shaw

⁸ Kanvinde

است و بارگذاری یکنواخت نمونه ستون تا زمان شکست ستون، در شکل (۴)، نمای کلی نمونه مدل شده در نرم افزار آباکوس نشان داده شده است. برای مدل سازی نمونه ها از المان های ۸ نقطه ای جامد انتگرال کاهش یافته (C3D8R) استفاده شده است.

۳-۱- فرضیات مدل سازی



شکل ۴- مدل سازی و مش بندی نمونه 24A در نرم افزار آباکوس

جدول ۱- مقاطع نمونه های آزمایشگاهی شاو و کانونده و مقایسه نتایج مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل عددی

مقاطع ستون		مطالعات تجربی شاو و کانونده		نتایج مدل سازی عددی	
آزمایش	مقطع ستون بزرگتر مقطع ستون کوچکتر	$\frac{M_{SP}}{M_{p,s}}$ ۱	δ^2 (mm)	$\frac{M_{SP}}{M_{p,s}}$	δ (mm)
24A	W 24X370 W 24X279	1.29	50	1.33	55
14A	W 14X730 W 14X550	1.37	-	1.41	-
14B	W 14X455 W 14X342	1.24	79.5	1.32	75
14C	W 14X145 W 14X132	1.04	43	1.15	45

^۱نسبت لنگر خمشی در محل وصله ستون به میزان لنگر خمشی پلاستیک مقطع کوچکتر
^۲جابه جایی وصله ستون

همین نوع المان ها در ناحیه نزدیک به وصله ستون در فاصله ای به اندازه ضخامت بال مقطع ستون کوچکتر، دارای المان مکعبی با ابعاد ۴ میلی متر است و با دور شدن از وصله ستون

تمامی اجزای تشکیل دهنده ستون شامل جوش های نفوذی ناقص، مقاطع ستون، سخت کننده ها و ناحیه متأثر از حرارت دارای

در این ناحیه و افزایش سرعت آنالیز تا دو انتهای نمونه، ساینز المان‌ها به ۴۰ میلی‌متر افزایش پیدا کرده است.

مطابق مطالعات گذشته، ناحیه متأثر از حرارت به فاصله ۳ تا ۶ میلی‌متر اطراف ناحیه جوشکاری شده را دربرمی‌گیرد [۱۱]. در این مطالعه ۶ میلی‌متر اطراف جوش نفوذی، پارتیشن‌بندی شده و مصالح ناحیه متأثر از حرارت به این بخش اختصاص یافته است. این ناحیه دارای المان مکعبی با ابعاد ۴ میلی‌متر است. به‌منظور افزایش سرعت آنالیز نمونه‌ها و همچنین تقارن مقاطع I شکل، نمونه‌های مدل‌سازی شده از میانه جان نصف شده و تمامی نقاط آن در راستای خارج از صفحه مقید شده است.

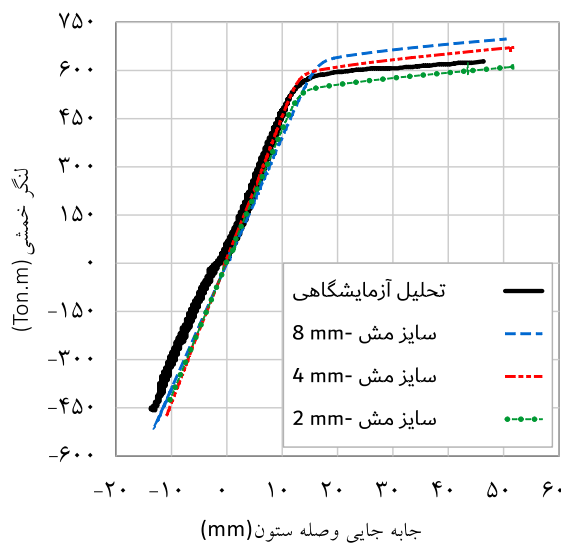
۳-۲- صحت‌سنجی ساینز المان‌ها

انتخاب بعد مناسب المان‌ها تأثیر به‌سزایی در دقت نتایج تحلیل خواهد داشت. برای نواحی اطراف اتصال با تمرکز تنش از مش کوچک‌تر و برای سایر نواحی از مش درشت‌تر استفاده می‌شود. به‌طور کلی هرچه بعد المان کم‌تر باشد، نتایج از دقت بیش‌تری برخوردار خواهند بود؛ اما از طرفی با توجه به زیاده‌شدن زمان محاسبات، لازم است یک بعد بهینه برای المان انتخاب شود. در این تحقیق ابعاد مش بر اساس آنالیز حساسیت مش و سرعت آنالیز، در ناحیه جوش نفوذی ناقص به‌ترتیب از نزدیکی محل وصله ستون در فاصله‌ای به اندازه ضخامت بال ستون بزرگ‌تر ۴ میلی‌متر و بعد از آن به فاصله دو برابر ضخامت ستون بزرگ‌تر، ۸ میلی‌متر و در ناحیه دورتر از وصله تا انتهای نمونه، ۴۰ میلی‌متر خواهد بود. ابعاد مش ناحیه متأثر از حرارت ۴ میلی‌متر در ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سه ساینز مختلف مش به‌منظور آنالیز حساسیت مش‌ها انتخاب شده است. مش با ساینزهای ۲، ۴ و ۸ میلی‌متر در ناحیه وصله ستون (به فاصله‌ای به اندازه ضخامت بال ستون) و ۴، ۸ و ۱۶ میلی‌متر در فاصله دو برابر ضخامت ستون بزرگ‌تر و در ناحیه دورتر از وصله به‌ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مطابق نتایج آنالیز، نمونه با ساینز مش ۲ میلی‌متر زودتر و نمونه با ساینز مش ۸ میلی‌متر دیرتر وارد رفتار غیرخطی شده‌اند. در نتیجه ترتیب ساینز مش ۴ میلی‌متر به‌منظور بررسی رفتار مقاطع انتخاب شده است.

۳-۳- بارگذاری و شرایط مرزی

در محل بارگذاری نمونه و دو انتهای نمونه سخت‌کننده‌هایی به اطراف مقطع ستون متصل شده‌اند؛ نقاط میانی دو سخت‌کننده انتهایی یکی در راستای قائم و دیگری در راستای افقی و قائم مقید شده است. نقاط میانی سخت‌کننده میانی در محل اعمال بار

به یک نقطه کوپل شده است و جابه‌جایی به این نقطه اعمال می‌شود. علاوه بر این موارد، هر دو سمت جوش نفوذی بال، به مقطع ستون متصل شده است و جان دو مقطع ستون نیز در ناحیه در نظر گرفته شده در مطالعات آزمایشگاهی **شاو** به یکدیگر متصل شده است. یک طرف مقطع ستون در محل وصله به اندازه درصد نفوذ جوش نفوذی ناقص که در واقع درصد ضخامت بال مقطع ستون کوچک‌تر است، کوپل شده و مقدار باقی‌مانده (ناحیه جوش‌نشده) بدون کوپل است و جوش نفوذی ناقص به ناحیه کوپل‌شده و طرف دیگر مقطع ستون، متصل می‌شود (شکل ۴-الف).



شکل ۵- صحت‌سنجی ساینز المان‌ها و بررسی تأثیر ساینز المان بر روی منحنی لنگر خمشی-جابه‌جایی نمونه 24A

۳-۴- معرفی مصالح فولاد و جوش و ناحیه متأثر از حرارت

به‌منظور معرفی رفتار مصالح خصوصیات الاستیک شامل تنش تسلیم، مدول الاستیسیته 21×10^4 مگاپاسکال و ضریب پواسن 0.25 در نظر گرفته شده است. برای تعریف مقاومت و کرنش نهایی از مقادیر تنش و کرنش واقعی (روابط (۱) و (۲)) به‌جای مهندسی و برای معرفی رفتار ناحیه بعد از آن تا نقطه شکست نمونه از روابط معرفی شده در مطالعات **آراساراتنام**^۱ و **سیواکوماران**^۲ [۱۲] (رابطه (۳)) استفاده شده است.

$$\epsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \epsilon_{\text{eng}}) \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma(1 + \epsilon_{\text{eng}}) \quad (2)$$

¹ Arasaratnam

² Sivakumaran

در روابط فوق، کرنش اصلاح شده و (σ_{true}) تنش اصلاح شده می باشد.

$$F_t = F_{ut} \left[w * \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{ut}} \right)^n + (1 - w) * (1 + \epsilon_t - \epsilon_{ut}) \right] \quad (3)$$

(F_{ut}) میزان نیرو یا تنش اصلاح شده در نقطه شروع نرم شدگی، (ϵ_{ut}) کرنش اصلاح شده در نقطه شروع نرم شدگی، (ϵ_t) میزان کرنش ها بعد از شروع نرم شدگی و (w) ثابت وزنی هر مصالح که با استفاده از روش سعی و خطا به دست خواهد آمد.

مصالح مصرفی در این تحلیل همانند مصالح استفاده شده در مطالعات آزمایشگاهی شاو و کانوننده [۱۰]، شامل فولاد A992 برای مقاطع ستون و سخت کننده ها، مصالح جوش E70T-6 برای قطعات منشوری جوش نفوذی ناقص (جدول (۲)) و به منظور معرفی رفتار ناحیه متأثر از حرارت مطابق مطالعات آزمایشگاهی میرزا [۱۱]، سخت شوندگی ترکیبی (جدول (۳)) تعریف شده است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح فولاد و جوش مصرفی در

مطالعات عددی

مشخصات مکانیکی	مصالح	
	A992	E70T-6
F_y (MPa)	390	526
F_u (MPa)	495.56	638.86
ϵ_u	0.16	0.12
F_u (MPa)	576	704
ϵ_u	0.15	0.113
n^1	0.186	0.127
K^2	822.8	930.6
ϵ_f^3	0.32	0.24
W^4	0.6	

^۱ پارامترهای ثابت رابطه توزیع توانی

^۳ کرنش شکست مصالح

^۴ پارامتر ثابت وزنی در رابطه (۳)

جدول ۳- پارامترهای سخت شوندگی کرنشی ایزوتروپیک و

کینماتیک ترکیبی مصالح ناحیه متأثر از حرارت

پارامتر	مصالح
	HAZ
C (MPa)	2140
γ	11.5
Q_{∞} (MPa)	103
b	5
Q_0 (MPa)	460

۳-۵- روش بررسی شکست

۳-۵-۱- معرفی روش بررسی شکست

بریجمن^۲ [۱۳] با آزمایش نمونه های تحت کشش با باریک شدگی های متفاوت، مشاهده کرد که شکل پذیری مصالح تحت تأثیر فشار هیدرواستاتیک است و با افزایش آن، شکل پذیری افزایش می یابد. وی نمونه های آزمایش دارای باریک شدگی های مختلف را تحت فشارهای هیدرواستاتیک متفاوت تا مرز شکست ادامه داد و مشاهده کرد باریک شدگی با ابعاد مختلف در یک فشار هیدرواستاتیک و تحت کرنش مشخص می شکند و رابطه بین تنش سه محوره و کرنش شکست با نسبت a/R (شکل (۶)) که (a) شعاع ناحیه باریک شده و (R) شعاع دایره محیطی است، نمونه های کششی خطی است و با آزمایش نمونه های مختلف توانست، روابط زیر را معرفی کند.

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_e} = \frac{1}{3} + \ln \left(\frac{a}{2R} + 1 \right) \quad (4)$$

$$\bar{\epsilon}_F = 2 \ln \left(\frac{a_0}{a} \right) \quad (5)$$

در این روابط (σ_H) و (σ_e) روابط (۶) و (۷) به ترتیب برابر با میزان تنش هیدرواستاتیک و تنش فون میزس^۳ معادل است که نسبت این دو تنش بیانگر میزان تنش سه محوره (η) است.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 + \sigma_3)^2)} \quad (6)$$

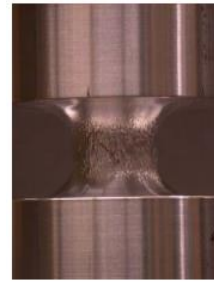
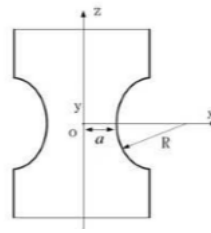
$$\sigma_H = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (7)$$

^۲ Bridgman
^۳ Von Mises

^۱ Myers



مقادیر (σ_1) ، (σ_2) و (σ_3) میزان تنش‌های اصلی در نمونه و $(\bar{\epsilon}_f)$ کرنش شکست معادل است.



شکل ۶- نمونه‌های استاندارد تست کشش در آزمایش‌های شکست

با مطالعات پیش‌تر در این زمینه، رایس^۱ و تریسی^۲ [۱۴]، کلیتوک^۳ [۱۵]، هنکوک^۴ و مکنزی^۵ [۱۶] روابطی بین تنش سه‌محوره و کرنش شکست معادل ارائه دادند. هنکوک و مکنزی با بررسی رفتار نمونه‌های استوانه‌ای دارای باریک‌شدگی با سایزهای مختلف، مشاهده کردند که با افزایش تنش سه‌محوره، کرنش شکست معادل کاهش پیدا می‌کند و بالعکس و رابطه (۸) را بین تنش سه‌محوره و کرنش شکست معادل ارائه دادند.

$$\epsilon_p^{critical} = \alpha \exp \left(-1.5 \frac{\sigma_H}{\sigma_e} \right) \quad (8)$$

در این رابطه، (α) ثابت مصالح است که از طریق آزمایش به‌دست می‌آید. هوپوترا^۶ و همکاران [۱۷] بر پایه مدل ریاضی کلموگرو^۷ [۱۸] رابطه‌ای برای پیش‌بینی شکست ارائه دادند. در این رابطه کرنش پلاستیک معادل تابعی از تنش سه‌محوره و نرخ تغییرات کرنش پلاستیک است و نقطه شروع شکست زمانی خواهد بود که پارامتر (ω_D) به یک برسد (رابطه (۹)).

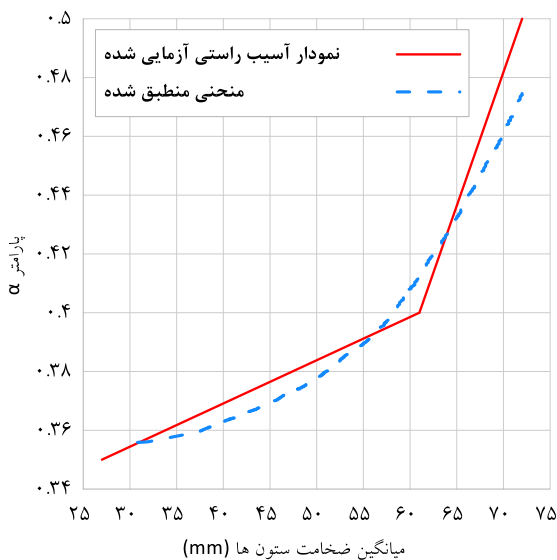
$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})} = 1 \quad (9)$$

متغیر آسیب (ω_D) به‌صورت یکنواخت با تغییر شکل پلاستیک، افزایش یافته و در هر مرحله از حل، تغییرات مثبت آن با استفاده از رابطه (۱۰)، محاسبه می‌گردد.

$$\omega_D = \int \frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})} \geq 0 \quad (10)$$

۳-۵-۲- معرفی منحنی شکست

در این مطالعه از ترکیب دو روش تنش-کرنش بحرانی اصلاح‌شده (SMCS) و آسیب نرم به‌منظور مدل‌سازی شکست استفاده شده است. در بخش تعریف آسیب نرم در نرم‌افزار آباکوس، منحنی تغییرات کرنش پلاستیک معادل نسبت به تغییرات تنش سه‌محوره بر اساس رابطه (۸) معرفی شده است. پارامتر (α) مطابق شکل (۷) بر اساس میانگین ضخامت ستون‌ها کالیبره شده است. منحنی تغییرات تنش سه‌محوره نسبت به کرنش پلاستیک معادل به روش سعی و خطا به‌گونه‌ای تعریف شده است که میزان کرنش پلاستیک معادل در المان بحرانی (شکل (۸)) در نمونه‌های مدل‌سازی شده در هنگام شکست به میزان ۰/۱۲۵ برسد؛ این میزان کرنشی است که المان بحرانی در تمامی نمونه‌های مدل‌سازی شده در همان جابه‌جایی متناسب با نمونه‌های آزمایشگاهی شاور و کانوینده، به آن می‌رسد. مطابق شکل (۷)، هر نمونه مدل‌سازی شده با ضخامت متفاوت دارای یک ضریب α متفاوت می‌باشد. با استفاده از این نمودار کالیبره‌شده می‌توان بر هر نمونه ستون با ضخامت متغیر بین ۲۵ تا ۷۰ میلی‌متر، منحنی آسیب تعریف نمود.



شکل ۷- منحنی تغییرات پارامتر α نسبت به تغییرات ضخامت مقطع ستون

¹ Rice

² Tracey

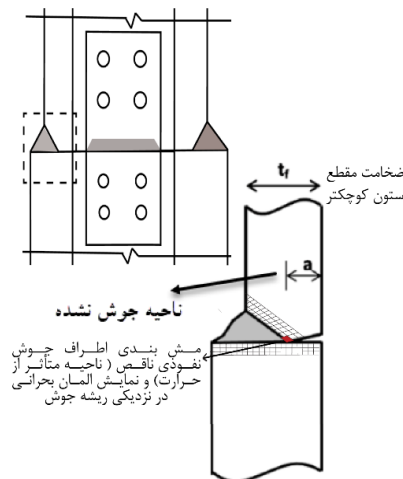
³ Clintock

⁴ Hancock

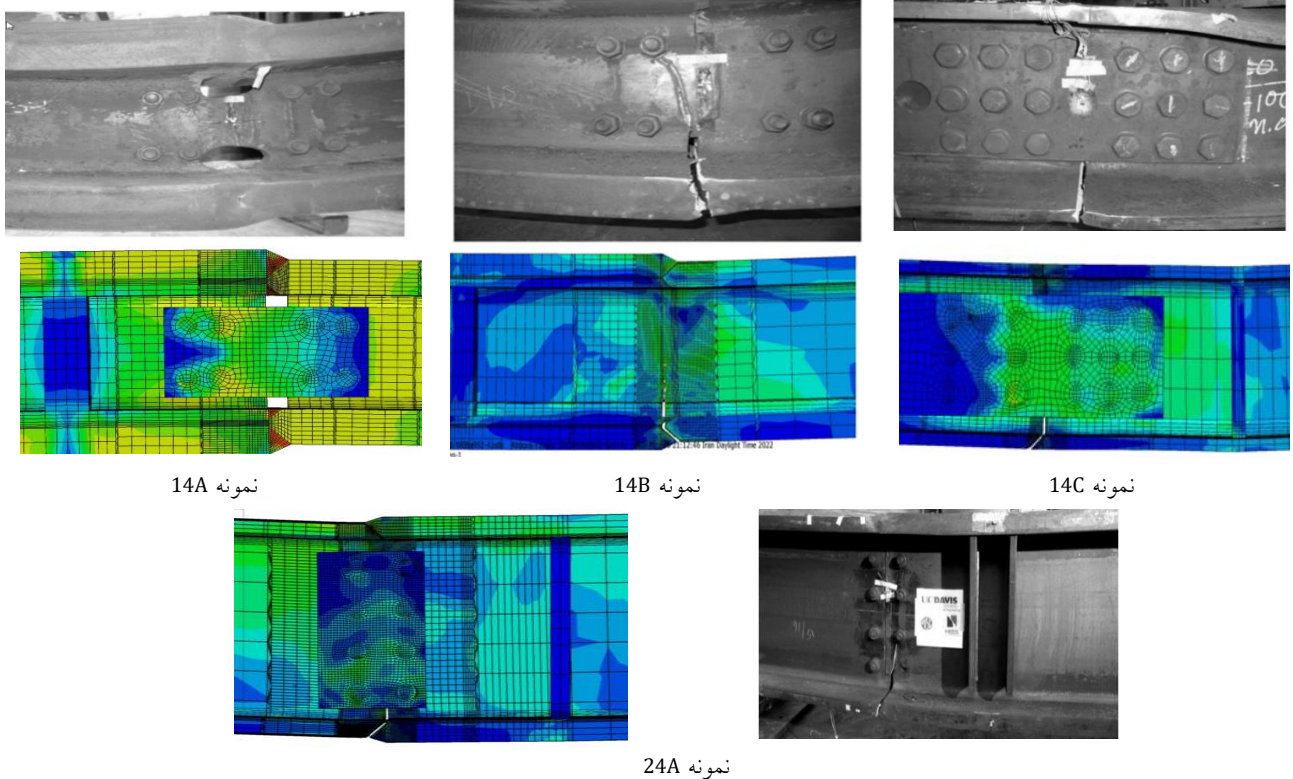
⁵ Mackenzie

⁶ Hooputra

⁷ Kolmogorov



شکل ۸- المان بحرانی در ناحیه متأثر از حرارت در نزدیکی ریشه جوش و ناحیه جوش نشده



شکل ۹- مقایسه شکل و گسترش آسیب در نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی

۳-۶- نتایج مطالعات عددی

نتایج حاصل از مدل‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی **شاو** و **کانوینده** در دو بخش مقایسه شکل و گسترش آسیب از ناحیه متأثر از حرارت و مقایسه نمودارهای میزان لنگر خمشی-جابه‌جایی در محل وصله ستون آورده شده است.

۳-۶-۱- مقایسه شکل و گسترش آسیب

در نمونه 14A مطابق نتایج آزمایشگاهی **شاو** و **کانوینده**، با اتمام ظرفیت بارگذاری جک آزمایشگاه، شکستی مشاهده نشده است

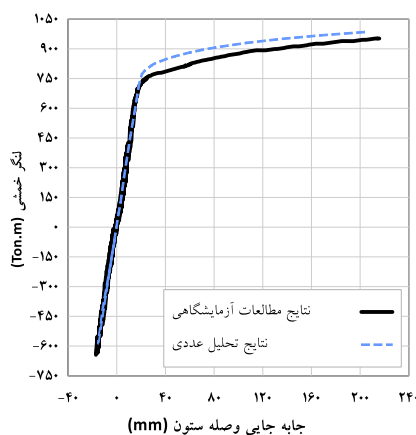
(شکل ۹)). تغییر شکل نمونه مدل‌سازی شده، مطابقت خوبی با نمونه آزمایشگاهی دارد. شکست دو نمونه 14B و 24A و گسترش آسیب در این دو نمونه مطابق نمونه‌های آزمایشگاهی **شاو** و **کانوینده** است. شکست از ناحیه جوش نفوذی ناقص در نزدیکی ریشه جوش آغاز شده واقع بر روی بال تحت کشش مقطع ستون، شروع شده و در جان نمونه گسترش پیدا کرده است. در نهایت نمونه 14C نیز به دلیل عدم وجود جوش نفوذی در جان، با شروع آسیب از بال، از ناحیه جان کاملاً جدا شده است (شکل ۹)).

۳-۶-۲- مقایسه منحنی لنگر خمشی-جابه‌جایی محل وصله ستون مطابق شکل (۱۰) و نتایج جدول (۱)، منحنی لنگر خمشی-جابه‌جایی تمامی نمونه‌ها تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی شاور و کانوینده دارد. با توجه به موقعیت بارگذاری نمونه در میانه مقطع ستون و معین بودن شرایط بارگذاری، میزان نیروی به‌دست‌آمده در حلقه‌های بارگذاری و بارگذاری یکنواخت نهایی، نصف و در فاصله محل وصله ستون تا تکیه‌گاه ضرب شده و میزان لنگر خمشی در محل وصله ستون به‌دست آمده است. در تمامی نمونه‌های تحلیل‌شده، سختی اولیه، رفتار ناحیه الاستیک و شروع رفتار پلاستیک همانند نتایج آزمایشگاهی است. میزان لنگر خمشی حداکثر و جابه‌جایی در محل وصله ستون در جدول (۱) اشاره شده است.

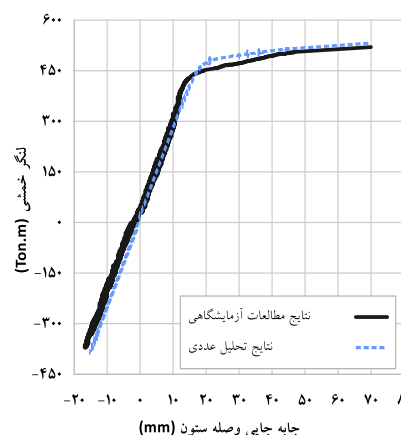
۴- مطالعات پارامتریک

با اطمینان از عملکرد مدل سه‌بعدی اجزای محدود، روش بررسی شکست و شبیه‌سازی رفتار وصله ستون‌ها، ۳۳ نمونه ستون قوطی‌شکل مطابق جدول (۴)، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و رفتار پارامترهایی همانند ضخامت و بعد مقطع ستون و درصد نفوذ جوش نفوذی ناقص بر روی رفتار وصله ستون مورد ارزیابی

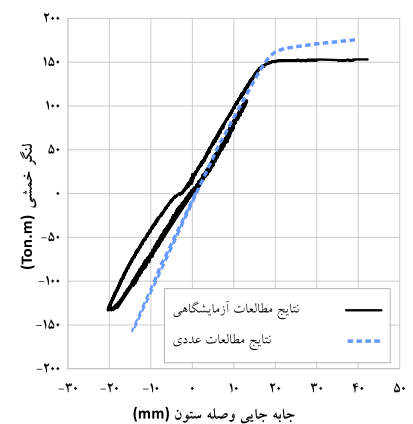
قرار گرفته است. تمامی مقاطع ستون انتخاب‌شده، مقاطعی هستند که در سازه‌های فلزی متوسط و بلندمرتبه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در انتخاب پهنا و ضخامت نمونه‌ها، فشردگی لرزه‌ای و لاغری مقاطع مطابق جدول D1.1 آیین‌نامه AISC 341-16 [۵] کنترل شده است. میزان درصد جوش نفوذی برای هر مقطع ستون به‌ترتیب ۱۰۰٪ (جوش نفوذی کامل)، ۸۵٪ و ۶۵٪ در نظر گرفته شده است. جوش نفوذی کامل برای مقایسه رفتار بین جوش نفوذی کامل و جوش نفوذی ناقص با درصد نفوذ ۸۵٪ که در آیین‌نامه AISC 314-16 مورد تأیید واقع شده، مدل‌سازی شده است. علت انتخاب پهناهای یکسان در هر نمونه مقطع ستون، این است که امکان قرار گیری دو ستون قوطی با پهناهای متفاوت به‌طور مستقیم بر روی یکدیگر و انجام فرآیند جوشکاری میسر نیست. در هر نمونه ستون با پهناهای یکسان، به‌منظور بررسی تأثیر ضخامت بر عملکرد وصله ستون، ضخامت‌ها بین ۵ تا ۱۰ میلی‌متر تغییر پیدا کرده است. به‌منظور بررسی تأثیر پهناهای مقطع ستون بر عملکرد وصله ستون، نمونه‌های ستون دارای ضخامت یکسان و پهناهای متفاوت نیز در نمونه‌های مدل‌سازی‌شده، در نظر گرفته شده است.



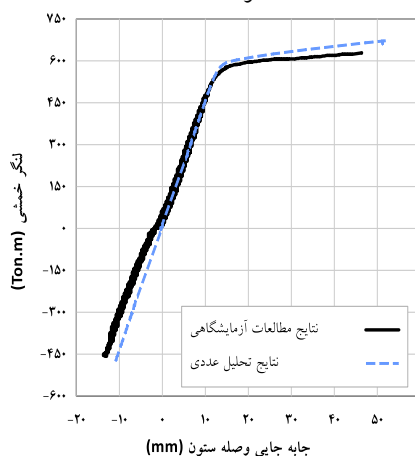
نمونه 14A



نمونه 14B



نمونه 14C



شکل ۱۰- مقایسه منحنی لنگر خمشی-جابه‌جایی محل وصله ستون در نمونه‌های مدل‌سازی‌شده و نمونه‌های آزمایشگاهی شاور و کانوینده

۴-۱- بارگذاری و شرایط مرزی

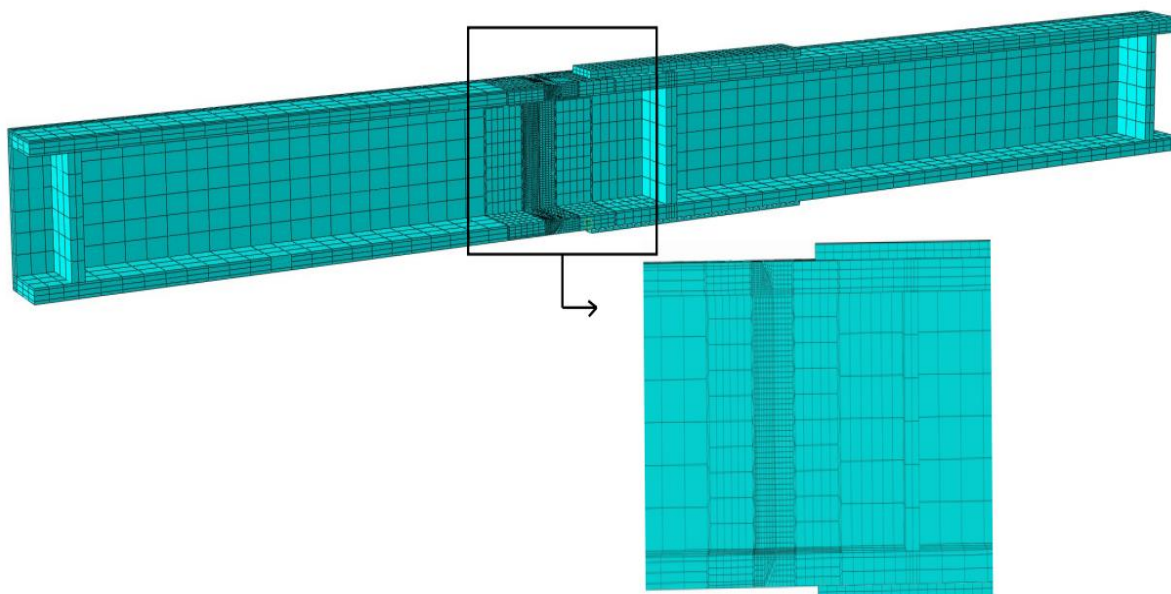
ورق تقویتی بالا و پایین نمونه در محل اعمال بار در نظر گرفته شده است که به دو طرف بال ستون متصل شده است (شکل (۱۱)).

فرضیات مدل‌سازی همانند آنچه در بخش راستی‌آزمایی مدل عددی اشاره شد، در نظر گرفته شده است. در نمونه‌هایی با ضخامت یکسان،

جدول ۴- نام‌گذاری به همراه مشخصات ابعادی نمونه‌های عددی مقاطع ستون باکس مطالعات پارامتریک

e ^۱	طول ستون بزرگ‌تر (mm)	طول ستون کوچک‌تر (mm)	ضخامت ستون بزرگ‌تر (mm)	ضخامت ستون کوچک‌تر (mm)	پهنا (mm)	CJP یا PJP (شماره نمونه)
۳۰۰	۱۸۰۰	۱۲۰۰	۲۵	۲۵	۳۰۰	۱۰۰٪(۱)، ۸۵٪(۲)، ۶۵٪(۳)
۲۰۰	۱۷۰۰	۱۳۰۰	۳۰	۲۵	۳۰۰	۱۰۰٪(۴)، ۸۵٪(۵)، ۶۵٪(۶)
۳۰۰	۱۸۰۰	۱۲۰۰	۳۰	۳۰	۳۰۰	۱۰۰٪(۷)، ۸۵٪(۸)، ۶۵٪(۹)
۲۵۰	۱۷۵۰	۱۲۵۰	۳۰	۳۰	۵۰۰	۱۰۰٪(۱۰)، ۸۵٪(۱۱)، ۶۵٪(۱۲)
۲۰۰	۱۷۰۰	۱۳۰۰	۳۵	۳۰	۵۰۰	۱۰۰٪(۱۳)، ۸۵٪(۱۴)، ۶۵٪(۱۵)
۳۳۰	۱۸۳۰	۱۱۷۰	۴۰	۳۰	۵۰۰	۱۰۰٪(۱۶)، ۸۵٪(۱۷)، ۶۵٪(۱۸)
۳۰۰	۱۸۰۰	۱۲۰۰	۴۰	۴۰	۵۰۰	۱۰۰٪(۱۹)، ۸۵٪(۲۰)، ۶۵٪(۲۱)
۳۰۰	۱۸۰۰	۱۲۰۰	۵۰	۵۰	۷۰۰	۱۰۰٪(۲۲)، ۸۵٪(۲۳)، ۶۵٪(۲۴)
۲۱۰	۱۷۱۰	۱۲۹۰	۶۰	۵۰	۷۰۰	۱۰۰٪(۲۵)، ۸۵٪(۲۶)، ۶۵٪(۲۷)
۳۴۰	۱۸۴۰	۱۱۶۰	۶۰	۶۰	۷۰۰	۱۰۰٪(۲۸)، ۸۵٪(۲۹)، ۶۵٪(۳۰)
۳۰۰	۱۸۰۰	۱۲۰۰	۷۰	۷۰	۱۰۰۰	۱۰۰٪(۳۱)، ۸۵٪(۳۲)، ۶۵٪(۳۳)

^۱فاصله محل اعمال بار تا وصله ستون



شکل ۱۱- مش‌بندی نمونه‌های مدل‌سازی شده مقاطع ستون باکس در نرم‌افزار آباکوس

تقویتی با توجه به ابعاد مقطع و ظرفیت خمشی متناسب با آن در بال بالا و پایین محل اعمال بار قرار داده شده است که به دلیل جلوگیری از تمرکز تنش در محل وصله، ۱۰ سانتی‌متر با آن فاصله دارد. ورق تقویتی به منظور افزایش ظرفیت خمشی در محل اعمال بار و رسیدن هم‌زمان محل اعمال بار و محل وصله به ظرفیت

هر نمونه مدل‌سازی شده مطابق با ظرفیت خمشی دو قطعه ستون، دارای فاصله محل اعمال بار تا محل وصله (e) متفاوت است؛ در نمونه‌هایی با ضخامت یکسان با توجه به نبود دو مقطع ستون با ابعاد مختلف، یک فاصله یکسان ۳۰ سانتی‌متر بین محل اعمال بار و محل وصله فرض شده است و در محل اعمال بار یک ورق

خمش خود مورد استفاده قرار گرفته است. طول نمونه ستون ۳ متر و به دلیل طولانی بودن زمان تحلیل‌ها و همچنین تقارن مقطع ستون قوطی‌شکل، نمونه ستون به صورت نصف مدل‌سازی شده است. همانند آنچه در بخش ۲-۳ مطرح شد برای نواحی اطراف اتصال وصله ستون از مش کوچک‌تر و برای سایر نواحی از مش درشت‌تر استفاده شده است.

۲-۴- نتایج مطالعات پارامتریک

نتایج مدل‌سازی نمونه‌های ستون قوطی‌شکل در سه بخش ارائه شده است: نتایج میزان لنگر خمشی-جابه‌جایی در محل وصله ستون، شکل شکست ستون قوطی‌شکل از ناحیه جوش نفوذی کامل و ناقص و توزیع کرنش شکست معادل در المان بحرانی

۲-۴-۱- میزان لنگر خمشی-جابه‌جایی

در جدول (۵)، نتایج میزان حداکثر لنگر خمشی محل وصله ستون به ظرفیت خمشی مقطع کوچک‌تر به همراه جابه‌جایی محل وصله ستون و نسبت جابه‌جایی وصله ستون به میزان جابه‌جایی شروع رفتار پلاستیک آورده شده است. در تمامی نمونه‌های مدل‌سازی شده به علت تمرکز تنش ایجادشده ناشی از ناحیه

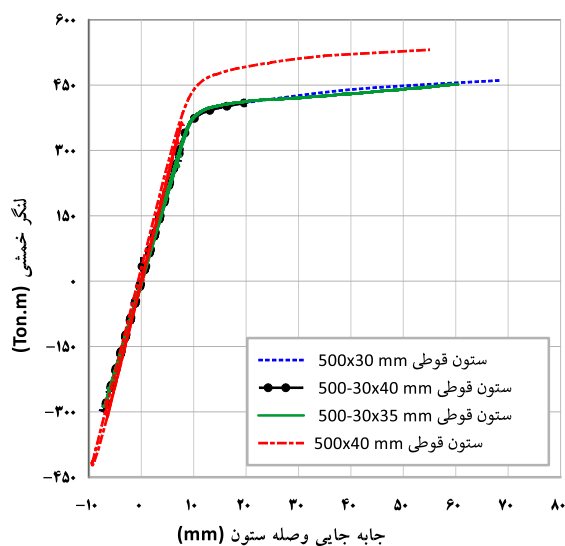
جوش نشده، میزان حداکثر لنگر خمشی و جابه‌جایی محل وصله ستون با جوش نفوذی ناقص ۶۵٪ کم‌ترین مقدار و بعد از آن جوش نفوذی ناقص ۸۵٪ نسبت به جوش نفوذی کامل میزان جابه‌جایی کم‌تری دارد. منحنی لنگر خمشی-جابه‌جایی محل وصله در نمونه‌هایی با جوش نفوذی ناقص ۸۵٪ با یکدیگر مقایسه شده است (شکل (۱۲)). به‌طور کلی با افزایش ضخامت و پهنای نمونه‌ها به علت افزایش سختی و افزایش تمرکز تنش در المان بحرانی، جابه‌جایی شکست کاهش پیدا می‌کند. در نمونه‌هایی با ضخامت یکسان به علت عدم تمرکز تنش ناشی از اختلاف ضخامت، میزان شکل‌پذیری بیش‌تر می‌باشد. در نمونه‌های با اختلاف ضخامت یک سانتی‌متر، شکل‌پذیری کم‌ترین مقدار است به‌طوری که شکست جوش نفوذی کامل تنها در این نمونه‌ها مشاهده شده است. در سایر نمونه‌های بارگذاری شده با جوش نفوذی کامل با جابه‌جایی‌های بیش‌تر از جابه‌جایی وارد بر نمونه‌های با جوش نفوذی ناقص با درصد نفوذ ۸۵٪، شکستی مشاهده نشده است به همین منظور جابه‌جایی شکست آن‌ها در جدول (۵) با خط تیره نمایش داده شده است.

جدول ۵- میزان نسبت حداکثر لنگر خمشی محل وصله ستون به ظرفیت خمشی مقطع کوچک‌تر به همراه جابه‌جایی محل وصله

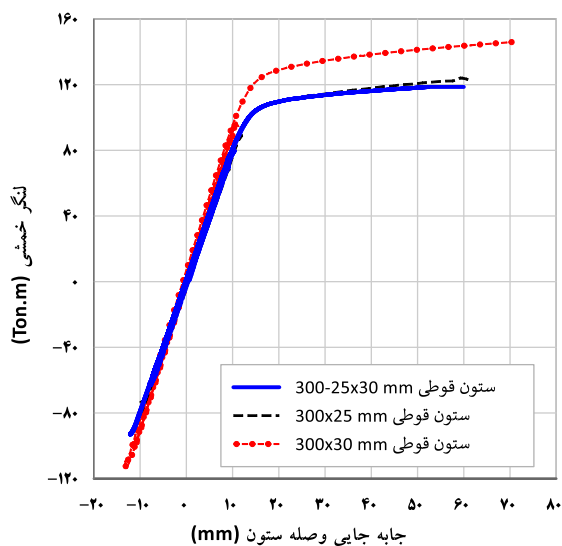
شماره نمونه			$\frac{M_{SP}}{M_{p,s}}$ ۱	δ_{SP} (mm)	$\frac{\delta_{SP}}{\delta_e}$ ۲
۱	۲	۳	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۰۷
۴	۵	۶	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۰۷
۷	۸	۹	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۰۶
۱۰	۱۱	۱۲	۱/۱۹	۱/۱۹	۱
۱۳	۱۴	۱۵	۱/۱۷	۱/۱۷	۱
۱۶	۱۷	۱۸	۱/۱	۱/۰۵	۰/۹۵
۱۹	۲۰	۲۱	۱/۱۵	۱/۱۲	۰/۹۵
۲۲	۲۳	۲۴	۱/۲۲	۱/۱۸	۱
۲۵	۲۶	۲۷	۱/۰۸	۱/۰۸	۱
۲۸	۲۹	۳۰	۱/۱۴	۱/۱۴	۱
۳۱	۳۲	۳۳	۱/۰۹	۱/۰۹	۱

۱ نسبت لنگر خمشی در محل وصله ستون به میزان لنگر خمشی پلاستیک مقطع کوچک‌تر

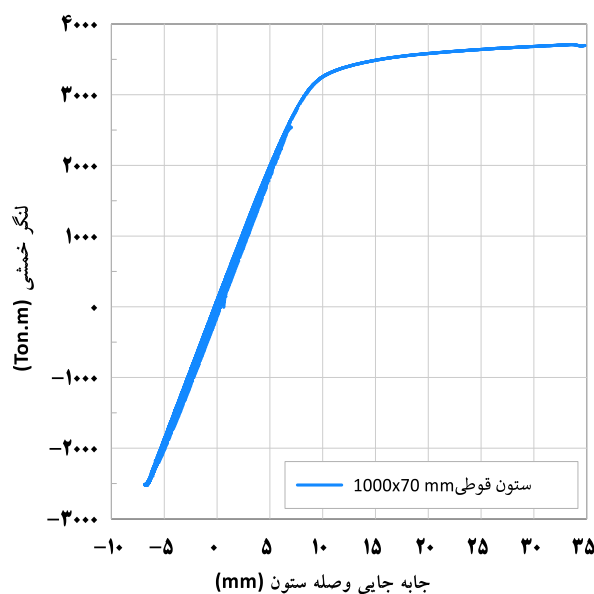
۲ نسبت جابه‌جایی محل وصله ستون به میزان جابه‌جایی الاستیک مقطع



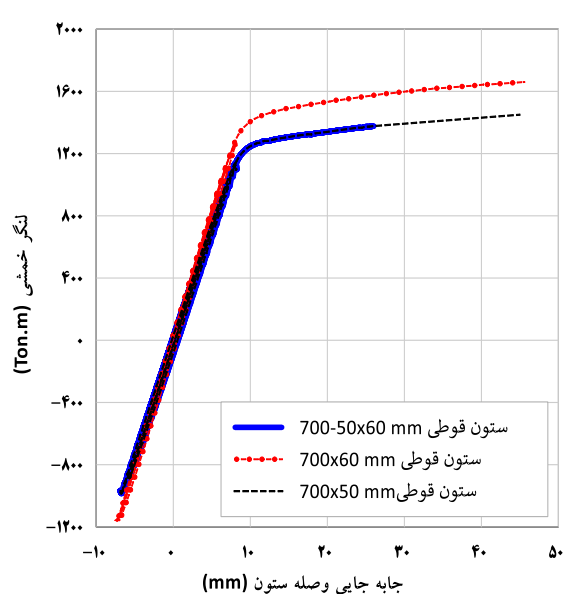
ب) پهناي ۵۰۰ میلی متر



الف) پهناي ۳۰۰ میلی متر

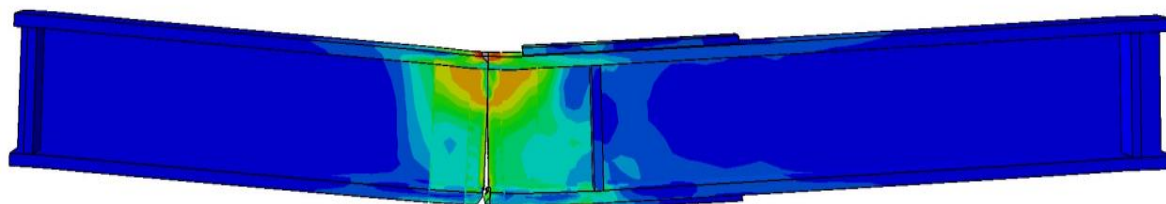


د) پهناي ۱۰۰۰ میلی متر

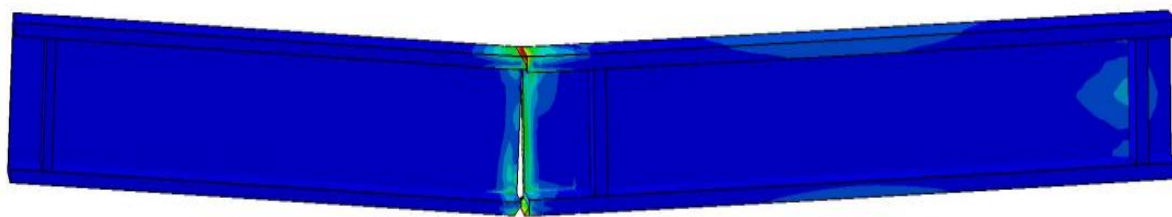


پ) پهناي ۷۰۰ میلی متر

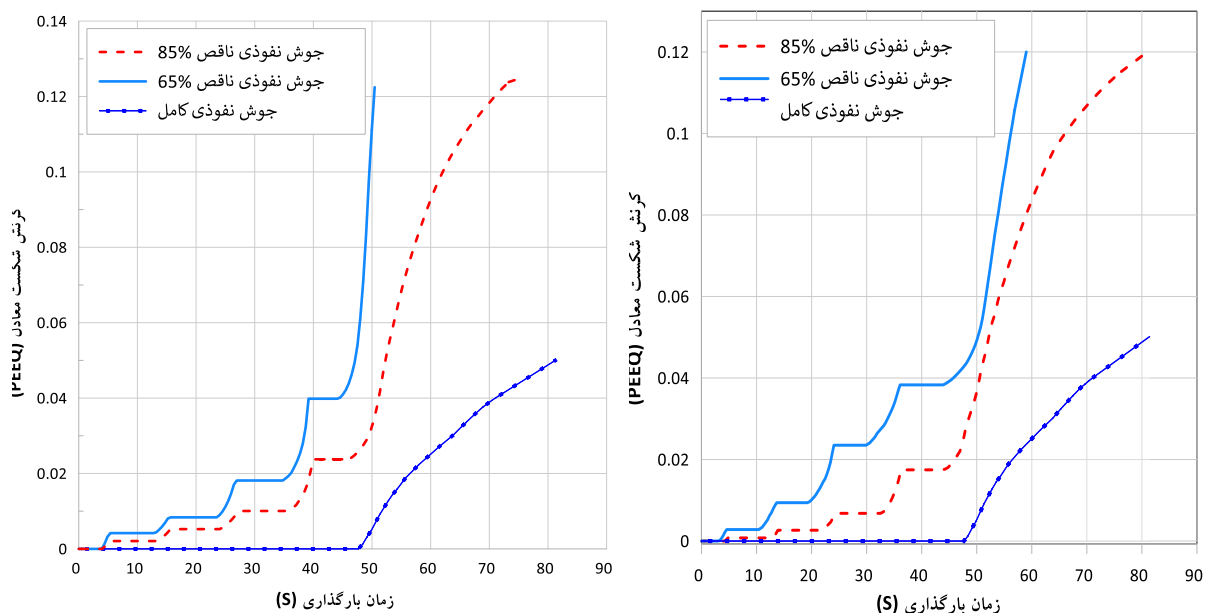
شکل ۱۲- منحنی لنگر خمشی-جابه جایی محل وصله ستون در نمونه های ستون قوطی شکل با پهنا و ضخامت های مختلف با جوش شیارى با درصد نفوذ ۸۵٪



شکل ۱۳- شکست مقطع ستون قوطی شکل با مقاطع یکسان

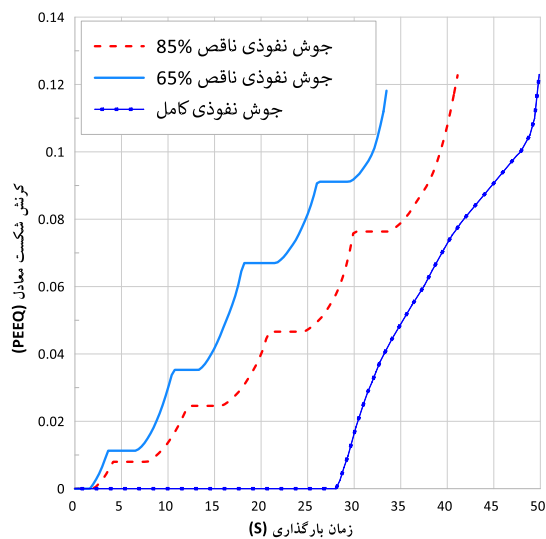


شکل ۱۴- شکست ستون قوطی شکل دارای دو مقطع متفاوت



ب) وصله ستون قوطی شکل با پهنای ۳۰۰ میلی متر دارای دو ضخامت مختلف ۲۵ و ۳۰ میلی متر

الف) وصله ستون قوطی شکل با پهنای ۳۰۰ میلی متر دارای دو ضخامت یکسان ۳۰ میلی متر



پ) وصله ستون قوطی شکل با پهنای ۵۰۰ میلی متر دارای دو ضخامت مختلف ۳۰ و ۴۰ میلی متر

شکل ۱۵- تغییرات کرنش شکست معادل در المان بحرانی

مطابق شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، وصله ستون قوطی شکل از ناحیه متأثر از حرارت جوش نفوذی کامل و ناقص بال پایین مقطع ستون که تحت کشش می‌باشد، دچار آسیب شده است و این آسیب در جان ستون گسترش می‌یابد. شکل (۱۳)، شکست جوش نفوذی ناقص در ستون قوطی شکل متشکل از دو مقطع کاملاً یکسان را نمایش می‌دهد که زیر محل اعمال بار از ورق تقویتی استفاده شده است و شکل (۱۴)، شکست جوش نفوذی ناقص در مقطع ستون قوطی شکل متشکل از دو مقطع دارای ضخامت متفاوت را نمایش می‌دهد.

۴-۲-۳- توزیع کرنش شکست معادل در المان بحرانی

در شکل (۱۵)، تغییرات کرنش شکست معادل در المان بحرانی در دو حلقه آخر بارگذاری و بارگذاری یکنواخت نهایی برای سه وصله ستون دارای جوش نفوذی کامل و ناقص، متشکل از دو مقطع یکسان، با اختلاف ضخامت ۵ میلی‌متر و ۱۰ میلی‌متر نمایش داده شده است. در تمامی نمونه‌های ستون قوطی شکل مدل‌سازی شده میزان تنش و کرنش در المان بحرانی در دو حلقه اول بارگذاری در ناحیه الاستیک باقی مانده است. به همین دلیل در شکل (۱۵)، تنها دو حلقه آخر بارگذاری آورده شده است. مطابق شکل (۱۵)، کرنش شکست معادل در نمونه‌ای با جوش نفوذی ناقص با درصد نفوذ ۶۵٪ در حلقه‌های بارگذاری و بارگذاری یکنواخت نهایی بسیار سریع افزایش پیدا کرده است. میزان این تغییرات در نمونه‌ای با درصد نفوذ ۸۵٪، کم‌تر است. وصله ستون قوطی شکل با جوش نفوذی کامل در دو نمونه دارای ضخامت یکسان و با اختلاف ضخامت ۵ میلی‌متر، در تمام حلقه‌های بارگذاری، الاستیک باقی مانده است و تغییرات کرنش در بارگذاری یکنواخت نهایی بسیار کم است. به همین دلیل شکست در این نمونه‌ها با جابه‌جایی زیاد مشاهده نشده است. مطابق شکل (۱۵-ب) تغییرات کرنش شکست معادل در نمونه‌ای با اختلاف ضخامت ۱۰ میلی‌متر در حلقه‌های بارگذاری بسیار بیش‌تر از سایر نمونه‌ها است. در وصله ستون دارای جوش نفوذی کامل، کرنش شکست در المان بحرانی در حلقه‌های بارگذاری، الاستیک باقی مانده است ولی در بارگذاری یکنواخت نهایی، به سرعت افزایش پیدا کرده و شکست اتفاق افتاده است. در تمامی نمونه‌های مدل‌سازی شده، شکست بعد از طی شدن حلقه‌های بارگذاری و در بارگذاری یکنواخت نهایی اتفاق افتاده است. در نتیجه استفاده از جوش نفوذی ناقص با درصد نفوذ حداقل ۶۵٪ در مقاطع ستون قوطی شکل امکان‌پذیر است.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یک مدل سه‌بعدی اجزای محدود به منظور بررسی عملکرد وصله ستون‌ها در نرم‌افزار آباکوس ساخته شده است و شکست در ناحیه متأثر از حرارت با استفاده از ترکیب دو روش SMCS و آسیب نرم در نرم‌افزار آباکوس معرفی شده است. چهار نمونه مطالعات آزمایشگاهی گذشته، راستی‌آزمایی شده است و با اطمینان از عملکرد مدل ساخته‌شده و کالیبره کردن یک منحنی شکست بر اساس میانگین ضخامت مقاطع ستون، ۳۳ نمونه ستون قوطی شکل با پهنا و ضخامت‌های مختلف دارای جوش نفوذی با درصد نفوذ متفاوت ۱۰۰٪، ۸۵٪ و ۶۵٪ ساخته شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. کاهش درصد نفوذ جوش شیار ناقص، باعث افزایش تمرکز تنش در المان بحرانی شده و شکل‌پذیری و حداکثر لنگر خمشی کاهش پیدا کرده است. افزایش پهنا و ضخامت ستون قوطی شکل با افزایش سختی مقطع باعث کاهش شکل‌پذیری شده است؛ به جز در نمونه با ضخامت یکسان که به دلیل عدم تمرکز تنش ناشی از اختلاف ضخامت، شکل‌پذیری بیش‌تری دارند. در نمونه‌های با اختلاف ضخامت یک سانتی‌متر، تمرکز تنش ناشی از اختلاف ضخامت در کنار تمرکز تنش ناشی از ناحیه جوش‌نشده باعث کاهش شدید شکل‌پذیری شده است؛ به طوری که شکست حتی در نمونه‌های با نفوذ کامل نیز مشاهده شده است. شکست در تمامی نمونه‌های بارگذاری شده، بعد از حلقه‌های بارگذاری و در بارگذاری یکنواخت نهایی اتفاق افتاده است. در نتیجه، امکان استفاده از جوش شیار ناقص با درصد نفوذ حداقل ۶۵٪ در مقاطع ستون قوطی شکل اثبات شده است.



- Journal of Mechanics and Physics of Solids 17 no. 3:201-217.
- [15] Clintock, F.A. (1968), "A criterion for ductile fracture by the growth of holes. Journal of Applied Mechanics", Journal of Structural Engineering, 35(2): 363-371.
- [16] Hancock, J.W., and Mackenzie, A.C. (1976), "On the mechanics of ductile failure in high-strength steel subjected to multi-axial stress-states", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 24(2-3), 147-160..
- [17] Hooputra, H., Gese, H., Dell, H., and Werner, H. (2004), "A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminum extrusions", International Journal of crashworthiness, 9(5), pp. 449-463.
- [18] Kolmogorov, W.L. (1970), "Spannungen Deformationen Bruch", Metallurgija, 230
- [1] Engelhardt, M.D., and Husain, A. (1992), "Cyclic tests on large scale steel moment connections", Rep. No. PMFSEL 92-2, Phil M. Ferguson Structural Engineering Laboratory, University of Texas, Austin, Tex.
- [2] Chi, W.M., Deierlein, G.G., and Ingraffea, A. (2000), "Fracture toughness demands in welded beam-column moment connections", Journal of Structural Engineering, 126 (1):88-97.
- [3] Deierlein, G.G., Krawinkler, H., and Cornell, C.A. (2003), "A framework for performance-based earthquake engineering", Proc. Pacific Conf. on Earthquake Engineering, New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Wellington, New Zealand
- [4] ANSI/AISC 341-10 (2010). "Seismic provisions for structural steel buildings", Chicago, Ill: American Institute of Steel Construction.
- [5] ANSI/AISC 341-16 (2016), "Seismic provisions for structural steel buildings", Chicago, Ill: American Institute of Steel Construction.
- [6] Popov, E.M., and Stephen, R.M. (1976), "Capacity of Columns with Splice Imperfections", Engineering Journal of the American Institute of Steel Construction: 16-23. Document.
- [7] Bruneau, M., and Mahin, S.A. (1991), "Full-scale tests of butt-welded splices in heavy-rolled steel sections subjected to primary tensile stresses", Journal of Structural Engineering, 28(1), pp:1-17
- [8] Nuttayasakul, N. (2000), "Finite Element Fracture Mechanics Study of Partial Penetration Welded Splices", (Doctoral dissertation, Stanford University).
- [9] Shen, J., and Sabol, T. (2008). "Seismic Demand on the Column Splices in Special Steel Moment Frames." Technical Report to American Institute of Steel Construction, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [10] Shaw, S.M., Stillmaker, K., and Kanvinde, A.M. (2015), "Seismic Response of Partial Joint-Penetration Welded Column Splices in Moment-Resisting Frames", Engineering Journal, Second Quarter, 87.
- [11] Myers, A., Deierlein, G.G., and Kanvinde, A. (2009), "Testing and probabilistic simulation of ductile fracture initiation in structural steel components and weldments", Stanford, California: Stanford University.
- [12] Arasaratnam, P., Sivakumaran, K.S., and Tait, M.J. (2011), "True Stress-True Strain Models for Structural Steel Elements", International Scholarly Research Notices.
- [13] Bridgman, P.W. (1964), "Studies in large plastic flow and fracture", Cambridge, MA: Harvard University Press.
- [14] Rice, J.R., and Tracey, D.M. (1969), "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields",

