

عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون با بال سوراخ شده برای قاب‌های فولادی شکل پذیر

اردوان آتش زبان^۱، محسن ایزدی نیا^۲، روح الله احمدی جزینی^{۳*}، ایمان حاجی رسولیها^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد، اصفهان

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران

۴- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه شفیلد انگلستان

* تهران، صندوق پستی ۱۸۷۳۵-۱۳۳۶، Roohollah_ahmady@yahoo.co.uk

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۲۰)

چکیده

آسیب‌های بسیار در اتصالات بال جوش شده تقویت نشده (Welded Un-reinforced Flange) WUF در زلزله ۱۹۹۴ نورتریج منجر به توسعه اتصالات خمشی مقطع تیر کاهش یافته (Reduced Beam Section) RBS برای جلوگیری از مودهای گسیختگی ترد زودرس در اتصالات جوشی شدند. این مقاله، عملکرد لرزه‌ای اتصالات مقاوم خمشی با بال سوراخ شده (Drilled flange connection-DF) را که اخیراً توسعه یافته‌اند به عنوان یک جایگزین ساده و کارآمد برای اتصالات RBS در نواحی لرزه‌ای، مورد مطالعه قرار می‌دهد. اتصالات DF به وسیله مجموعه‌ای از سوراخ‌های تعبیه شده با مته روی بال‌های بالایی و پایینی (در امتداد محور اصلی تیر) به منظور ایجاد یک نقطه ضعیف کنترل شده مفصل پلاستیک که می‌تواند مانع تمرکزهای تنش در لبه‌های اتصال شود، ایجاد می‌شوند. در این بررسی، مجموعه‌ای از مطالعات تحلیلی، بر مبنای تحقیقات تجربی قبلی، برای ارزیابی رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون WUF، DF و RBS انجام گرفت. ترکیبات متفاوت سوراخ و نسبت‌های مقاومت برشی چشمه اتصال استفاده گردید تا طرح بهینه‌ای حاصل شود و مودهای شکست زودرس در جوش‌های شیار با نفوذ کامل اجتناب شود. نتیجه شاخص این تحلیل‌ها نشان دهنده کارایی ایده‌آل اتصال بال سوراخ شده با اولین الگوی سوراخ در کاهش شاخص گسیختگی جوش نفوذی اتصال تیر به ستون می‌باشند. در این الگو قطر سوراخ‌ها با افزایش فاصله تا بر ستون افزایش یافته است.

واژگان کلیدی

اتصال بال سوراخ شده (DF)، اتصال مقطع تیرکاهش یافته (RBS)، اتصال بال جوش تقویت نشده (WUF)، چشمه اتصال، مقاومت برشی

Seismic Performance of Drilled Flange Beam to Column Connections for Ductile Steel Frames

A. Atashzaban, M. Izadinia, R. Ahmady Jazany, I. Hajirasouliha

Abstract

Extensive damages in welded unreinforced flange connections (WUF) in the Northridge 1994 earthquake led to the development of reduced beam section (RBS) moment connections to prevent premature brittle failure modes in welded connections. This paper investigates the seismic performance of recently developed drilled flange (DF) moment resisting connections as a simple and efficient alternative to RBS connections in seismic regions. DF connections are established by a series of holes made by drilling on the top and the bottom flanges of the beam (along the main axis) to create an intentional weak point, which can prevent stress concentrations at the connection edges. In this study, a series of analytical studies based on previous experimental researches were carried out to evaluate cyclic behaviour of DF, WUF and RBS beam to column connections. Different drilled flange hole configurations and panel zone shear strength ratios were used to obtain an optimum design and prevent premature failure modes in complete joint penetration groove welds. Results show optimum configuration of drilled flange holes in DF connections reduce the rapture index and equivalent plastic strains of critical points on welded joints and comparing with WUF and RBS connections provide an appropriate seismic performance. The diameter of holes increase by distance from column face for the optimum configuration of DF connections.

Keywords

Drilled flange connection, Reduced beam section connection, Unreinforced flange connection, Panel zone, Shear strength

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۵۳

گسیختگی گسترده در اتصالات بال تقویت نشده جوش شده WUF (Welded Unreinforced Flange) در قاب های مقاوم خمشی فولادی (MRF) در زلزله نورتریج، نکات بسیاری را در مورد هندسه و ویژگی های مواد و تاثیر این موارد بر شکست این اتصالات نشان داده است [۱]. چندین تحقیق در زمینه گسیختگی های مشاهده شده در اتصالات قبل از نورتریج، ثابت کرده اند که تنش سه محوری در جوش نفوذی کامل بال های تیر، منجر به یک گسیختگی زود هنگام خط جوش نزدیک به بال تیر قبل از هر گونه تسلیم تیر و تغییر شکل پلاستیک می شود [۲ و ۳]. در یکی از آخرین تحقیقات Han و همکارانش رفتار چرخه ای اتصالات جان جوش شده و بال پیچی تقویت نشده پس از زلزله نورتریج (WUF-B) را بررسی کردند. آزمایشات آنها نشان داد که اتصالات WUF-B دارای نسبت مقاومت چشمة اتصال متغیر از ۰/۹ تا ۱/۶ می توانند ظرفیت تغییر شکل نسبی طبقه را به بیشتر از ۰/۰۲ برساند که برای عملکرد لرزه ای اتصالات قاب های خمشی معمولی مناسب می باشند [۴]. اتصالات مقطع تیر کاهش یافته RBS (Reduced Beam Section) برای جلوگیری از مودهای گسیختگی ترد زودرس مشاهده شده در اتصالات بال جوش شده تقویت نشده WUF به دلیل تمرکز تنش بالا در لبه اتصال، ابداع شده اند [۵]. در اتصالات RBS به طور کلی، عرض بال تیر تا فاصله کوتاهی از مقطع ستون کاهش یافته و بنابراین برای کاهش تمرکز تنش ها در بر ستون، یک فیوز در اتصال ایجاد می کنند. بررسی های Reorder نشان داد که این نوع اتصال، قادر به تامین عملکرد لرزه ای خوب با ظرفیت چرخشی پلاستیک زیاد می باشد [۶]. Uang و همکارانش، شش آزمایش تمام مقیاس اتصال تیر به ستون، شامل اتصالات مقطع تیر کاهش یافته RBS با دال بتنی انجام دادند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که استفاده از بال پایینی تیر کاهش یافته به تنهایی نمی تواند مانع گسیختگی ترد در جوش نفوذی بال بالایی شود و حضور یک دال بتنی با حذف پشت بند جوش نفوذی، فقط اندکی عملکرد سیکلیک را بهبود می بخشد [۷].

Chen و Chao عملکرد لرزه ای اتصالات خمشی فولادی دارای مقاطع تیر کاهش یافته، را از طریق مجموعه ای از آزمایش های مقیاس بزرگ اتصال تیر به ستون نصب شده با دال های کف، بررسی کردند. آنها نشان دادند که نسبت لنگر خمشی مثبت به لنگر خمشی منفی ممکن است به بزرگی ۱/۱۸ باشد که اساساً به علت مشارکت دال های کف می باشد [۸].

Scott و همکارانش، عملکرد هشت اتصال خمشی مقطع تیر کاهش یافته RBS را تحت یک الگوی بارگذاری چرخه ای شبه استاتیکی به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها نتیجه گیری کردند که به کار گیری دال بتنی می تواند تیرها را در مقابل کماتش پیششی جانبی، بدون افزایش آشکار در کرنش های موجود در بال پایینی تیر مقاوم کند [۹]. در بررسی مشابهی، Lee و همکارانش، هشت آزمایش مقیاس کامل روی اتصالات خمشی فولادی مقطع تیر کاهش یافته RBS برای بررسی اثر نوع اتصال جان (بولت شده در مقابل جوش شده) و مقاومت چشمة اتصال بر عملکرد لرزه ای قاب خمشی انجام دادند. نتایج نشان دادند هر دو نمونه چشمة اتصال قوی و متوسط که دارای یک اتصال جان جوش شده اند، قادر به ایجاد ظرفیت چرخش اتصال مناسبی بر اساس معیارهای قاب مقاوم خمشی ویژه می باشند [۱۰]. Farrokhi و همکارانش، یک اتصال کاهش یافته را با حفر سوراخ هایی در ورق های بال برای ایجاد یک مقطع ضعیف عمدی پیشنهاد کردند. اتصال ورق بال سوراخ شده DF می تواند محل تمرکز تنش را از بر اتصال تغییر داده و مودهای گسیختگی موضعی نامطلوب تیر را که معمولاً در اتصالات مقطع تیر کاهش یافته RBS قرار دادی مشاهده می شوند، رفع کند. بررسی آنها نشان داد که اتصالات ورق بال سوراخ شده DF می توانند به طور قابل ملاحظه ای مقاومت و ظرفیت شکل پذیری انواع اتصالات خمشی جوش شده مقطع تیر کاهش یافته RBS را بهبود بخشند. به علاوه به نظر می رسد عملکرد اتصالات ورق بال سوراخ شده DF به کیفیت ریشه جوش وابستگی کمتری داشته باشد. زیرا مکانیزم رفتار غیر خطی اصلی در نزدیکی سوراخ های حفر شده ایجاد می شود [۱۱]. Vetr و Haddad، برای بررسی عملکرد لرزه ای اتصالات ورق بال سوراخ شده DF تحت بارگذاری چرخه ای، آزمایش های بیشتری انجام دادند و اتصالات ورق بال سوراخ شده DF در بررسی های آنها به ظرفیت خمشی مورد انتظار کامل رسیدند و سختی چرخشی کافی و شکل پذیری چرخشی مطلوب را نشان دادند [۱۲].

هدف این مقاله، بهینه سازی عملکرد لرزه ای اتصالات ورق بال سوراخ شده DF با تشخیص بهترین الگوی سوراخ و نسبت های مقاومت برشی تیر به چشمة اتصال، می باشد. برای ارزیابی عملکرد بهینه اتصالات ورق بال سوراخ شده DF، ظرفیت چرخش پلاستیک و ماکزیم کرنش پلاستیک معادل، تنش سه محوری و شاخص گسیختگی آنها با اتصالات خمشی RBS (مقطع تیر کاهش یافته) و WUF (بال تقویت نشده جوش شده) مقایسه شدند.

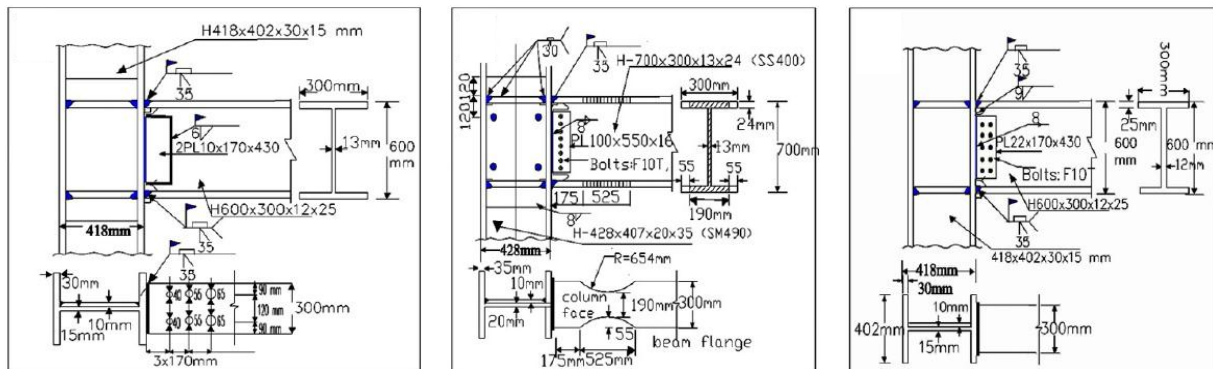


۲- نمونه های آزمایشی مرجع

برای درک بهتر و راست آزمایی از مطالعات تحلیلی، سه نمونه آزمایش اتصالات مقاوم خمشی فولادی با سه نوع اتصال WUF، RBS و DF از مطالعات گذشته انتخاب شدند. شکل (۱) جزئیات این سه نمونه آزمایش را نشان می دهد [۱۲-۱۴].

اتصال خمشی جوش شده تیر به ستون (WUF) که در این مطالعه برای راست آزمایی نمونه های تحلیلی استفاده شده است، از نمونه آزمایشی S6 در مطالعه Chen و همکارانش، اقتباس شده است [۱۲]. نتایج آزمایش آنها نشان داد که شکستگی بال تیر در این اتصال در تقاطع میان سوراخ دسترسی جوشکاری و

جوش نفوذی کامل در زاویه تغییر شکل نسبی طبقه ۴٪ آغاز شده است. سپس خط شکستگی به سمت لبه های بال، انتشار یافته و این آزمایش به شکستگی تیر نزدیک به جوش نفوذی CJP اشاره می کند. پاسخ چرخه ای این نمونه در شکل (۲-ب) نشان می دهد، هیچ تنزل مقاومتی در رفتار چرخه ای این اتصال تا نقطه گسیختگی مشاهده نشده است. Lee و همکارانش [۱۳]، مطالعه آزمایشگاهی در مورد عملکرد اتصالات RBS انجام دادند. نمونه ها طبق پروتکل بارگذاری ATC24 [۱۵]، به طور چرخه ای آزمایش شدند.

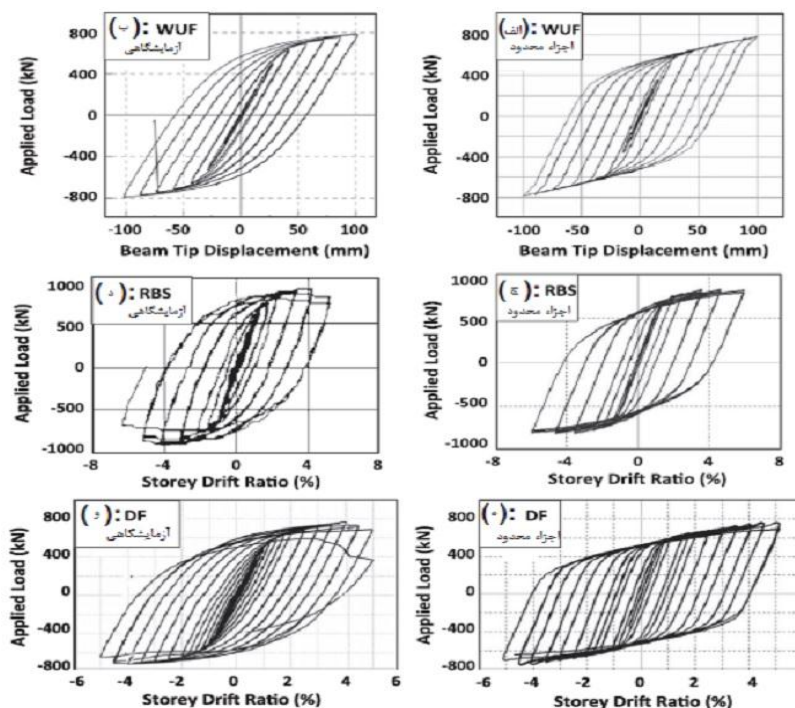


ج) اتصال DF [۱۴]

ب) اتصال RBS [۱۳]

الف) اتصال WUF [۱۲]

شکل ۱- نمای شماتیک نمونه های آزمایشی منتخب



شکل ۲- مقایسه میان پاسخ آزمایشگاهی (سمت چپ) و تحلیلی (سمت راست) بین نمونه های با اتصال WUF، RBS و DF

خلاصه سه نمونه آزمایش توصیف شده در جدول (۱) ارائه شده است.

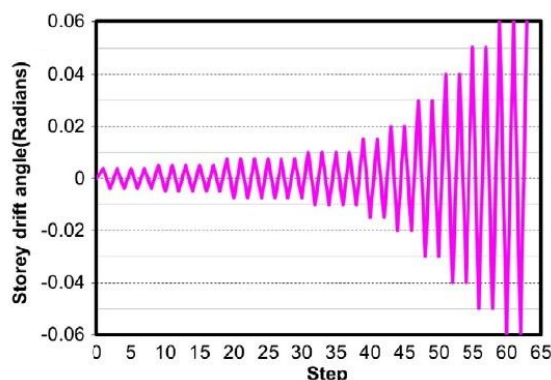
۱-۲- روش مدل سازی

سه مدل تحلیلی اجزاء محدود غیرخطی، با بکار بردن برنامه ANSYS [۱۷]، با مصالح فولادی و جوش تعریف شدند. المان Solid45 برای مدل سازی انتخاب شد. المان Solid45 به وسیله هشت گره با سه درجه آزادی در هر گره، برای مسائل جابجایی بزرگ غیر خطی، تعریف می شود. ذکر این نکته ارزشمند است که پیچ ها و ورق های برشی، در مدل تحلیلی نمونه های آزمایش S6 و DB700-SW مدل سازی نمی شوند، زیرا لغزش میان پیچ و ورق های برشی در آزمایش گزارش نشده است [۱۲، ۱۳]. شکل (۴) مدل های المان محدود (FEM) سه نمونه آزمایش ذکر شده در بخش قبلی را نشان می دهند.

مدل ها با اصلاح موضعی در نواحی اتصالات ستون با تنش بالا و سوراخ ها به طور غیر یکنواخت مش بندی می شوند. زیرا این مطالعه، رفتار موضعی اتصالات را بررسی می کند و تأثیرات خستگی چرخه ای را در نظر نمی گیرد. با در نظر گرفتن برخی شاخص های خسارت شامل شاخص های کرنش پلاستیک معادل و گسیختگی که توسط El-Tawil [۲۰] پیشنهاد شده اند، مطالعه پتانسیل شکست جوش و غیره، ممکن خواهند بود که شاخص گسیختگی (RI) توسط رابطه (۱) تعریف می شود:

$$RI = \frac{\varepsilon_{eqv}^{pl} / \varepsilon_y}{\exp\left(-1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eff}}\right)} \quad (1)$$

که ε_{eqv}^{pl} ، ε_y ، σ_m و σ_{eff} به ترتیب کرنش پلاستیک معادل، کرنش تسلیم، تنش هیدروستاتیک و تنش موثر (به عنوان تنش فون میسز) می باشند.



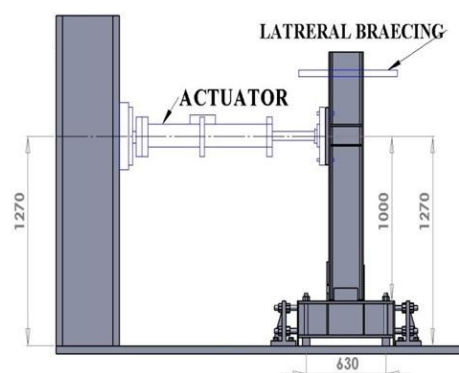
ب) الگوی بارگذاری به کار رفته برای نمونه آزمایش RDH1 [۱۶]

نمونه آزمایشی DB700-SW همانطور که در شکل (۱-ب) نشان داده می شود، برای ارزیابی رفتار لرزه ای اتصال RBS دارای چشمه اتصال قوی، بر اساس مقررات لرزه ای AISC [۱۶]، طراحی شد. شکل (۲-د) پاسخ چرخه ای نمونه آزمایشی DB700-SW را نشان می دهد. Haddad و Vetr [۱۴] مجموعه ای از مطالعات آزمایشگاهی برای ارزیابی رفتار لرزه ای اتصالات بال سوراخ شده DF انجام دادند. از این به بعد به نمونه های آزمایشی شامل سوراخ های حفر شده دربال با عنوان RDH1 با چشمه اتصال قوی اشاره می شود که عملکرد خوبی را نشان داده است. پیکر بندی سوراخ ها متشکل از سه ردیف سوراخ دو تایی است.

همانطور که در شکل ۱- (پ) ترسیم شده، قطر سوراخ ها با افزایش فاصله میان مرکز سوراخ و بر ستون افزایش می یابد. همچنین هر سوراخ دو تایی در یک نیز، نسبت به محور اصلی تیر، به طور متقارن روی بال تیر واقع است.

شکل (۳-الف) و (۳-ب) نیز مشخصات سازوکار و الگوی بارگذاری نمونه آزمایش RDH1 را نشان می دهند [۱۴]. به علت اهمیتی که اتصالات خمشی تیر به ستون و رفتار آنها در سازه ها حین بارهای لرزه ای دارند، جهت بررسی دقیق این رفتار باید به پارامترهای سختی، مقاومت و شکل پذیری اتصال توجه نمود. منحنی های هیستریزیس بدست آمده تحت بارهای چرخه ای امکان بررسی این سه پارامتر مهم اتصال را می دهند که به همین علت در این پژوهش از الگوی بارگذاری چرخه ای مطابق استاندارد لرزه ای AISC [۱۶] استفاده شده است.

پاسخ چرخه ای نمونه آزمایشی RDH1 در شکل (۲-و) نشان می دهد، ظرفیت چرخش کلی در انتهای آزمایش به حدود ۰.۵٪ زاویه دریفت طبقه می رسد.



الف) سازو کار نمونه های آزمایشی RDH1 [۱۴]

شکل ۳- سازو کار و الگوی بارگذاری به کار رفته برای نمونه آزمایش

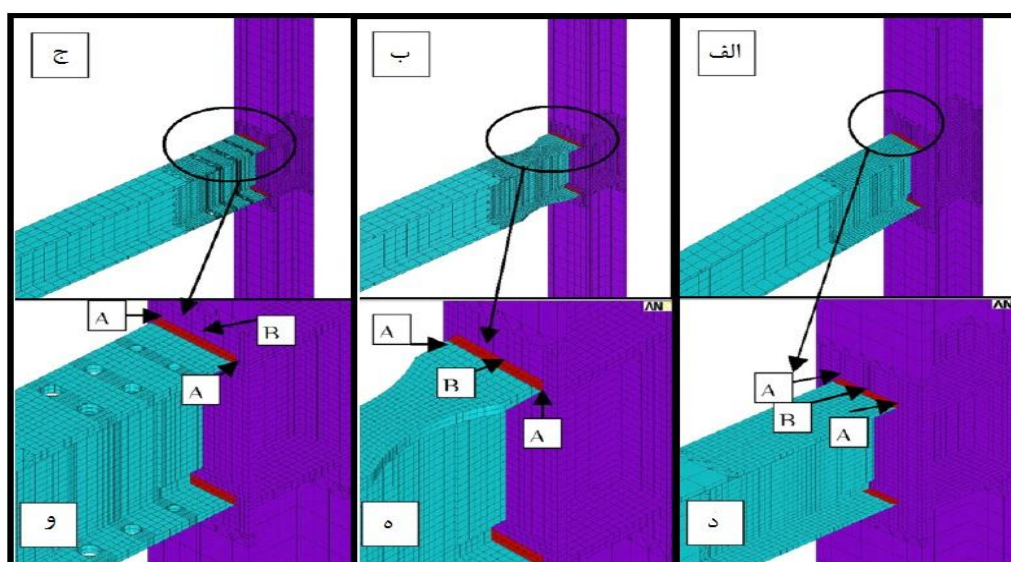
جدول ۱- خلاصه جزئیات برای نمونه‌های آزمایشگاهی مرجع این تحقیق

مشخصات هندسی اتصال (میلی متر)			مشخصات جوش	مشخصات مصالح F_y (مگا پاسکال)		ضخامت ورق مضاعف (میلی متر)	مقاطع تیر و ستون (میلی متر)	نمونه آزمایش
				ستون	تیر			
				بال جان	بال جان			
---			E7018 35/20	۳۴۳ ۵۱۲	۳۰۴ ۴۵۵	۱۰	H600×300×12×25 H418×402×30×15	WUF (S6 [12])
c	b	a	E70T7 35/25	۳۴۵ ۴۵۰	۴۵۰ ۴۰۰	۱۰	H700×300×13×24 H428×407×20×35	RBS (DB700-SW [13])
۵۵	۵۲۵	۱۷۵						
d3	d2	d1	E7018 35/20	۳۶۷ ۵۳۷	۳۱۰ ۴۲۰	۱۰	H600×300×12×25 H418×402×30×15	DF (RDH1 [14])
۳۰	۵۵	۴۰						

a, b و c: به مشخصات اتصال RBS رجوع شود (شکل (۱-ب)).

d1, d2 و d3: قطر سوراخ‌های اتصال بال سوراخ شده می باشند (شکل (۱-ج)).

d/e/f: به ترتیب نوع الکترود، زاویه پخ (درجه) و قطر ریشه جوش (میلی متر) هستند.

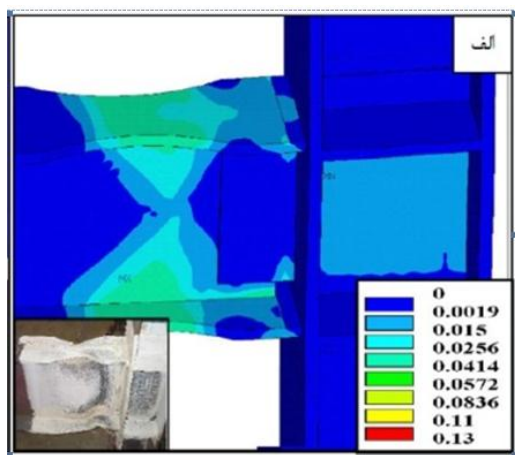


شکل ۴- (الف) مدل تحلیلی نمونه آزمایش S6، (ب) DB700-SW دارای اتصالات RBS، (ج) نمونه آزمایشی RDH1 و (د)، (ه)، (و) نقاط بحرانی متناظر

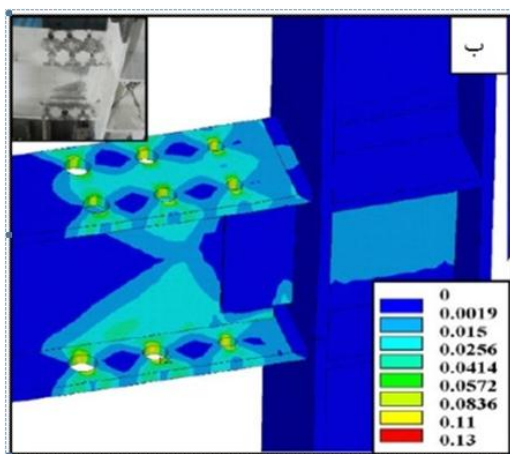
معیار تسلیم Von Mises برای تعریف رفتار پلاستیک انتخاب شد. بر مبنای اطلاعات آزمایش های شرح داده شده، مدل های تحلیلی سه نمونه آزمایش مختلف تعریف شدند. فرمول بندی تغییر شکل های بزرگ المان برای شبیه سازی کماتش چشمه اتصال، بال های تیرها، جان تیر و نیز بال های ستون به کار برده شدند. ویژگی های مواد بکار رفته در آنالیزها، بر مبنای روابط تنش- کرنش اندازه گیری شده در آزمایش های مینا بودند.

نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش فون میسر نسبت تنش سه محوری نامیده می شود. این نسبت کمیت مهمی برای گسیختگی شکل پذیر فلز است. نسبت تنش سه محوری بین ۰/۷۵- و ۱/۵- می تواند کاهش شدید در کرنش گسیختگی فلزات ایجاد کند و مقادیر کمتر از ۱/۵- باعث ایجاد گسیختگی ترد می شود. بر مبنای این معادله، یک مقدار RI بزرگتر، پتانسیل محتمل تری برای ترک خوردگی را نشان می دهد. رفتار کماتش غیر خطی، با بکار بردن نقص هندسی اولیه سازگار با شکل اولین مود کماتش نمونه آزمایش، در این آنالیز وارد شده است و

به لنگر پلاستیک اسمی کاهش داشته باشد. ضوابط مزبور با توجه منحنی بار چرخه ای شکل (۲) برای مدل‌های تحلیل شده برقرار می‌باشند.



الف) توزیع کرنش پلاستیک معادل برای مدل تحلیلی نمونه‌های آزمایش DB700-SW [۱۳]، در تغییر شکل نسبی طبقه ۰/۰۵ رادیان



ب) توزیع کرنش پلاستیک معادل مدل تحلیلی نمونه‌های آزمایش RDH1 [۱۴]، در تغییر شکل نسبی طبقه ۰/۰۵ رادیان

شکل ۵- توزیع کرنش پلاستیک معادل برای نمونه‌های آزمایش RDH1 و DB700-SW [۱۳ و ۱۴]

۳- توصیف مدل‌های تحلیلی مقایسه‌ای

در این مطالعه روش تحلیل اجزا محدود که قبلاً توصیف شده، برای بررسی تأثیر دامنه بسیار بزرگتری از متغیرهای هندسی نسبت به مدل‌های تحلیلی اولیه در حیطه مشخصات هندسی کارهای آزمایشگاهی [۱۴-۱۲] به کار گرفته می‌شود. این متغیرها در مدل‌های تحلیلی ارائه شده در این بخش ارزیابی شده‌اند. مقادیر اولیه قطرسوراخ‌ها در تحلیل برابر قطر سوراخ‌های نمونه‌های آزمایش RDH1 تعریف شده‌اند. در رابطه با این

۲-۲- راست آزمایی تحلیلی:

در تحقیق حاضر، نمودارهای بار چرخه‌ای در مقابل تغییر شکل نسبی طبقه، برای نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی S6، RDH1 و DB700-SW ارائه می‌شوند [۱۸]. شکل‌های (۲-الف)، (ج) و (ه) و (۲-ب)، (د) و (و) به ترتیب پاسخ‌های چرخه‌ای تحلیلی و سه نمونه آزمایش مرجع مطابق آنها را نشان می‌دهند. مقایسه‌ای از پاسخ‌های مدل‌های تحلیلی و نتایج آزمایش نشان می‌دهد، که مدل‌های تحلیلی می‌توانند پاسخ غیر الاستیک نمونه‌های آزمایش را به طور دقیق پیش بینی کنند. پاسخ پیش بینی شده تحلیلی تطابق خوبی با آزمایش همه نمونه‌های آزمایشی مینا دارد. پارامتر دیگری که مطابقت خوبی با نتایج داشت، کرنش پلاستیک معادل (ϵ_{eqv}^{pl}) می‌باشد. این پارامتر موثر که نشان دهنده رفتار ترد یا شکل پذیر اتصال خواهد بود به وسیله رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$\epsilon_{eqv}^{pl} = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\nu)} \times \left[(\epsilon_x^{pl} - \epsilon_y^{pl})^2 + (\epsilon_y^{pl} - \epsilon_z^{pl})^2 + (\epsilon_x^{pl} - \epsilon_z^{pl})^2 + \frac{2}{3}(\gamma_{xy}^{pl2} + \gamma_{yz}^{pl2} + \gamma_{xz}^{pl2}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

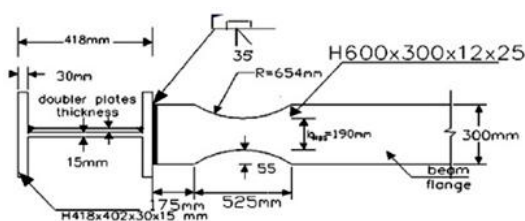
که ϵ_{eqv}^{pl} و γ_{ij}^{pl} مؤلفه‌های کرنش نرمال پلاستیک، $i=x,y,z$ و $j=xy,yz,xz$ مؤلفه‌های کرنش برشی پلاستیک و ν ضریب پواسون می‌باشد. نتایج کرنش پلاستیک معادل (EPEQ) با استفاده از نمودارهای توزیع کرنش نشان داده شده در شکل (۵) برای مدل تحلیلی نمونه‌های آزمایش RDH1 و DB700-SW نشان داده می‌شوند و مطابقت خوبی با نواحی رنگ ریختگی آزمایشگاه نشان داده شده در این شکل دارند. این پارامتر را می‌توان برای پیش بینی توزیع تغییر شکل‌های پلاستیک با شدت متفاوت به کار برد. بر مبنای نتایج تحلیلی، مقادیر کرنش پلاستیک معادل برای مدل تحلیلی نمونه‌های آزمایشی RDH1 در نواحی بال سوراخ شده، هنگامی که یک ترک در نزدیکی لبه یکی از سوراخ‌ها برای نمونه متناظر آزمایشگاهی رخ می‌دهد، در تغییر شکل نسبی طبقه ۰/۰۴ و ۰/۰۵ رادیان به ترتیب به ۰/۱۲ و ۰/۲۳ می‌رسند. در حالیکه این مقادیر در مدل تحلیلی نمونه‌های آزمایش DB700-SW در تغییر شکل نسبی طبقه ۰/۰۴ و ۰/۰۵ رادیان به ترتیب به ۰/۳۸ و ۰/۴۲۸ می‌رسند. بر اساس مقررات لرزه‌ای AISC برای اتصالات خمشی ویژه [۱۸]، لازم است اتصالات توانایی رسیدن به تغییر شکل نسبی معادل ۰/۰۴ رادیان در چرخش اتصال را داشته و مقاومت خمشی اتصال در بر ستون به ازای چرخش ۰/۰۴ رادیان حداکثر ۲۰ درصد نسبت

سوراخ‌های دارای اندازه قطری مشابه، به عنوان سومین الگوی سوراخ (Dh3) می‌باشد (شکل ۶-ه)). در نهایت مجموعه ششم شامل سوراخ‌ها با اندازه قطری مختلف تقلید شده از هندسه اتصالات RBS است که به عنوان چهارمین الگوی سوراخ‌ها (Dh4) می‌باشد (شکل ۶-و)).

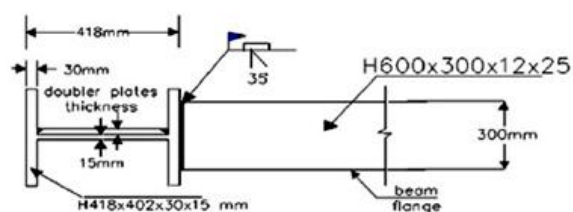
مصلح مورد استفاده برای تیرها و ستون‌ها از دو نوع St37 و SM490YA می‌باشد که برای فولاد St37، مقاومت حد تسلیم 240 kg/cm^2 و برای فولاد SM490YA، مقاومت حد تسلیم 360 kg/cm^2 است که مدول الاستیسیته $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و ضریب پواسون $\nu = 0.3$ می‌باشد. جهت رفتار دقیق مصلح، منحنی تنش-کرنش فولاد ST37 و SM490YA بوسیله گزینه سخت شوندگی چند خطی مدل‌سازی و برای مدل‌سازی جوش نفوذی اتصال مستقیم تیر به ستون از الکتروود E7018 با تنش تسلیم 3990 kg/cm^2 و تنش نهایی 4820 kg/cm^2 استفاده شد.

آزمایش‌ها سه طرح سوراخ برای مدل تحلیلی تعریف شده است. مقادیر قطر سوراخ بزرگ متوسط و کوچک به ترتیب برابر ۶۵ و ۵۵ و ۴۵ میلی متری باشند که برابر ۲۲٪، ۱۸٪ و ۱۳٪ عرض بال می‌باشند. فاصله میان سوراخ‌ها، نیز برابر مقدار اولیه در آزمایش مرجع می‌باشد (شکل ۱-پ)). با توجه به نوع اتصال‌ها و الگوی‌های متفاوت محتمل سوراخ کاری شش مجموعه تحلیلی تعریف می‌شود:

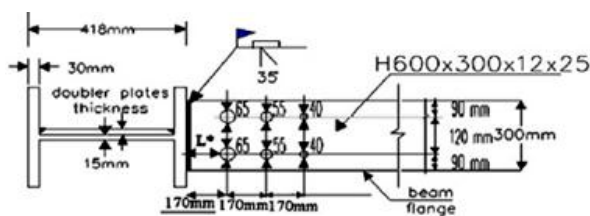
اولین مجموعه، مدل تحلیلی با اتصالات WUF بود (شکل ۶-الف)). دومین مجموعه اتصالات RBS می‌باشد (شکل ۶-ب)). سومین مجموعه اتصالات بال سوراخ شده با مقادیر افزایش قطر سوراخ با افزایش فاصله مرکز ردیف سوراخ تا بر ستون، به عنوان اولین الگوی سوراخ (Dh1) می‌باشد (شکل ۶-ج)). مجموعه چهارم، اتصالات بال سوراخ شده دارای پیکربندی مقادیر قطر سوراخ کاهش یافته با افزایش فاصله مرکز ردیف سوراخ‌ها تا بر ستون، یعنی دومین الگوی سوراخ (Dh2) می‌باشد (شکل ۶-د)). پنجمین مجموعه نیز متشکل از



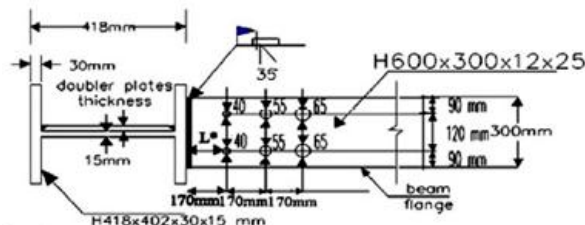
(ب) مدل تحلیلی با اتصالات RBS (دومین مجموعه)



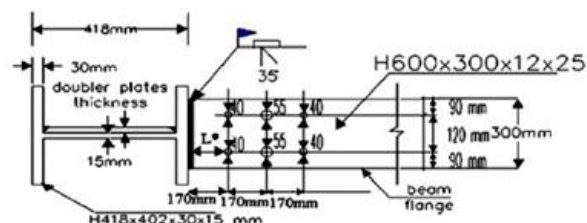
(الف) مدل تحلیلی با اتصالات WUF (اولین مجموعه)



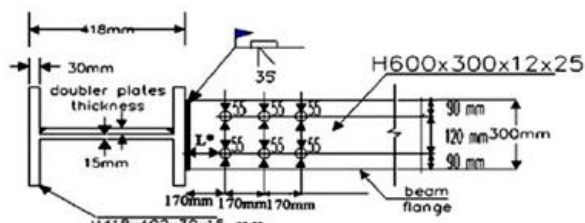
(د) مدل تحلیلی با دومین پیکربندی سوراخ DH2 (چهارمین مجموعه)



(ج) مدل تحلیلی با اولین پیکربندی سوراخ DH1 (سومین مجموعه)



(و) مدل تحلیلی با چهارمین پیکربندی سوراخ DH4 (ششمین مجموعه)



(ه) مدل تحلیلی با سومین پیکربندی سوراخ DH3 (پنجمین مجموعه)

شکل ۴- مدل‌های مختلف تحلیلی اتصالات در مطالعات اجزای محدود

طبق FEMA-355D [۱۸]، طراحی چشمه اتصال، شامل ضخامت ورق‌های تقویتی، بر مبنای شرطی از تعادل میان مقاومت تسلیم خمشی تیر و مقاومت برشی چشمه اتصال می‌باشد. برای چنین اتصالی تسلیم خمشی تا بر ستون توسعه می‌یابد. تقاضای برش تولید شده بوسیله تسلیم خمشی تیر را، می‌توان به وسیله رابطه ۳ در مقررات FEMA-355D [۱۸]، تعریف کرد:

$$V_{pzm} = \frac{\sum M_y}{d_b} \left(\frac{L}{L - d_c - 2l_p} \right) \left(\frac{h - d_b}{h} \right) \quad (۳)$$

که V_{pzm} برشی است که از تیر به چشمه اتصال منتقل می‌شود، L طول دهانه تیر، h ارتفاع کلی ستون، d_b عمق مقطع تیر، d_c ارتفاع مقطع ستون، M_y ظرفیت لنگر تسلیم تیر و l_p طول ورق اتصال می‌باشد. مقاومت تسلیم برشی چشمه اتصال بوسیله رابطه ۴ در مقررات FEMA-355D [۱۸]، تعریف می‌شود:

$$V_y = 0.6 F_{yc} \cdot d_c \cdot t_{wc} \quad (۴)$$

که F_{yc} تنش تسلیم جان ستون، t_{wc} ضخامت جان ستون (شامل ضخامت جان ستون و ورق‌های تقویتی) می‌باشد. این توصیه نامه پیشنهاد می‌کند که اگر $0.9 \ll V_{pzm}/V_y \ll 0.6$ باشد، حاشیه‌ای ایمنی برای جلوگیری از تمرکز تنش اضافی در اتصال

یا تغییر شکل بیش از حد اتصالات تامین می‌شود. لازم به ذکر است که ضخامت ورق تقویتی به کار رفته در آزمایش‌های توصیف شده مربوط به آستانه پایداری این معیار، یعنی $V_{pzm}/V_y \approx 0.7$ می‌باشد. برای توسعه نتایج آزمایش‌های مبنای، نسبت‌های $V_{pzm}/V_y = 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1$ نیز در مدل‌های تحلیلی گنجانده شده‌اند.

بر مبنای نوع اتصال و الگوی سوراخ‌ها (مجموعه WUF، مجموعه RBS، مجموعه Dh1، مجموعه Dh2، مجموعه Dh3 و مجموعه Dh4) و پنج نسبت V_{pzm}/V_y ، تعداد کلی ۳۰ مدل تحلیلی قابل مقایسه تعریف شدند (جدول ۲). قاعده نامگذاری شامل بر دو بخش می‌باشد: بخش اول، نوع اتصال را نشان می‌دهد همانطور که در شکل (۶) دیده می‌شود و بخش دوم نسبت V_{pzm}/V_y را نشان می‌دهند. این مدل‌ها طبق AISC [۱۶]، طراحی شدند. مقادیر نسبت مقاومت ورق‌های مضاعف (شامل ضخامت جان ستون)، در جدول (۲) برای هر مجموعه نشان داده شده است.

جدول ۲- خلاصه مدل‌های تحلیلی

(V_{pzmy}/V_y) نسبت مقاومت برشی چشمه اتصال					نوع اتصال		مجموعه
۱/۱	۱/۰	۰/۹	۰/۸	۰/۷			
WUF-1.1	WUF-1	WUF-0.9	WUF-0.8	WUF-0.7	نام مدل تحلیلی	WUF	۱
۱/۰	۱/۲	۱/۶	۲/۰	۲/۵	ضخامت ورق مضاعف (میلی متر)		
RBS-1.1	RBS-1	RBS-0.9	RBS-0.8	RBS-0.7	نام مدل تحلیلی	RBS	۲
۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱/۰۵	ضخامت ورق مضاعف (میلی متر)		
Dh1-1.1	Dh1-1	Dh1-0.9	Dh1-0.8	Dh1-0.7	نام مدل تحلیلی	Dh1	۳
۰/۸	۱/۰	۱/۴	۱/۸	۲/۲	ضخامت ورق مضاعف (میلی متر)		
Dh-1.1	Dh-1	Dh-0.9	Dh2-0.8	Dh2-0.7	نام مدل تحلیلی	Dh2	۴
۰/۸	۱/۰	۱/۴	۱/۸	۲/۲	ضخامت ورق مضاعف (میلی متر)		
Dh-1.1	Dh-1	Dh-0.9	Dh3-0.8	Dh3-0.7	نام مدل تحلیلی	Dh3	۵
۰/۹	۱/۱	۱/۵	۱/۹	۲/۳۵	ضخامت ورق مضاعف (میلی متر)		
Dh4-1.1	Dh4-1	Dh4-0.9	Dh4-0.8	Dh4-0.7	نام مدل تحلیلی	Dh4	۶
۰/۹	۱/۱	۱/۴	۱/۸	۲/۲۵	ضخامت ورق مضاعف (میلی متر)		



۴- اثرالگوهای مختلف سوراخ‌ها و نسبت مقاومت برشی بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات

نتایج همه مدل‌های تحلیلی تعریف شده در بخش ۳، در این بخش ارائه می‌شوند. همانند بخش قبلی، تغییر شکل نسبی طبقه 0.04 رادیان، مبنای مقایسه شاخص‌های تحلیلی خواهد بود. توزیع تنش فون میسر برای مدل تحلیلی نمونه‌های آزمایشی WUF، RBS و Dh1، برای نسبت‌های مقاومت $V_{pzm}/V_y = 0.7/9.1/1$ ، در تغییر شکل نسبی طبقه 0.04 رادیان مطالعه گردید. بر مبنای این توزیع، برای نسبت مقاومت بیشترین تنش فون میسر در جوش اتصال بال تیر به بال ستون اتفاق افتاده است و مقدارش به 4100 kg/cm^2 می‌رسد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تنش فون میسر قابل توجهی در مجاورت سوراخ‌ها، متمرکز شده است. بعبارت دیگر، اتصالات سوراخ شده می‌توانند تمرکز تنش را از جوش نفوذی به ناحیه سوراخ شده روی بال انتقال دهند.

با افزایش نسبت مقاومت برشی (V_{pzm}/V_y)، مقادیر تنش فون میسر در جوش نفوذی (CJP) اتصال تیر به ستون در تغییر شکل نسبی 0.04 افزایش می‌یابند. این بعلا مشارکت بیشتر چشمه اتصال در جابجایی جانبی می‌باشد. بنابراین تمرکز کرنش پلاستیک از بال‌های تیر به بر ستون و جوش نفوذی منتقل شده و قابلیت اتصالات سوراخ دار برای مدل تحلیلی Dh1-1.1 در انتقال تجمع کرنش پلاستیک از بر ستون به ناحیه ضعیف عمده، یعنی ناحیه بال سوراخ شده کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر، پتانسیل اتصالات سوراخ دار در انتقال تمرکز تنش فون میسر از جوش نفوذی به ناحیه سوراخ شده روی بال، با افزایش نسبت مقاومت V_{pzm}/V_y کاهش می‌یابد.

کرنش پلاستیک معادل (EPEQ) مطابق با معادله (۲) به عنوان یک شاخص تحلیلی، یک مقدار تقاضای کرنش غیرالاستیک محلی بوده و در ارزیابی و مقایسه شکست جوش نفوذی با توجه به الگوهای مختلف سوراخ نیز مفید می‌باشد.

برخی مطالعات توسط EL-Tawil [۲۰] و Ferreria [۲۱]، نیز اظهار داشته اند که آغاز ترک خوردگی را می‌توان با دقت مناسب بوسیله تعریف مقدار آستانه کرنش پلاستیک معادل (EPEQ) برای حالت تنش-کرنش معین پیش بینی کرد. شکل (۷) کرنش پلاستیک معادل در امتداد خط جوش نفوذی را در تغییر شکل نسبی طبقه 0.04 رادیان برای انواع مختلف

اتصال، الگوی های سوراخ کاری متفاوت و نسبت مقاومت 0.7 و 0.9 نشان می‌دهند.

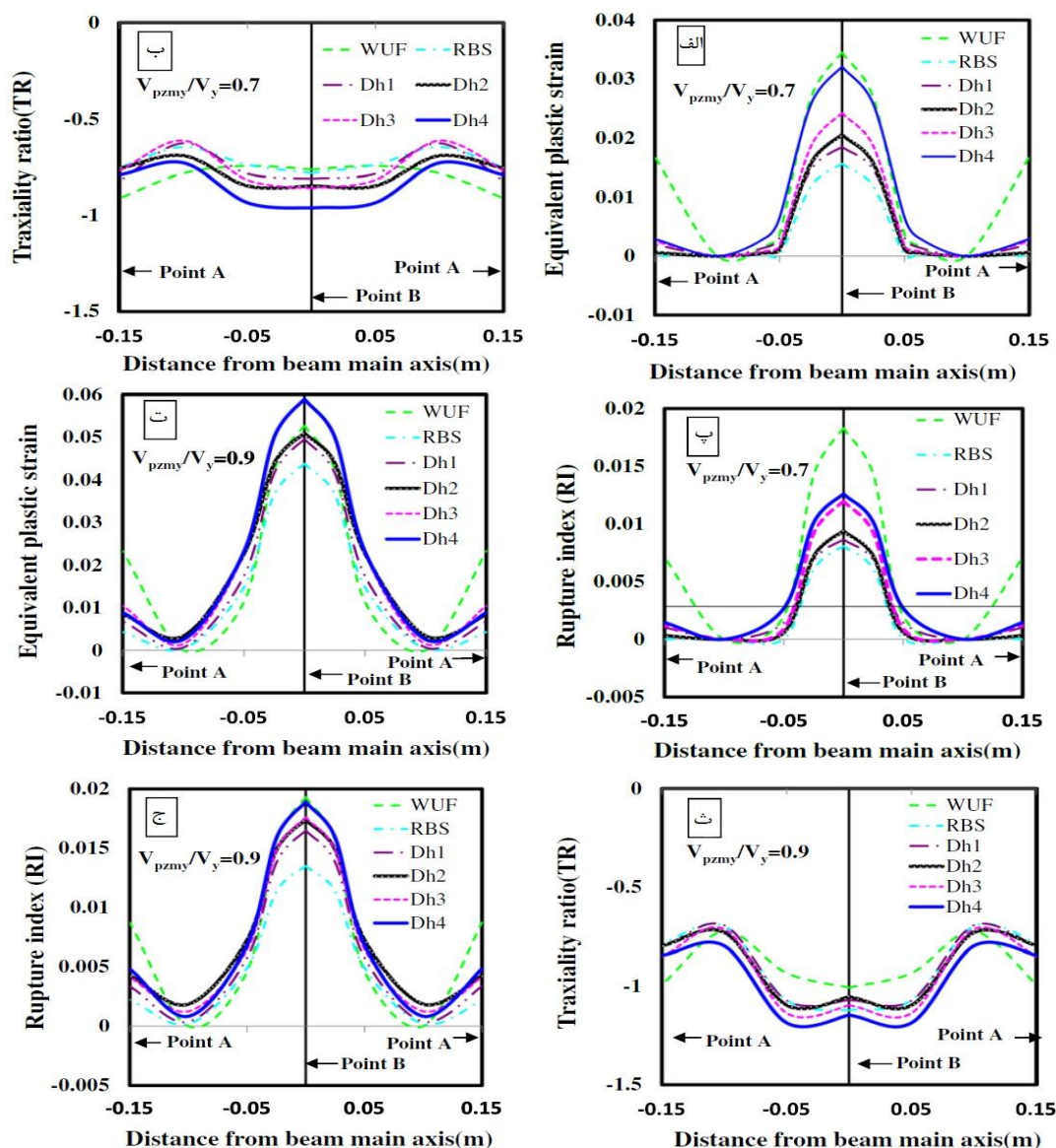
بر مبنای این شکل، مدل تحلیلی با اتصالات RBS در مقایسه با سایر مدل‌های تحلیلی، حداقل مقادیر کرنش پلاستیک معادل (EPEQ) را دارد. اما مدل تحلیلی Dh1 در مقایسه با مدل‌های تحلیلی Dh2، Dh3، Dh4 و WUF مخصوصاً برای نسبت $V_{pzm}/V_y = 0.7$ مقادیر کوچکتری از کرنش پلاستیک معادل را دارد و درصد کاهش کرنش پلاستیک معادل، مدل‌های تحلیلی RBS، DH1، DH2، DH3 و DH4 نسبت به مدل تحلیلی WUF در جدول (۳) آورده شده است.

به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای مدل پیشنهادی DH1 با نسبت مقاومتی $V_{pzm}/V_y = 0.7$ نمودار هیستریزس نمونه DH1 با نمودار هیستریزس نمونه‌های RBS و WUF در شکل (۸) مقایسه می‌شود. از نمودارهای هیستریزس لنگر نرمال شده M/M_p بر حسب زاویه دریافت طبقه شکل (۸)، برای نمونه‌ها می‌توان دریافت که اتصالات WUF از نظر مقدار لنگر نرمال شده (بیانگر بهره تیر از حداکثر ظرفیت پلاستیک خود در محل مفصل پلاستیک) دارای کمترین مقدار نسبت به دو نمونه اتصال RBS و DH1 است که نشان دهنده، توانایی کم اتصال WUF در به کارگیری حداکثر ظرفیت پلاستیک تیر و نزدیکی رفتار لرزه‌ای نمونه DH1 به نمونه از پیش تایید شده RBS است. بر مبنای بررسی قبلی، اغلب تنش هیدرواستاتیک کششی بزرگی بوسیله تنش‌های اصلی بزرگ ایجاد می‌شود و به طور کلی دلالت بر پتانسیل بیشتری برای شکستگی ترد دارد [۱۹ و ۲۰]. در حضور یک ترک یا نقص، یک تنش هیدرواستاتیک کششی بزرگ می‌تواند احتمال شکستگی ترد را افزایش دهد [۲۲]. فرآیند آغاز ترک به وسیله شرایط تنش سه محوری کششی بالایی (یعنی یک تنش کششی هیدرواستاتیک بالا) ایجاد می‌شود که منجر به تجمع آسیب از طریق به هم پیوستگی و تشکیل حفره‌های ریز می‌شود [۲۳ و ۲۴]. نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش فون میسر یعنی σ_m/σ_{eff} که در مخرج معادله (۱) ظاهر می‌شود، نسبت تنش سه محوری (TR) نامیده می‌شود. EL-Tawil و همکارانش [۲۰]، گزارش کرده‌اند که مقادیر نسبت تنش سه محوری (TR) کوچکتر از ۱/۵- می‌توانند شکستگی ترد ایجاد کند، در حالیکه مقادیر فوق‌الذکر که بین ۱/۵- و ۰/۷- قرار می‌گیرند باعث کاهش قابل توجهی در کرنش گسیختگی فلزات می‌شوند. شکل (۷-ب و ث)



همه مدل‌های تحلیلی با اتصال مختلف برای $V_{pzm}/V_y = 0/9$ (شکل ۷-ث) کمترین مقدار دارد که به کمتر از $1/3$ می‌رسد. در حالیکه مقادیر متناظر همه مدل‌های تحلیلی برای $V_{pzm}/V_y = 1/7$ در شکل (۷-ب) دیده می‌شود به $0/95$ می‌رسند. بنابراین همان طور که پیش بینی شده، احتمال گسیختگی در نقاط بحرانی ۱ و ۲ با افزایش نسبت مقاومت برشی V_{pzm}/V_y افزایش می‌یابد.

نسبت تنش سه محوری مدل تحلیلی پارامتری برای $V_{pzm}/V_y = 0/7, 0/9$ را نشان می‌دهند. نمودار نسبت تنش سه محوری مدل تحلیلی WUF دارای تفاوت‌های قابل توجهی نسبت به سایرین می‌باشد. بعبارت دیگر نسبت تنش سه محوری مدل‌های تحلیلی دارای بال سوراخ شده، شباهت بیشتری به اتصالات کاهش یافته بال (RBS) مخصوصاً برای نسبت مقاومت برشی $V_{pzm}/V_y = 0/9$ دارند. همچنین نسبت تنش سه محوری



شکل ۷- (الف)، (ب)، (پ): مقادیر کرنش پلاستیک معادل (EPEQ)، نسبت تنش سه محوری (TR) و شاخص گسیختگی (RI) در امتداد خط جوش نفوذی CJP در تغییر شکل نسبی طبقه $0/04$ رادیان برای پیکربندی‌های مختلف سوراخ و نسبت $V_{pzm}/V_y = 0/7$ و (ت)، (ث)، (ج): برای نسبت $V_{pzm}/V_y = 0/9$

جدول ۳- درصد کاهش کرنش پلاستیک معادل، مدل‌های تحلیلی

مدل‌های اتصال	نسبت مقاومت برشی چشمه اتصال V_{pzm}/V_y	فاصله از محور اصلی تیر (سانتی متر)	مقدار کرنش پلاستیک معادل جوش اتصال تیر به ستون (EPEQ)	درصد کاهش کرنش پلاستیک مدل‌ها نسبت به مدل اتصال WUF
RBS	۰/۷	۰	۱/۵۷e-۰۲	٪۵۴/۵
		۱۵	۱/۸۶e-۰۵	٪۹۹/۹
	۰/۹	۰	۴/۳۸e-۰۲	٪۱۷
		۱۵	۴/۲۹e-۰۳	٪۸۱/۶
Dh1	۰/۷	۰	۱/۸۵e-۰۲	٪۴۶/۵
		۱۵	۱/۹۲e-۰۳	٪۸۸/۶
	۰/۹	۰	۴/۹۶e-۰۲	٪۶
		۱۵	۶/۷۸e-۰۳	٪۷۱
Dh2	۰/۷	۰	۲/۰۶e-۰۲	٪۴۰
		۱۵	۶/۲۱e-۰۴	٪۹۶/۳
	۰/۹	۰	۵/۱۰e-۰۲	٪۳/۲
		۱۵	۸/۴۲e-۰۳	٪۶۵
Dh3	۰/۷	۰	۲/۴۲e-۰۲	٪۲۹/۸۵
		۱۵	۲/۴۹e-۰۳	٪۸۵
	۰/۹	۰	۵/۹۰e-۰۲	٪-۱۲
		۱۵	۱/۰۴e-۰۲	٪۵۵
Dh4	۰/۷	۰	۳/۲۱e-۰۲	٪۷
		۱۵	۲/۸۶e-۰۳	٪۸۳
	۰/۹	۰	۵/۹۰e-۰۲	٪-۱۲
		۱۵	۸/۸۳e-۰۳	٪۶۲

* علامت منفی نشان دهنده افزایش درصد کرنش پلاستیک معادل نمونه‌ها نسبت به نمونه WUF می‌باشد.

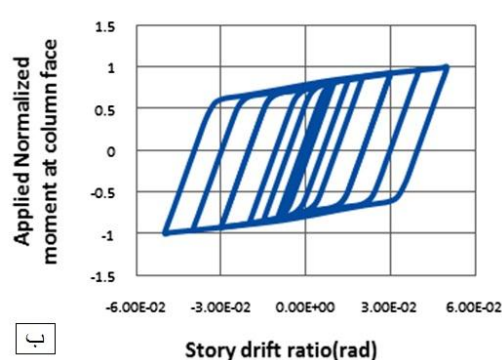
۵- نتیجه گیری و جمع بندی

بر مبنای بررسی‌های تحلیلی انجام شده در این تحقیق می‌توان نتایج زیر را اقتباس کرد:

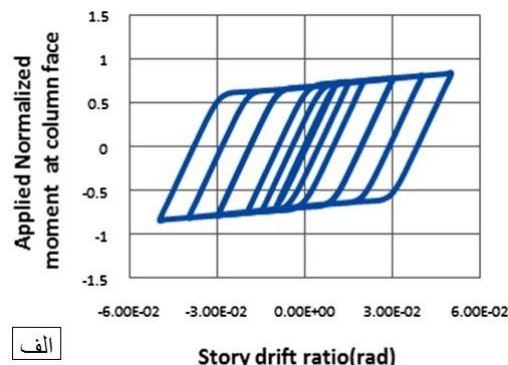
- نتایج تحقیق نشان داد که ایجاد سوراخ با مته می‌تواند ناحیه تمرکز تنش و تجمع کرنش را از جوش نفوذی (CJP) نزدیک به بر ستون، به ناحیه مجاور با سوراخ‌ها تغییر دهد و مود ترک خوردگی ترد نامطلوب مربوط به ریشه جوش را منتفی نماید. به علاوه ساخت آسان‌تر اتصالات بال سوراخ شده در مقایسه با ساخت اتصالات مقطع تیر کاهش یافته (RBS) یک مزیت مهم می‌باشد.

شکل (۷-پ و ج) نیز شاخص گسیختگی (RI) برای انواع مختلف اتصال، الگوهای متفاوت سوراخ‌ها و نسبت‌های مختلف $V_{pzm}/V_y = ۰/۷$ و $۰/۹$ را نشان می‌دهند. در رابطه با این شکل، مقدار حداکثر شاخص گسیختگی مدل تحلیلی دارای اتصالات بال سوراخ شده، مخصوصاً Dh1 نزدیکی بیشتری به مدل تحلیلی دارای اتصال RBS برای $V_{pzm}/V_y = ۰/۷$ دارد. اما این مطلب برای مدل تحلیلی دارای نسبت $V_{pzm}/V_y = ۰/۹$ معتبر نمی‌باشد و شاخص گسیختگی اتصالات بال سوراخ شده دارای اولین الگوی سوراخ‌ها، مقدار بیشتری نسبت به مدل تحلیلی دارای اتصالات RBS یعنی RBS-0.9 می‌باشد.

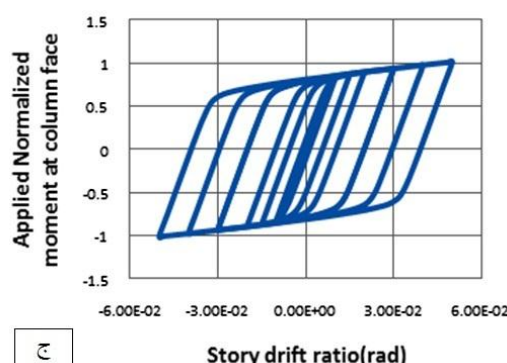




ب) RBS



الف) WUF



ج) Dh1

شکل ۸- نمودار هیستریزیس مدل‌های تحلیلی برای نسبت مقاومتی $V_{pzm}/V_y = 0.7$

نتایج تحلیلی این تحقیق نشان دادند که اتصالات بال سوراخ شده با اولین الگوی سوراخ، می‌توانند شاخص گسیختگی را در نقاط بحرانی A و B بر روی جوش نفوذی (CJP) اتصال تیر به ستون هنگامی که چشمه اتصال قوی می‌باشد، به طور موثر کاهش دهند. به عبارت دیگر، مدل تحلیلی Dh1 دارای نسبت مقاومت برشی $(V_{pzm}/V_y = 0.7)$ می‌تواند برای انتقال تمرکزهای تنش و تجمع کرنش پلاستیک معادل از جوش نفوذی اتصال تیر به ستون به نقاط ضعیف عمده، یعنی ناحیه بال سوراخ شده مؤثرتر باشد و جایگزینی برای اتصال RBS محسوب شود.

۶- مراجع

- [1] Youssef, N.F.G., Bonowitz, D. and Gross, J.L. (1995), "A Survey of Steel Moment Resisting Frame Buildings Affected by the 1994 Northridge Earthquake", NIST, Report No. NISTIR 5625, Gaithersburg.
- [2] Popov, E.P., Yang, T. and Chang, S. (1998), "Design of Steel MRF Connections Before and After 1994 Northridge Earthquake", Engineering Structures, Vol. 20, No. 12, pp. 1030-038.



- [20] El-Tawil, S., Mikesell, T., Vidarsson, E. and Kunnath, S. (1998), "Strength and Ductility of FR Welded Bolted Connections", Report No. SAC/BD-98/01, Sacramento, CA: SAC Joint Venture.
- [21] Ferreira, J., Castiglioni, C.A., Calado, L. and Agatino, M.R. (1998), "Low Cycle Fatigue Strength Assessment of Cruciform Welded Joints", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 47, No. 3, pp. 223-244.
- [22] Kanvinde, A.M. and Deierlein, G.G. (2007), "A Cyclic Void Growth Model to Assess Ductile Fracture in Structural Steel due to Ultra Low Cycle Fatigue", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 133, No. 6, pp. 701-712.
- [23] Mao, C., Ricles, J., Lu, L.W. and Fisher, J. (2001), "Effect of Local Detail on Ductility of Welded Moment Connections", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 127, No. 9, pp. 1036-1044.
- [24] Ricles, J.M., Mao, C., Lu, L.W. and Fisher, J. (2003), "Ductile Details for Welded Unreinforced Moment Connections subject to Inelastic Cyclic Loading", *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 1, pp. 667-680.
- [3] Whittaker, A., Gilani, A. and Bertero, V. (1998), "Evaluation of Pre-Northridge Steel Moment Resisting Frames Joint", *Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 7, pp. 263-283.
- [4] Han, S.W., Kwon, G.U. and Moon, K.H. (2007), "Cyclic Behavior of Post-Northridge WUF-B Connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, No. 3, pp. 365-374.
- [5] Engelhardt, M.D., Fry, G., Johns, S., Venti, M. and Holliday, S. (2000), "Behavior and Design of Radius Cut, Reduced Beam Section Connections", Rep. No. 00/17, SAC, California.
- [6] Roeder, C.W. (2002), "Connection Performance for Seismic Design of Steel Moment Frames", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 128, No. 4, pp. 517-525.
- [7] Uang, C., Yu, Q., Noel, S. and Gross, J. (2000), "Cyclic Testing of Steel Moment Connections Rehabilitated with RBS or Welded Haunch", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 126, No. 1, pp. 57-68.
- [8] Chen, S. and Chao, Y.C. (2001), "Effect of Composite Action on Seismic Performance of Steel Moment Connections with Reduced Beam Sections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 57, No. 4, pp. 417-434.
- [9] Scott, J., Fry, T. and Engelhardt, M.D. (200), "Experimental Evaluation of Cyclically Loaded Reduced Beam Section Moment Connections", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 128, No. 4, pp. 441-451.
- [10] Lee, C., Jeon, S.W., Kim, J.H. and Uang, C.M. (2005), "Effects of Panel Zone Strength and Beam Web Connection Method on Seismic Performance of Reduced Beam Section Steel Moment Connections", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 131, No. 12, pp. 1854-1865.
- [11] Farrokhi, H., Danesh, F. and Eshghi, S.A. (2009), "Modified Moment Resisting Connection for Ductile Steel Frames: Numerical and Experimental investigation", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, No. 10-11, pp. 2040-2049.
- [12] Chen, C.C., Chen, S.W., Chung, M.D. and Lin, M.C. (200), "Cyclic Behavior of Unreinforced and Ribreinforced Moment Connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, No. 1, pp. 1-21.
- [13] Lee, C., Woo, J., Kim, J.H., Kim, J.H. and Uang, C. (2004), "Seismic Performance of Reduced Beam Section Steel Moment Connection: Effect of Panel Zone Strength and Beam Web Connection Method", 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE), Vancouver, Canada, Paper No. 3449.
- [14] Vetr, M. and Haddad, H. (2010), "Study of Drilled Flange Connection as Moment Resisting Frame", Report No. 3732; International Institute of Earthquake Engineering and Seismology; Tehran; Iran.
- [15] ATC 24, (1992), Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures, Applied Technology Council.
- [16] AISC 341-10, (2010), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, Chicago (IL): American Institute of Steel Construction.
- [17] ANSYS, (1998), User's Manual, Version 5.4. 201. Johnson Road, Houston: ANSYS Inc.
- [18] FEMA, (2000), State of the Art Report on Connection Performance, Report No. FEMA-355D, Federal Emergency Management Agency.
- [19] Hancock, J.W. and Mackenzie, A.C. (1976), "On the Mechanisms of Ductile Failure in High Strength Steels subjected to Multi-Axial Stress States", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 24, No. 2-3, pp. 147-160.