



مطالعه آزمایشگاهی و عددی گسیختگی برش قالبی اعضای کششی فولادی با اتصالات دارای خروج از مرکزیت

سید رضا سیدزاده اطاقسرائی^۱، سید محمد سیدپور^۲، مجتبی جعفری صمیمی^{۳*}، سعید فلاحیان^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه شمال، آمل

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شمال، آمل

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

۴- مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شمال، آمل

* تهران، صندوق پستی ۱۴۶۹۶۶۹۱۹۱، jaafari.mojtaba@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴)

چکیده

یکی از انواع گسیختگی‌ها در اعضای کششی سازه‌های فولادی، گسیختگی برش قالبی است که با ایجاد تنش کششی و برشی در محدوده اتصال، بخشی از قطعه کنده می‌شود و موجب از دست رفتن استحکام قطعه می‌گردد. هدف از این مقاله، مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل اجزای محدود گسیختگی برش قالبی در اتصالات اعضای کششی فولادی گرم نورد شده دارای خروج از مرکزیت می‌باشد. بدین منظور ۸ نمونه آزمایشگاهی از صفحه اتصال با الگوی سوراخ مورب و اتصال دارای خروج از مرکزیت با فولاد نرمه ساختمانی تحت بارگذاری محوری کششی قرار گرفتند. متغیرهای اصلی برای نمونه‌های آزمایش شامل تعداد پیچ‌های اتصال، فواصل پیچ‌ها در راستای موازی و عمود بر امتداد بارگذاری بودند. نتایج مطالعات آزمایشگاهی با نتایج حاصل از پیش بینی روابط موجود (مبتنی بر قاعده $(s^2/4g)$) و همچنین روش تصویر سطوح Samimi و همکارانش (۲۰۱۶)، مقایسه گردید و نقاط ضعف و قوت هر یک شناسایی شد. همچنین نتایج تحلیل‌های عددی انجام گرفته به روش اجزای محدود که با نتایج آزمایشگاهی نیز همخوانی خوبی داشته است، اساس روش تصویر سطوح را تایید می‌کند. با توجه به نتایج توزیع تنش‌های کششی حقیقی در سطوح مورب موجود در محدوده گسیختگی برش قالبی اتصالات دارای خروج از مرکزیت، اثرات بارگذاری خارج از مرکز نمایان شده است که نیاز به عامل توزیع تنش‌های کششی غیر یکنواخت را توجیه می‌کند.

واژگان کلیدی

اتصالات پیچی، اتصالات دارای خروج از مرکزیت، فولاد گرم نورد شده، اعضای کششی، برش قالبی

Experimental and Numerical Study of Block Shear Rupture of Steel Tensile Members with Connections have Eccentricity

S.R. Seyedzadeh Otaghsaraei, S.M. Seyedpoor, M. Jafari Samimi, S. Fallahian

Abstract

One of the types of ruptures in the tensile members of steel structures is the block shear failure in which by creating tensile and shear stresses in the connection area, a part of section is torn away and it causes the strength loss of the section. The main aim of this paper is to experimentally study and finite element analysis of block shear failure having staggered pattern in connections of hot rolled steel tensile members. For this purpose, eight laboratory samples from the gusset plate with staggered pattern and connections have eccentricity with constructional mild steel were applied by a tensile axial loading. The main variables for the test specimens include the number of connection bolts, the bolt spacing along parallel and perpendicular to the loading length. The results of laboratory studies were compared with those obtained from the prediction of existing relationships (based on the rule $(s^2/4g)$) as well as the plane decomposition method of Samimi et al. (2016) and the strengths and weaknesses of each were identified. Furthermore, the results of numerical analyses made by finite element method, which also have a good consistency with the test results, confirm the basis of the plane decomposition method. Considering the results of the real tensile stress distribution at the staggered planes of the block shear failure area of the connections have eccentricity, the effects of loading eccentricity have been appeared which justifies the need for considering the factor of non-uniform tensile stress distribution.

Keywords

Bolted connections, Connections have eccentricity, Hot rolled steel, Tensile members, Block shear

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۷۷



گسیختگی برش قالبی یکی از انواع حالات گسیختگی اعضای فولادی با اتصال پیچی تحت بارگذاری کششی می‌باشد. از زمان کشف این نوع گسیختگی در پی فرو ریختن سقف ساختمان تجارت جهانی هارتفورد^۱ در سال ۱۹۷۸، تاکنون تحقیقات عددی و آزمایشگاهی بسیاری جهت شناخت بیشتر رفتار این نوع گسیختگی و همچنین بهبود روابط ارائه شده برای آن انجام شده است. تحقیقات موجود در زمینه شکست برش قالبی حاکی از آن است که طول اتصال و شرایط هندسی اتصال در میزان استحکام و حتی نوع شکست موثر است. یکی از موارد شرایط هندسی اتصال، الگوی سوراخکاری مورب است که علی‌رغم وجود تحقیقات آزمایشگاهی کم در این زمینه، توسط سایر محققین نشان داده شده است که وجود سطوح مورب در الگوی سوراخکاری، می‌تواند رفتار شکست برش قالبی قطعه را تغییر دهد [۴-۱]. در مطالعه اخیر Samimi و همکارانش [۱] نشان داده شد که در سطوح مورب موجود در مسیر شکست برش قالبی اعضا، ترکیبی از تنش‌های برشی و کششی حاکم است که با استفاده از روش تصویر سطوح^۲ پیشنهادی آنها، امکان تشخیص سهم هریک از تنش‌های کششی و برشی سطوح مورب موجود در مسیر شکست برش قالبی، قابل دستیابی است. بطوریکه با توجه به زاویه بین سطوح مورب و امتداد بارگذاری، تصویر سطوح مورب در راستای بارگذاری (سهم تنش برشی) و عمود بر آن (سهم تنش کششی)، انجام می‌گردد که با بهره‌گیری از دو مکانیزم شکستی که توسط استاندارد AISC 2010 [۵] به رسمیت شناخته شده بود، رابطه‌ای برای پیش‌بینی استحکام اعضا معرفی شد. اولین مکانیزم، شکست سطوح کششی به همراه تسلیم سطوح برشی است که در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی گزارش شده است [۶-۹] و مکانیزم دیگر، شکست هر دو سطح کششی و برشی محدوده برش قالبی است.

پیشنهاد استاندارد AISC 2016 [۱۰] برای پیش‌بینی استحکام سطوح مورب موجود در مسیر شکست برش قالبی، لحاظ نمودن سطوح مورب محدوده برش قالبی به عنوان سطوح کششی است و اثرات سطوح مورب را با استفاده از قاعده $s^2/4g$ برای پیش‌بینی استحکام سطوح مورب پیشنهاد می‌کند. این قاعده بر اساس مطالعات Cochrane [۱۱] در سال ۱۹۹۲ برای لحاظ نمودن اثرات سطوح مورب موجود در مسیر شکست نوع مقطع خالص شکل گرفته است. در مواردی که بارگذاری به صورت خارج از مرکز باشد و یا اتصال دارای خروج از

مرکزیت باشد، توزیع تنش کششی به صورت غیر یکنواخت خواهد بود که موجب شکست بلوک برش قالبی به صورت نامتقارن می‌شود. پیشنهاد استاندارد AISC 2016 [۱۰] برای این موارد لحاظ نمودن ضریب کاهش (U_{bs}) به استحکام محاسباتی سطح کششی است. این ضریب کاهش از رابطه $(1 - e/l)$ باید محاسبه شود. که در آن (e/l) نسبت خروج از مرکزیت بار به مرکز سختی تقسیم بر طول کششی بلوک است. در تحقیقی هم که توسط Teh و Yazici [۲] در زمینه گسیختگی برش قالبی مورب با اتصال دارای خروج از مرکزیت انجام شده است، با ارائه رابطه‌ای بر پایه قاعده $(s^2/4g)$ همراه بود. در این تحقیق با اعمال تغییراتی در قاعده $(s^2/4g)$ ، سعی شد تا پیش‌بینی استحکام شکست بهبود یابد و ضریب کاهش اعمالی به استحکام محاسباتی سطح کشش را با رابطه‌ای بر اساس قطر پیچ و فاصله افقی بین پیچ‌ها، پیشنهاد می‌دهد. بطور کلی تحقیقات کمی در زمینه گسیختگی برش قالبی با الگوی سوراخ مورب، صورت گرفته است و اطلاعات کمی برای پی بردن به میزان اعتبار قاعده $(s^2/4g)$ برای این موارد وجود دارد. همچنین در زمینه گسیختگی برش قالبی اتصالات فولادی گرم نورد شده دارای خروج از مرکزیت مطالعه‌ای صورت نگرفته است.

بنابراین هدف از این مقاله ارزیابی میزان دقت روابط مبتنی بر قاعده $(s^2/4g)$ و روش تصویر سطوح مورب پیشنهادی Samimi و همکارانش [۱]، با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های صفحه اتصال با الگوی سوراخ مورب اتصالات دارای خروج از مرکزیت با مد شکست برش قالبی، می‌باشد. همچنین با اعمال عامل کاهش استحکام محاسباتی سطوح کششی محدوده برش قالبی (U_{bs}) جهت لحاظ کردن توزیع تنش کششی غیر یکنواخت، اثرات بارگذاری خارج از مرکز بررسی خواهد شد.

۲- روابط مرتبط

در این بخش روابط موجود جهت پیش‌بینی ظرفیت گسیختگی برش قالبی که مبنای مقایسه در این مطالعه نیز می‌باشند ارائه می‌شوند.

۲-۱- رابطه استاندارد آمریکا

استاندارد AISC 2016 [۱۰] پدیده برش قالبی را یک حالت حادی گسیختگی می‌داند. بطوریکه مسیر شکست همواره در خط مرکزی سوراخ‌های پیچ است و مسیر تسلیم نیز در خط



مکانیزم تسلیم سطوح مورب و شکست سطوح برشی که به صورت رابطه (۴) است:

$$P_u = 0.6F_u A_{av} + F_y t \sum \left[g - d_h + \frac{S^2}{4g + 2d_h} \right] \left(0.9 + \frac{0.1d}{g} \right) \leq 0.6F_y A_{av} +$$

$$F_u t \sum \left[g - d_h + \frac{S^2}{4g + 2d_h} \right] \left(0.9 + \frac{0.1d}{g} \right)$$

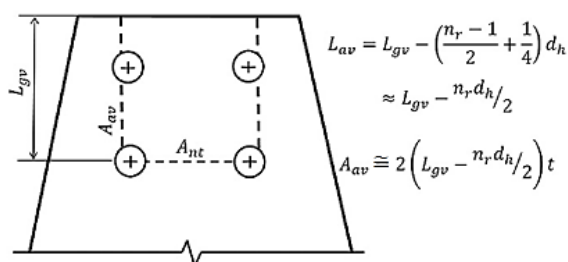
که A_{gv} سطوح برشی فعال^۴ است که در شکل (۱) نمایش داده شده است و با رابطه (۵) نیز محاسبه می‌گردد.

$$A_{av} = 2(L_{av})t \quad (۵)$$

که در آن:

$$L_{av} = L_{gv} + \left(\frac{n_r - 1}{2} + 0.25 \right) d_h \quad (۶)$$

که t ضخامت قطعه، d قطر پیچ، L_{gv} طول سطح ناخالص برش فعال^۵، L_{av} طول سطح خالص برش فعال^۶، و n_r تعداد پیچ‌های موجود در مسیر سطح برشی است.



شکل ۱- سطوح برش فعال در مطالعه Teh و Uz [۱۴]

از طرفی با توجه به اینکه روابط پیشنهادی ته و یازیکی [۲] برای فولادهای سرد نورد شده است و این فولادها در مقایسه با فولادهای گرم نورد شده دارای شکل پذیری و نسبت F_u/F_y کمتری هستند [۸]، بنابراین اگر رابطه (۴) را بر اساس رابطه (۷) که توسط Teh و Uz [۱۴] برای فولادهای گرم نورد شده پیشنهاد شده است، جایگذاری کنیم، رابطه (۸) را خواهیم داشت که برای فولاد گرم نورد شده با مد گسیختگی برش قالبی دارای سطوح مورب خواهد بود.

$$P_u = 0.6F_u A_{av} + F_u A_{nt} \quad (۷)$$

$$P_u = 0.6F_u A_{av} + F_u t \left[\sum \left[g - d_h + \frac{S^2}{4g + 2d_h} \right] \right] \left(0.9 + \frac{0.1d}{g} \right) \quad (۸)$$

مماس بر محیط سوراخ پیچ‌ها می‌باشد. لذا برای حالت حدی تسلیم، از سطح مقطع ناخالص و برای حالت حدی گسیختگی از سطح مقطع خالص، استفاده می‌نماید. همچنین این آیین نامه تنش برشی موثر حد تسلیم را ($0.6F_y$) فرض می‌کند که از روی مطالعات آماری و نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است. این مقدار اندکی بیشتر از مقدار معیار تسلیم فون میسز یعنی ($F_y/\sqrt{3}$)، می‌باشد. بر اساس این استاندارد رابطه ارایه شده برای برش قالبی به شرح زیر است:

$$P_u = 0.6F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \leq 0.6F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt} \quad (۱)$$

که A_{nt} سطح مقطع خالص تحت کشش، A_{nv} سطح مقطع خالص تحت برش، A_{gv} سطح مقطع ناخالص تحت برش، F_y تنش تسلیم فولاد، F_u تنش نهایی فولاد و U_{bs} عامل کاهش مقاومت است که توزیع تنش کششی غیریکنواخت را لحاظ می‌کند.

برای مواردی که سطوح مورب در مسیر شکست برش قالبی وجود داشته باشند، سطح خالص کششی محدوده برش قالبی با استفاده از قاعده ($S^2/4g$) با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{nt} = \sum \left[g - d_h + \frac{S^2}{4g} \right] t \quad (۲)$$

که S برابر فاصله طولی سوراخ‌ها، g برابر فاصله عرضی سوراخ‌ها، d_h قطر سوراخ پیچ و t ضخامت قطعه است. در صورت جایگذاری رابطه (۲) در رابطه (۱) برای حالات گسیختگی برش قالبی دارای سطوح مورب داریم:

$$P_u = 0.6F_u A_{nv} + U_{bs} F_u t \left[\sum \left[g - d_h + \frac{S^2}{4g} \right] \right] \leq 0.6F_y A_{gv} + U_{bs} F_u t \left[\sum \left[g - d_h + \frac{S^2}{4g} \right] \right] \quad (۳)$$

۲-۲- رابطه پیشنهادی Teh و Yazici (۲۰۱۳)

روابط پیشنهادی Teh و Yazici [۲] برای اتصالات پیچی در ورق‌های فولادی سرد نورد شده با مد گسیختگی برش قالبی دارای سطوح مورب است که بر پایه رابطه پیشنهادی Teh و Clements [۱۲] برای مد گسیختگی مقطع خالص^۳ در مسیر مورب، شکل گرفته است. در این روابط برای محاسبه استحکام سطوح برشی محدوده برش قالبی از تعریفی موسوم به سطوح برش فعال استفاده می‌شود. سطح برش فعال اولین بار در مقاله‌ای توسط Teh و Clements [۱۳] معرفی شد. مکانیزم‌های شکستی که Teh و Yazici [۲] بدان اعتقاد دارند عبارتند از مکانیزم شکست سطوح مورب به همراه تسلیم سطوح برشی و

L_{nv} طول سطح خالص برشی است و L_{gv} طول سطح ناخالص برشی است.

۳- مطالعه آزمایشگاهی و نتایج آزمایشات

۳-۱- مشخصات هندسی و مصالح نمونه‌ها

در این تحقیق ۸ نمونه صفحه اتصال پیچی با مصالح ST37-2 مطابق استاندارد DIN17100 [۱۵]، تحت بار محوری کششی، مورد آزمایش قرار گرفتند. ضخامت تمامی نمونه‌ها برابر ۴ میلی متر است. مشخصات مکانیکی مصالح نمونه‌های آزمایش از طریق آزمون استاندارد کشش، بر اساس استاندارد ASTM A370 [۱۶] بدست آمد. لذا ۳ آزمون دمبلی شکل در جهت عرضی (راستای عمود بر نورد)، ساخته شد. هر ۳ آزمون دمبلی شکل دارای عرض ۱۲/۵ میلیمتر و طول دهنه (گیج) ۵۰ میلیمتر بودند. مقدار استحکام تسلیم مصالح نمونه‌ها از روش افست کرنش ۰/۲ درصد محاسبه گردید. همچنین برای بدست آوردن تنش و کرنش حقیقی زمان شکست، سطح مقطع اولیه و سطح مقطع نهایی پس از شکست نمونه‌ها اندازه گیری شد. میانگین تنش تسلیم (F_y)، تنش نهایی (F_u)، مدول الاستیسیته (E)، کرنش سخت شدگی (ϵ_H)، کرنش در تنش نهایی ϵ_u ، سطح مقطع اولیه A_I ، سطح مقطع پس از شکست A_F و بار شکست P_F نمونه های آزمایش در جدول (۱) لیست شده است. همچنین بخاطر اینکه در این مقاله از نتایج آزمایشات مرجع [۱]، استفاده شده است، مشخصات مکانیکی مصالح نمونه‌های آزمایش آنها نیز در جدول (۱) آورده شده است.

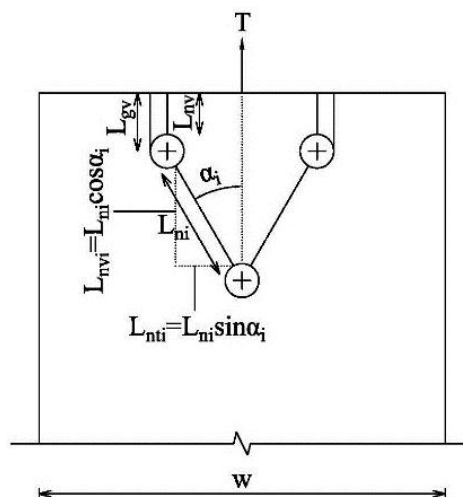
تمامی پیچ‌های مصرفی در آزمایش از رده ۱۰/۹ (معادل A490 در استاندارد ASTM)، تحت استاندارد خواص مکانیکی DIN EN-14399-4 [۱۷] بودند. همچنین برای تمامی مهره‌ها و واشرها نیز از رده ۱۰ تحت استاندارد خواص مکانیکی به ترتیب DIN EN-14399-4 [۱۷] و DIN EN-14399-6 [۱۸] استفاده شد.

۳-۲- ست-آپ آزمایش و آرایش نمونه‌ها

جهت اعمال بار کششی محوری به نمونه‌های آزمایش از ستاپ آزمایش بکار رفته در مطالعه Zeynali و همکارانش [۱۹] استفاده شد که در تصویر (الف) شکل (۳) نشان داده شده است. بطوریکه در آن برای ایجاد نیروی محوری کششی در نمونه‌های آزمایش، از دو جک فشاری استفاده گردید. این دو جک به وسیله المان‌های فاصله انداز، به تیر-ستون با تکیه گاه گیردار

۳-۲- رابطه پیشنهادی Samimi و همکارانش (۲۰۱۶)

رابطه پیشنهادی Samimi و همکارانش [۱] بر پایه مکانیزم‌های شکست استاندارد AISI 2016 [۱۰] و روش تصویر سطوح بنا نهاده شده است که برای مواردیکه در مسیر شکست برش قالبی سطوح مورب موجود باشد، کاربرد دارد. بنابراین با بهره گیری از روش تصویر سطوح، مکانیزم‌های شکست عبارت خواهند بود از، گسیختگی سطوح مورب که شامل گسیختگی کششی در تصویر سطوح خالص مورب در راستای عمود بر امتداد بارگذاری A_{nti} و گسیختگی برشی در تصویر سطوح خالص مورب در راستای موازی با امتداد بارگذاری A_{nvi} به همراه گسیختگی برشی در سطوح خالص موازی با امتداد بارگذاری A_{nv} و یا تسلیم برشی در سطوح ناخالص موازی با امتداد بارگذاری A_{gv} ، تصویر سطوح خالص مورب در راستای موازی با امتداد بارگذاری A_{nvi} و عمود بر امتداد بارگذاری A_{nti} با توجه به شکل (۲) از رابطه (۹) بدست می‌آید:



شکل ۲- نمایش تصویر سطوح خالص مورب در راستای موازی و عمود بر امتداد بارگذاری مطالعه مرجع [۱]

$$P_{us} = 0.6F_u A_{nv} + 0.6F_u A_{nvi} + U_{bs} F_u A_{nti} \leq \quad (9)$$

$$0.6F_y A_{gv} + 0.6F_u A_{nvi} + U_{bs} F_u A_{nti}$$

$$A_{nti} = tL_{nti} = tL_{ni} \sin \alpha_i \quad (10)$$

$$A_{nvi} = tL_{nvi} = tL_{ni} \cos \alpha_i \quad (11)$$

که باتوجه به شکل (۲)، α_i زاویه حاده بین سطوح مورب با امتداد بارگذاری است، L_{nti} تصویر طول مسیر خالص مورب در راستای عمود بر امتداد بارگذاری است، L_{nvi} تصویر طول مسیر خالص مورب در راستای موازی با امتداد بارگذاری است،

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح نمونه‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمون استاندارد کشش

نوع مصالح	مرجع گزارش	موقعیت نمونه‌گیری	ضخامت مقطع (mm)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش سخت شدگی (%)	کرنش در تنش نهایی (%)	سطح مقطع اولیه (mm ²)	سطح مقطع پس از شکست (mm ²)	بار شکست (kN)
صفحه اتصال ST37-2	مقاله حاضر	جهت عرضی	۴/۰	۲۹۴/۰	۳۹۹/۳	۲۰۲/۶	۱/۷۲	۱۷/۳	۴۹/۸۸	۱۷/۹۴	۱۳/۷۳
صفحه اتصال ST37-2	مرجع [۱]	جهت عرضی	۴/۰	۲۷۱/۱	۳۸۹/۹	۲۰۰/۶	۲/۱۶	۱۸/۶	۵۰/۱۶	۱۷/۴۱	۱۲/۹۴
ناودانی نمره ۱۲		جان	۶/۹	۲۸۱/۴	۴۰۶/۸	۲۰۵/۴	۲/۰۴	۱۹/۵	۸۶/۴۰	۳۳/۸۵	۲۶/۸۴
ناودانی نمره ۱۴		جان	۷/۰	۲۹۳/۰	۴۰۶/۲	۲۰۷/۲	۲/۱۰	۱۹/۹	۸۷/۲۲	۳۳/۸۳	۲۶/۲۹
ناودانی نمره ۱۶		جان	۷/۵	۲۹۷/۹	۴۱۲/۹	۲۰۶/۲	۱/۷۲	۱۶/۷	۹۴/۵۰	۳۷/۶۷	۲۹/۴۸
ناودانی نمره ۱۸		جان	۸/۰	۳۱۸/۴	۴۳۵/۰	۲۰۵/۸	۱/۸۱	۱۷/۷	۱۰۰/۵۶	۳۸/۸۱	۳۳/۶۰

متصل شدند و با هل دادن تیر-ستون با تکیه گاه غلطکی، بار محوری کششی را در نمونه‌های آزمایش ایجاد می‌کنند. اندازه گیری لحظه‌ای بار، به وسیله Load Cell‌هایی که روبروی جک‌ها، بروی تیر-ستون با تکیه گاه غلطکی متصل می‌شوند، امکان پذیر شد. همچنین برای کنترل مقدار Course لحظه‌ای جک‌ها در حین بارگذاری، یک جابجایی سنج در کنار هر جک نصب شد. برای اجتناب از ایجاد هر گونه برون محوری در بار کششی نمونه‌های آزمایش، اعضای ستاپ بارگذاری با دقت بالایی در محل مناسب‌شان قرار داده شدند. برای تمامی نمونه‌ها سرعت بارگذاری برابر ۱ mm/min لحاظ گردید. برای اندازه گیری جابجایی محدوده برش قالبی از دوجابجایی سنج (LVDT)^۷ استفاده گردید که در تصویر (ب) شکل (۳) نشان داده شده است. برای نصب LVDT روی نمونه‌های آزمایش، از یک پایه مگنتی استفاده شد که با فاصله ۴۸ میلیمتر از اولین ردیف پیچ‌ها روی نمونه‌ها نصب شد و در انتهای نمونه یک محدود کننده جابجایی (موسوم به نوار LVDT)^۸ به شکل T به وسیله چسب نصب گردید تا امکان اندازه گیری با LVDT فراهم گردد. مقدار فاصله قرارگیری پایه LVDT، مشابه مطالعات Samimi و همکارانش [۱] و Zeynali و همکارانش [۱۹ و ۲۰]، ۳ برابر قطر پیچ از اولین ردیف پیچ‌ها به عنوان نقطه مبنا برای اندازه گیری جابجایی محدوده برش قالبی است. در این حد فاصل از اولین ردیف پیچ‌ها، تنش‌های تقریباً یکنواخت ایجاد می‌شود که از نتایج بررسی‌های مقدماتی به روش اجزای محدود بدست آمده است.

برای اتصال بخش تکیه گاهی نمونه‌ها از صفحه اتصالی

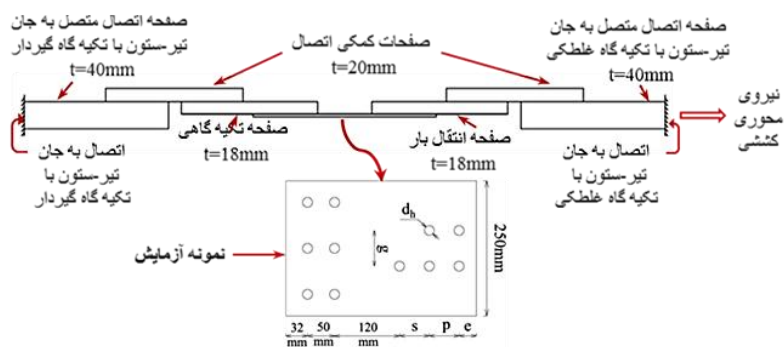
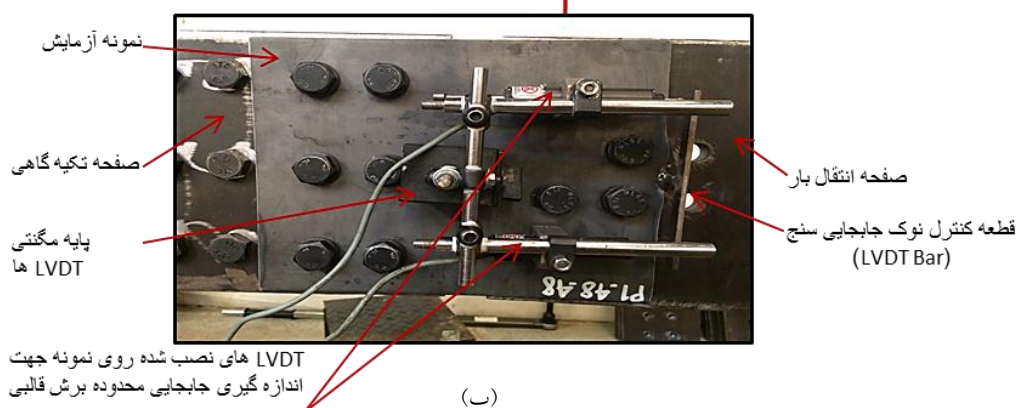
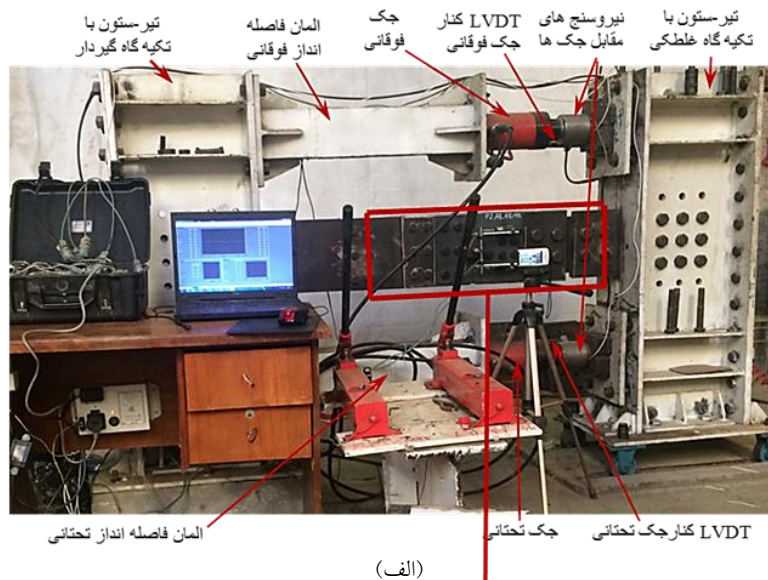
استفاده شد (صفحه تکیه گاهی)^۹ که از یک طرف به بخش تکیه گاهی نمونه متصل بود و از طرف دیگر به وسیله صفحه کمکی اتصال، به جان تیر-ستون با تکیه گاه گیر دار اتصال داشت. همچنین برای انتقال بار محوری کششی به نمونه‌ها از صفحه انتقال بار^{۱۰} استفاده شد که از یک طرف به بخش مورد بررسی در نمونه آزمایش متصل بود و از طرف دیگر به وسیله صفحه کمکی اتصال، به صفحه متصل به جان تیر-ستون با تکیه گاه غلطکی اتصال داشت. صفحه انتقال بار، صفحه تکیه گاهی و همچنین صفحات کمکی اتصال دارای ضخامت ۲۰ میلی متر بودند و ضخامت صفحات متصل به جان تیر-ستون‌ها برابر ۴۰ میلی متر انتخاب شدند و همگی آنها از فولاد نوع ST52-3 مطابق استاندارد DIN EN 17100 [۱۵] بودند. نحوه انتقال بار به کمک صفحات اتصال به صورت شماتیک در تصویر (ج) شکل (۳) قابل مشاهده است که در آن جزئیات هندسی نمونه‌های آزمایش نیز ارائه شده است.

نمونه‌های آزمایش، بر اساس تعداد پیچ‌های اتصال‌شان در دو گروه دسته بندی شدند. به طوریکه نیمی از آنها با ۳ پیچ (آرایش یافته در دو ردیف) اتصال یافتند و نیم دیگر برای بررسی تاثیر افزایش طول اتصال در شکست برش قالبی با مسیر مورب، با ۵ پیچ (آرایش یافته در سه ردیف) متصل شدند. به علت اینکه هدف از این مقاله، مطالعه متغیرهای آزمایشات روی پدیده گسیختگی برش قالبی بوده است، بنابراین در انتخاب نمونه‌های آزمایش سعی شد تا امکان شکست نوع برش قالبی نسبت به انواع دیگر شکست، محتمل‌تر باشد. در جدول (۲) ابعادهندسی نمونه‌های آزمایش لیست شده است.



با آچار معمولی سفت شدند^{۱۲} تا نیروی اصطکاک نتواند اثرات محسوسی بر نتایج بگذارد و عملکرد اتصالات به صورت اتکایی^{۱۳} باشد. همچنین به علت استفاده از نتایج آزمایشات Samimi و همکارانش [۱]، در جدول (۳) ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایش آنها نیز لیست شده است.

سوراخکاری نمونه‌ها از نوع سوراخ استاندارد بود که با استفاده از روش مته^{۱۱} و ۲ میلی‌متر بزرگتر از قطر پیچ‌ها یعنی برابر ۱۸ میلی‌متر انجام شد. در تمامی آزمایشات در قسمت زیر سر آچار خور پیچ و زیر مهره از واشر استفاده شده و تمامی پیچ‌های نمونه‌های آزمایش بدون ایجاد نیروی پیش تنیدگی بوسیله دست



شکل ۳- جزئیات نحوه آزمایش، (الف) ستاپ آزمایش (Test set-up)، (ب) جزئیات نصب LVDTها روی نمونه آزمایش، و (ج) شماتیک نحوه اعمال بار و جزئیات هندسی نمونه‌ها

جدول ۲- ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایش

نام نمونه	شکل مقطع	ضخامت مقطع (mm)	تعداد پیچ	زاویه (α_f°)	g (mm)	e (mm)	p (mm)	s (mm)
P1-48-48	صفحه اتصال	۴/۰	۳	۴۵	۴۸	۳۲	-	۴۸
P1-57-48			۳	۵۰	۵۷	۳۲	-	۴۸
P1-55-55			۳	۴۵	۵۵	۳۲	-	۵۵
P1-66-55			۳	۵۰	۶۶	۳۲	-	۵۵
P1-48-48/48			۵	۴۵	۴۸	۳۲	۴۸	۴۸
P1-57-48/48			۵	۵۰	۵۷	۳۲	۴۸	۴۸
P1-55-55/55			۵	۴۵	۵۵	۳۲	۵۵	۵۵
P1-66-55/55			۵	۵۰	۶۶	۳۲	۵۵	۵۵

جدول ۳- ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایش Samimi و همکارانش [۱]

نام نمونه	شکل مقطع	ضخامت مقطع (mm)	قطر سوراخ (mm)	تعداد پیچ	زاویه (α_f°)	g (mm)	e (mm)	p (mm)	s (mm)	L_{gi} (mm)
P-M12-333	صفحه اتصال	۴/۰	۱۴	۳	۳۰	۱۸	۲۴	-	۳۶	۳۶
P-M12-343		۴/۰	۱۴	۳	۴۲	۲۴	۲۴	-	۳۶	۳۶
P-M12-353		۴/۰	۱۴	۳	۵۶	۳۰	۲۴	-	۳۶	۳۶
P-M12-533		۴/۰	۱۴	۵	۳۰	۱۸	۲۴	۳۶	۳۶	۳۶
Ch120-M12-333	ناودانی	۶/۹	۱۴	۳	۳۰	۱۸	۲۴	-	۳۶	۳۶
Ch120-M12-533		۶/۹	۱۴	۵	۳۰	۱۸	۲۴	۳۶	۳۶	۳۶
Ch140-M12-333		۷	۱۴	۳	۳۰	۱۸	۲۴	-	۳۶	۳۶
Ch140-M12-533		۷	۱۴	۵	۳۰	۱۸	۲۴	۳۶	۳۶	۳۶
P-M16-333	صفحه اتصال	۴	۱۸	۳	۳۰	۲۴	۳۲	-	۴۸	۴۸
P-M16-343		۴	۱۸	۳	۴۲	۳۲	۳۲	-	۴۸	۴۸
P-M16-353		۴	۱۸	۳	۵۶	۴۰	۳۲	-	۴۸	۴۸
P-M16-533		۴	۱۸	۵	۳۰	۲۴	۳۲	۴۸	۴۸	۴۸
Ch160-M12-333	ناودانی	۷/۵	۱۸	۳	۳۰	۲۴	۳۲	-	۴۸	۴۸
Ch160-M12-533		۷/۵	۱۸	۵	۳۰	۲۴	۳۲	۴۸	۴۸	۴۸
Ch180-M12-333		۸	۱۸	۳	۳۰	۲۴	۳۲	-	۴۸	۴۸
Ch180-M12-533		۸	۱۸	۵	۳۰	۲۴	۳۲	۴۸	۴۸	۴۸

*توجه: برای نمونه‌های ناودانی اندازه ضخامت مربوط به بخش جان مقطع است و زاویه α_f به نزدیکترین عدد گرد شده است.

۳-۳- نتایج آزمایش و بحث

در تمامی نمونه‌های آزمایش، بارگذاری کششی تا زمان شکست کامل و جدا شدن کامل قسمت شکسته شده، ادامه یافت. در شکل (۴) لحظه پس از شکست برای تمامی نمونه‌های آزمایش، نشان داده شده است. شکست تمامی نمونه‌های آزمایش در حالت گسیختگی برش قالبی بوده است. در لحظه حداکثر استحکام قطعه، گلوئی شدن سطح مورب به صورت یکنواخت در کل این سطح نمی‌باشد بلکه در سمت نزدیک به لبه قطعه، گلوئی شدن زودتر رخ می‌دهد (تصویر شماره (۲) در

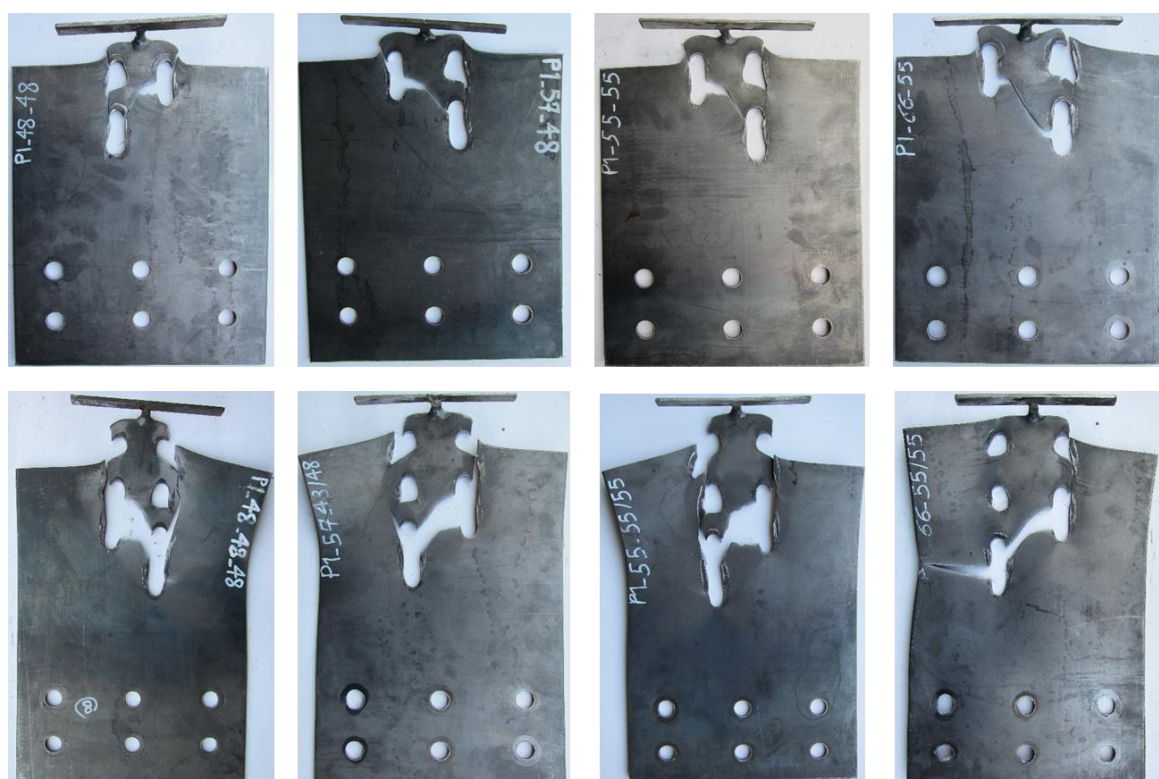
شکل (۵))، و با شروع شکست در یک سوی سطح مورب، کاهش استحکام قطعه مشاهده شد (تصویر شماره (۳) در شکل (۵)). همزمان با انتشار شکست سطوح مورب، گلوئی شدن غیر یکنواخت در کل سطح مورب شکل گرفت (تصویر شماره (۴) در شکل (۵)). شکست سطح برشی ابتدا در یکی از سطوح برشی لبه قطعه مشاهده شد (تصویر شماره (۵) در شکل (۵)). با شکل گیری شکست در کل سطوح برشی محدوده برش قالبی، گسیختگی برش قالبی شکل گرفت (تصویر شماره (۶) در شکل (۵)). نتایج مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از



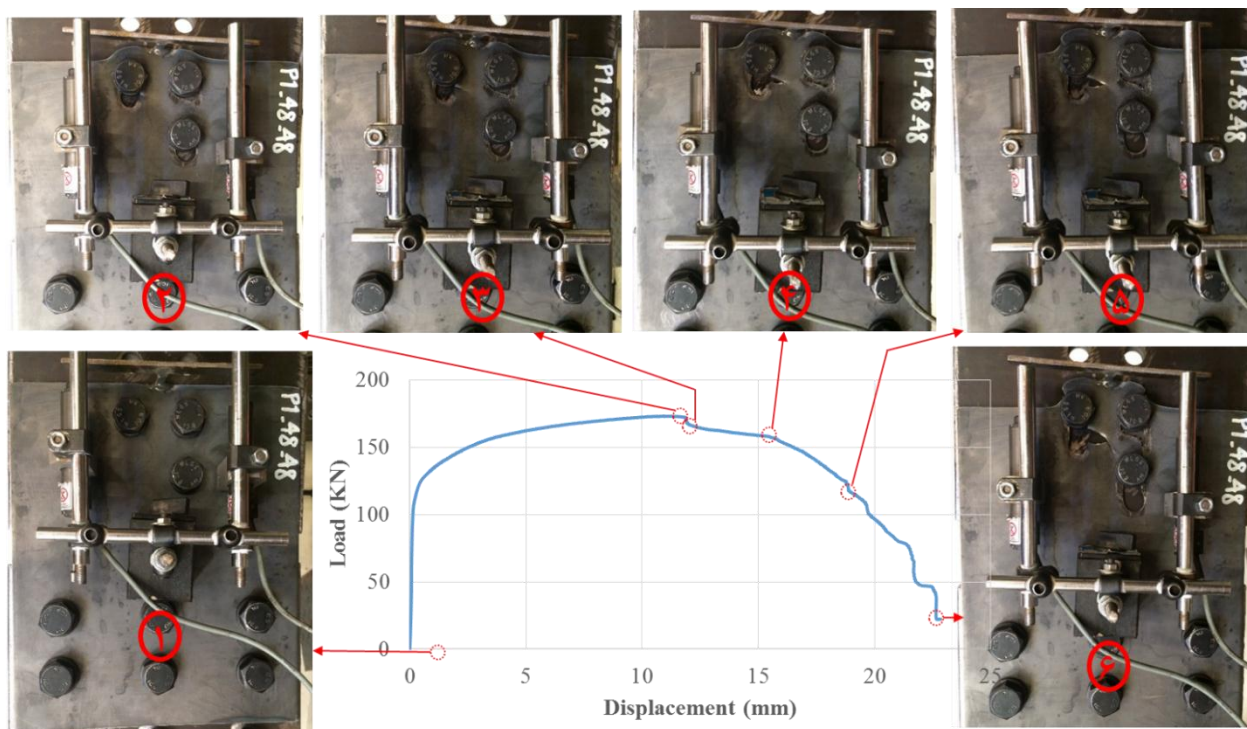
آن است که در تمامی نمونه‌های با الگوی سوراخ مورب، شکست نامتقارن برش قالبی رخ داده است. علت این پدیده به موجب خروج از مرکزیت اتصال است که سبب ایجاد اختلاف در مرکز سختی اتصال با مرکز بارگذاری شده است و این امر باعث توزیع تنش‌های محدوده برش قالبی به صورت غیر یکنواخت شده است.

در جداول (۴) و (۵) بار نهایی آزمایشگاهی (P_{exp}) و همچنین نسبت استحکام گسیختگی برش قالبی پیش بینی شده توسط روابط به بار نهایی آزمایشگاهی^{۱۴} (P_{pred}/P_{exp})، برای نمونه‌های آزمایش به ترتیب ۳ پیچ و ۵ پیچ (آرایش یافته به ترتیب در ۲ و ۳ ردیف) دارای سطوح مورب با اتصال دارای خروج از مرکزیت، قابل مشاهده است. همچنین مقایسه نتایج روابط برای نمونه‌های ۳ پیچ و ۵ پیچ (به ترتیب آرایش یافته در ۲ و ۳ ردیف) مطالعه Samimi و همکارانش [۱] که با شکست برش قالبی دارای سطوح مورب متقارن همراه بود، به ترتیب در جداول (۶) و (۷) آورده شده است. در جدول (۸) نیز نتیجه کلی مقایسه روابط برای تمامی نمونه‌های با الگوی سوراخ مورب ارائه شده است. ارزیابی نتایج پیش بینی روابط، نقاط ضعف و قوت آنها را مشخص کرده است. بطوریکه رابطه استاندارد AISC 2016 [۱۰]، محافظه کارانه ترین پیش بینی‌ها را

دارد که در تحقیقات دیگر هم به این موضوع اشاره شده است [۱، ۱۸، و ۱۹]. محافظه کاری روابط این استاندارد، با کاهش طول اتصال نیز افزایش می‌یابد. رابطه (۸) که از ترکیب روابط پیشنهادی تحقیقات [۲] و [۱۴]، برای شکست قالبی مورب فولاد گرم نورد شده، حاصل شده است نیز با دارا بودن بیشترین ضریب تغییرات در بین روابط بررسی شده (با مقدار ۰/۰۶۵)، به طور محافظه کارانه پیش بینی‌های استحکام را ارائه می‌دهد. به طوریکه میانگین نسبت پیش بینی‌های استحکام توسط این رابطه به نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های با الگوی شکست مورب برابر ۰/۸۵ است. این در حالی است که بنابر اظهارات Zeynali و همکارانش [۱۹] برای نمونه‌های با الگوی شکست غیرمورب، رابطه پیشنهادی Teh و Uz [۱۴] (رابطه (۸))، نتایج پیش بینی‌های استحکام نمونه‌ها را غیر محافظه کارانه ارائه می‌دهد که در این موارد نیز با افزایش طول اتصال، این غیرمحافظه کاری هم افزایش می‌یابد. همچنین رابطه پیشنهادی Samimi و همکارانش [۱] که برای موارد شکست برش قالبی با الگوی مورب است، با دارا بودن میانگین نسبت پیش بینی‌های استحکام توسط این رابطه به نتایج آزمایشگاهی، برابر ۰/۹۵ و ضریب تغییرات ۰/۰۳۷، بیشترین دقت را در بین سایر روابط بررسی شده، دارا است.



شکل ۴- تصاویر شکست نمونه‌های آزمایش



شکل ۵- منحنی بار-جابجایی و تصاویر شکل گیری شکست در نمونه نوعی P1-48-48 با الگوی سوراخ مورب با اتصال دارای خروج از مرکزیت

جدول ۴- مقایسه نتایج استحکام نهایی حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی مقاله حاضر، با الگوی سوراخ مورب با اتصال دارای خروج از مرکزیت
۳ پیچ و نتایج پیش بینی روابط

نام نمونه	استحکام نهایی آزمایشگاهی (kN)	نسبت نتایج پیش بینی روابط به نتایج آزمایشگاهی (P_{pred}/P_{exp})		
		رابطه (۳) AISC 2016 [۱۰]	رابطه (۸) [۲ و ۱۴]	رابطه (۹) [۱]
P1-48-48	۱۶۷/۲	۰/۸۰	۰/۹۰	۰/۹۴
P1-57-48	۱۸۲/۶	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۹۲
P1-55-55	۱۸۸/۱	۰/۸۱	۰/۹۰	۰/۹۶
P1-66-55	۲۰۸/۱	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۹۳
میانگین		۰/۷۹	۰/۸۹	۰/۹۴
ضریب تغییرات		۰/۰۱۸	۰/۰۱۳	۰/۰۱۶

جدول ۵- مقایسه نتایج استحکام نهایی حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی مقاله حاضر، با الگوی سوراخ مورب با اتصال دارای خروج از مرکزیت
۵ پیچ و نتایج پیش بینی روابط

نام نمونه	استحکام نهایی آزمایشگاهی (kN)	نسبت نتایج پیش بینی روابط به نتایج آزمایشگاهی (P_{pred}/P_{exp})		
		رابطه (۳) AISC 2016 [۱۰]	رابطه (۸) [۲ و ۱۴]	رابطه (۹) [۱]
P1-48-48/48	۲۴۴/۵	۰/۸۰	۰/۹۲	۰/۹۰
P1-57-48/48	۲۶۱/۲	۰/۷۹	۰/۹۰	۰/۸۹
P1-55-55/55	۲۷۸/۴	۰/۸۳	۰/۹۳	۰/۹۳
P1-66-55/55	۳۰۲/۶	۰/۸۰	۰/۸۹	۰/۹۰
میانگین		۰/۸۰	۰/۹۱	۰/۹۰
ضریب تغییرات		۰/۰۱۹	۰/۰۱۵	۰/۰۱۷

جدول ۶- مقایسه نتایج استحکام نهایی حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی اتصال یافته با الگوی سوراخ مورب ۳ پیچ Samimi و همکارانش [۱]

و نتایج پیش بینی روابط

نام نمونه	استحکام نهایی آزمایشگاهی (kN)	نسبت نتایج پیش بینی روابط به نتایج آزمایشگاهی (P_{pred}/P_{exp})		
		رابطه (۳) AISC 2016 [۱۰]	رابطه (۸) [۲ و ۱۴]	رابطه (۹) [۱]
P-M12-333	۱۰۳/۴	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۹۸
P-M12-343	۱۰۸/۷	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۹۹
P-M12-353	۱۱۲/۱	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۹۹
Ch120-M12-333	۱۸۲/۵	۰/۸۵	۰/۷۹	۱/۰۰
Ch140-M12-333	۱۸۷/۳	۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۹۹
P-M16-333	۱۳۷/۸	۰/۸۵	۰/۷۹	۰/۹۹
P-M16-343	۱۵۰/۵	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۹۷
P-M16-353	۱۵۷/۰	۰/۷۹	۰/۸۱	۰/۹۶
Ch160-M16-333	۲۳۱/۱	۰/۸۶	۰/۷۹	۱/۰۱
Ch180-M16-333	۳۱۵/۹	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۹۸
میانگین		۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۹۹
ضریب تغییرات		۰/۰۳۵	۰/۰۲۴	۰/۰۱۴

جدول ۷- مقایسه نتایج استحکام نهایی حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی اتصال یافته با الگوی سوراخ مورب ۵ پیچ Samimi و همکارانش [۱]

و نتایج پیش بینی روابط

نام نمونه	استحکام نهایی آزمایشگاهی (kN)	نسبت نتایج پیش بینی روابط به نتایج آزمایشگاهی (P_{pred}/P_{exp})		
		رابطه (۳) AISC 2016 [۱۰]	رابطه (۸) [۲ و ۱۴]	رابطه (۹) [۱]
P-M12-533	۱۴۸/۲	۰/۸۶	۰/۹۰	۰/۹۷
P-M16-533	۲۰۴/۰	۰/۸۵	۰/۸۹	۰/۹۵
Ch120-M12-533	۲۸۱/۵	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۹۱
Ch140-M12-533	۲۸۲/۴	۰/۸۲	۰/۸۷	۰/۹۲
Ch160-M16-533	۴۱۵/۶	۰/۸۳	۰/۸۷	۰/۹۳
Ch180-M16-533	۴۴۹/۷	۰/۸۶	۰/۹۰	۰/۹۷
میانگین		۰/۸۴	۰/۸۸	۰/۹۴
ضریب تغییرات		۰/۰۲۴	۰/۰۲۳	۰/۰۲۴

جدول ۸- مقایسه نتایج استحکام نهایی کل نمونه‌های با الگوی سوراخ مورب و اتصال دارای خروج از مرکزیت و بدون خروج از مرکزیت

بررسی شده در جداول (۴)، (۵)، (۶) و (۷)

کل نمونه‌های مورب	نسبت نتایج پیش بینی روابط به نتایج آزمایشگاهی (P_{pred}/P_{exp})		
	رابطه (۳) AISC 2016 [۱۰]	رابطه (۸) [۲ و ۱۴]	رابطه (۹) [۱]
میانگین	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۹۵
ضریب تغییرات	۰/۰۳۴	۰/۰۶۵	۰/۰۳۷

۴- مطالعه عددی به روش اجزاء محدود

مدل‌سازی‌های ۳ بعدی به روش اجزای محدود غیرخطی به وسیله نرم افزار Abaqus 6.11 [۲۱] انجام شد. بر این اساس با در نظر گرفتن هم زمان رفتار غیرخطی مصالح و هندسه عضو،

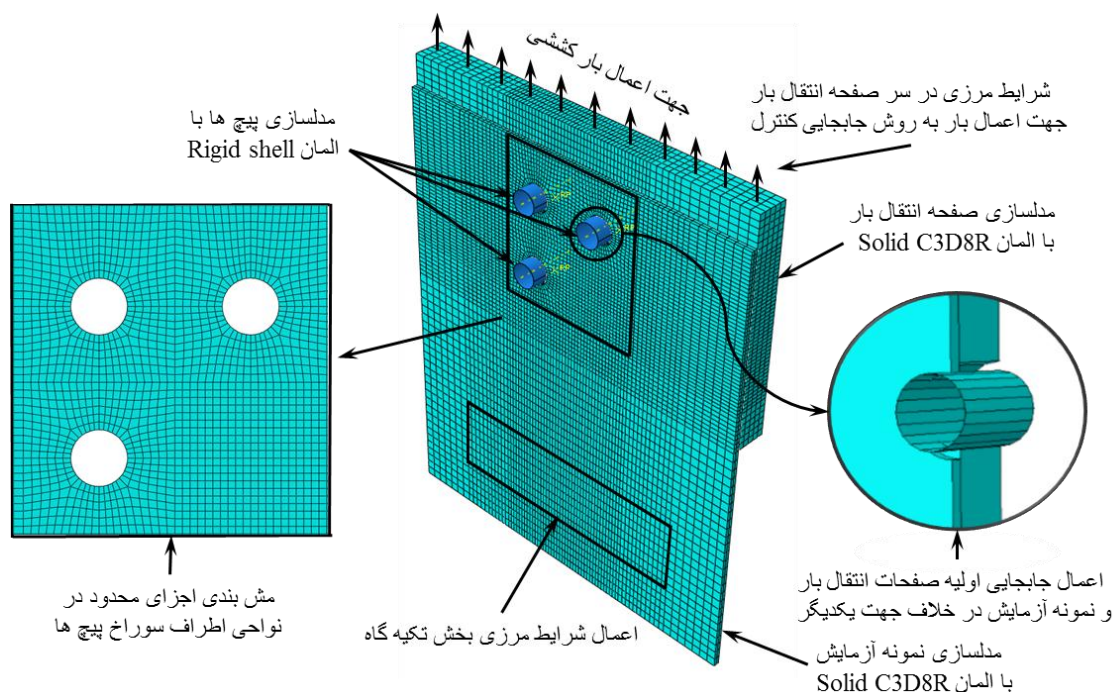
برای کسب اطلاعات بیشتر از جمله نحوه توزیع تنش‌ها و همچنین نحوه شکل گیری شکست در نمونه‌های آزمایش،



با استفاده از المان solid برای نمونه‌های آزمایش و همچنین صفحه انتقال بار و استفاده از المان Rigid برای پیچ‌های اتصال، با تحلیل صریح Dynamic/Explicit با افزایش نرخ بارگذاری به صورت جابجایی کنترل و به صورت شبه استاتیکی مدل‌سازی انجام شد. در مرحله مدل‌سازی نمونه‌ها سعی شد تا حد امکان مدل‌ها شبیه به نمونه‌های آزمایشگاهی باشد. بر این اساس در تمامی مدل‌سازی‌ها قطر سوراخ پیچ‌ها همانند نمونه‌های آزمایشگاهی ۲ میلی‌متر بزرگتر از قطر پیچ‌های اتصال لحاظ شد تا اثرات تمرکز تنش در سوراخ‌ها دقیق‌تر دیده شود. بدنه پیچ‌ها با اعمال جابجایی اولیه نمونه‌های آزمایش و صفحه انتقال بار در خلاف جهت هم به میزان ۱ میلی‌متر، به جداره سوراخ‌های قطعات تماس داده شد. برای انتقال بار از ورق با ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده شد که با اعمال جابجایی افزایشی اعمال بار به نمونه‌ها به صورت جابجایی کنترل فراهم گردید.

بخش تکیه گاه نمونه با طول برابر با نمونه آزمایشگاهی مدل‌سازی گردید ولی به دلیل عدم بررسی بخش تکیه گاه نمونه‌ها، بجای مدل‌سازی صفحه تکیه گاهی و اتصال نمونه با پیچ در این بخش، شرایط مرزی اعمال شد [۱ و ۱۹]. لذا نقاط مابین پیچ‌های اتصال در بخش تکیه گاهی نمونه‌ها با بستن تمامی درجات آزادی، مدل‌سازی گردید. از آنجایی که اتصال تمامی نمونه‌ها دارای عملکرد اتکایی بوده است و پیچ‌ها

در تمامی مدل‌سازی‌ها برای مش بندی از المان مکعبی C3D8R استفاده شده است. برای دستیابی به ابعاد مناسب مش‌بندی چندین تحلیل صورت گرفت تا بتوان مناسب‌ترین ابعاد مش را برای بخش‌های مختلف نمونه یافت. این مهم برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر و تشخیص بهتر مسیر شکست نمونه‌ها ضروری بوده است. برای این منظور به طور کلی در نواحی مرکز اتصال (نزدیک به سوراخ پیچ‌ها) المان‌بندی کوچک‌تر از نواحی دور از سوراخ پیچ‌ها انجام شد. نتایج حاکی از آن است که با مش‌های با ابعاد ۲/۵ میلی‌متر در نواحی نزدیک به سوراخ پیچ‌ها، مسیر شکست به درستی طی می‌شود و با تقریب مناسبی پاسخ ظرفیتی نمونه قابل دستیابی است. شکل (۶) جزئیات مدل‌سازی و مش‌بندی نوعی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۶- جزئیات مدل‌سازی اجزای محدود و مش بندی نمونه‌ها

از آنجایی که در تحلیل‌های انجام شده رفتار و پاسخ ظرفیتی نمونه‌ها تا زمان شکست قطعه مورد نیاز بوده است، بنابراین مصالح نمونه‌ها وارد ناحیه غیر الاستیک خواهند شد. بنابراین برای چنین مواردی باید از مشخصات مصالح حقیقی استفاده کرد. لذا با در دست داشتن نتایج مشخصات مصالح مهندسی که از آزمون استاندارد کشش بدست آمده است، می‌توان به کمک روابط موجود، منحنی تنش-کرنش حقیقی را بدست آورد. به طوریکه برای ناحیه غیرالاستیک تا ناحیه شروع گلوئی شدن با فرض حجم ثابت، با استفاده از روابط زیر کرنش و تنش حقیقی بدست آمدند [۲۲]:

$$\varepsilon_{True} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (12)$$

$$\sigma_{True} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (13)$$

که در آن؛ ε_{True} کرنش حقیقی تا شروع گلوئی شدن، σ_{True} تنش حقیقی تا شروع گلوئی شدن، ε_{nom} و σ_{nom} به ترتیب کرنش و تنش مهندسی بدست آمده از آزمون استاندارد کشش است.

با توجه به اینکه بعد از شروع گلوئی شدن کرنش در سراسر طول گیج یکسان نیست و در ناحیه گلوگاه بیشینه است، لذا مقدار اندازه گیری شده کرنش مهندسی بین دو نقطه در طول گلوگاه، یک مقدار میانگین را به جای مقدار ماکزیمم ارائه می‌دهد. از این جهت با شروع گلوئی شدن، کرنش حقیقی نمی‌تواند از کرنش مهندسی با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه شود. به طور مشابه تنش حقیقی نیز نمی‌تواند در لحظه گلوئی شدن از رابطه (۱۳) محاسبه شود، زیرا این مقدار کرنش مهندسی (ε_{nom}) میانگین کرنش را بکار می‌برد. لذا کرنش و تنش حقیقی برای ناحیه گلوگاه بر اساس سطح مقطع لحظه ای و بار لحظه ای به ترتیب از روابط (۱۴) و (۱۵) می‌توان محاسبه نمود:

$$\varepsilon_{True}^N = \ln(A_I + A) \quad (14)$$

$$\sigma_{True}^N = \frac{P}{A} \quad (15)$$

که در آن؛ A_I سطح مقطع اولیه، A سطح مقطع لحظه ای و P سطح مقطع لحظه ای است. البته در صورت داشتن سطح مقطع لحظه ای (A) و بار لحظه ای (P) می‌توان روابط (۱۴) و (۱۵) را برای کل ناحیه غیر خطی بکار برد. اما در تحقیق حاضر، به علت اندازه گیری فقط سطح مقطع اولیه (A_I) و سطح مقطع شکست (A_F)، از روابط (۱۴) و (۱۵) تنها در محاسبه کرنش و تنش حقیقی شکست (σ_{True}^F و ε_{True}^F) استفاده گردید. از طرفی همانطور که توسط Bridgman [۲۳] در سال ۱۹۴۴ اشاره شد،

مقادیر زیاد گلوئی شدن منجر به ایجاد یک تنش کششی مماسی می‌شود که پیرامون ناحیه گلوئی تولید می‌شود. بنابراین حالت تنش اصلاً تک محوری فرض نمی‌شود و رفتار ماده تحت تاثیر قرار می‌گیرد. بر این اساس می‌توان یک تصحیح تقریبی (B) بر پایه منحنی تجربی توسعه یافته توسط بریجمن ایجاد کرد که B را می‌توان با تخمین مناسبی از رابطه (۱۶) برای کرنش‌های حقیقی بین ۰/۱۵ الی ۳ محاسبه کرد [۲۴] و همچنین تنش تصحیح شده متناظر آن از رابطه (۱۷) بدست می‌آید:

$$B = 0.83 - 0.186 \log(\varepsilon_{True}^N) \quad (17)$$

$$\sigma_B = B \sigma_{True}^N \quad (18)$$

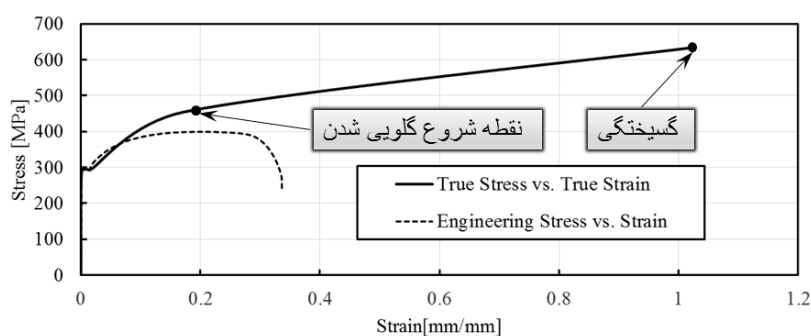
همچنین بدلیل آنکه در نرم افزار Abaqus کرنش خطی بر اساس مدول الاستیسیته در این ناحیه محاسبه می‌شود و برای معرفی ناحیه پلاستیک مقادیر کرنش پلاستیک با تفاضل آن از کرنش خطی محاسبه می‌شود، لذا مقدار (ε_{nom}/E) باید از مقادیر بدست آمده از روابط (۱۲) و (۱۴) کم شود.

منحنی تنش-کرنش مهندسی و حقیقی مصالح نمونه‌های آزمایش در شکل (۷) قابل مشاهده است. برای شبیه سازی شکست نمونه‌ها، تنظیمات نرم‌افزار به نحوی بود تا وقتی کرنش المانی به کرنش شکست برسد، آن المان حذف و ماتریس سختی دوباره تشکیل شود و تحلیل با فرض حذف (گسیختگی) آن المان ادامه می‌یابد. این کارکرد در نرم‌افزار Abaqus تحت عنوان Initiation Damage شناخته می‌شود. با توجه به بارگذاری محوری کششی برای نمونه‌ها این معیار ساده شکست می‌تواند بصورت مناسبی رفتار شکست نمونه‌ها را نشان دهد [۱ و ۱۹].

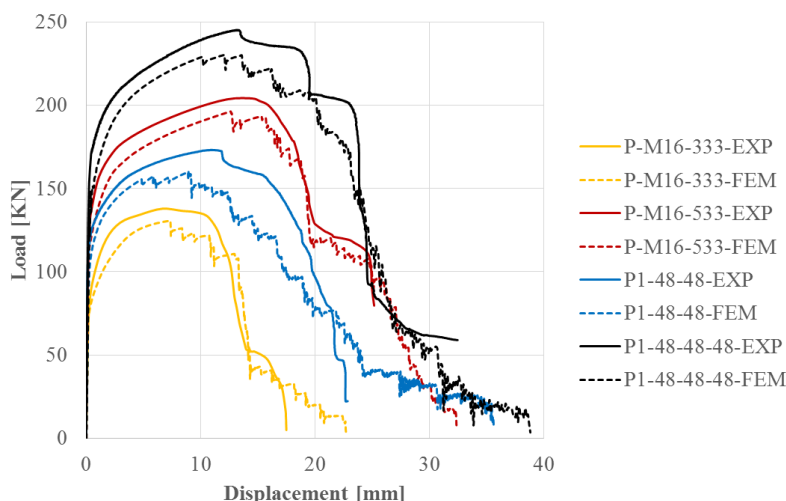
در منحنی‌های شکل (۸) مقایسه نتایج آنالیز اجزای محدود با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی برای ۴ نمونه آورده شده است که دو نمونه از آنها مربوط به آزمایشات این مقاله می‌باشد و ۲ نمونه دیگر از نتایج آزمایشات Samimi و همکارانش [۱] است.

به طور کلی نتایج پیش بینی پاسخ‌های ظرفیتی حاصل از تحلیل اجزای محدود رضایت‌بخش است و نتایج پیش بینی نحوه شکل گیری و انتشار شکست تمامی نمونه‌ها با دقت مناسبی مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی بوده است. به طوریکه همانند نمونه‌های آزمایشگاهی، حداکثر استحکام نمونه‌ها در لحظه گلوئی شدن سطوح کششی محدوده برش قالبی، مشاهده شده است. با ایجاد ترک در این سطوح، مقدار استحکام نمونه‌ها کاهش می‌یابد و با انتشار شکست در سطوح کششی و برشی محدوده برش قالبی، شکست کامل برش قالبی، شکل می‌گیرد.





شکل ۷- منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی و حقیقی نمونه‌های آزمایش



شکل ۸- مقایسه منحنی‌های بار-جابجایی آزمایشگاهی و عددی نمونه‌های مقاله حاضر و مطالعه [۱]

سطح مورب برای نمونه‌های نوعی p1-48-48 و p1-48-48/48 در جداره سوراخ نزدیک‌تر به لبه قطعه، بیشتر از سوراخ دورتر از لبه قطعه، است که به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) قابل مشاهده است. بر این اساس باید در پیش بینی استحکام این موارد از نمونه‌ها، اثرات توزیع تنش کششی غیریکنواخت در این سطوح، لحاظ شود.

۵- نتیجه گیری

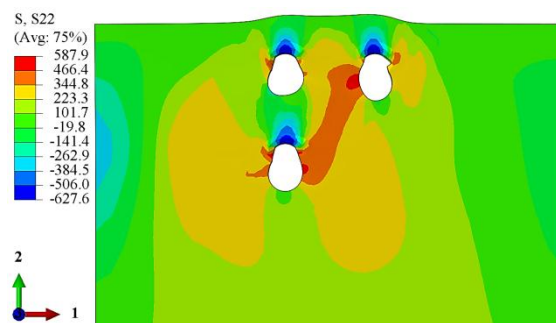
در این مقاله یک تحقیق آزمایشگاهی بر روی اعضای کششی فولادی اتصال یافته با پیچ‌های پرمقاومت، با الگوهای مختلف سوراخکاری با مد شکست برش قالبی انجام شد. اهداف اصلی این مقاله ارزیابی روابط مبتنی بر قاعده $(s^2/4g)$ و روش تصویر سطوح پیشنهادی Samimi و همکارانش (۲۰۱۶) و همچنین ارزیابی ضریب توزیع تنش کششی غیر یکنواخت برای موارد گسیختگی برش قالبی با الگوی شکست غیرمستقیم، بوده است. بر این اساس ۸ نمونه آزمایشگاهی از مقاطع صفحه اتصال با فولاد نرمه ساختمانی تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند.

نتایج تحلیل‌های اجزای محدود برای نمونه‌های مورب متقارن حاکی از آن است که سطوح مورب دارای تنش‌های برشی و کششی هستند و همانطور که توسط Samimi و همکارانش [۱] هم نشان داده شد، با توجه به مقدار زاویه این سطوح با امتداد بارگذاری، نسبت تنش‌های کششی و برشی در آن تغییر می‌کند. بنابراین با توجه به اینکه در مشاهدات آزمایشگاهی و همچنین در نتایج تحلیل اجزای محدود، در لحظه حداکثر استحکام نمونه‌ها، گلوئی شدن این سطوح رخ می‌دهد و با شروع شکست در آن از استحکام قطعه کاسته می‌شود، بنابراین برای این سطوح مکانیزم شکست ترکیبی برشی و کششی در سطح خالص مورب رخ خواهد داد که می‌توان مقدار تنش‌های برشی و کششی سطوح مورب را از روش پیشنهادی Samimi و همکارانش [۱] محاسبه کرد. از سوی دیگر در نمونه‌های مورب غیر متقارن (نمونه‌های آزمایشگاهی مقاله حاضر)، به علت وجود خروج از مرکزیت بار با مرکز سختی در این نمونه‌ها، توزیع تنش کششی در سطوح مورب، به صورت غیر یکنواخت می‌باشد. بطوریکه تمرکز تنش‌های حقیقی کششی

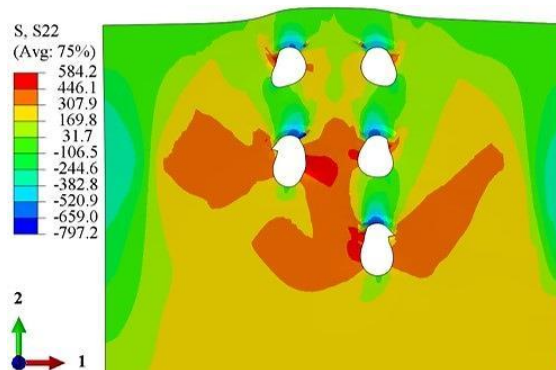
به طور کلی نتایج پیش بینی‌های استحکام توسط روابط، نشان می‌دهد که روش تصویر سطوح Samimi و همکارانش نسبت به قاعده $(s^2/4g)$ ، از دقت بالاتری برخوردار است. برای نمونه‌های با الگوی شکست قالبی مورب با اتصال دارای خروج از مرکزیت نیز، به دلیل وجود تنش‌های کششی غیریکنواخت، رابطه $(1 - e/l)$ (پیشنهاد شده توسط استاندارد AISC 2016) در محاسبات منظور شده است. رابطه $(1 - e/l)$ توانسته است به نحو مطلوبی اثرات بارگذاری خارج از مرکز را لحاظ کند. از طرفی با توجه به اینکه در مکانیزم‌های شکست پیشنهاد شده توسط استاندارد AISC 2016، پیش بینی‌های استحکام را به صورت محافظه کارانه ارائه می‌دهد و نظر به اینکه روش تصویر سطوح بر پایه این مکانیزم‌ها بنا نهاده شده است، بنابراین در روابط پیشنهادی صمیمی و همکاران نیز، این محافظه کاری در برخی از شرایط اتصال مشاهده می‌شود. به طوریکه در نتایج پیش بینی‌های استحکام نمونه‌هایی که با افزایش طول اتصال همراه بوده اند، محافظه کاری مشاهده شده است. محافظه کاری موجود در روش تصویر سطوح بدلیل مکانیزم‌های شکست ارائه شده توسط استاندارد AISC 2016 در محاسبه سهم سطوح برشی محدوده برش قالبی است. بنابراین در نمونه‌هایی که با افزایش طول اتصال همراه بوده اند، افزایش سطوح برشی محدوده برش قالبی بوجود آمده است که در نهایت افزایش محافظه کاری را در روابط Samimi و همکارانش به همراه داشته است. هر چند روش تصویر سطوح با دقت خوبی نسبت به سایر روابط موجود، ظرفیت نمونه های مورب با اتصال دارای خروج از مرکزیت را پیش بینی می‌کند، اما به منظور افزایش کارایی و کاهش محافظه کاری پیشنهاد می‌گردد مکانیزم شکست مناسب برای نمونه های دارای الگوی مورب (مقارن و غیر مقارن) شناسایی و معرفی شود.

۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان از همکاری‌های مرکز پژوهش متالورژی مواد رازی به خصوص سرپرست آزمایشگاه بررسی خواص مکانیکی فلزات آقای مهندس غلامرضا کندی و از شرکت ایران توحید برای تامین پیچ‌های پرمقاومت مصرفی در آزمایشات و همچنین از شرکت آکام فلز و آکام بتن برای در اختیار قرار دادن فضا و امکانات کمکی آزمایشگاهی قدردانی می‌نمایند. همچنین نویسندگان تمایل دارند از شرکت کنزا صنعت الموت به جهت همکاری خوب جهت ارائه دستگاه حذف کننده نویز الکتریکی



شکل ۹- توزیع تنش‌های کششی حقیقی در نمونه نوعی P1-48-48 با الگوی سوراخ مورب و اتصال دارای خروج از مرکزیت با دو ردیف پیچ



شکل ۱۰- توزیع تنش‌های کششی حقیقی در نمونه نوعی P1-48-48/48 با الگوی سوراخ مورب و اتصال دارای خروج از مرکزیت با سه ردیف پیچ

به منظور مشخص شدن نحوه توزیع تنش‌های کششی و برشی در زمان‌های مختلف بارگذاری کششی، تحلیل های سه بعدی غیرخطی به روش اجزای محدود به کمک نرم‌افزار Abaqus 6.11 انجام گردید. نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزا محدود همخوانی‌های خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. توزیع تنش‌های حقیقی کششی و برشی نمونه های با الگوی سوراخ مورب، تنش‌های ترکیبی کششی و برشی را در این سطوح نشان داده است که اساس روش تصویر سطوح پیشنهادی توسط صمیمی و همکاران، را تصدیق می‌کند. همچنین اختلاف بین مرکز سختی و مرکز بارگذاری در نمونه‌های با الگوی سوراخ مورب غیرمقارن، منجر به توزیع تنش‌های کششی حقیقی غیر یکنواخت در در سطوح مورب موجود در مسیر شکست قالبی، شده است بطوریکه در یک سوی سطح مورب شدت تنش‌های حقیقی کششی بیشتر از سمت دیگر آن است. بنابراین باید در پیش بینی استحکام آنها، اثرات توزیع تنش کششی غیر یکنواخت در این سطوح، لحاظ شود.

- [13] Clements, D.D.A and The, L.H. (2013), "Active Shear Planes of Bolted Connections Failing in Block Shear", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 139, pp. 320–327.
- [14] The, L.H. and Uz, M.E. (2015), "Block Shear Failure Planes of Bolted Connections–Direct Experimental Verifications," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 111, pp. 70–74.
- [15] DIN EN 17100, (2015), *Steels for General Structural Purposes*, Deutsches Institut fur Normung, E.V. Berlin, Germany.
- [16] ASTM A370, (2014), *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, American Society for Testing and Material, Pennsylvania, USA.
- [17] DIN EN 14399–4, (2006), *High-Strength Structural Bolting Assemblies for Preloading, Part 4: System HV – Hexagon Bolt and Nut Assemblies (English Version)*, Deutsches Institut fur Normung, E.V. Berlin, Germany.
- [18] DIN EN 14399–6, (2006), *High-Strength Structural Bolting Assemblies for Preloading, Part 6: Plain Chamfered Washers (English Version)*, Deutsches Institut fur Normung, E.V. Berlin, Germany.
- [19] Zeynali, Y., Jafari Samimi, M., Mazroei, A., Asgari Marnani, J. and Rohanimanesh, M.S. (2017), "Experimental and Numerical Study of Frictional Effects on Block Shear Fracture of Steel Gusset Plates with Bolted Connections", *Thin-Walled Structures*, Vol. 121, pp. 8–24.
- [20] زینالی، ی.، جعفری صمیمی، م.، مزروعی، ع.، عسگری مارنانی، ج. و روحانی منش، م.ص. (۱۳۹۵)، "مطالعه آزمایشگاهی رفتار شکست برش قلابی اتصال صفحات فولادی"، نشریه علمی - پژوهشی سازه و فولاد، دوره ۱۹، ص. ۷۵–۸۴.
- [21] Simulia Corp, (2011), *Abaqus Ver. 6.11, Analysis User Manual*, Dassault Systems, Illinois, RI, USA.
- [22] Ugural, A. and Fenster, S. (1987), "Advanced Strength and Applied Elasticity", Elsevier Science Publishing Co., New York, USA.
- [23] Bridgman, P.W. (1944), "The Stress Distribution at the Neck of a Tension Specimen", *Transactions of American Society of Metals*, Vol. 32, pp. 553–574.
- [24] Dowling, N.E. (2007), "Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue", Pearson Prentice Hall, USA.

دستگاه‌های اندازه گیری دقیق آزمایشگاهی صمیمانه تشکر نمایند.

۷- مراجع

- [1] Samimi, M.J., Marnani, J.A., Seyedzadeh Otaghsaraie, S.M. and Seyedzadeh Otaghsaraei, S.R. (2016), "Block Shear Experimental and Numerical Studies on Hot Rolled Channel and Gusset Plate with Staggered Bolted Connection", *Thin-Walled Structure*, Vol. 108, pp. 153–162.
- [2] The, L.H. and Yazici, V. (2013), "Unconventional Block Shear Failures of Bolted Connections in Cold-Reduced Steel Sheets", *Engineering Structures*, Vol. 56, pp. 567–571.
- [3] Epstein, H.I. and Thacker, B.H. (1991), "The Effect of Bolt Stagger for Block Shear Tension Failures in Angles", *Journal of Computers & Structures*, Vol. 39, pp. 571–576.
- [4] Epstein, H.I. and Chamarajanagar, R. (1996), "Finite Element Studies for Correlation with Block Shear Tests", *Journal of Computers & Structures*, Vol. 61, pp. 967–974.
- [5] AISC, (2010), *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- [6] Hardash, S.G. and Bjorhovde, R. (1985), "New Design Criteria for Gusset Plates in Tension", *Engineering Journal*, AISC, Vol. 22, pp. 77–94.
- [7] Huns, B.B.S., Grondin, G.Y. and Driver, R.G. (2006), "Tension and Shear Block Failure of Bolted Gusset Plates", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 33, pp. 395–408.
- [8] Seleim, S. and LaBoube, R.A. (1996), "Behavior of Low Ductility Steels in Cold-Formed Steel Connections", *Thin-Walled Structure*, Vol. 25, pp. 135–151.
- [9] Driver, R.G., Grondin, G.Y. and Kulak, G.L. (2006), "Unified Block Shear Equation for Achieving Consistent Reliability", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp. 210–222.
- [10] AISC, (2016), *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- [11] Cochrane, V.H. (1922), "Rules for Rivet Hole Deductions in Tension Members", *Journal of Engineering News-Record*, Vol. 89, pp. 847–848.
- [12] The, L.H. and Clements, D.D.A. (2012), "Tension Capacity of Staggered Bolted Connections in Cold-Reduced Steel Sheets", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 138, pp. 769–776.

پی نوشت

- ¹ Hartford Civic Center
- ² Plane Decomposition Method
- ³ Net Section Tension Failure
- ⁴ Active Shear Planes
- ⁵ Gross Area Length
- ⁶ Active Shear Area Length
- ⁷ Linear Differential Variable Transformer
- ⁸ LVDT Bar
- ⁹ Support Plate
- ¹⁰ Load Transfer Plate
- ¹¹ Drill
- ¹² Snug-Tightened by Hand
- ¹³ Bearing Type Connection
- ¹⁴ Professional Factor
- ¹⁵ None Frictional Contact

