

مدل سازی زوال در قاب‌های خمشی فولادی با اتصالات ورق فوقانی و تحتانی به ستون قوطی

مهدی قاسمیه^{۱*}، سیاوش کریمی^۲

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران
۲- دانش آموخته ارشد مهندسی عمران - سازه، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

*m.ghassemieh@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۵]

تاریخ دریافت: [۹۶/۱۱/۱۰]

چکیده

برای بررسی جامع عملکرد اجزای سازه باید بتوان رفتار آن‌ها را در محدوده‌ی وسیعی از رفتار غیرخطی ارزیابی و پیش‌بینی کرد و برای این منظور نیاز به مدل‌های هیستریزس تحلیلی است که قابلیت در نظر گرفتن همه‌ی مدهای زوال سختی و مقاومت را داشته باشند. به منظور استفاده از این مدل‌ها نیاز به مجموعه‌ای از داده‌ها است که بر اساس آن بتوان مدل‌ها را درستی‌آزمایی کرد. در این مقاله روابطی برای تعیین پارامترهای مدل زوال اصلاح شده‌ی ایبارا-کراوینکلر در نواحی مفاصل پلاستیک تشکیل شده در تیرهای متصل شده به ستون‌های قوطی فولادی توسط ورق‌های فوقانی و تحتانی ارائه می‌شود. به این منظور ابتدا تعدادی اتصال مطابق ضوابط مبحث دهم طراحی می‌شوند. در ادامه اتصالات طراحی شده به صورت عددی مدل‌سازی و تحلیل می‌شود. با استفاده از نتایج تحلیل عددی اتصالات، پارامترهای مدل زوال واسنجی شده و روابط مورد نظر با استفاده از وایازش غیرخطی ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی: زوال سختی و مقاومت، اتصالات فولادی، رفتار غیرخطی، ورق‌های فوقانی و تحتانی، بار چرخه‌ای

۱- مقدمه

عملکرد، ایمنی و اقتصادی بالاتر است [2]. بنابراین مباحث طراحی بر اساس عملکرد در طراحی لرزه‌ای مطرح می‌شود. طراحی بر اساس عملکرد طراحی ساختمان به نحوی است که تحت سطوح مختلف بارگذاری به صورت مشخص و از پیش تعیین شده‌ی رفتار کند [3]. در ساختمان‌های دارای قاب خمشی فولادی اتصالات نقش مهمی در عملکرد لرزه‌ای و میزان شکل‌پذیری آن دارند. از طرفی مقاطع I در تیرها و مقاطع قوطی شکل در ستون‌ها در قاب‌های خمشی فولادی به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شوند. بنابراین پیش‌بینی رفتار این نوع

طراحی لرزه‌ای در آیین‌نامه‌های فعلی به صورت الاستیک بوده و رفتار غیرخطی را به صورت غیرمستقیم در نظر می‌گیرند. سازه‌های طراحی شده بر اساس این آیین‌نامه‌ها هنگام وقوع زمین لرزه‌های شدید به صورت کنترل نشده دچار تغییر شکل‌های غیرالاستیک می‌شوند که می‌تواند منجر به پاسخ نامطلوب و حتی فروریزی سازه شود [1]. با وجود این‌که روش‌های الاستیک در گذشته پاسخ‌گوی نیازها بوده است، تقاضای جوامع در حال پیش بردن طراحی به سوی سطوح

گرفتن همه‌ی مدهای زوال قابل توجه سختی و مقاومت است. برای سادگی روابط از مدل ساده شده‌ی مفصل پلاستیک متمرکز در دو سر تیرها استفاده می‌شود. برای تعیین رفتار این مفصل‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای و یکنواخت از مدل ایبارا-کراوینکلر [7] استفاده می‌شود.

۲- طراحی و مدل‌سازی عددی

برای تأمین داده‌های مورد نیاز ۵۳ عدد از اتصال تیر به ستون با استفاده از ورق فوقانی و تحتانی (WFP) طراحی شده است. انتخاب مقاطع به گونه‌ای انجام شده است که طیف وسیعی از مقاطع استفاده شده در عمل را پوشش دهد. فشردگی لرزه‌ای مقاطع بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [4] کنترل شده و محدودیت‌های ذکر شده در FEMA 350 [5] برای مقاطع تیر و ستون برای طراحی اتصالات WFP نیز در نظر گرفته شده است. همچنین معیار ستون قوی-تیر ضعیف و مقاومت و پایداری چشمه‌ی اتصال نیز مطابق با ضوابط لرزه‌ای مبحث دهم کنترل شده است.

اتصالات در تغییرشکل‌های غیرخطی بزرگ ضروری به نظر می‌رسد. برای امکان مدل‌سازی کامل رفتار اجزای سازه‌ای با در نظر گرفتن زوال سختی و مقاومت، نیاز به روابطی است که پارامترهای مدل هیستریزیس مورد استفاده را به عوامل فیزیکی و هندسی که در عمل تعیین کننده‌ی زوال هستند، مرتبط کند. برای تعیین این روابط نیاز به نتایج آزمایشگاهی است که بتوان بر اساس آن پارامترهای مدل هیستریزیس زوال را واسنجی نمود. با این وجود به دلیل عدم وجود نتایج آزمایشگاهی کافی برای هر نوع از اتصالات، می‌توان از مدل‌های عددی با دقت کافی به عنوان جایگزین نتایج آزمایشگاهی استفاده کرده و از نتایج به دست آمده برای واسنجی پارامترها استفاده نمود. با توجه به اهمیت اتصالات تیر ۱ به ستون قوطی با استفاده از ورق فوقانی و تحتانی و معرفی این اتصال در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [4] و همچنین مشابه آن (WFP) در FEMA-350 [5] و AISC [6] به عنوان یکی از اتصالات پذیرفته شده تعیین روابط تعیین‌کننده رفتار زوال این نوع اتصال دارای اهمیت ویژه‌ای است. در نهایت هدف تعیین روابطی برای پیش‌بینی رفتار این اتصالات تحت بارهای چرخه‌ای با در نظر

شکل ۱. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی

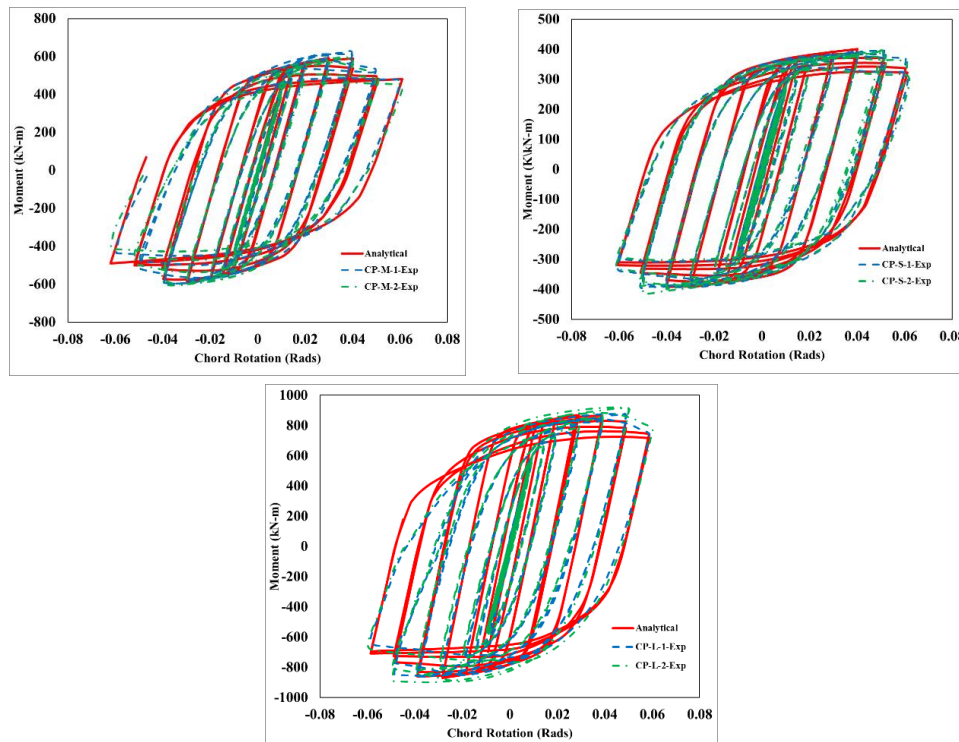


Fig. 1. Verification results

مجاز توسط آیین‌نامه، مهارهای جانبی در نظر گرفته شده است. با توجه به بارگذاری چرخه‌ای و سرعت پایین بارگذاری از تحلیل استاتیکی استفاده می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن المان‌های سه بعدی ۲۰ گره‌ای درجه دوم و همچنین قابلیت تغییر شکل‌های بزرگ، رفتار غیرخطی در مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود. بارگذاری نیز به صورت تغییر مکانی به سر تیرها اعمال شده است. برای طراحی ورق فوقانی ابتدا ورق تنها با دو خط جوش موازی طراحی شد و در صورتی که طول ورق بیش از عمق تیر به دست آمد، از جوش عرضی استفاده شود؛ اگر باز هم طول ورق بیش از عمق تیر شد، ورق به صورت انگشتی در نظر گرفته شد تا محدودیت کوچک‌تر بودن طول ورق از ارتفاع تیر رعایت گردد. با توجه به محدودیت ضخامت ورق‌های فوقانی و تحتانی، در اتصالاتی که ضخامت ورق آن‌ها بیش از ۴ سانتی‌متر به دست آمد، نوع فولاد استفاده شده برای ورق‌های فوقانی و تحتانی به فولاد ST-52 تغییر داده شد تا محدودیت ضخامت رعایت شود. در نهایت ۵۳ عدد اتصال طراحی و به عنوان هندسه‌ی مدل‌های عددی در نظر گرفته شد (شکل ۲).

برای طراحی ورق‌های اتصال از روش پیشنهاد شده توسط صنیعی‌نیا و همکاران [8] استفاده شده است. برای درستی آزمایشی مدل‌سازی سه اتصال با ورق فوقانی و تحتانی آزمایش شده توسط صنیعی‌نیا و همکاران [8] در نرم‌افزار ABAQUS [9] مدل‌سازی شده و منحنی لنگر-دوران آن‌ها با هم مقایسه شده اند (شکل ۱). مشاهده می‌شود که شیب شاخه‌های باربرداری و بارگذاری که سختی اتصال را نشان می‌دهند هماهنگی مناسبی دارند. همچنین ملاحظه می‌شود که مقاومت‌های بیشینه و تسلیم نیز برای منحنی‌های عددی و آزمایشگاهی اختلاف ناچیزی دارند. بنابراین با توجه به هماهنگی مناسب منحنی‌های عددی و آزمایشگاهی می‌توان درستی مدل‌سازی عددی را نتیجه گرفت. در مدل‌سازی اتصالات فرض می‌شود که جوش‌ها در ناحیه الاستیک باقی مانده و گسیختگی در آن‌ها رخ نمی‌دهد. با توجه به این‌که هدف بررسی رفتار چرخه‌ای اتصال است، از الگوی بارگذاری SAC [9] استفاده می‌شود. در مدل‌های عددی ستون، تکیه‌گاه دو انتهای ستون به صورت مفصل فرض شده است. در تیر نیز با در نظر گرفتن بیشینه فاصله

شکل ۲. پارامترهای مشخصات هندسی مدل‌های عددی

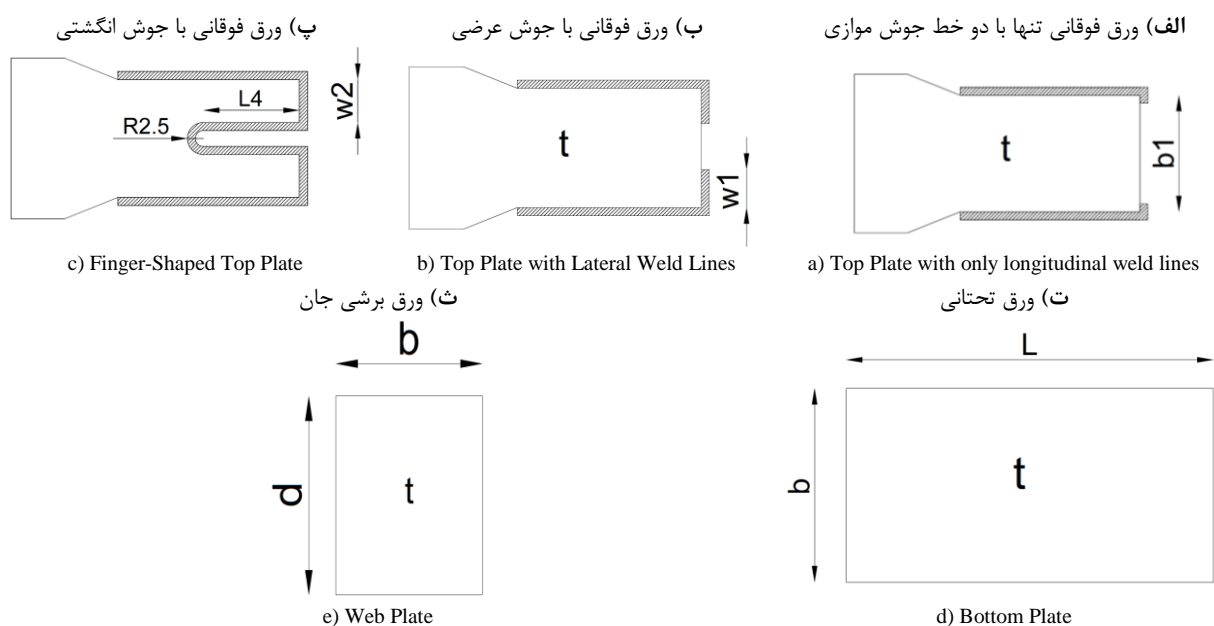


Fig. 2. Numerical Models Geometric Properties

به عنوان نمونه در شکل (۳) چگونگی کماتش بال تیر و چگونگی توزیع تنش در اتصال مشاهده، و ملاحظه می‌شود مفصل پلاستیک دور از بر ستون و پس از اتمام ورق‌های فوقانی و تحتانی تشکیل می‌شود که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مورد انتظار اتصال است. پس از تحلیل نمونه‌ها، منحنی لنگر-دوران برای اتصال ترسیم می‌شود (شکل ۴). در شکل (۴) لنگر متناظر با ۸۰ درصد لنگر پلاستیک نیز ترسیم شده است. در جدول (۱) نتایج عددی نمونه‌ها از جمله لنگر و دوران بیشینه اتصال، لنگر متناظر با تغییر مکان نسبی ۰/۰۴ و ۸۰ درصد لنگر پلاستیک تیر ارایه می‌شوند که بر اساس آن می‌توان ضوابط پذیرش اتصال را کنترل کرد.

پس از تحلیل غیرخطی اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای، نتایج شامل توزیع تنش یا کرنش پلاستیک در تمام مراحل بارگذاری بدست می‌آید.

شکل ۳: نتایج تحلیل

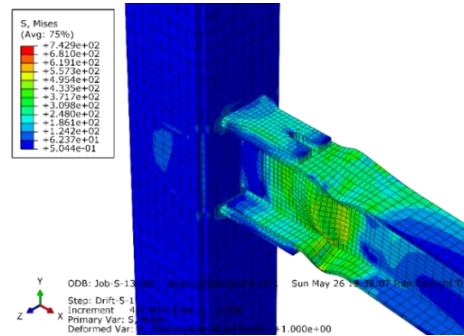


Fig. 3. Analysis result

شکل ۴. منحنی‌های لنگر-دوران برای مدل‌های عددی

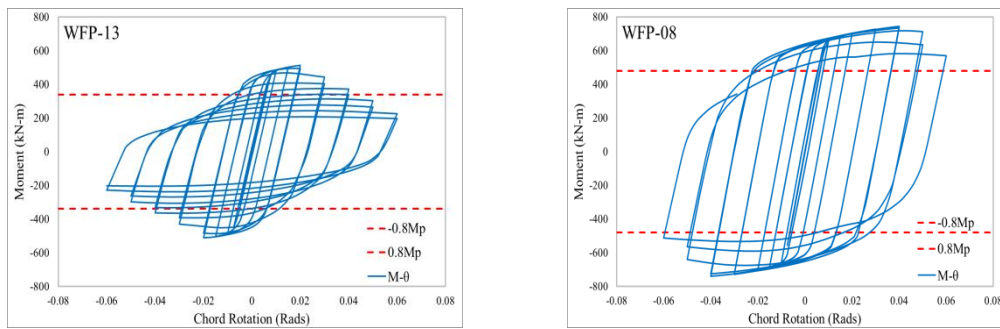


Fig. 4. Numerical Models Moment-Rotation Curves

جدول ۱: نتایج تحلیل مدل‌های عددی

نمونه اتصال	θ_{max} (rad)	M_{max} (kN.m)	$M_{\theta=0.04}$ (kN.m)	$M_{\theta=-0.04}$ (kN.m)	$0.8M_p$ (kN.m)
WFP-28	0.06	1547.1	1359.1	1202.1	988.3
WFP-29	0.04	1411.9	1094.7	952	923.8
WFP-30	0.04	1733.6	1305	1135.6	1130.4
WFP-31	0.04	1943.9	1429.8	1339.2	1299.6
WFP-32	0.05	1403.3	1020.2	931.8	904.6
WFP-33	0.05	1708.2	1471.6	1330.4	1097.9
WFP-34	0.04	1570.6	1041.3	1026	1028.1
WFP-35	0.05	2061.1	1780.9	1590.5	1286.4
WFP-36	0.04	2264.5	1694.7	1589.2	1442
WFP-37	0.05	1521.4	1045.3	1010	1000.7
WFP-38	0.05	1879.9	1470.2	1454	1210.3
WFP-39	0.04	1723.5	1156.2	1058.3	1135
WFP-40	0.05	2088.8	1558.5	1506.1	1379.5
WFP-41	0.04	2475.7	1765.3	1739.1	1587.7
WFP-42	0.05	2076.2	1449.5	1409.5	1333.7
WFP-43	0.05	2567.4	2052.4	1930.3	1575.8
WFP-44	0.05	2289.8	1690.4	1516.8	1489.7
WFP-45	0.05	2829.3	2179.4	2226.7	1772.1
WFP-46	0.04	3090.9	2284.9	2201.4	1968.4
WFP-47	0.04	2464	1609.7	1573.6	1585.5
WFP-48	0.05	2984.9	232.7	2099.5	1860.1
WFP-49	0.05	3328.1	2292.6	2245.5	2083.5
WFP-50	0.05	3654.2	2466.3	2373	2306.8
WFP-51	0.04	3520.1	2374.4	2330.6	2160.6
WFP-52	0.04	3934.1	2552.5	2512.4	2411.1
WFP-53	0.04	4322.9	2695.6	2613	2661.5

نمونه اتصال	θ_{max} (rad)	M_{max} (kN.m)	$M_{\theta=0.04}$ (kN.m)	$M_{\theta=-0.04}$ (kN.m)	$0.8M_p$ (kN.m)
WFP-01	0.06	229.3	228.4	229.3	149.5
WFP-02	0.06	292.1	290.3	292.1	192.5
WFP-03	0.06	389.7	389.7	389.6	254.2
WFP-04	0.06	275.5	259.6	254.9	182.8
WFP-05	0.06	353.4	323.8	320.9	233.9
WFP-06	0.06	498.6	494.3	496.3	316.2
WFP-07	0.06	597.4	596.6	597.4	385.6
WFP-08	0.06	743.5	743.5	740.5	479
WFP-09	0.05	418.3	313.7	314.4	277
WFP-10	0.06	604.6	603.3	604.6	373.6
WFP-11	0.05	711.5	656.6	625.2	453.8
WFP-12	0.06	933.4	921.1	915.6	574
WFP-13	0.06	513.8	372.3	362.6	339
WFP-14	0.05	686.7	671.4	654.5	433.2
WFP-15	0.05	800.2	690	617.4	524.2
WFP-16	0.05	1080.4	1077.7	1080.4	662
WFP-17	0.05	1001	897.2	859.9	632.5
WFP-18	0.05	1243.2	1241.1	1243.3	777.1
WFP-19	0.06	769.7	694.4	650	494.9
WFP-20	0.05	914.5	760.3	730	596.8
WFP-21	0.06	1214.6	1211.2	1194.4	752.7
WFP-22	0.04	1127.6	935.6	934.2	720.5
WFP-23	0.05	1403.2	1300.8	1291.3	388.1
WFP-24	0.05	1589.7	1343.7	1307.2	1009.9
WFP-25	0.05	1075.5	833.9	820.9	698.5
WFP-26	0.06	1358.3	1306.7	1294.6	846.1
WFP-27	0.05	1255.2	964.7	880.8	811.2

Table 1. Numerical Models Analysis Results

θ_{pc} : دوران پلاستیک پس از نقطه‌ی بیشینه برای بارگذاری یکنواخت (اختلاف بین دوران نقطه‌ی لنگر بیشینه و دوران در نقطه‌ی افت کامل مقاومت) و θ_u ظرفیت دوران نهایی همچنین دو پارامتر مرتبط با زوال چرخه‌ای که به صورت ذیل تعریف می‌شوند:

A : پارامتر نشان‌دهنده‌ی میزان زوال است. می‌توان برای چهار مد زوال موجود چهار مقدار مختلف برای این پارامتر فرض کرد. با این حال برای سادگی و همچنین عدم وجود خطای قابل توجه، مقدار آن برای هر چهار مد زوال یکسان فرض می‌شود.

c : این پارامتر سرعت وقوع زوال در چرخه‌های بارگذاری را مشخص می‌کند و مقدار آن بین ۱ تا ۲ است. مقدار یک نشان‌دهنده سرعت زوال یکسان در کل چرخه‌های بارگذاری است و هرچه این مقدار به عدد دو نزدیک‌تر باشد سرعت زوال در چرخه‌های پایانی بیش‌تر می‌شود. مقدار یک برای این پارامتر در واسنجی‌های انجام شده در نظر گرفته شده است. با توجه به موجود بودن مدل IK در نرم‌افزار غیرخطی OpenSees [11] به منظور واسنجی کردن پارامترهای مدل از این نرم‌افزار استفاده شده است. نحوه‌ی انجام واسنجی و تعیین پارامترهای مدل IK بر اساس مطالعات لیگنوس [7] انجام شده است. در شکل (۵) نتایج واسنجی این پارامترها برای سه اتصال نشان داده شده است. در این شکل منحنی حاصل از تحلیل با نرم‌افزار ABAQUS، منحنی واسنجی شده مرجع مدل IK و منحنی هیستریزس آن ترسیم شده‌اند.

۴- روابط ارایه شده برای پارامترهای زوال

پارامترهای هندسی مختلفی می‌توانند روی زوال تیرهای فولادی تأثیرگذار باشند که با توجه به مطالعات صورت گرفته و همچنین بررسی‌های انجام شده پارامترهایی که تأثیر قابل توجهی روی پارامترهای زوال دارند شناسایی شدند. این پارامترها به شرح ذیل تعریف می‌شوند:

۷-۲- کنترل ضوابط پذیرش عملکرد لرزه‌ای اتصال بر اساس ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه‌ی طراحی سازه‌های فولادی آمریکا [6]، اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی ویژه باید شرایط ذیل را تأمین نمایند:

(۱) اتصال باید بتواند حداقل 0.03 رادیان تغییر مکان نسبی طبقه را تحمل کند.

(۲) مقاومت خمشی اتصال در بر ستون، در تغییر مکان نسبی 0.04 ، حداقل 0.80 لنگر پلاستیک اسمی تیر باشد.

با مراجعه به جدول (۳) ملاحظه می‌شود که اتصالات طراحی شده شرایط فوق را دارا بوده و بنابراین می‌توان آن‌ها را واجد شرایط برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه در نظر گرفت. با توجه به محدودیت ضخامت بال در طراحی این اتصالات، در مقاطع قوی با نسبت ارتفاع به ضخامت جان بزرگ، در بیش‌تر نمونه‌ها افت ناگهانی در تغییر مکان جانبی نسبی 0.02 رادیان ملاحظه شد، که این امر می‌تواند به دلیل ضعیف بودن بال در این مقاطع باشد. پس از این افت ناگهانی، تثبیت نسبی در زوال مقاومت در مدل‌ها مشاهده می‌شود.

۳- مدل سازی و واسنجی پارامترهای زوال

همان‌گونه که ذکر شد، برای ارزیابی زوال از مدل اصلاح‌شده‌ی ایبارا-کراوینکلر (IK) استفاده شده است. با توجه به این‌که بررسی رفتار دوران مفاصل پلاستیک تشکیل شده در تیر مد نظر است، مدل در قالب لنگر و دوران شکل (۴)، مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای مدل به صورت ذیل تعریف می‌شوند: منحنی مرجع^۱ توسط سه پارامتر مقاومتی تعریف می‌شود که عبارتند از:

$$M_y: \text{لنگر تسلیم مؤثر}$$

$$M_c: \text{لنگر نقطه‌ی مقاومت حداکثر}$$

$$M_c = \kappa \cdot M_y: \text{لنگر پسماند}$$

و همچنین چهار پارامتر تغییر مکانی:

$$\theta_y: \text{دوران تسلیم}$$

θ_p : دوران پلاستیک پیش از نقطه حداکثر برای بارگذاری یکنواخت (اختلاف بین دوران تسلیم و نقطه‌ی لنگر بیشینه)

شکل ۵. مدل زوال اصلاح شده‌ی ایبارا-کراوینکلر [10]

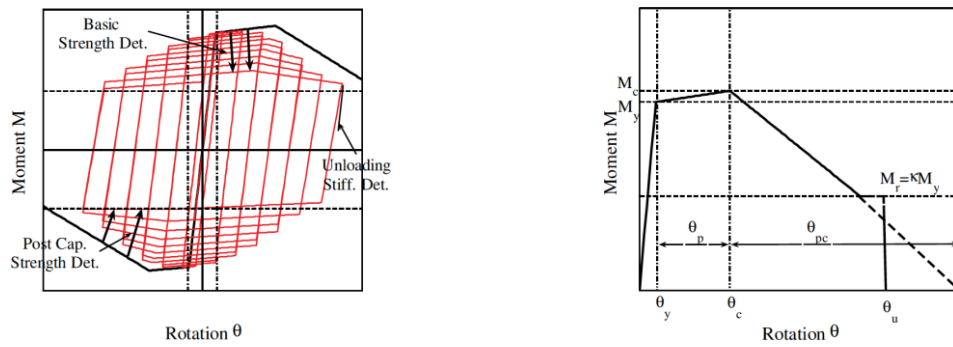


Fig. 5. Modified Ibarra-Krawinkler model [10]

شکل ۶. نتایج واسنجی پارامترهای مدل زوال

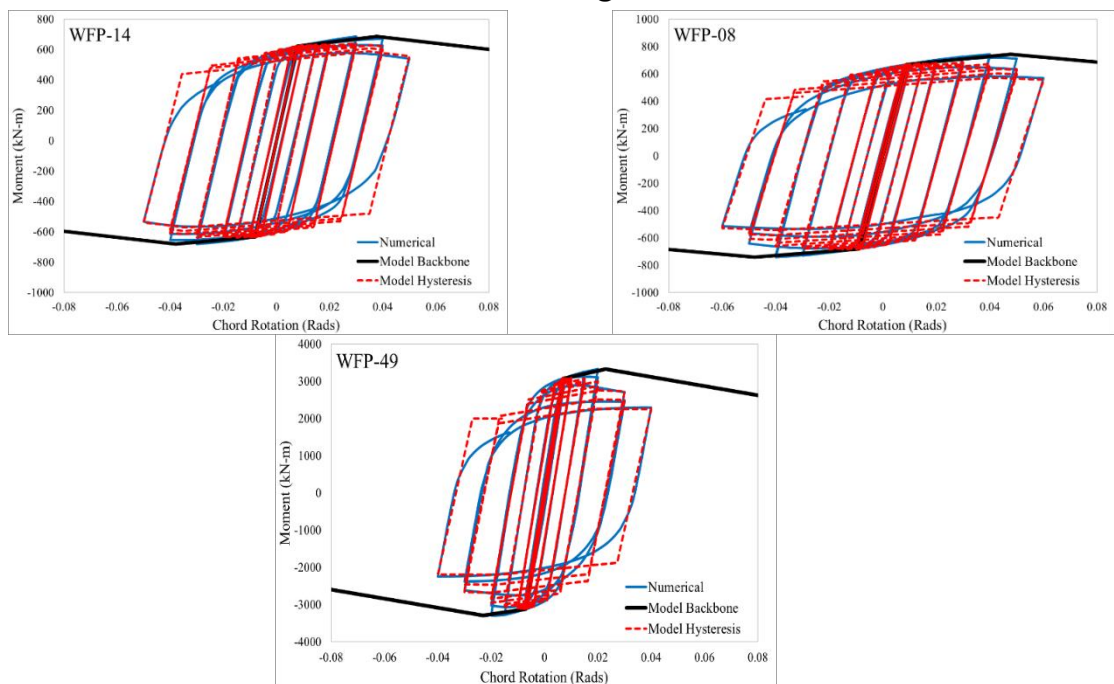


Fig. 6. Deterioration Model Calibration Results

WFP ارایه نمود.

مدل غیرخطی کلی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$RP = a_0 \cdot (X_1)^{a_1} \cdot (X_2)^{a_2} \dots (X_n)^{a_n} \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ ثابت‌هایی هستند که به عنوان ضرایب وایزش شناخته می‌شوند؛ و X_1, X_2, \dots, X_n متغیرهای وایزش هستند. برای انجام وایزش از نرم‌افزار تحلیل آماری SPSS [13] استفاده شده است و نوع وایزش، غیرخطی انتخاب شده است. بنابراین رابطه‌ی (۱) با جایگذاری پارامترهای مورد نظر به صورت زیر در می‌آید:

$$RP = a_0 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{a_1} \cdot \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^{a_2} \cdot \left(\frac{L_b}{r_y}\right)^{a_3} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{a_4} \cdot \left(\frac{d}{280}\right)^{a_5} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{tp}^{a_6} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{bp}^{a_7} \cdot \left(\frac{F_{ypl}}{240}\right)^{a_8} \quad (2)$$

d عمق تیر، L/d نسبت طول به دهانه‌ی تیر (نصف طول دهانه‌ی کل تیر در نظر گرفته شده است)، L_b/r_y این نسبت حساسیت به کمانش جانبی-پیچشی را مشخص می‌کند. L_b فاصله از بر ستون تا اولین مهار جانبی بوده و r_y شعاع ژیراسیون حول محور ضعیف تیر است. $b/2t_f$ نسبت نصف عرض به ضخامت بال تیر، h/t_w نسبت ارتفاع جان به ضخامت جان تیر، $(b/t)_{top}$ نسبت عرض به ضخامت ورق فوقانی، $(b/t)_{bot}$ نسبت عرض به ضخامت ورق تحتانی

با مشخص بودن پارامترهای هندسی تأثیرگذار روی هرکدام از پارامترهای زوال و از طریق وایزش چند متغیره غیرخطی می‌توان روابطی برای تعیین پارامترهای مدل برای اتصالات

نتایج عددی به صورت نقطه‌ای ترسیم شده است.

شکل ۷. مقادیر پیش‌بینی شده/مقادیر واسنجی شده برای (θ_p)

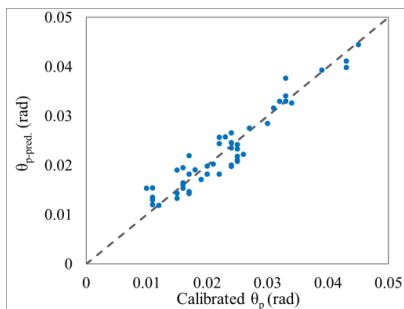


Fig. 7. Predicted/Calibrated Values for (θ_p)

۴-۲- روابط پیشنهاد شده برای دوران پلاستیک پس از نقطه‌ی

بیشینه θ_{pc}

رابطه به دست آمده برای θ_{pc} با استفاده از وایزش به صورت زیر است.

$$\theta_{pc} = 8129.33 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-1.997} \cdot \left(\frac{d}{280}\right)^{0.675} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{tp}^{-0.483} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{bp}^{-0.771} \cdot \left(\frac{F_{y,pl}}{240}\right)^{-0.868} \quad (4)$$

$(R^2 = 0.742)$

شکل ۸. مقادیر پیش‌بینی شده/مقادیر واسنجی شده (θ_{pc})

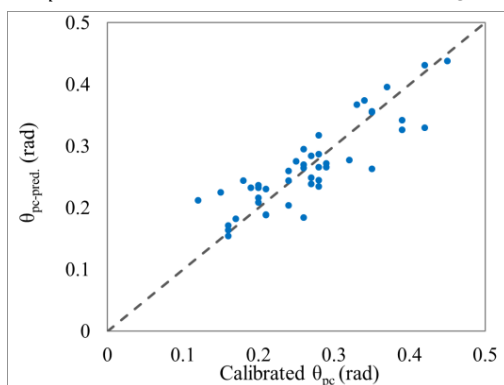


Fig. 8. Predicted/Calibrated Values for (θ_{pc})

از رابطه‌ی فوق مشخص می‌شود که پارامترهای h/t_w و عمق تیر بیش‌ترین تأثیر را بر روی θ_{pc} دارند. در شکل (۸) مقادیر پیش‌بینی شده برای θ_{pc} با استفاده از رابطه‌ی فوق در مقابل مقادیر حاصل از واسنجی θ_{pc} ترسیم شده است.

۴-۳- روابط پیشنهاد شده برای دوران پلاستیک تجمعی Δ

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، دوران پلاستیک تجمعی مرجع، پارامتری است که نرخ زوال چرخه‌ای را نشان می‌دهد. برای

در رابطه‌ی فوق، $F_{y,pl}$ تنش تسلیم ورق‌های فوقانی و تحتانی است که در داده‌های موجود، با توجه به استفاده از فولادهای ساختمانی از نوع ST-37 و ST-52، که تنش تسلیم ورق‌های فوقانی و تحتانی هستند دو مقدار ۲۴۰ یا ۳۶۰ مگاپاسکال را به خود اختصاص خواهد داد. همچنین روابط به دست آمده با فرض استفاده از فولاد ST-37 برای تیرها می‌باشد. بنابراین تنش تسلیم مصالح تیر به عنوان متغیر در نظر گرفته نشده است. با توجه به طراحی صورت گرفته و داده‌های موجود، روابطی ارائه شده برای بازه‌های زیر معتبر است:

- $35 \leq h/t_w \leq 60$
- $5 \leq b/2t_f \leq 8.75$
- $14.8 \leq L_b/r_y \leq 41$
- $4.7 \leq L/d \leq 8$
- $280 \text{ mm} \leq d \leq 950 \text{ mm}$
- $4 \leq (b/t)_{top} \leq 9$
- $9 \leq (b/t)_{bot} \leq 15.6$

همچنین باتوجه به امکان وجود خطای عددی در مدل‌های عددی و همچنین خطای احتمالی در فرآیند واسنجی، برون‌نهادهای داده‌ها شناسایی و حذف شده‌اند. برای حذف برون‌نهادها از روش‌های آماری استفاده شده است. به این صورت که مقادیر مانده پس از انجام وایزش استانداردسازی شده و با عدد ۲/۵ یا ۲ مقایسه شدند و مقادیر بزرگ‌تر از ۲/۵ یا ۲، از داده‌ها حذف شدند. به علاوه جهت سادگی روابط، پارامترهایی که تأثیر ناچیزی بر هر کدام از پارامترهای داشتند از روابط حذف شدند.

۴-۱- روابط پیشنهاد شده برای ظرفیت دوران پلاستیک θ_p

با توجه به منحنی‌های روند تغییرات در بخش پیش، پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر روی θ_p مشاهده شد. رابطه‌ی به دست آمده برای تعیین θ_p با استفاده از وایزش غیرخطی به صورت زیر می‌باشد:

$$\theta_p = 46.74 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-1.525} \cdot \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^{-0.448} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{-0.364} \cdot \left(\frac{d}{280}\right)^{-0.4} \quad (3)$$

$(R^2 = 0.881)$

در رابطه‌ی فوق مشاهده می‌شود که بیش‌ترین تأثیر روی θ_p را نسبت‌های h/t_w و L/d دارند. در شکل (۷) نمودار مقادیر θ_p بر اساس رابطه‌ی فوق در مقابل مقادیر θ_p حاصل از واسنجی

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{bp}^{-0.026} \cdot \left(\frac{F_{ypl}}{240}\right)^{0.013}$$

$$(R^2 = 0.938)$$

در شکل (۱۰) مقادیر پیش‌بینی شده برای نسبت $M_y/M_{y,p}$ با استفاده از رابطه‌ی فوق در مقابل مقادیر حاصل از واسنجی ترسیم شده است.

شکل ۱۰. مقادیر پیش‌بینی شده/مقادیر واسنجی شده ($M_y/M_{y,p}$)

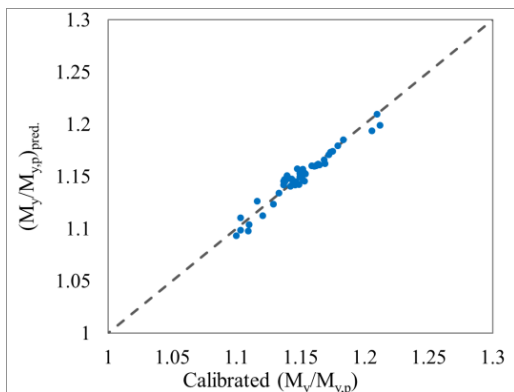


Fig. 10. Predicted/Calibrated Values for ($M_y/M_{y,p}$)

۴-۵- روابط پیشنهاد شده برای نسبت مقاومت پس از بیشینه

به مقاومت خمشی مؤثر M_c/M_y

سختی پس از تسلیم و در نتیجه M_c ، به صورت نسبت لنگر بیشینه به مقاومت خمشی مؤثر M_y تعریف می‌شود. نسبت M_c/M_y سختی شاخه‌ی سخت‌شدگی کرنش در منحنی مرجع را تعریف می‌کند. این سختی به دلیل تأثیری که بر پایداری سیستم سازه‌ای دارد، مهم است [12]. رابطه به دست آمده برای نسبت M_c/M_y به صورت زیر است.

$$\frac{M_c}{M_y} = 1.59 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.068} \cdot \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^{-0.053} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{tp}^{0.018} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{bp}^{-0.02} \quad (7)$$

$$(R^2 = 0.866)$$

در شکل (۱۱) مقادیر پیش‌بینی شده برای نسبت $M_c/M_{y,p}$ با استفاده از رابطه‌ی فوق در مقابل مقادیر حاصل از واسنجی ترسیم شده است.

سادگی فرض شده است که همه‌ی پارامترهای زوال با Λ یکسانی تعریف می‌شوند. همچنین توان نیز یک فرض شده است. رابطه به دست آمده با استفاده از وایزش برای تعیین Λ به صورت زیر است. ملاحظه می‌شود که بر خلاف θ_p و θ_{pc} نسبت $b_f/2t_f$ بیش‌ترین تأثیر را بر روی Λ دارد.

$$\Lambda = 735.79 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-1.523} \cdot \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^{-1.989} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{tp}^{0.709} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{bp}^{0.814} \cdot \left(\frac{F_{ypl}}{240}\right)^{-0.941} \quad (5)$$

$$(R^2 = 0.888)$$

شکل (۹) مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واسنجی شده را برای پارامتر Λ نشان می‌دهد.

شکل ۹. مقادیر پیش‌بینی شده/مقادیر واسنجی شده (Λ)

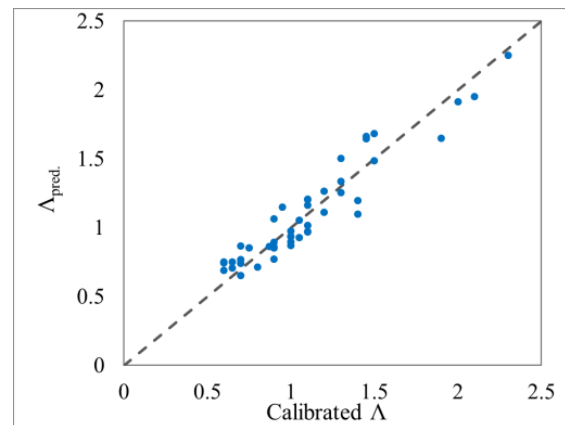


Fig. 9. Predicted/Calibrated Values for (Λ)

۴-۴- روابط پیشنهاد شده برای نسبت مقاومت خمشی مؤثر به

پیش‌بینی شده $M_y/M_{y,p}$

همان‌طور که اشاره شد، مدل زوال IK به صورت صریح، اثر سخت‌شدگی چرخه‌ای را در نظر نمی‌گیرد. اما اثر آن با افزایش میزان لنگر تسلیم به یک لنگر مؤثر در نظر گرفته می‌شود. مقاومت خمشی مؤثر M_y معمولاً اندکی از مقاومت خمشی پیش‌بینی شده $M_{y,p} = ZF_y$ بزرگ‌تر می‌باشد. رابطه‌ی به دست آمده برای نسبت $M_y/M_{y,p}$ با استفاده از وایزش به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{M_y}{M_{y,p}} = 2.03 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.029} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{-0.205} \cdot \left(\frac{b}{t}\right)_{tp}^{-0.012} \quad (6)$$

نسبت های $M_y/M_{y,p}$ و همچنین M_c/M_y ارایه شده است.

۴-۶- بررسی روابط پیشنهادی

در این بخش به منظور بررسی درستی روابط پیشنهادی، پارامترهای مدل زوال IK برای دو نمونه آزمایشگاهی با استفاده از روابط ارایه شده، تعیین شده و با منحنی آزمایشگاهی لنگر-دوران مقایسه می شود. نمونه آزمایشگاهی انتخاب شده از آزمایش های انجام شده توسط صنیعی نیا و همکاران [8] می باشد. با استفاده از روابط پیشنهادی پارامترهای زوال برای اتصال فوق به صورت جدول (۳) به دست می آید. پس از تعیین پارامترهای فوق با استفاده از روابط پیشنهادی می توان منحنی های هیستریزس تحلیلی را ترسیم کرد. در شکل (۱۲) این منحنی ها روی منحنی های آزمایشگاهی ترسیم شده است. ملاحظه می شود که منحنی های هیستریزس مدل زوال IK با دقت مناسبی بر منحنی هیستریزس آزمایشگاهی هماهنگ شده است که این امر نشان دهندهی مناسب بودن پاسخ های حاصل از روابط پیشنهادی است.

شکل ۱۱. مقادیر پیش بینی شده/مقادیر واسنجی شده $(M_c/M_{y,p})$

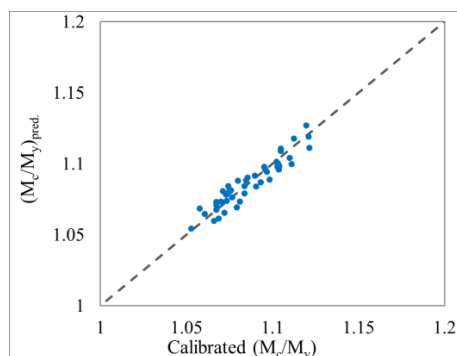


Fig. 11. Predicted/Calibrated Values for $(M_c/M_{y,p})$

جدول ۲. مشخصات آماری نسبت های $M_y/M_{y,p}$ و M_c/M_y

M_c/M_y	$M_y/M_{y,p}$	مشخصه ی آماری
1.09	1.15	Average
0.017	0.0245	Standard Deviation

Table 2. Statistical Properties for $M_y/M_{y,p}$ and M_c/M_y

برای تعیین پارامترهای M_c و M_y می توان پا پذیرفتن خطای بیش تر با استفاده از میانگین گیری یک نسبت واحد برای کلیه مقاطع تیر که در آنها از اتصالات ورق فوقانی و تحتانی استفاده شده است، در جدول (۲) متوسط و انحراف معیار

جدول ۳. مقادیر پارامترهای زوال با استفاده از روابط پیشنهادی

نمونه	K (kN/m)	M_y (kN.m)	M_c/M_y	θ_p (rad)	θ_{pc} (rad)	Δ	κ
CP-S	32918400000	369.4	1.11	0.039	0.36	2.2	0.4
CP-M	47217600000	549.2	1.09	0.032	0.32	1.4	0.4

Table 3. Deterioration Parameters values resulted fro proposed relationships

شکل ۱۲. هماهنگی منحنی هیستریزس مدل زوال IK بر منحنی آزمایشگاهی

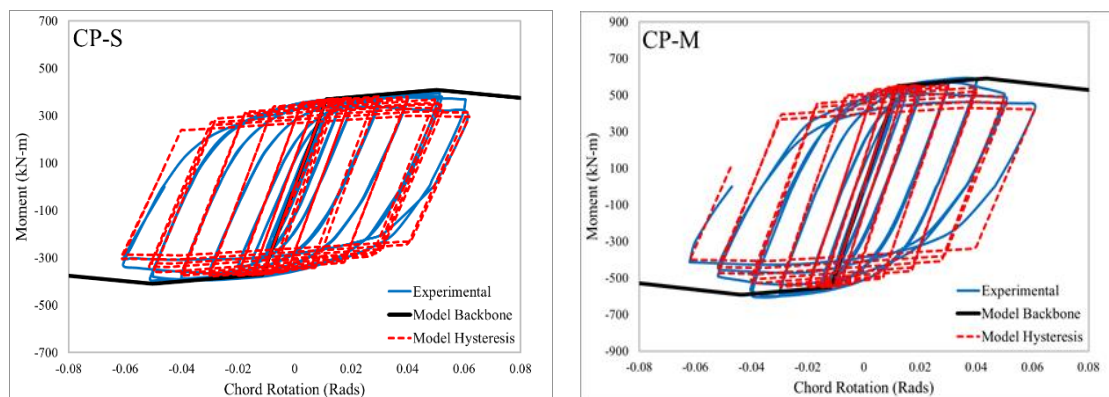


Fig. 12. Experimental and Deterioration IK Model Together

۵- نتیجه‌گیری

به منظور مدلسازی رفتار اعضا تحت بارهای یکنواخت و چرخه‌ای نیاز به داده‌هایی می‌باشد که به منظور واسنجی پارامترهای زوال مورد استفاده قرار گیرند. به این منظور، ۵۳ عدد اتصال تیر به ستون مطابق ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه‌ی طراحی سازه‌های فولادی ایران طراحی و به صورت عددی تحت بارهای چرخه‌ای مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج به دست آمده به شرح زیر است.

اتصالات تیر ۱ به ستون قوطی از نوع ورق‌های فوقانی و تحتانی ضوابط پذیرش قاب‌های خمشی را تأمین کرده و می‌تواند به عنوان یکی از اتصالات استفاده شده در قاب‌های خمشی ویژه مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به مشاهده نتایج تحلیل‌های عددی در تمامی مدل‌های تشکیل مفصل پلاستیک در خارج از بر ستون و پس از اتمام ورق‌های فوقانی و تحتانی مشاهده شد که این مسأله همراه با باقی ماندن چشمه اتصال در ناحیه‌ی الاستیک بود.

به دلیل محدودیت‌های جوش‌کاری و ضخیم شدن ورق‌های فوقانی و تحتانی در مقاطع بزرگ و همچنین محدودیت ضخامت بال تیر استفاده از این اتصال در مقاطع بسیار قوی و دهانه‌های بزرگ، طراحی و اجرا را با مشکلاتی همراه می‌کند.

برای تیرهای فولادی مورد مطالعه پارامترهای اصلی تأثیرگذار روی ظرفیت دوران پلاستیک θ_p نسبت‌های عمق به ضخامت جان h/t_w ، عمق تیر و نسبت L/d می‌باشد. در مورد ظرفیت دوران پس از نقطه‌ی بیشینه θ_{pc} اثر نسبت L/d ناچیزتر می‌باشد. اما برای پارامتر نرخ زوال A پارامترهای تأثیرگذار متفاوت بوده و ملاحظه می‌شود که نسبت عرض به ضخامت بال $b/2t_f$ نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به سایر پارامترها ایفا می‌کند.

کاهش فواصل مهارهای جانبی باعث افزایش ظرفیت دوران پلاستیک θ_p می‌شود. با این حال نسبت L_b/r_y تأثیر قابل توجهی بر روی ظرفیت دوران پلاستیک θ_p ندارد. این نسبت تأثیر قابل توجه تری روی ظرفیت دوران پس از نقطه‌ی بیشینه θ_{pc} و نرخ زوال A دارد که این امر به دلیل قابل توجه بودن کماتش جانبی-پیچشی در چرخه‌های بزرگ بارگذاری می‌باشد.

نسبت‌های عرض به ضخامت ورق‌های فوقانی و تحتانی با این‌که تأثیر قابل توجهی بر روی θ_p ندارند، اثر آن‌ها روی دو پارامتر دیگر زوال مهم و غیر قابل صرف نظر کردن است.

References

۶- مراجع

- 1- Goel S. C., Liao W. C., Bayat M. R. & Chao S. H. 2010 Performance-based plastic design (PBPD) method for earthquake-resistant structures: an overview. *The structural design of tall and special buildings*, **19**, 115-137.
- 2- Gupta A. & Krawinkler H. 1999 Seismic demands for the performance evaluation of steel moment resisting frame structures. *Stanford University*, USA.
- 3- Gong Y., Xu L. & Grierson D. E. 2005 Performance-based design sensitivity analysis of steel moment frames under earthquake loading. *International journal for numerical methods in engineering*, **63**, 1229-1249.
- 4- Tenth Code of Iran National Building Regulations 2000 (In Persian).
- 5- FEMA-350 2000 Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, *Federal Emergency Management Agency*. Washington, USA.
- 6- AISC 360-05 2005 Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, USA.
- 7- Lignos D. & Krawinkler H. 2009 Sidesway collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations. *Report No. TB 172, John A. Blume Earthquake Engineering Research Center, Stanford University*. CA, USA.
- 8- Saneei Nia Z., Mazroi, A. & Ghassemieh M. 2014 Cyclic performance of flange-plate connection to box column with finger shaped plate. *Journal of Constructional Steel Research*, **101**, 207-223.
- 9- ABAQUS Users Manual 6.10-1 2010 Providence, USA.
- 10- Krawinkler H., Parisi F., Ibarra L., Ayoub A., & Medina R.A. 2011 Development of a testing protocol for woodframe structures. *CUREe*, **102**, Richmond, CA, USA.
- 11- SPSS, "IBM SPSS Statistics Base 20, 2011 *SPSS Inc.*, Chicago, USA.
- 12- Medina R.A. & Krawinkler H. 2004 Seismic demands for nondeteriorating frame structures and their dependence on ground motions. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, CA, USA.

Modeling of deterioration in moment steel frames using WFP connections to box columns

M.Ghassemieh^{1*}, S.Karimi²

1- Prof., School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- M.S. in Structural Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*m.ghassemieh@ut.ac.ir

Abstract:

Seismic design in current codes is elastic and the nonlinear behavior is only incorporated indirectly. Structures which are designed by these codes are subjected to large excessive inelastic deformations under heavy earthquakes, which could lead to undesirable response or even collapse of the structure. Although elastic methods have been satisfactory in the past, public demands are leading design procedures to higher levels of performance, safety and economy. So due to the above mandate, performance based design is suggested for the seismic design. Performance based design is defined as a design procedure in which the structure performs in a predefined manner under different levels of loading. Therefore, in order to determine structure behavior under different loading, analytical models are needed to predict structural components behavior. In many buildings, steel moment frames are used as lateral loading system. In the steel moment frames buildings, connections play an important part in seismic performance and ductility of the structure. On the other hand, I-beam sections with box columns sections are widely used in steel moment frames. As a result, it is of great importance to predict these type of connections' behavior for the deformations in the nonlinear range. For feasibility of modeling of structural components considering stiffness and strength deterioration, relations are needed to correlate hysteresis model parameters to physical and geometrical factors, which practically determine deterioration. To obtain these relations, sufficient experimental results are required to calibrate deteriorating hysteresis model parameters. However due to the lack of enough experimental results for each particular connection, numerical models with acceptable accuracy could be used instead, and the obtained results can be used to calibrate the parameters. Considering the importance of I-beam to box column connections utilizing top and bottom plates and introducing these connections in the tenth code of Iranian national building regulations, and the WFP connections in FEMA-350 and AISC as one of the accepted connections, specifying the relations that determine the deterioration behavior of this type of connection is of particular importance. Thus the aim of this research is to propose relations in order to predict the behavior of the I-beam to box column moment connection. For this reason, WFP connections that were previously designed and tested by few researchers are used as the benchmark and verification samples. Essentially, the purpose is to propose relations to predict the behavior of these connections under cyclic loading considering all modes of stiffness and strength deterioration. The proposed relations made be simple and practical so that can be used in the design of structures. Hence, the simplified model of the concentrated plastic hinge can be used for both beam ends. To determine the behavior of these hinges under uniform cyclic loading, the Ibarra-Krawinkler hysteretic model is used. Deterioration model parameters are calibrated by using the results from numerical analysis and the intended relationships are represented by nonlinear regression. In conclusion, the deterioration model developed for WFP connections of I-beam to box column can provide efficiently for acceptance criteria of moment frames and can be used in special moment frames.

Keywords: Deterioration of stiffness and strength, WFP steel moment connection, top and bottom plate, cyclic loading, box column