

## خواص رفتاری سختی، ظرفیت نهایی و شکل‌پذیری یک اتصال نیمه صلب جدید

سیدحسین حسینی لواسانی؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۴/۸/۲۳ پذیرش ۹۴/۱۲/۱۲

### چکیده

سازه‌های فولادی باید از طریق اتصالات کارآمد با ظرفیت‌های (اتلاف) انرژی مشخص به‌منظور مقاومت در برابر زلزله القاء شده به‌وسیله حرکت‌های زمین متصل شوند. قبل از زلزله‌های نورتریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) طراحان و هم‌چنین آئین‌نامه‌ها در آن زمان، تمایل به استفاده از اتصالات جوشی داشتند که برای نیروهای ناشی از (حالت‌های) مختلف زلزله طراحی می‌شدند. مدل‌های اتصالات نیم صلب اساساً، نشان‌دهنده روابط، نوع پیچشی - خمشی هستند. آن‌ها منحنی‌های ساده‌ای هستند که شامل داده‌های آزمایشگاهی قابل‌دسترس است و برای نشان دادن اثر اتصالات در قاب‌های فولادی استفاده می‌شوند. با این وجود، کمبود دانش در داده‌های تجربی با پارامترهای مختلف، اجازه نمی‌دهد که محققان توابع پیچشی - خمشی را برای هر مجموعه و نوع اتصالات مختلف توصیف کنند. به‌منظور افزایش قدرت محاسباتی در دهه گذشته، برنامه‌های (روش‌های) المان محدود برای به‌دست آوردن نمودارهای (منحنی‌های) خمش - پیچش که اثر غیرخطی در پاسخ اتصالات را بازتاب می‌دهند، استفاده شده است. با کمک روش‌های اجزا محدود، اثر پارامترهای مختلف روی رفتار اتصالات می‌تواند بررسی شود. در این پژوهش چندین اتصال نیمه صلب رایج مدل شده، خواص رفتاری آن‌ها به‌صورت اجمالی بررسی شده و سپس با ارائه جزئیات مربوط به یک اتصال نیمه گیردار جدید، خواص رفتاری آن مانند سختی، ظرفیت نهایی و شکل‌پذیری آن بررسی شده و با سایر اتصالات مدل شده مقایسه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: اتصال نیمه صلب، روش المان محدود، سختی اتصال، ظرفیت نهایی، شکل‌پذیری

\* نویسنده مسئول lavasani@khu.ac.ir

### مقدمه

پس از زمین‌لرزه نورتریچ و کوبه، راه‌حل‌های جای‌گزین ساخت‌وساز برای قاب‌های فولاد نیمه‌صلب در مناطق لرزه‌ای مورد توجه و بررسی قرار گرفت. تحقیقات به‌دنبال یافتن راه‌حلی برای افزایش شکل‌پذیری تمامی اجزا اتصال و محدود کردن مدهای شکست بودند. در این‌جا مقدمه‌ای بر دانش بنیادی در روابط لنگر- دوران اتصالات همراه با ارائه مدل‌هایی است که برای نشان دادن و پیش‌بینی ویژگی‌های اتصال استفاده شده است. علاوه بر ارائه تحقیقات انجام‌شده مربوط به اجزا اتصالات نیمه‌صلب، تحقیقات انجام‌شده مربوط به عمل‌کرد قاب‌های فولادی نیمه‌صلب نیز پس از آن ارائه شده است. شایان ذکر است که نمونه‌های مختلف اتصالات تحت بارگذاری یک‌نواخت و چرخه‌ای به‌منظور بررسی خواص اجزای اتصال انجام شده است. در تمام آزمایش‌های صورت گرفته در کارهای دیگران، تیر به‌وسیله دستگاه تحریک‌کننده (جک) تحت بارگذاری قرار گرفته، درحالی‌که ستون ثابت نگه داشته شده است. جانسون<sup>۱</sup> و گرین<sup>۲</sup> اولین کارهای آزمایشگاهی مربوط به اتصال تیر به تیر و تیر به ستون را با استفاده از نبشی جان دابل و نبشی بالا و نبشی نشیمن در سال ۱۹۴۰ انجام دادند [۱]. در این آزمایش‌ها، اتصالات تحت لنگر خمشی متناظر با دورانی حدود سه برابر بیش‌تر از دوران تیر ساده قرار گرفتند. افرادی مانند پاپ<sup>۳</sup> و برترو<sup>۴</sup> (۱۹۷۳)، کوکرتی<sup>۵</sup> و همکاران (۱۹۸۷)، عزیزی نمینی و همکاران (۱۹۸۹)، نادر و آستانه (۱۹۹۶)، صراف و بروئی (۱۹۹۶) پژوهش‌های دیگری نیز در زمینه اتصالات نیمه‌صلب تحت بارگذاری یک‌نواخت، چرخه‌ای و دینامیکی انجام داده‌اند.

### مدل‌های رایج برای پیش‌بینی ویژگی‌های اتصالات

چنان‌که قبلاً ذکر شد بیش‌ترین بررسی‌ها در زمینه اتصالات نیمه‌صلب به بررسی و پیش‌بینی روابط لنگر- دوران اتصالات نیمه‌صلب معطوف شده است. این پژوهش‌ها در قالب عبارات ریاضی منحنی‌های برازش داده شده، مدل تحلیلی ساده و مدل‌های مکانیکی است.

- 
1. Jonson      2. Green      3. Pop      4. Bertero      5. Kukreti

علاوه بر این، مدل‌های دقیق المان محدود سه‌بعدی برای بیان رفتار پیچیده اتصالات توسعه داده شدند. توضیحات این مدل‌ها و ویژگی‌های متمایز آن‌ها در ادامه ذکر شده است. مدل‌های ریاضی توانایی تقریب رفتار لنگر- دوران اتصالات بدون نیاز به تست آزمایشگاهی را ارائه می‌کند. مدل‌های اولیه توسعه داده شده به صورت برازش منحنی بر داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از تحلیل رگرسیون بود. فری<sup>۱</sup> و موریس<sup>۲</sup> [۲] مدلی تجربی چندجمله‌ای با توان فرد ارائه دادند که در آن دوران به‌عنوان یک تابع از لنگر و دیگر پارامترهای منحنی برازش داده شده بیان شده است. این رابطه بر داده‌های حاصل از آزمایش اتصالات تحت بارهای یک‌نواخت قرار داده شده و در نهایت رابطه  $M - \theta$  استخراج شده که بدین صورت است:

$$\theta_r = C_1 (KM)^1 + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5 \quad (1)$$

که در آن  $M, \theta_r$  به ترتیب لنگر و دوران است.  $C_1, C_2, C_3$  پارامترهای منحنی برازش است.  $k$  پارامتر استاندارد شده است که تابعی از پارامترهای مهم هندسی مانند ابعاد عضو اتصال و ضخامت ورق است. ثابت منحنی برازش و ثابت استاندارد شده در جدول ۱ آورده شده است. در این کار هم‌چنین روابطی برای پیش‌بینی سختی مماسی،  $S_C$  و سختی اولیه،  $S_C^0$ ، اتصال بدین صورت ارائه شده است:

$$S_C = \frac{dM}{d\varphi_C} = \frac{1}{C_1 k + 3C_2 k (KM)^2 + 5C_3 k (KM)^4} \quad (2)$$

$$S_C^0 = \left. \frac{dM}{d\varphi_C} \right|_{M=0} = \frac{1}{C_1 k} \quad (3)$$

این رابطه را محققان دیگر استفاده کرده‌اند و رابطه لنگر- دوران را به خوبی مدل کرده است. اشکال اصلی این مدل پیش‌بینی سختی مماس منفی است. این اتفاق زمانی حاصل می‌شود که مشتق تابع چندجمله‌ای در داخل یک محدوده خاص گرفته شود، زیرا که این تابع به صورت چندجمله‌ای است که با شکلی به فرم قله‌ها و دره‌هایی مشخص شده است.

1. Frye      2. Morris

جدول ۱. ثابت منحنی برازش و ثابت استاندارد شده رابطه [2]Frye

نوع اتصال	ثابت‌های برازش	ثابت استاندارد
اتصال نبشی جان نکی	$C_1 = 4.28 \times 10^{-3}$ $C_2 = 1.45 \times 10^{-9}$ $C_3 = 1.51 \times 10^{-16}$	$k = d_a^{-2.4} t_a^{-1.8} g^{0.15}$
اتصال نبشی جان دوبل	$C_1 = 3.66 \times 10^{-4}$ $C_2 = 1.15 \times 10^{-6}$ $C_3 = 4.57 \times 10^{-8}$	$k = d_a^{-2.4} t_a^{-1.8} g^{0.15}$
اتصال نبشی نشیمن بالا و پایین	$C_1 = 2.23 \times 10^{-5}$ $C_2 = 1.85 \times 10^{-8}$ $C_3 = 3.19 \times 10^{-12}$	$k = d^{-1.287} t^{-1.128} t_c^{-0.415} I_a^{-0.694} g^{1.350}$
اتصال نبشی نشیمن به همراه نبشی دوبل جان	$C_1 = 8.46 \times 10^{-4}$ $C_2 = 1.01 \times 10^{-4}$ $C_3 = 1.24 \times 10^{-8}$	$k = d^{-1.5} t^{-0.5} t_c^{-0.415} I_a^{-0.7} d_b^{-1.1}$
اتصال صفحه انتهایی با سخت‌کننده ستون	$C_1 = 1.83 \times 10^{-3}$ $C_2 = -1.04 \times 10^{-4}$ $C_3 = 6.38 \times 10^{-6}$	$k = d_g^{-2.4} t_p^{-0.4} t_f^{-1.5}$
اتصال سپری	$C_1 = 1.79 \times 10^{-3}$ $C_2 = -1.76 \times 10^{-4}$ $C_3 = 2.04 \times 10^{-4}$	$k = d_g^{-2.4} t_p^{-0.6}$
اتصال روسری-زیرسری	$C_1 = 5.1 \times 10^{-5}$ $C_2 = 6.2 \times 10^{-10}$ $C_3 = 2.4 \times 10^{-13}$	$k = t_p^{-1.6} g^{1.6} d_b^{-2.3} t_w^{-0.5}$

ریچارد<sup>۳</sup> و ابوت<sup>۴</sup> [۳] یک مدل توانی با سه پارامتر برای نشان دادن رفتار لنگر- دوران اتصال تحت بارگذاری یک‌نواخت ارائه کردند. این مدل با رابطه (۳) نشان داده شده است:

$$M = \frac{R_{ki} \theta_r}{\left[ 1 + \left( \frac{\theta_r}{\theta_0} \right)^n \right]^{1/n}} \quad (۴)$$

در این جا  $R_{ki}$  سختی اولیه اتصال،  $n$  پارامتر شکل،  $\theta_0 = \frac{M_u}{R_{ki}}$  دوران پلاستیکی مرجع است

و  $M_u$  ظرفیت لنگر نهایی است. معادلات تجربی برای محاسبه پارامتر شکل  $n$  در جدول ۲ فهرست شده است. منحنی لنگر- دوران برای مقادیر مختلف از  $n$  در شکل ۱ نشان داده شده است.

1. Richard      2. Abbott

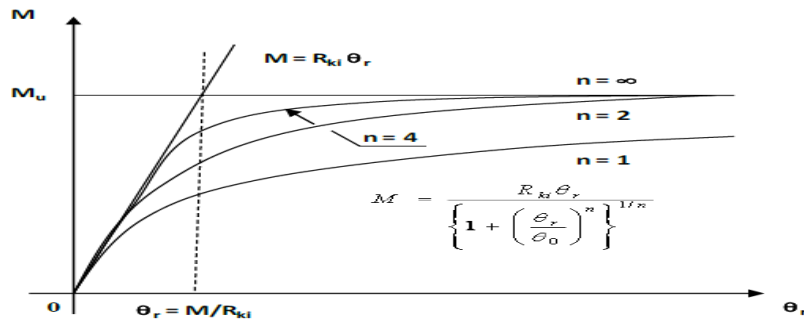
در این کار هم‌چنین روابطی برای پیش‌بینی سختی مماسی،  $S_C$  و سختی اولیه،  $S_C^0$ ، اتصال بدین صورت ارائه شده است:

$$S_C = \frac{dM}{d\varphi_C} = \frac{1}{C_1k + 3C_2k(KM)^2 + 5C_3k(KM)^4} \quad (5)$$

$$S_C^0 = \left. \frac{dM}{d\varphi_C} \right|_{M=0} = \frac{1}{C_1k} \quad (6)$$

جدول ۲. معادلات تجربی برای پارامتر شکل n [۳]

شماره دسته	نوع اتصال	n
I	اتصال نبشی جان تکی	$0.520 \log_{10} \theta_0 + 2.291$ $\dots \log_{10} \theta_0 > -3.073$
II	اتصال نبشی جان دویدل	$1.322 \log_{10} \theta_0 + 3.952$ $\dots \log_{10} \theta_0 > -2.582$
III	اتصال نبشی نشیمن بالا و پایین	$1.398 \log_{10} \theta_0 + 4.631$ $\dots \log_{10} \theta_0 > -2.721$
IV	اتصال نبشی نشیمن به همراه نبشی دویدل جان	$2.003 \log_{10} \theta_0 + 6.070$ $\dots \log_{10} \theta_0 > -2.880$



شکل ۱. مدل توانی با سه پارامتر [۳]

از آن‌جا که سختی مماسی اتصال،  $R_k$  و دوران نبشی،  $\theta_r$  را می‌توان به‌طور مستقیم و بدون تکرار تعیین کرد؛ این مدل به‌عنوان ابزاری مؤثر برای انجام تحلیل غیرخطی مرتبه دوم است. هرچند برخلاف مدل فری-موریس، این مدل نیاز به اطلاعات قبلی از سختی اولیه اتصال و ظرفیت لنگر نهایی برای پیش‌بینی کامل پاسخ لنگر- دوران اتصال دارد؛ بنابراین، پیش‌بینی این مدل از پاسخ بستگی به دو کمیت اساسی دارد که باید با ابزار یا مدل‌های دیگر پیش‌بینی شود:

$$R_k = \frac{dM}{d\theta_r} = \frac{R_{ki}}{\left[1 + \left(\frac{\theta_r}{\theta_0}\right)^n\right]^{(n+1)/n}} \quad (7)$$

برای کاهش مشکل مدل فری-موریس در رابطه با پیش‌بینی سختی مماس منفی اتصال زمانی که مشتق تابع چندجمله‌ای در داخل محدوده خاص گرفته شده باشد، انگ<sup>۱</sup> و موریس و [۴] پیشنهاد دادند تا با استفاده از مدل اسگود-رومبرگ<sup>۲</sup> استاندارد شده، روابطی برای بیان رفتار لنگر- دوران پنج نوع اتصال معمولی شامل نبشی جان تکی، نبشی جان دوپل، صفحه روسری- زیرسری، نبشی نشیمن بالا و پایین و اتصالات رکابی استخراج شود. مدل ارائه شده بدین صورت است:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{(KM)}{(KM)_0} = \left[1 + \left[\frac{KM}{(KM)_0}\right]^{(n-1)}\right] \quad (8)$$

که در آن  $\theta_0$ ،  $(KM)_0$  و  $n$  ثابت‌هایی هستند که به هندسه و نوع اتصال بستگی دارد. تابع اسگود-رومبرگ دارای این مزیت است که مشتق آن، شیب منحنی  $M-\theta$ ، دارای نوسان نیست که برخلاف ماهیت نوسانی ذاتی چندجمله‌ای‌ها است. لویی<sup>۳</sup> و چن<sup>۴</sup> مدلی نمایی بدین شکل ارائه کردند [۵]:

$$M = M_0 + \sum_{j=1}^n C_j \left[1 - \exp\left(-\frac{|\theta_C|}{2J \alpha}\right)\right] + R_{kf} |\varphi_C| \quad (9)$$

1. Ang      2. Osgood-Ramberg      3. Lui      4. Chen

جدول ۳. پارامترهای مدل نمایی [Chen- Lui ۵]

	A تنها نبشی جان	B نشیمن بالا و پایین و نبشی جان دوبل	C اتصال فلنجی	D صفحه انتهایی
$M_0$	0	0	0	0
$R_{kf}$	$0.47104 \times 10^2$	$0.443169 \times 10^3$	$0.96415 \times 10^3$	$0.41193 \times 10^3$
$\alpha$	$-0.511678 \times 10^{-3}$	$0.31425 \times 10^{-3}$	$0.31783 \times 10^{-3}$	$0.67083 \times 10^{-3}$
$C_1$	$-0.43300 \times 10^2$	$-0.34515 \times 10^3$	$-0.25038 \times 10^3$	$-0.67824 \times 10^3$
$C_2$	$0.12139 \times 10^4$	$0.52345 \times 10^4$	$0.50736 \times 10^4$	$0.27084 \times 10^4$
$C_3$	$-0.58583 \times 10^4$	$-0.26762 \times 10^5$	$-0.30396 \times 10^5$	$-0.21389 \times 10^5$
$C_4$	$0.12971 \times 10^5$	$0.61920 \times 10^5$	$0.75338 \times 10^5$	$0.78563 \times 10^5$
$C_5$	$-0.13374 \times 10^4$	$-0.65114 \times 10^5$	$-0.82873 \times 10^5$	$-0.99740 \times 10^5$
$C_6$	$0.52224 \times 10^4$	$0.25506 \times 10^5$	$0.33927 \times 10^5$	$0.43042 \times 10^5$

که در آن  $M$  لنگر اتصال،  $M_0$  لنگر اولیه و  $|\varphi_C|$  قدر مطلق تغییر شکل دورانی اتصال است؛  $R_{kf}$  کرنش سخت شدگی اتصالات است،  $\alpha$  ضریب مقیاس  $n$  تعداد عبارات در نظر گرفته شده و  $C_j$  ضرایب منحنی برازش است. مقادیر عددی ضرایب برازش بر اساس داده‌های تجربی قبلی برای چهار نوع اتصالات از جمله اتصال نبشی جان، نبشی بالا و نبشی نشیمن، اتصال فلنجی و اتصال با صفحه انتهایی در جدول ۳ فهرست شده است. سختی مماس و سختی اولیه آن‌ها طبق روابط (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آید:

$$S_C = \frac{dM}{d\varphi_C} \Big|_{|\varphi_C|=|\varphi_{cl}|} = \sum_{j=1}^n C_j \left[ 1 - \exp\left(-\frac{|\theta_C|}{2J\alpha}\right) \right] + R_{kf} \quad (10)$$

$$S_C^0 = \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{2J\alpha} + D_k H[-|\theta_k|]_{k=1} \quad (11)$$

مدل لویی-چن رفتار غیرخطی اتصالات را به‌خوبی بیان می‌کند. با این حال، اگر در منحنی لنگر-دوران تغییرات ناگهانی وجود داشته باشد، این مدل به‌خوبی کار نخواهد کرد. مشابه مدل ابوت-ریچارد این مدل نیز نیاز به دانش قبلی از ویژگی‌های مختلف اتصال از جمله لنگر اولیه و سخت‌شدگی کرنشی<sup>۱</sup> دارد. چن و کیشی<sup>۲</sup> [۶] با تغییر مدل لویی-چن بدین شکل، قابلیت مدل کردن تغییرات ناگهانی در نمودار لنگر-دوران را اصلاح کردند:

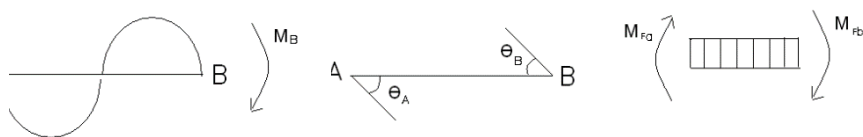
$$M = M_0 + \sum_{j=1}^n C_j \left[ 1 - \exp\left(-\frac{|\theta|}{2J\alpha}\right) \right] + \sum_{j=1}^n D_K (|\theta| - |\theta_k|) H(|\theta| - |\theta_k|) \quad (12)$$

که در آن  $M_0$  مقدار شروع لنگر اتصال در جایی است که برازش آغاز شده،  $D_K$  یک پارامتر ثابت برای بخش خطی منحنی،  $\theta_K$  دوران آغازین بخش خطی منحنی و  $H[\theta]$  یک تابع پله‌ای هویساید<sup>۳</sup> است. علاوه بر روش برازش منحنی، مدل‌های تحلیلی ساده نیز برای پیش‌بینی سختی اولیه و لنگر نهایی اتصال توسعه داده شده است. این مدل‌ها برای پیش‌بینی سختی اولیه از روابط تعادل، سازگاری و روابط ساختاری مواد بر اساس مفاهیم تحلیل الاستیک سازه استفاده می‌کنند. به‌همین ترتیب، تحلیل خمیری نیز برای پیش‌بینی لنگر نهایی استفاده می‌شود. برای نشان دادن رفتار چرخه‌ای اتصالات با نبشی جان دوپل، دستفانو<sup>۴</sup> و همکاران مدلی با استفاده از ویژگی مصالح و خصوصیات هندسی اتصال را پیشنهاد دادند [۷]. این مدل بعداً بسط داده شد و به‌وسیله افزودن نوعی از المان‌ها اثر لغزش نیز در مدل جای داده شد [۸].

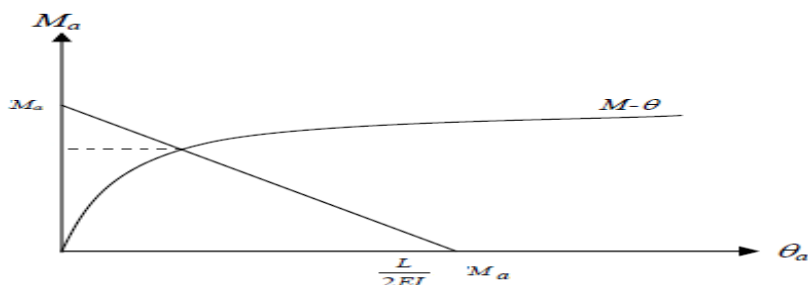
### مبانی نظری

در اتصالات نیمه‌صلب، در صد صلبیت اتصال به‌صورت نسبت دوران اعضا دو طرف اتصال نیمه‌صلب تعریف می‌شود. در این قسمت به بیان مفهوم درصد صلبیت اتصال  $R$  با استفاده از روش خط تیر<sup>۵</sup> می‌پردازیم:

1. Strain Hardening Stiffness    2. Kishi    3. Heaviside    4. Destefano    5. Beam Line



شکل ۲. منحنی‌های خط تیر



شکل ۳. منحنی لنگر-چرخش برای یک اتصال نیمه‌صلب در کنار خط تیر

درجه صلبیت  $R$ ، نسبت لنگر انتهایی حقیقی به لنگر گیرداری انتهایی در حالت کاملاً گیردار است. در شکل ۴ محل برخورد دو نمودار همان لنگر انتهایی حقیقی است و  $M_{Fa}$  لنگر گیردار انتهایی است.  $\theta_a=0$ ،  $\theta_b=0$  و  $\theta_a=\theta_b=0$  که  $M_{Fa}$  و  $M_{Fb}$  لنگرهای گیرداری هستند.

### مفهوم خط تیر

$$M_a = M_{Fa} + \frac{4EI}{L}\theta_a + \frac{2EI}{L}\theta_b \quad (13)$$

$$M_b = M_{Fb} + \frac{2EI}{L}\theta_a + \frac{4EI}{L}\theta_b \quad (14)$$

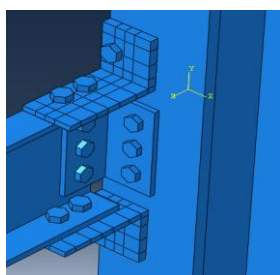
در اتصال مفصلی درصد صلبیت صفر است ( $R=0$ ) و در اتصال کاملاً گیردار درصد صلبیت اتصال برابر یک است ( $R=1$ ). در رابطه خط تیر در حالتی که لنگر در حالت بارگذاری قرینه است:

$$M_a = \frac{2EI}{L}\theta_a + M_{Fa} \quad (15)$$

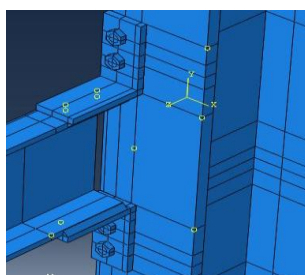
$\Theta_{\alpha}=0$  گیرداری کامل است کامل است در نتیجه  $Ma=MFa$  و در صورتی که انتهای تیر مفصلی باشد  $Ma=0$  است

### مدل‌سازی و آنالیز

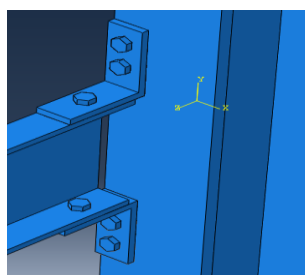
به منظور بررسی رفتار اتصال خمشی پیشنهادی در این کار، تعدادی اتصالات نیمه‌صلب رایج شبیه‌سازی شده و ویژگی‌های رفتاری آن‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای با یک‌دیگر مقایسه شده است. در تمامی مدل‌ها از تیر با مقطع IPE200 به طول ۱۲۰ سانتی‌متر و ستون با مقطع IPB300 به طول ۲۰۰ سانتی‌متر استفاده شده است. همه ابعاد به دست آمده برای اجزا اتصال منطبق بر اصول طراحی سازه است. نمونه‌های ساخته شده شامل اتصال نبشی نشیمن ساده پیچی (اتصال e)، اتصال نبشی نشیمن ساده جوشی (اتصال f)، اتصال نبشی نشیمن با نبشی جان پیچی (اتصال i)، اتصال نبشی نشیمن با نبشی جان جوشی (اتصال j)، اتصال سپری (اتصال g)، اتصال با ورق انتهایی (اتصال h) و اتصال با ورق انتهایی تقویت شده با لچکی (اتصال l) است. اتصال پیشنهادی از ۴ عدد صفحه افقی به همراه دو عدد صفحه قائم تشکیل شده است (شکل ۱۲). صفحات افقی بالایی و پایینی با مکانیسمی مشابه اتصال صلب با ورق روسری-زیرسری یک کوپل نیروی فشاری و کششی را از صفحه عمودی متصل به تیر به صفحه عمودی متصل به ستون منتقل می‌کنند. طراحی صفحات افقی بالایی و پایینی بر اساس کنترل کشش و فشار است. طول این صفحات باید به گونه‌ای انتخاب شود که این ورق در صفحه خود دچار کمانش قبل از تسلیم نشود. ابعاد صفحات قائم نیز مانند اتصال با صفحات انتهایی بر اساس کنترل برش و هم‌چنین انتقال نیروی اهرمی انجام می‌شود. اولین اتصال ساخته شده به صورت ۴ پیچی است (اتصال n1). به منظور بررسی عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات رفتاری این اتصال دو نمونه اتصال دیگر نیز ساخته شده است. در اتصال n2 به جای استفاده از صفحات بالا و پایینی با ضخامت ۱۵ میلی‌متری از صفحات با ضخامت ۸ میلی‌متری استفاده شد. در اتصال n3 علاوه بر این کاهش ضخامت از صفحات انتهایی دو پیچی (پیچ‌های داخلی) استفاده شده است.



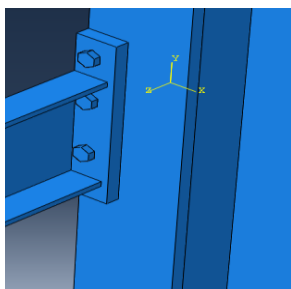
شکل ۶. اتصال نبشی نشیمن و بالایی و نبشی جان دوپل پیچی (i)



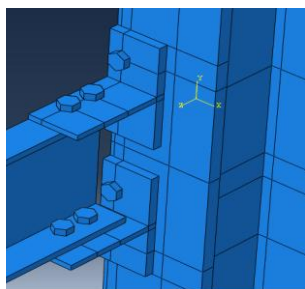
شکل ۵. اتصال نبشی نشیمن ساده جوشی (f)



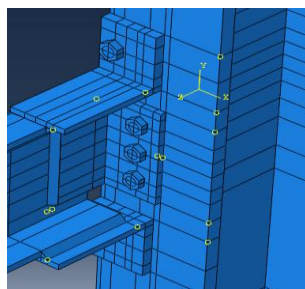
شکل ۴. اتصال نبشی نشیمن ساده پیچی (e)



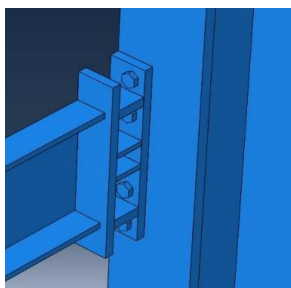
شکل ۹. اتصال با ورق انتهایی (h)



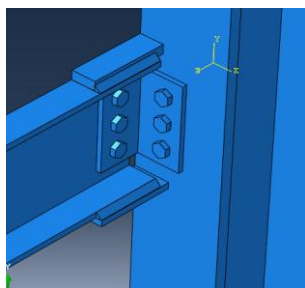
شکل ۸. اتصال سپری (g)



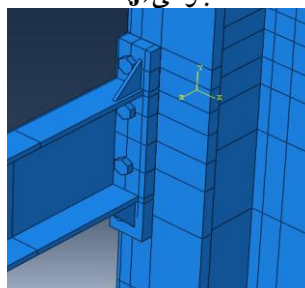
شکل ۷. اتصال نبشی نشیمن و بالایی و نبشی جان دوپل جوشی (j)



شکل ۱۲. اتصال نیمه صلب پیشنهادی (n1)



شکل ۱۱. اتصال با ورق روسری و زیر سری (n)



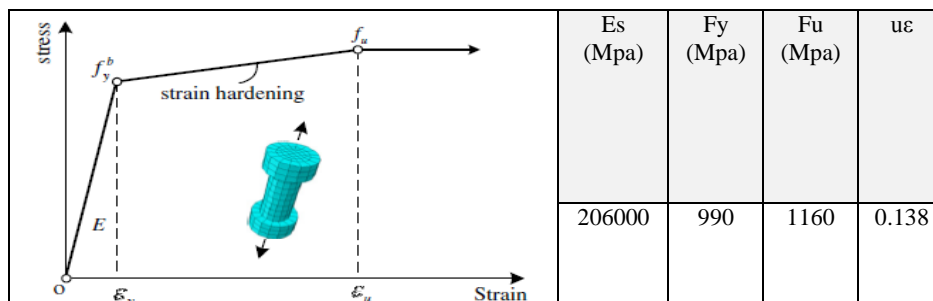
شکل ۱۰. اتصال با ورق انتهایی و لچکی (l)

### نحوه مدل‌سازی

در این پژوهش برای انجام تحلیل‌های غیرخطی اتصال از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. از جمله قابلیت‌های این نرم‌افزار تحلیل‌های مختلف از جمله آنالیز غیرخطی است که کاربرد بسیاری دارد. در مدل‌سازی سعی شده است اندرکنش بین اجزا تا حد امکان منطبق بر واقعیت باشد. اتصالات پیچی به صورت دقیق مدل شده و اندرکنش بین سطح پیچ و سوراخ به صورت اصطکاکی سخت با ضریب اصطکاک ۰,۳ با امکان جدایشوندگی بعد از باربرداری مدل شده است. همچنین جوش‌های گوشه به صورت یک منشور با مقطع مثلثی مدل شده است. درجایی که از جوش شیاری استفاده شده است، با توجه به این‌که مقاومت این نوع جوشکاری مانند فلز مادر است، دو قطعه اتصال به یک‌دیگر چسبانده شده‌اند. برای مش‌بندی المان‌ها از المان C3D8R استفاده شده است. مدل ساختاری سازه‌های فلزی تحت بارگذاری چرخه‌ای نقش بسیار مهمی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و تجزیه و تحلیل دارد. در حال حاضر، مدل‌های تنش کرنش فولاد معمولاً به صورت دو خط مستقیم و یا فرم‌های چندخطی تعریف شده است. این مدل‌ها، با این حال، نمی‌تواند شرایط بارگذاری چرخه‌ای را به درستی نشان دهند. در این کار از مدل ارائه‌شدهٔ کبک که به صورت مدلی ترکیبی از سخت‌شدگی همسان<sup>۱</sup> و سینماتیک<sup>۲</sup> استفاده می‌شود [۹]. این مدل در آباکوس به عنوان مدلی ساختاری پلاستیسیته در قالب یک مدل سخت‌شدگی هم‌سان و سینماتیکی غیرخطی تعریف شده است. پارامترهای مدل ساختاری ذکرشده را می‌توان با برازش داده‌های حاصل از تست آزمایشگاهی به دست آورد. با توجه به انجام ندادن آزمایش در این کار از مقادیر عددی ارائه شده در [۹] که برای فولاد Q345B به دست آمده است، استفاده می‌شود. همچنین مدول یانگ<sup>۳</sup> و نسبت پواسون<sup>۴</sup> برای همه اجزای فولادی به ترتیب به مقدار ۲۰۶ گیگاپاسکال و ۰,۳ در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور مدل‌سازی رفتار پیچ‌های پر مقاومت A10.9 از منحنی تنش کرنش الاستوپلاستیک چندخطی مطابق با شکل ۱۳ استفاده شده است. ضریب پواسون این پیچ‌ها برابر با ۰,۳ است و از مدل سخت‌شدگی سینماتیک برای بیان رفتار سخت‌شدگی استفاده شده است. با توجه به این‌که در بعضی از مدل‌ها از اتصالات جوشی استفاده شده است،

1. Isotropic      2. Kinematic      3. Young's Modulus      4. Poisson Ratio

باید خصوصیات چرخه‌ای فلز جوش در نرم‌افزار وارد شود. برای این منظور از مدل Lemaitre-Chaboche استفاده شده است. پارامترهای این مدل با توجه به آزمایش‌های انجام شده [۱۰] مطابق با شکل ۱۳ به نرم‌افزار معرفی شده است.

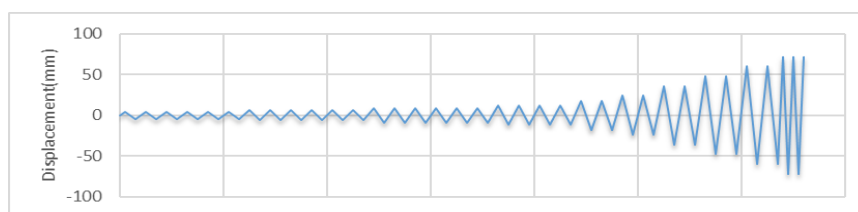


شکل ۱۳. مدل رفتاری پیچ پرمقاومت

جدول ۴. پارامترهای مدل چرخه‌ای جوش

$\sigma_0 = 5720$	$C1 = 1450$	$\gamma1 = 8$	$Q_\infty = 154$	$B = 5$
-------------------	-------------	---------------	------------------	---------

این مدل‌سازی تنها مربوط به جوش‌های گوشه مدل شده است و درجایی که از جوش شیاری استفاده شده باشد، اتصال دو فلز به صورت پیوسته در نظر گرفته شده و جوش شیاری به صورت مجزا مدل نمی‌شود. نیرو مطابق پروتکل بارگذاری ارائه شده با ATC-SAC [۱۱] که در حقیقت جای‌گزین زلزله‌های واقعی است به نمونه‌ها اعمال شده است (شکل ۱۳). این پروتکل مربوط به زلزله‌های دور از گسل است. این نیرو از طریق جابه‌جایی در انتهای تیر اعمال می‌شود که از ضرب پروتکل بارگذاری (جدول ۴) در مقدار طول تیر (۱۲۰ سانتی‌متر) به دست می‌آید. این تاریخچه بارگذاری شامل تغییرشکل‌های سیکلی گام به گام افزایشده است. شرایط مرزی به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که تکیه‌گاه پایین و بالای ستون به صورت مفصلی عمل کند. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه، تمامی گره‌ها در تکیه‌گاه‌ها در جهت جانبی (عمود بر صفحه) مقید شده‌اند.

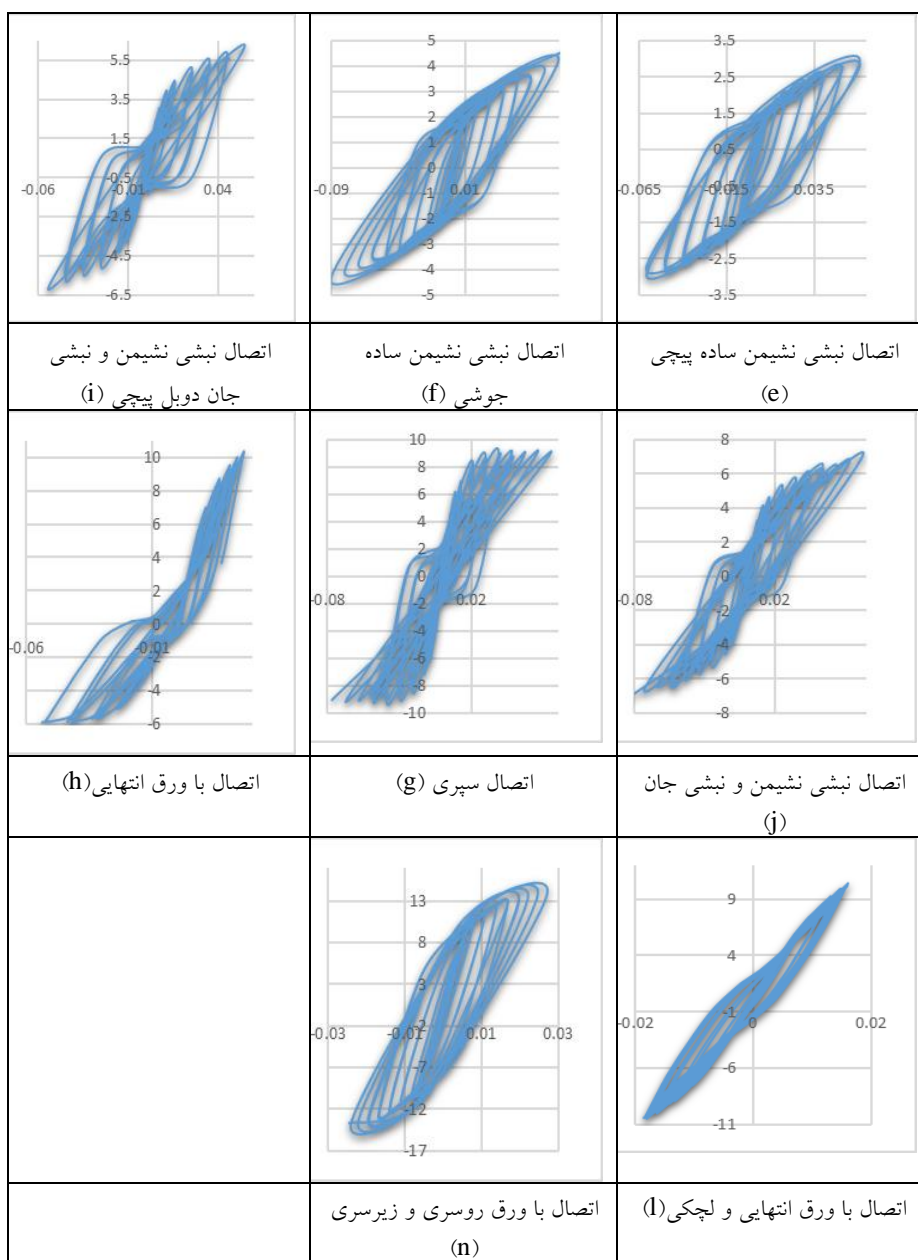


شکل ۱۴. پروتکل بارگذاری SAC

### بررسی اتصالات نیمه‌صلب

صلبیت یک اتصال را می‌توان با شیب منحنی  $M-\theta$  تعیین کرد. چون منحنی  $M-\theta$  برای جمع مقادیر  $M$  و  $\theta$  به صورت غیرخطی است می‌توان صلبیت اتصال را با شیب مماس بر منحنی  $M-\theta$  به دست آورد. ضریب صلبیت سکانت در بارهای سرویس،  $K_{serv}$ ، معیار مناسبی برای سنجش تغییر مکان‌ها و حرکت جانبی قاب‌ها است و مقدار آن را می‌توان بر اساس زاویه دورانی حدوداً معادل  $0.025$  رادیان تعیین کرد. منحنی لنگر-چرخش اتصالات مدل‌شده در شکل‌های زیر آورده شده است. در هر حال میزان صلبیت اتصال هنگامی معنی‌دار است که با میزان صلبیت اعضای متصل شده به آن مقایسه شود. طبق آیین‌نامه فولاد آمریکا [۱۲]، اتصالی در یک قاب با حرکت جانبی هنگامی به عنوان اتصال صلب در نظر گرفته می‌شود که کمیت بدون بعد  $\alpha = K_{serv}L/EI$  برای آن بزرگ‌تر از ۲۰ باشد. این طبقه‌بندی برای مقادیر مختلف  $\alpha$  بدین صورت هست: الف) اتصال تمام صلب است اگر  $\alpha > 20$ ، ب) اتصال نیمه‌صلب (مهار نسبی) است اگر  $2 \leq \alpha \leq 20$ ، ج) یک اتصال ساده است اگر  $\alpha < 2$ .

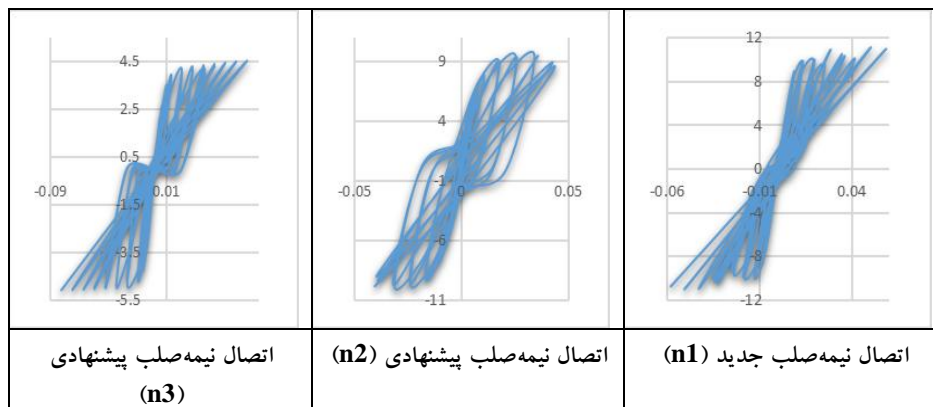
بر این اساس و در نظر گرفتن یک دهانه ۵ متری برای تیر، چنان‌که مشاهده می‌شود مقادیر  $\alpha$  متناظر با هر اتصال محاسبه شده است. هم‌چنین اتصال پیشنهادی n1 دارای بیش‌ترین درصد صلبیت در میان اتصالات نیمه‌صلب است. کاهش تعداد پیچ‌های اتصال اثر کاهنده بیش‌تری در مقدار صلبیت اتصال دارد، به طوری‌که با نصف کردن ضخامت ورق‌های فوقانی و تحتانی میزان صلبیت تنها ۹٪ کاهش داشته، اما با نصف کردن تعداد پیچ‌ها میزان صلبیت حدود ۶۴٪ کاهش داشته است. هم‌چنین اتصال n3 کم‌ترین میزان صلبیت را دارد و مقدار صلبیت آن در رده اتصال پیچی نبشی نشیمن با نبشی جان است.



شکل ۱۵. منحنی لنگر چرخش اتصالات نیم صلب رایج

### مقاومت اتصال

اتصالات بر اساس مقاومت خمشی که از خود نشان می‌دهند به دو گروه اتصالات با مقاومت کامل و اتصالات با مقاومت جزئی (ناقص) تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل اتصالاتی است که ظرفیت تحمل لنگر آن‌ها بزرگ‌تر یا مساوی ظرفیت تحمل لنگر (لنگر پلاستیک) تیر متصل به آن است و گروه دوم نیز اتصالاتی هستند که ظرفیت تحمل لنگر آن‌ها کم‌تر از ظرفیت تحمل تیر متصل به آن است [۱۳]. در اتصالات با مقاومت زیاد، مقاومت اتصال بیش‌تر به مقاومت تیر وابسته است و به‌هنگام ایجاد مفصل پلاستیک، این مفصل در تیر تشکیل می‌شود، درحالی‌که در اتصالات با مقاومت کم، مفصل در اتصال ایجاد می‌شود بنابراین می‌توان گفت به‌استثناء حالت اتصال مفصلی که در قاب‌های مقاوم خمشی کاربرد ندارند چهار حالت اتصال صلب با مقاومت بالا، اتصال نیمه صلب با مقاومت زیاد، اتصال صلب با مقاومت اندک و اتصال نیمه‌صلب با مقاومت اندک در سازه‌های مقاوم خمشی می‌توانند استفاده شوند.



شکل ۱۶. منحنی لنگر چرخش اتصال نیمه صلب پیشنهادی

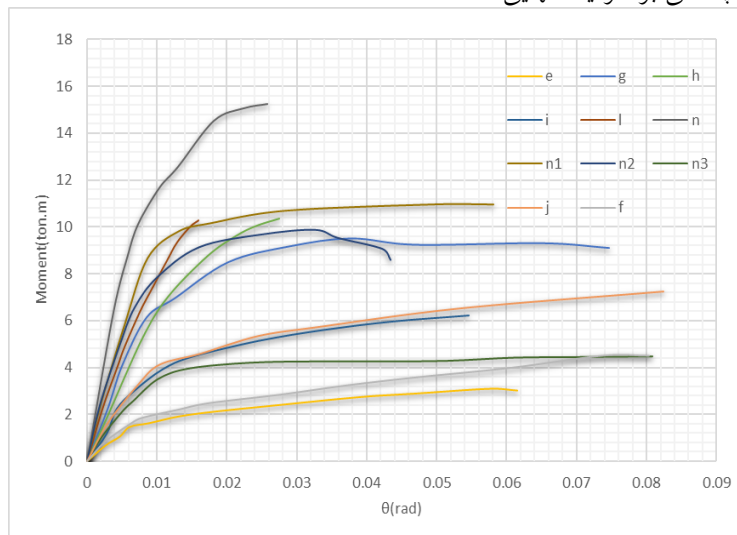
چنان‌که مشاهده می‌شود، در میان اتصالات رایج نیمه‌صلب بیش‌ترین مقاومت مربوط به اتصال صفحه انتهایی است. باید توجه داشت علت نامتقارنی ظاهر شده در نمودار لنگر انحنا اتصال صفحه انتهایی ناشی از عدم تقارن آرایش پیچ‌های این اتصال در ناحیه فشار و کشش است. در میان اتصالات نیمه‌صلب پیشنهادی در این پژوهش، اتصال n1 دارای بیش‌ترین مقاومت است. در حالی‌که کاهش لاغری ورق اتصال بالایی (از طریق کاهش ضخامت) به میزان ۵۰٪، تنها باعث کاهش ۱۱٪ مقاومت نهایی شده است، در صورتی‌که علاوه بر این کاهش لاغری به‌جای

استفاده از چهار عدد پیچ، از دوپیچ در صفحه انتهایی استفاده شود مقاومت نهایی (اتصال n3) نسبت به اتصال n1 به میزان ۶۰٪ کاهش می‌یابد و اتصال از یک اتصال پر مقاومت به اتصالی با مقاومت نسبی تبدیل می‌شود. به نظر می‌رسد مکانیسم استفاده شده در این اتصال قابلیت پوشش تمام رده‌های مقاومت را دارد. چنان‌که مشاهده می‌شود می‌توان با تغییراتی از قبیل کاهش تعداد پیچ‌ها یا کاهش لاغری ورق‌های بالایی و پایینی مقدار مقاومت نهایی اتصال را تغییر داد. شکل‌پذیری اتصال پارامتری کلیدی برای اتصالات نیمه‌صلب است که در آن‌ها تغییر شکل‌ها در اعضای اتصال متمرکز هستند. طبق ضوابط آیین‌نامه‌های لرزه‌ای سازه‌های فولادی، در قاب خمشی متوسط باید اعضا اتصالات قادر باشند تغییرشکل‌های غیرارتجاعی محدودی را هنگامی که در برابر نیروی زلزله قرار می‌گیرند تحمل کنند. از طرف دیگر از قاب‌های خمشی ویژه انتظار می‌رود که تغییر شکل‌های غیرارتجاعی چشم‌گیری را هنگام زلزله طرح تحمل کنند. اتصالی خمشی در قاب خمشی متوسط باید توانایی تحمل تغییرشکل‌های دورانی در محدوده غیرارتجاعی، حداقل به میزان ۰/۰۲ رادیان را بدون کاهش قابل توجه در مقاومت خود را دارا باشد. این مقدار برای اتصالات خمشی در قاب خمشی ویژه برابر با ۰/۰۴ رادیان است. در (شکل ۲۵) پوش نمودار لنگر-دوران اتصالات نیمه‌صلب آورده شده است. اتصال n1 و n2 با توجه به مقاومت زیاد و توانایی تحمل تغییرشکل‌های دورانی در حدود ۰/۰۴ رادیان بدون کاهش مقاومت، می‌تواند در قاب‌های خمشی ویژه به کار گرفته شود. از نکات برجسته اتصال ساخته‌شده با توجه به شکل می‌توان به توانایی جذب انرژی و تحمل تغییر شکل‌های زیاد در هر سه اتصال n1, n2, n3 در مقایسه با سایر اتصالات نیمه‌صلب هم‌ردی مقاومتی اشاره کرد، به طوری که تنها اتصال نیمه‌صلب با سپری بالایی و پایینی (اتصال g) قابلیت تحمل چنین تغییر شکل‌هایی را از خود نشان داده است.

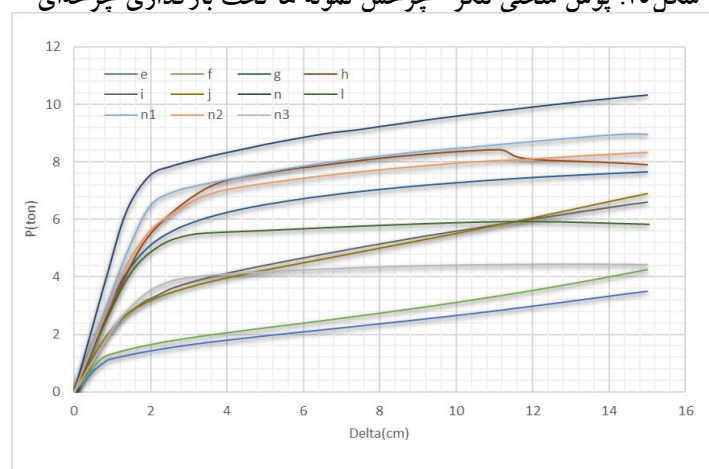
### ظرفیت تحمل بار

ظرفیت تحمل بار نمونه‌ها تحت بارگذاری مونوتونیک در شکل ۲۶ آورده شده است. در این بارگذاری، تمام نمونه‌ها تحت جابه‌جایی ۱۵ سانتی‌متری در انتهای خود به صورت استاتیکی قرار گرفته‌اند. این نمودارها دارای هم‌خوانی بسیاری با نتایج آزمایش چرخه‌ای است. چنان‌که

مشاهده می‌شود، بیش‌ترین نیروی قابل‌تحمل مربوط به اتصالات  $n$  و  $n1$  است. این دو اتصال هم‌چنین در ناحیه خطی نیز بیش‌ترین باربری را دارند. باربری اتصالات  $n1$ ،  $n2$  و  $n3$  نسبت به اتصال صلب  $n$  به‌ترتیب برابر با ۸۶، ۸۰ و ۴۳٪ است. کاهش چشم‌گیر ظرفیت باربری در اتصال  $n3$  ناشی از به‌کارگیری ۲ پیچ بجای ۴ پیچ است، درحالی‌که کاهش ضخامت ورق‌های افقی تأثیر چندانی بر ظرفیت نهایی اتصال نداشته است.



شکل ۲۵. پوش منحنی لنگر - چرخش نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۲۶. پوش منحنی لنگر - چرخش نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی خواص رفتاری یک اتصال نیمه‌صلب جدید، تعدادی از اتصالات ساده، نیمه‌صلب و یک اتصال صلب به‌همراه سه پیکربندی مختلف از اتصال پیشنهادی ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای و مونوتونیک خواص رفتاری آن‌ها بررسی شده و نتایج زیر به‌دست آمد: اتصال پیشنهادی با توجه به ضوابط آیین‌نامه‌ای در زمره اتصالات نیمه‌صلب قرار گرفت. با توجه به شباهت عمل‌کرد اتصال پیشنهادی به اتصال با ورق انتهایی، مشاهده شد که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر خصوصیات رفتاری اتصال پیشنهادی، اتصال پیچی صفحه انتهایی به ستون است. با تغییر جزئیات این اتصال می‌توان اتصالاتی در رده‌های مختلف مقاومتی داشت. با نصف کردن ضخامت ورق‌های فوقانی و تحتانی میزان صلبیت تنها ۹٪ کاهش داشته، اما با نصف کردن تعداد پیچ‌ها میزان صلبیت حدود ۶۴٪ کاهش داشته است. با مقایسه پوش منحنی لنگر-چرخش اتصالات نیمه‌صلب مشاهده شد که اتصال پیشنهادی توانایی جذب انرژی و تحمل تغییرشکل‌های زیاد در مقایسه با سایر اتصالات نیمه صلب هم‌رده مقاومتی دارد.

### تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه خوارزمی برای همکاری در طرح پژوهشی گرنت بدو ورود، تشکر و قدردانی شود.

### منابع

1. Johnson B., Green L., "Flexible welded angle connections", AWS. Weld Journal Vol. 19(10) (1940) 402-408.
2. Frye M.J., Morris G.A., "Analysis of flexibly connected steel frames", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 2(3) (1975) 280-291.
3. Richard R.M., Abbott B.J., "Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula", Journal of Engineering Mechanics, Vol.101 (EM4) (1975) 511-515.

4. Ang K.M., Morris G.A., "Analysis of Three-Dimensional Frames with Flexible Beam-Column Connections", Canadian Journal of Civil Engineering CSCE, Vol.11 (1984) 245-254.
5. Lui E.M., Chen W.F., "Analysis and behaviour of flexibly-jointed frames", Engineering Structures, Vol 8 (2) (1986) 107-118.
6. Kishi N., Chen W.F., "Moment-rotation relation of top and seat angle with double web angle connections", Connection in steel structures, behavior strength and design. E.A.S. Publishers, London, England (1988) 121-134.
7. De Stefano M., De Luca A., "Modeling of cyclic moment-rotation response of double-angle connections", Journal of Structural Engineering, Vol.120 (1) (1994) 212-229.
8. Shen J., Astaneh-Asl A., "Hysteresis model of bolted-angle connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol.54 (3) (2000) 317-343.
9. Chaboche J.L., "Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity", Int.J.Plast, Vol.5 (3) (1989) 247-302.
10. Chi W.M., Kanvinde A., Deirelin G., "Prediction of Ductile Fracture in Welding Connection using the SMCS Criterion", J.Struct, Eng, 132 (2) (2006) 171-181.
11. Krawinkler H., Gupta A., Medina R., Luco N., "Loading histories for Seismic Performance Testing of SMRF Components and Assemblies", SAC Joint Venture, Report no.SAC/BD-00/10.Richmond (CA) (2000).
12. American Institute of Steel Construction (AISC), "Specification for Structural Steel Buildings", Chicago, IL, American Institute of Steel Construction (AISC), Inc. (2005).
13. Ste Fano M.D., Antonell D.L., "Mechanical Models for Semi rigid Connections", In Constrtional Steel Design, Ed., P.J., Dowling, J.E., Hardening, E.Martinez-Romero, Elsevier Applied Science Publishers, London (1992) 276-279.