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

سیدحسین حسینی لواسانی؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ فنی مهندسی

تاریخ: دریافت ۹٤/۸/۲۳ **پذیرش** ۹٤/۱۲/۱۲

چکیده

سازه‌های فولادی باید از طریق اتصالات کارآمد با ظرفیت‌های (اتلاف) انرژی مشخص به‌منظور مقاومت در برابر زلزله القاء شده به‌وسیلهٔ حرکت‌های زمین متصل شوند. قبل از زلزله‌های نورتریج (۱۹۹٤) 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 دههٔ 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 بررسی‌شده 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

مقدمه

پس از زمین‌لرزه نورتریج و کوبه، راه‌حل‌های جای‌گزین ساخت‌وساز برای قاب‌های فولاد نیمه صلب 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 نیمه صلب، تحقیقات انجام‌شده مربوط به عمل‌کرد قاب‌های فولادی نیمه صلب 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 به‌وسیلهٔ دستگاه تحریک‌کننده (جک) تحت بارگذاری قرار گرفته، درحالی‌که ستون ثابت نگه داشته شده است. جانسون[1] و گرین[2] اولین کارهای آزمایشگاهی مربوط به اتصال تیر به تیر و تیر به ستون را با استفاده از نبشی جان دوبل و نبشی بالا و نبشی نشیمن در سال ۱۹٤۰ 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[3] و برترو[4] (۱۹۷۳)، کوکرتی[5] و همکاران (۱۹۸۷)، عزیزی نمینی و همکاران (۱۹۸۹)، نادر و آستانه (۱۹۹٦)، صراف و برونئی (۱۹۹٦) پژوهش‌های دیگری نیز در زمینه اتصالات نیمه صلب 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 لنگرـ 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

علاوه بر این، مدل‌های دقیق المان محدود سه‌بعدی برای بیان رفتار پیچیدهٔ 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 داده‌شده به‌صورت برازش منحنی بر داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از تحلیل رگرسیون بود. فریی[1] و موریس[2] [۲] مدلی تجربی چندجمله‌ای با توان فرد ارائه دادند که در آن دوران به‌عنوان یک تابع از لنگر و دیگر پارامترهای منحنی برازش داده‌شده بیان شده است. این رابطه بر داده‌های حاصل از آزمایش اتصالات تحت بارهای یک‌نواخت قرار داده شده و درنهایت رابطه $M-\theta$ استخراج‌شده که بدین‌صورت است:

$$\theta_r = C_1\left(KM\right)^1 + C_2\left(KM\right)^3 + C_3\left(KM\right)^5 \tag{۱}$$

که در آن θ_r, M به‌ترتیب لنگر و دوران است. C_3, C_2, C_1 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 استانداردشده در جدول ۱ آورده شده است.

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

$$S_C = \frac{dM}{d\varphi_C} = \frac{1}{C_1 k + 3C_2 k\left(KM\right)^2 + 5C_3 k\left(KM\right)^4} \tag{۲}$$

$$S_C^0 = \left.\frac{dM}{d\varphi_C}\right|_{M=0} = \frac{1}{C_1 k} \tag{۳}$$

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

1. Frye 2. Morris

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

جدول ۱. ثابت منحنی برازش و ثابت استانداردشده رابطهٔ Frye[2]

نوع اتصال	ثابت‌های برازش	ثابت استاندارد
اتصال نبشی جان تکی	$C_1 = 4.28\times10^{-3}$ $C_2 = 1.45\times10^{-9}$ $C_3 = 1.51\times10^{-16}$	$k = d_a^{-2.4} t_a^{-1.8} g^{0.15}$
اتصال نبشی جان دوبل	$C_1 = 3.66\times10^{-4}$ $C_2 = 1.15\times10^{-6}$ $C_3 = 4.57\times10^{-8}$	$k = d_a^{-2.4} t_a^{-1.8} g^{0.15}$
اتصال نبشی نشیمن بالا و پایین	$C_1 = 2.23\times10^{-5}$ $C_2 = 1.85\times10^{-8}$ $C_3 = 3.19\times10^{-12}$	$k = d^{-1.287} t^{-1.128} t_c^{-0.415} I_a^{-0.694} g^{1.350}$
اتصال نبشی نشیمن به همراه نبشی دوبل جان	$C_1 = 8.46\times10^{-4}$ $C_2 = 1.01\times10^{-4}$ $C_3 = 1.24\times10^{-8}$	$k = d^{-1.5} t^{-0.5} t_c^{-0.415} I_a^{-0.7} d_b^{-1.1}$
اتصال صفحه انتهایی با سخت‌کننده ستون	$C_1 = 1.83\times10^{-3}$ $C_2 = -1.04\times10^{-4}$ $C_3 = 6.38\times10^{-6}$	$k = d_g^{-2.4} t_p^{-0.4} t_f^{-1.5}$
اتصال سپری	$C_1 = 1.79\times10^{-3}$ $C_2 = -1.76\times10^{-4}$ $C_3 = 2.04\times10^{-4}$	$k = d_g^{-2.4} t_p^{-0.6}$
اتصال روسری-زیرسری	$C_1 = 5.1\times10^{-5}$ $C_2 = 6.2\times10^{-10}$ $C_3 = 2.4\times10^{-13}$	$k = t_p^{-1.6} g^{1.6} d_b^{-2.3} t_w^{-0.5}$

ریچارد[3] و ابوت[4] [۳] یک مدل توانی با سه پارامتر برای نشان دادن رفتار لنگر- دوران اتصال تحت بارگذاری یک‌نواخت ارائه کردند. این مدل با رابطهٔ (۳) نشان داده شده است:

$$M = \frac{R_{ki}\theta_r}{\left[1+\left(\frac{\theta_r}{\theta_0}\right)^n\right]^{1/n}} \qquad (٤)$$

در این‌جا 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

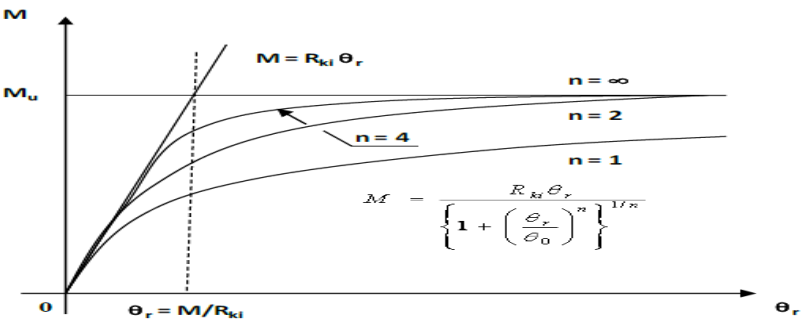
در این کار هم‌چنین روابطی برای پیش‌بینی سختی مماسی، S_C و سختی اولیه، S_C^0، اتصال بدین‌صورت ارائه شده است:

$$S_C = \frac{dM}{d\varphi_C} = \frac{1}{C_1 k + 3C_2 k\left(KM\right)^2 + 5C_3 k\left(KM\right)^4} \quad (۵)$$

$$S_C^0 = \left.\frac{dM}{d\varphi_C}\right|_{M=0} = \frac{1}{C_1 k} \quad (۶)$$

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

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



شکل ۱. مدل توانی با سه پارامتر [۳]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

ازآن‌جاکه سختی مماسی اتصال، R_k و دوران نبشی، θ_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 فریی–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:

$$R_k = \frac{dM}{d\theta_r} = \frac{R_{ki}}{\left[1+\left(\frac{\theta_r}{\theta_0}\right)^n\right]^{(n+1)/n}} \qquad (۷)$$

برای کاهش مشکل مدل فریی–موریس در رابطه با پیش‌بینی سختی مماس منفی اتصال زمانی که مشتق تابع چندجمله‌ای در داخل محدودهٔ خاص گرفته شده باشد، انگ[1] و موریس و [٤] پیشنهاد دادند تا با استفاده از مدل اسگود–رومبرگ[2] استاندارد شده، روابطی برای بیان رفتار لنگر– دوران پنج نوع اتصال معمولی شامل نبشی جان تکی، نبشی جان دوبل، صفحه روسری–زیرسری، نبشی نشیمن بالا و پایین و اتصالات رکابی استخراج شود. مدل ارائه شده بدین‌صورت است:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{(KM)}{(KM)_0} = \left[1+\left[\frac{KM}{(KM)_0}\right]^{(n-1)}\right] \qquad (۸)$$

که در آن $(KM)_0, \theta_0$ 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[3] و چن[4] مدلی نمایی بدین‌شکل ارائه کردند [۵]:

$$M = M_0 + \sum_{J=1}^{n} C_j\left[1-\exp\left(-\frac{|\theta_C|}{2J\propto}\right)\right] + R_{kf}\,|\varphi_C| \qquad (۹)$$

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

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}	0.47104×10^{2}	0.443169×10^{3}	0.96415×10^{3}	0.41193×10^{3}
α	-0.511678×10^{-3}	0.31425×10^{-3}	0.31783×10^{-3}	0.67083×10^{-3}
C_1	-0.43300×10^{2}	-0.34515×10^{3}	-0.25038×10^{3}	-0.67824×10^{3}
C_2	0.12139×10^{4}	0.52345×10^{4}	0.50736×10^{4}	0.27084×10^{4}
C_3	-0.58583×10^{4}	-0.26762×10^{5}	-0.30396×10^{5}	-0.21389×10^{5}
C_4	0.12971×10^{5}	0.61920×10^{5}	0.75338×10^{5}	0.78563×10^{5}
C_5	-0.13374×10^{4}	-0.65114×10^{5}	-0.82873×10^{5}	-0.99740×10^{5}
C_6	0.52224×10^{4}	0.25506×10^{5}	0.33927×10^{5}	0.43042×10^{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، α ضریب مقیاس n تعداد عبارات درنظر 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) به‌دست می‌آید:

$$S_C = \frac{dM}{d\varphi_C}\Big|_{|\varphi_C|=|\varphi_C|} = \sum_{J=1}^{n} C_j\left[1-\exp\left(-\frac{|\theta_C|}{2J\alpha}\right)\right]+R_{kf} \qquad (۱۰)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

$$S_C^0 = \sum_{J=1}^{n} \frac{C_j}{2J\alpha} + D_k H\left[-|\theta_K|\right]_{k=1} \tag{۱۱}$$

مدل لویی–چن رفتار غیرخطی اتصالات را به‌خوبی بیان می‌کند. بااین‌حال، 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[1] دارد. چن و کیشی[2] [٦] با تغییر مدل لویی–چن بدین شکل، قابلیت مدل کردن تغییرات ناگهانی در نمودار لنگر–دوران را اصلاح کردند:

$$M = M_0 + \sum_{J=1}^{n} C_J\left[1-\exp\left(-\frac{|\theta|}{2J\alpha}\right)\right] + \sum_{J=1}^{n} D_K\left(|\theta|-|\theta_k|\right)H\left(|\theta|-|\theta_k|\right) \tag{۱۲}$$

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، θ_K دوران آغازین بخش خطی منحنی و $H[\theta]$ یک تابع پله‌ای هویساید[3] 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 دوبل، دستفانو[4] 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].

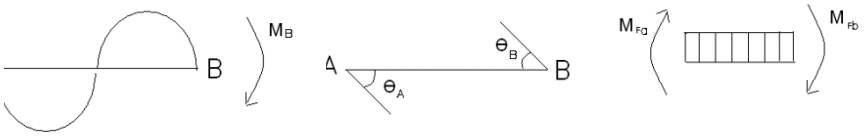
مبانی نظری

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 اتصالR با استفاده از روش خط تیر[5] می‌پردازیم:

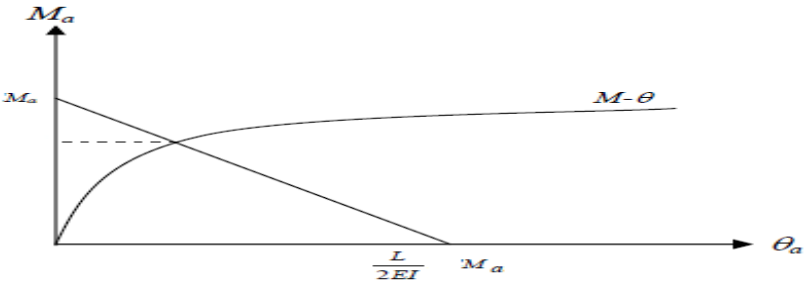
1. Strain Hardening Stiffness 2. Kishi 3. Heaviside 4. Destefano 5. Beam Line

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]



شکل۲. منحنی‌های خط تیر



شکل۳. منحنی لنگر- چرخش برای یک اتصال نیمه‌صلب در کنار خط تیر

درجه صلبیت R، نسبت لنکر انتهایی حقیقی به لنگر گیرداری انتهایی در حالت کاملاً گیردار است. در شکل ٤ محل برخورد دو نمودار همان لنگر انتهایی حقیقی است و MFa لنگر گیردار انتهایی است. Θa=0، Θb=0 و Θa=Θb=0 که Mfa وMfb لنگرهای گیرداری هستند.

مفهوم خط تیر

$$M_a = M_{Fa} + \frac{4EI}{L}\theta_a + \frac{2EI}{L}\theta_b \qquad (۱۳)$$

$$M_b = M_{Fb} + \frac{2EI}{L}\theta_a + \frac{4EI}{L}\theta_b \qquad (۱٤)$$

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:

$$M_a = \frac{2EI}{L}\theta_a + M_{Fa} \qquad (۱۵)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

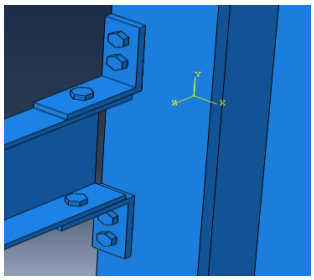
$\Theta_{\alpha}=0$ گیرداری کامل است کامل است در نتیجه Ma=MFa و در صورتی که انتهای تیر مفصلی باشد Ma=0 است

مدل‌سازی و آنالیز

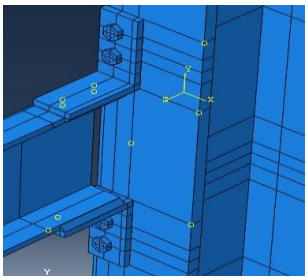
به‌منظور بررسی رفتار اتصال خمشی پیشنهادی در این کار، تعدادی اتصالات نیمه‌صلب رایج شبیه‌سازی‌شده و ویژگی‌های رفتاری آن‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای با یک‌دیگر مقایسه شده است. در تمامی مدل‌ها از تیر با مقطع IPE200 به‌طول ۱۲۰سانتی‌متر و ستون با مقطع IPB300 به‌طول ۲۰۰ سانتی‌متر ستفاده شده است. همهٔ ابعاد به‌دست 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 ٤ 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 به‌گونه‌ای 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 به‌صورت ٤ پیچی است (اتصال n1). به‌منظور بررسی عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات رفتاری این اتصال دو نمونه اتصال دیگر نیز ساخته شده است. در اتصال n2 به‌جای 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

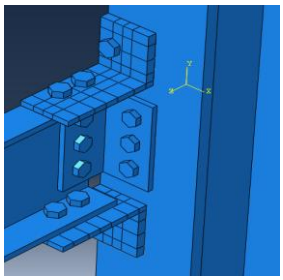
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]



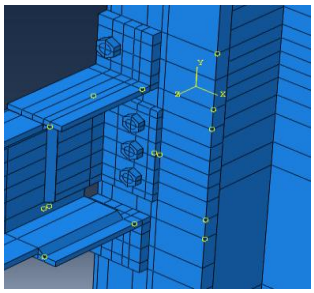
شکل ٤. اتصال نبشی نشیمن ساده پیچی (e)



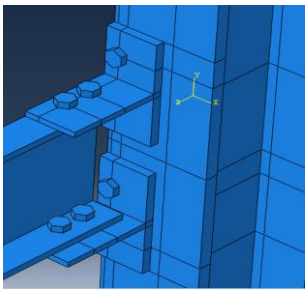
شکل ٥. اتصال نبشی نشیمن ساده جوشی (f)



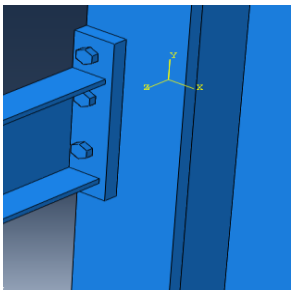
شکل ٦. اتصال نبشی نشیمن و بالایی ونبشی جان دوبل پیچی (i)



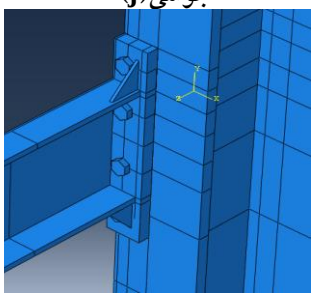
شکل ۷. اتصال نبشی نشیمن و بالایی و نبشی جان دوبل جوشی(j)



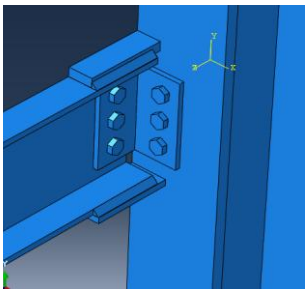
شکل ۸. اتصال سپری (g)



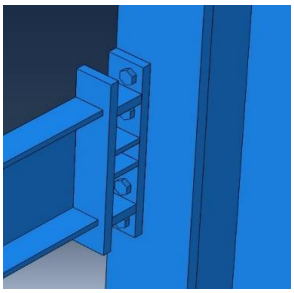
شکل۹. اتصال با ورق انتهایی (h)



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



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



شکل ۱۲. اتصال نیمه صلب پیشنهادی (n1)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

نحوهٔ مدل‌سازی

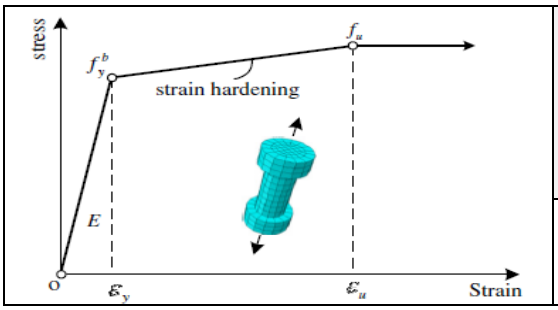
در این پژوهش برای انجام تحلیل‌های غیرخطی اتصال از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. از جمله قابلیت‌های این نرم‌افزار تحلیل‌های مختلف از جمله آنالیز غیرخطی است که کاربرد بسیاری دارد. در مدل‌سازی سعی شده است اندرکنش بین اجزا تا حد امکان منطبق بر واقعیت باشد. اتصالات پیچی به‌صورت دقیق مدل شده و اندرکنش بین سطح پیچ و سوراخ به‌صورت اصطکاکی سخت با ضریب اصطکاک ۰٫۳ با امکان جداشوندگی بعد از باربرداری مدل شده است. هم‌چنین جوش‌های گوشه به‌صورت یک منشور با مقطع مثلثی مدل شده است. درجایی که از جوش شیاری استفاده شده است، با توجه به‌این‌که 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 به‌صورت دو خط مستقیم و یا فرم‌های چندخطی تعریف‌شده است. این مدل‌ها، بااین‌حال، نمی‌تواند شرایط بارگذاری چرخه‌ای را به‌درستی نشان دهند. در این کار از مدل ارائه‌شدهٔ کبوکه که به‌صورت مدلی ترکیبی از سخت شدگی همسان[1] و سینماتیک[2] استفاده می‌شود [۹]. این مدل در آباکوس به‌عنوان مدلی ساختاری پلاستیسیته در قالب یک مدل سخت‌شوندگی هم‌سان و سینماتیکی غیرخطی تعریف شده است. پارامترهای مدل ساختاری ذکرشده را می‌توان با برازش داده‌های حاصل از تست آزمایشگاهی به‌دست آورد. با توجه به انجام ندادن آزمایش در این کار از مقادیر عددی ارائه شده در [۹] که برای فولاد Q345B به‌دست‌آمده است، استفاده می‌شود. هم‌چنین مدول یانگ[3] و نسبت پوآسون[4] برای همه اجزای فولادی به‌ترتیب به‌مقدار ۲۰۶ گیگاپاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. هم‌چنین به‌منظور مدل‌سازی رفتار پیچ‌های پر مقاومت A10.9 از منحنی تنش کرنش الاستوپلاستیک چندخطی مطابق با شکل ۱۳ استفاده شده است. ضریب پوآسون این پیچ‌ها برابر با ۰/۳ است و از مدل سخت‌شدگی سینماتیک برای بیان رفتار سخت‌شوندگی 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

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 انجام‌شده [۱۰] مطابق با شکل ۱۳ به نرم‌افزار معرفی شده است.



Es (Mpa)	Fy (Mpa)	Fu (Mpa)	uε
206000	990	1160	0.138

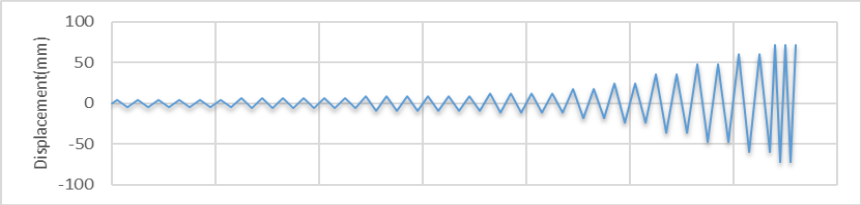
شکل ۱۳. مدل رفتاری پیچ پرمقاومت

جدول٤.پارامترهای مدل چرخه‌ای جوش

$\sigma\|_0 = 5720$	C1=1450	γ1=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 به‌صورت پیوسته در نظر گرفته شده و جوش شیاری به‌صورت مجزا مدل نمی‌شود. نیرو مطابق پروتکل بارگذاری ارائه‌شده 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 ٤) در مقدار طول تیر (۱۲۰ سانتی‌متر) به‌دست می‌آید. این تاریخچه بارگذاری شامل تغییرشکل‌های سیکلی گام به گام افزاینده است. شرایط مرزی به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که تکیه‌گاه پایین و بالای ستون به‌صورت مفصلی عمل کند. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه، تمامی گره‌ها در تکیه‌گاه‌ها در جهت جانبی(عمود بر صفحه) مقید شده‌اند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]



شکل ١٤. پروتکل بارگذاری SAC

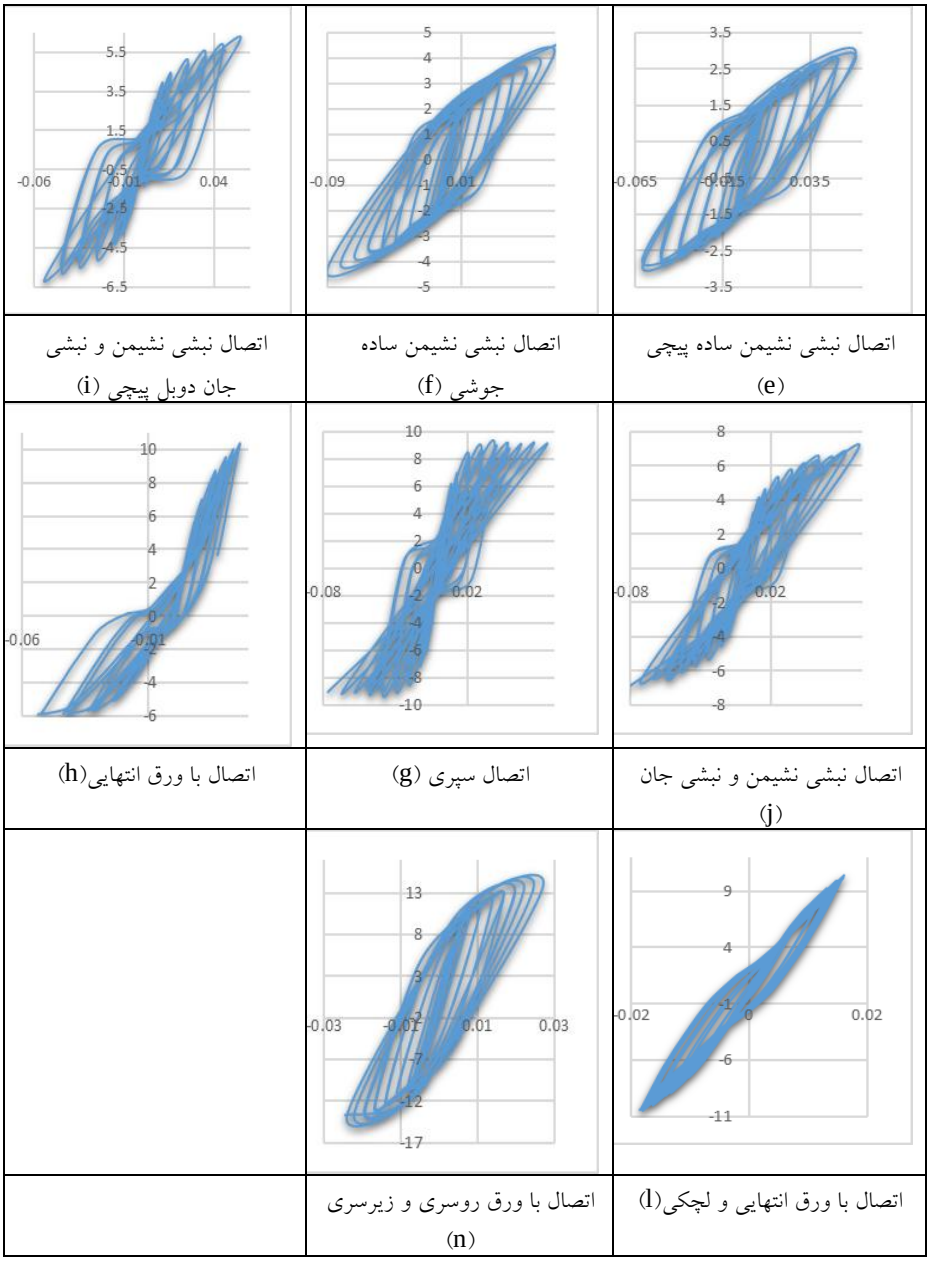
بررسی اتصالات نیمه‌صلب

صلبیت یک اتصال را می‌توان با شیب منحنی M-θ تعیین کرد. چون منحنی M-θ برای جمیع مقادیر M و θ به‌صورت غیرخطی است می‌توان صلبیت اتصال را با شیب مماس بر منحنی M-θ به‌دست آورد. ضریب صلبیت سکانت در بارهای سرویس، Kserv، معیار مناسبی برای سنجش تغییر مکان‌ها و حرکت جانبی قاب‌ها است و مقدار آن را می‌توان بر اساس زاویهٔ دورانی حدوداً معادل ۰/۰۰۲۵ رادیان تعیین کرد. منحنی لنگر–چرخش اتصالات مدل‌شده در شکل‌های زیر آورده شده است. در هرحال 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 به‌عنوان 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 α بدین‌صورت هست: **الف)**اتصال تمام صلب است اگر α >۲۰، **ب)** اتصال نیمه‌صلب (مهار نسبی) است اگر ۲۰ ≥ α ≥ ۲، **ج)** یک اتصال ساده است اگر α < ۲.

بر این اساس و در نظر گرفتن یک دهانه ۵ متری برای تیر، چنان‌که مشاهده می‌شود مقادیر α 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 کاهندهٔ بیش‌تری در مقدار صلبیت اتصال دارد، به‌طوری‌که با نصف کردن ضخامت ورق‌های فوقانی و تحتانی میزان صلبیت تنها ۹٪ کاهش داشته، اما با نصف کردن تعداد پیچ‌ها میزان صلبیت حدود ٦٤٪ کاهش داشته است. هم‌چنین اتصال n3 کم‌ترین میزان صلبیت را دارد و مقدار صلبیت آن در ردهٔ اتصال پیچی نبشی نشیمن با نبشی جان است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

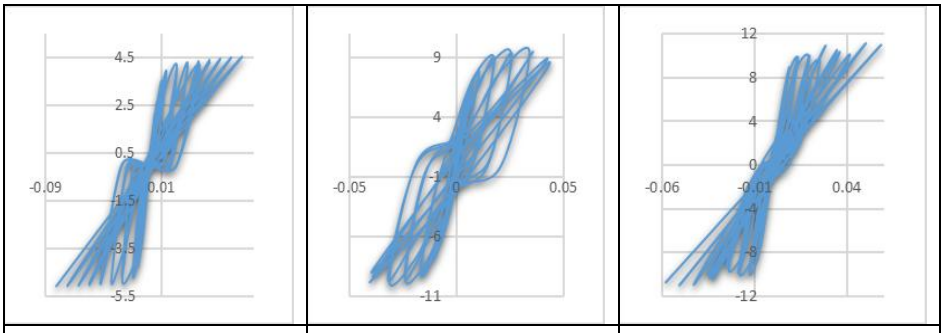


شکل ۱۵. منحنی لنگر چرخش اتصالات نیم‌صلب رایج

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

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.



اتصال نیمه‌صلب جدید (n1)	اتصال نیمه‌صلب پیشنهادی (n2)	اتصال نیمه‌صلب پیشنهادی (n3)

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 ناحیهٔ 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، درصورتی‌که علاوه بر این کاهش لاغری به‌جای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

استفاده از چهار عدد پیچ، از دوپیچ در صفحه انتهایی استفاده شود مقاومت نهایی (اتصال n3) نسبت به اتصال n1 به‌میزان ٦٠٪ کاهش می‌یابد و اتصال از یک اتصال پر مقاومت به اتصالی با مقاومت نسبی تبدیل می‌شود. به‌نظر 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 هنگامی‌که 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 به‌میزان ۰/۰۲ رادیان را بدون کاهش قابل‌توجه در مقاومت خود را دارا باشد. این مقدار برای اتصالات خمشی در قاب خمشی ویژه برابر با ۰/۰٤ 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 ۰/۰٤ رادیان بدون کاهش مقاومت، می‌تواند در قاب‌های خمشی ویژه به‌کار 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 n2, n1 و n3 در مقایسه با سایر اتصالات نیمه‌صلب هم ردی مقاومتی اشاره کرد، به‌طوری‌که تنها اتصال نیمه‌صلب با سپری بالایی و پایینی (اتصال g) قابلیت تحمل چنین تغییر شکل‌هایی را از خود نشان داده است.

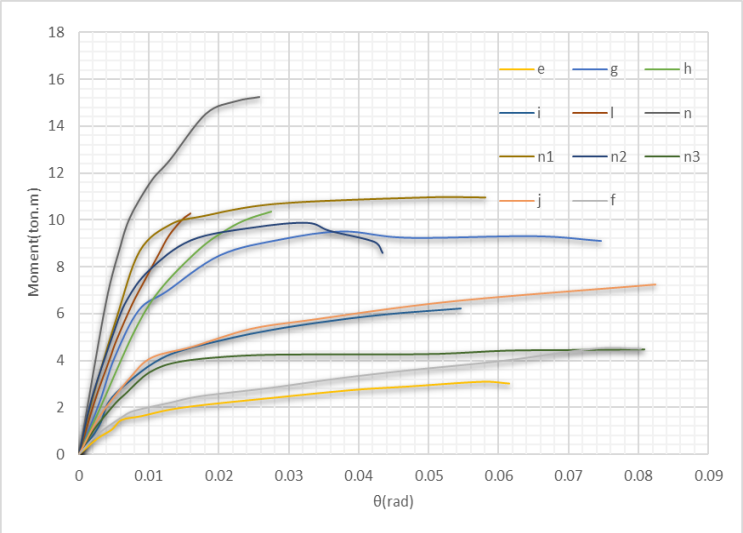
ظرفیت تحمل بار

ظرفیت تحمل بار نمونه‌ها تحت بارگذاری مونوتونیک در شکل ۲٦ آورده شده است. در این بارگذاری، تمام نمونه‌ها تحت جابه‌جایی ۱۵ سانتی‌متری در انتهای خود به‌صورت استاتیکی قرارگرفته‌اند. این نمودارها دارای هم‌خوانی بسیاری با نتایج آزمایش چرخه‌ای است. چنان‌که

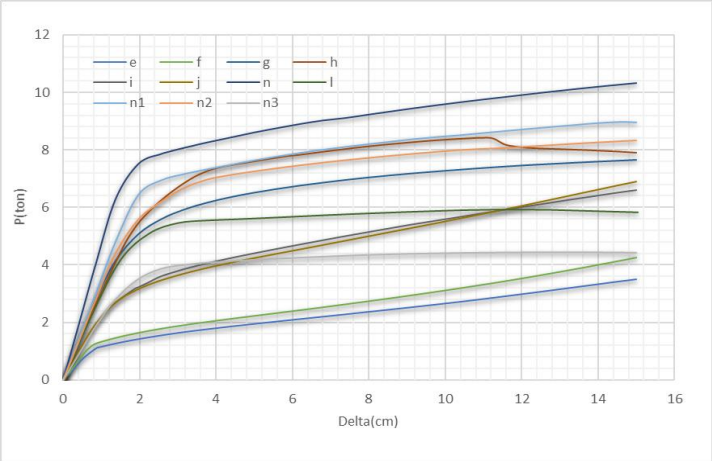
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

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 ۸٦، ۸۰ و ٤۳٪ است. کاهش چشم‌گیر ظرفیت باربری در اتصال n3 ناشی از به‌کارگیری ۲ پیچ بجای ٤ پیچ است، درحالی‌که کاهش ضخامت ورق‌های افقی تأثیر چندانی بر ظرفیت نهایی اتصال نداشته است.



شکل۲۵. پوش منحنی لنگر- چرخش نمونه ها تحت بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۲٦. پوش منحنی لنگر-چرخش نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

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 زمرهٔ 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 اتصالی 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 ٦٤٪ کاهش داشته است. با مقایسهٔ 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 هم‌ردهٔ 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]

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 C onnection 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.4.2]