



## چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

### محاسبه سختی دورانی اتصالات صلب اجرا شده توسط ورق های بالاسری و پایین سری با استفاده از مدل ریاضی کیسالا

\*سید بهزاد نبوی<sup>۱</sup>، نادر فنائی<sup>۲</sup>

#### چکیده

در طراحی اتصالات مفصلی تیر به ستون قاب‌های فولادی، فرض بر این است که هیچگونه لنگری از تیر به ستون منتقل نمی‌شود و همینطور در مورد اتصالات صلب خمشی نیز فرض می‌شود تمام لنگر خمشی تیر به ستون منتقل می‌شود. این فرضیات در واقعیت صادق نیستند بدین صورت که در اتصالات مفصلی، بسته به نوع اتصال و مشخصات اجزای آن، درصدی از لنگر به ستون منتقل می‌گردد و همینطور اتصالات صلب خمشی نیز همه لنگر تیر را به ستون منتقل نمی‌کنند. در نظر گرفتن این موارد باعث تغییر در مقدار نیروهای وارده از طرف تیر به ستون می‌گردد. در این مقاله عوامل مؤثر و میزان تأثیر آنها بر منحنی لنگر- دوران اتصالات خمشی با ورقهای بالاسری و پایین سری مورد مطالعه قرار گرفته و روشی کاربردی برای محاسبه سختی این نوع اتصالات در تحلیل قاب‌های فولادی ارائه شده است. پس از ساخت مدل‌های عددی و صحت‌سنجی نتایج حاصله با تحقیقات آزمایشگاهی، عوامل مؤثر بر سختی اتصالات خمشی با ورقهای بالاسری و پایین سری بررسی شده و در انتها توسط مدل نمایی کیسالا رابطه‌ای ریاضی به منظور تعیین منحنی سختی این نوع از اتصالات خمشی ارائه شده است.

#### کلمات کلیدی

اتصال صلب خمشی، ورقهای بالاسری و پایین سری، منحنی لنگر- دوران، مدل اجزاء محدود

#### ۱- مقدمه

مقصود طراحان از اتصال خمشی، اتصالی است که بتواند لنگر را به طور کامل انتقال دهد و هیچگونه دورانی بین تیر و ستون اتفاق نیفتد. با توجه به اینکه بخش عمده لنگر تیر به صورت یک زوج نیرو در بال‌های فشاری و کششی تیر با بازوی تقریباً برابر ارتفاع تیر حمل می‌گردد، نقش یک اتصال خمشی فراهم کردن تمهیدات لازم برای انتقال این نیروها می‌باشد. استفاده از ورق بر روی بال بالا و پایین تیر (ورق‌های پوششی) یکی از روش‌های مناسب برای ایجاد یک اتصال خمشی می‌باشد. چن و کیشی [1]، با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده، بانک اطلاعات جامعی از اتصالات نیمه صلب شامل نوع اتصال، خواص مصالح، ابعاد هندسی اتصال و ... را جمع‌آوری کردند تا با استفاده از آنها بتوان پارامترهای موجود در مدل‌های ریاضی ارائه شده برای منحنی لنگر- چرخش اتصالات از قبیل مدل چندجمله‌ای فرای و موریس [2]، مدل نمایی چن-لویی

\*۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، s.behzad\_nabavi@yahoo.com

۲. عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fanaie@kntu.ac.ir

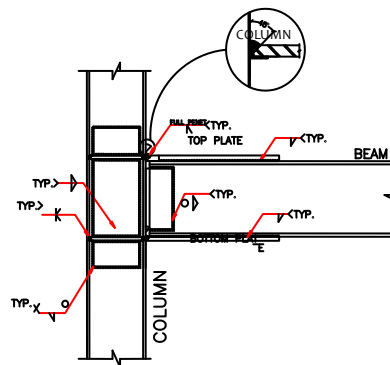


## چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

[3]، مدل توانی ریچارد- ابات [4] و ... را کالیبره نمود.

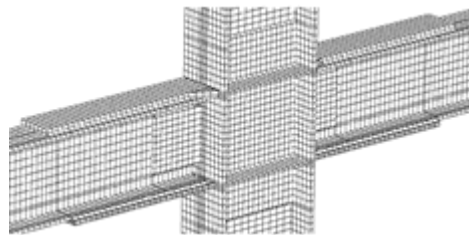
### ۲- جزئیات نمونه‌های مدل‌سازی شده

اتصال خمشی متشکل از دو ورق می‌باشد که بال فوقانی و تحتانی تیر را مطابق با شکل ۱ به ستون متصل می‌کنند. طول ستون در تمامی نمونه‌ها برابر ۳ m و فاصله آزاد بین تیر و ستون ۲۰ mm در نظر گرفته شده است. در نمونه‌های مدل‌سازی شده از ورق پارویی برای ورق بالا و ورق مستطیلی برای ورق پایین استفاده شده است. ورق بالا با استفاده از جوش نفوذ کامل به بال ستون و از دو طرف با استفاده از جوش گوشه به بال تیر متصل شده است. برای ورق پایین نیز از جوش نفوذ کامل برای اتصال به بال ستون و از جوش گوشه در دو طرف برای اتصال به بال تیر استفاده شده است.



شکل ۱- اتصال خمشی با ورق بالا و پایین

نمونه‌ها بر اساس ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده‌اند. در شکل ۲ یک مدل اجزاء محدود از این اتصالات نشان داده شده است.



شکل ۲- نمونه اجزاء محدود از اتصال با ورق بالا و پایین

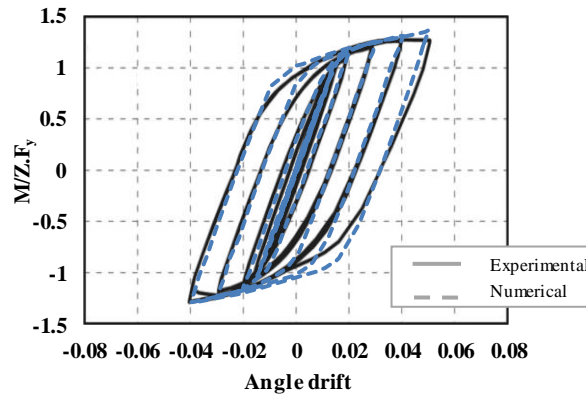
### ۳- صحت سنجی مدل‌سازی

قبادی و همکاران [5] در سال ۲۰۰۹، ۵ نمونه آزمایشگاهی از اتصالات خمشی را تحت بار چرخه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. به منظور ارزیابی صحت مدل‌سازی، دو نمونه RC2 که همخوانی زیادی با یکی از اتصالات مورد بررسی در این تحقیق دارند انتخاب شدند. در شکل ۳ نمودار لنگر نرمال شده  $(M/Z.F_y)$  در برابر تغییر مکان نسبی طبقه حاصل از مدل اجزاء محدودی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. Z اساس مقطع پلاستیک تیر و  $F_y$  تنش تسلیم مصالح تیر می‌باشد. تغییر مکان



## چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

نسبی طبقه از تقسیم جا بجایی افقی انتهای ستون به طول ستون به دست می آید.



شکل ۳- نمودار لنگر نرمال شده در برابر تغییر مکان در نمونه RC2

### ۴- نتایج عددی

در بررسی نتایج حاصل از مدلسازی المان محدود همانطور که انتظار می رفت دیده شد ضخامت ورق فوقانی تأثیر محسوسی بر رفتار اتصال دارد و افزایش آن باعث افزایش سختی و مقاومت اتصال می شود. همچنین مشاهده شد افزایش طول قسمت جوش شده ورق فوقانی به بال تیر تأثیر محسوسی بر نتایج ندارد ولی افزایش طول قسمت دوزنقه ای (پارویی) که به بال تیر جوش نشده است باعث کاهش سختی و مقاومت اتصال می گردد. دیده شد که افزایش عرض ورق فوقانی نیز باعث افزایش سختی و مقاومت اتصال می شود و همچنین تأثیر تغییر مشخصات ورق پایین سری روی عملکرد اتصال، مشابه ورق بالاسری می باشد که این موضوع از قبل نیز قابل پیش بینی بود. نتایج تحلیل المان محدود نشان داد که عرض و ضخامت ورق برشی جان به علت اینکه از سه طرف به جان تیر جوش شده است، تأثیری بر رفتار اتصال ندارند، همچنین تغییر ارتفاع ورق برشی نیز به این دلیل که عمده لنگر تیر توسط ورق های بالاسری و پایین سری به ستون منتقل می شود، تأثیر چشمگیری بر منحنی رفتاری اتصال نمی گذارد.

### ۵- مدل کیسالا

به طور کلی رفتار یک عضو سازه ای با سه پارامتر سختی، مقاومت و شکل پذیری ارزیابی می شود. منحنی لنگر-چرخش مهمترین شاخص لازم برای بررسی رفتار اتصالات است، چرا که هر سه پارامتر سختی، مقاومت و شکل پذیری از این منحنی قابل استخراج می باشد. بسیاری از محققان از گذشته تا کنون اقدام به استخراج این منحنی ها با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی یا تحلیلی کرده اند. در این مقاله مدل ریاضی پیشنهاد شده توسط کیسالا برای منحنی لنگر-چرخش اتصالات بررسی شده و این مدل برای تعیین سختی اتصالات خمشی اجرا شده با ورق های بالاسری و پایین سری استفاده شده است.

کیسالا [6] در سال ۲۰۰۲ یک رابطه نمایی سه پارامتری مطابق با رابطه زیر ارائه نمود:

$$M = (M_0 + K_p \theta) [1 - \exp(-K_i \theta / M_0)] \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $K_i$  سختی الاستیک،  $K_p$  سختی پلاستیک و  $M_0$  نقطه تقاطع خط مماس بر منحنی با محور لنگر می باشد.

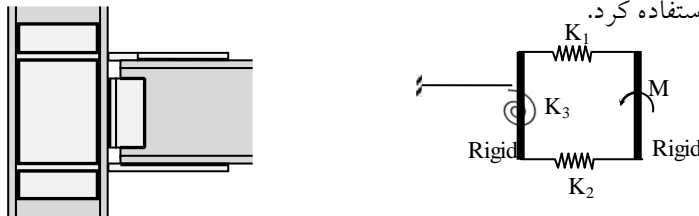


## چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

هر سه پارامتر رابطه کیسالا از یکدیگر مستقل می باشند که این امر باعث کارایی مناسب این مدل می شود، به طوری که این مدل می تواند سختی الاستیک، سختی پلاستیک و مقاومت اتصال را به خوبی ارائه دهد و در واقع کیسالا توانست با مدل نمایی خود مشکلات موجود در مدل های قبلی را مرتفع سازد.

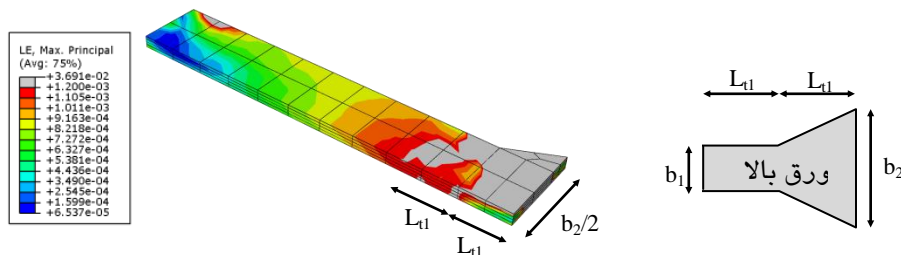
### ۶- تعیین پارامترهای مدل کیسالا

چرخش اتصال خمشی با ورق بالا و پایین را می توان به دو بخش تقسیم کرد: بخش اول تغییر شکل هایی که در اثر نیروهای محوری ناشی از تبدیل لنگر تیر به یک زوج نیرو، در ورق های بالا و پایین اتفاق می افتد و بخش دوم تغییر شکلی است که در چشمه اتصال به واسطه حضور این زوج نیرو رخ می دهد. با توجه به این توضیحات می توان از مدل نشان داده شده در شکل ۴ برای محاسبه سختی اولیه اتصال استفاده کرد.



شکل ۴- مدل تحلیلی برای محاسبه سختی اولیه اتصال

در شکل فوق  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  به ترتیب سختی محوری ورق بالاسری، سختی محوری ورق پایین سری و سختی دورانی چشمه اتصال می باشند. همانطور که در قسمت قبل مشاهده شد افزایش طول قسمتی از ورق بالاسری و پایین سری که به بال تیر جوش داده شده است تأثیری در رفتار اتصال ندارد، اما همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است قسمتی از طول ورق بالاسری که تقریباً برابر با طول آزاد ورق (همان  $L_{t1}$  که طولی از ورق است که به بال تیر جوش نشده است) می باشد تغییر شکل داده و دچار کرنش می شود.



شکل ۵- توزیع کرنش در ورق بالا و مدل تحلیلی برای محاسبه سختی محوری آن

با توجه به شکل ۵ برای محاسبه  $K_1$  داریم:

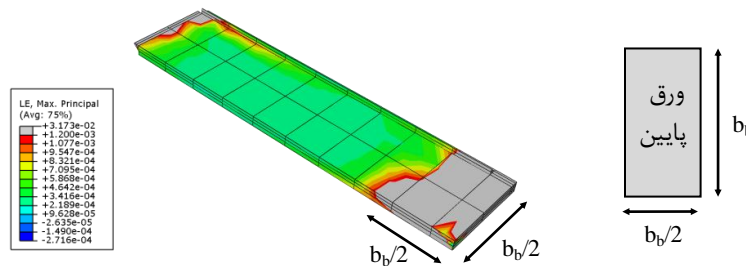
$$\Delta_t = \int_0^{2L_{t1}} \frac{P_t dx}{EA_t(x)} = \int_0^{L_{t1}} \frac{P_t dx}{Eb_1 t_t} + \int_{L_{t1}}^{2L_{t1}} \frac{P_t L_{t1} dx}{Et_t [x(b_2 - b_1) + L_{t1}(2b_1 - b_2)]} = \frac{P_t L_{t1}}{Eb_1 t_t} + \frac{P_t L_{t1} \ln(b_2 / b_1)}{Et_t (b_2 - b_1)} \quad (2)$$



## چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

$$K_1 = \frac{P_t}{\Delta_t} = \frac{Et_t(b_1 - b_2)}{L_{t1} [1 - (b_2/b_1) - \ln(b_2/b_1)]} \quad (3)$$

$t_t$  در رابطه فوق ضخامت ورق بالاسری است و  $b_1$  و  $b_2$  عرضهای ورق بالاسری هستند که در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. در مورد ورق پایین سری نیز همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است افزایش طول ورق تأثیری بر رفتار اتصال ندارد اما مطابق شکل زیر ورق پایین سری در طولی که تقریباً برابر با نصف عرض آن می‌باشد دچار تغییر شکل می‌شود.



شکل ۶- توزیع کرنش در ورق پایین سری و مدل تحلیلی برای محاسبه سختی محوری

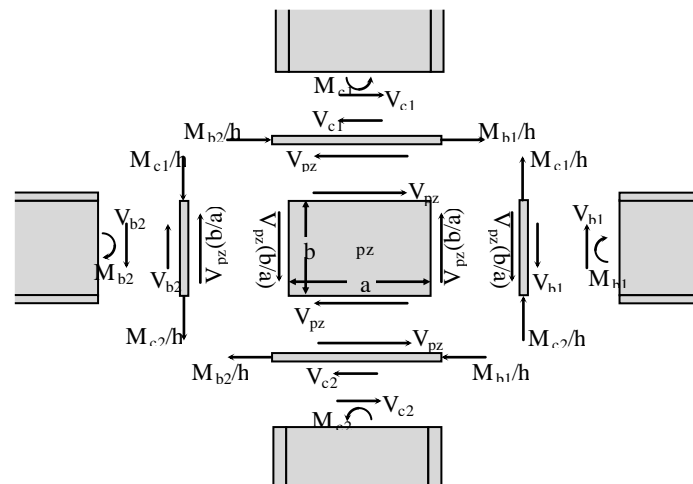
بنابراین سختی محوری ورق پایین سری که عرض آن  $b_b$  و ضخامت آن  $t_b$  است، برابر است با:

$$K_2 = \frac{EA_b}{L_b} = \frac{Eb_b t_b}{(b_b/2)} = 2Et_b \quad (4)$$

با نوشتن معادله تعادل افقی بر روی ورق پیوستگی بالا داریم:

$$V_{pz} = \frac{M_{b1}}{h_{b1}} + \frac{M_{b2}}{h_{b2}} - V_{c1} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $h_{b1}$  و  $h_{b2}$  به ترتیب ارتفاع مقطع تیر در سمت راست و چپ اتصال می‌باشد. از معادله تعادل کل اتصال خواهیم داشت:



شکل ۷- نیروهای وارد بر چشمه اتصال از طرف تیر و ستون ناشی از بارهای جانبی



## چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

$$V_{c1} = V_{c2} \quad (6)$$

در صورتی که فرض کنیم ارتفاع ستون  $H$ ، برابر میانگین ارتفاع ستون در بالا و پایین اتصال باشد از برابری برش دو ستون نتیجه می‌گیریم که:

$$\left. \begin{aligned} V_{c1} &= \frac{2M_{c1}}{H - h_b} \\ V_{c2} &= \frac{2M_{c2}}{H - h_b} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &V_{c1} = V_{c2} \\ &\Rightarrow M_{c1} = M_{c2} \end{aligned} \quad (7)$$

در رابطه فوق برابر میانگین ارتفاع مقطع تیر در سمت راست و چپ اتصال می‌باشد.

با نوشتن معادله تعادل لنگر در چشمه اتصال و با توجه به رابطه فوق داریم:

$$M_{b1} + M_{b2} = M_{c1} + M_{c2} = 2M_{c1} \quad (8)$$

در نهایت نیروی برشی چشمه اتصال برابر است با:

$$V_{pz} = \frac{M_{b1}}{h_{b1}} + \frac{M_{b2}}{h_{b2}} - \frac{2M_{c1}}{H - h_b} \cong \frac{M_{b1} + M_{b2}}{h_b} (1 - \rho) \quad , \quad \rho = \frac{h_b}{H - h_b} \quad (9)$$

برای محاسبه سختی دورانی چشمه اتصال با توجه به اینکه چشمه اتصال تحت برش خالص است، به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\tau = G\gamma \quad (10)$$

$$V_{pz} = GA\gamma \quad (11)$$

در رابطه فوق  $\gamma$  کرنش برشی یا همان زاویه چرخش چشمه اتصال است.

با جایگذاری رابطه (۸) در رابطه (۱۱) و در نظر گرفتن  $M_{b1} + M_{b2} = M$  داریم:

$$M = \frac{GAh_b}{1 - \rho} \gamma \quad (12)$$

بنابراین سختی دورانی چشمه اتصال برابر است با:

$$K_3 = \frac{G(h_c - 2t_{fc})(t_{wc} + t_{pz})h_b}{1 - \rho} \quad (13)$$

در رابطه فوق،  $h_c$  ارتفاع مقطع ستون،  $t_{wc}$  ضخامت جان یا جان‌های ستون،  $t_{pz}$  مجموع ضخامت ورق‌های مضاعف و  $G$  مدول برشی مصالح چشمه اتصال است. در نهایت سختی اولیه اتصال با توجه به شکل ۴ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K_i = \frac{K_1 K_2 K_3 h_b^2}{(K_1 + K_2) K_3 + K_1 K_2 h_b^2} \quad (14)$$

در رابطه فوق ارتفاع مقطع تیر و  $a_w$  بُعد جوش نبشی بالا به ستون می‌باشد.

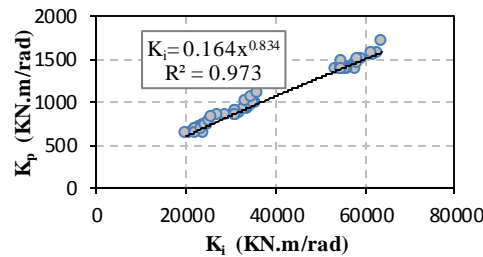


## چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه

سختی پلاستیک را با استفاده از تحلیل رگرسیون بر حسب سختی اولیه به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$K_p = 0.164 (K_i)^{0.83} \quad (15)$$

در رابطه فوق  $K_i$  و  $K_p$  بر حسب  $KN.m/rad$  می‌باشند.



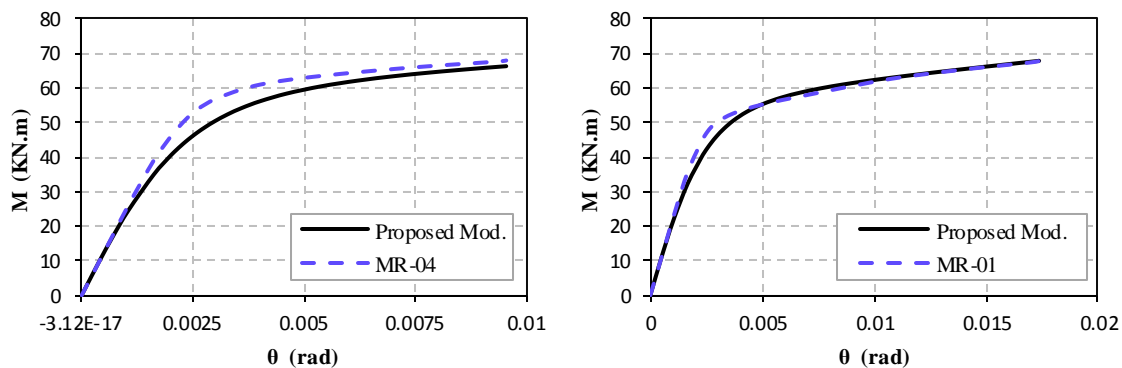
شکل ۸- نمودار تحلیل رگرسیون برای محاسبه سختی پلاستیک

$M_0$  بر حسب متغیرهایی که بر مقاومت اتصال تأثیرگذارند از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$M_0 = 522.4 \times 10^{-6} \left( \frac{b_1 + b_2}{2} \right)^{0.49} t_i^{0.22} L_{t1}^{-0.06} b_b^{0.27} t_b^{0.14} t_p^{0.028} (t_{cw} + t_{pz})^{0.18} h_b^{1.34} \quad (16)$$

در رابطه فوق ضخامت ورق پیوستگی می‌باشد. تمامی ابعاد هندسی در رابطه فوق بر حسب  $mm$  و  $M_0$  بر حسب  $KN.m$  است.

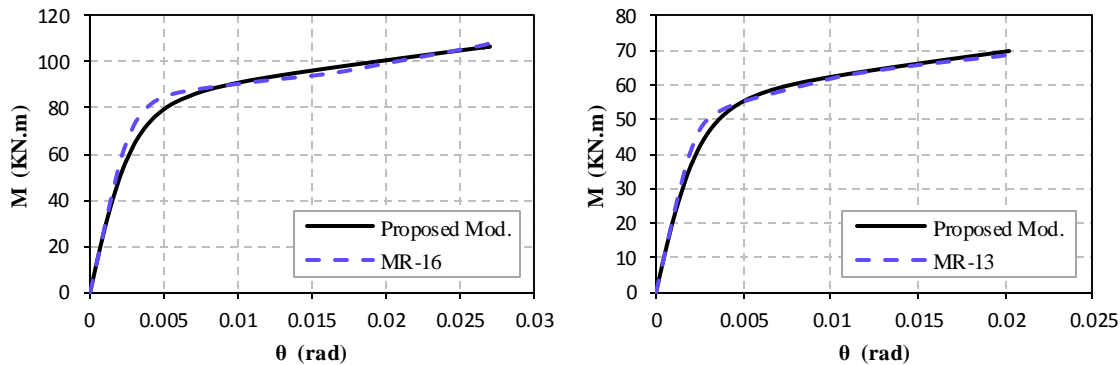
در شکل ۹ نتایج حاصل از روابط ارائه شده با نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود مقایسه شده است. به دلیل تعدد نمونه‌ها، منحنی‌های شکل ۹ به صورت خلاصه آورده شده‌اند.



شکل ۹- مقایسه منحنی لنگر - دوران مدل کیسالا با نتایج مدل‌سازی‌های عددی



## چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه



شکل ۹- مقایسه منحنی لنگر-دوران مدل کیسالا با نتایج مدل سازی های عددی (ادامه)

### ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل نمایی کیسالا برای منحنی لنگر- دوران غیرخطی اتصالات صلب جوشی با ورقهای بالاسری و پایین سری بررسی شد. با توجه به پارامترهای لحاظ شده، از این مدل می توان تقریباً برای تمامی اتصالات در صورت تعیین پارامترهای مدل مذکور استفاده کرد. پارامترهای معرفی شده برای مدل کیسالا، سختی اولیه، سختی پلاستیک و یک ضریب شکل به نام لنگر مرجع می باشند. پارامترهای پیشنهادی برای مدل کیسالا با استفاده از یک سری روابط نیمه تحلیلی و مدلسازی اجزاء محدود برای اتصال صلب جوشی تعیین شده اند. مقایسه نتایج مدل کیسالا با نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود حاکی از آن است که می توان با استفاده از مدل کیسالا منحنی لنگر- دوران اتصالات را با دقت خوبی بدست آورد. روابط ارائه شده می توانند برای در نظر گرفتن اتصالات نیمه صلب در تحلیل و طراحی قاب های ساختمانی مؤثر باشند.

### مراجع

- [1] Chen, W. F., and Kishi, N. (1989). "Semirigid Steel Beam-to-Column Connections: Data Base and Modeling", *Structural Engineering*, 115 (1).
- [2] Frye, M. J., and Morris, G. A. (1975). "Analysis of Flexibly Connected Steel Frames", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2 (3), pp. 280-291.
- [3] Chen, W. F., and Lui, E. M. (1985), "Column with Restraint and Bending in Load and Resistance Factor Design", *AISC Journal*, Third Quarter, pp 105-132.
- [4] Richard, R. M. and Abbott, B. J. (1975). "Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula", *J. Engrg. Mech. Div., ASCE*, 101 (EM4), pp 511-515.
- [5] Ghobadi, M.S. Mazroi, A. Ghassemieh, M. "Cyclic Response Characteristics of Retrofitted Moment Resisting Connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.65, pp.586-598, 2009.
- [6] Chisala, M. L., "Modelling Moment-Rotation Curves for Standard Beam-to-Column Connections", *Engineering Structures*, Vol.21, pp.1066-1075, 1999.