

# یک مدل تحلیلی یکتا برای تیرهای پیوند کوتاه، میانی و بلند در قابهای مهاربندی شدهی واگرا

امیر اشتری<sup>۱</sup>، سعید عرفانی<sup>۲\*</sup>، مسعود نکویی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران - سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

sderfani@aut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱/۲۰]

## چکیده

هدف از انجام این پژوهش بسط و گسترش مدل تحلیلی یکتا برای پیش بینی رفتار الاستیک و غیرالاستیک تیرهای پیوند است، به گونه‌ای که برای انواع مختلف تیر پیوند شامل تیر پیوند کوتاه، متوسط و بلند قابل استفاده باشد. هنگامی که قاب‌های مهاربندی شده واگرا تحت اثر زلزله‌های شدید قرار می‌گیرند، تیرهای پیوند از خود رفتار غیرالاستیک نشان می‌دهند، درحالی‌که تیرهای خارج از ناحیه‌ی تیر پیوند، ستون‌ها و مهاربندها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در محدوده‌ی الاستیک باقی بمانند. برای انجام تحلیل‌های غیرخطی مناسب روی قاب‌های مهاربندی شده واگرا، نیاز به مدلی تحلیلی است که بتواند با دقت زیادی رفتار غیرالاستیک تیرهای پیوند را پیش‌بینی کند. طبق اطلاع نویسندگان، در حال حاضر تنها برای تیرهای پیوند کوتاه مدل تحلیلی ارائه شده است. در این پژوهش یک مدل تحلیلی ارائه شده است که می‌تواند با دقت بسیار زیادی مقادیر بیشینه و همچنین مقادیر میانی نیروها و تغییر شکل‌های تیرهای پیوند کوتاه، متوسط و بلند را پیش‌بینی کند. پارامترهای مدل بر اساس نتایج چندین آزمایش صورت گرفته روی تیرهای پیوند و قاب‌های مهاربندی شده واگرا کالیبره شده‌اند. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی با منحنی‌های هیستریزس آزمایش‌ها نشان دهنده دقت بسیار بالای مدل تحلیلی ارائه شده است. استفاده از مدل پیشنهادی برای انجام تحلیل‌های غیرالاستیک روی قاب‌های مهاربندی شدهی واگرا توصیه می‌شود.

**واژگان کلیدی:** قابهای مهاربندی شدهی واگرا، تیر پیوند کوتاه، تیر پیوند متوسط، تیر پیوند بلند، مدل تحلیلی

## ۱- مقدمه

قاب‌های مهاربندی شده واگرا دارای سختی جانبی و استهلاک انرژی بالایی هستند [1]. از آنها به صورت گسترده‌ای به عنوان سیستم باربر جانبی ساختمان‌های چند طبقه در مناطق لرزه خیز استفاده می‌شود [2]. اجزای اصلی قاب‌های مهاربندی شده‌ی واگرا شامل ستون‌ها، تیرهای جمع کننده، مهاربندها و تیرهای پیوند فعال است. تیرهای پیوند فعال به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا از طریق تسلیم در زلزله طرح باعث فراهم آمدن شکل‌پذیری و استهلاک انرژی شوند، در حالیکه باقی اعضای سازه‌ای به شکلی طراحی شده‌اند که از تیرهای پیوند فعال قوی‌تر بوده و در محدوده الاستیک باقی بمانند [3]. مشخصه اصلی قاب مهاربندی شده واگرا این است که حداقل یکی از دو سر مهاربند طوری به تیر متصل شده است که نیروی آن از طریق قسمت کوچکی از تیر، به نام تیر پیوند، به ستون منتقل می‌شود [4]. طول لینک  $e$ ، معمولاً با توجه به نسبت بین ظرفیت لنگر پلاستیک  $M_p$  به ظرفیت برش پلاستیک  $V_p$ ، نرمال می‌شود. این طول نرمال شده  $\rho$ ، نسبت طول نامیده می‌شود. تیرهای پیوند با نسبت طول کمتر از  $1/6$ ، تیر پیوند کوتاه یا برشی نامیده شده، در ابتدا در برش به تسلیم می‌رسند و می‌توانند برای چرخش غیر الاستیک ( $\gamma$ )،  $0.08$  رادیان طراحی شوند. تیرهای پیوند با نسبت طول بزرگتر از  $2/6$ ، تیر پیوند بلند نامیده شده، در دو انتها تشکیل مفصل پلاستیک خمشی داده و می‌توانند برای چرخش غیرالاستیک  $0.02$  رادیان طراحی شوند. تیرهای پیوند با نسبت طول بین  $1/6$  و  $2/6$ ، تیرهای پیوند میانی نامیده شده، ترکیبی از تسلیم خمشی و برشی را تجربه کرده و با توجه به نسبت طول و با استفاده از درونیابی خطی، برای چرخش غیرالاستیک بین  $0.08$  و  $0.02$  رادیان طراحی می‌شوند [5]. تیر پیوند باید تا پیش از شکست شکل‌پذیر، از ظرفیت استهلاک انرژی بالایی برخوردار باشد تا از فروریزش قاب جلوگیری کند [6]. در طراحی قاب‌های مهاربندی شده واگرا بیشتر از تیرهای پیوند کوتاه یا برشی استفاده می‌شود [7]. معمولاً در مدل‌های تحلیلی که برای تحلیل غیرالاستیک قابهای مهاربندی شده واگرا استفاده می‌شوند، تیرهای پیوند به

صورت المان‌های غیرالاستیک با مفاصل خمشی و برشی متمرکز مدل می‌شوند. تیرهای خارج از ناحیه تیر پیوند، مهاربندها و ستون‌ها معمولاً به وسیله المان تیر-ستون الاستیک مدل می‌شوند، چرا که این اعضاء برای رفتار غیرالاستیک طراحی نشده‌اند [8].

رایسلز و پوپوف [9] برای تیرهای پیوند کوتاه یک مدل تحلیلی ارائه کردند. این مدل از یک المان تیر الاستیک خطی با مفاصل پلاستیک در هر انتها تشکیل شده است. هر مفصل طول صفر دارد و از یک سری زیرمفصل تشکیل شده است. رمضان و قبرا [10] زیرمفصل‌ها را با فنرهای انتقالی و پیچشی جایگزین کردند و مدل جدیدی ارائه کردند. در هر دو مدل سختی برشی اشتباه مدل شده است. ریچاردز و یوانگ [5] سختی برشی مدل ارائه شده توسط رمضان و قبرا را اصلاح کرده و مدل جدیدی ارائه نمودند. کوبویچ و همکارانش [8] ادعا کردند این مدل‌های تحلیلی مقادیر بیشینه نیرو و تغییر شکل را خوب پیش‌بینی می‌کنند ولی مقادیر میانی را کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌کنند. آنها یک مدل تحلیلی بر پایه آزمایش‌های انجام شده توسط اوکازاکی و انگلهارت [11]، بی‌توجه به این مساله که ابعاد پروفیل‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها متفاوت از ابعاد پروفیل‌های استاندارد است، ارائه کردند. برای در نظر گرفتن این تفاوت در ابعاد، برخلاف آنچه در متن مقاله گفته شده است، نسبت سخت شوندگی کرنشی برابر  $0.045$  لحاظ شده است. به همین دلیل سختی برشی مدل پیشنهادی آنها نادرست بود و نیروهای برشی پیش‌بینی شده بین  $15$  تا  $24$  درصد بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی است [12]. برای مطالعه رفتار تیر پیوند به تنهایی ممکن است مقادیر بیشینه نیروها و تغییر شکل‌ها کافی باشند ولی برای تحلیل قاب مهاربندی شده واگرا، به مقادیر میانی نیروها و تغییر شکل‌ها نیز نیاز است. اشتری و عرفانی [12] نشان دادند که مدل‌های تحلیلی موجود مقادیر بیشینه نیروها و تغییر شکل‌ها را نیز به درستی پیش‌بینی نمی‌کنند، و یک مدل تحلیلی برای لینک‌های کوتاه ارائه کردند که هم مقادیر بیشینه و هم مقادیر میانی نیروها و تغییر شکل‌ها را با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کند. طبق اطلاع نویسنده‌گان، در حال حاضر تنها

شکل‌ها را برای تیرهای پیوند کوتاه، میانی و بلند پیش‌بینی کند. مدل پیشنهادی به وسیله چهار گره تعریف می‌شود و شامل یک المان تیر-ستون الاستیک، دو فنر انتقالی با طول صفر و دو فنر پیچشی با طول صفر است. همان گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است،  $i$  و  $j$  گره‌های داخلی و  $i'$  و  $j'$  گره‌های خارجی است. المان تیر-ستون الاستیک گره‌های داخلی را به یکدیگر متصل می‌کند. گره‌های خارجی دارای مختصات یکسان با گره داخلی است و برای تعریف فنرهای برشی و چرخشی با طول صفر به کار می‌روند. المان تیر-ستون الاستیک طوری مقید شده است که در هر شرایط بارگذاری به صورت الاستیک رفتار کند و هیچ گونه تسلیم یا تشکیل مفاصل پلاستیک در دو انتهای آن اتفاق نیفتد. طول این المان برابر طول لینک،  $e$ ، در نظر گرفته شده است.

شکل ۱. مدل تحلیلی پیشنهادی

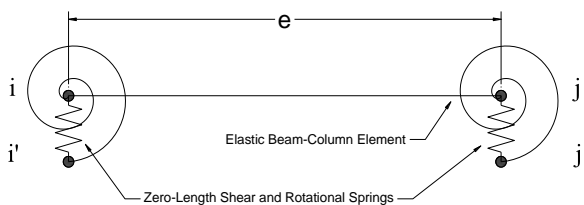


Fig. 1. Proposed analytical model

شکل ۲. درجات آزادی مدل تحلیلی پیشنهادی

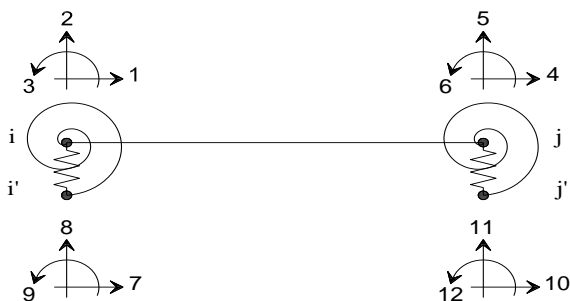


Fig. 2. Degrees of freedom for proposed analytical model

درجات آزادی گره‌های داخلی و خارجی در شکل (۲) نشان داده شده است. گره‌های داخلی و خارجی طوری مقید شده‌اند که درجات آزادی ۱ و ۴ به ترتیب برابر درجات

برای تیرهای پیوند کوتاه مدل تحلیلی ارائه شده است. لیگنوس و کراوینکلر [13] یک مدل زوال برای اعضای فولادی در قاب‌های خمشی ارائه کردند. در این پژوهش مدل ارائه شده توسط اشتری و عرفانی [12] گسترش داده شده است تا یک مدل تحلیلی ارائه شود که قادر است هم مقادیر بیشینه و هم مقادیر میانی نیروها و تغییر شکل‌ها را برای تیرهای پیوند کوتاه، میانی و بلند پیش‌بینی کند. برای دستیابی به این هدف، فنرهای پیچشی با طول صفر به مدل قبلی ارائه شده توسط نویسندگان افزوده شده است. برای ساخت مدل‌های عددی از برنامه OpenSees استفاده شده است. برای کالیبره کردن پارامترهای مدل از آزمایش‌های مختلف استفاده شده است. در هر آزمایش با استفاده از منحنی‌های هیستریزس، تغییر مکان‌های اعمال شده به دست آمد و در مدل عددی اعمال شد. مقایسه بین منحنی‌های هیستریزس به دست آمده با استفاده از مدل تحلیلی پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده دقت بالای مدل است. استفاده از مدل پیشنهادی در تحلیل‌های غیرالاستیک قاب‌های مهاربندی شده واگرا توصیه می‌شود.

## ۲- روش تحقیق

برای توسعه مدل تحلیلی ابتدا با استفاده از سعی و خطا یک مدل تحلیلی برای لینک‌های برشی و یک مدل تحلیلی برای لینک‌های خمشی به دست آمد. سپس با ترکیب این دو مدل یک مدل یکتا برای انواع مختلف لینک به دست آمد. در پایان با مدلسازی آزمایش‌های مختلف صورت گرفته روی انواع مختلف لینک و مقایسه منحنی‌های هیستریزس آزمایشگاهی و عددی، مدل تحلیلی پیشنهادی راستی آزمایی شد.

## ۳- مدل تحلیلی پیشنهادی

### ۳-۱- تشریح مدل تحلیلی پیشنهادی

در این پژوهش مدل ارائه شده توسط اشتری و عرفانی [12] گسترش داده شده است تا یک مدل تحلیلی ارائه شود که قادر است هم مقادیر بیشینه و هم مقادیر میانی نیروها و تغییر

$$I_{bc} = 1.1I \quad (2)$$

$$\alpha_s^+ = \alpha_s^- = 0.001 \quad (3)$$

$$M_y^+ = 1.1R_y F_y Z \quad (4)$$

$$M_y^- = -M_y^+ \quad (5)$$

$$\Lambda_s = 495 \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-1.34} \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^{-0.595} \left(\frac{1.1F_y}{345}\right)^{-0.36} \quad (6)$$

$$\Lambda_c = \Lambda_a = \Lambda_k = \Lambda_s \quad (7)$$

$$c_s = c_c = 1.1 \quad (8)$$

$$c_a = c_k = 1.0 \quad (9)$$

$$\theta_p^+ = \theta_p^- = 0.07 \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.365} \left(\frac{b_f}{t_f}\right)^{-0.14} \times \left(\frac{L}{d}\right)^{0.3} \left(\frac{d}{533}\right)^{-0.7} \left(\frac{1.1F_y}{345}\right)^{-0.12} \quad (10)$$

$$\theta_{pc}^+ = \theta_{pc}^- = 5.63 \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.565} \left(\frac{b_f}{t_f}\right)^{-0.8} \times \left(\frac{d}{533}\right)^{-0.28} \left(\frac{1.1F_y}{345}\right)^{-0.43} \quad (11)$$

$$\kappa^+ = \kappa^- = 0.4 \quad (12)$$

$$\theta_u^+ = \theta_u^- = 0.06 \quad (13)$$

$$D^+ = D^- = 1.0 \quad (14)$$

که I ممان اینرسی لینک،  $I_{bc}$  ممان اینرسی المان تیر-ستون الاستیک،  $\alpha_s^+$  و  $\alpha_s^-$  به ترتیب نسبت سخت شوندگی کرنشی برای جهت بارگذاری مثبت و منفی،  $M_y^+$  و  $M_y^-$  مقاومت تسلیم موثر برای جهت بارگذاری مثبت و منفی،  $\Lambda_s$  پارامتر زوال چرخه‌ای برای جهت زوال مقاومت،  $\Lambda_c$  پارامتر زوال چرخه‌ای برای جهت زوال مقاومت  $\Lambda_a$ ،  $\Lambda_k$  پارامتر زوال چرخه‌ای برای جهت بارگذاری مجدد شتاب،  $\Lambda_s$  پارامتر زوال چرخه‌ای برای جهت بارگذاری مجدد شتاب یافته،  $c_s$  نرخ زوال مقاومت،  $c_c$  نرخ زوال مقاومت  $\Lambda_a$ ،  $c_a$  نرخ زوال بارگذاری مجدد شتاب یافته،  $c_k$  نرخ زوال سختی بار برداری،  $\theta_p^+$  و  $\theta_p^-$  به ترتیب چرخش  $\theta_{pc}^+$  و  $\theta_{pc}^-$  به ترتیب چرخش  $\theta_u^+$  و  $\theta_u^-$  به ترتیب چرخش  $\kappa^+$  و  $\kappa^-$  به ترتیب نسبت مقاومت پس ماند برای جهت مثبت و

آزادی ۷ و ۱۰ است. درجات آزادی ۲ و ۵ به وسیله فنرهای برشی با طول صفر به ترتیب به درجات آزادی ۸ و ۱۱ متصل شده‌اند. درجات آزادی ۳ و ۶ به وسیله فنرهای چرخشی با طول صفر به ترتیب به درجات آزادی ۹ و ۱۲ متصل شده‌اند.

از برنامه OpenSees برای ساخت مدل‌های عددی استفاده است. برای کالیبره کردن پارامترهای مدل از ۱۱ آزمایش چرخه‌ای انجام گرفته توسط اوکازاکی و انگلهارت [11] روی لینک‌های کوتاه، ۷ آزمایش چرخه‌ای انجام گرفته توسط کاسای و پوپوف [14] روی لینک‌های کوتاه، ۱ آزمایش چرخه‌ای انجام گرفته توسط برمن و بروئو [15] روی یک قاب مهاربندی شده‌ی واگرای یک طبقه با مقیاس بزرگ، ۶ آزمایش چرخه‌ای انجام گرفته توسط اوکازاکی و انگلهارت [11] روی لینک‌های میانی، و ۲ آزمایش چرخه‌ای انجام گرفته توسط انگلهارت و پوپوف [16] روی لینک‌های بلند، استفاده شده است. رفتار غیرخطی فنرهای برشی به وسیله ماده هیسترتیک Giuffrè-Menegotto-Pinto یا همان ماده Steel02 در برنامه OpenSees مدل شده است. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی این پارامترها برای ماده Steel02 به دست آمده‌اند:  $E_0 = V_n = 0.6F_y A_s$ ،  $V_y = 1.3R_y V_n$ ،  $CR1 = 0.915$ ،  $R_0 = 17.0$ ،  $b = 0.002$ ،  $2GA_s/e$ ،  $CR2 = 0.05$ ،  $a_1 = a_3 = 0.0$ ،  $a_2 = a_4 = 1.0$  که در این روابط  $F_y$  تنش تسلیم مصالح لینک،  $R_y$  نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به کمترین تنش تسلیم منظور شده،  $V_n$  مقاومت برشی اسمی لینک،  $E_0$  سختی برشی الاستیک مماسی اولیه،  $R_0$ ،  $CR1$  و  $CR2$  پارامترهای کنترل تبدیل بین شاخه‌های الاستیک و پلاستیک،  $a_1$  و  $a_3$  به ترتیب افزایش پوش تسلیم فشاری و کششی،  $a_2$  و  $a_4$  پارامترهای سخت شوندگی ایزوتروپیک و  $b$  نسبت سخت شوندگی کرنشی است. رفتار غیر خطی فنرهای چرخشی با استفاده از مدل اصلاح شده Ibarra-Medina-Krawinkler با رفتار هیسترتیک دو خطی (Bilin material) مدل شده است و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی این پارامترها برای آن به دست آمده‌اند:

$$K_0 = \frac{60EI}{e} \quad (1)$$

عملی با گامهای ۰/۰۱ رادیان، با دو چرخه بارگذاری در هر افزایش چرخش، دارد. پروتکل بارگذاری severe مانند پروتکل بارگذاری old-AISC است با این تفاوت که به جای دو چرخه بارگذاری به چهار چرخه بارگذاری در هر افزایش چرخش نیاز دارد. پروتکل بارگذاری revised نیاز دارد که پس از پایان بارگذاری چرخه‌ای در چرخش لینک ۰/۰۵ رادیان، چرخش لینک در گامهای ۰/۰۲ رادیان، با یک چرخه بارگذاری در هر افزایش چرخه، افزایش داده شود. در آخر، پروتکل بارگذاری random به صورت تصادفی ایجاد شده بود تا چرخش‌های بزرگ را دو جهت بارگذاری در خلال چرخه‌های بارگذاری اولیه اعمال کند. مدل OpenSees نمونه‌های 4A، 4A-RLP و 9-RLP در شکل (۴) نشان داده شده است. نمونه‌های 4A و 4A-RLP دارای تیر پیوند کوتاه و مدل 9-RLP دارای تیر پیوند میانی است.

شکل ۴. مدل OpenSees برای نمونه‌های 4A، 4A-RLP و 9-RLP

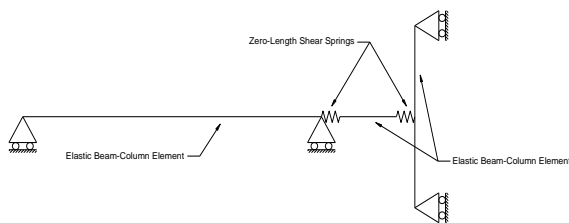


Fig. 4. OpenSees model for specimens 4A, 4A-RLP, and 9-RLP

نتایج عددی برای نمونه‌های 4A، 4A-RLP و 9-RLP با نتایج آزمایشگاهی به ترتیب در شکل‌های (۵ و ۶) مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌های (۵ و ۶) نشان داده شده است نتایج عددی برازش بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند و مدل پیشنهادی نه تنها مقادیر بیشینه، بلکه مقادیر میانی نیروی برشی و تغییر شکل‌ها را نیز به خوبی پیش بینی کرده است. در نمونه‌های 4A و 4A-RLP تنها فنرهای برشی دچار تسلیم شدند و فنرهای چرخشی الاستیک باقی ماندند. در نمونه 9-RLP هم فنرهای برشی و هم فنرهای چرخشی دچار تسلیم شدند.

منفی بارگذاری،  $\theta_u^+$  و  $\theta_u^-$  به ترتیب ظرفیت چرخش نهایی برای جهت مثبت و منفی بارگذاری،  $D^+$  و  $D^-$  به ترتیب نرخ زوال چرخه‌ای برای جهت مثبت و منفی بارگذاری است.

## ۴- مدلسازی عددی و راستی آزمایی

### ۴-۱- آزمایش اول

اوکازاکی و انگلهارت [11] ۱۱ لینک کوتاه و ۶ لینک میانی با یک انتهای متصل به ستون را آزمایش کردند. برای ساخت نمونه‌ها چهار مقطع بال پهن متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. همه نمونه‌ها از فولاد ASTM A992 با  $F_y = 345 \text{ MPa}$ ،  $R_y = 1.1$  و  $E = 200 \text{ GPa}$  و  $G = 77 \text{ GPa}$  ساخته شدند. جزییات کامل و ابعاد دستگاه آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۳. جزییات و ابعاد دستگاه آزمایش [11]

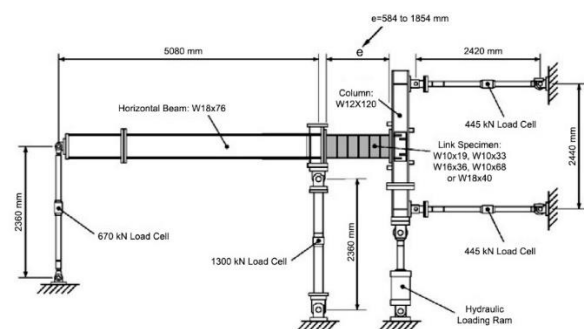


Fig. 3. Details and dimensions of test setup [11]

از چهار پروتکل بارگذاری چرخه‌ای متفاوت در آزمایش‌ها استفاده شده است. این چهار پروتکل severe، old-AISC، revised و random نام گذاری شده‌اند. هر پروتکل بارگذاری زاویه چرخش لینک  $\gamma$ ، که به صورت تقسیم جابه‌جایی نسبی دو انتهای لینک تقسیم بر لینک محاسبه می‌شود، را کنترل می‌کند. پس از چندین چرخه الاستیک اولیه پروتکل بارگذاری old-AISC نیاز به افزایش چرخش لینک

۴-۲- آزمایش دوم

کسای و پوپوف [14] لینک کوتاه با یک انتهای متصل به ستون را آزمایش کردند. همه لینکها دارای مقطع  $W8 \times 10$  بودند. همه نمونهها از فولاد ASTM A36 با  $F_y = 250 \text{ MPa}$ ،  $R_y = 1.5$  و  $E = 200 \text{ GPa}$  و  $G = 75 \text{ GPa}$  ساخته شدند. دستگاه آزمایش در شکل (۷) نشان داده شده است. مدل OpenSees دستگاه آزمایش در شکل (۸) نشان داده شده است.

شکل ۷. دستگاه آزمایش [14]

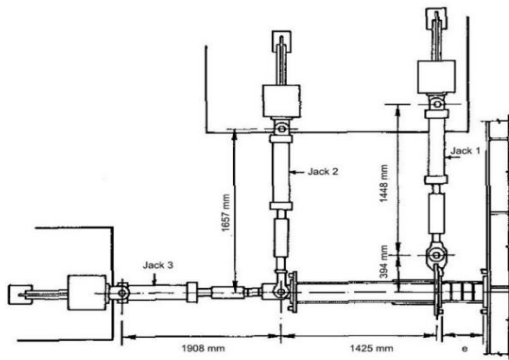


Fig. 7. Experimental setup [14]

شکل ۸. مدل OpenSees دستگاه آزمایش

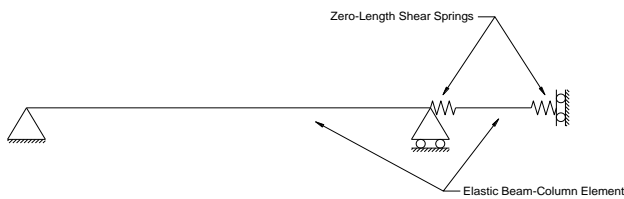
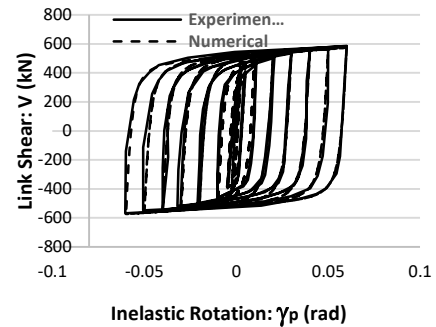


Fig. 8. OpenSees model for test setup

نتایج عددی نمونههای ۵ و ۷ در شکل (۹) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدهاند. همان گونه که در شکل (۹) نشان داده شده است نتایج عددی برآزش بسیار خوبی با دادههای آزمایشگاهی دارند و مدل پیشنهادی نه تنها مقادیر پیشینه، بلکه مقادیر میانی نیروی برشی و تغییر شکلها را نیز به خوبی پیش بینی کرده است. در همه نمونهها تنها فنرهای برشی دچار تسلیم شدند و فنرهای چرخشی الاستیک باقی ماندند.

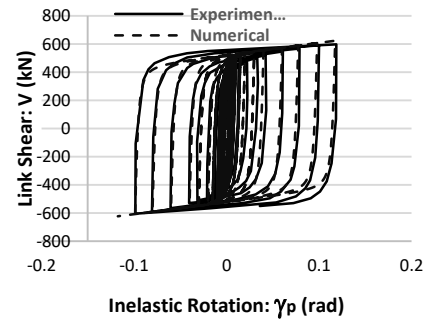
شکل ۵. مقایسه منحنیهای هیستریزیس آزمایشگاهی و عددی نمونههای 4A و 4A-RLP با استفاده از مدل پیشنهادی

(الف) نمونه 4A



(a) Specimen 4A

(ب) نمونه 4A-RLP



(b) Specimen 4A-RLP

Fig. 5. Comparison of experimental and analytical hysteresis curves for specimens 4A and 4A-RLP using the proposed model

شکل ۶. مقایسه منحنیهای هیستریزیس آزمایشگاهی و عددی نمونه 9-RLP با استفاده از مدل پیشنهادی

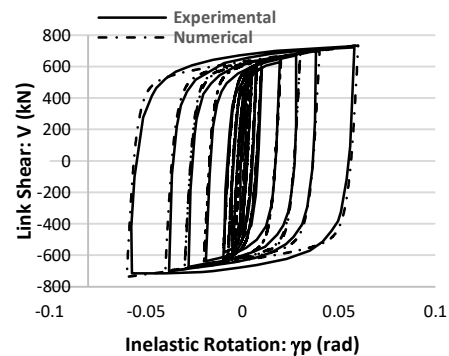
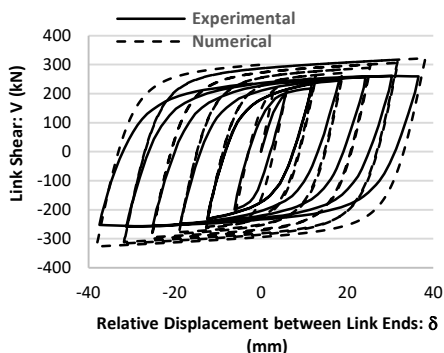


Fig. 6. Comparison of experimental and analytical hysteresis curves for specimen 9-RLP using the proposed model

شکل ۱۰. مقایسه منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی و عددی نمونه‌های

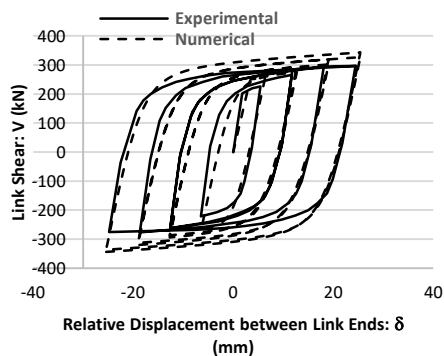
۵ و ۷ با استفاده از مدل پیشنهادی کوبوویچ و همکارانش [8]

(الف) نمونه‌ی ۵



a) Specimen 5

(ب) نمونه‌ی ۷



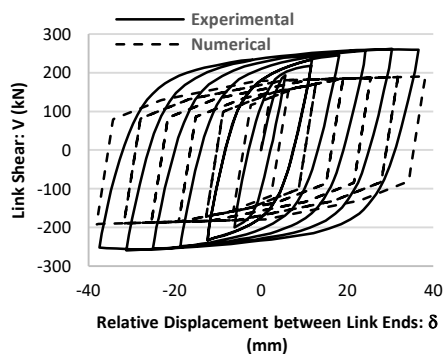
b) Specimen 7

**Fig. 10.** Comparison of experimental and analytical hysteresis curves for specimens 5 and 7 using the proposed model by Koboovic et al. [8].

شکل ۱۱. مقایسه منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی و عددی نمونه‌های

۵ و ۷ با استفاده از مدل پیشنهادی ریچاردز و یوانگ [5]

(الف) نمونه‌ی ۵

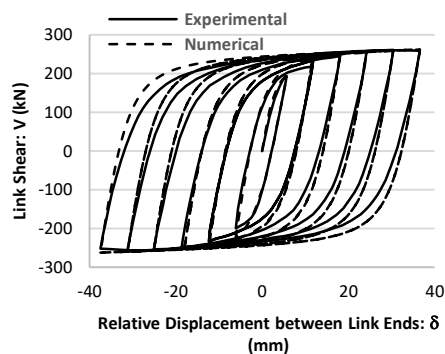


a) Specimen 5

شکل ۹. مقایسه منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی و عددی نمونه‌های

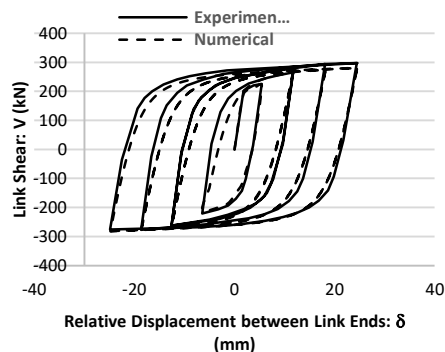
۵ و ۷ با استفاده از مدل پیشنهادی

(الف) نمونه‌ی ۵



a) Specimen 5

(ب) نمونه‌ی ۷



b) Specimen 7

**Fig. 9.** Comparison of experimental and analytical hysteresis curves for specimens 5 and 7 using the proposed model

نتایج عددی به دست آمده با استفاده از مدل کوبوویچ و همکارانش [8] در شکل (۱۰) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است مقادیر بیشینه نیروی برشی پیش بینی شده برای نمونه‌های ۵ و ۷ به ترتیب ۲۴ و ۱۵ درصد بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی است. نتایج عددی به دست آمده با استفاده از مدل ریچاردز و یوانگ [5] در شکل (۱۱) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است مقادیر بیشینه نیروی برشی پیش بینی شده برای نمونه‌های ۵ و ۷ به ترتیب ۲۶ و ۳۶ درصد کمتر از مقادیر آزمایشگاهی است.

شکل ۱۳. مدل OpenSees دستگاه آزمایش

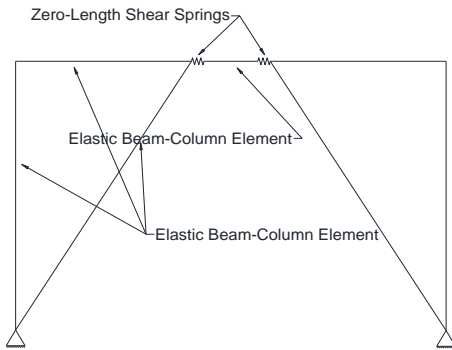


Fig. 13. OpenSees model for test setup

نتایج عددی در شکل (۱۴) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. همان گونه که در شکل (۱۴) نشان داده شده است نتایج عددی برازش بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند و مدل پیشنهادی نه تنها مقادیر بیشینه، بلکه مقادیر میانی نیروی برشی و تغییر شکل‌ها را نیز به خوبی پیش بینی کرده است. این برازش خوب نشان دهنده این موضوع است که مدل پیشنهادی قادر به پیش بینی رفتار غیرالاستیک لینک به تنهایی و قاب مهاربندی شده و اگر شامل تیر، ستون، مهاربند و لینک است. همچنین تنها فنرهای برشی دچار تسلیم شدند و فنرهای چرخشی الاستیک باقی ماندند.

شکل ۱۴. مقایسه منحنی‌های هیستریزاس آزمایشگاهی و عددی با استفاده از مدل پیشنهادی

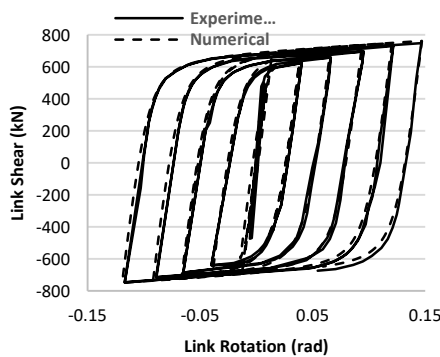
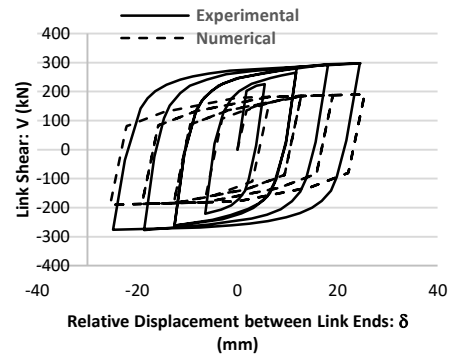


Fig. 14. Comparison of experimental and analytical hysteresis curves using the proposed model

نتایج عددی به دست آمده با استفاده از مدل کوبوویچ و همکارانش [8] و ریچاردز و یوانگ [5] به ترتیب در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. همان گونه که در شکل‌های (۱۵)

(ب) نمونه‌ی ۷



b) Specimen 7

Fig. 11. Comparison of experimental and analytical hysteresis curves for specimens 5 and 7 using the proposed model by Richards and Uang [5].

### ۳-۴- آزمایش سوم

برمن و برونو [15] یک قاب مهاربندی شده و اگر با مقیاس بزرگ با لینک کوتاه (برشی) را آزمایش کردند. برای جلوگیری از کماتش جانبی پیچشی از لینک با مقطع قوطی استفاده شد. دستگاه آزمایش و مدل OpenSees به ترتیب در شکل‌های (۱۲ و ۱۳) نشان داده شده‌اند. نمونه‌ی آزمایشگاهی با استفاده از فولاد ASTM A572 Gr. 50 با  $F_y = 345 \text{ MPa}$  و  $R_y = 1.1$  و  $E = 200 \text{ GPa}$  و  $G = 77 \text{ GPa}$  ساخته شد. ابعاد مقطع لینک بدین شرح است:  $d = b = 150 \text{ mm}$  و  $t_w = 8 \text{ mm}$ ،  $t_f = 16 \text{ mm}$  و  $e = 460 \text{ mm}$  مقطع مهاربندها HSS  $178 \times 178 \times 12.7$  و مقطع ستون‌ها W  $310 \times 143$  است و همه اتصالات صلب هستند.

شکل ۱۲. دستگاه آزمایش [15]

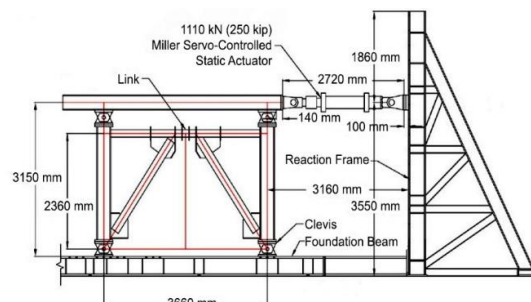


Fig. 12. Test setup [15]



$G =$  و  $E = 200 \text{ GPa}$  ،  $R_y = 1.5$  ،  $250 \text{ MPa}$  ،  $75 \text{ GPa}$  ساخته شدند. دستگاه آزمایش در شکل (۱۷) نشان داده شده است. مدل OpenSees دستگاه آزمایش برای نمونه ۲ در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

شکل ۱۷. جزئیات دستگاه آزمایش [16]

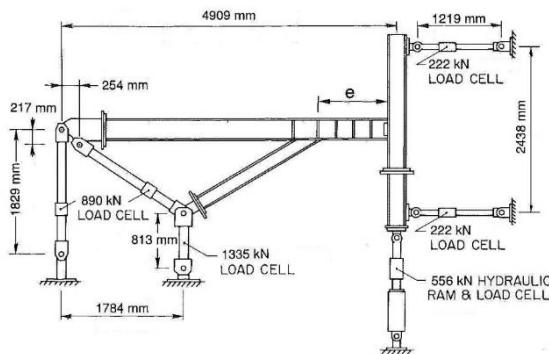


Fig. 17. Detail of test setup [16]

شکل ۱۸. مدل OpenSees دستگاه آزمایش

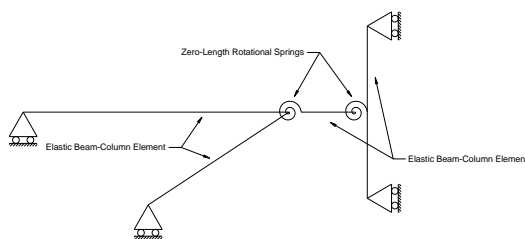


Fig. 18. OpenSees model for test setup

نتایج عددی نمونه‌ی ۲ در شکل (۱۹) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. همان گونه که در شکل (۱۹) نشان داده شده است نتایج عددی برازش بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند و مدل پیشنهادی نه تنها مقادیر حدکثر، بلکه مقادیر میانی نیروی برشی و تغییر شکل‌ها را نیز به خوبی پیش بینی کرده است. نتایج عددی به دست آمده با استفاده از مدل لیگنوس و کراوینکلر [13] برای نمونه‌ی ۲ در شکل (۲۰) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان گونه که در شکل (۲۰) نشان داده شده است مقادیر حداکثر نیروی برشی پیش بینی شده ۴۰ درصد کمتر از مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد.

(۱۶) نشان داده شده است مقادیر بیشینه نیروی برشی لینک پیش بینی شده با استفاده از مدل کوبویچ و همکارانش [8] و ریچاردز و یوانگ [5] به ترتیب ۲۳ و ۵ درصد بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی است.

شکل ۱۵. مقایسه منحنی‌های هیستریزس آزمایشگاهی و عددی با استفاده

از مدل پیشنهادی کوبویچ و همکارانش [8]

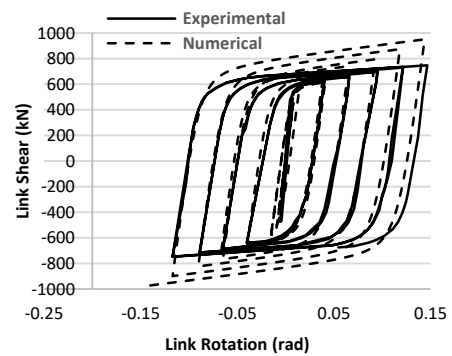


Fig. 15. Comparison of experimental and analytical hysteresis curves using the proposed model by Kobojevic et al. [8]

شکل ۱۶. مقایسه منحنی‌های هیستریزس آزمایشگاهی و عددی با

استفاده از مدل پیشنهادی ریچاردز و یوانگ [5]

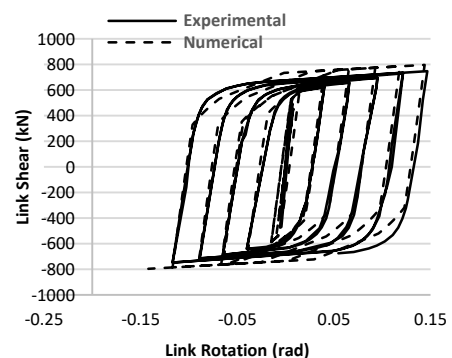


Fig. 16. Comparison of experimental and analytical hysteresis curves using the proposed model by Richards and Uang [5]

#### ۴-۴- آزمایش چهارم

انگلهارت و پوپوف [16] لینک بلند با یک انتهای متصل به ستون را آزمایش کردند. همه لینک‌ها دارای مقطع W12x16 بودند. همه نمونه‌ها از فولاد ASTM A36 با  $F_y =$

[7] ارائه کردند، بدون توجه به این نکته که ابعاد مقاطع استفاده شده در آزمایش با ابعاد مقاطع استاندارد متفاوت است. آنها برای جبران این اختلاف بین ابعاد مقاطع مورد استفاده و مقاطع استاندارد، بر خلاف آنچه که در متن مقاله به آن اشاره کردند، نسبت سخت شوندگی کرنشی را برابر 0.0045 قرار دارند. به همین دلیل مدل پیشنهادی آنها برای سایر آزمایشها انجام گرفته نتیجه خوبی به دست نمی‌آورد و مقادیر بیشینه نیروی برشی پیش‌بینی شده بین ۱۵ تا ۲۴ درصد بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی است [12]. طبق پژوهش‌های نگارنده در حال حاضر همه مدل‌های تحلیلی برای لینک‌های کوتاه (برشی) ارائه شده‌اند و مدل تحلیلی مناسبی برای لینک‌های میانی و بلند وجود ندارد. لیگنوس و کراوینکلر [13] یک مدل زوال برای اجزای فولادی قاب‌های خمشی ارائه کرده‌اند. در این پژوهش نشان داده شده است که بیشینه نیروی برشی به دست آمده با استفاده از مدل لیگنوس و کراوینکلر [13] برای قاب‌های خمشی فولادی ۴۰ درصد کمتر از مقادیر آزمایشگاهی است. در این پژوهش مدل تحلیلی ارائه شده توسط اشتری و عرفانی [12]، به منظور ارائه مدلی تحلیلی که می‌تواند به خوبی مقادیر بیشینه و میانی نیروی برشی و تغییر شکل را برای انواع لینک‌ها شامل لینک کوتاه، میانی و بلند پیش‌بینی کند، گسترش داده شده است. به این منظور فنرهای پیچشی با طول صفر به مدل پیشین اضافه شده است. از برنامه OpenSees برای ساخت مدل‌های عددی استفاده شده است. رفتار غیرخطی فنرهای برشی به وسیله ماده هیستریتیک Giuffrè-Menegotto-OpenSees یا همان ماده Steel02 در برنامه‌ی OpenSees مدل شده است. رفتار غیر خطی فنرهای پیچشی با استفاده از مدل اصلاح شده Ibarra-Medina-Krawinkler با رفتار هیستریتیک دو خطی (Bilin material) مدل شده است. برای کالیبره کردن پارمترهای مدل از ۱۱ آزمایش چرخه‌ای انجام گرفته توسط اوکازاکی و انگلهارت [11] روی لینک‌های کوتاه، ۷ آزمایش چرخه‌ای انجام گرفته توسط کاسای و پوپوف [14] روی لینک‌های کوتاه، ۱ آزمایش چرخه‌ای انجام گرفته توسط برمن و برونو [15] روی یک قاب مهاربندی شده واگرای یک طبقه با مقیاس بزرگ، ۶ آزمایش چرخه‌ای

شکل ۱۹. مقایسه منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی و عددی نمونه ۲ با استفاده از مدل پیشنهادی

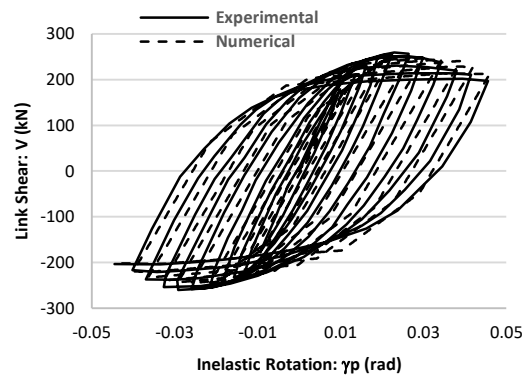


Fig. 19. Comparison of experimental and analytical hysteresis curves for specimen 2 using the proposed model

شکل ۲۰. مقایسه منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی و عددی نمونه ۲ با استفاده از مدل پیشنهادی لیگنوس و کراوینکلر [13]

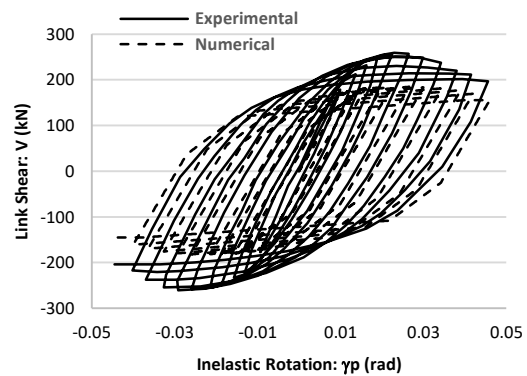


Fig. 20. Comparison of experimental and analytical hysteresis curves for specimen 2 using the proposed model by Lignos and Krawinkler [13]

## ۵- تفسیر نتایج

در مقالات گفته شده است که مدل‌های تحلیلی موجود برای لینک‌های کوتاه معمولاً خیلی خوب بیشترین مقادیر نیروی برشی و تغییر شکل را پیش‌بینی می‌کنند، ولی مقادیر میانی را دست پایین پیش‌بینی می‌کنند. اشتری و عرفانی [12] نشان داده‌اند که مدل‌های تحلیلی موجود برای لینک‌های کوتاه مقادیر بیشینه نیروی برشی و تغییر شکل را نیز به خوبی پیش‌بینی نمی‌کنند. کوبوویچ و همکارانش [8] یک مدل تحلیلی بر پایه آزمایش‌های انجام گرفته به وسیله اوکازاکی و انگلهارت

[6] Ohsaki M. & Nakajima T. 2012 Optimization of link member of eccentrically braced frames for maximum energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*, **75** (2012) 38-44.

[7] Okazaki T., Engelhardt M.D., Hong J.K., Uang C.M. & Drolia A. 2014 Improved Link-to-Column Connections for Steel Eccentrically Braced Frames. *Journal of Structural Engineering*, **141**(8), 04014201.

[8] Kobojevic S., Rozon J. & Tremblay R. 2012 Seismic performance of low-to-moderate height eccentrically braced steel frames designed for North American seismic conditions. *Journal of Structural Engineering*, **138**(12), 1465-1476.

[9] Ricles J.M. & Popov E.P. 1994 Inelastic link element for EBF seismic analysis. *Journal of Structural Engineering*, **120**(2), 441-463.

[10] Ramadan T. & Ghobarah A. 1995 Analytical model for shear-link behavior. *Journal of Structural Engineering*, **121**(11), 1574-1580.

[11] Okazaki T. & Engelhardt M.D. 2007 Cyclic loading behavior of EBF links constructed of ASTM A992 steel. *Journal of Constructional Steel Research*, **63**(6), 751-765.

[12] Ashtari A. & Erfani S. 2016 An analytical model for shear links in eccentrically braced frames. *Steel and Composite Structures*, **22**(3), 627-645.

[13] Lignos D.G. & Krawinkler H. 2010 Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading. *Journal of Structural Engineering*, **137**(11), 1291-1302.

[14] Kasai K. & Popov E.P. 1986 General behavior of WF steel shear link beams. *Journal of Structural Engineering*, **112**(2), 362-282.

[15] Berman J.W. & Bruneau M. 2007 Experimental and analytical investigation of tubular links for eccentrically braced frames. *Engineering Structures*, **29**(8), 1929-1938.

[16] Engelhardt M.D. & Popov E.P. 1992 Experimental performance of long links in eccentrically braced frames. *Journal of Structural Engineering*, **118**(11), 3067-3088.

انجام گرفته توسط اوکازاکی و انگلهارت [11] روی لینکهای میانی، و ۲ آزمایش چرخه‌ای انجام گرفته توسط انگلهارت و پوپوف [15] روی لینک‌های بلند، استفاده شده است. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی با منحنی‌های هیستریزیس به دست آمده با استفاده از مدل تحلیلی پیشنهادی، دقت مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. استفاده از مدل پیشنهادی برای انجام تحلیل‌های غیرالاستیک روی قابهای مهاربندی شده واگرا توصیه می‌شود.

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش مدل‌های تحلیلی پیشین، به منظور ارائه مدلی تحلیلی که می‌تواند به خوبی مقادیر بیشینه و میانی نیروی برشی و تغییر شکل را برای انواع لینک‌ها شامل لینک کوتاه، میانی و بلند پیش‌بینی کند، گسترش داده شده است. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی با منحنی‌های هیستریزیس به دست آمده با استفاده از مدل تحلیلی پیشنهادی، دقت مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

## References

## ۷- مراجع

[1] Kanvinde A.M., Marshall K.S., Grilli D.A. & Bombia G. 2014 Forensic Analysis of Link Fractures in Eccentrically Braced Frames during the February 2011 Christchurch Earthquake: Testing and Simulation. *Journal of Structural Engineering*, **141**(5), 04014146.

[2] Wang F., Su M., Hong M., Guo Y. & Li S. 2016 Cyclic behavior of Y-shaped eccentrically braced frames fabricated with high-strength steel composite. *Journal of Constructional Steel Research*, **120**, 176-187.

[3] Xu X., Zhang Y. & Lou Y. 2016 Self-centering eccentrically braced frames using shape memory alloy bolts and post-tensioned tendons. *Journal of Constructional Steel Research*, **125**, 190-204.

[4] AISC 341 2016 Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois, USA.

[5] Richards P.W. & Uang C.M. 2006 Testing protocol for short links in eccentrically braced frames. *Journal of Structural Engineering*, **132**(8), 1183-1191.

# A unique analytical model for short, intermediate and long links in eccentrically braced frames

Ashatari<sup>1</sup>, S. Erfani<sup>2\*</sup> and M. Nekooei<sup>3</sup>

- 1- Ph.D. student of structural engineering, Civil engineering department, Science and research branch, Islamic azad university, Tehran, Iran
- 2- Professor Assistant, Civil and environmental engineering faculty, Amirkabir industrial university, Tehran, Iran
- 3- Professor Assistant, Civil engineering department, Science and research branch, Islamic azad university, Tehran, Iran

sderfani@aut.ac.ir

## Abstract

The purpose of this study is to develop the previous proposed analytical model by the first and second authors for short links, so it can be used for all kinds of links including short, intermediate, and long links. Eccentrically braced frames (EBF) offer high lateral stiffness because of their braced configuration while also providing high ductility and energy dissipation. They are widely used as a lateral-force resisting system for multi-story buildings located in seismic areas. The key components of the EBF system include columns, collector beams, braces and active links. The link is defined by a horizontal eccentricity between the intersection points of the two brace centerlines with the beam centerline (or between the intersection points of the brace and column centerlines with the beam centerline for links adjacent to columns). The active links are designed to provide ductility and energy dissipation through yielding under design basis earthquakes, while all other structural members are designed to be stronger than the links and stay in elastic range. The link length is often normalized with respect to the ratio between the plastic moment capacity and the plastic shear capacity of the link section. This normalized link length is called the length ratio. Links with a length ratio less than 1.6, called short or shear links, yield primarily in shear and can be designed for 0.08 radian inelastic rotation. Links with length ratio greater than 2.6, called long links, form flexural hinges at either end and can be designed for 0.02 radian inelastic rotation. Links with length ratios between 1.6 and 2.6, called intermediate links, experience a combination of flexural and shear yielding and can be designed for inelastic rotations between 0.02 and 0.08 radian depending on the length ratio. Sufficient analytical model which can accurately predict the inelastic performance of the links is needed to perform reliable nonlinear analyses of EBFs. Analytical models that are used to study the inelastic seismic response of the EBFs usually reflect the anticipated behavior of the different frame elements. Links are modeled as inelastic elements with concentrated end flexural and shear hinges. Beams outside of the link, braces, and columns are typically modeled as elastic beam-column elements, because no inelastic behavior is anticipated in design. It is said in the literature that available analytical models for short links generally predict very well the maximum shear forces and deformations from experiments on short links, but may underestimate the intermediary values. In this study it is shown that available analytical models do not predict very well the maximum shear forces and deformations too. To the authors' knowledge, currently there are only suitable analytical models for short links. In this study an analytical model which can accurately predict both maximum and intermediary values of forces and deformations for short, intermediate, and long links, is proposed. The parameters of model are established based on test results from several experiments on links and EBFs. Comparison of available test results with the hysteresis curves obtained using the proposed analytical model established the accuracy of the model. The proposed model is recommended to be used to perform inelastic analyses of EBFs.

**Keywords:** Eccentrically braced frames, Short link, Intermediate link, Long link, Analytical model