

## میرایی دیوار برشی فولادی در طراحی مستقیم براساس تغییر مکان

بهرام رضایی بنا

### چکیده

روش طراحی مستقیم براساس تغییر مکان یک روش طراحی می باشد که دارای الگوریتمی خیلی ساده جهت طراحی اعضا دارد و در سالهای اخیر محققین زیادی این روش را برای استفاده در طراحی سازه های مختلف توسعه دادند. این روش ابتدا برای سازه های بتنی و پلها بوجود آمد ولی بعدا برای سازه های فولادی نیز توسعه داده شد. قابهای خمشی، مهاربندهای درون محور، مهاربندهای برون محور و مهاربندهای کمانش تاب از جمله سیستمهایی هستند که با این روش طراحی شده اند. لیکن هنوز دیوارهای برشی فولادی مورد مطالعه قرار نگرفته اند. مهمترین پارامترهای طراحی مستقیم براساس تغییر مکان، تغییر مکان تسلیم و میرایی چرخه ای می باشند که در این مطالعه برای دیوارهای برشی فولادی تعیین می شود. برای این کار سیستم دیوار برشی فولادی شامل قاب خمشی فولادی و ورق فولادی انتخاب می شود. برای اینکه تاثیر عوامل مختلف بر روی پارامترهای طراحی مشخص شود دو نوع قاب با ابعاد مختلف و ورقهایی به ضخامتهای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی متر مورد ارزیابی قرار می گیرد. با کمک آنالیزهای استاتیکی چرخه ای عوامل موثر بر روی پارامترهای طراحی تعیین و روابط ساده جهت مقاصد طراحی پیشنهاد می گردد. همچنین نتایج نشان دادند که تغییر مکان تسلیم و میرایی چرخه ای عمدتا به ارتفاع قاب، ضخامت ورق و جنس مصالح بستگی دارد.

کلمات کلیدی: روش طراحی مستقیم بر اساس تغییر مکان، میرایی چرخه ای، دیوار برشی فولادی، تغییر مکان تسلیم

\*نویسنده مسئول: بهرام رضایی بنا

پست الکترونیکی: Bahram.deprem@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰

پریستلی مفهوم طراحی مستقیم براساس تغییرمکان<sup>۱</sup> DDBD را با استفاده از مفهوم سازه جایگزین برای اولین بار ارائه داد که در آن پرپود اولیه و مقاومت اعضا آخرین مرحله نتایج آنالیز بود [۱]. مطابق شکل ۱، در این روش، طراحی به این صورت است که با در اختیار داشتن تغییرمکان طراحی در بیشینه پاسخ سازه‌ی معادل یک درجه آزادی و فرض شکل‌پذیری مشخص بر آن، میرایی چرخه‌ای از رابطه‌هایی بدست می‌آید سپس با بکارگیری طیف تغییرمکان برای میرایی چرخه‌ای، پرپود سازه یک درجه آزادی  $T_e$  بدست آمده و با استفاده از جرم معادل یک درجه آزادی  $m_e$  سختی سازه از رابطه (۱) حاصل می‌گردد. با ضرب این سختی در تغییرمکان طراحی، برش پایه طراحی بدست می‌آید (رابطه ۲).

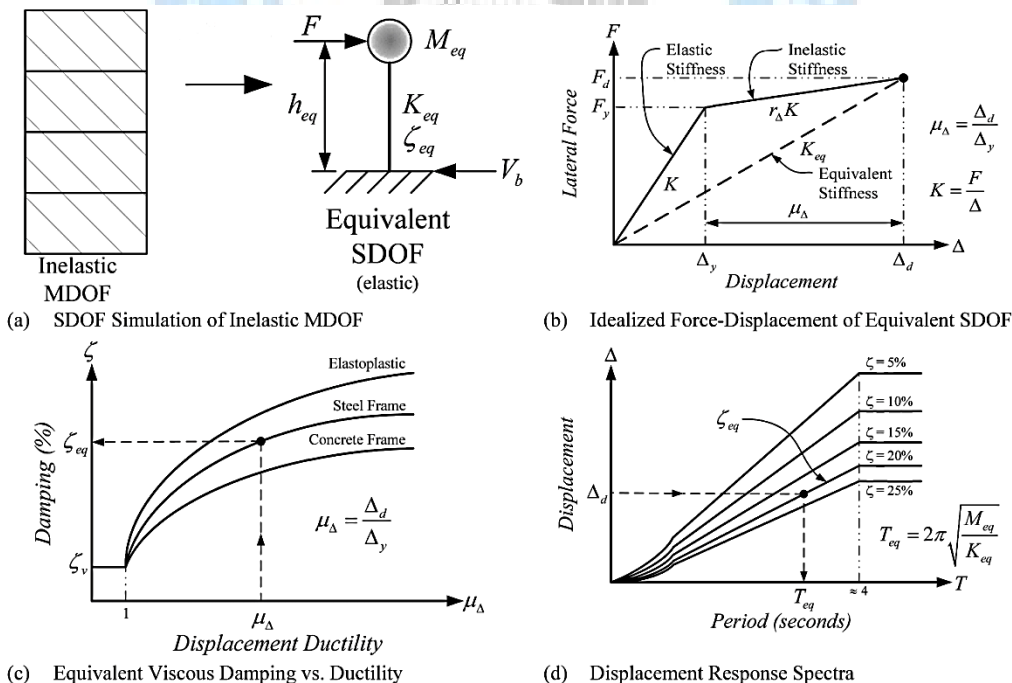
$$K_e = 4\pi^2 \frac{m_e}{T_e^2} \quad (1)$$

$$F = V_{Base} = K_e \Delta_d \quad (2)$$

در روابط فوق،  $K_e$  سختی موثر،  $m_e$  جرم موثر،  $T_e$  پرپود موثر و  $\Delta_d$  تغییرمکان هدف می‌باشند. روش DDBD در ابتدا برای سازه‌های یک درجه آزادی مانند پله‌های بتنی استفاده شد [۲] و در ادامه به صورت فرمول بندی شده برای سازه‌های بتن آرمه به کار برده شد [۳]. یکی از مهمترین پارامترهای DDBD میرایی چرخه‌ای می‌باشد. به طور سنتی میرایی چرخه‌ای با استفاده از روش ژاکوبسن<sup>۲</sup> بدست می‌آید [۴]. در این روش مطابق رابطه (۳)، میرایی از برابری انرژی جذب شده توسط دو سیستم غیرالاستیک و سیستم معادل تحت بارگذاری چرخه‌ای حالت پایا در یک تغییرمکان معلوم محاسبه می‌شود.

$$\xi_{hys} = \frac{A_h}{2\pi F_m \Delta_m} \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $A_h$  مساحت کامل یک دوره پاسخ نیرو-تغییرمکان سیستم غیرخطی،  $F_m$  نیرو حداکثر و  $\Delta_m$  تغییرمکان حداکثر در سیستم غیر خطی و سیستم الاستیک معادل می‌باشد.



شکل ۱: مراحل طراحی مستقیم براساس تغییرمکان.

<sup>1</sup> Direct Displacement Based-Design

<sup>2</sup> Jacobsen

دوایری<sup>۳</sup> و همکاران با کالیبره کردن میرایی بدست آمده از روش ژاکوبسن از طریق آنالیزهای تاریخچه زمانی غیر خطی روابطی برای محاسبه میرایی چرخه‌ای براساس شکل‌پذیری، پیرو و مدلهای چرخه‌ای پیشنهاد دادند. ایشان همچنین اشاره کردند که همبستگی میرایی به پیرو، برای محدوده پیرو بزرگتر از یک ثانیه می‌تواند ناچیز باشد [۵]. پرستلی<sup>۴</sup> براساس این تحقیق و با فرض اینکه پیرو موثر اکثر سازه‌ها بزرگتر از یک می‌باشد رابطه استاندارد بصورت رابطه (۴) بدون دخالت پیرو ارائه داد [۶].

$$\xi = 0.05 + C \frac{\mu - 1}{\pi \mu} \quad (4)$$

در رابطه فوق  $\mu$  شکل‌پذیری و  $C$  ضریبی است که براساس مدلهای چرخه‌ای تعیین می‌شود که برای سازه‌های فولادی مقدار  $0.577$  تعیین شده است. با توجه به اینکه رفتار چرخه‌ای و لرزه‌ای و مکانیسم جذب انرژی سیستمهای مختلف فولادی نظیر دیوار برشی، قاب خمشی، قاب مهاربند همگرا، قاب مهاربند واگرا و ... با یکدیگر تفاوت زیادی دارند، بنابراین استفاده از یک رابطه برای همه آنها نمی‌تواند مناسب باشد. هریس<sup>۵</sup> مطالعات دقیقتری بروی قابهای خمشی فولادی انجام داد که در آن براساس روشهای مختلف، میرایی چرخه‌ای برای این نوع سیستمهای سازه‌ای ارائه داد [۷]. ویجی سوندارا<sup>۶</sup> و همکاران با کمک روش پیشنهادی دوایری میرایی بدست آمده از روش ژاکوبسن را برای قابهای مهاربندی شده درون محور کالیبره کردند و رابطه میرایی را براساس نسبت لاغری و شکل‌پذیری پیشنهاد دادند [۸]. یحیایی و رضایی بنا جهت سرعت بخشیدن به عملیات کالیبره کردن میرایی ژاکوبسن با آنالیزهای تاریخچه زمانی غیرخطی، روش جرم بازبینی شده را پیشنهاد دادند و با کمک این روش، میرایی چرخه‌ای قابهای مهاربندی شده همگرای ویژه را ارائه کردند [۹]. ایشان همچنین در مطالعه دیگری، DDBD را جهت طراحی قابهای مهاربندی شده همگرای ویژه در مناطق نزدیک گسل توسعه دادند و محاسبه میرایی چرخه‌ای را از الگوریتم گام به گام DDBD حذف کرده و به جای آن مستقیماً محاسبه پیرو موثر را پیشنهاد دادند [۱۰]. سولیان<sup>۷</sup> روش DDBD را برای قابهای مهاربندی شده واگرا بدون استفاده از میرایی چرخه‌ای و با کمک ضریب کاهش نیرو توسعه دادند [۱۱].

با توجه به اینکه سیستمهای مقاوم لرزه‌ای فولادی نظیر قاب خمشی، مهاربند همگرا و واگرا در تحقیقات قبلی جهت استفاده در DDBD مورد ارزیابی قرار گرفته است، در این مطالعه DDBD برای دیوار برشی فولادی توسعه می‌یابد. برای این منظور دو قاب با ابعاد مختلف و ضخامت‌های ورق متفاوت (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر) انتخاب و براساس AISC 360-05 طراحی می‌گردند [۱۲]. با کمک نرم افزار آباکوس قابهای انتخابی مدل‌سازی و تحت آنالیز چرخه‌ای قرار می‌گیرند [۱۳]. همچنین به روش PFI<sup>۸</sup> مقادیر تغییرمکان تسلیم و نهایی محاسبه و با مقادیر حاصل از آنالیز چرخه‌ای مقایسه و جهت کاربرد در DDBD اصلاح می‌گردند [۱۴]. در نهایت روابطی برای تعیین میرایی چرخه‌ای پیشنهاد می‌شود.

## ۲- معرفی ساختمانهای مورد مطالعه

دیوار برشی فولادی یکی از سیستمهای مقاوم لرزه ای می‌باشد که در سالهای اخیر به علت جذب انرژی بالا، مشخصات چرخه‌ای پایدار و سختی جانبی زیاد مورد توجه محققین قرار گرفته است. این سیستم از یک ورق فولادی متصل به اعضای لبه‌ای (تیر وستون) تشکیل شده است. رفتار این نوع سیستم بستگی زیادی به ضخامت ورق دارد. ورقهای ضخیم از کمانش خارج از صفحه جلوگیری می‌کنند در صورتیکه ورقهای نازک مقاومت پس از کمانش و شکل‌پذیری قابل توجهی نشان می‌دهند [۱۵]. مقاومت پس از کمانش نتیجه یک مکانیسمی است که به عمل میدان کششی معروف است برای تشکیل میدان کششی نیاز به تیر و ستون بسیار قوی وجود دارد. که باعث می‌شود نیروهای محوری بسیار زیادی به ستونها اعمال شود. فلسفه طراحی این نوع سیستمها، تشکیل میدان کششی در ورق می‌باشد که در نتیجه سعی می‌شود اعضای لبه‌ای طوری طراحی شوند که در اثر مقاومت حداکثر مورد انتظار ورق، تیر وستون در اثر تسلیم کامل ورق بصورت الاستیک باقی بمانند. البته

<sup>3</sup> Dwairi

<sup>4</sup> Priestley

<sup>5</sup> Harris

<sup>6</sup> Wijesundara

<sup>7</sup> Sullivan

<sup>8</sup> Plate Frame Interaction

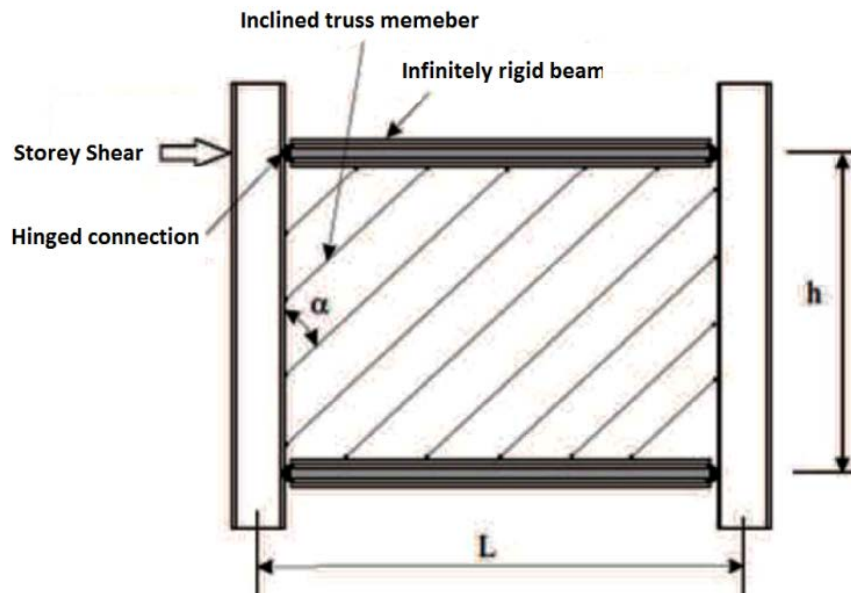
با استفاده از مقطع تیر کاهش یافته سعی می‌شود در دو انتهای تیر مفصل پلاستیک تشکیل گردد [۱۶]. در این مطالعه جهت طراحی نمونه‌ها از روش اشاره شده در AISC 341-05 که بر پایه مطالعه توربورن<sup>۹</sup> و همکاران [۱۷] می‌باشد استفاده می‌شود. در این روش، برای مدل کردن ورق فولادی به منظور آنالیز، یک سری میله‌های مورب به جای میدان کششی ورق پرکننده مطابق شکل ۲ به کار برده می‌شود. میله‌ها دارای اتصال مفصلی در دو انتهای خود و در محل اتصال به تیر یا ستون بوده و فقط قادر به تحمل نیروهای کششی می‌باشند و در جهت تنشهای کششی اصلی در پانل قرار می‌گیرند. تعداد میله‌های مورد نیاز برای مدل کردن مطلوب، بستگی به هندسه پانل دارد. با این حال، استفاده از حداقل ۱۰ میله پیشنهاد شده است. مساحت مقطع معادل هر میله برابر با حاصل ضرب عرض نوار و ضخامت ورق بدست می‌آید. با توجه به اینکه برای آنالیز، نیاز به اندازه مقاطع تیر و ستون و ضخامت ورق می‌باشد، با کمک یک قاب مهاربندی شده معادل که شامل فقط یک مهاربند قطری می‌باشد تحلیل سازه صورت گرفته و نیروهای اعضا بدست می‌آید. با فرض یک زاویه برای میدان کششی  $\alpha$  مقدار مقاومت مورد نیاز دیوار و یا برش طبقه  $V_n$  از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$V_n = 0.42F_y t_w L_{cf} \sin 2\alpha \quad (5)$$

در رابطه فوق،  $F_y$  مقاومت تسلیم ورق،  $t_w$  ضخامت ورق و  $L_{cf}$  طول خالص ورق می‌باشد. با توجه به اینکه  $\alpha$  بستگی به اندازه تیر و ستون دارد و در ابتدای طراحی مشخص نمی‌باشد می‌توان از یک فرض نزدیک به واقعیت استفاده کرد. مطالعات نشان داده است که این زاویه بین ۳۰ الی ۵۵ درجه متغیر می‌باشد و می‌توان برای شروع از مقدار ۴۵ درجه استفاده کرد [۱۸]. مقدار دقیق آن بعد از طراحی اعضای لبه‌ای از رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left[ \frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right]} \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $A_b$  سطح مقطع تیر،  $A_c$  سطح مقطع ستون،  $I_c$  ممان اینرسی ستون،  $h$  فاصله مرکز به مرکز تیرها و  $L$  فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها مطابق شکل ۲ می‌باشد. برای تخمین اولیه اندازه مقاطع ستون و تیر از روابط (۷) و (۸) استفاده می‌شود.



شکل ۲: مدل نواری میله مورب [۱۷].

<sup>9</sup> Thorburn

$$I_c \geq 0.00307 \frac{t_w h^4}{L} \quad (7)$$

$$I_b \geq 0.003 \frac{t_w L^4}{h} \quad (8)$$

با تخمین اولیه مقاطع تیر وستون زاویه میدان کششی محاسبه و مقاومت طبقه بدست می‌آید. با استفاده از مقاومت جدید طبقه، تیر وستون بصورت دقیق با رعایت ضوابط آیین نامه طراحی می‌گردد. این پروسه بصورت تکراری بوده و مقاطع و زاویه میدان کششی در پایان عملیات تکرار تعیین می‌شود.

طراحی تیر برای نیروی متناظر با تسلیم ورق انجام می‌شود. مقدار بارگسترده روی تیر  $W_{ub}$ ، لنگر خمشی  $M_{ub}$ ، نیروی محوری  $P_{ub}$  و نیروی برشی از طریق تنش اعمالی از طرف ورق با روابط (۹) - (۱۱) تعیین می‌شود.

$$W_{ub} = R_y F_y t_w \cos^2 \alpha, M_{ub} = \frac{W_{ub} L_h^2}{8} \quad (9)$$

$$P_{ub} = \frac{1}{2} R_y F_y t_w h_c \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} R_y F_y t_w L_{cf} \sin 2\alpha \quad (10)$$

$$V_{ub} = \frac{2M_{pr}}{L_h} + \frac{W_{ub}}{2} L_{cf}, M_{pr} = 1.1 R_y F_{yb} Z_{RBS} \quad (11)$$

در روابط فوق  $h_c$  ارتفاع ستون،  $R_y$  ضریب اضافه مقاومت می‌باشد که برابر ۱/۱ در نظر گرفته می‌شود،  $F_{yb}$  تنش تسلیم مصالح تیر،  $Z_{RBS}$  مدول پلاستیک مقطع تیر با مقطع کاهش یافته و  $L_h$  فاصله بین مفاصل پلاستیک در تیر می‌باشد که برای تیر با مقطع کاهش یافته از رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد [۱۸].

$$L_h = L - 2S_h, S_h = 1/2(d_c + d_b) \quad (12)$$

در رابطه فوق  $d_c$  و  $d_b$  ارتفاع مقطع ستون و تیر می‌باشد.

نیروی محوری ستون  $P_{uc}$  از مجموع نیروی محوری القا شده از طرف مقاومت قابل انتظار ورق و نیروی برشی تیر حاصل می‌گردد [۱۶]. بنابراین می‌توان نوشت:

$$P_{uc} = \frac{1}{2} R_y F_y t_w h_c \sin 2\alpha + V_{ub} \quad (13)$$

لنگر خمشی ستون  $M_{uc}$  ناشی از کشش ورق و ظرفیت مفصل پلاستیک تیر  $M_{pb}$  از رابطه (۱۴) بدست می‌آید.

$$M_{uc} = R_y F_y t_w \left( \frac{h_c^2}{12} \right) \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} M_{pb} \quad (14)$$

$$M_{pb} = M_{pr} + V_{ub} S_h$$

به منظور تعیین ضریب مناسب میرایی چرخه‌ای برای یک تراز شکل‌پذیری مشخص، دو قاب دیوار برشی فولادی یک طبقه با ابعاد مختلف انتخاب شدند. مطالعه لانه‌وی و همکاران نشان داد در حالتیکه نسبت ارتفاع به عرض ورق کوچکتر از ۰/۵ باشد رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی بهبود می‌یابد [۱۹]. بنابراین برای اینکه اثر نسبت ارتفاع به عرض در میرایی بررسی شود نمونه A دارای نسبت ارتفاع به عرض ۰/۸ و نمونه B دارای نسبت ارتفاع به عرض ۰/۵ استفاده شد.

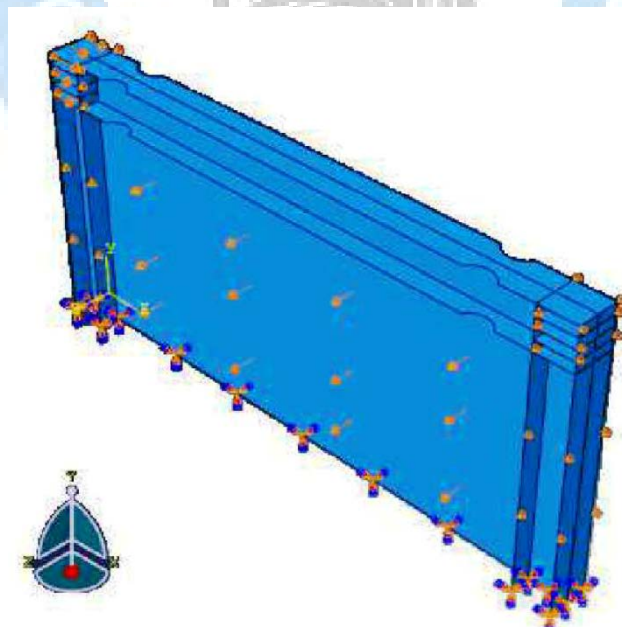
نمونه‌ها دارای ضخامت‌های مختلف بین ۲ تا ۱۰ میلی‌متر انتخاب شدند. نمونه‌ها براساس ضوابط AISC 341-05 طراحی شدند. مشخصات قابهای طراحی شده در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین برای اینکه از طرف ورق تنشهای کمتری به اعضای لبه‌ای وارد شود مقاومت تسلیم ورق کمتر از تیر و ستون انتخاب شدند. برای مطالعه حاضر مقاومت تسلیم ورق و اعضای لبه‌ای به ترتیب 345, 250 مگاپاسکال در نظر گرفته شد.

جدول ۱: مشخصات قابهای طراحی شده

Frame	Plate Thickness (mm)	Dimension of Plate (mm x mm)	Beam Section (IPB)	Column Section (IPB)
Aswst 2	2	2920 × 2250	300	280
Aswst 4	4	2800 × 2200	400	400
Aswst 6	6	2700 × 2150	500	500
Aswst 8	8	2600 × 2100	600	600
Aswst 10	10	2550 × 2075	650	650
Bswst 2	2	3720 × 1700	300	280
Bswst 4	4	3660 × 1650	400	340
Bswst 6	6	3600 × 1625	450	400
Bswst 8	8	3550 × 1600	500	450
Bswst 10	10	3500 × 1575	550	500

### ۳- مدل سازی و صحت سنجی

برای مدل سازی از نرم افزار اجزا محدود ABAQUS استفاده شد [۱۳]. در مدلسازی تمامی اعضای قاب و ورق از المان پوسته<sup>۱۰</sup> سه بعدی (S4R) استفاده شد. این المان توانایی بررسی رفتار هر دو پوسته ضخیم و نازک را دارد. از جمله قابلیت های این المان در نظر گرفتن پلاستیسیته، خزش، تورم، سخت شوندگی کرنشی، تغییر شکل ها و کرنش های بزرگ می باشد. تمامی اعضای قاب به یکدیگر ادغام و یکپارچه شد. در مدل سازی سه بعدی به منظور جلوگیری از حرکت خارج از صفحه با معرفی یک قید تکیه گاهی برای تیر و ستون ها، جابجایی خارج از صفحه محدود شد. همچنین برای مدلسازی نقص اولیه سازه، یک تغییر مکان اولیه به داخل ورق فولادی اعمال شد. برای مدل سازی رفتار فولاد از مدل دو خطی الاستوپلاستیک کامل با سخت شوندگی ۱٪ پس از تسلیم استفاده شد. برای تحلیل چرخه های یک دوره جابجایی با دامنه ای برابر تغییر مکان هدف متناظر با شکل پذیری در بالای قاب در نظر گرفته شد. در شکل ۳ نحوه مدل سازی در نرم افزار ABAQUS و اعمال شرایط مرزی نشان داده شده است.

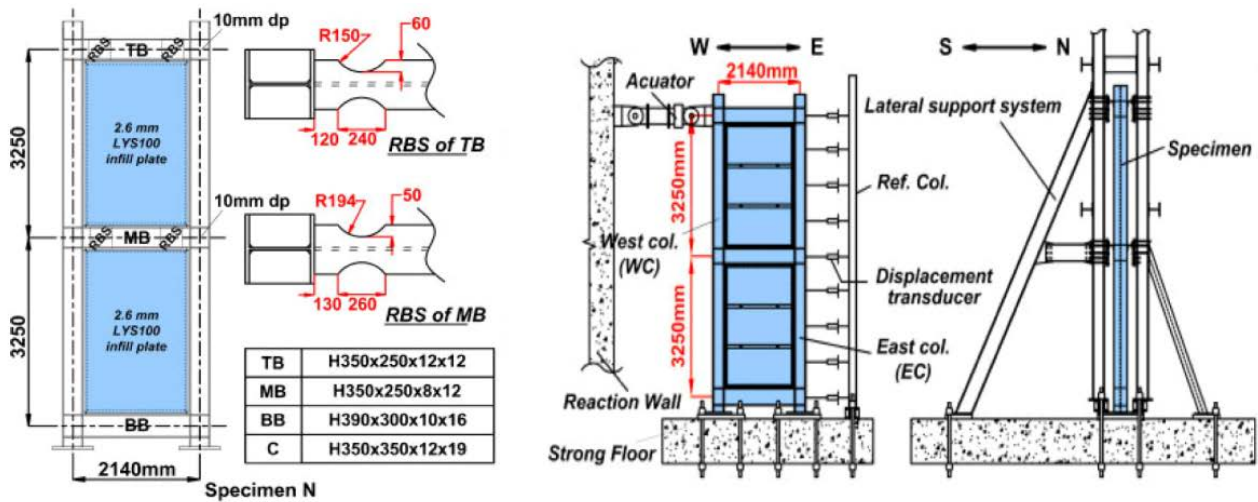


شکل ۳: مدل المان محدود دیوار برشی فولادی.

بمنظور صحت سنجی کامل مدل سازی عددی، از نتایج نمونه آزمایشگاهی مربوط به لی و همکاران استفاده شد [۲۰]. نمونه آزمایشی، یک قاب دو طبقه می باشد که مشخصات قطعات، نحوه آزمایش و شرایط مرزی در شکل ۴ نشان داده شده است. برای بیان صحت

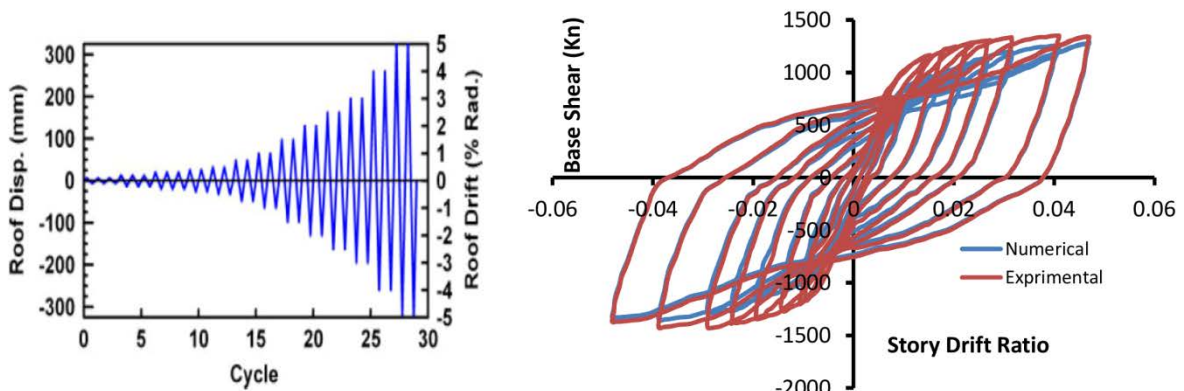
<sup>10</sup> Shell

عملیات انجام گرفته، نمونه آزمایشی در محیط نرم افزار ABAQUS به ترتیب گفته شده مدل سازی و منحنی نیروی برشی - تغییر مکان جانبی قاب با نتایج به دست آمده از آزمایش مقایسه می شود.



شکل ۴: مشخصات نمونه آزمایشگاهی [۲۰].

نتایج آنالیز عددی و آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، مدل عددی بادقت مناسب می تواند پاسخ واقعی قاب را پیش بینی کند. تغییر مکان تسلیم اولیه، افزایش مقاومت پس از تسلیم، سختی اولیه، سختی مرحله بارگذاری، باربرداری و بارگذاری مجدد تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۵: نتیجه صحت سنجی.

#### ۴- میرایی چرخه ای ژاکوبسن

همانطور که قبلا اشاره شد میرایی ژاکوبسن از رابطه (۳) قابل محاسبه است. برای تعیین میرایی چرخه ای برش ژاکوبسن، با اعمال یک دوره تحریک سینوسی جایجایی با دامنه تغییر مکان هدف متناسب با شکل پذیری، تحلیل چرخه ای انجام می گیرد و پس از تعیین مساحت یک دوره از نمودار نیرو- تغییر مکان پایسته و بیشینه نیروی و تغییر مکان متناسب با این نیرو، با استفاده از رابطه (۳) میرایی چرخه ای محاسبه می شود. در تعیین تغییر مکان هدف، ابتدا نیازمند تعیین تغییر مکان تسلیم می باشد. برای محاسبه تغییر مکان تسلیم دیوار برشی فولادی از روش PFI استفاده می شود [۱۴]. در این روش که اندرکنش ورق و قاب PFI نامیده می شود، ابتدا رفتار ورق فولادی و قاب محیطی به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته و سپس با استفاده از اصل جمع آثار قوا، رفتار کلی سیستم بدست می آید. با توجه به معلوم بودن مقطع

ستون و فرض صلبیت بالای تیر و همچنین گیرداری تیر و ستون، سهم نیروی برشی در لحظه تسلیم قاب محیطی  $F_{yf}$  و مقدار تغییرمکان تسلیم  $U_{yf}$  مشخص بوده و از روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$F_{yf} = \frac{4M_{yc}}{h} \quad (15)$$

$$U_{yf} = \frac{M_{yc}h^2}{6EI_c} \quad (16)$$

در روابط فوق،  $M_{yc}$  مقاومت خمشی تسلیم ستون می‌باشد. همچنین با توجه به مشخصات ورق، نیروی تسلیم ورق  $F_{yw}$  و تغییرمکان تسلیم ورق  $U_{yw}$  از روابط (۱۷) و (۱۸) قابل محاسبه می‌باشد.

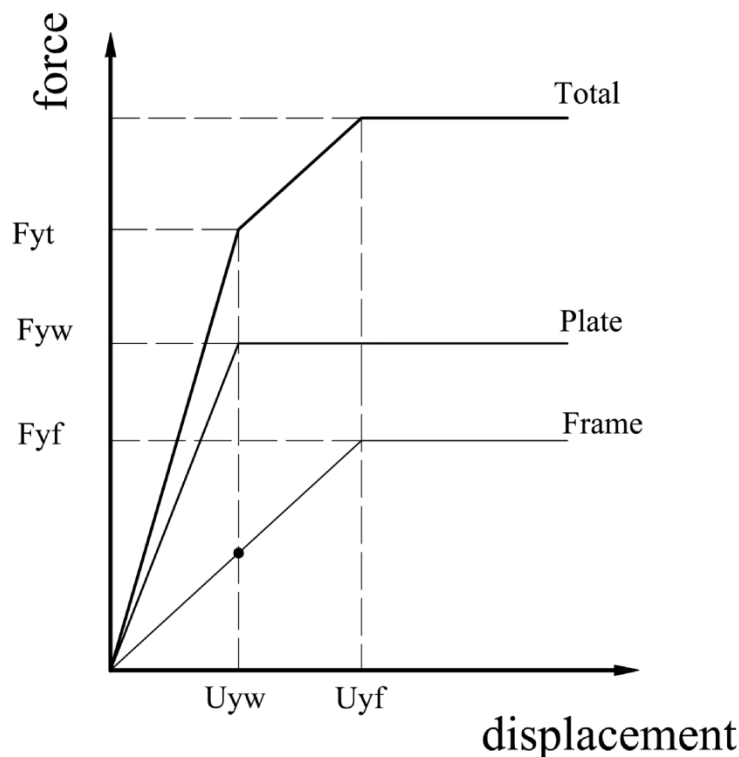
$$F_{yw} = Lt_w \left( \tau_{cr} + \frac{1}{2} \sigma_{ty} \sin 2\theta \right) \quad (17)$$

$$U_{yw} = \left( \frac{\tau_{cr}}{G} + \frac{2\sigma_{ty}}{E} \right) h \quad (18)$$

$$\tau_{cr} = \frac{K\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left( \frac{t_w}{L} \right)^2 \begin{cases} K = 5.35 + 4 \left( \frac{L}{h} \right)^2 & \frac{h}{L} \geq 1 \\ K = 5.35 \left( \frac{L}{h} \right)^2 + 4 & \frac{h}{L} \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

$$3\tau_{cr}^2 + 3\tau_{cr}\sigma_{ty} + \sigma_{ty}^2 - \sigma_0^2 = 0 \quad (20)$$

در روابط فوق،  $\tau_{cr}$  تنش تسلیم برشی حد کمانش ورق (رابطه ۱۹)،  $\sigma_{ty}$  تنش حد تسلیم میدان کششی به وجود آمده در ورق (رابطه ۲۰)،  $\sigma_0$  و تنش تسلیم تک محوره ورق فولادی (تنش تسلیم ورق) می‌باشند. رفتار کلی سیستم، شامل تغییر مکان تسلیم  $U_{yt}$  و نیروی برشی سیستم  $F_{yt}$  با کمک اصل جمع آثار قوا مطابق شکل ۶ تعیین می‌شود.



شکل ۶: منحنی نیرو - تغییرمکان قاب تنها، ورق تنها و سیستم.

تمامی پارامترهای شکل ۶ برای تمامی مدلها به کمک روش PFI محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین برای مقایسه، مقادیر پارامترها از طریق آنالیز استاتیکی مدل المان محدود در این جدول آورده شده است.



جدول ۲: مقادیر تغییرمکان و مقاومت تسلیم ورق تنها، قاب تنها و سیستم به روش PFI

Frame	Plate Parameters		Frame Parameters		Total parameters		Finite element results		
	$U_{yw}$ (mm)	$F_{yw}$ (KN)	$U_{yf}$ (mm)	$F_{yf}$ (KN)	$U_{yt}$ (mm)	$F_{yt}$ (KN)	$U_{yw}$ (mm)	$F_{yt}^{FE}$ (KN)	$F_{yt}^{FE}/F_{yt}$
Aswst 2	5.62	732	13.35	744	5.62	1044	5.62	926	0.89
Aswst 4	5.48	1413	9.72	1530	5.48	2296	5.48	2150	0.94
Aswst 6	5.32	2068	8.08	2233	5.32	3539	5.32	3250	0.92
Aswst 8	5.15	2702	6.99	2896	5.15	4833	5.15	4450	0.93
Aswst 10	5.01	3380	6.57	3282	5.01	5884	5.01	5250	0.89
Bswst 2	4.24	933	8.21	950	4.24	1417	4.24	1350	0.95
Bswst 4	4.10	1853	7.11	1452	4.10	2690	4.10	2430	0.91
Bswst 6	4.00	2778	6.19	1918	4.00	4018	4.00	3659	0.92
Bswst 8	3.89	3731	5.64	2333	3.89	5338	3.89	5089	0.95
Bswst 10	3.75	4715	5.19	2785	3.75	6720	3.75	6345	0.94

همانطور که مشاهده می شود در تمامی مدلها تغییرمکان تسلیم قاب بزرگتر از تغییرمکان تسلیم ورق می باشد که نشان می دهد تسلیم در ورق زودتر از قاب اتفاق افتاده است و رفتار سیستم صحیح می باشد. همچنین در ستون آخر جدول، نسبت مقاومت بدست آمده از مدل المان محدود به مقاومت حاصل از روش PFI برای کل سیستم ارائه شده است که همگی کوچکتر از یک می باشند. از آنجاییکه در روش PFI از مدل ایده آل شده استفاده شده است بنابراین مقادیر واقعی کمتر از مقادیر تحلیلی خواهد شد که همین اتفاق در مدل المان محدود رخ داده است. برای تعیین میرایی ژاکوبسن، ابتدا تغییرمکان تسلیم بدست آمده از روش PFI مطابق جدول ۲ استفاده می شود. هر قاب با توجه به مقدار تغییرمکان تسلیم، تحت یک سیکل بارگذاری با دامنه برابر با تغییرمکان تسلیم مورد آنالیز قرار می گیرد. در صورتیکه این مقدار، تغییر مکان تسلیم واقعی سیستم باشد باید میرایی آن برابر با صفر و یا نزدیک به صفر گردد. نتایج مربوط به میرایی با تغییرمکان تسلیم به روش PFI در جدول ۳ ارائه شده است.

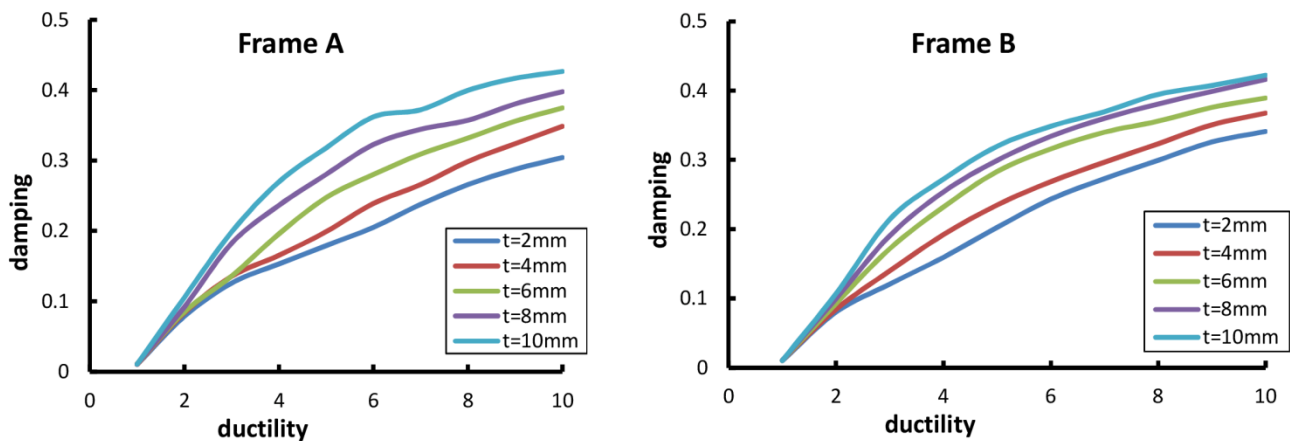
جدول ۳: تغییرمکان تسلیم واقعی قابها

Frame	$U_{yt}^{PFI}$ (mm)	$\xi_{hys}^{PF}$ (%)	$U_{yt}^{FI}$ (mm)	$\xi_{hys}^{FI}$ (%)	$\frac{U_{yt}^{FI}}{U_{yt}^{PFI}}$
Aswst2	5.62	10.4	4.6	1.03	0.81
Aswst4	5.48	9.8	4.3	1.01	0.78
Aswst6	5.32	9.1	4.28	1.03	0.8
Aswst8	5.15	8.5	4.16	1.03	0.81
Aswst10	5.01	7.8	4.07	1.04	0.81
Bswst2	4.24	7.2	3.52	1.02	0.82
Bswst4	4.10	7.0	3.50	1.03	0.85
Bswst6	4.00	6.9	3.39	1.03	0.85
Bswst8	3.89	6.5	3.3	1.02	0.85
Bswst10	3.75	6.4	3.11	1.04	0.83

مطابق ستون سوم جدول فوق مشاهده می شود، میرایی حاصل از تغییرمکان تسلیم تحلیلی مقادیری بیشتر از ۵٪ ارائه می دهد که می تواند در شکل پذیریهای بالاتر، باعث افزایش خطا گردد. با توجه به اینکه روش PFI از مدل ایده آل شده استفاده می کند، مقادیر واقعی تغییرمکان تسلیم از مقدار تحلیلی کمتر خواهد بود. طبق فرض استفاده شده توسط ژاکوبسن، میزان انرژی تلف شده در لحظه تسلیم و به تبع آن میرایی چرخه ای در این لحظه برابر صفر می باشد. تعیین دقیق تغییر مکان تسلیم در میرایی صفر در مدل های المان محدود به علت

تعداد المان زیاد عملاً غیرممکن و یا با عملیات تکراری خیلی زیاد امکان‌پذیر می‌باشد. برای راحتی، تغییرمکان حالتی به عنوان تغییرمکان تسلیم انتخاب می‌شود که میرایی آن حدود ۱٪ باشد. بنابراین برای تعیین تغییرمکان در لحظه تسلیم بصورت آزمون و خطا با تحلیل چرخه‌ای که در آن دامنه یک دوره جابجایی، بگونه‌ای انتخاب می‌شود که پس از بدست آوردن نمودار نیرو-تغییرمکان پایسته، میرایی حاصل نزدیک ۱ درصد باشد. با این روش مقدار تغییرمکان تسلیم واقعی بدست می‌آید که در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق ستون آخر جدول فوق، تقریباً مقادیر تسلیم واقعی حدود ۸۰٪ مقادیر تسلیم تحلیلی می‌باشد که از طریق اعمال ضریب ۰/۸ به رابطه تسلیم به روش PFI می‌توان مقدار تسلیم واقعی را بدست آورد. با انتخاب شکل‌پذیریهای مختلف و تغییرمکان تسلیم واقعی سیستم، میرایی ژاکوبسن برای مدل‌های انتخابی تعیین می‌شود.

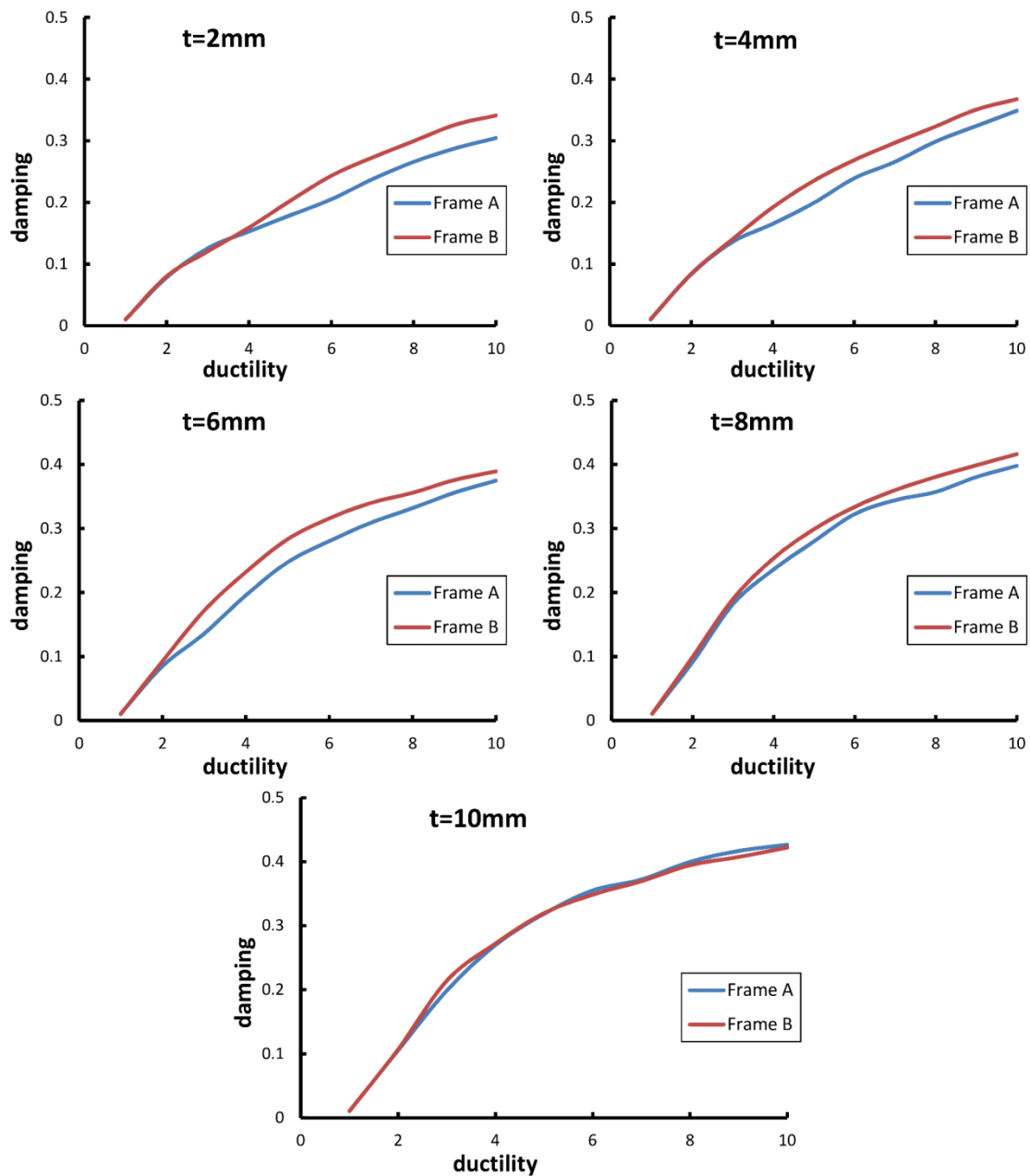
در شکل ۷ تغییرات میرایی براساس شکل‌پذیری برای ۱۰ مدل انتخابی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میرایی، برای هر دو نوع قاب علاوه بر شکل‌پذیری به ضخامت ورق بستگی دارد. البته تا شکل‌پذیری ۲ میرایی همه مدل‌ها تقریباً بر هم منطبق بوده و مستقل از ضخامت ورق می‌باشد و بعد از آن با افزایش شکل‌پذیری، میرایی بیشتر می‌گردد.



شکل ۷: نمودار تغییرات میرایی در مقابل شکل‌پذیری.

برای اینکه مشخص شود که ابعاد قاب چه تاثیری بر روی میرایی دارد، میرایی قاب‌ها براساس ضخامت ورق برای هر دو نوع قاب بصورت جداگانه در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، ابعاد قاب بر روی میرایی چرخه‌ای تاثیر گذار می‌باشد. اگرچه این تاثیرات با افزایش ضخامت ورق کاهش می‌یابد، بطوریکه در ضخامت ورق برابر با ۱۰ میلی‌متر تقریباً میرایی هر دو قاب برهم منطبق می‌باشند که نشان می‌دهد هرچه ضخامت ورق افزایش می‌یابد تاثیرات ابعاد قاب بر روی میرایی کمتر می‌گردد. همچنین می‌توان گفت هرچه شکل قاب به مستطیل نزدیکتر می‌شود میرایی افزایش می‌یابد و قابلیت جذب انرژی بیشتر می‌شود.

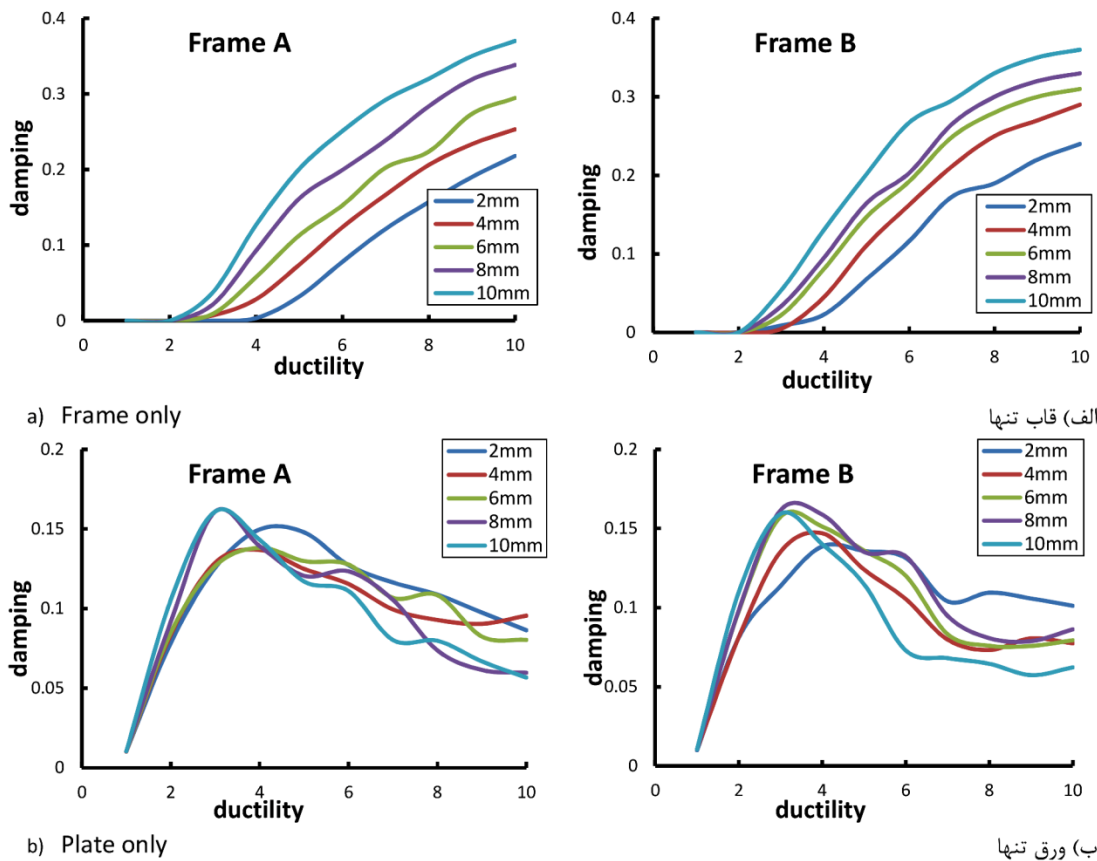
با توجه به اینکه میرایی سیستم، شامل میرایی ورق و قاب می‌باشد، برای اینکه میزان مشارکت هر کدام در میرایی کلی سیستم مشخص شود، میرایی قاب و ورق بصورت جداگانه بررسی می‌شود. برای اینکار، ابتدا میرایی قاب براساس تغییرمکان تسلیم کلی سیستم به همان روش گفته شده تعیین می‌گردد. جهت تعیین میرایی ورق تنها، میرایی قاب تنها از میرایی کلی سیستم کم می‌شود. نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق شکل ۹ مشاهده می‌گردد که تا شکل‌پذیری ۲، فقط ورق در میرایی کلی تاثیر گذار بوده و اعضای قاب تقریباً هیچ گونه تاثیری در میرایی ندارد. تا این لحظه با افزایش ضخامت ورق میرایی افزایش می‌یابد ولی این افزایش چندان قابل توجه نمی‌باشد. بعد از شکل‌پذیری ۲ به دلیل تسلیم تیر، جذب انرژی در اعضای قاب شروع شده، میرایی قاب تنها و به تبع آن میرایی کلی سیستم افزایش می‌یابد. میرایی قاب تنها، به دلیل افزایش ابعاد قاب ناشی از مقاومت قابل انتظار ورق به شدت افزایش می‌یابد و در عوض میرایی ورق تنها به علت کمناش قطری ورق کاهش پیدا می‌کند. با این حال میرایی کلی در حالت دوم (بعد از شکل‌پذیری ۲) به خاطر اندرکنش قاب و ورق، روند صعودی دارد. با توجه به اینکه تسلیم ابتدا در ورق اتفاق می‌افتد و میرایی قاب تنها بصورت افزایشی می‌باشد، نشان می‌دهد که ستونها به حالت الاستیک باقی مانده و ناپایداری در انتهای بارگذاری رخ نداده است. و رفتار مورد انتظار اتفاق افتاده است.



شکل ۸: نمودار تغییرات میرایی در مقابل شکل پذیری براساس ضخامت ورق.

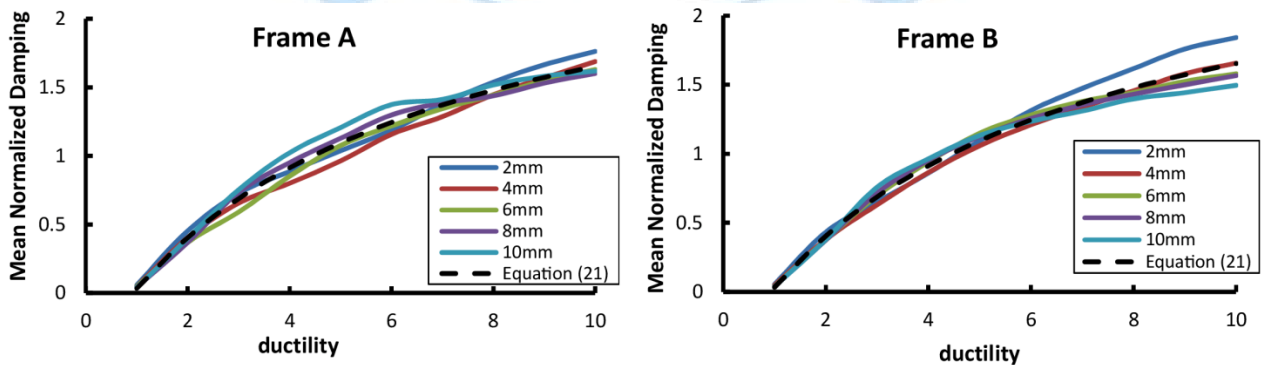
### ۵- تعیین رابطه مناسب برای محاسبه میرایی

همانطور که در بخش قبلی مشخص شد، میرایی دیوار برشی فولادی بستگی به شکل پذیری، ضخامت ورق و ابعاد قاب دارد. با توجه به اینکه مشخصات مصالح به کار رفته در ورق و اعضای قاب و مقاطع اعضای قاب در شکل پذیری و تغییر مکان تسلیم تاثیرگذار هستند، بنابراین مهمترین پارامتر تاثیرگذار در میرایی، شکل پذیری تعیین می شود. پارامتر دوم از میان ضخامت ورق، ارتفاع قاب، عرض قاب، نسبت عرض به ارتفاع و قطر قاب انتخاب می گردد. با بررسی هر کدام از این پارامترها و نقش آنها در میرایی کلی، مشخص شد که ضخامت ورق و ارتفاع ورق بیشترین نقش را دارند. بنابراین با نرمالیزه کردن میرایی براساس این دو پارامتر رابطه مناسب برای تعیین میرایی کلی دیوار برشی فولادی ارائه می شود.



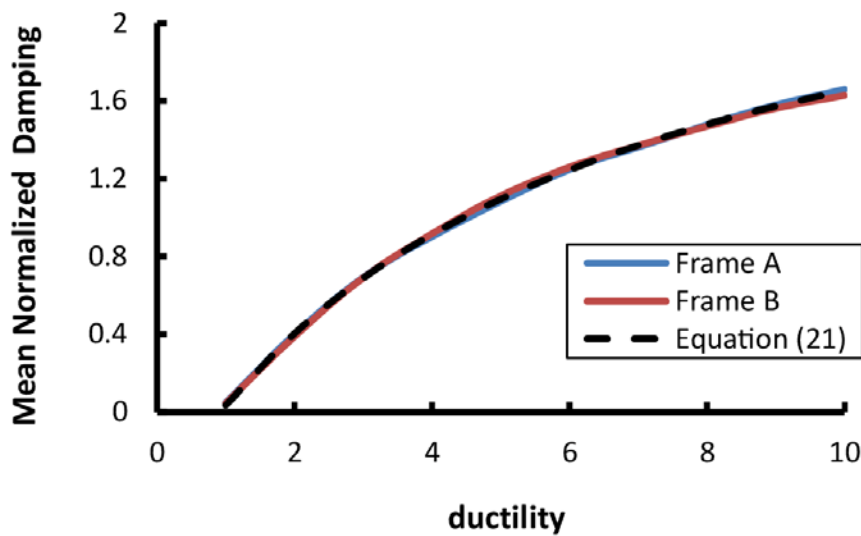
شکل ۹: نمودار تغییرات میرایی در مقابل شکل پذیری: الف) قاب تنها و ب) ورق تنها.

در شکل ۱۰ میرایی نرمالیزه شده کلی سیستم برای هر دو نوع قاب ارائه شده است. محور قائم منحنی‌ها، بر اساس ریشه چهارم نسبت ضخامت ورق به ارتفاع ورق نرمالیزه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تقریباً در هر دو مدل، منحنیها برهم منطبق شده اند و می‌توان از یک منحنی متوسط استفاده کرد.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات میرایی نرمالیزه شده در مقابل شکل پذیری.

در شکل ۱۱ منحنیهای متوسط برای هر دو مدل همزمان رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، هر دو منحنی بر هم منطبق شده اند. بنابراین مشخص می‌شود که با تقسیم میرایی بر ریشه چهارم نسبت ضخامت ورق به ارتفاع ورق، اثر ابعاد قاب حذف می‌شود و می‌توان یک منحنی واحد بر اساس شکل پذیری، ضخامت ورق و ارتفاع ورق بدست آورد. رابطه (۲۱) برای تعیین میرایی دیوار برشی فولادی پیشنهاد می‌شود. منحنی مربوط به این رابطه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ بصورت خطوط خط چین نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، رابطه میرایی بخوبی قادر به تخمین میرایی کلی می‌باشد.



شکل ۱۱: نمودار تغییرات میرایی نرمالیزه شده در مقابل شکل پذیری.

$$\frac{\xi}{\sqrt[4]{t/h}} = \frac{(-0.47 + 0.51\mu)}{(1 + 0.18\mu)} \quad (21)$$

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش با پیروی از روش ژاکوبسن به تعیین میرایی چرخه‌ای برای سیستم دیوار برشی فولادی پرداخته شد. در این روش ابتدا دو نوع قاب با ابعاد و ضخامتهای ورق مختلف انتخاب و مطابق با AISC2005 طراحی گردید. طراحی اعضای قاب براساس مقاومت قابل انتظار ورق صورت گرفت. همچنین مقاطع اعضای قاب طوری طراحی شد که ستونها در طی بارگذاری چرخه‌ای در حالت الاستیک باقی بمانند و تیرها بعد از تسلیم ورق رفتار غیرخطی از خود نشان دهند. تغییر مکان تسلیم و نهایی مدلهای با استفاده از روش اندر کنش قاب و ورق (PFI) تعیین شد. سپس این قاب ها در نرم افزار ABAQUS مدل و در ترازهای مختلف شکل پذیری تحت بارگذاری چرخه‌ای آنالیز گردید. نتایج بدست آمده بصورت زیر ارائه می گردد

۱- تغییر مکان تسلیم بدست آمده از روش PFI حدود 20% بیشتر از تغییر مکان تسلیم حاصل از تحلیل المان محدود می باشد. این به خاطر استفاده از مدل ایده آل شده در روش PFI می باشد. در این مطالعه با کمک میرایی ژاکوبسن روشی برای تعیین تغییر مکان تسلیم واقعی ارائه شد. در روش پیشنهادی، ابتدا با فرض تغییر مکان تسلیم برابر با تغییر مکان تسلیم روش PFI میرایی ژاکوبسن تعیین شد. با توجه به اینکه در لحظه تسلیم باید میرایی صفر باشد تغییر مکان تسلیم با روش سعی و خطا آنچنان کاهش داده شد تا میرایی حدود ۱% گردد. از آنجائیکه در مدلهای المان محدود، پیدا کردن تغییر مکانی که در آن میرایی صفر می گردد بسیار سخت و زمانبر می باشد معیار ۱٪ برای مدلهای المان محدود می تواند مناسب باشد. با استفاده از تغییر مکان تسلیم واقعی، میرایی سیستم دیوار برشی فولادی شامل ورق و قاب بصورت جداگانه تعیین گردید.

۲- تا شکل پذیری ۲ فقط ورق در میرایی کلی سیستم تاثیر گذار بوده ولی بعد از آن با تسلیم شدن تیرها، میرایی کلی تحت تاثیر اعضای قاب (لبه‌ای) قرار می گیرد بطوریکه با افزایش شکل پذیری میرایی ورق تنها به علت کماتش کاهش پیدا کرده، میرایی قاب تنها افزایش پیدا می کند.

۳- مشخص گردید که مهمترین پارامترهای موثر در میرایی کلی سیستم، شکل پذیری، ضخامت ورق و ارتفاع ورق می باشد. با افزایش ورق و شکل پذیری میرایی افزایش پیدا می کند. باید اشاره شود که پارامترهایی از قبیل ابعاد ورق، مقاطع اعضای قاب، مقاومتها

مصالح و ... در خود شکل پذیری لحاظ می شوند با این حال با نرمالیزه کردن میرایی براساس شکل پذیری، ضخامت و ارتفاع ورق به یک منحنی واحد می توان رسید.

۴- هرچه شکل قاب به سمت مستطیل میل می کند، میرایی بیشتر می گردد. رفتار چرخه ای قابهای مستطیلی نسبت به مربعی مناسب می باشد.

۵- براساس سه پارامتر مهم شامل شکل پذیری، ضخامت و ارتفاع ورق، رابطه ای برای پیش بینی میرایی سیستم دیوار برشی فولادی ارائه گردید (رابطه ۲۱). رابطه پیشنهادی توانایی تخمین با دقت قابل قبول میرایی چرخه ای سیستم دیوار برشی فولادی دارد.

## مراجع

- [1] Priestley, M. J. N. (1993). Myths and fallacies in earthquake engineering conflicts between design and reality. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 26(3), 329-341.
- [2] Kowalsky, M. J. Priestley, M. J. N. and Macrae, G. A. (1995). Displacement-Based design of RC bridge columns in seismic regions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24(12), 1623-1643.
- [3] Priestley, M. J. N. (1997). Displacement-Based seismic assessment of reinforced concrete buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 1(1), 157-192.
- [4] Jacobsen, L. S. (1960). Damping in composite structures. In: *Proceedings of 2nd World Conference on Earthquake Engineerin*. Tokyo and Kyoto, Japan, 1029-1044.
- [5] Dwairi, H. Kowalsky, M. J. and Nau, J. M. (2007). Equivalent damping in support of direct displacement-based design. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(4), 512-530.
- [6] Priestley, M. J. N. (2007). *Displacement - Based Seismic Design of Structures*. IUSS press.
- [7] Harris, J. L. (2006). *A Direct Displacement-Based Design of Low-Rise Seismic Resistant Steel moment Frames*. Ph. D Thesis. University of California.
- [8] Wijesundara, K. K. Nascimbene, R. and Sullivan, T. J. (2011). Equivalent viscous damping for steel concentrically braced frame structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(5), 1535-1558.
- [9] Yahyai, M. and Rezayibana, B. (2015). A Simplified Methodology to Determine Damping For Special Concentrically-Braced Frames. *International Journal of Steel Structures*, 15(3), 541-555.
- [10] Yahyai, M. and Rezayibana, B. (2015). Direct Displacement-Based Design of Special Concentrically-Braced Frames in Near-Fault Regions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(10), 2945-2971.
- [11] Sullivan, T. J. (2013). Seismic design of steel eccentrically braced frame structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(6), 2197-2231.
- [12] American Institute of steel construction (ANSI/AISC 360-05), (2005). *Specification for structural steel buildings*. Chicago, IL.
- [13] ABAQUS (2016). ABAQUS Theory Manual and Users' Manual Version 6.14.
- [14] Sabouri-Ghomi, S. Ventura, C. E. and Kharrazi, M. H. K. (2005). Shear analysis and design of ductile steel plate walls. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 131(6), 878-889.
- [15] Bing, Q.u. and Bruneau, M. (2009). Design of steel plate shear walls considering boundary frame moment resisting action. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 135(12), 1511-1521.
- [16] American Institute of steel construction (ANSI/AISC 341-05), (2005). *Seismic provisions for structural steel buildings*. Chicago, IL.
- [17] Thorburn, L.J. Kulal, G.L. and Montgomery, C.J. (1983). Analysis of steel plate shear walls, *Structural engineering. Report No. 107*, Department of civil engineering university of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
- [18] Sabelli, R. and Bruneau, M. (2006) Steel design guide. *Steel plate shear wall*, 20, AISC.
- [19] Lanhui, G. Qin, R. Xinbo, M. and Sumei, Z. (2011). Behavior of Steel Plate Shear Wall Connected to frame beams only. *International Journal of Steel Structure*, 11(4), 467-479.
- [20] Li, C. H. Tsa, K. C. Lin, C. H. and Chen, P. C. (2010). Cyclic tests of four two-story narrow steel plate shear walls part 2: experimental results and design implications. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 39, 801-826.