

میرایی دیوار برشی فولادی در طراحی مستقیم براساس تغییرمکان

بهرام رضایی بنا

گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل، اردبیل، ایران

چکیده

روش طراحی مستقیم براساس تغییرمکان یک روش طراحی می‌باشد که دارای الگوریتمی خیلی ساده جهت طراحی اعضا دارد و در سالهای اخیر محققین زیادی این روش را برای استفاده در طراحی سازه‌های مختلف توسعه دادند. این روش ابتدا برای سازه‌های بتنی و پلها بوجود آمد ولی بعداً برای سازه‌های 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 شده‌اند. لیکن هنوز دیوارهای برشی فولادی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. مهمترین پارامترهای طراحی مستقیم براساس تغییرمکان، تغییرمکان تسلیم و میرایی چرخه‌ای می‌باشند که در این مطالعه برای دیوارهای برشی فولادی تعیین می‌شود. برای این کار سیستم دیوار برشی فولادی شامل قاب خمشی فولادی و ورق فولادی انتخاب می‌شود. 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 میلی‌متر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با کمک آنالیزهای استاتیکی چرخه‌ای عوامل موثر بر روی پارامترهای طراحی تعیین و روابط ساده جهت مقاصد طراحی پیشنهاد می‌گردد. همچنین نتایج نشان دادند که تغییرمکان تسلیم و میرایی چرخه‌ای عمدتاً به ارتفاع قاب، ضخامت ورق و جنس مصالح بستگی دارد.

کلمات کلیدی: روش طراحی مستقیم بر اساس تغییرمکان، میرایی چرخه‌ای، دیوار برشی فولادی، تغییرمکان تسلیم.

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

10.22065/JSCE.2019.144103.1632	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2019.144103.1632	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۱۰/۲۹	۱۳۹۷/۱۰/۲۰	۱۳۹۷/۰۵/۲۱
بهرام رضایی بنا				*نویسنده مسئول:	
Bahram.deprem@gmail.com				پست الکترونیکی:	

Damping of steel shear wall in direct displacement based-design

Bahram Rezayibana

Civil Engineering Department, Islamic Azad University , Ardabil Branch, Ardabil, Iran

ABSTRACT

The direct displacement based-design is a design method that has a simplified procedure to design of structural member and in recent years, has been developed to design of structures by the researchers. This method was first established just for concrete structures and bridges and then has been developed for steel structures such as moment Frames, concentrically and eccentrically braced-frames and Buckling-restrained braced frames. However, steel shear walls have not been studied. The main parameters of the direct displacement based design are the yield displacement and the hysteresis damping where is studied in this paper for steel shear walls. To achieve this purpose, two types of frames with different dimensions and plate thickness (2, 4, 6, 8, and 10 millimeter) are designed based on plate capacity according the AISC 340, and by using plate and frame interaction (PFI). The effective design parameters of steel shear walls are obtained by the hysteresis static analysis and simplified expressions are proposed to the design goals. The results showed that, the yield displacement and the hysteresis damping depended on frame height, plate thickness and material properties. Simplified expression to determine the damping was proposed in terms of the ductility, the plate thickness, and the height of the frame.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 August 2018

Revise Date: 10 January 2019

Accept Date: 19 January 2019

Keywords:

Direct Displacement Base-Design; Hysteresis damping; Steel Shear Wall; Yield displacement; Ductility

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.144103.1632

*Corresponding author: Bahram Rezayibana

Email address: Bahram.deprem@gmail.com

۱- مقدمه

پرستلی مفهوم طراحی مستقیم براساس تغییرمکان^۱ DDBD را با استفاده از مفهوم سازه جایگزین برای اولین بار ارائه داد که در آن پیوند 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 رابطه‌ی هابی بدست می‌آید سپس با بکارگیری طیف تغییرمکان برای میرایی چرخه‌ای، پیوند 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).

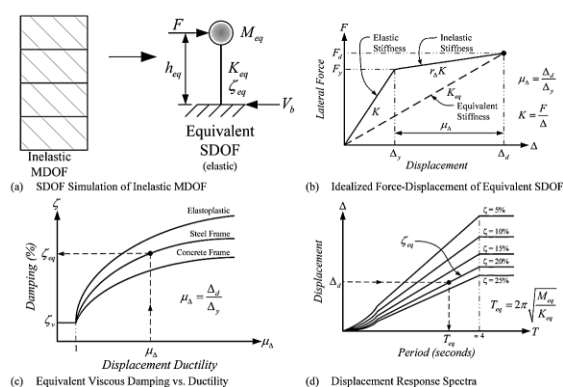
$$K_e = 4\pi^2 \frac{m_e}{T_e^2} \quad (1)$$

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

در روابط فوق، K_e سختی موثر، m_e جرم موثر، T_e پیوند موثر و Δ_d تغییرمکان هدف می‌باشند. روش DDBD در ابتدا برای سازه‌های یک درجه آزادی مانند پلهای 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^۲ 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 Δ_m تغییرمکان حداکثر در سیستم غیر خطی و سیستم الاستیک معادل می‌باشد.



شکل ۱: مراحل طراحی مستقیم براساس تغییرمکان.

¹ Direct Displacement Based-Design

² Jacobsen

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

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

در رابطه فوق μ شکل پذیری 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^۵ مطالعات دقیقتری بر روی قابهای خمشی فولادی انجام داد که در آن براساس روشهای مختلف، میرایی چرخه‌ای برای این نوع سیستمهای سازه‌ای ارائه داد [۷]. ویجی سوندارا^۶ 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 شکل پذیری پیشنهاد دادند [۸]. یحیایی و رضایی بنا جهت سرعت بخشیدن به عملیات کالیبره کردن میرایی ژاکوبسن با آنالیزهای تاریخچه زمانی غیرخطی، روش جرم بازیابی 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 پرپود موثر را پیشنهاد دادند [۱۰]. سولیوان^۷ 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 مدل سازی و تحت آنالیز چرخه‌ای قرار می‌گیرند [۱۳]. همچنین به روش PFI^۸ مقادیر تغییر مکان 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 شکل پذیری قابل توجهی نشان می‌دهند [۱۵]. مقاومت پس از کمانش نتیجه یک

³ Dwairi

⁴ Priestley

⁵ Harris

⁶ Wijesundara

⁷ Sullivan

⁸ Plate Frame Interaction

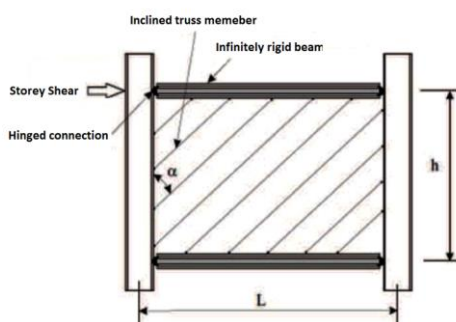
مکانیسمی است که به عمل میدان کششی معروف است برای تشکیل میدان کششی نیاز به تیر و ستون بسیار قوی وجود دارد. که باعث می شود نیروهای محوری بسیار زیادی به ستونها اعمال شود. فلسفه طراحی این نوع سیستمها، تشکیل میدان کششی در ورق می باشد که در نتیجه سعی می شود اعضای لبه ای طوری طراحی شوند که در اثر مقاومت حداکثر مورد انتظار ورق، تیر و ستون در اثر تسلیم کامل ورق بصورت الاستیک باقی بمانند. البته با استفاده از مقطع تیر کاهش یافته سعی می شود در دو انتهای تیر مفصل پلاستیک تشکیل گردد [۱۶]. در این مطالعه جهت طراحی نمونه ها از روش اشاره شده در AISC 341-05 که بر پایه مطالعه توربورن^۹ و همکاران [۱۷] می باشد استفاده می شود. در این روش، برای مدل کردن ورق فولادی به منظور آنالیز، یک سری میله های مورب به جای میدان کششی ورق پرکننده مطابق شکل ۲ به کار برده می شود. میله ها دارای اتصال مفصلی در دو انتهای خود و در محل اتصال به تیر یا ستون بوده و فقط قادر به تحمل نیروهای کششی می باشند و در جهت تنشهای کششی اصلی در پانل قرار می گیرند. تعداد میله های 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 می آید. با توجه به اینکه برای آنالیز، نیاز به اندازه مقاطع تیر و ستون و ضخامت ورق می باشد، با کمک یک قاب مهاربندی شده معادل که شامل فقط یک مهاربند قطری می باشد تحلیل سازه صورت گرفته و نیروهای اعضا بدست می آید. با فرض یک زاویه برای میدان کششی α مقدار مقاومت مورد نیاز دیوار و یا برش طبقه V_n از رابطه (۵) بدست می آید.

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

در رابطه فوق، F_y مقاومت تسلیم ورق، t_w ضخامت ورق و L_{cf} طول خالص ورق می باشد. با توجه به اینکه α بستگی به اندازه تیر و ستون دارد و در ابتدای طراحی مشخص نمی باشد می توان از یک فرض نزدیک به واقعیت استفاده کرد. مطالعات نشان داده است که این زاویه بین ۳۰ الی ۵۵ درجه متغیر می باشد و می توان برای شروع از مقدار ۴۵ درجه استفاده کرد [۱۸]. مقدار دقیق آن بعد از طراحی اعضای لبه ای 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 ستون ها مطابق شکل ۲ می باشد. برای تخمین اولیه اندازه مقاطع ستون و تیر از روابط (۷) و (۸) استفاده می شود.



شکل ۲: مدل نواری میله مورب [۱۷].

⁹ 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 250، 345 مگاپاسکال در نظر گرفته شد.

جدول ۱: مشخصات قابهای طراحی شده

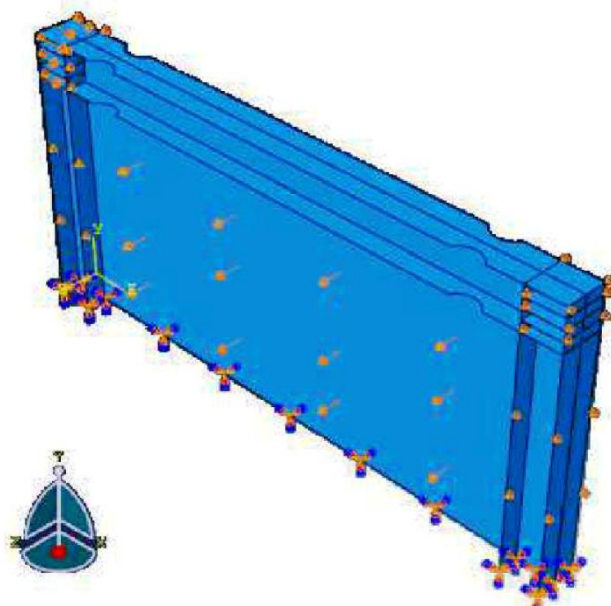
Frame	Plate Thickness (mm)	Dimension of Plate (mm x mm)	Beam Section (IPB)	Column Section (IPB)
Aswst 2	2	2920 × 2250	300	280
Aswst 4	4	2800 × 2200	400	400
Aswst 6	6	2700 × 2150	500	500
Aswst 8	8	2600 × 2100	600	600
Aswst 10	10	2550 × 2075	650	650
Bswst 2	2	3720 × 1700	300	280
Bswst 4	4	3660 × 1650	400	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^{۱۰} 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، سخت‌شوندگی کرنشی، تغییر شکل‌ها و کرنش‌های بزرگ می‌باشد. 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 ستون‌ها، 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 سخت‌شوندگی ۱٪ پس از تسلیم استفاده شد. برای تحلیل

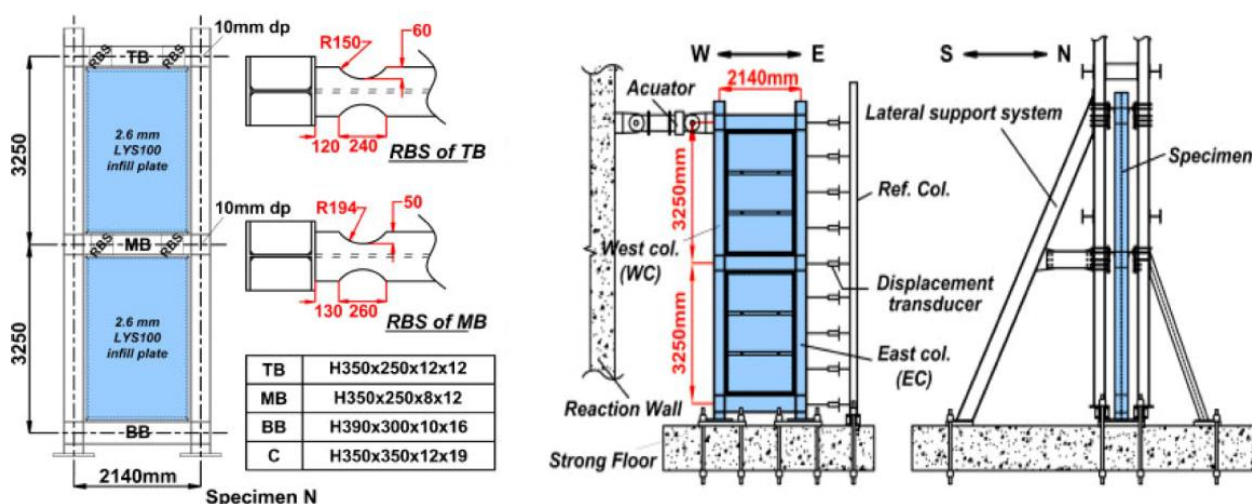
¹⁰ Shell

چرخه‌ای یک دوره جابجایی با دامنه‌ای برابر تغییرمکان 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.



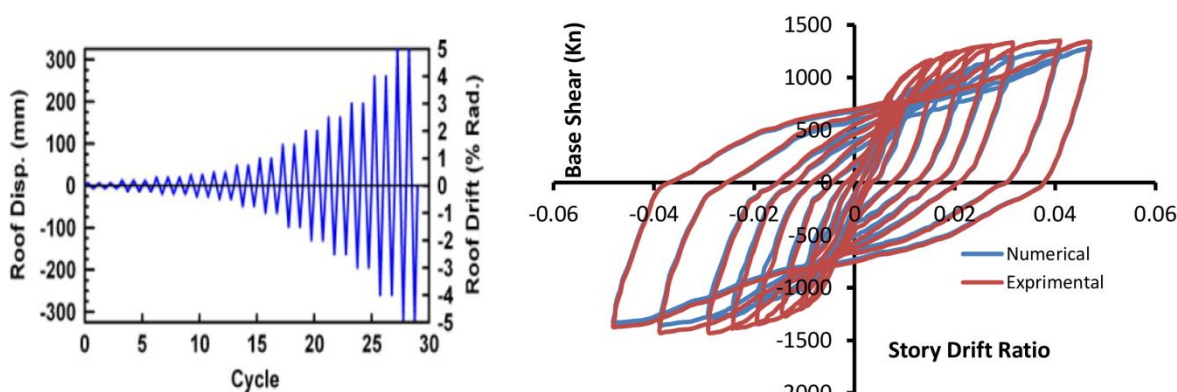
شکل ۳: مدل المان محدود دیوار برشی فولادی.

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 می‌باشد که مشخصات قطعات، نحوه آزمایش و شرایط مرزی در شکل ۴ نشان داده شده است. برای بیان صحت عملیات انجام گرفته، نمونه آزمایشی در محیط نرم افزار ABAQUS به ترتیب گفته شده مدل سازی و منحنی نیروی برشی-تغییرمکان جانبی قاب با نتایج به دست آمده از آزمایش مقایسه می‌شود.



شکل ۴: مشخصات نمونه آزمایشگاهی [۲۰].

نتایج آنالیز عددی و آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل عددی بادقت مناسب می‌تواند پاسخ واقعی قاب را پیش‌بینی کند. تغییرمکان تسلیم اولیه، افزایش مقاومت پس از تسلیم، سختی اولیه، سختی مرحله بارگذاری، بارگذاری 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 چرخه‌ای بروش ژاکوبسن، با اعمال یک دوره تحریک سینوسی جابجایی با دامنه تغییرمکان هدف متناسب با شکل‌پذیری، تحلیل چرخه‌ای انجام می‌گیرد و پس از تعیین مساحت یک دوره از نمودار نیرو- تغییرمکان پایسته و بیشینه نیروی و تغییرمکان متناسب با این نیرو، با استفاده از رابطه (۳) میرایی چرخه‌ای محاسبه می‌شود. در تعیین تغییرمکان هدف، ابتدا نیازمند تعیین تغییرمکان تسلیم می‌باشد. برای محاسبه تغییرمکان تسلیم دیوار برشی فولادی از روش PFI استفاده می‌شود [۱۴]. در این روش که اندرکنش ورق و قاب PFI نامیده می‌شود، 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 می‌آید. 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.

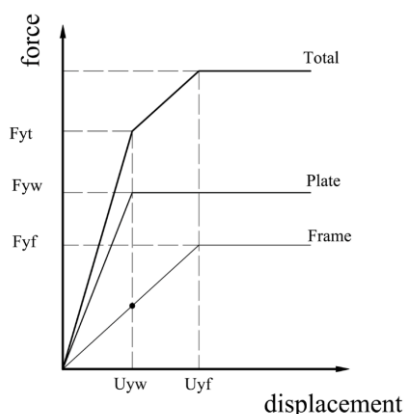
$$F_{yw} = Lt_w \left(\tau_{cr} + \frac{1}{2} \sigma_{ty} \sin 2\theta \right) \quad (17)$$

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

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

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

در روابط فوق، τ_{cr} تنش تسلیم برشی حد کمانش ورق (رابطه (۱۹))، σ_{ty} تنش حد تسلیم میدان کششی به وجود آمده در ورق (رابطه (۲۰)) و σ_0 تنش تسلیم تک محوره ورق فولادی (تنش تسلیم ورق) می باشند. 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 می شود.



شکل ۶: منحنی نیرو - تغییر مکان 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 تغییر مکان و مقاومت تسلیم ورق تنها، قاب تنها و سیستم به روش PFI

	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

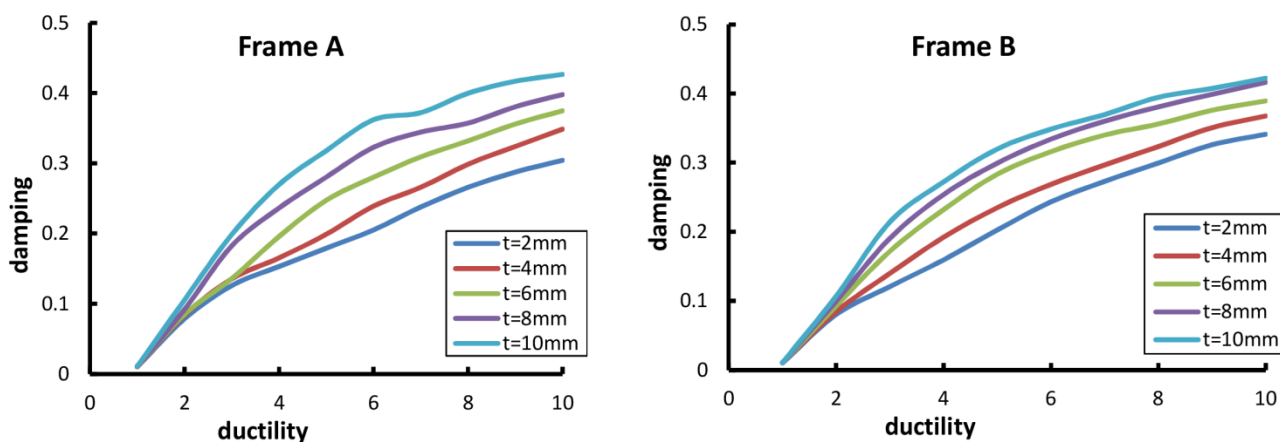
همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی مدلها تغییرمکان تسلیم قاب بزرگتر از تغییرمکان تسلیم ورق می‌باشد که نشان می‌دهد تسلیم در ورق زودتر از قاب اتفاق افتاده است و رفتار سیستم صحیح می‌باشد. همچنین در ستون آخر جدول، نسبت مقاومت بدست آمده از مدل المان محدود به مقاومت حاصل از روش PFI برای کل سیستم ارائه شده است که همگی کوچکتر از یک می‌باشند. از آنجاییکه در روش PFI از مدل ایده‌آل 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 می‌شود. هر قاب با توجه به مقدار تغییرمکان تسلیم، تحت یک سیکل بارگذاری با دامنه برابر با تغییرمکان تسلیم مورد آنالیز قرار می‌گیرد. 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)	ξ_{hys}^{PFI} (%)	U_{yt}^{FI} (mm)	ξ_{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
Bswst	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 می‌شود، میرایی حاصل از تغییرمکان تسلیم تحلیلی مقادیری بیشتر از ۵٪ ارائه می‌دهد که می‌تواند در شکل پذیریه‌های بالاتر، باعث افزایش خطا گردد. با توجه به اینکه روش PFI از مدل ایده‌آل شده استفاده می‌کند، 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 چرخه‌ای در این لحظه برابر صفر می‌باشد. تعیین دقیق تغییر مکان تسلیم در میرایی صفر در مدل‌های 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 شکل پذیریه‌های مختلف و تغییرمکان تسلیم واقعی سیستم، میرایی ژاکوبسن برای مدل‌های انتخابی تعیین می‌شود.

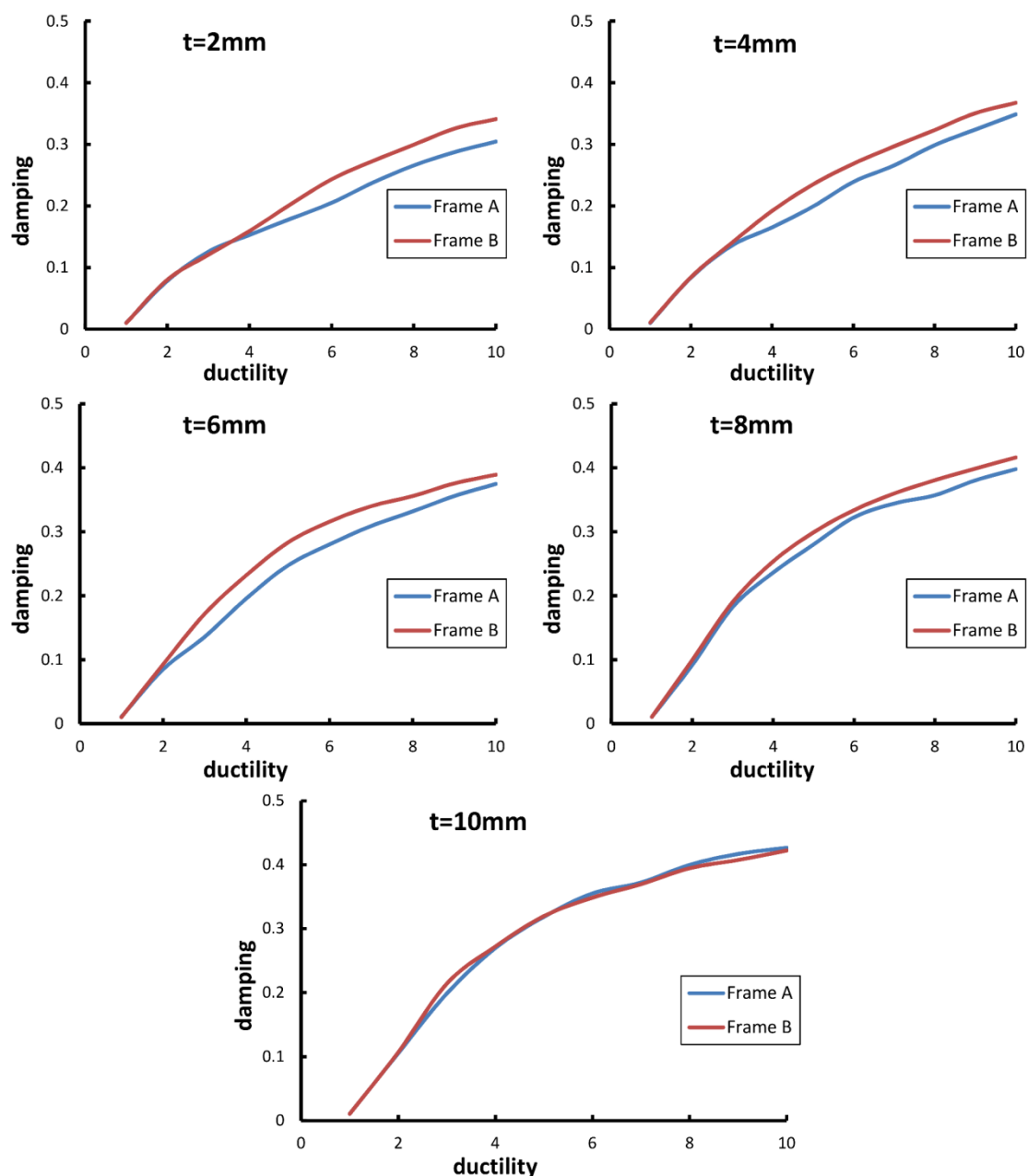
در شکل ۷ تغییرات میرایی براساس شکل‌پذیری برای ۱۰ مدل انتخابی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میرایی، برای هر دو نوع قاب علاوه بر شکل‌پذیری به ضخامت ورق بستگی دارد. البته تا شکل‌پذیری ۲ میرایی همه مدلها تقریباً بر هم منطبق بوده و مستقل از ضخامت ورق می‌باشد و بعد از آن با افزایش شکل‌پذیری،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



شکل ۷: نمودار تغییرات میرایی در مقابل شکل پذیری.

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 هرکدام در میرایی کلی سیستم مشخص شود، میرایی قاب و ورق بصورت جداگانه بررسی می‌شود. برای اینکار، ابتدا میرایی قاب براساس تغییر مکان 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 شکل پذیری 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 شکل پذیری 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 کماتش قطری ورق کاهش پیدا می‌کند. با این حال میرایی کلی در حالت دوم (بعد از شکل پذیری 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.

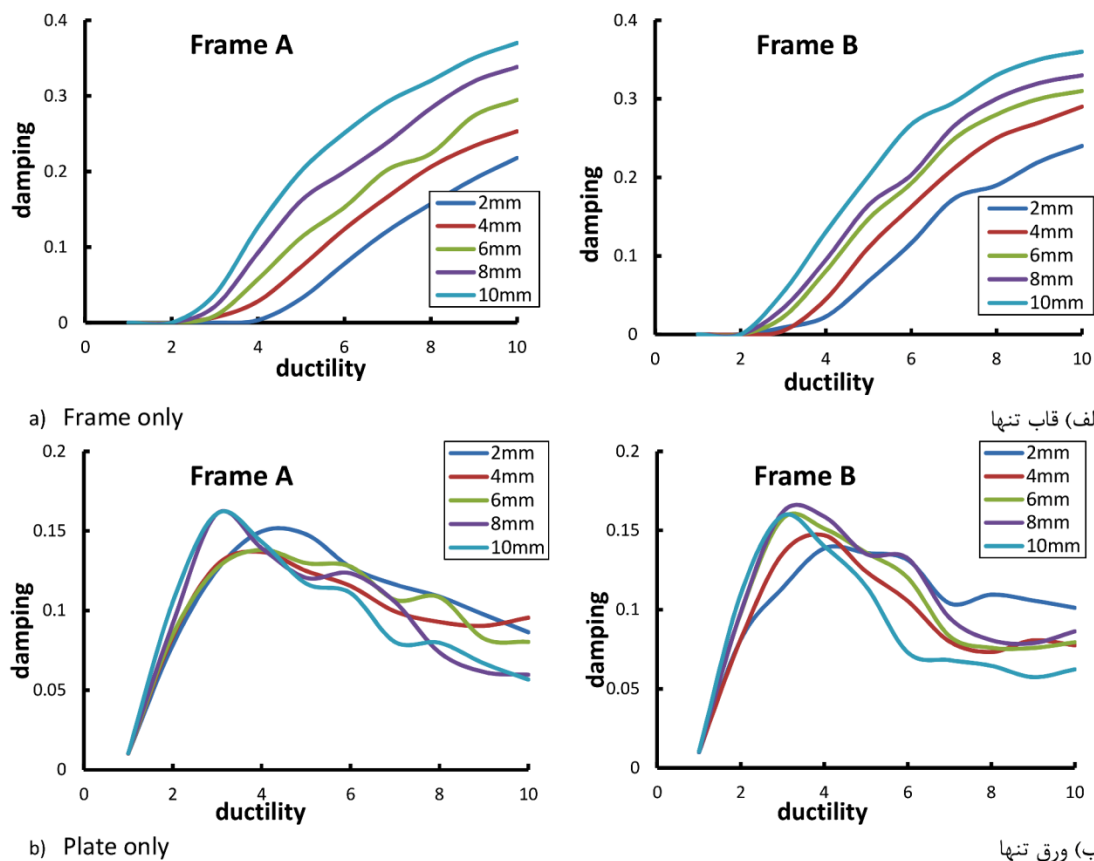


شکل ۸: نمودار تغییرات میرایی در مقابل شکل پذیری براساس ضخامت ورق.

۵- تعیین رابطه مناسب برای محاسبه میرایی

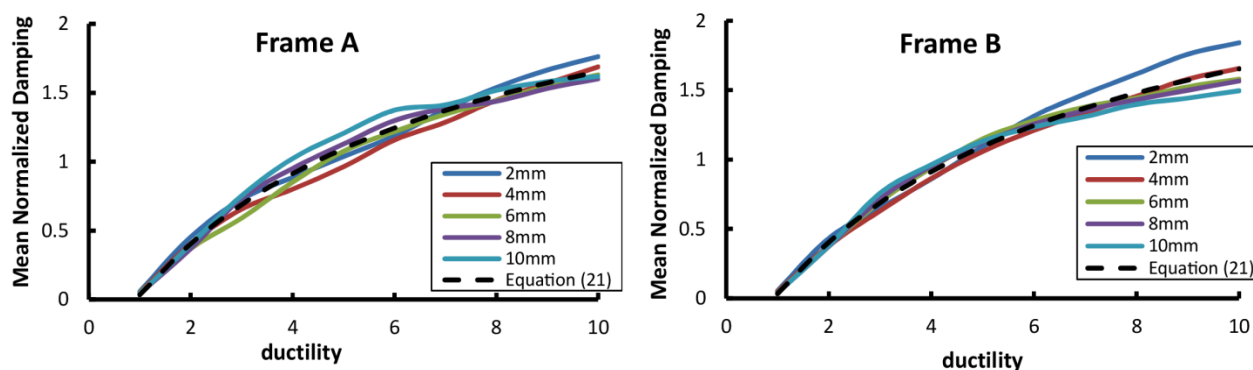
همانطور که در بخش قبلی مشخص شد، میرایی دیوار برشی فولادی بستگی به شکل پذیری، ضخامت ورق و ابعاد قاب دارد. با توجه به اینکه مشخصات مصالح به کار رفته در ورق و اعضای قاب و مقاطع اعضای قاب در شکل پذیری و تغییر مکان تسلیم تاثیرگذار هستند، بنابراین مهمترین پارامتر تاثیرگذار در میرایی، شکل پذیری تعیین می شود. 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 می‌شود.



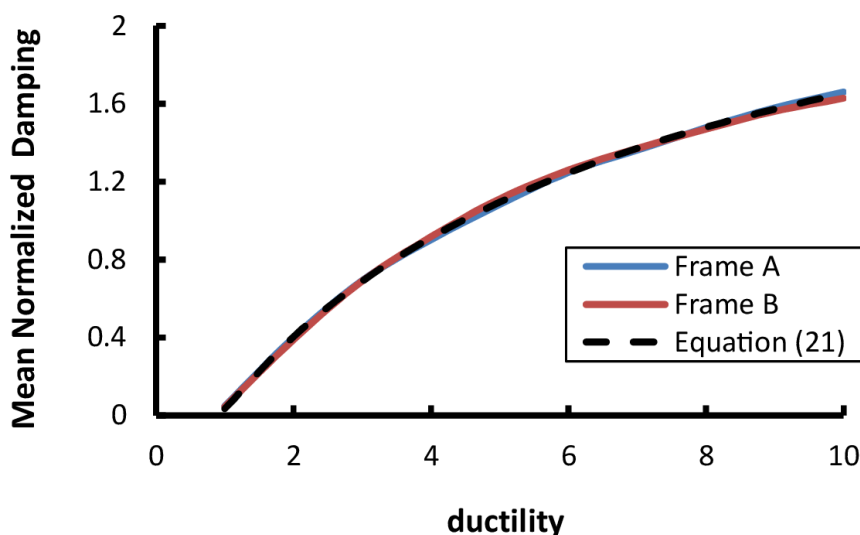
شکل ۹: نمودار تغییرات میرایی در مقابل شکل پذیری: الف) قاب تنها و ب) ورق تنها.

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 براساس 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 درحالت 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 قاب‌ها در نرم افزار ABAQUS مدل و درترازهای مختلف شکل‌پذیری تحت بارگذاری چرخه‌ای آنالیز گردید. نتایج بدست آمده بصورت زیر ارائه می‌گردد

۱- تغییرمکان تسلیم بدست آمده از روش PFI حدود 20% بیشتر از تغییرمکان تسلیم حاصل از تحلیل المان محدود می‌باشد. این به خاطر استفاده از مدل ایده‌آل شده در روش PFI می‌باشد. در این مطالعه با کمک میرایی ژاکوبسن روشی برای تعیین تغییرمکان تسلیم واقعی ارائه شد. در روش پیشنهادی، ابتدا با فرض تغییرمکان تسلیم برابر با تغییرمکان تسلیم روش PFI میرایی ژاکوبسن تعیین شد. با توجه به اینکه در لحظه تسلیم باید میرایی صفر باشد تغییرمکان تسلیم با روش سعی و خطا آنچنان کاهش داده شد تا میرایی حدود ۱% گردد. از آنجاییکه در مدل‌های المان محدود، پیدا کردن تغییرمکانی که در آن میرایی صفر می‌گردد بسیار

- سخت و زمانبر می‌باشد معیار ۱٪ برای مدل‌های المان محدود می‌تواند مناسب باشد. با استفاده از تغییر مکان تسلیم واقعی، میرایی سیستم دیوار برشی فولادی شامل ورق و قاب بصورت جداگانه تعیین گردید.
- ۲- تا شکل‌پذیری 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 می‌گیرد بطوریکه با افزایش شکل‌پذیری میرایی ورق تنها به علت کماتش کاهش پیدا کرده، میرایی قاب تنها افزایش پیدا می‌کند.
- ۳- مشخص گردید که مهمترین پارامترهای موثر در میرایی کلی سیستم، شکل‌پذیری، ضخامت ورق و ارتفاع ورق می‌باشد. با افزایش ورق و شکل‌پذیری میرایی افزایش پیدا می‌کند. باید اشاره شود که پارامترهایی از قبیل ابعاد ورق، مقاطع اعضای قاب، مقاومت‌های مصالح و ... در خود شکل‌پذیری لحاظ می‌شوند با این حال با نرمالیزه کردن میرایی براساس شکل‌پذیری، ضخامت و ارتفاع ورق به یک منحنی واحد می‌توان رسید.
- ۴- هرچه شکل قاب به سمت مستطیل میل می‌کند، میرایی بیشتر می‌گردد. رفتار چرخه‌ای قابهای مستطیلی نسبت به مربعی مناسب می‌باشد.
- ۵- براساس سه پارامتر مهم شامل شکل‌پذیری، ضخامت و ارتفاع ورق، رابطه‌ای برای پیش‌بینی میرایی سیستم دیوار برشی فولادی ارائه گردید (رابطه ۲۱). رابطه پیشنهادی توانایی تخمین با دقت قابل قبول میرایی چرخه‌ای 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.

