

بررسی تشکیل میدان کششی در دیوارهای برشی فولادی با عدم اتصال کامل ورق جان به المان‌های مرزی قائم

نادر فنائی^{۱*}، سید محمدرضا حاجی میرصادقی^۲

۱- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*تهران، صندوق پستی ۴۴۱۶-۱۵۸۷۵، fanaie@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸)

چکیده

طراحی بر اساس ظرفیت المان‌های مرزی قائم جهت تحمل مقاومت قابل انتظار تسلیم ورق جان معمولاً منجر به ابعاد بزرگ برای ستون‌ها می‌گردد. این مشکل کلیدی منجر به عدم استفاده گسترده از دیوارهای برشی فولادی گردیده است. هدف این پژوهش بررسی تشکیل میدان کششی در دیوارهای برشی فولادی با عدم اتصال کامل ورق جان به المان‌های مرزی قائم می‌باشد. این کاهش طول اتصال منجر به کاهش تقاضای خمشی و سختی المان‌های مرزی قائم می‌گردد. برای این منظور ابتدا روش مدل - سازی اجزاء محدود بر اساس یک مطالعه آزمایشگاهی صحت سنجی گردید و در ادامه بر اساس مدل صحت سنجی شده نه مدل اجزاء محدود با نسبت‌های مختلف عدم اتصال ورق جان توسعه داده شد. در انتها بر اساس فرضیات تأیید شده با مدل‌های اجزاء محدود و بررسی آزمایشگاهی تکمیلی، دو معادله حاکم شامل مقاومت برشی ورق جان و زاویه جهت گیری میدان کششی در ورق جان برای نسبت عدم اتصال کوچکتر از ۳۰٪ ارائه شدند.

واژگان کلیدی

دیوار برشی فولادی، عدم اتصال کامل ورق جان، المان مرزی قائم، روش اجزاء محدود

Investigation of tension field formation in steel shear walls with partial length connection of web to vertical boundary elements

N. Fanaie, S.M.R. Hajimirsadeghi

Abstract

Capacity based design of vertical boundary elements with regard to resisting expected yield strength of the web plate could be led to large column size. This key problem leads to a lack of widespread implementation of steel shear walls. This research project aims to investigate the formation of tension field in steel shear wall with partial length connection of web plate to vertical boundary element which in this type of steel shear walls, reducing the length of the connection leads to a reduction in the flexure and stiffness demand on the vertical boundary elements. For this purpose, the finite element modeling methodology was initially established and validated based on a laboratory test. Nine FE models were developed based on the verified specimens, and various not connected infill plate values. Finally, based on assumptions confirmed by numerical modeling and complementary experimental investigation, two governing equations have been developed for this type of steel shear wall, including panel shear strength, tension field inclination angle in the web plate in case, not connected length ratio is less than 30%.

Keywords

Steel shear wall, Partial length connection of web plate, Vertical boundary element, Finite element method

دیوارهای برشی فولادی، سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای هستند که حدود ۵۰ سال از معرفی آن‌ها می‌گذرد [۱]. هرچند که پژوهشگران مختلف، مقاومت بالا، شکل پذیری مناسب و سختی بالای این سیستم را در مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی و عددی نمایش داده‌اند [۵-۲]، این سیستم هنوز نتوانسته به عنوان یک سیستم فراگیر مورد استفاده قرار بگیرد. از جمله علل مهم این موضوع، ابعاد غیر متعارف در المان‌های مرزی قائم می‌باشد. المان‌های مرزی قائم علاوه بر تقاضای لنگر واژگونی مشابه با یک سیستم مهاربندی از تقاضاهای دیگری نیز برخوردار می‌باشند. این تقاضاهای مازاد به خاطر تحمل بار جانبی ناشی از تشکیل میدان کششی در ورق جان دیوار و عملکرد قابی در قاب خمشی پیرامونی ورق جان می‌باشد [۶]. راه حل‌های زیادی در ارتباط با تعدیل این تقاضا از طرف ورق جان [۱۷-۷] یا ناشی از تعدیل عملکرد قابی با استفاده از اتصال تیر با مقطع کاهش یافته به ستون [۸] یا ارائه طرحی بهینه برای تحمل اقتصادی این تقاضاها توسط المان‌های مرزی قائم با استفاده از ستون‌های با مقطع مختلط یا بتن مسلح [۲۰-۱۸] توسط محققین مختلف ارائه گردیده است. از جمله راه حل‌های ارائه شده برای تعدیل تقاضاهای ناشی از اضافه مقاومت ورق جان، استفاده از ورق‌های با الگوی منظم سوراخ دار [۷]، استفاده از ورق‌های با مقاومت پایین و ضخامت کم [۸]، استفاده از ورق جان با آلومینیوم کم مقاومت و شکل پذیر [۹ و ۱۰] و تغییر ساز و کار باربری در ورق جان از تشکیل میدان کششی به حالت‌های برش خالص با افزودن ورق‌های سخت کننده یا پانل‌های پوششی بتنی (ساندویچ) [۱ و ۱۱] و یا ایجاد شیارهای موازی و قائم برای تشکیل لینک‌های شکل پذیر خمشی در ورق جان [۱۲] می‌باشد. همچنین ایجاد مقید کننده‌ها در عرض دیوار (دستک‌های فشاری افقی) جهت کاهش دهانه مشارکت کننده در تحمل خمش المان‌های مرزی قائم [۱۳]، استفاده از ستون‌های ثانویه جهت تحمل تقاضای خمشی ناشی از ورق جان که خرابی آن منجر به ناپایداری کل سازه نمی‌شود [۱۴]، استفاده از وسیله اتصال چسب به جای جوش جهت اتصال ورق‌های نازک و اجتناب از اضافه مقاومت ورق‌های ضخیم‌تر [۱۰]، چیدمان نامنظم ورق جان در نمای سازه [۶] و استفاده از سیستم بازویی و تیر همبند [۶] نیز از موارد دیگر در ارتباط با کاهش این تقاضا می‌باشد. عدم اتصال ورق جان به المان‌های مرزی قائم [۱۷-۱۵] نیز توسط تعدادی از محققین مورد بررسی قرار گرفته که دارای مزایایی از قبیل عدم مشارکت المان‌های مرزی قائم در تحمل بار

جانبی ناشی از تشکیل میدان کششی در ورق جان و سهولت در افزایش ضخامت ورق جان جهت کنترل سختی و امکان جوشکاری می‌باشد. اما با این وجود عدم تماس ورق جان به المان مرزی قائم باعث از دست دادن ظرفیت المان مرزی قائم در بسیج کردن هر چه بیشتر سختی و مقاومت در سیستم و کاهش شکل پذیری و زوال در رفتار چرخه‌ای می‌گردد [۱۵] و [۱۶]. از این رو ایده دیوارهای برشی فولادی با عدم اتصال کامل ورق جان به المان‌های مرزی قائم برای ایجاد توازن بین کاهش تقاضای وارد بر المان‌های مرزی قائم به عنوان عامل مثبت و کاهش مقاومت، سختی و عملکرد چرخه‌ای نسبت به دیوارهای برشی فولادی متداول به عنوان عوامل منفی مطرح گردیده است [۲۱ و ۲۲].

۲- معرفی ایده دیوارهای برش فولادی با عدم اتصال ورق جان به قسمت میانی المان‌های مرزی قائم و ارائه

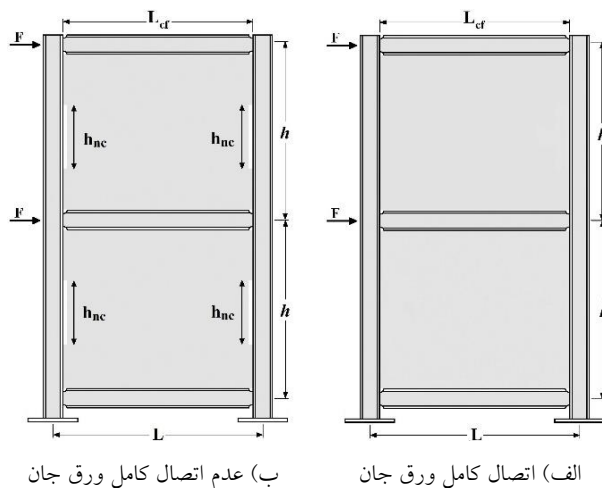
اهداف پژوهش

برای معرفی بهتر ایده عدم اتصال کامل ورق جان به قسمت میانی المان مرزی قائم، ساده‌سازی‌هایی در نظر گرفته می‌شود. دیوار برشی فولادی دو طبقه با اتصالات مفصلی المان مرزی افقی به المان مرزی قائم و اتصال مفصلی المان مرزی قائم به فونداسیون همان گونه که در شکل (۱) نمایش داده شده در نظر گرفته می‌شود. در این شکل h_{mc} طول عدم اتصال ورق جان به المان مرزی قائم، h فاصله مرکز به مرکز المان‌های مرزی افقی و L فاصله مرکز به مرکز المان‌های مرزی قائم و L_{cf} فاصله وجوه داخلی المان‌های مرزی قائم می‌باشد و NCR به عنوان نسبت عدم اتصال تعریف می‌شود.

شکل (۲) مدل تحلیلی توسعه داده شده توسط Berman و Bruneau [۲۳] را که در آن فرض می‌شود المان‌های مرزی قائم به عنوان یک تیر سراسری بر روی تعدادی تکیه گاه (که نقش آن را المان‌های مرزی افقی به عهده دارند) قرار گرفته‌اند، برای دو حالت دیوارهای برشی متعارف (الف) و دیوارهای برشی با عدم اتصال ورق جان به قسمت میانی المان‌های مرزی قائم (ب) نمایش می‌دهد. فرض می‌شود زاویه جهت گیری میدان کششی با المان مرزی قائم (α) برای وضعیت شکل (۲-ب) نیز مشابه با حالت (۲-الف) در سراسر ورق جان، ثابت می‌باشد که البته در ادامه مقاله این فرض مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که مشاهده می‌شود ورق جان تحت اثر تنش کششی در راستای تشکیل میدان کششی قرار گرفته و با توجه به ضخامت اندک ورق جان و در نتیجه کماتش زودرس آن در تنش‌های

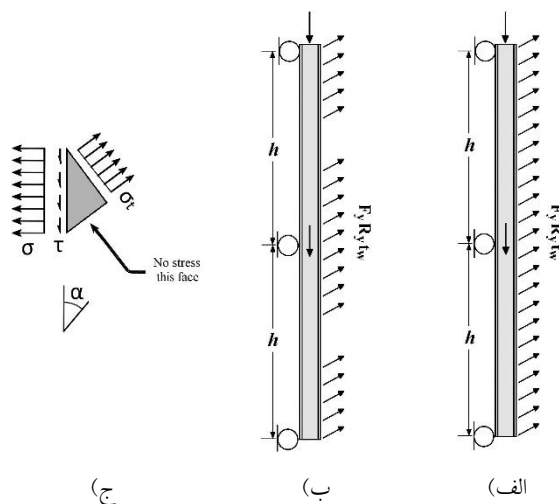


فشاری بسیار کوچک، هیچ تنشی در راستای عمود بر تشکیل میدان کششی وجود ندارد. البته در گوشه‌های ورق جان وضعیت کمی متفاوت بوده که البته خارج از بحث کلی این مقاله می‌باشد.



شکل ۱- دیوار برشی فولادی

بار متمرکز ناشی از برش المان‌های مرزی افقی و بار گسترده ناشی از تشکیل میدان کششی در ورق جان بر روی این تیر سراسری (المان مرزی قائم) اثر می‌کند.



شکل ۲- مدل تحلیلی المان مرزی قائم، الف) نمودار جسم آزاد المان مرزی قائم در دیوارهای برشی متعارف، ب) نمودار جسم آزاد المان مرزی قائم در دیوارهای برشی با عدم اتصال ورق جان به قسمت میانی المان‌های مرزی قائم، ج) تجزیه تنش‌های قطری ناشی از تشکیل میدان کششی قطری بار گسترده وارد شده به المان مرزی قائم در لحظه تسلیم

ورق جان دارای شدت $R_y F_y t_w$ بوده که در آن F_y تنش تسلیم ورق جان، t_w ضخامت ورق جان و R_y نسبت تنش تسلیم قابل انتظار به تنش تسلیم مشخصه مصالح می‌باشد. برای محاسبه تلاش‌های داخلی در المان مرزی قائم، تنش‌های قطری ناشی از تشکیل میدان کششی به دو مؤلفه افقی و قائم، همانطور که در شکل (۲-ج) نمایش داده شده تقسیم می‌شود. شدت این بار گسترده حتی در ضخامت‌های کم ورق جان نیز بسیار قابل توجه می‌باشد. از همین رو هدف از ایده عدم اتصال ورق جان به قسمت میانی المان‌های مرزی قائم، انتقال این بار گسترده به مقدار قابل توجه از وسط المان مرزی قائم به مجاورت نواحی تکیه‌گاهی (المان‌های مرزی افقی) جهت کاهش تقاضای خمشی و سختی از این المان می‌باشد.

در سیستم دیوار برشی فولادی، ورق جان به عنوان عضو کنترل شونده توسط تغییر شکل، تعیین کننده مقاومت تسلیم سیستم و تقاضای وارد بر سایر اعضای کنترل شونده توسط نیرو مانند المان‌های مرزی افقی و قائم و اتصالات آن‌ها می‌باشد. از این رو آگاهی از کیفیت تشکیل میدان کششی در ورق جان، پیش نیاز طراحی در این سیستم می‌باشد. با توجه به این مقدمه، اهداف این مطالعه به شرح زیر می‌باشد.

- بررسی وضعیت میدان تنش در ورق جان به کمک مدل‌سازی عددی با روش اجزاء محدود با در نظر گرفتن تغییر در نسبت عدم اتصال ورق جان به المان مرزی قائم (NCR).
- بررسی تشکیل میدان کشش در یک نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با نسبت مشخص عدم اتصال ورق جان به المان مرزی قائم.
- ارائه روابط تحلیلی با توجه به کیفیت تشکیل میدان کششی در ورق جان در بازه مشخص نسبت عدم اتصال (این بازه در قسمت‌های بعدی تعیین می‌گردد).

۳- بررسی عددی دیوار برشی فولادی با عدم اتصال ورق جان به المان مرزی قائم

۳-۱- صحت سنجی و روش مدل‌سازی عددی

برای صحت سنجی مدل‌سازی عددی در این تحقیق، در ابتدا مطالعه آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته توسط توسط Li و همکارانش [۲۴] به عنوان یکی از تحقیقات قبلی صورت گرفته بر روی دیوارهای برشی فولادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. صحت سنجی در این تحقیق بر اساس نرم افزار تجاری

مشخصات مصالح به کار رفته در المان‌های مرزی افقی و قائم در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح به کار رفته در نمونه Li و همکارانش (تنش‌ها برحسب مگا پاسکال هستند) [۲۴]

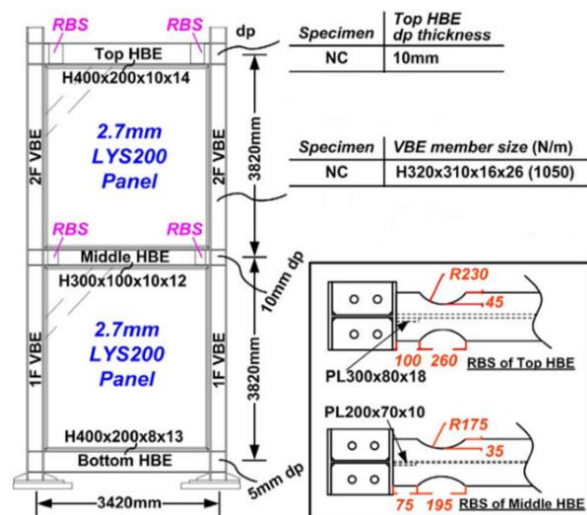
عضو	مقطع	بال		جان	
		تنش تسلیم	تنش نهایی	تنش تسلیم	تنش نهایی
T-HBE	H400x200x10x14	۴۰۵	۵۳۷	۴۶۴	۵۶۱
M-HBE	H300x150x10x12	۳۷۲	۵۰۶	۴۶۴	۵۶۱
B-HBE	H400x200x8x13	۳۹۰	۵۰۲	۴۳۰	۵۰۹
VBE	H320x310x16x25	۳۸۶	۵۴۷	۳۸۹	۵۶۴

برای مدل‌سازی المان‌های مرزی و ورق جان دیوار برشی فولادی المان پوسته‌ای^۱ استفاده شده است. المان مورد نظر یک المان چهار گرهی^۲ با انتگرال گیری کاهش یافته است. لازم به توضیح است که این المان از قابلیت در نظر گرفتن همزمان رفتار غشایی و خمشی برخوردار بوده و برای در نظر گرفتن هر دو رفتار غیرخطی هندسی و مصالح مناسب می‌باشد. ورق جان به صورت مستقیم با قید تای^۳ به المان‌های مرزی متصل گردیده است. مطالعات قبلی [۲۵] قابل چشم پوشی بودن اثر این نوع مدل‌سازی اتصال، به جای در نظر گرفتن ورق‌های واسطه^۴ جهت اتصال ورق جان به المان‌های مرزی را نشان داده است. شرایط تکیه‌گاهی المان‌های مرزی قائم به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح فولادی به صورت دو خطی با شیب پس از تسلیم برابر با ۱ درصد مدول الاستیسیته در نظر گرفته شده است.

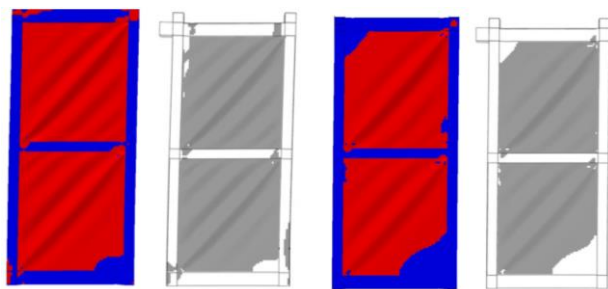
برای در نظر گرفتن کماتش در ورق جان دیوار از ایجاد نقص (تغییر مکان خارج از صفحه) در هندسه اولیه ورق جان استفاده گردید. با توجه به عدم برداشت هندسه اولیه ورق جان پیش از آزمایش، هندسه این نقص بر اساس جمع آثار دو مد اولیه کماتش ورق جان که بر اساس تحلیل کماتش در نرم افزار Abaqus به دست آمده بود، لحاظ گردید. در محل المان‌های مرزی افقی مطابق با شرایط آزمایشگاهی، از حرکت خارج از صفحه نمونه جلوگیری به عمل آمد. بر اساس تحلیل حساسیت صورت گرفته و صحت سنجی مدل اجزاء محدود ساخته شده با نتایج مدل مرجع [۲۴]، ابعاد المان‌های پوسته‌ای برابر با ۵۰×۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در انتها بارگذاری جانبی

Abaqus ver. 2016 انجام می‌شود و برای نمونه از دیوار برشی فولادی با وضعیت ستون معمولی (NC) ارائه شده در تحقیق Li و همکارانش استفاده می‌شود.

نمونه مورد بررسی جهت صحت سنجی در این مطالعه، یک دیوار برشی فولادی دو طبقه و تک دهانه با عرض (فاصله مرکز تا مرکز المان‌های مرزی قائم) برابر با ۳۴۲۰ میلی‌متر و ارتفاع (فاصله مرکز تا مرکز المان‌های مرزی فوقانی و تحتانی) برابر ۷۶۴۰ میلی‌متر معادل با ۳۸۲۰ میلی‌متر برای هر طبقه می‌باشد. هندسه نمونه مورد نظر در شکل (۳) نمایش داده شده است. در این نمونه، ورق جان دارای ضخامت ۲/۷ میلی‌متر بوده و از فولاد با تنش تسلیم پایین برابر ۲۲۰ مگاپاسکال تشکیل شده است. ورق جان در چهار سمت خود با جوش به المان‌های مرزی قائم و افقی متصل گردیده است. المان‌های مرزی مورد استفاده در نمونه از فولاد A572Gr50 تشکیل گردیده است. سه مقطع فولادی بال پهن به نام‌های $H400 \times 200 \times 10 \times 14$ ، $H300 \times 150 \times 10 \times 12$ و $H400 \times 200 \times 8 \times 13$ به ترتیب برای المان‌های مرزی بالایی، میانی و پایینی استفاده شده و برای المان‌های مرزی قائم نیز $H320 \times 310 \times 16 \times 25$ به کار گرفته شده است. چهار عدد معرفی شده برای ابعاد در نامگذاری مقاطع بال پهن مورد اشاره بر اساس استاندارد کشور تایوان بوده که به ترتیب ارتفاع مقطع، عرض بال، ضخامت ورق جان و ضخامت ورق بال مقطع را بر حسب میلی‌متر نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود از تیر با مقطع کاهش یافته برای اتصال تیر به ستون استفاده شده است.



شکل ۳- جزئیات هندسی نمونه با ستون معمولی مورد آزمایش توسط Li و همکارانش [۲۴]



الف) دریفت ۱٪ (ب) دریفت ۲٪

شکل ۵- مقایسه سطح تسلیم در این مطالعه و مدل‌سازی [۲۴]

جدول ۲- نامگذاری مدل‌ها بر حسب نسبت عدم اتصال

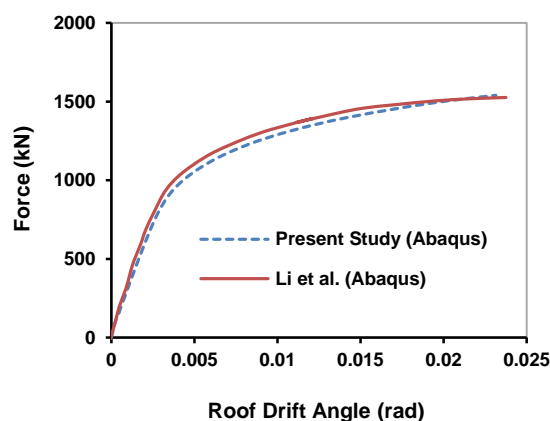
نام مدل	NCR (%)	نام مدل	NCR (%)
L0	۰	L5	۵۰
L1	۱۰	L6	۶۰
L2	۲۰	L8	۸۰
L3	۳۰	L10	۱۰۰
L4	۴۰	-	-

همانگونه که به صورت کیفی در شکل‌ها مشاهده می‌شود راستای موج‌های کماتش ایجاد شده در ورق جان که تقریباً نمایش دهنده راستای تشکیل میدان کششی [۲۶] می‌باشد برای نسبت عدم اتصال تا حدود ۳۰ درصد موازی یکدیگر می‌باشند و با افزایش این نسبت، انحراف از وضعیت توازی در راستای نوارهای کششی ایجاد شده در ورق جان، به صورت محسوس مشاهده می‌شود. قبل از ارائه جزئیات بیشتر از نتایج مدل‌سازی عددی صورت گرفته و تحلیل آن، در قسمت بعدی به عنوان یک نمونه به بررسی آزمایشگاهی توازی نوارهای کششی تشکیل شده در ورق جان یک دیوار برشی فولادی با نسبت عدم اتصال ورق جان به المان مرزی قائم کوچکتر از ۳۰ درصد، پرداخته می‌شود.

۴- بررسی آزمایشگاهی تشکیل میدان کششی در ورق جان

جهت بررسی تجربی تشکیل میدان کششی در ورق جان با عدم اتصال کامل به المان مرزی قائم، یک نمونه دیوار برشی فولادی سخت نشده با یک نسبت مشخص عدم اتصال ورق جان به المان مرزی قائم پس از طراحی و ساخت با ملاحظاتی که در ادامه ارائه می‌گردد، تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت.

تغییر مکان کنترل برای ایجاد منحنی بار افزون به نمونه اعمال گردید. از آنجا که در مطالعه Li و همکارانش مدل‌سازی عددی (با جزئیات ارائه شده بالا) و آزمایشگاهی به صورت همزمان انجام شده است، برای صحت سنجی مدل‌سازی عددی در این پژوهش از مقایسه منحنی رفتار نیرو-تغییر مکان این مطالعه با منحنی متناظر در مطالعه Li و همکاران استفاده گردیده است. شکل (۴) تطابق مناسب منحنی بار-تغییر مکان در مدل اجزاء محدود ارائه شده در این مطالعه و مدل تولید شده توسط Li و همکارانش بر اساس مطالعه آزمایشگاهی خودشان را نمایش می‌دهد.



شکل ۴- تطابق مناسب نتایج مدل‌سازی در این تحقیق و مطالعه Li و همکارانش [۲۴]

به عنوان معیار ثانویه جهت صحت سنجی مدل‌سازی صورت گرفته، شکل (۵) وضعیت تسلیم در سطح نمونه مدل‌سازی شده در این مطالعه را در مقایسه با مدل Li و همکارانش در دریفت‌های ۱٪ و ۲٪ بر اساس معیار تسلیم فون میسنز نمایش می‌دهد. نواحی تسلیم تقریباً یکسان در سطح دو مدل مشاهده می‌گردد. رنگ قرمز در این مطالعه و خاکستری در مطالعه Li و همکارانش نمایش دهنده ناحیه تسلیم شده می‌باشد.

۲-۳- تشکیل میدان کششی در مدل‌های تحلیلی

در این قسمت بر اساس مدل صحت سنجی شده در قسمت قبل، ۹ مدل اجزاء محدود با نسبت‌های مختلف عدم اتصال ورق جان جهت بررسی وضعیت تشکیل میدان کششی ساخته شد. جدول (۲) نامگذاری ۹ مدل مورد بررسی در این پژوهش را بر اساس نسبت‌های عدم اتصال مختلف ارائه می‌نماید. شکل (۶) به صورت کیفی وضعیت تسلیم در سطح مدل‌های L0 تا L10 را در دریفت ۱ درصد نمایش می‌دهد.

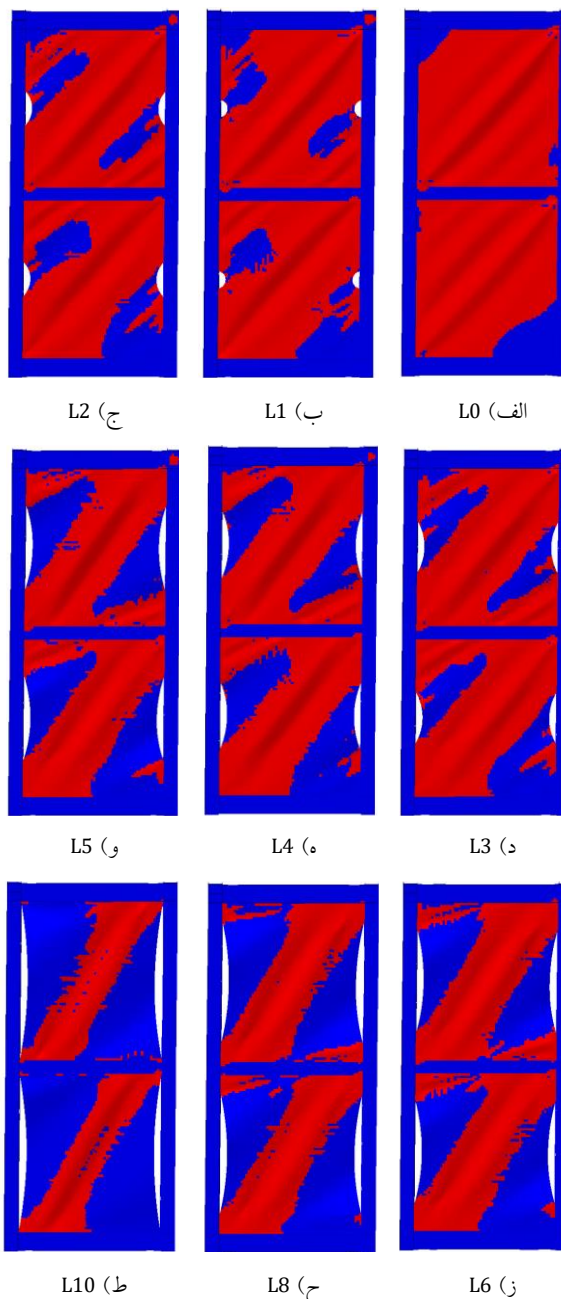
اجزاء محدود انجام شده و بر اساس این طراحی یک نمونه بزرگ مقیاس دیوار برشی فولادی یک طبقه سخت نشده با عدم اتصال ورق جان به قسمت میانی المان مرزی قائم ساخته شده است. عرض نمونه (فاصله مرکز تا مرکز المان‌های مرزی قائم) برابر با ۲۲۵۰ میلی‌متر و ارتفاع (فاصله مرکز تا مرکز المان‌های مرزی فوقانی و تحتانی) برابر ۲۶۵۰ میلی‌متر می‌باشد. هندسه نمونه مورد نظر در شکل (۷) نمایش داده شده است. در این نمونه ورق جان دارای ضخامت ۱ میلی‌متر بوده و از فولاد با تنش تسلیم پایین ST14 تهیه شده است.

با توجه به ضخامت نازک ورق جان در نمونه مورد آزمایش از جوشکاری با گاز CO₂ برای اتصال ورق جان به المان‌های مرزی قائم استفاده گردیده است تا ملاحظات جوشکاری متعارف با الکتروود دستی منجر به افزایش ضخامت ورق جان به دلیل حداقل ضخامت مورد نیاز جوشکاری و در نتیجه رشد بی‌رویه ابعاد المان‌های مرزی قائم (و افقی) نگردد. ورق جان در چهار سمت خود به غیر از ناحیه عدم اتصال در مجاورت المان مرزی قائم با جوش به المان‌های مرزی قائم و افقی متصل گردیده است. المان‌های مرزی مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی از فولاد ST44 تهیه گردیده و از مقطع زوج قوطی 2 × Box150 × 100 × 6 (ابعاد ارائه شده بر حسب میلی‌متر است) برای این اعضاء استفاده شده است. مشخصات مصالح مورد استفاده بر اساس نتایج آزمایش تست کشش در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات مصالح به کار رفته در نمونه آزمایشگاهی

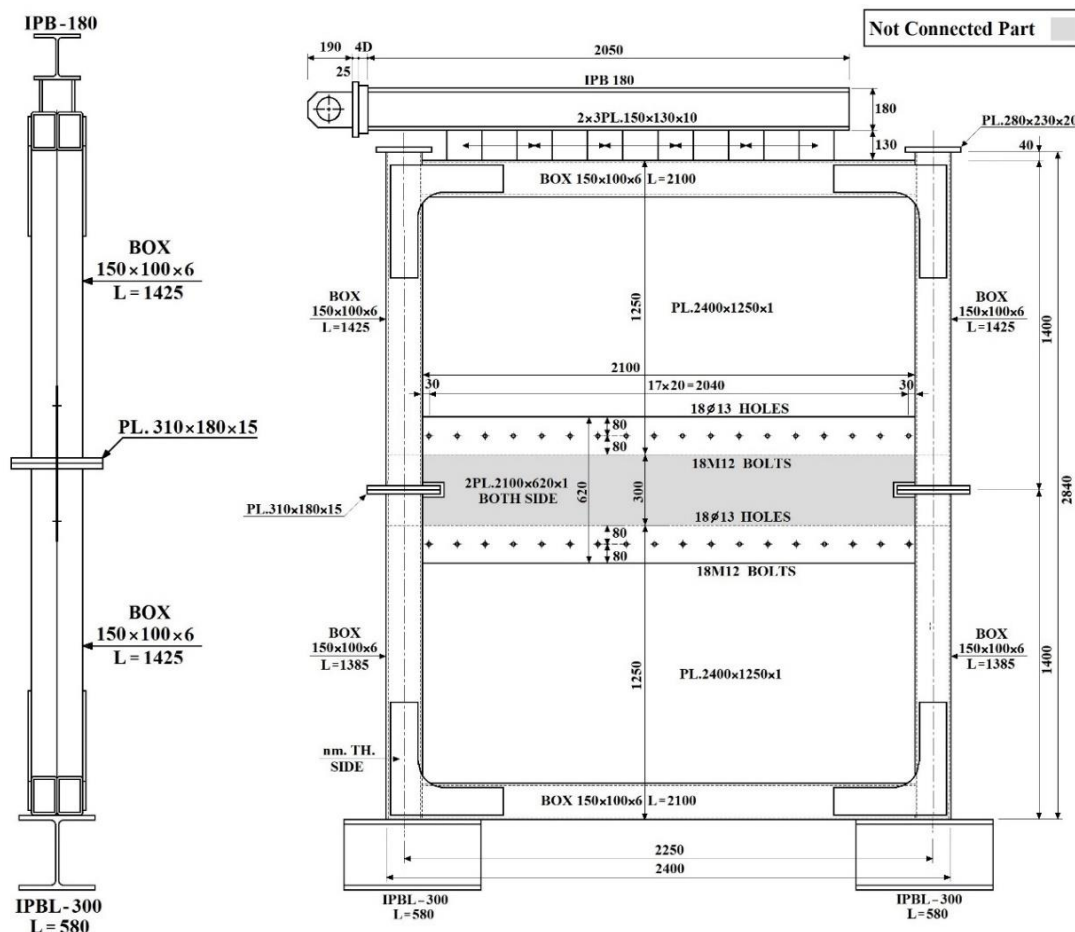
تنش نهایی (مگا پاسکال)	تنش تسلیم (مگا پاسکال)	مقطع	عضو
۴۴۰/۵	۴۲۰	2×Box150×100×6	المان مرزی
۳۱۹/۴	۱۸۱/۶	ورق ۱ میلی‌متر	ورق جان

طول عدم اتصال ورق جان به قسمت مرکزی المان مرزی همان طور که در شکل (۷) ارائه شده برابر با ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد ($NCR=30/(280-30)=0.12$). این نسبت به عنوان یک نسبت عدم اتصال کمتر از ۳۰ درصد جهت تحقیق فرض توازی نوارهای کششی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برپایش نمونه مورد آزمایش و جزئیات ناحیه غیر متصل ورق جان در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل ۶- وضعیت سطح تسلیم دیوار در دریفت ۱٪

لازم به توضیح است ساخت این نمونه و بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده بر روی آن که در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام شده است، دارای اهداف دیگری نیز بوده که در پژوهش دیگری مورد بررسی قرار گرفته است [۲۷] و در این پژوهش صرفاً نحوه تشکیل میدان کششی در ورق جان مد نظر بوده است. برای تعیین ابعاد نمونه آزمایشگاهی مورد نظر که ملاحظات یک طراحی واقعی را نمایندگی کند، پس از یک طراحی مقدماتی، یک مدل سازی



شکل ۷- جزئیات ابعادی نمونه مورد آزمایش [۲۷]

شکل (۹) تشکیل میدان کششی در چرخه چهاردهم بارگذاری را که منجر به تشکیل کامل میدان کششی در ورق جان گردید، نمایش می‌دهد. برای مشاهده امتداد موج‌های کمانشی (نوارهای کششی) از دسته خطوط موازی سیاه رنگ در این شکل استفاده گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود در نسبت عدم اتصال در نظر گرفته شده، نوارهای کششی عمدتاً موازی با یکدیگر در سرتاسر ورق جان شکل گرفته است.

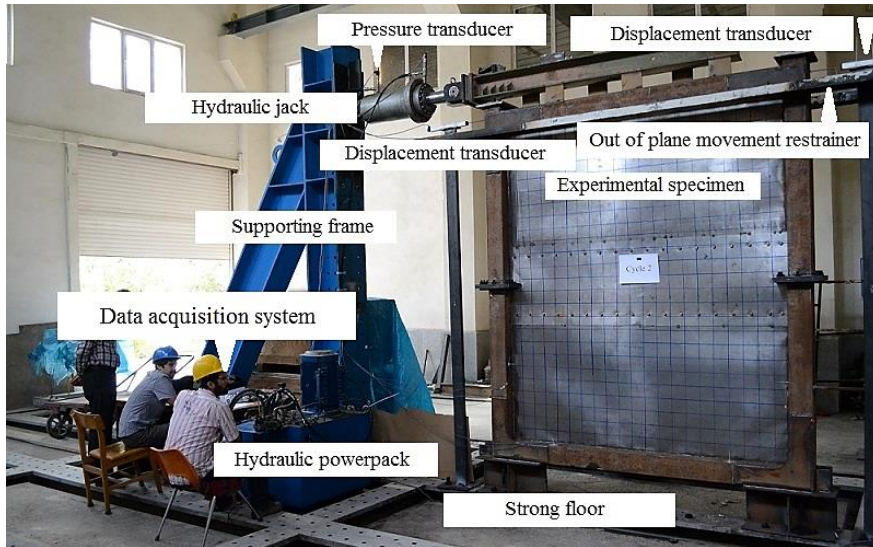
۵- نتایج تفصیلی مدل‌سازی عددی و ارائه روابط

تحلیلی

همانگونه که در شکل (۱۰) نمایش داده شده است، دو ناحیه بر روی ورق جان با توجه به وضعیت تشکیل میدان کششی در شکل (۶) قابل تفکیک می‌باشد. این دو ناحیه با نام‌های ناحیه مرکزی (CE) با رنگ آبی و ناحیه کناری (CO) با رنگ قرمز در شکل (۱۰) قابل تفکیک می‌باشد. همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، در این دو ناحیه به صورت مجزا نوارهای

نمونه مورد آزمایش از طریق اتصال جوشی به تیرهای تکیه‌گاهی متصل شده و این تیرها نیز از طریق اتصال پیچی به کف قوی آزمایشگاه متصل شده‌اند.

بارگذاری جانبی در بالای نمونه از طریق جک هیدرولیکی که بین نمونه و قاب عکس‌العمل آزمایشگاه نصب گردیده بود، بر روی نمونه اعمال گردید. بارگذاری جک مطابق با دستور العمل بارگذاری ATC 24 [۲۸] بر روی نمونه وارد گردید. از دو عدد سنسور اندازه‌گیری تغییر مکان (LVDT) در طرفین نمونه در تراز المان مرزی افقی فوقانی جهت ثبت تغییر مکان طبقه استفاده شده است و جهت اندازه‌گیری نیروی وارد به دیوار برشی فولادی نیز از دو عدد سنسور اندازه‌گیری فشار که بر روی جک هیدرولیکی نصب شده‌اند، استفاده گردید. قبل از اعمال بارگذاری بر روی دیوار برشی، سطح ورق جان جهت مشاهده بهتر موج‌های کمانشی و تعیین جهت تشکیل میدان کششی در آن به کمک خط‌های افقی و قائم با ابعاد 100×100 میلی‌متر شبکه بندی گردید.



الف) تصویر برپایش نمونه مورد آزمایش



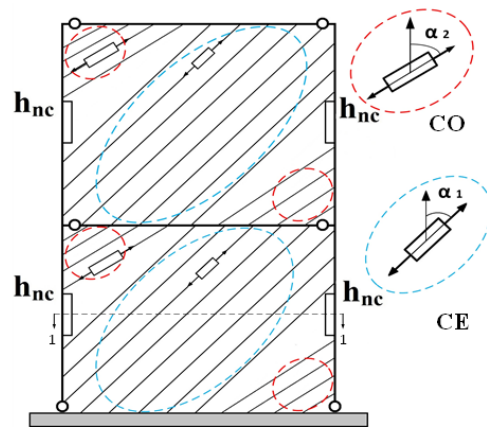
ب) تصویر ناحیه عدم اتصال ورق جان به المان مرزی قائم در نمونه ساخته شده
ج) تصویر ناحیه عدم اتصال ورق جان به المان مرزی قائم در مراحل ساخت و نصب نمونه

شکل ۸- جزئیات نمونه آزمایشگاهی [۲۷]



شکل ۹- شکل گیری تقریباً موازی نوارهای کششی در نمونه مورد آزمایش با نسبت عدم اتصال $NCR=0.12$ (جهت مشاهده امتداد نوارهای کششی از دسته خطوط موازی سیاه رنگ استفاده شده است.) [۲۷]

کششی به صورت تقریباً موازی شکل گرفته است. برای مطالعه توزیع تنش برشی در ناحیه میانی مورد بحث در این قسمت، توزیع نیروی برشی در امتداد واحد طول در سطح مقطع ۱-۱ در شکل (۱۰) که همان توزیع "جریان برش" در ادبیات فنی مقاومت مصالح می‌باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است این توزیع در واقعیت معادل توزیع مؤلفه افقی نیروی نوارهای کششی در قسمت میانی ورق جان در واحد طول می‌باشد و یکنواختی در آن، بیانگر یکنواختی میدان کششی در این ناحیه می‌باشد.



شکل ۱۰- تشکیل شماتیک میدان کششی در دیوارهای برشی فولادی با عدم اتصال کامل ورق جان به المان‌های مرزی قائم

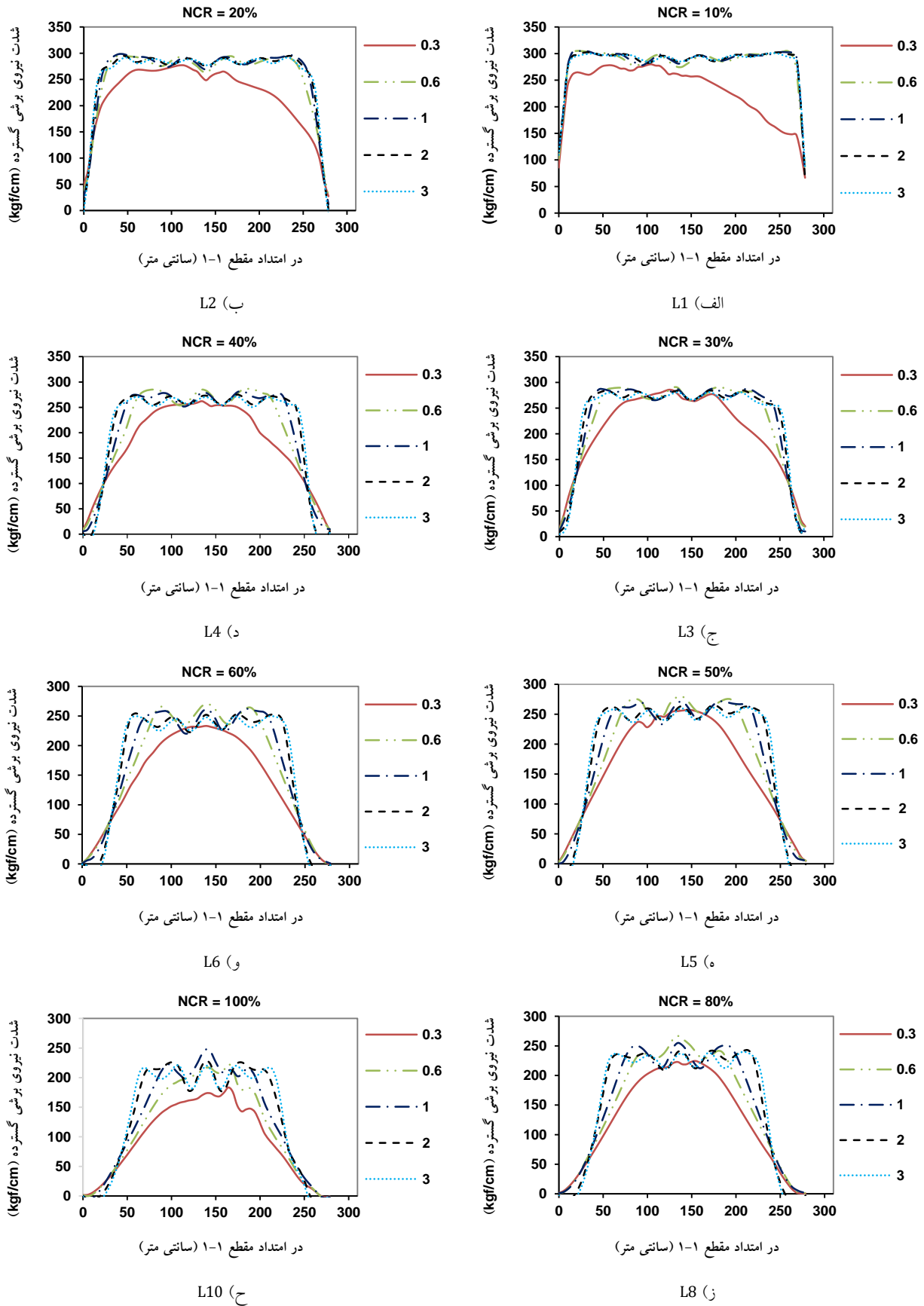
شکل (۱۱) توزیع جریان برش در سطح مقطع ۱-۱، معرفی شده در شکل (۱۰) را به صورت تابعی از درصد دررفت طبقه نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به غیر از نواحی مجاور طول متصل نشده ورق جان که توانایی بسیج تنش و مشارکت در باربری را ندارند، ناحیه مرکزی ورق جان دارای توزیع تقریباً یکنواخت جریان برش می‌باشد. لازم به توضیح است که همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، غیر یکنواختی موجود در توزیع جریان برش در ابتدای بارگذاری، با افزایش دررفت طبقه (به دلیل بازتوزیع تنش در ورق جان) تعدیل می‌شود. در رفتی که در آن تسلیم قابل توجه در ورق جان اتفاق می‌افتد تابعی از مشخصات مصالح ورق جان، هندسه نمونه، سختی المان‌های مرزی و ... می‌باشد. آیین‌نامه‌های طراحی معمولاً مقاومت تسلیم ورق جان را با تقسیم بر یک ضریب اضافه مقاومت، جهت در نظر گرفتن عدم تسلیم کامل ورق جان در دررفت‌های کمتر ارائه می‌کنند. به همین منظور در این پژوهش با توجه به شکل (۱۱) درصد دررفت ۰/۶ به عنوان دررفت تسلیم ورق جان در نظر گرفته شده

است و لازم به توضیح است که این دررفت بزرگ‌تر از دررفت محاسبه شده با استفاده از روابط مقاومت مصالح می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است توزیع جریان برش در طول سطح مقطع ۱-۱ از مقدار صفر شروع شده و پس از طی یک طول با مقدار تقریبی صفر به صورت قائم به یک پله (فلات) با ارتفاع تقریباً ثابت رسیده و مجدداً با یک افت سریع به صورت متقارن نسبت به محور مرکزی دیوار، به صفر می‌رسد. این مشاهده بیانگر آن است که توزیع تقریبی جریان برش (یا تنش با توجه به ثابت بودن ضخامت) در طول سطح مقطع ۱-۱ را می‌توان با تقریب مناسب بر اساس جزئیات ارائه شده در شکل (۱۲) ارائه کرد. همانطور که در شکل (۱۲) ارائه شده است، می‌توان مقاومت برشی (تسلیم) ورق جان دیوار را از ضرب مقدار جریان برشی متوسط (ارتفاع پله) (F_{X-ave}) در طول مؤثر تحمل کننده یا بسیج شونده تنش (l_{eff}) محاسبه کرد. آن چه در این مرحله حائز اهمیت می‌باشد، پیدا کردن رابطه‌ای برای این مقدار متوسط جریان برشی و طول مؤثر بسیج شونده تنش می‌باشد. با فرض به تسلیم رسیدن نوارهای تشکیل شده در میدان کششی ناحیه مرکزی ورق جان و نازک بودن این ورق که از ایجاد تنش فشاری قابل توجه ممانعت می‌کند، همان طور که در شکل (۱۲) نمایش داده شده است، با استفاده از معادله تعادل می‌توان فرض کرد مقدار متوسط جریان برشی در سطح مقطع ۱-۱ دارای مقداری برابر با رابطه (۱) می‌باشد. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که مستقل از نسبت عدم اتصال در ورق جان، توزیع تنش برشی در قسمت میانی ورق جان به صورت یکنواخت می‌باشد، اما از آنجا که با توجه به بررسی عددی و آزمایشگاهی تا نسبت عدم اتصال حدود ۳۰ درصد، میدان کششی به صورت تقریباً موازی در سراسر ورق جان شکل می‌گیرد، ادامه بحث بر اساس توازی نوارهای کششی در سرتاسر ورق جان در بازه مورد بحث مورد بررسی قرار می‌گیرد (تا ۳۰ درصد عدم اتصال) که نتیجه آن برابری زاویه α_1 و α_2 که از این به بعد α نامیده می‌شود، می‌باشد.

$$F_{X-ave} = \sigma_y \times \sin(\alpha) \times \cos(\alpha) \times t_w \quad (1)$$

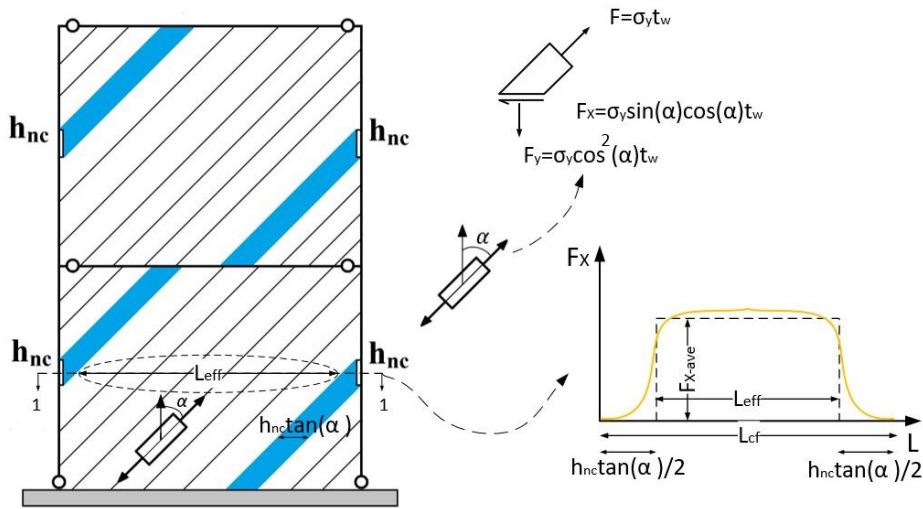
حاصل ضرب مقدار متوسط جریان برشی در طول پله مشخص شده در شکل (۱۲) (l_{eff}) ، برابر با مقاومت برشی بسیج شده در ورق جان می‌باشد. در این صورت بر اساس جزئیات ارائه شده در شکل (۱۲) مقدار طول مؤثر تنش در مقطع ۱-۱ دیوار برشی از رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد.

$$L_{eff} = L_{cf} - h_{nc} \tan(\alpha) \quad (2)$$



شکل ۱۱- توزیع جریان برشی در سطح مقطع ۱-۱ معرفی شده در شکل (۱۰) به صورت تابعی از درصد دررفت طبقه





شکل ۱۲- توزیع شماییک جریان برشی در در امتداد مقطع معرفی شده ۱-۱

انرژی کرنشی در رابطه حداقل کار لحاظ کرد. انرژی کرنشی ذخیره شده در ورق جان دیوار برابر است با:

$$W_{Web-nc} = \int \frac{\sigma^2}{2E} dV \quad (3)$$

با استفاده از فرض توازی نوارهای کششی و استفاده از رابطه تعادل، رابطه زیر بین نیروی برشی وارد بر طبقه و تنش نوارهای کششی برقرار است:

$$\sigma = \frac{V_m}{(L - h_{nc} \tan(\alpha)) \sin(\alpha) \cos(\alpha) t_w} \quad (4)$$

حجم مؤثر ورق جان در تحمل تنش برابر است با:

$$V = h t_w (L - h_{nc} \tan(\alpha)) \quad (5)$$

در نهایت انرژی کرنشی ذخیره شده در ورق جان به شرح زیر می‌باشد:

$$W_{Web-nc} = \frac{V_m^2 h (1 + \tan^2(\alpha))^2}{2E t_w (L - h_{nc} \tan(\alpha)) \tan^2(\alpha)} \quad (6)$$

با توجه به قضیه حداقل کار، مقدار بحرانی زاویه α با حداقل کردن انرژی کرنشی ذخیره شده در ورق جان از طریق مشتق گیری نسبت به زاویه α و برابر صفر دادن حاصل، مطابق رابطه محاسبه (۷) می‌گردد.

$$\frac{\partial W_{Total}}{\partial \alpha} = 0 \rightarrow \quad (7)$$

$$\frac{d}{d\alpha} \left(\frac{V_m^2}{2E} \left[\frac{h(1 + \tan^2(\alpha))^2}{t_w (L - h_{nc} \tan(\alpha)) \tan^2(\alpha)} \right] \right) = 0$$

گام بعدی، محاسبه زاویه تشکیل میدان کششی در ورق جان می‌باشد. زاویه تشکیل میدان کششی در ورق جان دیوارهای برشی سخت نشده برای اولین بار توسط Thorburn و Kulak [۲۹] و سپس با انجام اصلاحاتی توسط Timler و Kulak [۳۰] بر اساس روش کار حداقل ارائه گردید و نتایج کار آنها مورد استفاده آیین نامه AISC 341 [۳۱] قرار گرفت. می‌دانیم که تعادل سازه‌های معین از طریق معادلات استاتیکی برقرار می‌شود. در سازه‌های نامعین معادلات استاتیکی برای تحلیل سیستم کافی نبوده و نیاز به معادلات سازگاری نیز می‌باشد. در عمل، تعادل سازه‌های نامعین به صورتی برقرار می‌شود که انرژی کرنشی در آن حداقل گردد.

از این رو در این مطالعه نیز از روش کار حداقل برای محاسبه زاویه تشکیل میدان کششی در دیوارهای برشی فولادی با عدم اتصال کامل ورق جان به قسمت میانی المان‌های مرزی قائم با فرض نسبت عدم اتصال کوچکتر از ۳۰ درصد (که تضمین کننده شکل گیری نوارهای موازی در ورق جان دیوار برشی می‌باشد) استفاده می‌شود. از آنجا که المان‌های مرزی غالباً به نحوی طراحی می‌شوند که از سختی و مقاومت کافی برخوردار باشند، می‌توان آنها را به عنوان المان‌های صلب و بدون ذخیره انرژی کرنشی در نظر گرفت [۱۶] که البته در دیوار برشی پیشنهادی، کاهش تقاضای سختی مورد نیاز المان‌های مرزی قائم نسبت به مقدار لازم در آیین نامه AISC 341 [۳۱] تسهیل کننده این فرض می‌باشد.

با این توضیح زاویه جهت گیری میدان کشش در ورق جان را می‌توان تنها با لحاظ کردن سطح مؤثر ورق جان در محاسبات

$$A \tan^3(\alpha) + B \tan^2(\alpha) + C \tan(\alpha) + D = 0; \quad (9)$$

$$A = -\frac{h_{nc}}{h}, B = 2\frac{L}{h}, C = 3\frac{h_{nc}}{h}, D = -2\frac{L}{h}$$

لازم به توضیح است که V در جدول (۴) مقدار دقیق مقاومت برشی ورق جان بر اساس محاسبه مساحت زیر نمودار شکل (۱۱) در دریافت ۰/۶ درصد می‌باشد و $F_{X-ave} \times L_{eff}$ (kgf) مقدار پیش بینی شده مقاومت برشی ورق جان بر اساس روش پیشنهادی می‌باشد. همانطور که جدول (۴) نشان می‌دهد، این روش در محدوده مورد استفاده از دقت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. شکل (۱۳) نیز تطابق روش پیشنهادی با توزیع جریان برشی در مقطع میانی ورق جان (۱-۱) را به خوبی نشان می‌دهد.

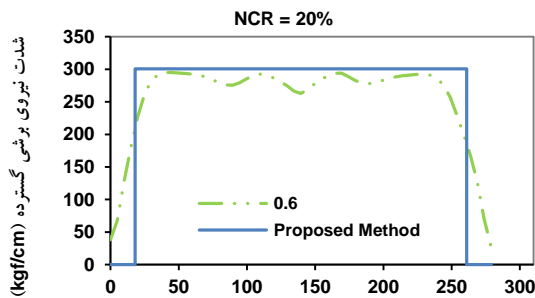
پس از محاسبه جملات حاصل از مشتق گیری، مطابق رابطه (۸) و ساده سازی آن، رابطه درجه ۳ برحسب $\tan(\alpha)$ با ضرایب ثابت که تابعی از مشخصات هندسی ورق جان می‌باشد، مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌گردد.

$$(1 + \tan^2(\alpha))^2 h \times \frac{(-h_{nc} \tan^3(\alpha) + 2L \tan^2(\alpha) + 3h_{nc} \tan(\alpha) - 2L)}{(L - h_{nc} \tan(\alpha))^2 t_w \tan^3(\alpha)} \quad (10)$$

حال با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۱) و روش پیشنهادی برای تعیین مقاومت برشی ورق جان که در شکل (۱۲) ارائه گردیده است، در جدول (۴) و شکل (۱۳) به صحت سنجی روابط (۱)، (۲) و (۹) پرداخته می‌شود.

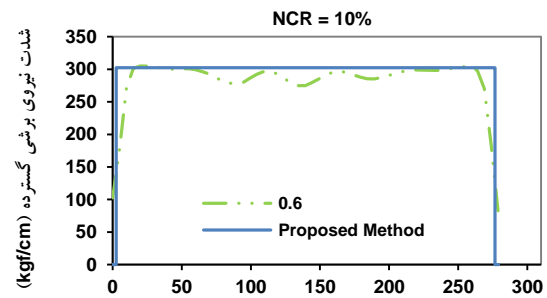
جدول ۴- صحت سنجی روابط (۱)، (۲) و (۹)

خطا (%)	$F_{X-ave} \times L_{eff}$ (kgf)	V (kgf)	F_{X-ave} (kgf/cm)	L_{eff} (cm)	$\tan(\alpha)$	L_{cf} (cm)	L (cm)	h (cm)	NCR (%)
۴/۲	۸۲۸۳۰/۲	۷۹۴۲۹	۳۰۲/۳	۲۷۴	۰/۹۴۳	۳۱۰	۳۴۲	۳۸۲	۱۰
۱/۲	۷۳۰۴۶	۷۲۱۲۸	۳۰۰/۶	۲۴۳	۰/۸۸۴	۳۱۰	۳۴۲	۳۸۲	۲۰
۰/۷	۶۴۲۱۶	۶۴۶۶۰	۲۹۷/۳	۲۱۶	۰/۸۲۴	۳۱۰	۳۴۲	۳۸۲	۳۰



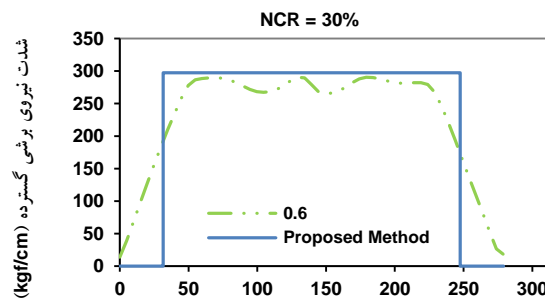
در امتداد مقطع ۱-۱ (سانتی متر)

L2 (ب)



در امتداد مقطع ۱-۱ (سانتی متر)

L1 (ف)



در امتداد مقطع ۱-۱ (سانتی متر)

L3 (ج)

شکل ۱۳- تطابق روش پیشنهادی با توزیع جریان برشی در مقطع میانی ورق جان (۱-۱)

۶- جزئیات اجرایی ناحیه عدم اتصال ورق جان

یک نکته قابل توجه در بحث اتصال ورق جان به المان مرزی قائم، بحث تمرکز تنش در محل شروع عدم اتصال ورق جان می‌باشد. شکل (۱۴) پارگی و جدایش این قسمت از ورق جان را به عنوان یکی از حالت‌های خرابی مشاهده شده در نمونه مورد بررسی در بند ۴، نشان می‌دهد. لازم به توضیح است علی‌رغم این جدایش، نمونه رفتار چرخه‌ای شکل پذیری [۳] و [۲۷] از خود نشان داده است. همچنین بررسی توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) به عنوان یک پارامتر پیش بینی کننده خرابی در مدل‌های توسعه داده شده در این مقاله نیز نمایانگر اختلاف قابل توجه مقادیر این پارامتر در مجاورت نواحی شروع عدم اتصال نسبت به سایر نواحی در ورق جان می‌باشد. مشاهدات فوق بیانگر نیاز به ارائه جزئیات مناسب در این ناحیه و یا محدود کردن ظرفیت تغییر مکان جانبی این سیستم جهت کنترل این حالت خرابی می‌باشد که به عنوان پژوهشی تکمیلی در ادامه قابل بررسی می‌باشد.



الف) مجاورت المان مرزی قائم سمت راست
ب) مجاورت المان مرزی قائم سمت چپ

شکل ۱۴- جدایش ورق جان در مجاورت ناحیه عدم اتصال از ستون‌های پیرامونی در نمونه آزمایشگاهی [۳]

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل سازی اجزاء محدود و بررسی آزمایشگاهی، به بررسی کیفیت تشکیل میدان کششی در ورق جان دیوارهای برشی فولادی با عدم اتصال کامل ورق جان به قسمت میانی المان مرزی قائم پرداخته شده است. اهم نتایج به دست آمده در این بررسی به شرح زیر می‌باشد:

- عدم اتصال ورق جان به المان مرزی قائم در قسمت میانی منجر به تغییر جهت نوارهای کششی ایجاد شده در ورق جان می‌گردد.

- اثر این عدم اتصال بر انحراف از شکل گیری نوارهای کششی تا نسبت عدم اتصال ۳۰٪ قابل صرف نظر کردن می‌باشد و در نسبت‌های بالاتر عدم اتصال، ورق جان به دو ناحیه با جهت گیری متفاوت نوارهای کششی، قابل تفکیک می‌باشد.

- برای اندازه گیری زاویه نوارهای کششی در ورق جان تا نسبت عدم اتصال ۳۰٪ با استفاده از روش حداقل کار، رابطه‌ای تحلیلی ارائه شد.

- برای تعیین مقاومت برشی ورق جان تا نسبت عدم اتصال ۳۰٪، رابطه‌ای تحلیلی ارائه گردید و هر دو رابطه فوق با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد راستی آزمایی قرار گرفت و نتایج، نمایش دهنده دقت بالای این روابط در پیش بینی رفتار ورق جان می‌باشد.

۷- مراجع

- [1] Astaneh-Asl, A. (2001), "Seismic behavior and design of steel plate shear walls", Steel TIPS Report-Structural Steel Educational Council, Moraga, California.
- [2] Shekastehband, B., Azaraxsh, A.A., Showkati, H. and Pavir, A. (2017), "Behavior of semi-supported steel shear walls: experimental and numerical simulations", Engineering Structures, Vol. 135, pp. 161-176.
- [3] Hajimirsadeghi, M., Mirtaheri, M., Zandi, A.P. and Hariri-Ardebilil, M.A. (2019), "Experimental cyclic test and failure modes of a full scale enhanced modular steel plate shear wall", Engineering Failure Analysis, Vol. 95, pp. 283-288.
- [4] Paslar, N., Farzampour, A. and Hatami, F. (2020), "Investigation of the infill plate boundary condition effects on the overall performance of the steel plate shear walls with circular openings", Structures, Vol. 27, pp. 824-836.
- [5] Cui, J.C., Xu, J.D., Xu, Z.R. and Huo, T. (2020), "Cyclic behavior study of high load-bearing capacity steel plate shear wall", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 172, pp. 106-178.
- [6] Berman, J.W., Lowes, L.N., Okazaki, T., Bruneau, M., Tsai, K.C., Driver, R.G., Sabelli, R. and Moore W.P. (2008), "Research needs and future directions for steel plate shear walls", In Proceeding of the Structures Congress.
- [7] Vian, D. and Bruneau, M. (2005), "Steel plate walls for seismic design and retrofit of building structures", Technical Report MCEER-05-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY.
- [8] Berman, J.W. and Bruneau, M. (2003), "Experimental investigation of light-gauge steel plate shear walls for the seismic retrofit of buildings", Technical Report MCEER-03-001, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- [9] Matteis, G.De., Mazzolani, F.M. and Panico, S. (2008), "Experimental tests on pure aluminum shear panels with welded stiffeners", Engineering Structures, Vol. 30, pp. 1734-1744.

- [24] Li, C.H., Tsai, K.C. and Lee, H.C. (2014), "Seismic design and testing of the bottom vertical boundary elements in steel plate shear walls, part 2: experimental studies", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 43, pp. 2155-2177.
- [25] Driver, R.G, Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L. and Elwi, A.E. (1997), "Seismic behavior of steel plate shear walls", *Structural Engineering Rep. No. 215*, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Alberta.
- [26] Webster, D.J., Berman, J.W. and Lowes, L.N. (2014), "Experimental investigation of SPSW web plate stress field development and vertical boundary element demand", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 140, pp. 785-796.
- [27] حاجی میرصادقی، م. (۱۳۹۳)، "ارزیابی تحلیلی و تجربی پانل‌های برشی مدولار فولادی با عناصر مرزی مستقل از ستون برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.
- [28] Krawinkler, H. (1992), Report No. ATC 24: Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures.
- [29] Thorburn L.J. (1982), "Analysis and design of steel shear wall Systems", Master Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton.
- [30] Timler, P.A. (1984), "Experimental study of steel plate shear walls", Master Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton.
- [31] AISC 341, (2016), "Seismic provisions for structural steel building", American Institute of Steel Construction.
- [۱۰] بافته‌چی، ه. (۱۳۹۳)، "ارزیابی تحلیلی و تجربی پانل‌های برشی آلومینیومی برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.
- [11] Astaneh-Asl, A. (2002), "Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls", *Steel TIPS Report*, Structural Steel Educational Council, Moraga, California.
- [12] Hitaka, T. and Matsui, C. (2003), "Experimental study on steel shear wall with slits", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, pp. 586-595.
- [13] Li, C.H., Tsai, 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", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 39, pp. 801-826.
- [14] Jahanpour, A., Jonson, J. and Moharrami, H. (2012), "Seismic behavior of semi-supported steel shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 74, pp. 118-133.
- [15] Qian, X. (2017), "Development of a high-performance steel plate shear wall system with an innovative gusset plate moment connection", Ph.D. Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley
- [16] Choi, I.R. and Park, H.G. (2009), "Steel plate shear walls with various infill plate designs", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, pp. 785-796.
- [17] Guo, L., Rong, Q., Ma, X. and Zhang, S. (2011), "Behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only", *International Journal of Steel Structures*, Vol. 11, pp. 467-479.
- [18] Zhao, Q. and Astaneh-Asl, A. (2004), "Cyclic behavior of an innovative steel shear wall system", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 2576.
- [19] Choi, I.R. and Park, H.G. (2010), "Cyclic loading test for reinforced concrete frame with thin steel infill plate", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, pp. 654-664.
- [20] Dastfan, M. (2011), "Ductile Steel Plate Shear Walls with PEC Columns", Ph.D. Thesis, University of Alberta, Edmonton.
- [21] Wei, M.W., Liew, J.Y.R. and Fu, X.Y. (2017), "Panel action of novel partially connected buckling-restrained steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 128, pp. 483-497.
- [22] Paslar, N., Farzampour, A. and Hatami, F. (2020), "Infill plate interconnection effects on the structural behavior of steel plate shear walls", *Thin-Walled Structures*, Vol. 149, pp. 106-621.
- [23] Berman, J.W. and Bruneau, M. (2008), "Capacity design of vertical boundary elements in steel plate shear walls", *Engineering Journal American Institute of Steel Construction*, Vol. 45, pp. 57-71.

پی نوشت

- 1 Shell
- 2 Abaqus S4R Element
- 3 Tie
- 4 Fish plate
- 5 Plateau

