

## Theoretical investigation of the middle panel in steel plate shear walls with two rectangular openings

Salaheddin Zabihi<sup>1</sup>, Arman Mamazizi<sup>2\*</sup>

1- M.Sc., Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

### ABSTRACT

The perforated steel plate shear wall is one of the different lateral load resisting systems. The steel plate shear wall system contains two rectangular openings, the middle panel between two openings has a major role in the energy absorption. In this paper, considering the middle panel similar to the link-beam of EBF and reviewing the existing theoretical formulas for anticipating the middle panel behaviour, a new condition related to the stiffness of web plate and stiffeners, which are located on the surrounding opening is added. The results show that the new added condition helps better identify the behaviour of the middle panel and to separate the boundaries of behaviour type. In addition, a formula with high accuracy is determined to calculate the shape factor of a section with box-shaped flanges. Furthermore, in accordance with obtained diagrams from triple conditions, the effects of six dimension parameters on the behaviour of the middle panel are investigated and the bounds of changing the behaviour type of the middle panel are determined. The results of the theoretical study show that the 64% increase in width, 47%, and 32% decrease in height and plate thickness of middle panel respectively and 100%, 14%, and 122% increase in height of web, flange width, and thickness of box stiffeners respectively changed the behaviour type of middle panel from flexural-dominant to shear-dominant. These obtained results were calculated only in the case of examining the relevant parameters.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 06 January 2021

**Revise Date:** 11 April 2021

**Accept Date:** 01 June 2021

### Keywords:

Steel Shear Wall

Rectangular Opening

Middle Panel

Link-Beam

Theoretical Behavior

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.265930.2328>

\*Corresponding author: Arman Mamazizi

Email address: a.mamazizi@uok.ac.ir

## بررسی تئوری رفتار پانل میانی دیوار برشی فولادی دارای دو بازشوی مستطیلی

صلاح‌الدین ذبیحی<sup>۱</sup>، آرمان مام‌عزیزی<sup>۲\*</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

### چکیده

دیوار برشی فولادی بازشودار یکی از انواع مختلف این سیستم باربر جانبی می باشد. در دیوار برشی فولادی دارای دو بازشوی مستطیلی، پانل میانی بین دو بازشو نقش عمده‌ای در میزان جذب انرژی دارد. میزان جذب انرژی پانل میانی بسته به نوع رفتار آن و بر اساس تسلیم ورق پانل یا سخت‌کننده‌های پیرامونی‌اش تغییر می‌یابد. در این پژوهش با مشابهت دادن پانل میانی به تیر پیوند مهاربندهای واگرا و بررسی روابط تئوریک موجود برای پیش‌بینی رفتار پانل میانی (بر اساس دو شرط مربوط به نیرو و تغییر مکان حد الاستیک)، شرط دیگری در ارتباط با سختی ورق و سخت‌کننده‌ها به دو شرط موجود اضافه و روابط تئوریک جدیدی جهت پیش‌بینی رفتار پانل میانی با سخت‌کننده‌های پیرامونی قوطی شکل ارائه شده‌است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شرط سوم اضافه شده، به تشخیص بهتر رفتار پانل میانی و تفکیک مرزهای تغییر رفتار کمک می‌کند. همچنین رابطه‌ای مناسب برای محاسبه‌ی ضریب شکل مقاطع با بال‌های قوطی به دست آمده‌است. در نهایت، با استفاده از نمودارهای مربوط به شروط سه‌گانه‌ی به دست آمده، تأثیر شش پارامتر ابعادی بر رفتار پانل میانی ارزیابی و حدود تغییر نوع رفتار پانل میانی محاسبه شده‌است. نتایج مطالعه‌ی پارامتریک نشان می‌دهد که افزایش ۶۴ درصدی پهنا، کاهش ۴۷ درصدی ارتفاع و ۳۲ درصدی ضخامت ورق پانل میانی، افزایش ۱۰۰ درصدی ارتفاع جان، ۱۴ درصدی پهناهای بال و ۱۲۲ درصدی ضخامت ورق سخت‌کننده‌ی قوطی شکل، سبب تغییر رفتار پانل میانی از "خمش‌ی در مرز ترکیبی" به "ترکیبی در مرز برشی" می‌شود. اعداد به دست آمده تنها در حالت بررسی پارامتر مربوطه و نسبت به اندازه‌ی آن پارامتر در پانل میانی با رفتار "خمش‌ی در مرز ترکیبی" صادق می‌باشند.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، بازشوی مستطیلی، پانل میانی، تیر پیوند

| شناسه دیجیتال: |   | سابقه مقاله: |                      |            |                 |            |
|----------------|---|--------------|----------------------|------------|-----------------|------------|
| doi:           | https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.265930.2328 | چاپ          | انتشار آنلاین        | پذیرش      | بازنگری         | دریافت     |
|                | 10.22065/jsce.2021.265930.2328                    | ۱۴۰۰/۱۰/۳۰   | ۱۴۰۰/۰۳/۱۱           | ۱۴۰۰/۰۳/۱۱ | ۱۴۰۰/۰۱/۲۲      | ۱۳۹۹/۱۰/۱۷ |
|                |   |              | آرمان مام‌عزیزی      |            | *نویسنده مسئول: |            |
|                |   |              | a.mamazizi@uok.ac.ir |            | پست الکترونیکی: |            |

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، زلزله و باد در ساختمان‌های بلند مرتبه به معضل جدی برای مهندسی سازه تبدیل شده‌است. به منظور مقابله با بارهای جانبی، سیستم‌های متنوعی با مشخصات مخصوصی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دیوار برشی فولادی<sup>۱</sup> از جدیدترین سیستم‌های باربر جانبی بوده که از سال‌های ۱۹۷۰ میلادی به بعد تمایل به استفاده از آن به عنوان سیستمی مقبول و مناسب، بیش‌تر و بیش‌تر شده‌است. وظیفه‌ی اصلی سیستم مقابله با نیروهای افقی کف طبقات و لنگر واژگونی منتج از نیروهای جانبی می‌باشد [۱].

در طراحی مناسب دیوار برشی فولادی، دستیابی به شکل‌پذیری و جذب انرژی زیاد توسط ورق نازک فراهم می‌شود. به علت دشواری تهیه‌ی چنین ورقی و به منظور کاهش سختی، از ورق‌های ضخیم‌تر و با بازشو استفاده می‌شود [۲]. از نقطه‌نظر معماری نیز استفاده از بازشوها با اندازه و موقعیت‌های مختلف در دیوار برشی فولادی از جمله مزایای مهم این سیستم می‌باشد [۳]. هم‌چنین سخت‌کننده‌ها به منظور دستیابی به عملکرد سازه‌ای بهتر در یک یا دو طرف ورق دیوار نصب و سبب ممانعت از کمانش کلی دیوار می‌شوند [۴].

اولین تئوری‌های پیش‌بینی رفتار هیستریزس دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده، بر اساس کارهای آزمایشگاهی و توسط ترومپوش و کولاک [۵] و رابرتز و صبوری [۶] ارائه شده‌است. نمونه‌ی بزرگ مقیاس و بدون سخت‌کننده‌ی آزمایش شده توسط تیملر و کولاک [۷]، رفتار شکل‌پذیر (شکل‌پذیری بیش‌تر از ۳/۵) و اضافه مقاومت بیش‌تر از ۲ را نشان داد. کاسز و همکاران [۸] دریافتند که استفاده از ورق نازک در یک قاب فولادی سبب افزایش سختی، ظرفیت باربری و جذب انرژی می‌شود. صبوری و سجادی [۹] با آزمایش بر روی دو نمونه دیوار برشی فولادی با و بدون سخت‌کننده و ورق با مقاومت پایین نتیجه گرفتند که نصب سخت‌کننده‌ها تأثیر کمی در مقاومت برشی دیوار داشته، اما تأثیر قابل توجهی در کاهش تغییر مکان تسلیم برشی ورق و افزایش سختی برشی آن و ظرفیت جذب انرژی سیستم دارد. حاجی میرصادقی و همکاران [۱۰] یک نمونه دیوار برشی مدولار تقویت‌شده<sup>۲</sup> برای افزایش سختی، قابلیت جذب انرژی و شکل‌پذیری قاب‌های موجود و بهسازی آن‌ها معرفی کردند. در تحقیقات انجام گرفته توسط قلهدکی و همکاران [۱۱] با مطالعه‌ی اثر اندازه‌ی چشمه‌ی سخت‌کننده‌ها بر روی رفتار غیر خطی سیستم دیوار برشی فولادی، میزان انرژی تلف شده محاسبه شده و در مطالعه‌ی دیگر توسط همان محققین [۱۲] با استفاده از آنالیز دینامیکی افزاینده، ضریب رفتار سیستم دیوار برشی فولادی در حالت حدی برای سازه‌های بلند و کوتاه مرتبه مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین یکی از پارامترهای مورد بررسی در این سیستم تعیین میزان شاخص خسارت می‌باشد [۱۳].

اولین تحقیق آزمایشگاهی بر روی دیوار برشی فولادی بازشودار توسط تاکاهاشی و همکاران [۱۴] انجام شده‌است. رابرتز و صبوری [۱۵] بیان کردند که در اثر وجود بازشوی دایره‌ای مرکزی به قطر  $D$ ، مقاومت نهایی و سختی پانل با اعمال ضریب کاهش  $(1-D/d)$  در مقاومت و سختی نمونه‌ی بدون بازشو محاسبه می‌شود. افشاری و قلهدکی [۲] با استفاده از تحلیل عددی، رابطه‌ی بدون بعد از مختصات بازشو برای پیش‌بینی دقیق کاهش مقاومت دیوار برشی با بازشوی دایره‌ای در محل‌های مختلف ارائه دادند. ولی‌زاده و همکاران [۱۶] نتیجه گرفتند، افزایش قطر بازشو و کاهش ضخامت ورق، سبب کاهش جذب انرژی و قرار دادن بازشو در مرکز پانل سبب بیش‌ترین کاهش جذب انرژی می‌شود. شکسته‌بند و همکاران [۱۷-۲۰] تحقیقات آزمایشگاهی، تئوریک و عددی مختلفی را بر روی دیوارهای برشی با اتصالات متنوع ورق به قاب پیرامونی، با ورق‌های با مقاومت پایین و یا بالا و با بازشو انجام دادند. شکسته‌بند و همکاران [۱۷] نتیجه گرفتند که افزایش قطر بازشو و کاهش ضخامت ورق، سبب کاهش مقاومت برشی سیستم می‌شود.

تحقیقات بر روی نمونه‌های با بازشوی مستطیلی توسط حسین‌زاده و تهرانی‌زاده [۲۱]، صبوری و همکاران [۲۲] و برخورداری و همکاران [۲۳] و مقایسه‌ی موارد با بازشوی مستطیلی و با بازشوی مربعی توسط سادات‌خلردی و همکاران [۲۴] انجام شده‌است. در تحقیقات آمده است که مقاومت نهایی و سختی سیستم به علت وجود بازشوی سخت‌شده افزایش و شکل‌پذیری کلی سیستم کاهش

<sup>1</sup> Steel plate shear wall

<sup>2</sup> Enhanced modular steel shear wall

می‌یابد [۲۱]. در پانل‌های سخت‌شده با یک بازشوی مستطیلی منفرد، کاهش سختی و مقاومت بستگی به موقعیت بازشو نداشته و در پانل‌های سخت‌نشده به علت وقوع کمانش کلی و شروع میدان کششی پس‌کمانش از مرکز ورق، اندازه‌ی تداخل بازشو با میدان کششی، بر کاهش مقاومت و سختی تأثیر گذاشته و بازشویی با کم‌ترین تداخل، بهینه‌ترین می‌باشد [۲۲]. دیوار با بازشوی مستطیلی مقاومت نهایی و سختی بیش‌تری به نسبت دیوار با بازشوی مربعی داشته و دیوار با بازشوی مربعی عموماً، جذب انرژی بیش‌تری دارد [۲۳]. موسوی و صبوری [۲۵] نیز به بررسی تئوری، عددی و آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با یک بازشوی مستطیلی در شکل هم ارتفاع با ارتفاع پانل دیوار پرداختند. ایجاد این نوع بازشو سبب به وجود آمدن دو دیوار برشی فولادی با یک ستون قوی و یک ستون ضعیف در دو طرف آن می‌شود. محققین دریافتند که در مجاورت ستون ضعیف، میدان کششی در بخش‌هایی از ورق تشکیل نمی‌شود [۲۵]. اخیراً هم مطالعات آزمایشگاهی و عددی برای مطالعه‌ی عملکرد سازه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی دارای بازشو انجام گرفته [۲۶-۲۸] و با روش‌هایی مانند سطح پاسخ، ظرفیت برشی این سیستم پیش‌بینی شده‌است [۲۹].

برای دیوار برشی فولادی دارای دو بازشوی مستطیلی، صبوری و مام‌عزیزی [۳] آزمایش‌هایی بر روی سه نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی انجام داده و نتیجه گرفتند مقاومت برشی نهایی، سختی برشی و جذب انرژی در هر سه نمونه با پهنای مؤثر یکسان، برابر و مستقل از موقعیت دو بازشو می‌باشد. صبوری و همکاران [۳۰] نیز در مطالعه‌ی تئوری و عددی توسط روش اجزاء محدود، روش جدید اندرکنش ورق و قاب<sup>۳</sup> برای پیش‌بینی مقاومت و سختی برشی دیوار برشی فولادی دارای دو بازشوی مستطیلی را ارائه کردند.

در این پژوهش با مطالعه‌ی اجمالی دیوار برشی فولادی دارای دو بازشوی مستطیلی و تیر پیوند مهاربندهای واگرا، پانل میانی به تیر پیوند مشابهت داده شده و رفتار آن بررسی شده‌است. روابط پیش‌بینی رفتار پانل میانی با سخت‌کننده‌های ورق شکل پیرامونی در مراجع [۳۱ و ۳۲] موجود است. مبنای آن روابط بر اساس تعیین دو شرط مربوط به نیرو و تغییر مکان حد الاستیک می‌باشد. از آن‌جا که روابط مذکور قابلیت تفکیک مرزهای تبدیل رفتاری به یکدیگر (برشی به ترکیبی و ترکیبی به خمشی) را نداشته، شرط سوم در ارتباط با نسبت سختی‌های ورق پانل میانی و سخت‌کننده‌ها به دو شرط موجود اضافه شده، روابطی جهت پیش‌بینی رفتار پانل میانی با سخت‌کننده‌های قوطی شکل استخراج و حدودی برای تعیین رفتار پانل میانی تحت تأثیر پارامترهای ابعادی ورق و سخت‌کننده‌ها ارائه شده‌است. هم‌چنین رابطه‌ی مناسب جهت محاسبه‌ی ضریب شکل مقاطع با بال‌های قوطی به دست آمده‌است. در بررسی تئوریک، شش پارامتر ابعادی پانل میانی و سخت‌کننده‌های قوطی شکل بر رفتار پانل میانی مؤثر بوده که به علت تأثیر گذاری هر کدام از آن‌ها، تنها بررسی تأثیر هر یک قابل مطالعه خواهد بود. لذا نمودارهای هر کدام از نسبت‌های مربوط به شروط سه‌گانه در مقابل نسبت مرتبط با پارامتر مورد بررسی رسم و حدود تغییر رفتار از آن‌ها به دست خواهد آمد.

## ۲- دیوار برشی فولادی با دو بازشوی مستطیلی و صحت سنجی نمونه‌ی آزمایشگاهی

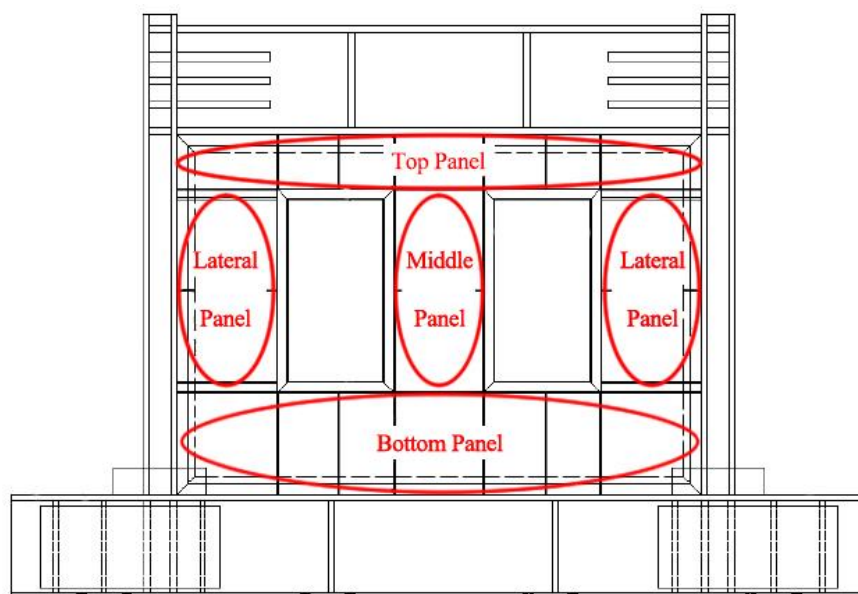
در صورت استفاده از دو بازشوی مستطیلی در دیوار برشی فولادی، ورق دیوار به تعدادی پانل تقسیم شده که پانل بین دو بازشو با عنوان پانل میانی شناخته می‌شود. مطابق با روش اندرکنش جدید ارائه شده توسط صبوری و همکاران [۳۰] و نیز بررسی آزمایشگاهی انجام شده توسط صبوری و مام‌عزیزی [۳]، پهنای پانل میانی تأثیری در سختی، مقاومت و قابلیت جذب انرژی نمونه‌های با پهنای مؤثر یکسان ندارد، در حالی که رفتار پانل میانی از نقطه‌نظر جذب انرژی حائز اهمیت است. در شکل ۱ نمونه‌ای از دیوار برشی فولادی با دو بازشوی مستطیلی و نام‌گذاری پانل‌های آن مطابق با مرجع [۳] نشان داده شده‌است.

در سیستم دیوار برشی فولادی بیش‌ترین اتلاف انرژی در پانل‌های میانی و پیرامونی رخ داده و مقدار آن به رفتار پانل‌ها بستگی دارد. در پانل‌هایی با رفتار غالب برشی مقدار جذب انرژی بیش‌تر است [۳]. برای تعیین رفتار پانل میانی سه محدوده‌ی رفتاری برشی، ترکیبی و خمشی در نظر گرفته می‌شود. به دلیل جذب انرژی بیشتر رفتار برشی بر خمشی ترجیح داده شده و می‌توان با افزایش پهنای پانل و یا کاهش ارتفاع آن به رفتار برشی نزدیک‌تر شد [۳۱ و ۳۲]. علی‌رغم آن‌که برای پانل میانی با سخت‌کننده‌های ورق شکل، روابط به

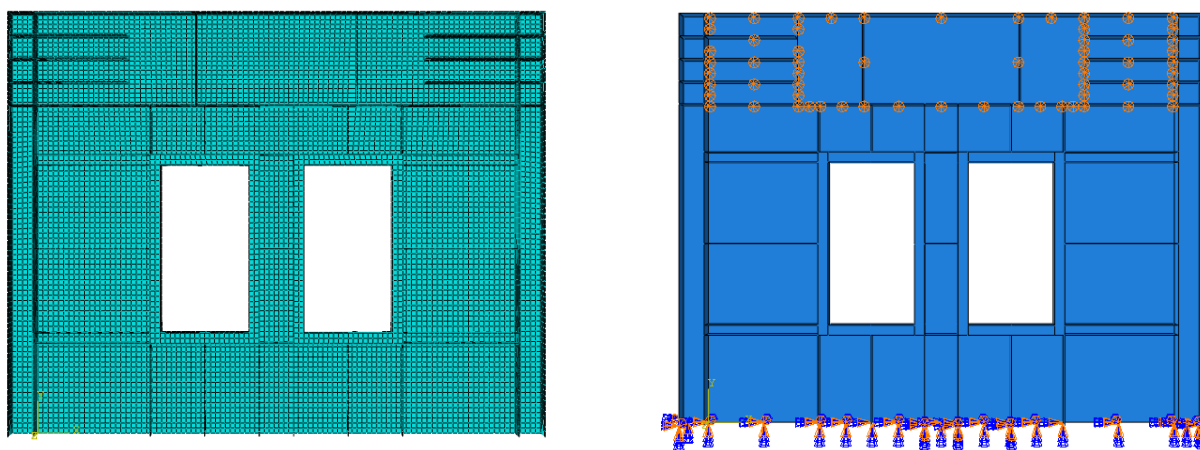
<sup>3</sup> New Plate Frame Interaction (PFI) model

دست آمده در مراجع [۳۱ و ۳۲] شامل ابعاد سخت‌کننده‌ها نبوده، لیکن ابعاد سخت‌کننده‌های قوطی شکل بر رفتار پانل میانی تأثیر داشته و باید در روابط وارد شوند.

در این مقاله یکی از مدل‌های آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی دارای دو بازشوی مستطیلی به نام SSW201 در مرجع [۳] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مطابق شکل ۲ مدل‌سازی شده و با مقایسه‌ی منحنی‌های هیستریزس مدل عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی در شکل ۳ و همچنین مشاهده‌ی تغییر شکل‌های حاصل از مدل عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی در شکل ۴، صحت‌سنجی مدل‌های عددی صورت گرفته است.



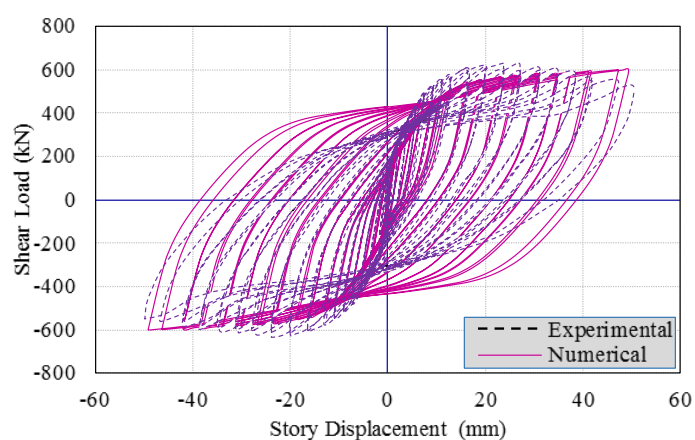
شکل ۱: نام‌گذاری پانل‌های مختلف در دیوار برشی فولادی با دو بازشوی مستطیلی [۳]



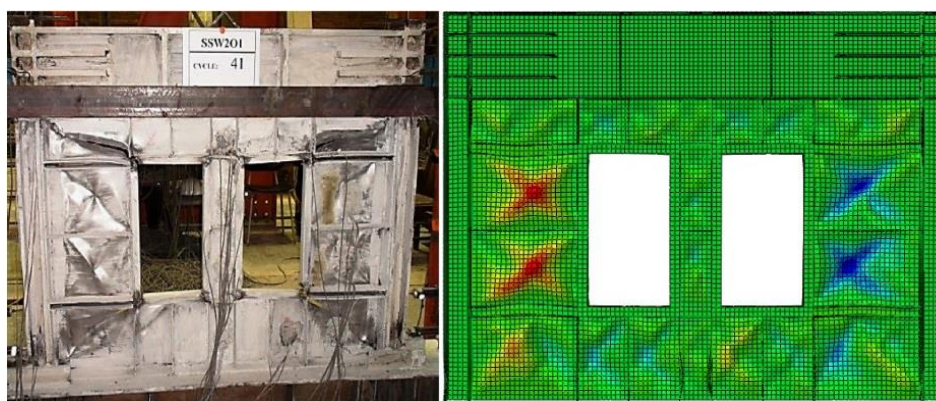
شکل ۲: نمونه‌ی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس (شرایط مرزی اعمال شده و مش بندی مدل)

جدول ۱: مشخصات مصالح مصرفی نمونه‌های آزمایش شده توسط صبوری و مام‌عیزی [۳]

| ضخامت ورق<br>( میلی‌متر ) | موقعیت استفاده        | مدول الاستیسیته<br>(مگاپاسکال) | تنش تسلیم<br>(مگاپاسکال) | تنش نهایی<br>(مگاپاسکال) | ازدیاد طول(%) |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| ۲                         | ورق دیوار             | ۲۰۶۰۰۰                         | ۱۸۹/۵                    | ۲۹۹/۹                    | ۴۶/۲          |
| ۱۵                        | بال ستون              | ۲۰۸۰۰۰                         | ۳۴۸/۲                    | ۵۲۱/۴                    | ۲۶/۹          |
| ۲۰                        | تیر                   | ۲۰۹۰۰۰                         | ۴۱۵/۷                    | ۵۵۷/۲                    | ۲۵/۲          |
| ۲                         | سخت‌کننده های جعبه‌ای | ۲۰۸۰۰۰                         | ۲۴۵/۲                    | ۳۸۴/۷                    | ۳۱/۲          |
| ۴                         | سخت‌کننده‌های روی ورق | ۲۰۸۰۰۰                         | ۲۴۵/۲                    | ۳۸۴/۷                    | ۳۱/۲          |



شکل ۳: مقایسه‌ی نمودارهای هیستریزیس به دست آمده از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی



ب

الف

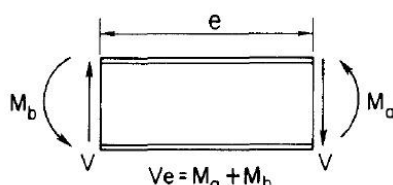
شکل ۴: تغییر مکان خارج از صفحه‌ی نمونه در الف) پایان تحلیل عددی و ب) پایان آزمایش

## ۳- مهاربند واگرا و تیر پیوند

در سیستم مهاربندی واگرا نیروهای محوری موجود در مهاربندهای قطری توسط خمش یا برش در بخشی از تیر که پیوند فعال<sup>۴</sup> نامیده شده، به ستون‌ها یا دیگر مهاربندها انتقال می‌یابد [۳۳]. قسمت‌های انتهایی پیوند تحت لنگرهای خمشی زیادی هستند؛ حال آن‌که در همه‌ی طول پیوند نیروی برشی بالایی وجود دارد [۳۴].

طول تیر پیوند نوع رفتار غالب آن را تعیین می‌کند [۳۵]. پیوند بسیار کوتاه ( پیوند برشی<sup>۵</sup> )، تحت بارگذاری جانبی افزایشی، با تشکیل مفاصل پلاستیک در برش تسلیم شده و تسلیم خمشی نسبتاً کمی در دو انتها دارد. بر خلاف آن، پیوندی که بسیار بلند بوده ( پیوند خمشی<sup>۶</sup> )، در دو انتهای خود تشکیل مفصل پلاستیک داده و در آن تسلیم برشی کمی دیده می‌شود. اگر طول در محدوده‌ی بین دو نوع رفتار ذکر شده باشد، پیوند تحت هر دو نوع تسلیم خمشی و برشی قرار می‌گیرد. به طور کلی رفتار برشی پیوندها ترجیح داده می‌شود [۳۴].

بر اساس روابط تعادل استاتیکی و نیز نیروهای اعمالی بر یک پیوند مجزا مطابق شکل ۵، رابطه‌ی بین برش و لنگر خمشی به صورت زیر ارائه می‌شود:



شکل ۵: تعادل استاتیکی و نیروهای اعمالی بر یک پیوند مجزا [۳۴]

$$Ve = M_a + M_b \quad (1)$$

$$\text{if } M_a = M_b = M \Rightarrow Ve = 2M \quad \text{or} \quad e = \frac{2M}{V} \quad (2)$$

نتایج آزمایشگاهی تیرهای پیوند نشان می‌دهد که تسلیم برشی جان مکانیزمی عالی برای جذب انرژی است. نمونه‌هایی که در برش تسلیم می‌شوند، قادر به تحمل تغییر شکل‌های غیر الاستیک بزرگ و جذب انرژی زیادی بوده و همه‌ی نمونه‌هایی که در خمش تسلیم شده، منجر به گسیختگی خواهند شد. هیچ‌کدام از نمونه‌های با تسلیم برشی، گسیخته نخواهند شد [۳۶]. بر اساس روابط کلاسیک و در نظر گرفتن تیر پیوند در شرایط حدی تسلیم، راجر و پوپوف [۳۶]، مالی و پوپوف [۳۳]، کاسای و پوپوف [۳۷] و انگلهارت و پوپوف [۳۸] روابطی برای محدوده‌ی رفتاری تیرهای پیوند ارائه کرده‌اند. رابطه‌ی کلی به صورت زیر است [۳۸]:

$$\frac{1.6M_p}{V_p} < e < \frac{3M_p}{V_p} \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)،  $e$  طول تیر پیوند،  $M_p$  و  $V_p$  به ترتیب لنگر و برش پلاستیک مقطع می‌باشند. پیوندهای با طول واقع در محدوده‌ی مذکور رفتار ترکیبی، با طول کم‌تر از حد پایین رفتار برشی و با طول بیش‌تر از حد بالا رفتار خمشی دارند.

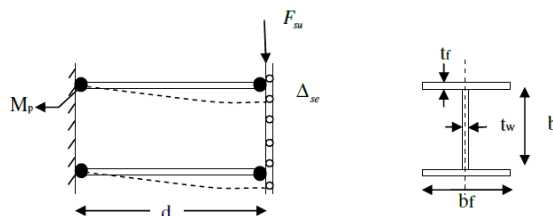
تیرگونه‌ها اعضایی تعریف می‌شوند که می‌توان آن‌ها را همانند یک تیر با دو تکیه‌گاه گیردار کامل و گیردار غلطکی در دو انتهای آن، با امکان عمل در برش، خمش و یا ترکیب آن‌ها، شبیه‌سازی کرد. علاوه بر روابط کلاسیک مذکور جهت پیش‌بینی رفتار تیر پیوند که بر

<sup>4</sup> Active Link

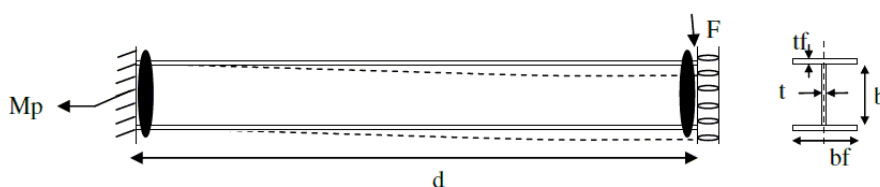
<sup>5</sup> Shear Link

<sup>6</sup> Moment Link

اساس ظرفیت نیرویی آن بوده، روابطی تکمیلی و با در نظر گرفتن تغییر مکان‌های تسلیم جان و بال تیر پیوند به دست می‌آید. در این روند، با تعریف تیر پیوند به صورت تیرگونه، در نظر گرفتن دو نوع عملکرد برشی و خمشی مطابق شکل‌های ۶ و ۷ و با استفاده از دو شرط مربوط به نیرو و تغییر مکان، روابطی برای تعیین رفتار تیر پیوند ارائه شده‌است. عملکرد برشی تیر پیوند مترادف با جاری شدن جان مقطع و عملکرد خمشی با تشکیل دو مفصل پلاستیک در دو انتهای تیر پیوند تعریف می‌شود [۳۹].



شکل ۶: عملکرد برشی در تیر پیوند به طول d [۳۹]



شکل ۷: عملکرد خمشی در تیر پیوند به طول d [۳۹]

#### ۴- تشابه رفتار پانل میانی و تیر پیوند

به جهت بررسی رفتار پانل میانی، ابتدا باید به تشابه ویژگی‌ها و نوع عملکرد آن با اعضای سازه‌ای مشابه و بررسی موارد تحلیلی و نظری مشترک پرداخت. همانطور که عنوان شد، مکانیزم و توانایی جذب انرژی چه در تیرهای پیوند و چه در پانل میانی، عامل مهمی در نحوه رفتار سیستم‌های مربوطه می‌باشد. لذا همانند تیر پیوند که در آن تسلیم برشی مکانیزم مناسبی برای جذب انرژی بوده، پانل میانی را نیز می‌توان به منظور رفتار بهینه‌ی برشی و جذب انرژی مناسب طراحی کرد.

با مشابهت نوع عملکرد تیر پیوند به یک دیوار برشی فولادی که در آن، جان پیوند به صورت ورق دیوار برشی و سخت‌کننده‌ها و بال‌ها به ترتیب به صورت تیرها و ستون‌های موجود در قاب فولادی اطراف دیوار عمل کرده، می‌توان روابطی برای تعیین تغییر مکان‌های برشی و خمشی حد الاستیک تیرهای پیوند به دست آورد [۴۰]. از جهت دیگر، پانل میانی که خود همانند یک دیوار برشی فولادی با ابعاد کم‌تر از ابعاد پانل اصلی عمل کرده را نیز می‌توان به یک تیر پیوند مشابهت داد. رفتار پانل میانی به صورت تیرگونه و همانند یک تیر پیوند با دو نیروی برشی مساوی و مخالف و دو لنگر مساوی و موافق در دو انتها در نظر گرفته شده و با استفاده از روابط کلاسیک نیرو و تغییر مکان پیش‌بینی خواهد شد [۳۱ و ۳۲]. هر چند که در به دست آوردن روابط تئوریک از این مشابهت رفتار تیر پیوند با پانل میانی استفاده شده است، اما وجود تفاوت‌های ذاتی بین آن‌ها باعث ایجاد خطا در روابط پیشنهادی می‌شود. بعضی از مهم‌ترین این تفاوت‌ها عبارتند از:

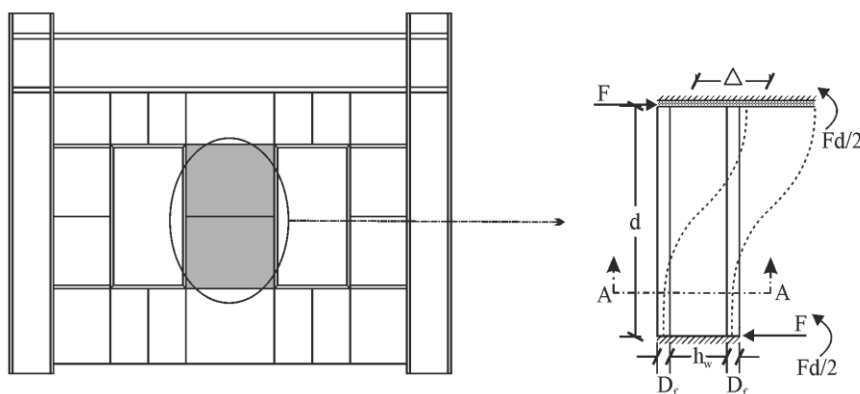
- ۱- در تیرهای پیوند امکان اعمال نیروی محوری برآمده از مؤلفه‌ی افقی نیروی محوری مهاربند، بر تیر پیوند وجود دارد؛ در حالی که بر مقطع پانل میانی نیروی محوری اعمال نمی‌شود.
- ۲- در تیرهای پیوند لزوماً لنگر دو انتها برابر نیست (برای تیر پیوندی که متصل به ستون است، لنگر سمت ستون بیشتر از سمت دیگر است)، اما در این مقاله لنگر دو انتهای پانل میانی برابر در نظر گرفته شده‌است.
- ۳- شرایط تکیه‌گاهی دو انتهای تیر پیوند، با شرایط تکیه‌گاهی دو انتهای پانل میانی متفاوت است. به این صورت که هر دو طرف تیر پیوند لزوماً دارای شرایط تکیه‌گاهی متفاوت نیستند (در یک قاب مهاربندی واگرای متقارن، شرایط تکیه‌گاهی دو طرف تیر پیوند یکسان می‌باشد)، در حالی که یک طرف پانل میانی تکیه‌گاه گیردار و سمت دیگر تکیه‌گاه گیردار غلطکی دارد.



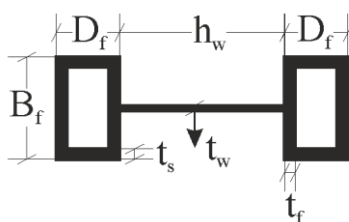
## ۵- رفتار پانل میانی با سخت‌کننده‌های قوطی شکل پیرامونی

تسلیم برشی جان یک تیر پیوند مترادف با رسیدن سطح گسترده‌ای از ورق جان به تنش تسلیم می‌باشد. حال آن‌که تسلیم خمشی که در بال‌های یک مقطع اتفاق افتاده، تنها شامل طولی نسبتاً کم از دو انتهای تیر بوده و به نسبت تسلیم برشی جان، سطح کم‌تری از ورق‌های بال را شامل می‌شود [۳۹]. با توجه به این‌که اجزای یک مقطع با تسلیم خود وارد مرحله‌ی غیر الاستیک و جذب انرژی شده، بیش‌تر بودن نواحی تسلیم در آن‌ها به معنای استفاده‌ی بیش‌تر از کارایی اجزاء در جذب انرژی و بهبود رفتار می‌باشد. همانند تیر پیوند و به دلیل ذکر شده تسلیم برشی ورق پانل میانی (جان تیر پیوند)، عملکرد مطلوب‌تری به نسبت تسلیم خمشی دو انتهای آن در سخت‌کننده‌ها دارد.

با شبیه‌سازی پانل میانی به همراه سخت‌کننده‌های قوطی شکل پیرامونی آن به یک تیرگونه، قسمت زیرین آن به صورت گیردار کامل و قسمت بالایی تنها به صورت گیردار غلطکی فرض شده که این شرایط تکیه‌گاهی باعث قابلیت تغییر مکان جانبی در قسمت فوقانی می‌شود. اگر نیروی جانبی  $F$  به قسمت بالایی پانل میانی وارد شده، نیروها و عکس‌العمل‌های به دست آمده مطابق شکل ۸ خواهد بود. مقطع تیر فرضی به دست آمده نیز مشابه شکل ۹ و به صورت تیر ورق با بال‌های قوطی می‌باشد.



شکل ۸: شبیه‌سازی پانل میانی با سخت‌کننده‌ی قوطی شکل پیرامونی به تیر فرضی تحت بار جانبی  $F$  و عکس‌العمل‌های آن



شکل ۹: مقطع A-A تیر فرضی پانل میانی با سخت‌کننده‌ی قوطی شکل پیرامونی

روابط ارائه شده‌ی قبلی تنها یکی از مرزهای رفتاری (مرز تبدیل رفتار برشی به رفتار خمشی) را تعیین کرده و رفتار ترکیبی را در نظر نمی‌گیرند. در این پژوهش علاوه بر دو شرط اول و دوم ذیل، شرط سوم مرتب با نسبت سختی ورق و سخت‌کننده‌ها اضافه شده و سه شرط اساسی برای تسلیم برشی ورق پانل میانی قبل از تسلیم خمشی سخت‌کننده‌های قوطی شکل پیرامون آن در نظر گرفته شده‌است.

- ۱- نیروی برشی حد الاستیک ورق پانل میانی کم‌تر از نیروی خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌های قوطی شکل باشد [۳۱ و ۳۲].
- ۲- تغییر مکان‌های برشی حد الاستیک در ورق پانل میانی، بیش‌تر از تغییر مکان‌های خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌های قوطی شکل باشد [۳۱ و ۳۲].

۳- سختی برشی ورق پانل میانی کم‌تر از سختی خمشی سخت‌کننده‌های قوطی شکل باشد.

در ادامه به محاسبه‌ی پارامترهای مورد نیاز برای شروط سه‌گانه پرداخته می‌شود. روابط به دست آمده با فرض عدم کمانش ورق پانل میانی قبل از تسلیم آن استخراج شده‌اند. روابط کلی در مرجع [۳۲] موجود بوده و در این پژوهش برای پانل میانی با سخت‌کننده‌های قوطی شکل، هر جا که لازم باشد، تغییر می‌یابد.

### ۱-۵- نیروی برشی حد الاستیک ورق پانل میانی

در صورت وقوع تسلیم ورق قبل از کمانش آن ( $\tau_{cr} = \tau_{yw} = \frac{\sigma_{yw}}{\sqrt{3}}$ )، نیروی برشی حد الاستیک ورق برابر با حاصل ضرب تنش تسلیم برشی ورق در سطح مقطع آن می‌باشد [۳۲]:

$$F_{se} = \tau_{yw} A_w = \tau_{yw} h_w t_w = \frac{\sigma_{yw}}{\sqrt{3}} h_w t_w \quad (۴)$$

در رابطه‌ی (۴)،  $F_{se}$  نیروی برشی حد الاستیک ورق،  $\tau_{yw}$  و  $\sigma_{yw}$  تنش تسلیم برشی و تنش تسلیم فولاد ورق،  $A_w$  سطح مقطع،  $h_w$  پهنا و  $t_w$  ضخامت ورق پانل میانی می‌باشند.

$$A_w = h_w t_w \quad (۵)$$

### ۲-۵- نیروی خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌های قوطی شکل

با توجه به شکل ۸، لنگر خمشی حاکم بر دو انتهای تیر برابر یک دوم نیروی برشی انتهایی ضرب در فاصله‌ی دو نیرو می‌باشد [۲۵].

$$M = \frac{F d}{2} \quad (۶)$$

تسلیم خمشی هنگامی اتفاق افتاده که مقطع بال‌ها به نهایت ظرفیت تسلیم خود برسد. در این صورت نیروی خمشی حد الاستیک بر اساس ظرفیت خمشی بال‌ها به دست خواهد آمد [۳۲].

$$M_f = \frac{F_{be} d}{2} \quad (۷)$$

$F_{be}$  نیروی خمشی حد الاستیک بال‌های مقطع و  $d$  ارتفاع پانل میانی می‌باشد. هم‌چنین  $M_f$  ظرفیت خمشی بال‌ها بوده و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$M_f = A_f (h_w + D_f) \sigma_{yf} \quad (۸)$$

در نهایت نیروی خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{be} = \frac{2A_f (h_w + D_f) \sigma_{yf}}{d} \quad (۹)$$

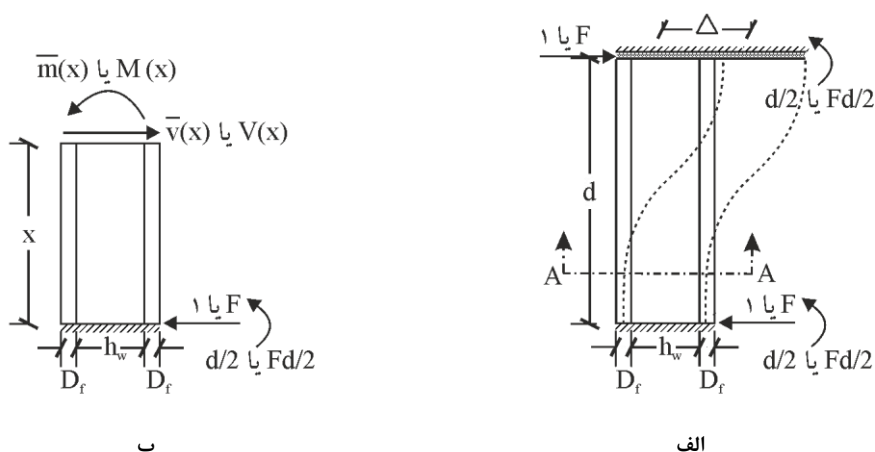
$\sigma_{yf}$  تنش تسلیم فولاد،  $D_f$  ارتفاع جان و  $A_f$  سطح مقطع سخت‌کننده‌ی قوطی شکل هستند.

## ۳-۵- تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق پانل میانی

تغییر مکان برشی حد الاستیک، تنها با در نظر گرفتن اثر تسلیم جان مقطع (ورق پانل میانی) و بر اساس اصل کار مجازی محاسبه خواهد شد. در صورت اعمال بار مجازی واحد و یا بار جانبی  $F$  به تیر فرضی مورد نظر، مطابق شکل ۱۰- الف، نیروهای برشی داخلی واقعی و مجازی مطابق شکل ۱۰- ب و بر اساس روابط (۱۰) و (۱۱) به دست خواهند آمد [۳۲].

$$V(x) = F \quad (10)$$

$$\bar{v}(x) = 1 \quad (11)$$



شکل ۱۰: الف) اعمال نیروی جانبی  $F$  یا مجازی واحد به تیر فرضی و عکس‌العمل‌های مربوطه و ب) نیروها و لنگرهای مجازی و واقعی داخلی در مقطعی به فاصله  $x$  از پایین تیر فرضی

بر اساس اصل کار مجازی و استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱)، تغییر مکان برشی واقعی از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۳۲]:

$$\Delta_s = K \int_0^d \frac{\bar{v}V}{GA} dx = K \int_0^d \frac{F}{GA} dx = K \frac{Fd}{GA} \quad (12)$$

تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق مطابق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۳۲]:

$$\Delta_{se} = K \frac{F_{se} d}{GA} = K \frac{\sigma_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3GA}} d \quad (13)$$

در روابط بالا  $G$  مدول برشی الاستیک فولاد،  $\bar{v}$  و  $V$  نیروهای برشی مجازی و حقیقی داخلی در اثر اعمال بار مجازی واحد و بار جانبی  $F$  و  $\Delta_s$  تغییر مکان برشی واقعی نقطه می‌باشد. همچنین  $A$  سطح مقطع تیر فرضی بوده و بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$A = A_w + 2A_f = t_w h_w + 4B_f t_f + 4D_f t_s - 8t_f t_s \quad (14)$$

$K$  ضریب شکل است که برای مقاطع مستطیلی برابر  $1/2$ ، برای مقاطع دایره‌ای برابر  $1/4$  و برای مقاطع I شکل (اگر  $A$  تنها مساحت جان باشد) برابر یک می‌باشد [۴۱]. پارامتر  $B_f$  پهنای بال سخت‌کننده‌ی قوطی شکل و  $t_s$  ضخامت بال و جان آن می‌باشند. در این پژوهش بر اساس روش مطابق با محاسبه‌ی تنش‌های برشی، رابطه‌ی برای ضریب شکل مقاطع با بال‌های قوطی ارائه خواهد شد. با تعریف تنش برشی به صورت رابطه‌ی (۱۵)، ضریب شکل مقطع بر اساس رابطه‌ی (۱۶) خواهد بود [۴۱].

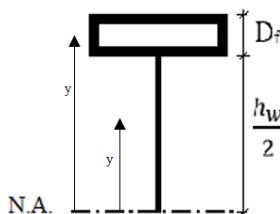
$$\tau_{xy}(y) = \frac{V_y Q(y)}{I_z t(y)} \quad (15)$$

$$K = \frac{A}{I_z^2} \iint_A \frac{Q^2(y)}{t^2(y)} dA \quad (16)$$

در روابط،  $Q(y)$  و  $I_z$  به ترتیب لنگر سطح و ممان اینرسی مقطع،  $V_y$  نیروی برشی و  $t(y)$  ضخامت محاسبه‌ی تنش برشی می‌باشند.

$$I_z = \left[ \frac{(B_f D_f^3) - ((B_f - 2t_s)(D_f - 2t_f)^3)}{6} + \left( \frac{A_f}{2} (D_f + h_w)^2 \right) \right] + \left[ \frac{t_w h_w^3}{12} \right] \quad (17)$$

برای مقطع با بال‌های قوطی پارامترهای متغیر و متأثر از ارتفاع، لنگر سطح مقطع در تراز محاسبه‌ی تنش برشی و ضخامت مربوطه می‌باشد. با تقریب خوبی به منظور صرف نظر کردن از بال‌های قوطی و تنها در نظر گرفتن مقدار لنگر سطح متغیر برای جان و جان قوطی و با انتخاب مقادیر  $y$  (مثبت) از محور خنثی به بالا (مطابق شکل ۱۱)، روابط به دست خواهند آمد.



شکل ۱۱: ارتفاعات متغیر جان و جان قوطی در محاسبه‌ی لنگر سطح متغیر

با استفاده از فرض گفته شده، رابطه‌ی (۱۶) به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$K = \frac{A}{I_z^2} \iint_A \frac{Q^2(y)}{t^2(y)} dA = \frac{A}{I_z^2} \left[ \iint_A \frac{Q_w^2(y)}{t^2(y)} dA + \iint_A \frac{Q_f^2(y)}{t^2(y)} dA \right] \quad (18)$$

در رابطه‌ی (۱۸)،  $Q_w(y)$  و  $Q_f(y)$  به ترتیب لنگر سطح متغیر در جان مقطع و لنگر سطح متغیر در جان قوطی می‌باشند.

برای محاسبه‌ی لنگر سطح متغیر بر حسب ارتفاع در جان مقطع، مقدار  $y$  از  $-\frac{h_w}{2}$  تا  $\frac{h_w}{2}$  متغیر خواهد بود. لذا:

$$Q_w(y) = A_f \left( \frac{h_w}{2} + \frac{D_f}{2} \right) + \frac{t_w}{2} \left( \frac{h_w}{2} - y \right) \left( \frac{h_w}{2} + y \right) = \frac{A_f}{2} (h_w + D_f) + \frac{t_w}{8} (h_w^2 - 4y^2) \quad (19)$$

با به توان دو رساندن لنگر سطح و انتگرال گیری از آن در بازه‌ی  $-\frac{h_w}{2}$  تا  $\frac{h_w}{2}$ ، رابطه‌ی زیر به دست خواهد آمد:

$$\int_{-h_w/2}^{+h_w/2} Q_w^2(y) dy = 2 \int_0^{+h_w/2} Q_w^2(y) dy$$

$$= 2 \left[ \frac{2t_w^2}{15} \left( \frac{h_w}{2} \right)^5 + \frac{2A_f t_w}{3} \left( \frac{h_w}{2} \right)^4 + A_f^2 \left( \frac{h_w}{2} \right)^3 + \frac{A_f D_f t_w}{3} \left( \frac{h_w}{2} \right)^3 + A_f^2 D_f \left( \frac{h_w}{2} \right)^2 + \frac{A_f^2 D_f^2}{4} \left( \frac{h_w}{2} \right) \right] \quad (20)$$

$$= \frac{h_w^5 t_w^2}{120} + \frac{h_w^4 t_w A_f}{12} + \frac{h_w^3 t_w A_f D_f}{12} + \frac{h_w^3 A_f^2}{4} + \frac{h_w^2 A_f^2 D_f}{2} + \frac{h_w A_f^2 D_f^2}{4}$$

$$t(y) = t_w \quad (21)$$

$$dA = t_w dy \quad (22)$$

برای محاسبه‌ی لنگر سطح در جان قوطی، مقدار  $y$  در بالای تار خنثی از  $\frac{h_w}{2} + t_f$  تا  $\frac{h_w}{2} + D_f - t_f$  و در پایین تار خنثی از  $(\frac{h_w}{2} + t_f) -$  تا  $(\frac{h_w}{2} + D_f - t_f) -$  متغیر خواهد بود. لنگر سطح در جان قوطی مطابق رابطه‌ی (۲۳) می‌باشد:

$$Q_f(y) = t_f (B_f - 2t_s) \left( \frac{h_w - t_f}{2} + D_f \right) + t_s \left( \left( \frac{h_w}{2} + D_f \right)^2 - y^2 \right) = t_f (B_f - 2t_s) \left( H - \frac{t_f}{2} \right) + t_s (H^2 - y^2) \quad (23)$$

با به توان دو رساندن مقدار  $Q_f(y)$  و انتگرال‌گیری از آن در دو بازه‌ی عنوان شده و تعریف پارامترهای زیر، رابطه‌ی (۲۵) به دست می‌آید.

$$a = \frac{h_w}{2} + t_f, \quad b = \frac{h_w}{2} + D_f - t_f, \quad H = \frac{h_w}{2} + D_f \quad (24)$$

$$\int_{\frac{h_w}{2} + t_f}^{\frac{h_w}{2} + D_f - t_f} Q_f^2(y) dy + \int_{-(\frac{h_w}{2} + t_f)}^{-(\frac{h_w}{2} + D_f - t_f)} Q_f^2(y) dy = 2 \int_{\frac{h_w}{2} + t_f}^{\frac{h_w}{2} + D_f - t_f} Q_f^2(y) dy = 2 \int_a^b Q_f^2(y) dy = -\frac{2t_s^2}{5} (a^5 - b^5) + \quad (25)$$

$$\frac{2t_s}{3} (a^3 - b^3) (2H^2 t_s + 2H(B - 2t_s)t_f - (B - 2t_s)t_f^2) - \frac{1}{2} (a - b) (2H^2 t_s + 2H(B - 2t_s)t_f - (B - 2t_s)t_f^2)^2$$

$$t(y) = 2t_s \quad (26)$$

$$dA = 2t_s dy \quad (27)$$

در نهایت ضریب شکل برای مقطع با بال‌های قوطی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{A}{I_z^2} \left[ 2 \int_0^{h_w/2} \frac{Q_w^2(y)}{(t_w)^2} t_w dy + 2 \int_{\frac{h_w}{2} + t_f}^{\frac{h_w}{2} + D_f - t_f} \frac{Q_f^2(y)}{(2t_s)^2} 2t_s dy \right] = \frac{A}{I_z^2} \left[ \frac{2}{t_w} \int_0^{h_w/2} Q_w^2(y) dy + \frac{1}{t_s} \int_a^b Q_f^2(y) dy \right] \quad (28)$$

$$K = \frac{A}{I_z^2} \left[ \frac{30A_f^2 h_w (D_f + h_w)^2 + 10A_f h_w^3 (D_f + h_w) t_w + h_w^5 t_w^2}{120t_w} - \frac{(a - b) (2H^2 t_s + 2H(B_f - 2t_s)t_f - (B_f - 2t_s)t_f^2)^2}{4t_s} \right] \quad (29)$$

$$\left[ -\frac{t_s}{5} (a^5 - b^5) + \frac{1}{3} (a^3 - b^3) (2H^2 t_s + 2H(B_f - 2t_s)t_f - (B_f - 2t_s)t_f^2) \right]$$

#### ۴-۵- تغییر مکان خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌های قوطی شکل

با توجه به شکل ۱۰-ب، لنگرهای خمشی واقعی و مجازی داخلی از روابط (۳۰) و (۳۱) به دست خواهند آمد:

$$M(x) = F \times \left( x - \frac{d}{2} \right) \quad (30)$$

$$\bar{m}(x) = 1 \times \left( x - \frac{d}{2} \right) \quad (31)$$

بر اساس روش کار مجازی و با توجه به روابط (۳۰) و (۳۱)، تغییر مکان خمشی واقعی برابر است با:

$$\Delta_f = \int_0^d \bar{m} \frac{M_z}{EI_z} dx = \int_0^d \left( x - \frac{d}{2} \right) \frac{F \left( x - \frac{d}{2} \right)}{EI_z} dx = \frac{F d^3}{12EI_z} \quad (32)$$

در رابطه‌ی (۳۲)،  $\bar{m}$  و  $M_z$  لنگرهای خمشی مجازی و حقیقی داخلی در اثر اعمال بار مجازی واحد و  $\Delta_f$  تغییر مکان خمشی واقعی نقطه می‌باشد.

تغییر مکان خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها با در نظر گرفتن نیروی خمشی حد الاستیک هنگام وقوع تسلیم در بال‌ها و با استفاده از اصل کار مجازی مشابه رابطه‌ی (۳۲) محاسبه می‌شود.

$$\Delta_{be} = \frac{F_{be} d^3}{12EI_z} = \frac{M_f d^2}{6EI_z} = \frac{A_f (h_w + D_f) \sigma_{yf}}{6EI_z} d^2 \quad (33)$$

با تقریب خوبی می‌توان از جان مقطع و ممان اینرسی سخت‌کننده‌ها حول محور خود، در محاسبه‌ی ممان اینرسی صرف نظر کرد.

$$I_{fz} = A_f \frac{(D_f + h_w)^2}{2} \quad (34)$$

$I_{fz}$  ممان اینرسی بال‌ها حول محور  $Z$  می‌باشد. در نتیجه:

$$\Delta_{be} = \frac{A_f (h_w + D_f) \sigma_{yf}}{6EI_{fz}} d^2 = \frac{\sigma_{yf}}{3E (h_w + D_f)} d^2 \quad (35)$$

## ۵-۵- بررسی شروط مورد نیاز

### ۵-۵-۱- شرط اول: نسبت نیروی خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها به نیروی برشی حد الاستیک ورق پانل میانی

مطابق تعریف، برای وقوع عملکرد برشی به عنوان اولین شرط لازم است که:

$$\frac{F_{be}}{F_{se}} > 1 \quad (36)$$

$$\frac{\sigma_{yw}}{\sqrt{3}} h_w t_w < \frac{2A_f (h_w + D_f) \sigma_{yf}}{d} \quad (37)$$

$$\frac{d}{(h_w + D_f)} < 2\sqrt{3} \left( \frac{A_f}{A_w} \right) \left( \frac{\sigma_{yf}}{\sigma_{yw}} \right) \quad (38)$$

### ۵-۵-۲- شرط دوم: نسبت تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق پانل میانی به تغییر مکان خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها

به عنوان دومین شرط برای وقوع عملکرد برشی لازم است که:

$$\frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} > 1 \quad (39)$$

$$K \frac{\sigma_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3GA}} d > \frac{\sigma_{yf}}{3E(h_w + D_f)} d^2 \quad (40)$$

اگر  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$  بوده، پس از ساده‌سازی رابطه‌ی زیر به دست خواهد آمد.

$$\frac{d}{(h_w + D_f)} < 2\sqrt{3}K \left( \frac{A_w}{A} \right) \left( \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{yf}} \right) \quad (41)$$

### ۳-۵-۵- شرط تغییر مکان یا نیرو کنترل بودن روابط ( نوع پانل )

برای تیرگونه‌ها، در مقاطعی که بال‌های نسبتاً قوی دارند، عمدتاً شرط حاکم بر عملکرد برشی، شرط مربوط به تغییر مکان‌ها و شرط کنترل‌کننده‌ی رفتار برشی در مقاطع با بال‌های نسبتاً ضعیف، شرط مربوط به نیروها می‌باشد [۳۹]. هرگاه شرط تعیین‌کننده‌ی رفتار مربوط به نیروها بوده، نسبت نیروی خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها به نیروی برشی حد الاستیک ورق کم‌تر از نسبت تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق به تغییر مکان خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها خواهد بود. در صورتی که نسبت مربوط به تغییر مکان‌ها کم‌تر از نسبت مربوط به نیروها بوده، شرط مربوط به تغییر مکان‌ها رفتار را کنترل می‌کند. لذا برای تیر فرضی مورد بررسی از طریق مقایسه‌ی نسبت‌های مربوط به نیرو و تغییر مکان‌ها، به روابطی برای ارزیابی رفتار بال‌های مقطع رسیده و رویکرد برخورد با پانل بر این اساس تعیین می‌شود.

#### مقاطع نیرو کنترل

$$\frac{F_{be}}{F_{se}} < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \quad (42)$$

$$\frac{2A_f (h_w + D_f) \sigma_{yf}}{d} < \frac{K \sigma_{yw} h_w t_w d}{\sqrt{3GA}} \quad (43)$$

$$\frac{\sigma_{yw}}{\sqrt{3}} h_w t_w < \frac{A_f (h_w + D_f) \sigma_{yf}}{6EI_{fz}} d^2$$

در نهایت رابطه‌ای بر اساس نسبت مساحت بال به جان به دست می‌آید:

$$\frac{A_f}{A_w} < \left( \frac{1}{(h_w + D_f)} \right) \left( \frac{\sigma_{yw}}{\sigma_{yf}} \right) \sqrt{K \frac{EI_{fz}}{GA}} \quad (44)$$

عبارت سمت راست رابطه‌ی بالا که به مشخصات مقطع و جنس فولاد به کار رفته بستگی داشته، با عنوان  $A_{re}$  نام‌گذاری شده و نسبت مساحت بال به جان نیز  $A_r = \frac{A_f}{A_w}$  می‌باشد. در این صورت اگر:

$$A_r \leq A_{re} \quad (45)$$

مقطع دارای بال نسبتاً ضعیف بوده و نیرو کنترل می‌باشد. هم‌چنین اگر:

$$A_r > A_{re} \quad (46)$$

مقطع دارای بال نسبتاً قوی بوده و تغییر مکان کنترل می‌باشد.

### ۴-۵-۵- شرط سوم: نسبت سختی خمشی سخت‌کننده‌ها به سختی برشی ورق پانل میانی

همانطور که عنوان شد، مقاطع می‌توانند نیرو کنترل و یا تغییر مکان کنترل باشند. در این صورت تنها یکی از شروط مربوط به نیرو یا تغییر مکان قابل اتکا بوده و شرط دوم توانایی پیش‌بینی رفتار را نخواهد داشت. با تعریف سختی خمشی سخت‌کننده‌ها به صورت نسبت نیروی خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها به تغییر مکان مربوطه و سختی برشی ورق به صورت نسبت نیروی برشی حد الاستیک ورق به تغییر مکان مربوطه‌ی آن، شرط سوم به صورت زیر ارائه خواهد شد.

$$K_b > K_s \quad (47)$$

$$K_b = \frac{F_{be}}{\Delta_{be}} = \frac{12EI_{fz}}{d^3} \quad (48)$$

$$K_s = \frac{F_{se}}{\Delta_{se}} = \frac{GA}{Kd} \quad (49)$$

در روابط بالا  $K_b$  و  $K_s$  به ترتیب سختی برشی ورق پانل میانی و سختی خمشی سخت کننده‌های قوطی شکل می‌باشند. در نهایت شرط سوم مربوط به نسبت سختی‌ها مطابق رابطه‌ی زیر تعریف خواهد شد.

$$d < \sqrt{\frac{12KEI_{fz}}{GA}} \quad (50)$$

به منظور تعیین رفتار یک پانل میانی مشخص و موجود با سخت کننده‌های قوطی شکل پیرامونی ابتدا لازم است نوع آن با توجه به رابطه‌ی (44) تعیین شود. سپس اگر پانل نیروکنترل بوده رابطه‌ی (38) و اگر تغییر مکان کنترل بوده رابطه‌ی (41)، هرکدام به همراه رابطه‌ی (50) کنترل خواهد شد. برای پانلی نیروکنترل برقراری روابط (38) و (50) رفتار برشی، عدم برقراری رابطه‌ی (38) و برقراری رابطه‌ی (50) رفتار ترکیبی و عدم برقراری هیچ‌کدام از دو رابطه‌ی مذکور رفتار خمشی را نتیجه می‌دهد. در پانل‌های تغییر مکان کنترل، برقراری روابط (41) و (50) به معنای رفتار برشی، عدم برقراری رابطه‌ی (41) و برقراری رابطه‌ی (50) به معنای رفتار ترکیبی و عدم برقراری هیچ‌کدام از دو رابطه‌ی مذکور به معنای رفتار خمشی می‌باشد.

روابط (38)، (41)، (44) و (50) به دست آمده از شروط سه‌گانه، هرکدام شامل پارامترهای مختلف وابسته به ویژگی‌های پانل میانی و سخت کننده‌های قوطی شکل می‌باشند. علی‌رغم حالت موجود برای پانل میانی با سخت کننده‌های ورق شکل، نمی‌توان به روابطی ساده به منظور تعیین حدود رفتار پانل میانی دست یافته و یا تأثیر دو یا چند پارامتر را با هم در نظر گرفت. در نتیجه برای بررسی رفتار پانل میانی هرکدام از پارامترهای آن و سخت کننده‌های قوطی شکل شامل 6 عدد (در تحقیق حاضر ضخامت‌های بال و جان سخت کننده‌ی قوطی شکل با هم برابر و با عنوان  $t_b$  است)، در نظر گرفته شود. به این صورت که هنگام بررسی هر پارامتر، بقیه‌ی پارامترها ثابت بوده و رفتار پانل میانی و مرزهای تبدیل رفتاری، متناسب با پارامتر مربوطه به دست خواهد آمد.

با در نظر گرفتن هرکدام از پانل‌های نیروکنترل و یا تغییر مکان کنترل، می‌توان برای هر سه محدوده‌ی رفتاری برشی، ترکیبی و یا خمشی روابطی مناسب بین نسبت‌های مربوط به نیروها، تغییر مکان‌ها و سختی‌ها برقرار کرد.

$$\left( \frac{F_{be}}{F_{se}} < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \right) \text{ پانل‌های نیرو کنترل}$$

۱- رفتار برشی

$$1 < \frac{F_{be}}{F_{se}} \rightarrow 1 < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}}, \quad 1 < \frac{K_b}{K_s} = \frac{F_{be} \Delta_{se}}{F_{se} \Delta_{be}} \quad (51)$$

$$1 < \frac{F_{be}}{F_{se}}, \quad 1 \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < \frac{F_{be}}{F_{se}} \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \rightarrow \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < \frac{F_{be}}{F_{se}} \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} = \frac{K_b}{K_s} \quad (52)$$

$$1 < \frac{F_{be}}{F_{se}} < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < \frac{K_b}{K_s} \quad (53)$$

۲- رفتار ترکیبی



$$\frac{F_{be}}{F_{se}} < 1, \quad 1 < \frac{K_b}{K_s} \quad (54)$$

$$\frac{F_{be}}{F_{se}} < 1, \quad \frac{F_{be}}{F_{se}} \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < 1 \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \rightarrow \frac{F_{be}}{F_{se}} \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} = \frac{K_b}{K_s} < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \quad (55)$$

$$\frac{F_{be}}{F_{se}} < 1 < \frac{K_b}{K_s} < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \quad (56)$$

۳- رفتار خمشی

$$\frac{F_{be}}{F_{se}} < 1, \quad \frac{K_b}{K_s} < 1 \quad (57)$$

$$\frac{F_{be}}{F_{se}} < 1, \quad \frac{F_{be}}{F_{se}} \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < 1 \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \rightarrow \frac{F_{be}}{F_{se}} \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} = \frac{K_b}{K_s} < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \quad (58)$$

پانل‌های تغییر مکان کنترل ( $\frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < \frac{F_{be}}{F_{se}}$ )

۱- رفتار برشی

$$1 < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \rightarrow 1 < \frac{F_{be}}{F_{se}}, \quad 1 < \frac{K_b}{K_s} = \frac{F_{be} \Delta_{se}}{F_{se} \Delta_{be}} \quad (59)$$

$$1 < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}}, \quad 1 \times \frac{F_{be}}{F_{se}} < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \times \frac{F_{be}}{F_{se}} \rightarrow \frac{F_{be}}{F_{se}} < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \times \frac{F_{be}}{F_{se}} = \frac{K_b}{K_s} \quad (60)$$

$$1 < \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < \frac{F_{be}}{F_{se}} < \frac{K_b}{K_s} \quad (61)$$

۲- رفتار ترکیبی

$$\frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < 1, \quad 1 < \frac{K_b}{K_s} \quad (62)$$

$$\frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < 1, \quad \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \times \frac{F_{be}}{F_{se}} < 1 \times \frac{F_{be}}{F_{se}} \rightarrow \frac{F_{be}}{F_{se}} \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} = \frac{K_b}{K_s} < \frac{F_{be}}{F_{se}} \quad (63)$$

$$\frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < 1 < \frac{K_b}{K_s} < \frac{F_{be}}{F_{se}} \quad (64)$$

۳- رفتار خمشی

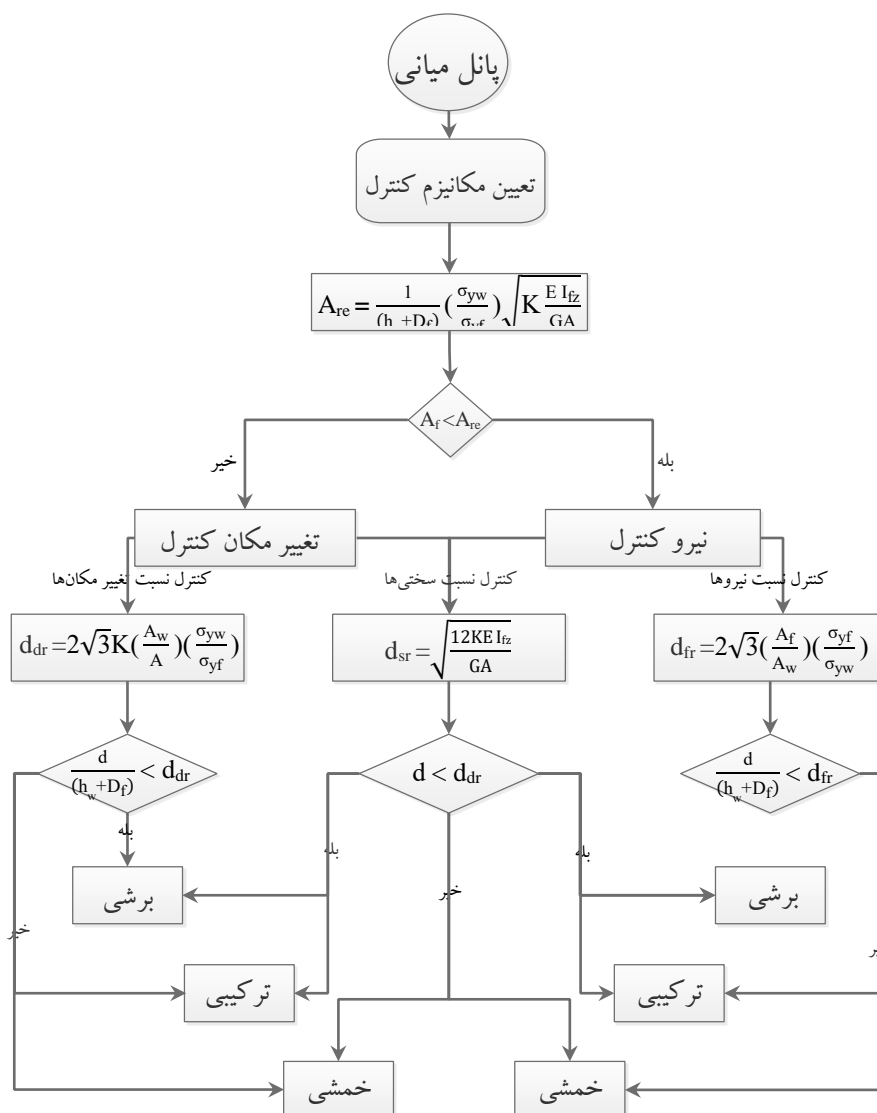
$$\frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < 1, \quad \frac{K_b}{K_s} < 1 \quad (65)$$

$$\frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} < 1, \quad \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} \times \frac{F_{be}}{F_{se}} < 1 \times \frac{F_{be}}{F_{se}} \rightarrow \frac{F_{be}}{F_{se}} \times \frac{\Delta_{se}}{\Delta_{be}} = \frac{K_b}{K_s} < \frac{F_{be}}{F_{se}} \quad (66)$$

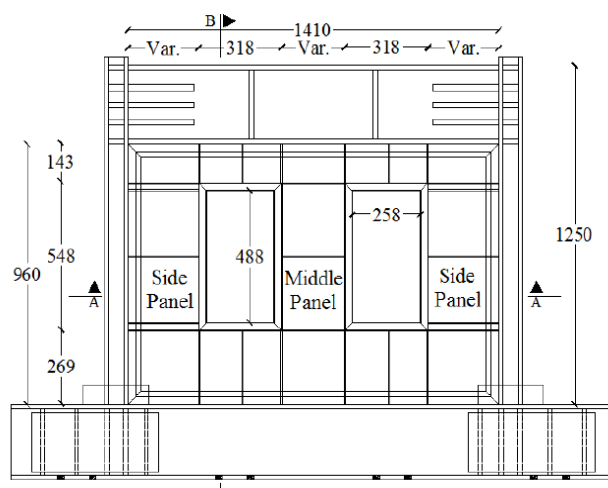
بر اساس روابط به دست آمده الگوریتم پیش بینی نوع رفتار پانل میانی بر اساس شکل ۱۲ بیان شده است.

## ۶- بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار پانل میانی

در بررسی‌های تئوری جهت تعیین تأثیر هر یک از پارامترهای پانل میانی و یا سخت‌کننده‌ی قوطی شکل بر رفتار پانل میانی، پارامتر مورد نظر متغیر در نظر گرفته شده و بقیه‌ی پارامترها مطابق جدول ۲ ثابت فرض می‌شوند. پانل میانی و سخت‌کننده‌ی قوطی شکل پیرامون آن، در یک دیوار برشی فولادی دارای دو بازشوی مستطیلی مشابه شکل ۱۳ قرار داشته که به عنوان تیر فرضی مطابق بخش ۵ در نظر گرفته می‌شوند. سپس با استفاده از روابط بخش مذکور، نمودارهای نسبت تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق به تغییر مکان خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها، نسبت نیروی خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها به نیروی برشی حد الاستیک ورق و نسبت سختی خمشی سخت‌کننده‌ها به سختی برشی ورق در مقابل نسبت مرتبط با پارامتر مورد بررسی رسم و حدودی جهت تعیین مرزهای تبدیل رفتار برشی به ترکیبی و ترکیبی به خمشی تعیین خواهد شد. همچنین تأثیر هر پارامتر بر روند رفتاری پانل میانی بررسی می‌شود. پارامترها به دو دسته‌ی مربوط به ورق پانل میانی و مربوط به سخت‌کننده‌ی قوطی شکل تقسیم‌بندی می‌شوند.



شکل ۱۲: نمودار شماتیک تعیین رفتار پانل میانی با سخت‌کننده‌های قوطی شکل پیرامونی



شکل ۱۳: مشخصات و ابعاد دیوار برشی فولادی با دو بازشوی مستطیلی، مدل شده توسط صبوری و همکاران [۳۰]

در جدول ۲ ابعاد پارامترهای مختلف در مقابل پارامتر مورد بررسی یادداشت شده است.

جدول ۲: ابعاد پارامترهای مختلف پانل میانی و سخت کننده های قوطی شکل در بررسی تأثیر هر کدام از پارامترها

| پارامترها            | $h_w$ (mm) | $d$ (mm) | $t_w$ (mm) | $D_f$ (mm) | $B_f$ (mm) | $t_b$ (mm) |
|----------------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| پهنای پانل میانی     | متغیر      | ۵۴۸      | ۲          | ۳۰         | ۶۰         | ۲          |
| ارتفاع پانل میانی    | ۱۰۰        | متغیر    | ۲          | ۳۰         | ۶۰         | ۲          |
| ضخامت ورق پانل میانی | ۲۳۸        | ۵۴۸      | متغیر      | ۳۰         | ۶۰         | ۲          |
| ارتفاع جان سخت کننده | ۲۰۰        | ۵۴۸      | ۲          | متغیر      | ۴۰         | ۲          |
| پهنای بال سخت کننده  | ۱۸۰        | ۵۴۸      | ۲          | ۲۵         | متغیر      | ۲          |
| ضخامت ورق سخت کننده  | ۳۲۰        | ۵۴۸      | ۳          | ۳۰         | ۶۰         | متغیر      |

## ۱-۶-۱ پارامترهای مربوط به ورق پانل میانی

### ۱-۶-۱-۱ بررسی تأثیر نسبت ارتفاع به پهنای پانل میانی ( $\frac{d}{h_w}$ )

#### ۱-۶-۱-۱-الف- متأثر از تغییر پهنای پانل میانی ( $h_w$ )

با افزایش نسبت ارتفاع به پهنای پانل میانی متأثر از کاهش پهنای پانل میانی و مطابق شکل ۱۴-الف، نسبت های مربوط به تغییر مکان ها و سختی ها کاهش، نسبت مربوط به نیروها افزایش یافته و رفتار به سوی خمشی سوق می یابد. پانل های میانی با نسبت ارتفاع به پهنای بیشتر از  $5/12$  رفتار خمشی، کمتر از  $5/12$  و بیشتر از  $3/11$  رفتار ترکیبی و کمتر از  $3/11$  رفتار برشی دارند.

#### ۱-۶-۱-۱-ب- متأثر از تغییر ارتفاع پانل میانی ( $d$ )

با افزایش نسبت ارتفاع به پهنای پانل میانی متأثر از افزایش ارتفاع پانل میانی و مطابق شکل ۱۴-ب، هر سه نسبت مربوط به تغییر مکان ها، نیروها و سختی ها کاهش پیدا کرده اند. افزایش ارتفاع پانل سبب تغییر رفتار از برشی به ترکیبی و از ترکیبی به خمشی می شود. برای پانل های میانی، نسبت ارتفاع به پهنای کمتر از  $2/79$  سبب رفتار برشی، بیشتر از  $2/79$  و کمتر از  $5/29$  سبب رفتار ترکیبی و نسبت ارتفاع به پهنای بیشتر از  $5/29$  سبب رفتار خمشی می شوند.

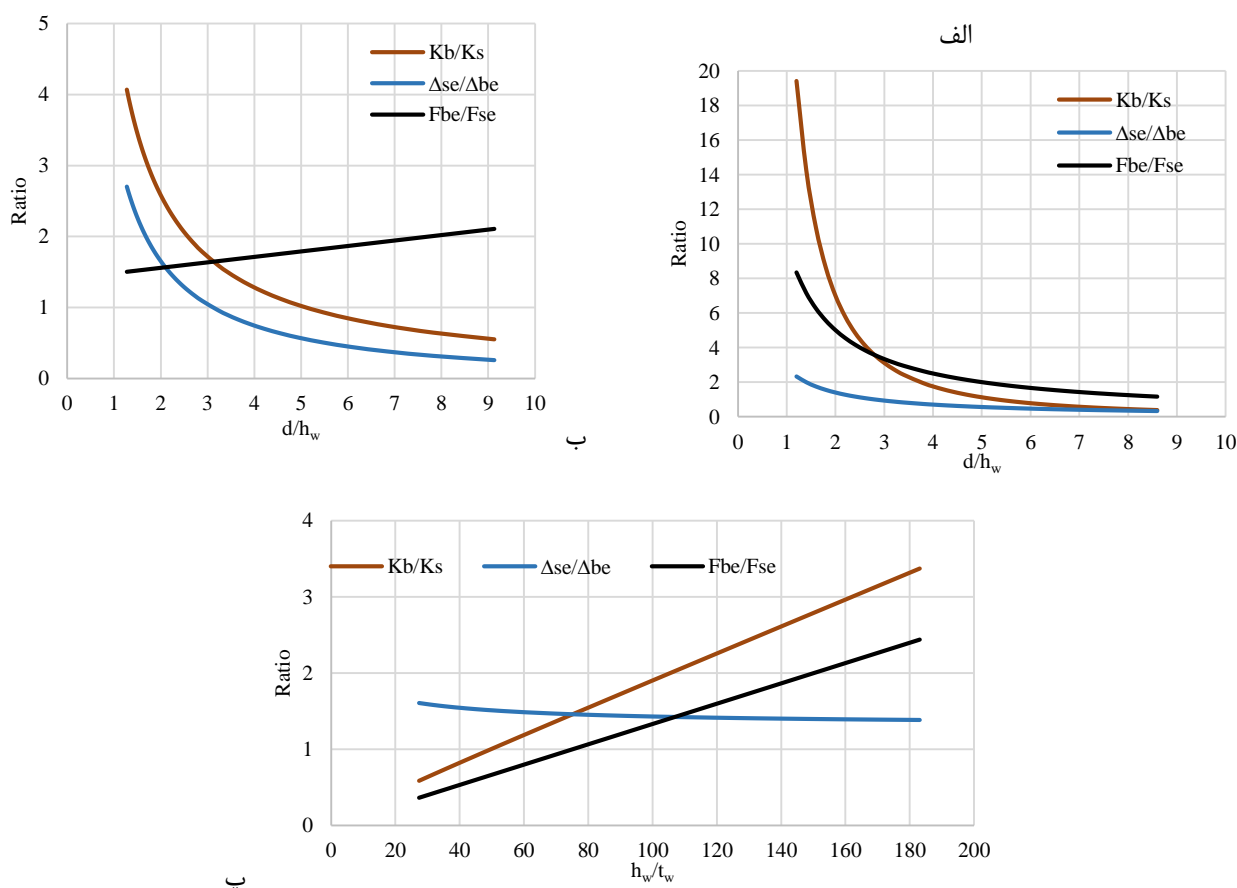
۲-۱-۶- بررسی تأثیر ضریب لاغری ورق جان پانل میانی ( $\frac{h_w}{h}$ )

با افزایش ضریب لاغری جان پانل میانی (کاهش ضخامت ورق پانل) و مطابق شکل ۱۴-۱، نسبت‌های مربوط به نیروها و سختی‌ها افزایش می‌یابند. نسبت مربوط به تغییر مکان‌ها با شیب بسیار کمی کاهش می‌یابد. کاهش ضخامت ورق پانل میانی در راستای تغییر رفتار برشی می‌باشد. برای پانل‌های میانی، ضریب لاغری جان بیش‌تر از  $\frac{74}{38}$  رفتار برشی، کم‌تر از  $\frac{74}{38}$  و بیش‌تر از  $\frac{50}{64}$  میلی‌متر رفتار ترکیبی و ضریب لاغری کم‌تر از  $\frac{50}{64}$  رفتار خمشی را سبب می‌شود.

## ۲-۲- پارامترهای مربوط به سخت‌کننده‌های قوطی شکل

۱-۲-۲-۶- بررسی تأثیر نسبت پهناهای بال سخت‌کننده‌ی قوطی شکل به ارتفاع جان آن ( $\frac{B_f}{D_f}$ )۱-۲-۲-۶-الف- متأثر از تغییر ارتفاع جان سخت‌کننده‌ی قوطی شکل ( $D_f$ )

با افزایش نسبت پهناهای بال به ارتفاع جان سخت‌کننده‌ی قوطی شکل متأثر از کاهش ارتفاع جان آن و مطابق شکل ۱۵-الف، نسبت‌های مربوط به نیروها و سختی‌ها کاهش یافته و نسبت مربوط به تغییر مکان‌ها با شیب کمی افزایش می‌یابد. کاهش ارتفاع جان سخت‌کننده سبب رفتار خمشی می‌شود. بر این اساس برای پانل‌های میانی، نسبت پهناهای بال سخت‌کننده‌ی قوطی شکل به ارتفاع جان بیش‌تر از ۴ سبب رفتار خمشی، بین ۴ و ۲ سبب رفتار ترکیبی و نسبت پهناهای بال به ارتفاع جان کم‌تر از ۲ سبب رفتار برشی می‌شود.



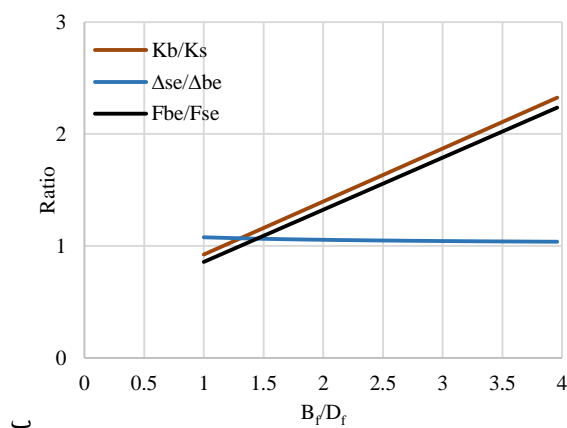
شکل ۱۴: نمودار تغییر نسبت تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق به تغییر مکان خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها، نسبت نیروی خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها به نیروی برشی حد الاستیک ورق و نسبت سختی خمشی سخت‌کننده‌ها به سختی برشی ورق در مقابل الف و ب) نسبت ارتفاع به پهناهای پانل میانی و پ) ضریب لاغری جان ورق پانل میانی

۱-۲-۶-ب- متأثر از تغییر پهناى بال سخت‌کننده‌ی قوطی شکل ( $B_f$ )

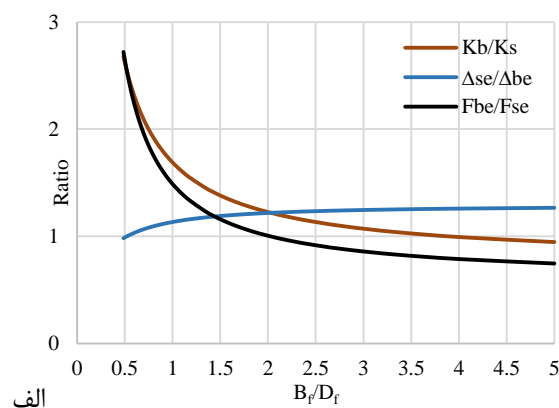
با افزایش نسبت پهناى بال به ارتفاع جان سخت‌کننده‌ی قوطی شکل متأثر از افزایش پهناى بال آن و مطابق شکل ۱۵-ب، نسبت‌های مربوط به نیروها و سختی‌ها افزایش یافته و نسبت مربوط به تغییر مکان‌ها با شیب بسیار کمی کاهش می‌یابد. افزایش پهناى بال سخت‌کننده سبب بهبود رفتار برشی می‌شود. برای پانل‌های میانی نسبت پهناى بال سخت‌کننده به ارتفاع جان کمتر از ۱/۱۶ رفتار خمشی، بیش‌تر از ۱/۱۶ و کمتر از ۱/۳۲ رفتار ترکیبی و نسبت پهناى بال سخت‌کننده به ارتفاع جان بیش‌تر از ۱/۳۲ رفتار برشی را سبب می‌شود.

۲-۲-۶- بررسی تأثیر ضریب لاغری جان ورق سخت‌کننده‌ی قوطی شکل ( $\frac{D_f}{t_b}$ )

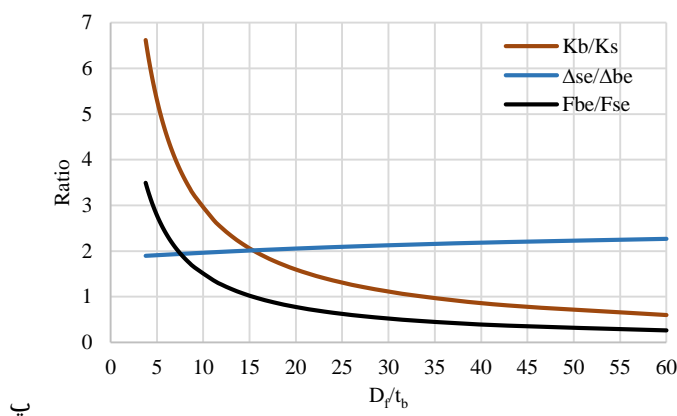
با افزایش لاغری جان سخت‌کننده‌ی قوطی شکل (کاهش ضخامت ورق سخت‌کننده) و مطابق شکل ۱۵-پ، نسبت‌های مربوط به نیروها و سختی‌ها کاهش یافته و نسبت مربوط به تغییر مکان‌ها با شیب بسیار کمی افزایش می‌یابد. کاهش ضخامت ورق سخت‌کننده‌ی قوطی شکل سبب عملکرد خمشی می‌شود. برای پانل‌های میانی ضریب لاغری جان سخت‌کننده بیش‌تر از ۳۳/۳۳ رفتار خمشی، کم‌تر از ۳۳/۳۳ و بیش‌تر از ۱۵ رفتار ترکیبی و ضریب لاغری کم‌تر از ۱۵ رفتار برشی را سبب می‌شود.



ب



الف



پ

شکل ۱۵: نمودار تغییر نسبت تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق به تغییر مکان خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها، نسبت نیروی خمشی حد الاستیک سخت‌کننده‌ها به نیروی برشی حد الاستیک ورق و نسبت سختی خمشی سخت‌کننده‌ها به سختی برشی ورق در مقابل الف و ب) نسبت پهناى پانل میانی به ارتفاع جان سخت‌کننده و پ) ضریب لاغری جان سخت‌کننده

## ۷- بررسی مقایسه‌ی روابط تئوریک به دست آمده با نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و عددی

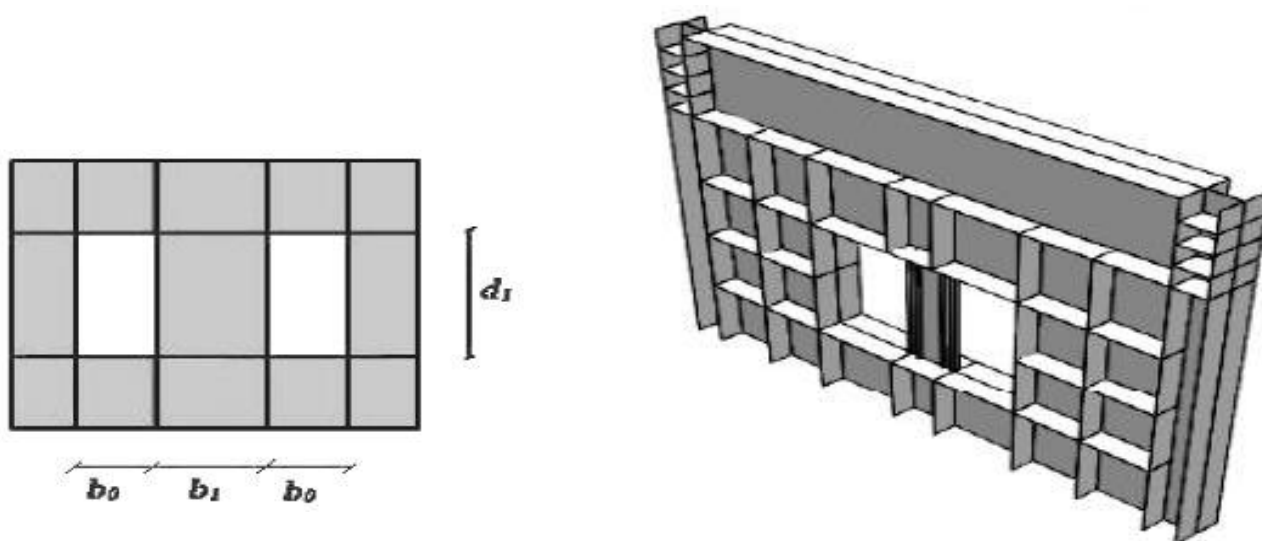
موارد آزمایشگاهی معدودی وجود دارد که بتوان روابط تئوریک ارائه شده را بر اساس آن‌ها صحت‌سنجی کرد. با این حال پانل میانی سه نمونه دیوار برشی فولادی آزمایش شده توسط صبوری و مام‌عزیزی در مرجع [۳]، که تنها تفاوت آنها فاصله‌ی دو بازو از یکدیگر بوده و در نتیجه پهنای پانل میانی سه نمونه متغیر می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته‌است. در جدول ۳ مشخصات این سه نمونه پانل میانی به همراه مقایسه رفتار تئوریک آن‌ها ذکر شده است.

جدول ۳: مشخصات تئوریک پانل میانی نمونه‌های آزمایش شده توسط صبوری و مام‌عزیزی [۳]

| نام                          | پهنا (میلی‌متر) | نسبت مربوط به نیروهای حد الاستیک | نسبت مربوط به تغییر مکان‌های حد الاستیک | نسبت مربوط به سختی‌ها | رفتار تئوریک | رفتار در مرجع [۳] |
|------------------------------|-----------------|----------------------------------|---|-----------------------|--------------|-------------------|
| پانل میانی در نمونه‌ی SSW201 | ۱۰۰             | ۱/۸۳                             | ۰/۵۱                                    | ۰/۹۳                  | خمشی         | خمشی              |
| پانل میانی در نمونه‌ی SSW202 | ۲۳۸             | ۱/۵۸                             | ۱/۴۱                                    | ۲/۲۴                  | برشی         | برشی              |
| پانل میانی در نمونه‌ی SSW203 | ۵۲۶             | ۱/۴۹                             | ۳/۴۲                                    | ۵/۰۸                  | برشی         | برشی              |

نتایج نشان داده شده در جدول ۳ در ارتباط با مقایسه‌ی پیش‌بینی نوع رفتار تئوریک پانل میانی سه نمونه‌ی آزمایش شده با رفتار عنوان شده در آن مرجع، بیان می‌کند که روابط تئوریک بدست آمده در پیش‌بینی رفتار پانل میانی این سه نمونه با دقت خوبی عمل کرده‌اند.

همچنین در مرجع [۳۲]، تعدادی مدل‌های عددی نمونه‌های دیوار برشی فولادی دارای دو بازوی مستطیلی با نسبت‌های مختلف ارتفاع به پهنای پانل میانی مورد بررسی قرار گرفته‌است. یکی از مدل‌های عددی در شکل ۱۶ نشان داده شده‌است. با توجه به تأکید اصلی این پژوهش به ارائه‌ی شرط سوم در تعیین تشخیص نوع رفتار پانل میانی، برای همه‌ی مدل‌های تحلیل شده در مرجع [۳۲]، نسبت‌های مربوط به شروط سه‌گانه بر اساس روابط تئوریک به دست آمده در این پژوهش تعیین شده و رفتار پانل میانی با رفتار ذکر شده در مرجع [۳۲] مقایسه شده است. در جدول ۴ مشخصات همه نمونه‌های عددی و نوع رفتار پانل میانی ذکر شده که دقت روابط تئوریک بدست آمده قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۶: نمونه‌های عددی استفاده شده در مرجع [۳۲]

بر اساس نتایج بیان شده در جدول ۴، می توان گفت که روابط تئوریک به دست آمده در این مقاله به خوبی توانایی پیش بینی نوع رفتار پانل میانی را دارد.

جدول ۴: مشخصات نمونه های عددی و مقایسه ی رفتار تئوریک پانل های میانی بررسی شده در مرجع [۳۲] با روابط تئوریک

| شماره | ارتفاع | پهنا  | نسبت ارتفاع به پهنا | نسبت مربوط به نیروهای حد الاستیک | نسبت مربوط به تغییر مکان های حد الاستیک | نسبت مربوط به سختی ها | رفتار تئوریک | رفتار تئوریک در مرجع [۳۲] |
|-------|--------|-------|---------------------|----------------------------------|---|-----------------------|--------------|---------------------------|
| ۱     | ۴۵۰    | ۶۴۰/۴ | ۰/۷                 | ۱/۱۰                             | ۳/۲۰                                    | ۳/۵۲                  | برشی         | برشی                      |
| ۲     | ۴۵۰    | ۴۴۷/۵ | ۱                   | ۱/۱۰                             | ۲/۲۰                                    | ۲/۴۲                  | برشی         | برشی                      |
| ۳     | ۴۵۰    | ۲۹۷/۵ | ۱/۵                 | ۱/۱۰                             | ۱/۴۳                                    | ۱/۵۸                  | برشی         | برشی                      |
| ۴     | ۴۵۰    | ۲۱۳/۸ | ۲/۰۸                | ۱/۱۱                             | ۱/۰۲                                    | ۱/۱۳                  | برشی         | برشی                      |
| ۵     | ۴۵۰    | ۲۰۲/۰ | ۲/۲                 | ۱/۱۱                             | ۰/۹۶                                    | ۱/۰۷                  | خمشی         | خمشی                      |
| ۶     | ۴۵۰    | ۱۷۷/۵ | ۲/۵                 | ۱/۱۱                             | ۰/۸۴                                    | ۰/۹۴                  | خمشی         | خمشی                      |
| ۷     | ۴۵۰    | ۱۵۹/۴ | ۲/۷۸                | ۱/۱۱                             | ۰/۷۵                                    | ۰/۸۴                  | خمشی         | خمشی                      |
| ۸     | ۴۵۰    | ۱۲۶/۱ | ۳/۵                 | ۱/۱۲                             | ۰/۵۹                                    | ۰/۶۶                  | خمشی         | خمشی                      |
| ۹     | ۴۵۰    | ۱۰۴/۶ | ۴/۲                 | ۱/۱۲                             | ۰/۴۹                                    | ۰/۵۵                  | خمشی         | خمشی                      |
| ۱۰    | ۴۵۰    | ۸۲/۴  | ۵/۳                 | ۱/۱۳                             | ۰/۳۹                                    | ۰/۴۴                  | خمشی         | خمشی                      |
| ۱۱    | ۴۵۰    | ۷۲/۵  | ۶                   | ۱/۱۳                             | ۰/۳۴                                    | ۰/۳۹                  | خمشی         | خمشی                      |
| ۱۲    | ۴۵۰    | ۶۱/۸  | ۷                   | ۱/۱۴                             | ۰/۲۹                                    | ۰/۳۳                  | خمشی         | خمشی                      |
| ۱۳    | ۴۵۰    | ۵۳/۸  | ۸                   | ۱/۱۵                             | ۰/۲۵                                    | ۰/۲۹                  | خمشی         | خمشی                      |
| ۱۴    | ۴۵۰    | ۴۷/۵  | ۹                   | ۱/۱۵                             | ۰/۲۲                                    | ۰/۲۶                  | خمشی         | خمشی                      |

## ۸- نتیجه گیری

در این پژوهش با بررسی روابط تئوریک پیش بینی رفتار تیر پیوند در مهاربندهای واگرا، مشابهت پانل میانی به آن و مرور رفتار پانل میانی با سخت کننده های ورق شکل، شروط سه گانه ای در ارتباط با نسبت های مربوط به نیروها، تغییر مکان ها و سختی ها برای پیش بینی رفتار پانل میانی با سخت کننده های قوطی شکل ارائه شده است. هر گاه یکی از دو شرط نسبت نیروی خمشی حد الاستیک سخت کننده ها به نیروی برشی حد الاستیک ورق و یا نسبت تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق به تغییر مکان خمشی حد الاستیک سخت کننده ها (بسته به نیرو یا تغییر مکان کنترل بودن پانل میانی به ترتیب تنها نسبت مربوط به نیروها و یا تغییر مکان ها) و نسبت سختی خمشی سخت کننده ها به سختی برشی ورق بیش تر از یک بوده رفتار برشی و هر گاه کم تر از یک باشند، رفتار خمشی خواهد بود. اگر هر یک از دو نسبت مربوط به نیروها و یا تغییر مکان ها کم تر از یک بوده و نسبت مربوط به سختی ها بیش تر از یک باشد، رفتار ترکیبی خواهد بود.

در بررسی پارامترهای مختلف پانل میانی که شامل شش عدد بوده نتیجه شد که افزایش پهنا پانل میانی و کاهش ارتفاع و ضخامت ورق آن سبب بهبود رفتار برشی می شود. در مورد پارامترهای مربوط به سخت کننده ی قوطی شکل نیز باید گفت، افزایش ارتفاع جان، پهنا پانل و ضخامت ورق سخت کننده ی قوطی شکل هر سه سبب بهبود رفتار و گذر از رفتار خمشی به ترکیبی و ترکیبی به برشی می شوند. نتایج مطالعه ی پارامتریک نشان می دهد که افزایش ۶۴ درصدی پهنا، کاهش ۴۷ درصدی ارتفاع و ۳۲ درصدی ضخامت ورق پانل میانی، افزایش ۱۰۰ درصدی ارتفاع جان، ۱۴ درصدی پهنا پانل و ۱۲۲ درصدی ضخامت ورق سخت کننده ی قوطی شکل، سبب تغییر رفتار پانل میانی از "خمشی در مرز ترکیبی" به "ترکیبی در مرز برشی" می شود. اعداد به دست آمده تنها در حالت بررسی پارامتر مربوطه و نسبت به اندازه ی آن پارامتر در پانل میانی با رفتار "خمشی در مرز ترکیبی" صادق می باشند. در میان دو گروه از پارامترها، پارامترهای مربوط به پانل میانی به نسبت پارامترهای مربوط به سخت کننده های قوطی شکل، تأثیر بیشتری بر رفتار پانل میانی دارند. در بین پارامترهای مربوط به پانل میانی هر سه پارامتر، تأثیر نسبتاً مشابهی بر رفتار پانل میانی داشته و در بین پارامترهای مربوط به سخت کننده

ها نیز پارامتر ضخامت ورق سخت‌کننده به نسبت دو پارامتر دیگر، تأثیر بیشتری بر رفتار پانل میانی دارد. در نهایت می‌توان گفت شرط مربوط به سختی‌ها شرطی جانبی در کنار دو شرط اصلی بوده که در تشخیص رفتار ترکیبی پانل‌های میانی و پیش‌بینی بهتر مرزهای تبدیل رفتارهای سه‌گانه کمک می‌کند.

## مراجع

- [1] Nassernia, S. and Showkati, H. (2017). Experimental study of opening effects on mid-span steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, 8-18.
- [2] Afshari, M. and Gholhaki, M. (2018). Shear strength degradation of steel plate shear walls with optional located opening. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18, 1547-1561.
- [3] Sabouri-Ghomi, S. and Mamazizi, S. (2015). Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings. *Thin-Walled Structures*, 86, 56-66.
- [4] Sabelli, R. and Bruneau, M. (2007). Design guide 20: steel plate shear walls. *American Institute of Steel Construction*.
- [5] Tromposch, E. W., and Kulak, G. L. (1987). Cyclic and static behaviour of thin panel steel plate shear walls *Structural Engineering Report No. 145*. Department of Civil Engineering, University of Alberta, Canada.
- [6] Roberts, T. M., and Ghomi, S. S. (1991). Hysteretic characteristics of unstiffened plate shear panels. *Thin-Walled Structures*, 12(2), 145-162.
- [7] Timler, P. A., and Kulak, G. L. (1983). Experimental study of steel plate shear walls *Structural Engineering Report No. 114*. Department of Civil Engineering, University of Alberta, Canada.
- [8] Caccese, V., Elgaaly, M., and Chen, R. (1993). Experimental study of thin steel-plate shear walls under cyclic load. *Journal of Structural Engineering*, 119(2), 573-587.
- [9] Sabouri-Ghomi, S., and Sajjadi, S. R. A. (2012). Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 75, 152-159.
- [10] Hajmirsadeghi, M., Mirtaheri, M., Zandi, A., and Hariri-Ardebili, M. (2019). Experimental cyclic test and failure modes of a full scale enhanced modular steel plate shear wall. *Engineering Failure Analysis*, 95, 283-288.
- [11] Gholhaki, M., Karimi, M., Pachideh, G. (2019). Investigation of Subpanel Size Effect on Behavior Factor of Stiffened Steel Plate Shear Wall. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol 5, 73-87.
- [12] Gholhaki, M., Pachideh, G., Rezayfar, O. and ghazvini, S. (2019). Specification of Response modification factor for Steel Plate Shear Wall by Incremental Dynamic Analysis Method [IDA]. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol 6, 211-24.
- [13] Pachideh, G., Gholhaki, M., and Saedi Daryan, A. (2019). Analyzing the damage index of steel plate shear walls using pushover analysis. *Structures*, Vol 20, 437-51.
- [14] Takahashi, Y., Takemoto, Y., and Takeda, T. (1973). Experimental study on thin steel shear walls and particular steel bracings under alternative horizontal load *Preliminary Report, IABSE, Symp. On Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-defined Repeated Loads* (Vol. 13, pp. 185-191). Lisbon, Portugal.
- [15] Roberts, T. M., and Sabouri-Ghomi, S. (1992). Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels. *Thin-Walled Structures*, 14(2), 139-151.
- [16] Valizadeh, H., Sheidaii, M., and Showkati, H. (2012). Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 70, 308-316.
- [17] Shekastehband, B., Azaraxsh, A., and Showkati, H. (2017). Experimental and numerical study on seismic behavior of LYS and HYS steel plate shear walls connected to frame beams only. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17, 154-168.
- [18] Shekastehband, B., Azaraxsh, A., Showkati, H., and Pavir, A. (2017). Behavior of semi-supported steel shear walls: Experimental and numerical simulations. *Engineering structures*, 135, 161-176.
- [19] Shekastehband, B., Azaraxsh, A., and Showkati, H. (2018). Experimental seismic study on shear walls with fully-connected and beam-only-connected web plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, 204-215.
- [20] Shekastehband, B., and Azaraxsh, A. A. (2019). Strength, stiffness, ductility, and dissipated energy reduction of semisupported steel shear walls (SSSW) due to a circular opening. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(2), e1558.
- [21] Hosseinzadeh, S., and Tehranizadeh, M. (2012). Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 77, 180-192.
- [22] Sabouri-Ghomi, S., Ahouri, E., Sajadi, R., Alavi, M., Roufegarinejad, A., and Bradford, M. (2012). Stiffness and strength degradation of steel shear walls having an arbitrarily-located opening. *Journal of Constructional Steel Research*, 79, 91-100.



- [23] Barkhordari, M., Hosseinzadeh, S. A., and Seddighi, M. (2014). Behavior of steel plate shear walls with stiffened full-height rectangular openings. *Asian Journal of Civil Engineering*, 15(5), 741-759.
- [24] Sadat Kholerdi, S. E., Nazarimofrad, E., Farrokhzad, M., and Topal, U. (2018). Evaluation of the seismic behavior of semi-supported steel shear walls with different ratio and shape of openings. *Australian Journal of Structural Engineering*, 19(2), 118-130.
- [25] Mousavi Qieh-Qeshlaghi, P., and Sabouri-Ghomi, S. (2018). Theoretical and Experimental Study on Steel Plate Shear Wall with Unequal Columns. *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(1), 103-114.
- [26] Zaigen, M., Yuqing, Y. (2020). Experimental and numerical study on seismic behavior of obliquely stiffened steel plate shear walls with openings. *Thin-Walled Structures*, Vol 146, 106457.
- [27] Paslar, N., Farzampour, A., 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, 824-36.
- [28] Ahamd khan, N., Srivastava, G. (2020). Models for strength and stiffness of steel plate shear walls with openings. *Structures*, Vol 27, 2096-2113.
- [29] Bypour, M., Kioumarsi, M., Yekrangnia, M. (2021). Shear capacity prediction of stiffened steel plate shear walls (SSPSW) with openings using response surface method. *Engineering Structures*, Vol 226, 111340.
- [30] Sabouri-Ghomi, S., Mamazizi, S., and Alavi, M. (2015). An investigation into linear and nonlinear behavior of stiffened steel plate shear panels with two openings. *Advances in Structural Engineering*, 18(5), 687-700.
- [31] Sabouri, S., Ahouri, A., and Mamazizi, S. (2013). Study of Unstiffened Central Panel between Two Openings in Steel Plate Shear Walls with Stiffeners. *Journal of Civil Engineering Ferdowsi*, 24(1), 15-34.
- [32] Sabouri, S., and Ahouri, E. (2015). Study of Stiffened Central Panel Between Two Openings in Steel Plate Shear Walls with Stiffeners. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 46(2), 19-28. doi:10.22060/ceej.2015.381
- [33] Malley, J. O., and Popov, E. P. (1984). Shear links in eccentrically braced frames. *Journal of Structural Engineering*, 110(9), 2275-2295.
- [34] Popov, E. P., and Engelhardt, M. D. (1988). Seismic eccentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 10, 321-354.
- [35] Popov, E. P. (1983). Recent research on eccentrically braced frames. *Engineering structures*, 5, 3-9.
- [36] Roeder, C. W., and Popov, E. P. (1977). Inelastic behavior of eccentrically braced steel frames under cyclic loadings. Berkeley, Calif.: Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.
- [37] Kasai, K., and Popov, E. P. (1986). General behavior of WF steel shear link beams. *Journal of Structural Engineering*, 112(2), 362-382.
- [38] Engelhardt, M. D., and Popov, E. P. (1992). Experimental performance of long links in eccentrically braced frames. *Journal of Structural Engineering*, 118(11), 3067-3088.
- [39] Rajabi, M. (2011). *Determining Boundaries Of Quasi Beams Behavior In Shear, Flexural or Transition Mode*. (Thesis for the Degree of Master of Science (M.Sc.) in Civil, Structural Engineering), K. N. Toosi University of Technology, Tehran.
- [40] Sabouri-Ghomi, S., and Ziaei, M. (2008). A study on the behavior of shear link beam made of easygoing steel in eccentrically braced frames. *Paper presented at the The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, October, Beijing, China*.
- [41] Akhavan Leil Abadi, M. R., and Tahouni, S. (2012). *Structural Analysis (Classical and Matrix Methods)*. Tehran: Amirkabir University Of Technology Branch.