

ویژگی‌های رفتاری و خصوصیات جذب انرژی صفحات برشی فولادی بالحاظ اثر جنس و نسبت لاغری

زهرا علی‌عرب، سید علی اصغر حسین زاده*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۹

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۷

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

کلمات کلیدی:

خصوصیات رفتاری صفحات

کمانش

تسلیم

بارگذاری برشی

المان محدود

خلاصه: در تحقیق حاضر، تاثیر سه جنس متعارف از مصالح فولادی (فولاد ضدزنگ، فولاد نرمه ساختمانی و فولاد با تنش تسلیم پایین) و دامنه وسیعی از نسبت‌های لاغری در ویژگی‌های رفتار غیرخطی و قابلیت جذب انرژی صفحات فولادی تحت شرایط بارگذاری برشی با استفاده از روش المان محدود و بهره‌گیری از تحلیل‌های خطی/غیرخطی استاتیکی و سیکلی مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج تحلیل‌ها، صفحات فولادی مختلف با توجه به نسبت لاغری‌شان در پنج محدوده پیشنهادی بسیار لاغر، لاغر، متوسط، ضخیم و بسیار ضخیم طبقه‌بندی شدند. ویژگی‌های رفتار کلی، زمان نسبی وقوع کمانش یا تسلیم و روند توسعه تنش‌ها در طول بارگذاری برای هر یک از محدوده‌ها مورد بحث و مقایسه قرار گرفت. با تحلیل آماری نتایج، روابط تئوری اصلاح شده‌ای جهت تعیین مرزهای محدوده‌های پنج‌گانه لاغری برای هر یک از مصالح فولادی ارائه شد. همچنین، روابط جدیدی جهت تخمین بار کمانشی در محدوده غیرارتجاعی و خمیری ارائه گردید که قادر است تخمین دقیق‌تری از ظرفیت کمانشی صفحات نسبت به روابط تئوری موجود در آشتو ارائه دهد. به‌طور کلی با افزایش نسبت لاغری، تدریجاً از قابلیت جذب انرژی صفحات (به دلیل وقوع کمانش و پدیده تنگ‌شدگی) و توسعه تسلیم در سطح ورق کاسته می‌شود. در محدوده صفحات بسیار ضخیم، قابلیت جذب انرژی صفحات صرفاً تحت تاثیر تنش تسلیم مصالح است، در حالی که در محدوده‌های لاغر، متوسط و ضخیم، علاوه بر آن تحت تاثیر نسبت لاغری نیز است. قابلیت جذب انرژی صفحات فولادی مختلف در محدوده بسیار لاغر، بدون توجه به نسبت لاغری و تنش تسلیم، کم و بیش مشابه است.

۱- مقدمه

کرد [۱، ۲]. با توجه به این کاربردهای گسترده، بررسی جامع رفتار صفحات و مطالعه دقیق پایداری آن‌ها در شرایط مختلف بارگذاری و بهره‌برداری همواره از موضوعات مورد توجه محققان بوده است. صفحات بسته به نوع سازه و شرایط بهره‌برداری، تحت شرایط مختلفی از بارگذاری قرار می‌گیرند، لیکن در حالت کلی رفتارشان متأثر از وقوع پدیده‌های کمانش یا تسلیم در آن‌ها است. از طرفی، وقوع کمانش یا تسلیم در صفحه نیز، با فرض یک شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری مشخص، تحت تاثیر جنس و مشخصات هندسی ورق قرار دارد. از این جهت می‌توان صفحات را، صرف‌نظر از جنس، ابعاد و شرایط تکیه‌گاهی، با توجه به ضخامت یا نسبت لاغری‌شان (نسبت

کاربرد صفحات فلزی با جنس‌های مختلف (به‌ویژه فولادی و آلومینیومی) در علوم و صنایع مختلف مهندسی، نظیر هوا و فضا، کشتی‌سازی و عمران بسیار گسترده شده‌است. از موارد کاربرد صفحات در مهندسی عمران می‌توان به دیوارهای برشی فولادی، عرشه و شاه‌تیرهای پل، ستون‌ها و تیروورق‌های ساختمانی، دال‌ها، شاه‌تیرهای جعبه‌ای، جان تیرهای همبند در سازه‌های دارای قاب‌های مهارشده واگرا (EBF)^۱ و سازه‌های نگهداری گازها و مایعات اشاره

1 Eccentrically braced frame

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ahosseinzade@gmail.com



ضخامت به بعد کوچکتر صفحه) به سه دسته کلی لاغر، متوسط و ضخیم تقسیم نمود [۱، ۳]. به بیان دیگر، برای یک صفحه با شرایط بارگذاری و تکیه‌گاهی مشخص و البته ابعاد ثابت، بسته به نسبت لاغری صفحه ممکن است کمانش قبل، بعد یا تقریباً همزمان با تسلیم اتفاق بیفتد [۱، ۳].

۱-۲- مرور ادبیات گذشته

در طول دهه‌های اخیر، ارزیابی مقاومت و مطالعه ظرفیت کمانشی و پس از کمانش صفحات فلزی (آلومینیومی و عمدتاً فولادی) لاغر تحت بارگذاری برشی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۴-۱۲]. مطالعه ظرفیت کمانش ارتجاعی صفحات مسطح تقویت نشده ابتدا توسط بریان [۱۳] انجام شد. تیموشنکو [۱۴] کمانش صفحات مستطیلی تحت تنش‌های برشی میان‌صفحه‌ای را، صرفاً برای مودهای کمانشی متقارن، با استفاده از روش انرژی بررسی کرد. در ادامه، با استفاده از روش ماتریسی و با لحاظ مودهای کمانشی متقارن و نامتقارن، تنش کمانشی برشی صفحات مسطح مستطیلی با شرایط مرزی ساده مورد توجه سایر محققین قرار گرفت [۱۵]. ماکویی و اسکالود [۱۶] در زمینه پایداری سازه‌های صفحه‌ای و طراحی پانل‌های جان و بخصوص، مقاومت نهایی ورق‌های تقویت نشده فولادی تحت شرایط بارگذاری برشی مطالعه انجام دادند. رادس [۱۷] نیز بر روی المان‌های صفحه‌ای و اعضای که در معرض کمانش موضعی هستند مطالعه کرد و نتیجه گرفت که با وجود مطالعات قبلی انجام شده در زمینه رفتار کمانشی و پس از کمانشی صفحات، نیاز به انجام مطالعات بیشتر و گسترده‌تر در این زمینه ضروری است. علاوه بر این‌ها، نتایج مطالعات محققین مختلف در زمینه رفتار کمانشی و پس از کمانش صفحات برشی (فولادی و آلومینیومی) لاغر نیز تحت شرایط خاص نظیر حضور بازشوها و ترک‌ها به اتفاق نشان می‌دهد که حضور این بازشوها یا نقص‌ها، بسته به ابعاد و موقعیت‌شان، می‌توانند تاثیر نامطلوبی را بر روی ظرفیت کمانشی و ظرفیت نهایی صفحات داشته باشند [۱۸-۲۳]. مشابه با صفحات بدون تقویت، بررسی رفتار و پایداری صفحات تقویت شده تحت شرایط مختلف بارگذاری نیز در پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی متعددی مورد توجه قرار گرفته است [۲۴-۲۹]. همان‌طور که در بالاتر اشاره شد، یکی از موضوعات اساسی که در طراحی، مطالعه رفتار و باربری صفحات مطرح است،

موضوع کمانش در آنها است. مزیت اصلی استفاده از سخت‌کننده‌ها، در مقایسه با افزایش ضخامت ورق، آن است که بدون افزایش قابل توجه در وزن ورق، با افزایش ظرفیت کمانشی (به دلیل تقسیم ورق به زیرپانل‌های^۱ کوچکتر و افزایش سختی خمشی خارج از صفحه آن) و پس از کمانش ورق، ظرفیت باربری آن افزایش می‌شود. در واقع، در صفحات سخت‌شده طراحی سخت‌کننده‌ها به گونه‌ای انجام می‌شود که مود کمانش حاکم از حالت کمانش کلی به کمانش موضعی در زیرپانل‌ها تغییر یابد [۲۸]. همچنین بر اساس مبانی نگرش ارتوتروپیک^۲ در حالت کلی می‌توان مقاومت نهایی ورق سخت شده را از طریق معادل‌سازی آن با یک ورق (بدون سخت‌کننده) با ضخامت (موثر) ثابت با دقت مناسبی ارزیابی کرد [۲۴، ۲۵].

در مقابل، در مقایسه با صفحات لاغر، مطالعات در زمینه رفتار صفحات ضخیم یا نسبتاً ضخیم فولادی و آلومینیومی، به ویژه تحت بارگذاری برشی، محدودتر است [۱، ۳۰-۳۵]. در سال‌های اخیر، کمانش برشی خمیری در صفحات تقویت نشده فولادی (رده SS۴۰۰) و آلومینیومی (رده A۱۷۰۷۵T۶) در محدوده مشخصی از نسبت لاغری و برای شرایط مرزی ساده و گیردار مورد بررسی قرار گرفته است [۳۵]. نتایج نشان داد که ورق‌های رده ضخیم قبل از وقوع کمانش دچار تسلیم می‌شوند و ظرفیت پس از تسلیم در آن‌ها در درجه اول تابع مدول الاستیسیته ثانویه مصالح است. در ورق‌های رده متوسط نیز وقوع کمانش و تسلیم تقریباً به‌طور همزمان اتفاق می‌افتد و صفحه فاقد ظرفیت پس از تسلیم یا پس از کمانش است. همچنین، وجود نقص یا تغییرشکل‌های اولیه^۳ در ورق می‌تواند بر روی ظرفیت پس از تسلیم و مقاومت نهایی ورق‌های ضخیم تاثیر نامطلوب داشته باشد. در تحقیقی دیگر، رفتار کمانشی صفحات برشی فلزی برای مصالح فولاد کربن‌دار، فولاد ضدزنگ و آلومینیوم، با فرض شرایط مرزی گیردار، مورد توجه قرار گرفته است و به‌صورت کیفی و کمی، صفحات با توجه به نسبت لاغری‌شان در سه گروه لاغر، متوسط و ضخیم دسته‌بندی شده‌اند [۱].

۱-۳- اهداف و دامنه تحقیق

تحقیق حاضر با استفاده از روش المان محدود خصوصیات رفتار

- 1 Subpanels
- 2 Orthotropic procedure
- 3 Initial imperfection

نتایج تحلیل‌های عددی، روابط تئوری جدیدی جهت تخمین نسبتاً دقیقتر ظرفیت کمانشی ارائه می‌شود. در ادامه نیز تاثیر جنس مصالح و نسبت‌های لاغری صفحات (با توجه به محدوده‌های پنج‌گانه تعریف شده) در قابلیت استهلاک انرژی آن‌ها تحت الگوی بار برشی به‌صورت کیفی و کمی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- تعاریف

۲-۱- تقسیم‌بندی محدوده‌های رفتار صفحات تحت بارگذاری

برشی

بر اساس تعریف صورت گرفته در آیین‌نامه آشتو ۲۰۱۸ [۳]، رفتار صفحات تحت بارگذاری برشی را با توجه به نسبت لاغری‌شان می‌توان در قالب سه دسته کلی لاغر، متوسط و ضخیم تقسیم‌بندی کرد. در صفحات لاغر (محدوده کمانش ارتجاعی)، ظرفیت کمانش برشی ورق (V_{cr}) کوچکتر از ظرفیت برشی حد خطی آن (V_p) است. در صفحات متوسط (محدوده کمانش غیرارتجاعی)، ظرفیت کمانش برشی ورق (V_{cr}) بین ظرفیت برشی حد خطی (V_p) و ظرفیت اسمی تسلیم برشی (V_y) قرار می‌گیرد. در صفحات ضخیم (محدوده کمانش خمیری) نیز ظرفیت کمانش برشی ورق (V_{cr}) بزرگتر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن (V_y) است.

قیطاسی و علی‌نیا [۱] نیز، مشابه با آشتو ۲۰۰۵ [۳۶]، رفتار صفحات تحت بارگذاری برشی را بر اساس نسبت لاغری‌شان به سه دسته کلی لاغر، متوسط و ضخیم تقسیم‌بندی می‌کنند، با این تفاوت که در تعریف این محققین، مشخصه صفحات متوسط برابری ظرفیت کمانشی برشی (V_{cr}) و ظرفیت برشی حد خطی (V_p) ورق ذکر شده‌است. این موضوع (با توجه به اختلاف تنش‌های حد تناسب (τ_p) و حد تسلیم (τ_y) در مصالح مختلف) می‌تواند سبب شود که نتایج تقسیم‌بندی انجام شده توسط این محققین تا حدی با تقسیم‌بندی آشتو، صرفنظر از میزان دقت و توافق روابط آشتو با واقعیت، متفاوت باشد.

۲-۲- کمانش برشی

ظرفیت کمانش برشی صفحات در حالت ارتجاعی طبق رابطه‌ی

۱ محاسبه می‌گردد.

$$V_{cr} = \frac{K\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \times (bt) \quad (1)$$

خطی / غیرخطی و قابلیت جذب انرژی صفحات فولادی شامل سه نوع مصالح فولادی متعارف و نسبتاً پرکاربرد ساختمانی (شامل فولاد نرمه ساختمانی^۱ (ST)، فولاد با تنش تسلیم پایین^۲ (LYP^{۱۰۰}) یا به اختصار، LYP) و فولاد ضدزنگ^۳ (SS) را تحت شرایط بارگذاری برشی برای دامنه وسیعی از نسبت‌های لاغری و با فرض شرایط مرزی ساده مورد بررسی قرار می‌دهد. فولاد نرمه ساختمانی به دلیل مقاومت مناسب و قابلیت شکل‌پذیری بالا یکی از پرکاربردترین مصالح فولادی در صنایع ساختمان‌سازی است. همچنین، امکان کاربرد فولادهای با تنش تسلیم پایین نیز با توجه به نسبت مقاومت به تنش تسلیم بسیار بالا و شکل‌پذیری بسیار مطلوب در ساخت المان‌های جاذب انرژی به‌ویژه در مناطق با خطر لرزه‌خیزی بالا رو به افزایش است. در مقایسه با این دو نوع، فولادهای ضدزنگ با وجود مشخصات مطلوبی که دارند، به دلیل هزینه تولید نسبتاً بالاتر دارای کاربرد محدودتری در مهندسی عمران هستند. با وجود این، مزایایی نظیر زیبایی، شکل‌پذیری، ظرفیت تسلیم بالا و مقاومت در برابر آتش‌سوزی و به‌خصوص خوردگی، با کاهش یا حذف هزینه‌های ثانویه مربوط به نگهداری و تعمیر ساختمان، استفاده از این نوع فولاد را به‌لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیرتر می‌کند.

با توجه به موارد مورد اشاره، در ابتدا صفحات فولادی مختلف در قالب یک تقسیم‌بندی جدید (با توجه به ویژگی‌ها و خصوصیات متفاوت مشاهده شده) در پنج گروه کلی شامل بسیار لاغر، لاغر، متوسط، ضخیم و بسیار ضخیم در ارتباط با نسبت لاغری‌شان دسته‌بندی می‌شوند. مشخصه‌های رفتاری هر یک از این دسته‌ها با توجه به نمونه منحنی‌های رفتار آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد و با یکدیگر مقایسه می‌شود. سپس، خصوصیات رفتاری صفحات از نقطه نظر وقوع هر یک از پدیده‌های کمانش یا تسلیم در آن‌ها و زمان وقوع این پدیده‌ها در ارتباط با ظرفیت نهایی‌شان برای هر یک از محدوده‌های پنج‌گانه پیشنهاد شده مطالعه می‌گردد. همچنین برای محدوده صفحات ضخیم تا بسیار لاغر، دقت روابط تئوری موجود در تعیین ظرفیت بحرانی کمانشی با نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های المان محدود، مقایسه (از نتایج این بخش می‌توان به‌عنوان تایید صحت روش مدلسازی نیز بهره برد)، و در صورت لزوم مبتنی بر

- 1 Structural mild steel
- 2 Low yield point steel
- 3 Stainless steel

آباکوس^۱ [۳۸] و بهره‌گیری از روش‌هاش تحلیل خطی کمانشی، غیرخطی استاتیکی و شبه-استاتیکی سیکلی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. مطالعات برای سه جنس مختلف از مصالح فولادی متعارف، شامل فولاد ضدزنگ (SS)، فولاد نرمه ساختمانی (ST) و فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP)، برای دامنه وسیعی از نسبت‌های لاغری ($\lambda = 10 \sim 2200$) و با فرض شرایط مرزی ساده انجام می‌شود. شکل ۱ شرایط تکیه‌گاهی و الگوی بارگذاری برشی را برای تحلیل‌های خطی/ غیرخطی استاتیکی و سیکلی نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در تحلیل‌های استاتیکی از طریق اعمال نیرو در چهار وجه ورق با الگوی برشی برای ایجاد شرایط بارگذاری خالص برشی در صفحه استفاده گردید [۱]، درحالی‌که در تحلیل‌های سیکلی که با توجه ماهیت تحلیل‌ها که با اعمال و کنترل جابه‌جایی (به‌جای نیرو) رفت و برگشتی در سیستم همراه است و عملاً، ایجاد شرایط بارگذاری خالص برشی در صفحه چندان میسر نیست، بارگذاری برشی به‌صورت جابه‌جایی‌های افقی رفت و برگشتی در لبه فوقانی اعمال شد.

در مدل‌سازی از المان پوسته‌ای^۲ با خاصیت انتگرال‌گیری کاهش یافته (S⁴R) استفاده می‌گردد [۳۸]. مشابه با مطالعات قبلی انجام شده توسط نویسندگان دوم و همکاران [۱۸-۲۰]، حداکثر بعد مش‌بندی در مدل‌ها با توجه نتایج آنالیز حساسیت و صحت‌سنجی (که در اینجا به‌جهت اختصار از تکرار آن صرف‌نظر می‌شود) معادل با ۲۰ میلی‌متر (مش‌بندی ۵۰×۵۰) به‌دست آمد. البته در بخش‌های بعدی، از طریق مقایسه نتایج بار کمانشی به‌دست آمده از تحلیل المان محدود با نتایج روابط تئوری موجود، صحت روش مدل‌سازی و نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار به‌طور ضمنی تایید خواهد شد. به‌طور کلی، صفحات به دلایل مختلفی نظیر عملیات حمل و جابه‌جایی به محل، خطاهای اجرایی و یا عملیات مونتاژ و جوشکاری همواره دارای نقص‌های اولیه هستند [۳۹]. علاوه بر این، بارهای ثقیلی و وزن خود صفحات، به ویژه در صفحات نازک، نیز می‌تواند عامل دیگری برای ایجاد تغییرشکل‌های اولیه‌ای عمود بر صفحه در ورق باشد [۴۰]. بنابراین، وجود این نقص‌های اولیه می‌بایست به‌طریقی در فرآیند مدل‌سازی و تحلیل صفحات در نظر گرفته شود. ازینرو، به‌جهت تسهیل وقوع کمانش در صفحات و کمک به توسعه حوزه میدان کششی قطری در آن‌ها، تغییرشکل اولیه بسیار کوچکی در جهت عمود بر صفحه مطابق با

در رابطه‌ی ۱، پارامتر K ضریب بارکمانشی است که تابع شرایط تکیه‌گاهی (ساده یا گیردار) و نسبت ابعادی صفحات ($\varphi = a/b$) است و به‌ترتیب از روابط ۲ و ۳ برای شرایط مرزی ساده و گیردار محاسبه می‌شود. بنابراین با توجه به روابط (۲) و (۳)، ضریب کمانش برشی در صفحات مربعی شکل با نسبت ابعادی واحد، برای شرایط مرزی ساده و گیردار به‌ترتیب معادل با ۹/۳۴ و ۱۴/۵۸ محاسبه می‌گردد.

$$K = 5.34 + 4/\varphi^2 ; \varphi = a/b \geq 1 \quad (2)$$

$$K = 8.98 + 5.6/\varphi^2 ; \varphi = a/b \geq 1 \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳، پارامتر b همواره بعد کوچک‌تر صفحه است [۳۷].

براساس آیین‌نامه آشتو ۲۰۱۸ [۳] ظرفیت کمانشی برشی صفحات با توجه به محدوده لاغری‌شان طبق روابط ۴ تا ۶ محاسبه می‌گردد. همچنین، نسبت لاغری (λ) و پارامتر لاغری (β) نیز به‌ترتیب بر اساس روابط ۷ و ۸ تعریف می‌شود.

- کمانش ارتجاعی:

$$\tau_{cr} = \frac{0.9EK}{\lambda^2} ; \lambda > y \sqrt{EK/\sigma_y} , (y = 1.4) \quad (4)$$

- کمانش غیرارتجاعی:

$$\tau_{cr} = \frac{0.65\sqrt{EK\sigma_y}}{\lambda} ; x \sqrt{EK/\sigma_y} < \lambda \leq y \sqrt{EK/\sigma_y} \quad (5)$$

$$(x = 1.12 \ \& \ y = 1.4)$$

- کمانش خمیری:

$$\tau_{cr} = 0.58\sigma_y ; \lambda \leq x \sqrt{EK/\sigma_y} , (x = 1.12) \quad (6)$$

$$\lambda = b/t \quad (7)$$

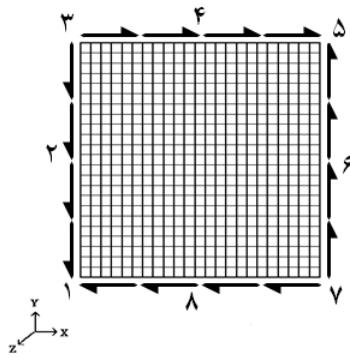
$$\beta = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (8)$$

۳- روش مطالعه

در این پژوهش، بالغ بر صد و بیست صفحه فولادی با نسبت‌های لاغری و جنس‌های مختلف و ابعاد ثابت (۱۰۰۰ × ۱۰۰۰ میلی‌متر) تحت الگوی بارگذاری برشی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود

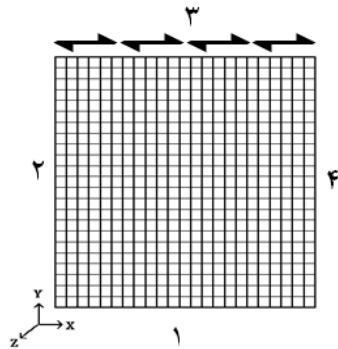
1 Abaqus

2 Shell



شماره لبه یا کنج	درجه آزادی					
	U_x	U_y	U_z	θ_x	θ_y	θ_z
۱	•	•	•	•	•	•
۲			•			
۳			•	•	•	•
۴			•			
۵			•	•	•	•
۶			•			
۷			•	•	•	•
۸			•			

الف: در تحلیل‌های خطی کمانشی و استاتیکی غیرخطی (پوش اور)



شماره لبه یا کنج	درجه آزادی					
	U_x	U_y	U_z	θ_x	θ_y	θ_z
۱	•	•	•			
۲			•			
۳		•	•			
۴			•			

ب: در تحلیل‌های سیکلی

شکل ۱. الگوهای بارگذاری برشی و شرایط تکیه گاهی صفحات

Fig. 1. Shear loading and boundary conditions, (a): Eigen-buckling/nonlinear static analyses, (b): Cyclic analyses

اسگود-رامبرگ مبتنی بر تخمین کرنش کل با توجه به مقادیر کرنش ارتجاعی (بر اساس قانون هوک) و کرنش خمیری (بر اساس یک رابطه توانی) است و با استفاده از آن می‌توان با دقت نسبتاً مناسبی منحنی تنش-کرنش مصالح را تقریب زد [۴۲].

۴- بررسی نتایج

۴-۱- تحلیل‌های خطی/غیرخطی استاتیکی

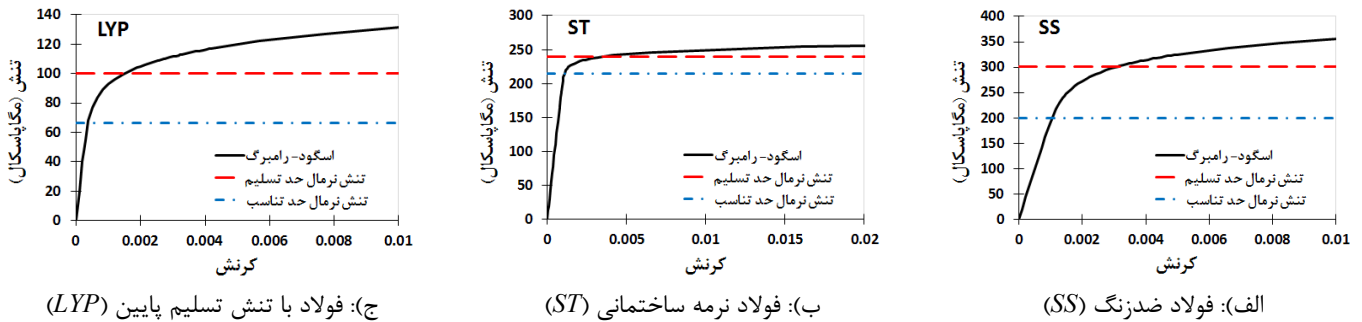
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نسبت لاغری و جنس مصالح در رفتار صفحات تحت بارگذاری برشی موثر است. در این قسمت، با

یکی از مودهای کمانشی آن در نظر گرفته می‌شود [۳۹، ۴۰]. بیشینه مقدار این تغییرشکل اولیه معادل با ۰/۰۵ میلی‌متر، به گونه ای در نظر گرفته شده‌است که تاثیر قابل توجهی بر نتایج تحلیل نگذارد. مشخصات مکانیکی و منحنی‌های تنش کرنش اسگود-رامبرگ مصالح مورد مطالعه به جهت انجام تحلیل‌های غیرخطی به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۲ مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است که در شرایطی که داده‌های آزمایشگاهی دقیق برای منحنی تنش-کرنش در دسترس نباشد، می‌توان از روش‌های تخمینی نظیر روش اسگود-رامبرگ برای تقریب منحنی تنش-کرنش بهره برد [۳۵، ۳۹، ۴۱]. اساس معادله

جدول ۱. مشخصات مصالح

Table 1. Material properties

نوع مصالح	نام اختصاری	E (GPa)	E_t (GPa)	σ_p (Mpa)	σ_y (Mpa)	τ_p (Mpa)	τ_y (Mpa)	ν
فولاد ضدزنگ	SS	۱۹۷/۲	۷/۲۷	۲۰۰	۳۰۱/۴	۱۱۵/۵	۱۷۴	۰/۳
فولاد نرمه ساختمانی	ST	۲۱۰	۰/۹۲	۲۱۵	۲۴۰	۱۲۴/۱	۱۳۸/۶	۰/۳
فولاد با تنش تسلیم پایین	LYP	۲۰۰	۳/۱۶	۶۶/۴	۱۰۰	۳۸/۳	۵۷/۷	۰/۳



شکل ۲. منحنی‌های اسگود-رامبرگ مصالح فولادی مختلف [۱، ۴۳، ۴۴]

Fig. 2. Material Ramberg-Osgood curves, (a): Stainless steel, (b): Mild steel, (c): Low yield point steel [1, 43, 44]

که در صفحات بسیار لاغر ظرفیت کمانشی ورق در مقایسه با ظرفیت نهایی آن ناچیز (قابل صرف نظر) است. در نتیجه، برخلاف صفحات لاغر که ظرفیت ناحیه ارتجاعی آن‌ها می‌تواند از مقادیر کم (ولی غیر قابل صرف نظر) تا مقادیر زیاد متغیر باشد، صفحات بسیار لاغر تقریباً فاقد ناحیه رفتار خطی در طول بارگذاری هستند. این موضوع تاحدی سبب تمایز در خصوصیات رفتاری و قابلیت جذب انرژی صفحات این رده با صفحات لاغر می‌شود. همچنین، در صفحات بسیار ضخیم نیز اصولاً کمانش رخ نمی‌دهد (به بیان دیگر، ظرفیت اسمی کمانشی خمیری ورق (رابطه‌ی ۶) از روابط تئوری موجود (بسیار) بیشتر از ظرفیت نهایی آن محاسبه می‌شود) و باربری صفحه کاملاً تحت تاثیر وقوع تسلیم و گسترش آن در سطح ورق است. این موضوع نیز تاحدی سبب تمایز خصوصیات رفتاری و ویژگی‌های جذب انرژی صفحات این رده با صفحات ضخیم می‌گردد. خلاصه تعاریف انجام شده در بالا در روابط ۹ تا ۱۳ بیان شده است.

- صفحات بسیار لاغر:

$$V_{cr} \leq 0.1V_u \quad (9)$$

- صفحات لاغر:

$$0.1V_u < V_{cr} < V_p \quad (10)$$

- صفحات متوسط:

$$V_p \leq V_{cr} < V_y \quad (11)$$

- صفحات ضخیم:

$$V_{cr} \geq V_y \quad (12)$$

استفاده از نتایج تحلیل غیرخطی استاتیکی ابتدا مصالح مختلف بر اساس نسبت لاغری و با توجه به مشخصه‌های رفتاری‌شان به پنج دسته بسیار لاغر، لاغر، متوسط، ضخیم و بسیار ضخیم تقسیم‌بندی می‌شوند. سپس، خصوصیات رفتاری هر یک از دسته‌ها از حیث رفتار کلی بار-جابجایی، وقوع کمانش یا تسلیم و نحوه گسترش تنش‌ها در طول بارگذاری برشی مورد بحث و مقایسه قرار می‌گیرد. در انتهای این بخش نیز نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های عددی برای بار کمانشی با نتایج به‌دست آمده از روابط تئوری موجود برای محدوده‌های بسیار لاغر، لاغر، متوسط و ضخیم مقایسه می‌شود و در صورت لزوم، با استفاده از تحلیل‌های آماری نتایج به‌دست آمده از مطالعات عددی، روابط تئوری دقیقتری جهت ارزیابی بار کمانشی ارائه می‌گردد. مطالعات مقدماتی انجام شده توسط نویسندگان [۴۱] نشان داده است که در محدوده صفحات متوسط و ضخیم که کمانش به‌ترتیب در محدوده غیرارتجاعی و خمیری اتفاق می‌افتد، تا حدی از دقت روابط پیشنهاد شده توسط آشتو [۳] در مقایسه با تحلیل‌های المان محدود کاسته می‌شود.

لازم به ذکر است که مشابه با تعاریف آیین‌نامه آشتو [۳]، در صفحات لاغر، کمانش در محدوده خطی از رفتار صفحه اتفاق می‌افتد. در صفحات متوسط، ظرفیت کمانش برشی ورق در محدوده غیرارتجاعی از رفتار ورق به‌وقوع می‌پیوندد. در صفحات ضخیم نیز وقوع تسلیم بر کمانش پیشی می‌گیرد و کمانش در محدوده غیرخطی (خمیری) اتفاق می‌افتد. علاوه بر محدوده‌های ذکر شده، همان‌طور که در بالا اشاره شد، تقسیم‌بندی و مطالعه خصوصیات صفحات در دو محدوده بسیار لاغر و بسیار ضخیم نیز، به‌جهت تفاوت‌های رفتاری موجود با سه دسته اخیر، در این مقاله مورد بحث و توجه قرار می‌گیرد. رفتار صفحات بسیار لاغر، مشابه با صفحات لاغر است، با این تفاوت

- صفحات بسیار ضخیم:

$$V_{cr} \gg V_u \quad (۱۳)$$

هنوز میزان این اختلاف در مقایسه با رفتار مشاهده شده از صفحات در سایر محدوده‌ها بسیار زیاد است.

- صفحات متوسط: مشابه با تعریف صورت گرفته در مراجع [۱]، [۳۵]، وقوع پدیده‌های کمانش و تسلیم در این صفحات تقریباً به‌طور همزمان و یا به فاصله کمی از یکدیگر اتفاق می‌افتد. با وقوع این دو پدیده، صفحه نیز به بیشینه باربری خود می‌رسد و پس از آن، وارد فاز رفتار نرم‌شونده می‌شود. بنابراین، صفحه فاقد ظرفیت پس از کمانش یا پس از تسلیم بوده، و ظرفیت کمانشی برشی (اولین تسلیم یا نهایی) آن تقریباً معادل با ظرفیت حد تناسب و یا کمی کوچکتر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن قرار می‌گیرد.

- صفحات ضخیم (لاغری کم): مشابه با تعریف صورت گرفته در مرجع [۱]، [۳۵]، در ظرفیتی معادل با ظرفیت اسمی تسلیم برشی، تقریباً کل سطح ورق به شرایط تسلیم می‌رسد. پس از آن، صفحه باربری ناچیزی را با الگوی رفتار سخت‌شونده (بعلت توسعه تنش‌ها در ناحیه سخت‌شونده منحنی رفتار مصالح) تا لحظه وقوع کمانش خمیری تجربه می‌کند. همزمان با وقوع کمانش خمیری در صفحه، ورق به حد نهایی باربری خود، که به میزان کمی بزرگتر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی ورق است، می‌رسد. در ادامه، رفتار ورق به‌صورت نرم‌شونده ادامه می‌یابد.

- صفحات بسیار ضخیم یا چاق (لاغری بسیار کم): در ظرفیتی معادل با ظرفیت اسمی تسلیم برشی، کل ورق به‌طور همزمان به شرایط تسلیم کامل می‌رسد. پس از آن ورق، بعلت توسعه تنش‌ها در ناحیه سخت‌شونده از رفتار مصالح، باربری محدودی را با رفتار سخت‌شونده (با توجه به مدول الاستیسیته ثانویه منحنی تنش- کرنش مصالح) تا رسیدن به بیشینه ظرفیت تجربه می‌کند. همان‌طور که در شکل (۳-ه) مشاهده می‌شود، در این حالت تغییرشکل‌های عمود بر صفحه ورق، به‌دلیل عدم وقوع پدیده کمانش، بسیار محدود است.

به‌جهت ایجاد درک بیشتر از نحوه توسعه تنش‌ها در صفحات با لاغری‌های مختلف در طول بارگذاری، شکل ۴ توسعه تنش‌ها در طول بارگذاری را در لحظه وقوع پدیده کمانش، وقوع اولین تسلیم و حد نهایی باربری برای صفحات با مصالح مختلف مورد توجه قرار می‌دهد. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که الگوی توسعه تنش‌ها برای صفحات برشی با مصالح فولادی مختلف در طول بارگذاری کم و بیش مشابه است.

۴-۱-۱- خصوصیات کلی رفتار صفحات

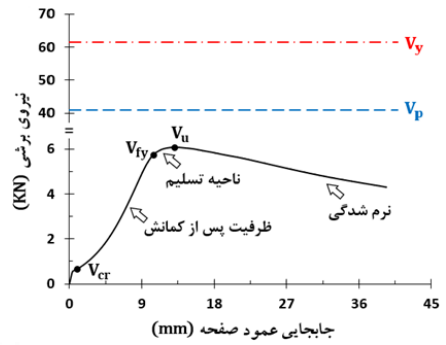
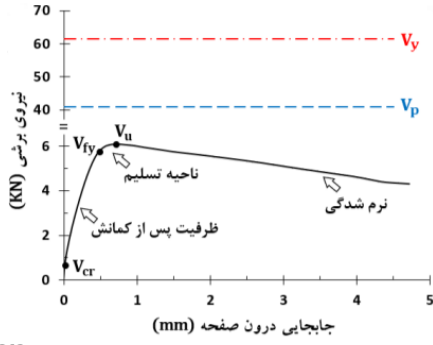
در این قسمت، خصوصیات رفتاری صفحات فولادی در محدوده‌های پنج‌گانه تعریف می‌شود و با ارائه منحنی‌های رفتار کلی صفحات مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل ۳، الگوی کلی منحنی‌های بار- جابه‌جایی درون صفحه و جابه‌جایی خارج از صفحه را برای محدوده‌های پنج‌گانه بسیار لاغر تا بسیار ضخیم نمایش می‌دهد. به جهت امکان مقایسه، ظرفیت برشی حد تناسب، ظرفیت اسمی تسلیم برشی صفحات و نقاط مرتبط با لحظه وقوع کمانش، اولین تسلیم و ظرفیت نهایی صفحات نیز در شکل ۳ مشخص شده‌است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده:

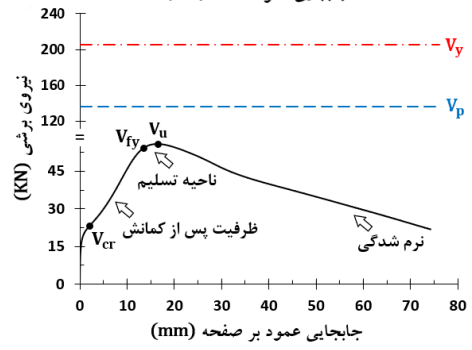
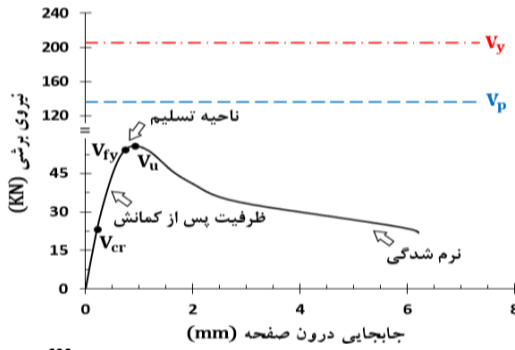
- صفحات بسیار لاغر: پدیده کمانش در همان بارهای اولیه اتفاق می‌افتد و همزمان با آن، تغییرشکل خارج از صفحه ورق شروع به افزایش ناگهانی می‌کند. صفحه تا رسیدن به اولین تسلیم، ظرفیت پس از کمانش قابل توجهی از خود نشان می‌دهد. پس از وقوع اولین تسلیم، صفحه به‌صورت ناگهانی سختی خود را از دست داده و پس از آن، ظرفیت ناچیزی از خود تا رسیدن به بیشینه ظرفیت نشان می‌دهد. در ادامه، ورق وارد فاز نرم‌شوندگی (افزایش تغییرشکل توام با کاهش مقاومت، یا سختی منفی) می‌شود. همچنین در این محدوده، ظرفیت کمانشی، ظرفیت اولین تسلیم یا ظرفیت نهایی صفحه به میزان قابل توجهی از ظرفیت برشی حد تناسب یا ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن کوچک‌تر است.

- صفحات لاغر: رفتار کلی صفحات لاغر و بسیار لاغر تا حد زیادی مشابه یکدیگر است. در مقایسه با صفحات بسیار لاغر، صفحات لاغر ظرفیت کمانشی نسبتاً بیشتری از خود نشان می‌دهند و بنابراین، بسته به نسبت لاغری، ظرفیت پس از کمانش نسبتاً محدودتری دارند. پس از وقوع اولین تسلیم، بدون مشاهده افت ناگهانی سختی در آن‌ها، ظرفیت نسبتاً کمتری از خود تا رسیدن به حد نهایی باربری نشان می‌دهند. بعلاوه، در ورق‌های لاغر از نسبت اختلاف بین ظرفیت کمانشی، ظرفیت اولین تسلیم یا ظرفیت نهایی صفحه با ظرفیت حد تناسب یا ظرفیت اسمی تسلیم برشی ورق کاسته می‌شود، اگرچه

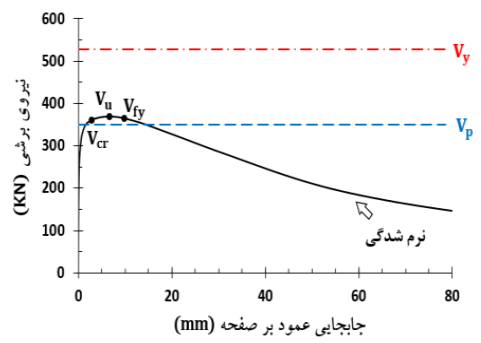
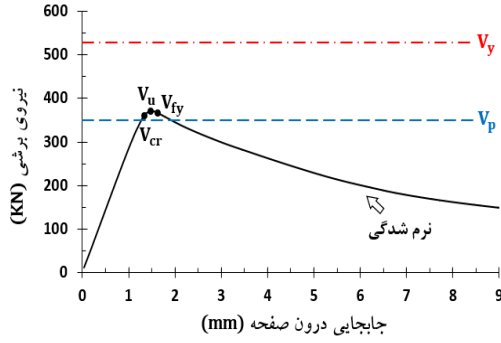
الف: بسیار لاغر



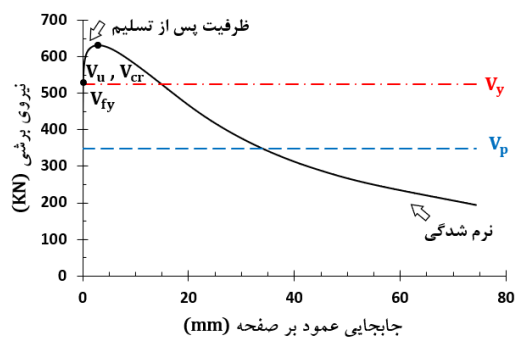
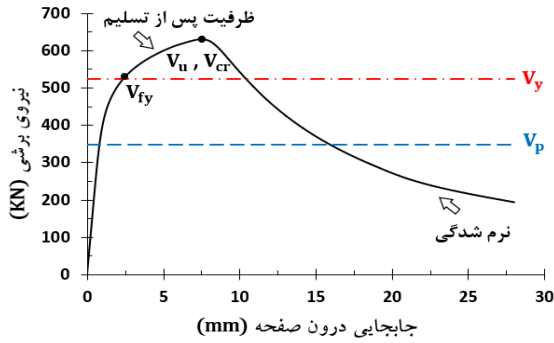
ب: لاغر



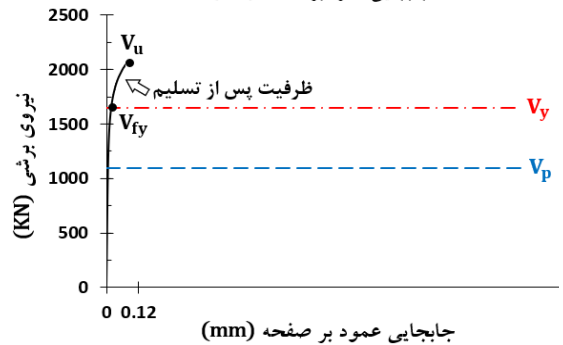
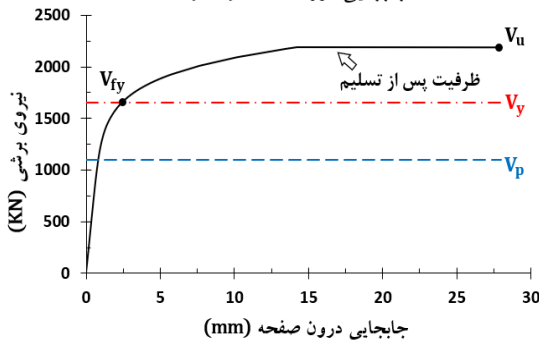
ج: متوسط



د: ضخیم

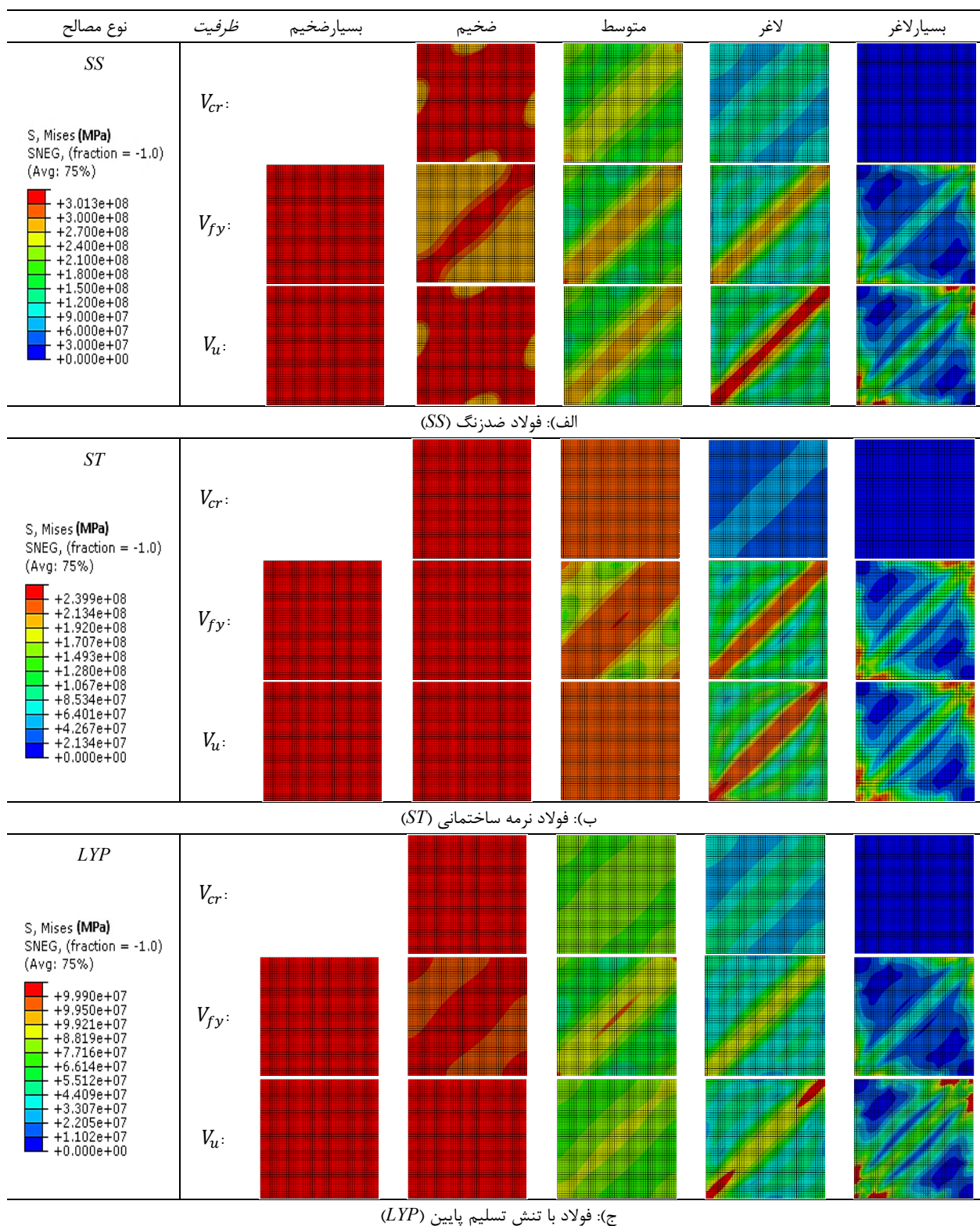


ه: بسیار ضخیم



شکل ۳. الگوهای کلی منحنی‌های رفتار صفحات برای محدوده‌های مختلف لاغری

Fig. 3. General behaviors of steel shear panels for different slenderness categories, (a): Very slender, (b): Slender, (c): Moderate, (d): Stocky, (e): Very stocky



شکل ۴. الگوی گسترش پلاستیسیت و توزیع تنش‌ها در صفحات فولادی مختلف در طول بارگذاری برشی

Fig. 4. Distributions of plasticity and stresses during loading history, (a): Stainless steel, (b): Mild steel, (c): Low yield point steel

منحنی تنش-کرنش توسعه پیدا می‌کنند و که این موضوع، قابلیت باربری محدودی را به صفحه می‌دهد. در صفحات بسیار ضخیم نیز با الگویی نسبتاً مشابه با صفحات ضخیم، توسعه تنش‌ها در کل سطح ورق به‌طور یکنواخت است. با وقوع تسلیم در سطح ورق، کل سطح ورق به‌طور کاملاً یکنواخت به شرایط تسلیم می‌رسد و پس از آن تا حد نهایی باربری، تنش‌ها در محدوده تنش‌های سخت‌شونده مصالح توسعه پیدا می‌کند.

۴-۱-۲- تقسیم‌بندی صفحات با توجه معیار لاغری

جداول ۲ تا ۴ خلاصه نتایج کمی تحلیل غیرخطی استاتیکی صفحات برشی فولادی مختلف را برای شماری از لاغری‌های منتخب ارائه می‌کند. با توجه به نتایج ارائه شده، محدوده‌های پنج‌گانه رفتار صفحات فولادی مختلف نیز مشخص شده‌است.

همان‌طور که در جداول ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود و قبلاً نیز اشاره شد، در صفحات بسیار ضخیم در طول بارگذاری کمانش روی نمی‌دهد. ظرفیت نهایی ورق، بسته به نوع مصالح فولادی (مدول الاستیسیته ثانویه مصالح)، تا حدی بزرگتر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن می‌شود. با توجه به نتایج، حداکثر نسبت مقاومت به ظرفیت اسمی تسلیم برشی به ترتیب برای فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP)، فولاد ضدزنگ (SS) و فولاد نرمه ساختمانی (ST) به‌دست آمده

در صفحات لاغر و بسیار لاغر تا لحظه وقوع کمانش، توسعه تنش‌ها در صفحه محدود است (اگرچه ممکن است که به دلیل وجود تغییرشکل‌های اولیه مقداری اختلاف تنش در سطح ورق، حتی در محدوده ارتجاعی از رفتار نیز مشاهده شود). پس از وقوع کمانش، در صفحات بسیار لاغر توسعه تنش‌ها صرفاً در ناحیه نسبتاً محدودی از ورق اتفاق می‌افتد و در حد نهایی باربری، تنها بخش‌های محدودی از لبه‌های ورق در کنج‌های کششی آن به شرایط تسلیم می‌رسد. در مقابل در مقایسه با صفحات بسیار لاغر، توسعه تنش‌ها در صفحات لاغر پس از وقوع کمانش در آن‌ها تاحدی گسترده‌تر است و در حد نهایی باربری، تسلیم در ناحیه نسبتاً محدودی در راستای قطر کششی آن توسعه می‌یابد. توسعه تنش‌ها در صفحات متوسط، تا حدی تابع جنس مصالح فولادی است و با تغییر جنس صفحات تا حدی دچار تغییر می‌شود. به‌رحال در حالت کلی، صرفنظر از نوع مصالح فولادی، مشاهده می‌شود که در مقایسه با صفحات لاغر و بسیار لاغر، سطح بزرگتری از ورق در صفحات متوسط در توسعه تنش‌ها مشارکت می‌کند و در حد نهایی باربری، پهنای ناحیه تسلیم قطری توسعه بیشتری می‌یابد. با افزایش بارگذاری در صفحات ضخیم، صرفنظر از نوع مصالح، بخش قابل توجهی از صفحه (تقریباً کل صفحه) به‌طور همزمان به شرایط تسلیم می‌رسد. در مرحله پس از تسلیم تا حد نهایی بارگذاری (وقوع کمانش خمیری)، تنش‌ها در ناحیه سخت‌شونده از

جدول ۲. خلاصه نتایج تحلیل صفحات فولادی از نوع فولاد ضدزنگ (SS)

Table 2. Summary of the nonlinear analysis results of stainless steel shear panels

محدوده	t (mm)	$\lambda = b/t$	$\beta = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$	V_{fy} (KN)	V_{cr} (KN)	V_p (KN)	V_y (KN)	V_u (KN)	V_u/V_y	V_{cr}/V_p	V_{cr}/V_y
بسیار ضخیم	۱۰۰/۰	۱۰	۰/۳۹	۱۷۴۳۲/۲	-	۱۱۵۵۰/۰	۱۷۴۰۰/۰	۲۰۷۷۶/۰	۱/۱۹۴	-	-
	۲۵/۰	۴۰	۱/۵۶	۴۳۴۷/۱	-	۲۸۸۷/۵	۴۳۵۰/۰	۵۱۹۳/۹	۱/۱۹۴	-	-
ضخیم	۲۲/۲۲	۴۵	۱/۷۶	۳۸۷۴/۹	۴۶۱۶/۰	۲۵۶۶/۷	۳۸۶۶/۷	۴۶۱۶/۰	۱/۱۹۴	۱/۷۹۸	۱/۱۹۴
	۱۶/۶۷	۶۰	۲/۳۵	۲۸۹۷/۲	۳۲۵۶/۶	۱۹۲۵/۰	۲۹۰۰/۰	۳۲۵۶/۶	۱/۱۲۳	۱/۶۹۲	۱/۱۲۳
	۱۲/۲۰	۸۲	۳/۲۱	۲۰۸۳/۸	۲۱۲۲/۷	۱۴۰۸/۵	۲۱۲۲/۰	۲۱۲۲/۷	۱/۰۰۰	۱/۵۰۷	۱/۰۰۰
متوسط	۱۲/۰۵	۸۳	۳/۲۴	۲۰۴۹/۰	۲۰۷۶/۹	۱۳۹۱/۶	۲۰۹۶/۴	۲۰۷۶/۹	۰/۹۹۱	۱/۴۹۲	۰/۹۹۱
	۸/۳۳	۱۲۰	۴/۶۹	۹۶۵/۶	۹۶۸/۵	۹۶۲/۵	۱۴۵۰/۰	۹۶۸/۵	۰/۶۶۸	۱/۰۰۶	۰/۶۶۸
لاغر	۸/۲۶	۱۲۱	۴/۷۳	۹۴۸/۰	۹۵۰/۳	۹۵۴/۵	۱۴۳۸/۰	۹۵۰/۳	۰/۶۶۱	۰/۹۹۶	۰/۶۶۱
	۳/۳۳	۳۰۰	۱۱/۷۳	۱۳۱/۹	۶۳/۱	۳۸۵/۰	۵۸۰/۰	۱۴۲/۵	۰/۲۴۶	۰/۱۶۴	۰/۱۰۹
	۱/۶۷	۶۰۰	۲۳/۴۶	۳۲/۰	۸/۴	۱۹۲/۵	۲۹۰/۰	۳۷/۰	۰/۱۲۸	۰/۰۴۴	۰/۰۲۹
	۱/۰۰	۱۰۰۰	۳۹/۱	۱۲/۴	۱/۷	۱۱۵/۵	۱۷۴/۰	۱۴/۴	۰/۰۸۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۰
	۰/۹۱	۱۱۰۰	۴۳/۰۰	۹/۹	۱/۲	۱۰۵/۰	۱۵۸/۲	۱۲/۲۴	۰/۰۷۷	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸
بسیار لاغر	۰/۶۷	۱۵۰۰	۵۸/۶۴	۵/۶	۰/۵	۷۷/۰	۱۱۶/۰	۷/۳۹	۰/۰۶۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴
	۰/۴۵	۲۲۰۰	۸۶/۰۱	۳/۲	۰/۲	۵۲/۵	۷۹/۱	۴/۲۲	۰/۰۵۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲

جدول ۳. خلاصه نتایج تحلیل صفحات فولادی از نوع فولاد نرمه ساختمانی (ST)

Table 3. Summary of the nonlinear analysis results of mild steel shear panels

محدوده	t (mm)	$\lambda = b/t$	$\beta = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$	V_{fy} (KN)	V_{cr} (KN)	V_p (KN)	V_y (KN)	V_u (KN)	V_u/V_y	V_{cr}/V_p	V_{cr}/V_y
بسیار ضخیم	۱۰۰/۰	۱۰	۰/۳۴	۱۳۸۶۲/۱	-	۱۲۴۱۰/۰	۱۳۸۵۶/۴	۱۴۷۶۳/۰	۱/۰۶۵	-	-
	۲۲/۲۲	۴۵	۱/۵۲	۳۰۷۹/۸	-	۲۷۵۷/۸	۳۰۷۹/۲	۳۲۷۷/۲	۱/۰۶۴	-	-
ضخیم	۲۰/۰	۵۰	۱/۶۹	۲۷۷۰/۴	۲۹۲۶/۵	۲۴۸۲/۰	۲۷۷۱/۳	۲۹۲۶/۵	۱/۰۵۶	۱/۱۷۹	۱/۰۵۶
	۱۲/۵	۸۰	۲/۷۰	۱۷۳۲/۳	۱۸۰۱/۰	۱۵۵۱/۲	۱۷۳۲/۰	۱۸۰۱/۰	۱/۰۴۰	۱/۱۶۱	۱/۰۴۰
	۱۱/۶۳	۸۶	۲/۹۱	۱۶۱۲/۱	۱۶۴۷/۸	۱۴۴۳/۰	۱۶۱۱/۲	۱۶۴۷/۸	۱/۰۲۳	۱/۱۴۲	۱/۰۲۳
متوسط	۱۱/۴۹	۸۷	۲/۹۴	۱۴۶۲/۱	۱۵۱۳/۸	۱۴۲۶/۴	۱۵۹۲/۷	۱۵۱۳/۸	۰/۹۵۰	۱/۰۶۱	۰/۹۵۰
	۹/۰۱	۱۱۱	۳/۷۵	۱۰۴۰/۴	۱۱۱۹/۱	۱۱۱۸/۰	۱۲۴۸/۳	۱۱۱۹/۱	۰/۸۹۶	۱/۰۰۰	۰/۸۹۶
لاغر	۸/۹۳	۱۱۲	۳/۷۹	۱۰۲۳/۲	۱۱۰۲/۳	۱۱۰۸/۰	۱۲۳۷/۲	۱۱۰۲/۳	۰/۸۹۱	۰/۹۹۵	۰/۸۹۱
	۲/۲۲	۴۵۰	۱۵/۲۱	۵۶/۴	۲۰/۰	۲۷۵/۸	۳۰۷/۹	۵۸/۱	۰/۱۸۹	۰/۰۷۲	۰/۰۶۵
	۱/۱۱	۹۰۰	۳۰/۴۳	۱۴/۹	۲/۴	۱۳۷/۹	۱۵۴/۰	۱۵/۴	۰/۱۰۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۶
	۰/۸۳	۱۲۰۰	۴۰/۵۷	۸/۴	۱/۰۰	۱۰۳/۴	۱۱۵/۵	۹/۱	۰/۰۷۹	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹
بسیار لاغر	۰/۷۷	۱۳۰۰	۴۳/۹۵	۷/۳	۰/۸	۹۵/۵	۱۰۶/۶	۷/۸	۰/۰۷۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸
	۰/۶۷	۱۵۰۰	۵۰/۷۱	۶/۴	۰/۵	۸۲/۷	۹۲/۴	۶/۶	۰/۰۷۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶
	۰/۴۵	۲۲۰۰	۷۴/۳۷	۳/۱	۰/۲	۵۶/۴	۶۳/۰	۳/۳	۰/۰۵۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳

جدول ۴. خلاصه نتایج تحلیل صفحات فولادی از نوع فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP)

Table 4. Summary of the nonlinear analysis results of low yield point steel shear panels

محدوده	t (mm)	$\lambda = b/t$	$\beta = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$	V_{fy} (KN)	V_{cr} (KN)	V_p (KN)	V_y (KN)	V_u (KN)	V_u/V_y	V_{cr}/V_p	V_{cr}/V_y
بسیار ضخیم	۱۰۰/۰	۱۰	۰/۲۲	۵۷۸۰/۶	-	۳۸۳۰/۰	۵۷۷۴/۰	۷۶۷۶/۱	۱/۳۲۹	-	-
	۲۲/۲۲	۴۵	۱/۰۱	۱۲۸۳/۳	-	۸۵۱/۱	۱۲۸۳/۱	۱۷۰۵/۶	۱/۳۲۹	-	-
ضخیم	۲۰/۰	۵۰	۱/۱۲	۱۱۶۷/۱	۱۵۳۵/۲	۷۶۶/۰	۱۱۵۴/۸	۱۵۳۵/۲	۱/۳۲۹	۲/۰۰۴	۱/۳۲۹
	۱۴/۲۹	۷۰	۱/۵۶	۸۳۶/۲	۱۰۵۲/۰	۵۴۷/۱	۸۲۴/۹	۱۰۵۲/۰	۱/۲۷۵	۱/۹۲۳	۱/۲۷۵
	۸/۷۷	۱۱۴	۲/۵۵	۴۹۷/۴	۵۱۱/۴	۳۳۶/۰	۵۰۶/۵	۵۱۱/۴	۱/۰۰۹	۱/۵۲۲	۱/۰۰۹
متوسط	۸/۷۰	۱۱۵	۲/۵۷	۴۹۱/۵	۴۹۹/۱	۳۳۳/۰	۵۰۲/۱	۴۹۹/۱	۰/۹۹۴	۱/۴۹۸	۰/۹۹۴
	۶/۶۷	۱۵۰	۳/۳۵	۲۹۹/۶	۳۰۳/۷	۲۵۵/۳	۳۸۴/۹	۳۰۷/۱	۰/۷۹۸	۱/۱۸۹	۰/۷۸۹
	۵/۶۲	۱۷۸	۳/۹۸	۲۱۱/۸	۲۱۵/۷	۲۱۵/۲	۳۲۴/۴	۲۱۵/۷	۰/۶۶۵	۱/۰۰۲	۰/۶۶۵
لاغر	۵/۵۹	۱۷۹	۴/۰۰	۲۰۹/۵	۲۱۳/۲	۲۱۴/۰	۳۲۲/۶	۲۱۳/۲	۰/۶۶۱	۰/۹۹۶	۰/۶۶۱
	۲/۲۲	۴۵۰	۱۰/۰۶	۳۲/۲	۱۴/۶	۸۵/۱	۱۲۸/۳	۳۴/۲	۰/۲۶۷	۰/۱۷۱	۰/۱۱۳
	۱/۱۱	۹۰۰	۲۰/۱۲	۸/۴	۲/۴	۴۲/۶	۶۴/۲	۸/۹	۰/۱۳۹	۰/۰۵۶	۰/۰۳۷
	۰/۵۹	۱۷۰۰	۳۸/۰۱	۲/۵	۰/۳	۲۲/۵	۳۴/۰	۲/۸	۰/۰۸۲	۰/۰۱۵	۰/۰۱۰
بسیار لاغر	۰/۵۰	۲۰۰۰	۴۴/۷۲	۱/۸	۰/۲	۱۹/۲	۲۸/۹	۲/۱	۰/۰۷۳	۰/۰۱۱	۰/۰۰۷
	۰/۴۵	۲۲۰۰	۴۹/۱۹	۱/۵	۰/۱۶	۱۷/۴	۲۶/۲	۱/۸	۰/۰۶۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶

مختلف، به سمت مقدار واحد میل می‌کند.

در صفحات رده متوسط، ظرفیت کمانشی ورق در بین ظرفیت برشی حد تناسب و ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن قرار می‌گیرد و با وقوع کمانش (غیرارجاعی)، صفحه به حداکثر مقاومت خود می‌رسد. بنابراین در این محدوده، نسبت مقاومت به ظرفیت اسمی تسلیم برشی ورق، کوچکتر یا تقریباً مساوی واحد است و با افزایش نسبت

است.

در صفحات ضخیم، کمانش خمیری، فراتر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی و ظرفیت برشی حد خطی، هم‌زمان با رسیدن ورق به حد نهایی باربری اتفاق می‌افتد. بنابراین در این محدوده، نسبت ظرفیت نهایی ورق به ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن، بسته به نوع مصالح، تا حدی بزرگتر از واحد است، لیکن با افزایش نسبت لاغری، برای مصالح

جدول ۵. تقسیم‌بندی صفحات فولادی مختلف با توجه به معیار لاغری (نتایج المان محدود) و مقایسه با روابط آشتو

Table 5. Quantitative classification of different steel shear panels according to their slenderness ratio and comparison with the available relationships in AASHTO

		بسیار ضخیم		ضخیم		متوسط		لاغر		بسیار لاغر		
		$(\beta = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \leq y\sqrt{K})$		$(x\sqrt{K} \leq \beta = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \leq y\sqrt{K})$		$(x\sqrt{K} \leq \beta = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \leq y\sqrt{K})$		$(x\sqrt{K} \leq \beta = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \leq y\sqrt{K})$		$(x\sqrt{K} \leq \beta = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \leq y\sqrt{K})$		
		x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	
آشتو		-	-	-	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۴۰	۱/۴۰	-	-	۱/۴۰	-
المان محدود	SS	-	۰/۵۱	۰/۵۱	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۵۴	۱/۵۴	۱۴/۰۷	۱۴/۰۷	۱۴/۰۷	-
	ST	-	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۹۵	۰/۹۵	۱/۲۳	۱/۲۳	۱۴/۳۸	۱۴/۳۸	۱۴/۳۸	-
	LYP	-	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۱/۳۰	۱/۳۰	۱۴/۶۳	۱۴/۶۳	۱۴/۶۳	-

محدوده‌های متوسط- ضخیم (کمانش غیرارتجاعی- کمانش خمیری) نیز با توجه به تغییر مدول الاستسیته مصالح در این محدوده از رفتار مصالح، استفاده از مدول الاستسیته حد خطی (E)، به تنهایی، در روابط چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. به هر حال، تحلیل دقیقتر این مسئله مطالعات بیشتری را می‌طلبد و در دامنه تحقیق حاضر نمی‌گنجد.

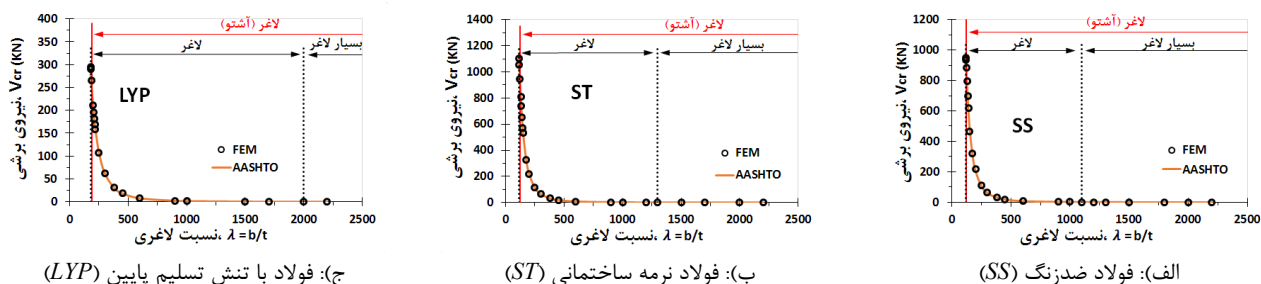
۱-۳-۴- ارزیابی و مقایسه نتایج تحلیل عددی و روابط تئوری موجود برای بار کمانشی

در اشکال ۵ و ۶ نتایج بار کمانشی ($V_{cr} = \tau_{cr} \times b \times t$) به دست آمده از تحلیل عددی و روابط تئوری موجود (روابط ۴ تا ۶) به ترتیب برای محدوده‌های لاغر و بسیار لاغر و محدوده‌های متوسط و ضخیم مقایسه شده‌است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود و نتایج تحقیقات گذشته توسط نویسنده [۴۱] نیز نشان می‌دهد، در محدوده صفحات لاغر و بسیار لاغر، روابط تئوری موجود (رابطه‌ی ۴) و نتایج تحلیل‌های المان محدود توافق مناسبی دارند که موید صحت روش مدلسازی و تحلیل در نرم‌افزار نیز است. در مقابل در محدوده‌های صفحات متوسط و ضخیم، مشاهده می‌شود روابط تئوری موجود (روابط ۵ و ۶) در مقایسه با نتایج تحلیل‌های المان محدود بار کمانشی را تا حدی کوچکتر ارزیابی می‌کنند. به همین جهت، با توجه به نتایج تحلیل المان محدود و با استفاده از تحلیل آماری نتایج به دست آمده از مصالح فولادی در نظر گرفته شده، روابط جدیدی برای ارزیابی بار کمانشی صفحات متوسط و ضخیم پیشنهاد شده‌است، که همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، قادر است با دقت نسبتاً بهتری نسبت به روابط آشتو [۳] بار کمانشی صفحات را در محدوده متوسط (کمانش غیرارتجاعی) و ضخیم (کمانش خمیری) پیش‌بینی کند (به

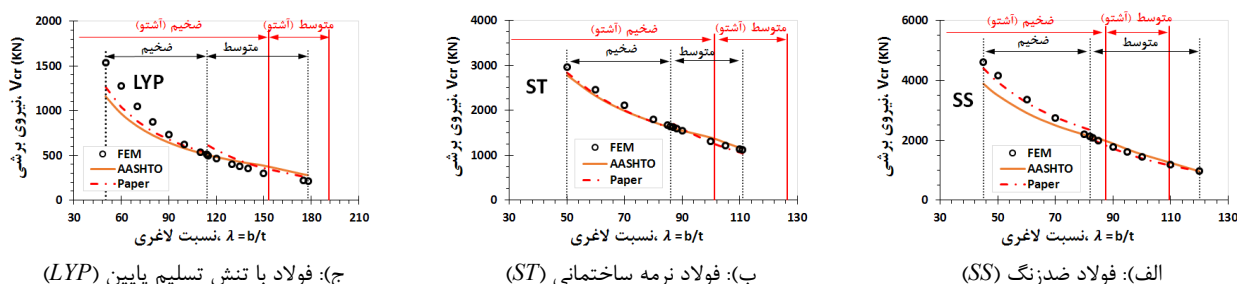
لاغری، تا حد مشخصی کاهش می‌یابد.

در صفحات لاغر و بسیار لاغر، ورق در محدوده ارتجاعی از رفتار خود دچار کمانش می‌شود. نسبت ظرفیت نهایی به ظرفیت اسمی تسلیم برشی کوچکتر از واحد است و با افزایش لاغری، کوچکتر می‌شود، به گونه‌ای که در ورق‌های بسیار لاغر ($\lambda = 220$) این نسبت به حدود ۵٪ نیز می‌رسد.

همان‌طور که قبلاً صحبت شد و در جداول ۲ تا ۴ نیز مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد معیار لاغری بتواند معیار مناسبی جهت مرزبندی و تشخیص محدوده رفتار صفحات تحت بارگذاری برشی باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول ۲ تا ۴ و ارزیابی آماری نسبت‌های (پارامتر) لاغری برای هر یک از محدوده‌های رفتار، نتایج مرزبندی محدوده‌های لاغری برای مصالح مختلف فولادی در جدول ۵ ارائه، و با روابط پیشنهادی موجود در آشتو [۳] مقایسه شده‌است. مشابه با نتایج گزارش شده در تحقیقات گذشته [۱، ۳۵]، در جدول ۵ نیز برای صفحات فولادی مختلف در نظر گرفته شده در این تحقیق مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از تحلیل المان محدود برای مرزبندی صفحات فولادی مختلف با یکدیگر اختلاف دارند. بعلاوه، در محدوده‌های صفحات لاغر، متوسط و ضخیم نیز بین نتایج مرزبندی به دست آمده از تحلیل المان محدود با روابط آشتو اختلاف مشاهده می‌شود. احتمالاً دلیل این موضوع به نحوه تعریف پارامتر لاغری (β) بر می‌گردد که برای محدوده‌های مختلف (کمانش ارتجاعی، کمانش غیرارتجاعی و کمانش خمیری) با توجه به پارامترهای تنش تسلیم (σ_y) و مدول الاستسیته اولیه (E) تعریف شده‌است. در حالی که به نظر می‌رسد در تعیین مرز محدوده‌های لاغر- متوسط (کمانش ارتجاعی- کمانش غیرارتجاعی) استفاده از پارامتر تنش حد تناسب (σ_p) به جای تنش حد تسلیم (σ_y) مصالح مناسبتر باشد. همچنین، در تعیین مرز



شکل ۵. مقایسه نتایج بار کمانشی به دست آمده از تحلیل المان محدود با روابط تئوری موجود برای صفحات محدوده‌های لاغر و بسیار لاغر
Fig. 5. Comparison of buckling loads from finite element/theoretical for slender/very slender plates, Stainless steel, (b): Mild steel, (c): Low yield point steel



شکل ۶. مقایسه نتایج بار کمانشی به دست آمده از تحلیل المان محدود با روابط آیین‌نامه آشتو برای صفحات محدوده‌های متوسط و ضخیم
Fig. 6. Comparison of buckling loads from finite element/theoretical/proposed equation for moderate/stocky plates, Stainless steel, (b): Mild steel, (c): Low yield point steel

تسلیم در صفحه، رفتار صفحه در محدوده رفتار خطی قرار دارد. با وقوع یکی از پدیده‌های تسلیم یا کمانش، ورق به ترتیب به لحاظ مکانیکی یا هندسی وارد مرحله غیرخطی می‌شود. در صورتیکه هر دو پدیده تسلیم (غیرخطی مکانیکی یا مصالح) و کمانش (غیرخطی هندسی) در صفحه به وقوع پیوسته باشد، رفتار صفحه به طور کامل غیرخطی خواهد بود.

شکل ۷ خصوصیات باربری صفحات فولادی برشی را برای مصالح و نسبت‌های (محدوده‌های) لاغری مختلف، بر اساس دامنه رفتار خطی یا غیرخطی‌شان (مکانیکی، هندسی یا هر دو) در طول بارگذاری تا لحظه رسیدن به مقاومت نهایی مورد توجه قرار می‌دهد. به جهت ترسیم نتایج در شکل (۷)، ظرفیت‌های متناظر با وقوع اولین تسلیم، کمانش (ارتجاعی، غیرارتجاعی یا خمیری) یا حد نهایی باربری برای هر نسبت لاغری به صورت بی‌بعد و با تقسیم کردن ظرفیت مربوطه به مقاومت نهایی ورق مورد نظر حاصل شده‌است. همچنین به جهت فراهم آوردن امکان مقایسه راحت‌تر، محدوده‌های رفتار مصالح (بسیار لاغر، لاغر، متوسط، ضخیم و بسیار ضخیم) نیز بر اساس مطالعه حاضر و روابط آشتو [۳] در شکل ۷ به تفکیک ترسیم شده‌است. با توجه به

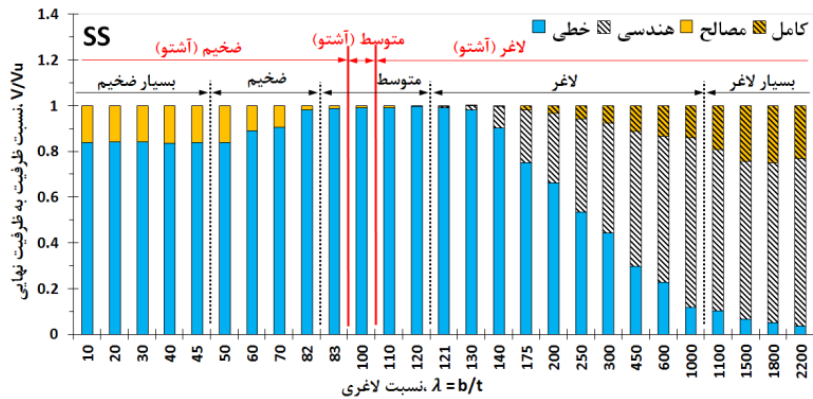
ترتیب روابط ۱۴ و ۱۵).

$$\tau_{cr} = 0.592 \times \frac{(EK\sigma_y)^{0.50}}{\lambda} \quad (14)$$

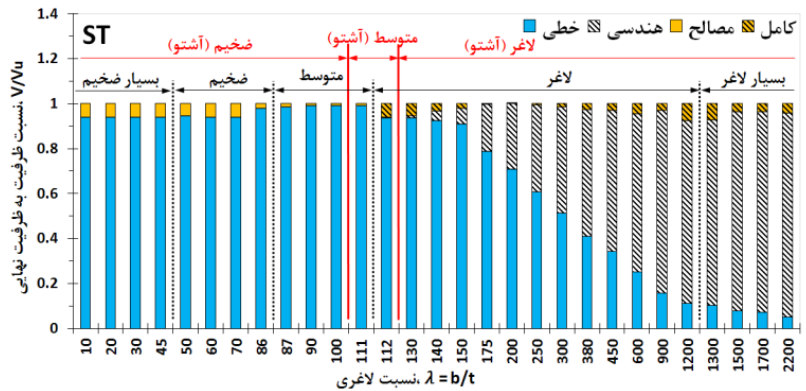
$$\tau_{cr} = 0.827 \times \sigma_y \times \left(\frac{K \times E_t}{\lambda \times E} \right)^{0.047} \quad (15)$$

۴-۱-۴- تاثیر نسبت (محدوده) لاغری بر دامنه‌های رفتار خطی/غیرخطی در طول باربری

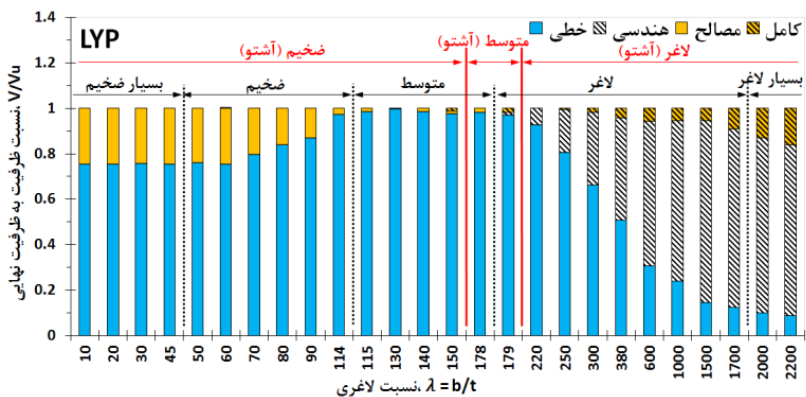
همان‌طور که می‌دانیم و قبلاً نیز اشاره شد، صفحات بسته به نسبت لاغری‌شان پدیده‌های کمانش و یا تسلیم را در طول بارگذاری‌شان تجربه می‌کنند. آگاهی نسبت به زمان وقوع پدیده‌های تسلیم و کمانش، توالی یا تاخر این دو پدیده نسبت به یکدیگر و ظرفیت‌های متناظر با هر یک، نه تنها از حیث درک بهتر رفتار صفحات بعنوان المان اصلی باربر یا بخشی از یک سیستم باربر می‌تواند با اهمیت باشد، بلکه در فرآیند طراحی چنین سازه‌هایی نیز می‌تواند به عنوان یک عامل تاثیرگذار باشد و فلسفه جدیدی را در طراحی آن‌ها برای سطوح مختلف بارگذاری به‌ارمغان آورد. تا قبل از وقوع کمانش و



(الف): فولاد ضدزنگ (SS)



(ب): فولاد نرمه ساختمانی (ST)



(ج): فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP)

شکل ۷. دامنه رفتار خطی و غیرخطی (هندسی، مصالح و یا هر دو) صفحات فولادی با مصالح و نسبت‌های (محدوده‌های) لاغری مختلف از شروع تا حداکثر بارگذاری

Fig. 7. Separation of linear/nonlinear behavior phases for steel shear panels of different slenderness ratios, (a): Stainless steel, (b): Mild steel, (c): Low yield point steel

نتایج به دست آمده: نهایی باربری به لحاظ مکانیکی غیرخطی می‌شود، درحالی که رفتار آن

به لحاظ هندسی همچنان خطی است.

صفحات بسیار ضخیم: بسته به جنس صفحه و نسبت لاغری آن، بخش

صفحات بسیار ضخیم: بسته به جنس صفحه و بدون توجه به

قابل توجهی از باربری صفحه، به ویژه برای نسبت‌های لاغری بزرگتر،

نسبت لاغری، بخش قابل توجهی از باربری در محدوده ارتجاعی اتفاق

در محدوده خطی اتفاق می‌افتد. پس از آن با وقوع تسلیم در ورق،

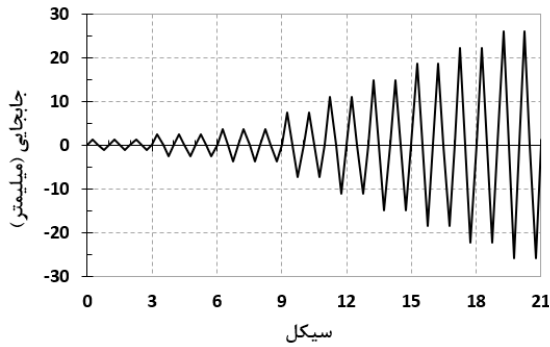
می‌افتد (به ترتیب ۸۵، ۹۵ و ۷۵ درصد از ظرفیت نهایی به ترتیب برای

رفتار ورق تا حد نهایی باربری، که همزمان با وقوع کمناش (خمیری)

مصالح فولاد ضدزنگ (SS)، فولاد نرمه ساختمانی (ST) و فولاد با

تنش تسلیم پایین (LYP). پس از آن، ورق تسلیم، و رفتار آن تا حد

رفتار آن تا حد



شکل ۸. تاریخچه اعمال بارگذاری سیکلی
Fig. 8. History of cyclic displacement

جابه‌جایی حد تسلیم (δ_y) برای تمام مدل‌ها یکسان و تقریباً معادل با $3/7$ میلی‌متر فرض شده‌است. شش سیکل ابتدایی به ترتیب مبتنی بر جابه‌جایی‌های $0,33\delta_y$ و $0,67\delta_y$ با سه تکرار، در جابه‌جایی $1\delta_y$ نیز سه سیکل تکرار، و برای هر کدام از جابه‌جایی‌های بزرگتر از آن ($2\delta_y$ تا $7\delta_y$) دو سیکل تکرار فرض شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اعمال جابه‌جایی‌ها تقریباً مشابه با دستورالعمل تحلیل سیکلی آیین‌نامه آمریکا عمل شده [۴۵]، با این تفاوت که در جابه‌جایی‌های $2\delta_y$ و $3\delta_y$ به جای سه تکرار، دو تکرار فرض شده‌است. شرایط مرزی و الگوی بارگذاری برشی صفحات قبلاً در شکل ۱-ب تشریح شده‌است.

شکل ۹ الگوی کلی منحنی‌های هیستریزس^۱ صفحات فولادی را در محدوده‌های بسیار لاغر تا بسیار ضخیم برای مصالح مختلف ارائه می‌کند. در ارائه نتایج، محورهای قائم نسبت به ظرفیت اسمی تسلیم برشی ورق ($V_y = \tau_y \times b \times t$) و محورهای افقی نیز نسبت به ارتفاع صفحه بی بعد (نسبت دریافت) شده‌اند. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود با کاهش نسبت لاغری (در محدوده‌های صفحات ضخیم و بسیار ضخیم) در شرایطی که رفتار صفحه عمدتاً تحت اثر وقوع تسلیم در آن است، سطح زیر منحنی‌های هیستریزس و در نتیجه، قابلیت جذب انرژی صفحات نیز برجسته‌تر است. در مقابل با کاهش نسبت لاغری در محدوده متوسط، لاغر و به‌ویژه، بسیار لاغر که به تدریج نقش کماتش در رفتار صفحات برجسته‌تر می‌شود، به دلیل وقوع کماتش و در نتیجه، پدیده تنگ‌شدگی^۲ در منحنی‌های هیستریزس، قابلیت جذب انرژی صفحات تحت تاثیر قرار گرفته و از میزان جذب انرژی آن‌ها کاسته می‌شود. همچنین، مقایسه نتایج برای

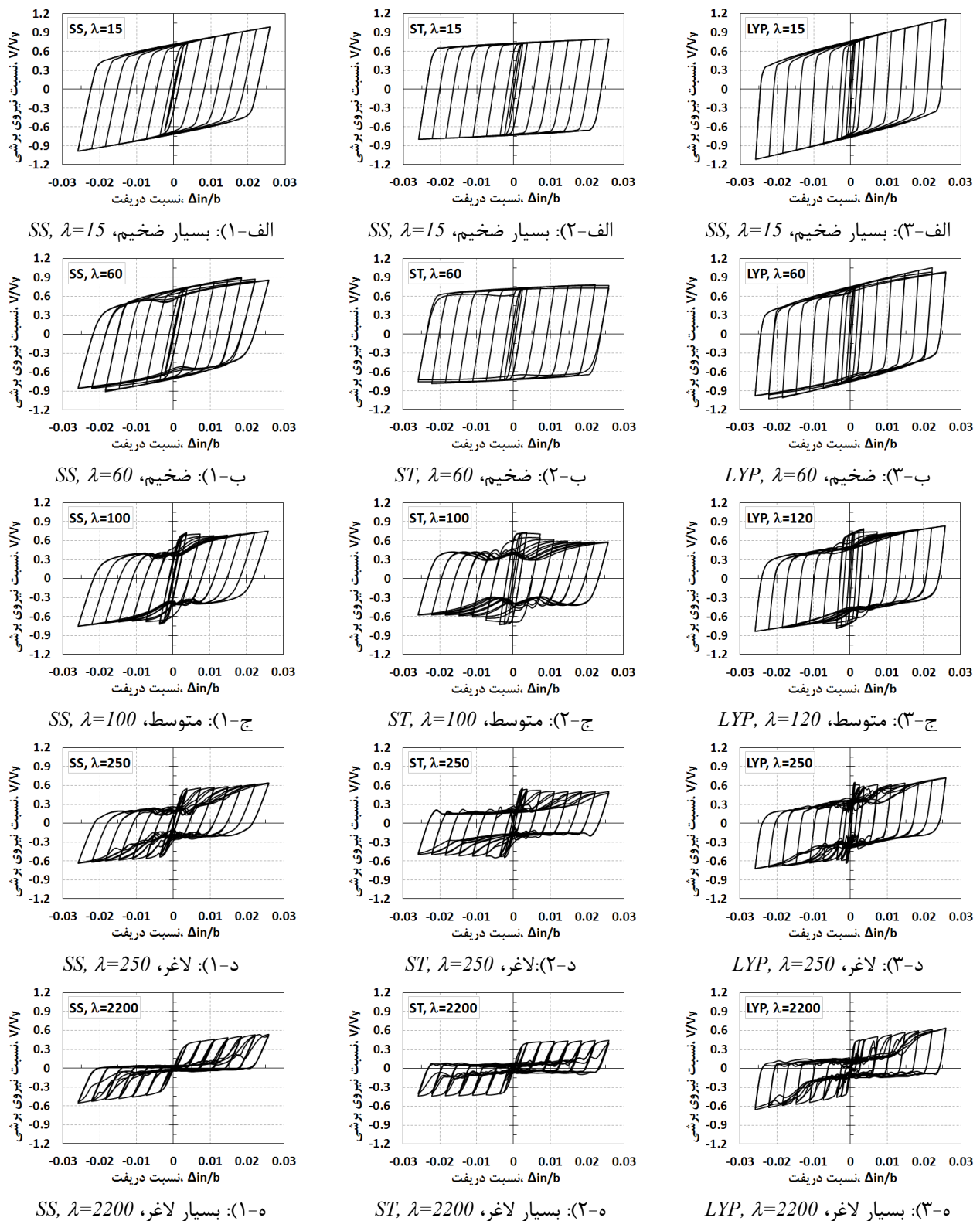
در آن است، به لحاظ مکانیکی غیرخطی می‌شود. بنابراین مشابه با صفحات بسیار ضخیم، عملاً ورق تا لحظه رسیدن به باربری نهایی خود رفتار غیرخطی هندسی (یا غیرخطی کامل) را تجربه نمی‌کند.
- صفحات متوسط: بسته به جنس صفحات، عمده باربری در محدوده ارتجاعی از رفتار اتفاق می‌افتد و عملاً، دامنه رفتار غیرخطی (هندسی یا مکانیکی) ناچیز و قابل صرف‌نظر است.
- صفحات لاغر و بسیار لاغر: در محدوده لاغری‌های کوچکتر، رفتار تا حدی مشابه با صفحات متوسط است و عمده باربری در فاز ارتجاعی اتفاق می‌افتد. پس از آن با وقوع کماتش، صفحه رفتار غیرخطی هندسی را تجربه می‌کند. در ادامه با وقوع تسلیم یا کمی پس از آن، ورق با تجربه رفتار غیرخطی کامل (هندسی و مصالح) به حد نهایی باربری خود می‌رسد. با افزایش نسبت لاغری، به دلیل افت ظرفیت کماتشی ورق، تدریجاً دامنه رفتار خطی آن نیز کاهش می‌یابد. با وقوع کماتش، ورق وارد فاز پس از کماتش یا محدوده رفتار غیرخطی هندسی می‌شود. در نسبت‌های لاغری بزرگتر نیز عمده باربری ورق در محدوده پس از کماتش (غیرخطی هندسی) اتفاق می‌افتد. اگرچه در حالت کلی با افزایش نسبت لاغری، پدیده تسلیم در ورق نیز به‌طور نسبی زودتر رخ می‌دهد و در نتیجه، دامنه رفتار غیرخطی کامل (هندسی و مصالح) تا حدی افزایش می‌یابد.

۲-۴- تحلیل سیکلی و استهلاک انرژی

جهت بررسی تاثیر نسبت (محدوده) لاغری در خصوصیات جذب انرژی صفحات برشی، برای هریک از مصالح فولاد ضدزنگ (SS)، فولاد نرمه ساختمانی (ST)، فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP) تعدادی مدل با نسبت‌های لاغری مختلف (به‌گونه‌ای که معرف هر یک از محدوده‌های پنج‌گانه رفتار باشند) انتخاب می‌گردد و تحت آنالیز سیکلی قرار می‌گیرد. به‌منظور فراهم آوردن امکان مقایسه منطقی و یکسان بین نتایج جذب انرژی و رفتار سیکلی صفحات مختلف با یکدیگر، از یک تاریخچه بارگذاری یکسان، که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، برای مدل‌های مختلف استفاده گردید.

با توجه به شکل ۸ و با عنایت به ماهیت تحلیل سیکلی، بارگذاری با اعمال ۲۱ سیکل جابه‌جایی جانبی به لبه فوقانی ورق (مطابق شکل ۱-ب) تا رسیدن به تغییرمکان نسبی جانبی حدود $25/9$ میلی‌متر (تقریباً معادل با درصد دریافت $2/5\%$) انجام شده‌است. در این راستا،

1 Hysteresis
2 Pinching



شکل ۹. منحنی های هیستریزیس صفحات فولادی مختلف در محدوده های بسیار لاغر تا بسیار ضخیم
 Fig. 9. Hysteresis curves of different steel shear panels

است.

در محدوده صفحات ضخیم، متوسط و لاغر، قابلیت جذب انرژی صفحات تحت تاثیر تنش تسلیم مصالح و به‌ویژه نسبت لاغری صفحات است. با تغییر نسبت لاغری صفحه، قابلیت جذب انرژی صفحات می‌تواند به‌شدت تغییر کند. به‌رحال با فرض یک محدوده لاغری مشخص و نسبت لاغری ثابت، مشابه با صفحات رده بسیار ضخیم، بیشینه انرژی جذب شده در واحد حجم صفحات به‌ترتیب برای مصالح فولاد ضدزنگ (SS)، فولاد نرمه ساختمانی (ST) و فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP) مشاهده می‌شود. در مقابل، در صفحات رده بسیار لاغر به‌نظر می‌رسد که قابلیت جذب انرژی صفحات عمدتاً تحت تاثیر مدول الاستیسته صفحات باشد و بنابراین، نه تنش تسلیم و نه نسبت لاغری تاثیری در آن ندارند. ازین جهت عملاً، قابلیت جذب انرژی صفحات فولادی مختلف در این محدوده کم و بیش مشابه است.

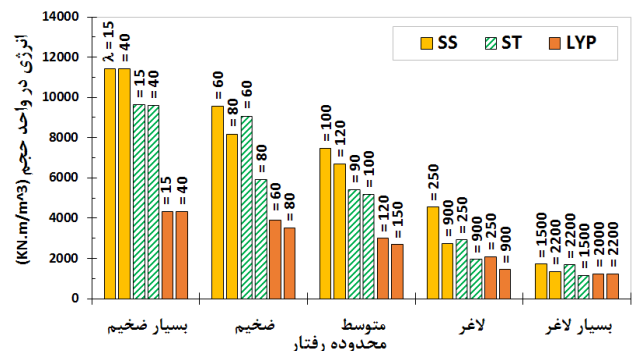
۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، جهت بررسی خصوصیات و ویژگی‌های رفتاری صفحات فولادی تحت الگوی بارگذاری برشی، بالغ بر صد و بیست صفحه با مصالح و نسبت‌های لاغری مختلف با استفاده از روش مدل‌سازی المان محدود و بهره‌گیری از روش‌های آنالیز استاتیکی غیرخطی و سیکلی مورد تحلیل قرار گرفتند. صفحات فولادی از سه جنس مختلف (فولاد ضدزنگ (SS)، فولاد نرمه ساختمانی (ST) و فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP))، به‌صورت مربع‌شکل با ابعاد "۱۰۰۰×۱۰۰۰" میلی‌متر مربع، با شرایط مرزی ساده و در محدوده بسیار وسیعی از نسبت‌های لاغری ($10 \leq \lambda \leq 220$) فرض شدند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها، صفحات در پنج رده بسیار لاغر، لاغر، متوسط، ضخیم و بسیار ضخیم با توجه به معیار لاغری مرزبندی و دسته‌بندی شدند. خصوصیات رفتاری و قابلیت جذب انرژی هر رده به‌لحاظ کیفی و کمی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین، روابطی جهت تعیین مرزبندی‌های رفتاری صفحات و تخمین دقیق‌تر بار کمانشی صفحات متوسط و ضخیم ارائه شد. نتایج برجسته تحقیق حاضر عبارت است از:

در صفحات بسیار لاغر، پدیده کمانش (ارتجاعی) در همان بارهای اولیه اتفاق می‌افتد و همزمان با آن، تغییرشکل خارج از صفحه

مصالح مختلف فولادی با یکدیگر، نشان می‌دهد که الگوی منحنی‌های هیستریزس برای مصالح مختلف برای هر محدوده مشخص از رفتار (لاغری) تقریباً مشابه یکدیگر است. البته به جهت شیب (مدول الاستیسته) ثانویه (نرخ رشد تنش‌ها در ناحیه سخت‌شوندگی مصالح) بیشتر در منحنی‌های تنش-کرنش فولاد ضدزنگ (SS) و فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP) نسبت به فولاد نرمه ساختمانی (ST) (شکل ۲ را ببینید)، امتداد کلی منحنی‌های هیستریزس تاحدی تحت تاثیر قرار گرفته است.

به جهت مقایسه کمی تاثیر نسبت‌های (محدوده‌های) لاغری و جنس مصالح در قابلیت جذب انرژی صفحات، شکل ۱۰ متوسط انرژی جذب شده در دو سیکل انتهایی را به واحد حجم صفحات برای مدل‌های مختلف مقایسه می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در حالت کلی، صرفنظر از نوع مصالح، با افزایش نسبت لاغری (تغییر لاغری مصالح از محدوده بسیار ضخیم تا بسیار لاغر)، به‌دلیل وقوع کمانش در صفحه و در نتیجه آن، پدیده تنگ‌شدگی در منحنی‌های رفتار، جذب انرژی واحد حجم صفحات تدریجاً تا مقدار محسوسی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، از قابلیت جذب انرژی آن‌ها کاسته می‌شود. در محدوده صفحات بسیار ضخیم که کمانش در آن‌ها رخ نمی‌دهد، قابلیت جذب انرژی صفحات کاملاً تحت تاثیر تنش تسلیم مصالح است و با تغییر نسبت لاغری در این محدوده، تغییر نمی‌کند. با توجه به نتایج، حداکثر جذب انرژی در محدوده صفحات بسیار ضخیم به‌ترتیب برای مصالح فولاد ضدزنگ (SS)، فولاد نرمه ساختمانی (ST) و فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP) به‌دست آمده



شکل ۱۰. متوسط انرژی جذب شده در دو سیکل انتهایی در واحد حجم صفحات برشی با مصالح و نسبت‌های (محدوده‌های) لاغری مختلف
Fig. 10. Average energy dissipation of the last two cycles per unit volume for steel shear panels with different materials and slenderness ratios

ورق به‌طور ناگهانی شروع به افزایش می‌کند. صفحه تا رسیدن به اولین تسلیم (غیرخطی کامل)، بخش عمده‌ای از باربری خود را در محدوده پس از کمانش (غیرخطی هندسی) انجام می‌دهد. با وقوع اولین تسلیم، صفحه به میزان محدودی تا حد نهایی مقاومت به باربری خود ادامه می‌دهد. در حد نهایی باربری، توسعه تنش‌ها در سطح صفحه محدود است و تنها نقاط مشخصی از کنج‌های کششی صفحه به شرایط تسلیم می‌رسند. بنابراین، ظرفیت نهایی صفحه در مقایسه با ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن ناچیز ارزیابی می‌شود (تقریباً با توجه نتایج، $V_u = (0.1 \sim 0.9)V_y$).

رفتار صفحات لاغر نیز تا حد زیادی مشابه با صفحات بسیار لاغر است، با این تفاوت که صفحات لاغر، ظرفیت کمانشی نسبتاً بیشتری از خود نشان می‌دهند و بنابراین، بسته به نسبت لاغری، ظرفیت پس از کمانش (محدوده رفتار غیرخطی هندسی) نسبتاً محدودتری دارند. اندکی پس از وقوع اولین تسلیم (محدوده رفتار غیرخطی کامل) به ظرفیت نهایی خود می‌رسند. بسته به نسبت لاغری و نوع مصالح، ظرفیت نهایی صفحات لاغر می‌تواند به میزان کم تا قابل توجهی کوچکتر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن‌ها باشد (تقریباً با توجه نتایج، $V_u = (0.1 \sim 0.9)V_y$ ، لیکن در مقایسه با صفحات بسیار لاغر، تا حدی از نسبت اختلاف کاسته می‌شود. گسترش تنش‌ها در سطح صفحات لاغر حتی در حد نهایی باربری نیز محدود است و تنها نواحی مشخصی از صفحه در راستای قطر کششی آن دچار تسلیم می‌شود.

در صفحات متوسط، وقوع اولین تسلیم و کمانش تقریباً به‌طور هم‌زمان و یا با فاصله کمی از یکدیگر اتفاق می‌افتد و بلافاصله پس از آن، صفحه به حد نهایی باربری خود می‌رسد. در مقایسه با صفحات لاغر، توسعه تنش‌ها در سطح ورق گسترده‌تر است و سطح بیشتری از آن در حد نهایی باربری به حد تسلیم می‌رسد. در نتیجه، ظرفیت نهایی ورق، بسته به نسبت لاغری، به ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن نزدیک می‌شود (تقریباً با توجه نتایج، $V_u = (0.7 \sim 1.0)V_y$).

در صفحات ضخیم، در ظرفیت معادل با ظرفیت اسمی تسلیم برشی، تقریباً کل سطح ورق به شرایط تسلیم می‌رسد. پس از آن، صفحه باربری ناچیزی را با الگوی رفتار سخت‌شونده (بعلت توسعه تنش‌ها در ناحیه سخت‌شونده از منحنی رفتار مصالح) تا لحظه وقوع کمانش خمیری در صفحه تجربه می‌کند. هم‌زمان با وقوع کمانش

خمیری در صفحه، ورق به حد نهایی باربری خود، که به میزان کمی بزرگتر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی ورق است، می‌رسد (تقریباً با توجه نتایج، $V_u = (1.0 \sim 1.3)V_y$).

در صفحات بسیار ضخیم، در ظرفیت معادل با ظرفیت اسمی تسلیم برشی، کل سطح ورق به شرایط تسلیم کامل می‌رسد. پس از آن ورق، بعلت توسعه تنش‌ها در ناحیه سخت‌شونده از رفتار مصالح، باربری محدودی را با رفتار سخت‌شونده (با توجه به با مدول الاستیسیته ثانویه مصالح) تا رسیدن به بیشینه ظرفیت خود نشان می‌دهد. بنابراین، مقاومت نهایی ورق، بسته به جنس مصالح، تا حدی بزرگتر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی خواهد بود (تقریباً با توجه نتایج به‌دست آمده، $V_u = (1.05 \sim 1.3)V_y$). در صفحات این رده، تغییر شکل‌های عمود بر صفحه ورق، به‌دلیل عدم وقوع پدیده کمانش، بسیار محدود است.

برای هر یک از مصالح، روابط تئوری اصلاح شده جهت تخمین محدوده لاغری برای هر یک از رده‌های پنج‌گانه رفتار به‌صورت جداگانه ارائه و با روابط آشتو [۳] مقایسه شد.

نتایج تحلیل المان محدود و روابط تئوری موجود در آشتو [۳] جهت تخمین بار کمانشی صفحات در محدوده ارتجاعی (صفحات رده لاغر و بسیار لاغر)، توافق نزدیکی داشتند، لیکن در محدوده کمانش غیرارتجاعی (صفحات متوسط) و کمانش خمیری (صفحات ضخیم) تا حدی اختلاف بین نتایج این دو وجود داشت. با مطالعه آماری نتایج المان محدود، روابط ریاضی جدیدی جهت تخمین بار کمانشی صفحات در این دو محدوده ارائه شد که قادر است بار کمانشی را برای مصالح مختلف، با دقت نسبتاً بهتری در مقایسه با روابط تئوری موجود پیش‌بینی کند.

به‌طور کلی، قابلیت جذب انرژی صفحات (انرژی جذب شده در واحد حجم) با افزایش نسبت لاغری (تغییر محدوده رفتار از بسیار ضخیم به بسیار لاغر)، عمدتاً به‌دلیل وقوع کمانش و پدیده تنگ‌شدگی، تدریجاً با افت مواجه می‌شود. قابلیت جذب انرژی صفحات فولادی در محدوده بسیار ضخیم صرفاً تحت تاثیر تنش تسلیم مصالح است (حداکثر و حداقل جذب انرژی به ترتیب برای فولاد ضدزنگ (SS) و فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP) مشاهده شد)، درحالی‌که در محدوده‌های صفحات ضخیم، متوسط و لاغر، تحت تاثیر نسبت لاغری نیز علاوه بر تنش تسلیم قرار دارد. در محدوده بسیار لاغر، بدون توجه

جدول ۶. فهرست پارامترها

طول پانل	a	ضریب کمانش برشی	K	ظرفیت کمانش برشی	V_{cr}
عرض پانل	b	ضریب پواسون	ν	ظرفیت برشی معادل با وقوع اولین	V_{fy}
ضخامت پانل	t	مدول الاستیسیته ثانویه	E_t	ظرفیت برشی حد خطی (تناسب)	V_p
نسبت ابعادی	φ	تنش نرمال حد خطی	σ_p	ظرفیت اسمی تسلیم برشی	V_y
نسبت لاغری	λ	تنش نرمال حد تسلیم	σ_y	ظرفیت برشی نهایی	V_u
پارامتر لاغری	β	تنش برشی حد خطی	τ_p		
مدول الاستیسیته	E	تنش برشی حد تسلیم	τ_y		

- [9] C.H. Yoo, S.C. Lee, Mechanics of web panel postbuckling behavior in shear. *Journal of Structural Engineering*, 132(10) (2006) 1580-1589.
- [10] M.M. Alinia, M. Dastfan, Behavior of thin steel plate shear walls regarding frame members, *Journal of Constructional Steel Research*, 62(7) (2006) 730-738.
- [11] M.M. Alinia, M. Shakiba, H.R. Habashi, Shear failure characteristics of steel plate girders, *Thin-Walled Structures*, 47(12) (2009) 1498-1506.
- [12] M.M. Alinia, A. Gheitashi, M. Shakiba, Postbuckling and ultimate state of stresses in steel plate girders, *Thin-Walled Structures*, 49(4) (2011) 455-464.
- [13] G.H. Bryan, On the stability of a plane plate under thrusts in its own plane with applications on the buckling of the sides of a ship, *Proceedings of London Mathematical Society*, 1891.
- [14] S. Timoshenko, *Theory of elastic stability*, New York: McGraw Hill, 1936.
- [15] M. Stein, J. Neff, Buckling stresses of simply supported rectangular flat plates in shear, NACA: Technical note no. 1222, 1947.
- [16] R. Maquoi, M. Skaloud, Stability of plates and plated structures: general report. *Journal of Constructional Steel Research*, 55(1-3) (2000) 45-68.
- [17] J. Rhodes, Some observations on the postbuckling behavior of thin plates and thin-walled members, *Thin-Walled Structures*, 41(2-3) (2003) 207-226.
- [18] M.M. Alinia, S.A.A. Hosseinzadeh, H.R. Habashi, Influence of central cracks on buckling and post-buckling behaviour of shear panels, *Thin-walled Structures*, 45(4) (2007) 422-443.

به معیار لاغری و تنش تسلیم، قابلیت جذب انرژی صفحات فولادی با مصالح مختلف، کم و بیش مشابه است.

۶- فهرست پارامترها

جدول (۶) پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق را ارائه می‌دهد.

مراجع

- [1] A. Gheitashi, M.M. Alinia, Slenderness classification of unstiffened metal plates under shear loading, *Thin-Walled Structures*, 48(7) (2010) 508-518.
- [2] M.M. Alinia, M. Dastfan, Cyclic behaviour, deformability and rigidity of stiffened steel shear panels, *Journal of Constructional Steel Research*, 63(4) (2007) 554-563.
- [3] AASHTO, LRFD bridge design specifications, 8th ed: American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 2018.
- [4] M.M. Alinia, H.R. Habashi, A. Khorram, Nonlinearity in the postbuckling behavior of thin steel shear panels, *Thin-Walled Structures*, 47(4) (2009) 412-420.
- [5] M.L. Sharp, J.W. Clark, Thin aluminum shear webs. *Journal of Structural Division*, 97(4) (1971) 1021-1038.
- [6] D.M. Porter, K.C. Rokey, H.R. Evans, The collapse behavior of plate girders loaded in shear, *Structural Engineer*, 53(8) (1975) 313-325.
- [7] C. Marsh, W. Ajam, H. Ha, Finite element analysis of postbuckled shear webs, *Journal of Structural Engineering*, 114(7) (1988) 1571-87.
- [8] S.C. Lee, C.H. Yoo, Experimental study on ultimate shear strength of web panels. *Journal of Structural Engineering*, 125(8) (1999) 838-846.

- Structures, 80 (2014) 22–31.
- [30] G. Gerard. Critical shear-stress of plates above the proportional limit. *Journal of Applied Mechanics*, 15(1) (1948) 7–12.
- [31] E.Z. Stowell, A unified theory of plastic buckling of columns and plates. NACA Technical note 1556, 1948.
- [32] T. Inoue, Analysis of plastic buckling of rectangular steel plates supported along their four edges, *International Journal of Solids and Structures*, 31(2) (1994) 219-230.
- [33] J.W. Hutchinson, Plastic buckling, *Advances in Applied Mechanics*, 14 (1974) 67-144.
- [34] T. Inoue, Analysis of plastic buckling of steel plates in shear based on the tresca yield criterion. *International Journal of Solids and Structures*, 33(26) (1996) 3903-3923.
- [35] M.M. Alinia, A. Gheitasi, S. Erfani, Plastic shear buckling of unstiffened stocky plates, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(8-9) (2009) 1631-1643.
- [36] AASHTO, LRFD bridge design specifications, 3rd ed: American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 2005.
- [37] M.M. Alinia, *Theory of plates and shells*, Tehran, Ashian, 2010.
- [38] ABAQUS, analysis user's manual, version 6.16. Hibbitt, Karlsson, Sorenson, Inc., (HKS), 2016.
- [39] M. Amani, M.M. Alinia, M. Fadakar, Imperfection sensitivity of slender/stocky metal plates. *Thin-Walled Structures*, 73 (2013) 207–215.
- [40] S.A.A. Hosseinzadeh, Mohsen Tehranizadeh, The wall-frame interaction effect in steel plate shear wall systems, *Journal of Constructional Steel Research*, 98 (2014) 88–99.
- [41] S.A.A. Hosseinzadeh, A. Kamraninejad, Effect of slenderness ratio on nonlinear-static/cyclic behavior characteristics of shear panels. *IQBQ*, 17(2) (2017) 93-104. (In Persian)
- [42] W. Ramberg, W.R. Osgood, Description of stress-strain curves by three parameters, National Advisory
- [19] M.M. Alinia, S.A.A. Hosseinzadeh, H.R. Habashi, Numerical modelling for buckling analysis of cracked shear panels, *Thin-Walled Structures*, 45(12) (2007) 1058–1067.
- [20] M.M. Alinia, S.A.A. Hosseinzadeh, H.R. Habashi, Buckling and post-buckling strength of shear panels degraded by near border cracks, *Journal of Constructional Steel Research*, 64(12) (2008) 1483–1494.
- [21] M.A. Komur, Elasto-plastic buckling analysis for perforated steel plates subject to uniform compression, *Mechanics Research Communications*, 38(2) (2011) 117–122.
- [22] S.A.A. Hosseinzadeh, M. Tehranizadeh, Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls, *Journal of Constructional Steel Research*, 77 (2012) 180–192.
- [23] E. Maiorana, C. Pellegrino, C. Modena, Non-linear analysis of perforated steel plates subjected to localized symmetrical load, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4) (2009) 959–964.
- [24] W.H. Hoppman, M.D. Baltimore, Bending of orthogonally stiffened plates, *Journal of Applied Mechanics*, (1955) 267–71.
- [25] N.J. Huffington, V.A. Blacksborg, Theoretical determination of rigidity properties of orthogonally stiffened plates, *Journal Applied Mechanics*, (1956) 15–20.
- [26] H. Okada, K. Kitaura, Y. Fukumoto, Buckling strength of stiffened plates containing one longitudinal or transverse girder under compression, *Bulletin of University of Osaka Prefecture, Series A*, 20(2) (1971) 287–306.
- [27] J. Kondo, Ultimate strength of longitudinally stiffened plate panels subjected to combined axial and lateral loading, Ph.D. thesis, Lehigh University, 1965.
- [28] M.M. Alinia, R.S. Shirazi, On the design of stiffeners in steel plate shear walls, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10-11) (2009) 2069-2077.
- [29] N.E. Shanmugam, Zhu. Dongqi, Y.S. Choo, M. Arockiaswamy, Experimental studies on stiffened plates under in-plane load and lateral pressure, *Thin-Walled*

- yield point steel gusset plate connections. *Thin-Walled Structures*, 57 (2012) 62–69.
- [45] ATC-24, *Guidelines Of Cyclic Seismic Testing On Components For Steel Structures*, Redwood City, California, U.S.A., Applied Technology Council, 1992.
- Committee for Aeronautics, Washington DC, Technical note No. 902, 1943.
- [43] S. Tahouni, *Design of steel structures (ASD and LRFD)*, Tehran, Elam-o-adab, 2013.
- [44] S.J. Chen, C.C. Chang, *Experimental study of low*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Z. Aliarab, S. A. A. Hosseinzadeh, *Behavioral Characteristics of Steel Shear Panels with Different Materials and Slenderness Ratios*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(4) (2021): 1649-1670.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17076.6455](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17076.6455)



