



Effect of buckling and yielding phenomena on the behavior of steel and aluminum shear panels

Z. Aliarab, S.A.A Hosseinzadeh*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Golestan, Iran

ABSTRACT: The present study investigates the effects of material mechanical properties and slenderness ratios of plates on the nonlinear and cyclic behavior characteristics of metal shear panels (including carbon steel (CS), low yield point steel (LYP160) and aluminum (Al)), using the finite element method. The plates are first qualitatively and quantitatively classified into the five groups of very slender, slender, moderate, stocky and very stocky, regarding their slenderness ratios. Very slender plates have negligible buckling capacity and thus, they buckle at the initial stages of loading. Slender plates buckle in the elastic range of behavior. Moderate plates buckle in the inelastic range of stresses before material yielding occurs in the plates. Stocky plates buckle in the plastic (post-yield) range of stresses. The behavior of very stocky plates is only dominated by the yielding phenomenon and they do not buckle during loading. Based on the statistical analysis of the results, new relationships for the estimation of inelastic and plastic buckling loads are also proposed. The cyclic analysis results show that the energy dissipation capability of very stocky/stocky/moderate plates is solely dependent on the material yield stress and elastic modulus of elasticity, whereas for the slender plates, the effectiveness of material yield stress in the energy dissipation of plates is decreased and the role of the material elastic modulus of elasticity becomes more important. In the case of very slender shear plates, the energy dissipation capability seems to be dependent on the initial and secondary modulus of material only.

Review History:

Received: Oct. 26, 2020

Revised: May, 08, 2021

Accepted: Sep. 27, 2021

Available Online: Oct. 24, 2021

Keywords:

Metal plate

Yielding

Buckling

Finite element

Cyclic analysis

1- Introduction

Steel and aluminum plates are widely used in the construction of thin-walled structures in various fields of engineering, especially civil engineering. The use of steel plates in the construction of bridge girders and building box beams and columns, the infill plate of steel shear wall system, the plate at the connection of beam to column, and link-beam webs of eccentrically braced frame systems [1] are very common examples. Aluminum plates are also used in the construction of the beam and column sections and also, stiffened plates as seismic energy dissipation component in seismic areas [2, 3]. Previous studies have been mainly focused on the behavior of slender plates with certain slenderness ratios. In the case of moderate and thick plates, the study of various aspects of nonlinear and energy dissipation behavior characteristics of plates has received less attention from researchers. In addition, the classification and behavioral characteristics of plates with very small [4] or very large [5] slenderness ratios, despite existing applications, have received less attention from past researchers. Previous studies [1, 6] have also shown that the results of AASHTO for behavior classification of metal plates and those reported by

researchers using the finite element can be different. Further, for moderate or stocky plates, there is a difference between the buckling capacity results of different metal plates from formulas proposed by AASHTO and those of finite element analyses [1, 7].

The present study uses the finite element method to study the effect of buckling and yielding phenomena on the energy absorption and linear/nonlinear behavior characteristics of steel and aluminum shear plates with different slenderness ratios. First, different metal plates are characterized and classified into the five proposed groups named very slender, slender, moderate, stocky and very stocky, according to the occurrence of buckling and yielding. Based on the obtained results of different plates, new relationships are proposed for the classification of metal plates of different slenderness ratios. Also, new relationships are proposed for more accurately estimating the buckling load of different metal plates of moderate and stocky classes. Finally, the effect of the material and slenderness ratio of metal plates on the energy dissipation behavior characteristics under cyclic loading is qualitatively and quantitatively investigated.

*Corresponding author's email: ahosseinzade@gmail.com



2- Methodology

In this study, over 110 square metal plates with fixed dimensions (1000×1000 mm²) and different slenderness ratios are studied using ABAQUS finite element software. Linear buckling, linear/nonlinear static and quasi-static cyclic analysis methods are used. The studies are performed for three different types of conventional and commonly used metal materials, including two types of steel materials (carbon steel (CS) and low yield point steel (LYP160)) and one type of aluminum material for wide range of slenderness ratios ($\lambda=10\sim 2200$), assuming simply boundary conditions.

3- Results and Discussion

In addition to the three classical behavioral classes (stocky, moderate and slender), two classes of very slender and very stocky are proposed and the behavior of plates for these five classes is examined, considering metal plates having a wide range of slenderness ratios.

Very slender plates have low buckling capacity and significant post-buckling capacity. After the occurrence of the first yielding, they gradually lose their stiffness and thus, show a small post-yielding capacity up to ultimate strength. After that, they enter the softening phase of the behavior. Slender plates have a relatively low to medium buckling capacity or a moderate to relatively high buckling capacity, in contrast, depending on their slenderness ratio. Shortly after the occurrence of first yielding, they reach their maximum strength. Buckling, first yielding and ultimate strength happens almost simultaneously in moderate plates. In stocky plates at a capacity equivalent to the nominal shear yield capacity, yielding occurs almost at the entire plate surface. Afterward, the plate carries limited load with hardening behavior until the occurrence of plastic buckling. With the occurrence of plastic buckling, the plate reaches its maximum strength and the out-of-plane displacements begin to increase. Very stocky plates yield completely at a load equivalent to the nominal shear yielding capacity. Then, the plate shows a limited post-yielding capacity with hardening behavior until reaching the ultimate strength. Because of the absence of buckling, unlike in other classes, no softening behavior is observed for this class and out of plane displacement is very small.

The results in this study show that in stocky to slender plates, there is some difference between AASHTO and finite element results for the classification of various metal plates. The ranges of slenderness ratios for different behavioral classes, contrary to AASHTO relationship, also change with the plate material. Based on the obtained results, the ranges of slenderness ratios for each of the behavioral classes are defined for each plate material.

The results of buckling critical stress obtained from numerical analyses and existing theoretical relations are compared for different behavioral classes. For moderate and stocky plates, the results of existing theoretical relationships and finite element analyses are different. Thus, based on the obtained numerical results, new relationships are proposed for the moderate and stocky plates that are able to predict

the buckling of these classes with relatively better accuracy compared to AASHTO relationships. (Eqs.1 & 2 respectively)

$$\tau_{cr} = 0.592 \frac{\sqrt{EK \sigma_y}}{\lambda} \quad (1)$$

$$\tau_{cr} = 0.827 \sigma_y \times \left(\frac{KE_t}{\lambda E} \right)^{0.047} \quad (2)$$

4- Conclusion

Very slender plates have little buckling strength and considerable post-buckling capacity. Most of their post-buckling capacity occurs before yielding and after the yielding, the plate shows limited capacity up to the ultimate strength. At the ultimate state, only a limited area at the tensile corner edges experiences yielding. Slender plates, depending on their slenderness ratio, have little to considerable capacity in the elastic phase of behavior. At the ultimate state, a limited area along with the tensile diagonal yields, while the level of stresses in other regions is not very high. Moderate plates carry a significant part of the shear load in the elastic range of the behavior and they experience yielding in a relatively wider area along the tensile diagonal at the ultimate state. Stocky plates, depending on the slenderness ratio, provide a significant part of their capacity in the elastic phase of the behavior and at the moment of plastic buckling occurrence, they reach their ultimate strength while the full plate area is yielded uniformly. Very stocky plates, depending on the material type of plate, carry a certain and significant part of the shear load in the elastic range of the behavior.

The cyclic analysis results showed that the energy dissipation capability of very stocky/stocky/moderate plates is solely dependent on the material yield stress and elastic modulus of elasticity, whereas for the slender plates, the effectiveness of material yield stress in the energy dissipation of plates is decreased and the role of the material elastic modulus of elasticity becomes more important. In the case of very slender shear plates, the energy dissipation capability seems to be dependent on the initial and secondary modulus of material only.

References

- [1] 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.
- [2] G. De Matteis, F.M. Mazzolani, S. Panico, Pure aluminium shear panels as dissipative devices in moment-resisting steel frames, *Earthquake engineering structural dynamics*, 36(7) (2007) 841-859.
- [3] S. Jiang, Z. Xiong, X. Guo, Z. He, Buckling behaviour of aluminium alloy columns under fire conditions, *Thin-Walled Structures*, 124 (2018) 523-537.

- [4] M.M. Alinia, A study into optimization of stiffeners in plates subjected to shear loading, *Thin-walled structures*, 43(5) (2005) 845-860.
- [5] S.A.A. Hosseinzadeh, M. Tehranizadeh, Behavioral characteristics of code designed steel plate shear wall systems, *Journal of Constructional Steel Research*, 99 (2014) 72-84.
- [6] 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.
- [7] Z. Aliarab, S.A.A. Hosseinzadeh, Behavioral characteristics of steel shear panels with different materials and slenderness ratios, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(4) (2021) 24-24.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Z. Aliarab, S.A.A Hosseinzadeh, *Effect of buckling and yielding phenomena on the behavior of steel and aluminum shear panels*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(3) (2022) 199-202.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19178.7092](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19178.7092)





اثر نسبت لاغری بر رفتار صفحات برشی آلومینیومی و فولادی

زهرا علی عرب، سید علی اصغر حسین زاده*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۰۲

کلمات کلیدی:

صفحات فلزی
تسلیم
کمانش
المان محدود
تحلیل چرخه‌ای

خلاصه: از صفحات فلزی فولادی و آلومینیومی به صورت گسترده در ساخت سازه‌های جدار نازک در شاخه‌های مختلف مهندسی، به ویژه مهندسی عمران، استفاده می‌شود. تحقیق حاضر با استفاده از روش المان محدود تاثیر وقوع کمانش و تسلیم را در خصوصیات رفتار خطی/غیرخطی و قابلیت جذب انرژی صفحات برشی فلزی با نسبت‌های لاغری مختلف مورد مطالعه قرار می‌دهد. دو نوع مصالح کاربردی فولادی، شامل فولاد کربن دار و فولاد با تنش تسلیم پایین، و یک نوع آلیاژ آلومینیوم برای صفحات فرض می‌شود. از نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی به منظور: - تقسیم‌بندی صفحات در پنج محدوده رفتاری پیشنهادی (بسیار لاغر، لاغر، متوسط، ضخیم، بسیار ضخیم)، - ارائه روابط ریاضی جهت مرزبندی و تخمین بار کمانشی، و - تشریح خصوصیات صفحات هر محدوده رفتاری در ارتباط با منحنی‌های رفتار، نحوه توسعه تنش‌ها و دامنه‌های رفتار خطی/غیرخطی در طول بارگذاری استفاده می‌شود. نتایج تحلیل‌های چرخه‌ای نیز نشان می‌دهد که قابلیت جذب انرژی صفحات در محدوده‌های بسیار ضخیم، ضخیم و متوسط، متأثر از تنش تسلیم و مدول الاستیسیته اولیه مصالح است، در حالی که در محدوده لاغر، به ویژه برای نسبت‌های لاغری بزرگ‌تر، از تاثیرگذاری پارامتر تنش تسلیم کاسته، و نقش مدول الاستیسیته اولیه مصالح پررنگ‌تر می‌شود. در محدوده بسیار لاغر نیز به نظر می‌رسد که مدول‌های الاستیسیته اولیه و ثانویه مصالح نقش موثرتری در قابلیت جذب انرژی صفحات داشته باشد.

۱- مقدمه

و الگوی بارگذاری صفحات مرتبط است. به صورت خاص، رفتار یک صفحه با ابعاد (طول و عرض)، شرایط مرزی و جنس معلوم، و تحت یک شرایط بارگذاری مشخص، تحت تاثیر نسبت لاغری (نسبت ضخامت به بعد صفحه) آن قرار دارد و بسته به آن، خصوصیات باربری صفحه می‌تواند تغییر کند. صفحات بسته به نقش‌شان در سازه اصلی، در محدوده وسیعی از نسبت‌های لاغری، از لاغری‌های کم یا بسیار کم [۱۳-۱۰] تا لاغری‌های متوسط، زیاد یا بسیار زیاد [۱۴-۲۰] مورد استفاده قرار می‌گیرند. آیین‌نامه آشتو [۲۱]، در یک تقسیم‌بندی کلی با لحاظ اثرات جنس و شرایط مرزی صفحات، بر این اساس که وقوع کمانش در کدام یک از محدوده‌های رفتاری الاستیک، غیرارتجاعی یا پلاستیک اتفاق می‌افتد، صفحات را با توجه به لاغری‌شان به سه محدوده کلی لاغر، متوسط و ضخیم تقسیم‌بندی کرده و برای هر یک از محدوده‌ها، روابطی برای تخمین ظرفیت کمانش برشی ارائه کرده است. هر چند که بر اساس پژوهش‌های انجام شده، انجام مطالعات بیشتر در این

از صفحات فلزی فولادی و آلومینیومی به صورت گسترده در ساخت سازه‌های جدار نازک^۱ در صنایع مختلف مهندسی، به ویژه مهندسی عمران، استفاده می‌شود. استفاده از صفحات فولادی در ساخت پل‌ها، تیروورق‌ها و ستون‌های جعبه‌ای، صفحه داخلی دیوار برشی فولادی، ورق چشمه اتصال تیر به ستون و جان تیرهای همبند^۲ [۱-۳] بسیار معمول است. همچنین، از صفحات آلومینیومی نیز در ساخت مقاطع تیر و ستون‌ها و یا به صورت سخت شده به عنوان جاذب انرژی زلزله (میراگر تسلیمی) در مناطق لرزه‌خیز استفاده می‌شود [۹-۴]. در حالت کلی، خصوصیات رفتاری صفحات در طول بارگذاری تحت تاثیر وقوع دو پدیده کمانش و تسلیم است. کیفیت و زمان وقوع پدیده‌های تسلیم و کمانش نیز با مشخصات هندسی و مکانیکی (جنس)، شرایط مرزی

- 1 Thin-walled structures
- 2 Link beam

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ahosseinzade@gmail.com



$$\tau_{cr} = \frac{0.9EK}{\lambda^2};$$

$$\lambda > y \sqrt{\frac{EK}{\sigma_y}} \text{ and } y = 1.4 \quad (2)$$

$$\tau_{cr} = \frac{0.65\sqrt{EK\sigma_y}}{\lambda};$$

$$x\sqrt{EK\sigma_y} < \lambda \leq y\sqrt{EK\sigma_y} \text{ and } x = 1.12 \text{ \& } y = 1.4 \quad (3)$$

$$\tau_{cr} = 0.58\sigma_y;$$

$$\lambda \leq x \sqrt{\frac{EK}{\sigma_y}} \text{ and } x = 1.12 \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{b}{t} \text{ \& } \beta = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (5)$$

۱-۳- پیشینه تحقیق

صفحات در بسیاری از سازه‌های مهندسی عمران تحت شرایط بارگذاری خالص برشی و یا تاثیر غالب آن در ترکیب با سایر انواع بارگذاری‌ها قرار می‌گیرند [۲۵-۲۳]. عمده تحقیقات گذشته در زمینه بارگذاری برشی به مطالعه رفتار کلی، پایداری و ارزیابی ظرفیت‌های کمانشی (کلی یا موضعی) و نهایی صفحات لاغر (تقویت شده یا نشده، با یا بدون بازشو)، با تمرکز بر یک یا چند صفحه با نسبت لاغری مشخص و یا بر روی یک دامنه بسیار محدود از نسبت‌های لاغری، معطوف شده‌اند [۲۶-۳۲، ۲۳ و ۲].

پژوهشگران مختلفی با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی، ظرفیت نهایی، شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی دیوارهای برشی فولادی نازک (سخت نشده) را مورد مطالعه قرار دادند [۳۳، ۲۶، ۲۰-۱۶ و ۱۳]. نتایج تحقیقات عددی و آزمایشگاهی رضایی و همکاران [۳۵ و ۳۴] بر روی رفتار قاب خمشی تقویت شده با ورق فولادی نشان داد که استفاده از ورق سبب افزایش قابل توجه شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌شود. چن و ژانگ [۳۶] و دی‌ماتیس و همکاران [۳۷] استفاده از مزایای فولاد با تنش تسلیم پایین را به ترتیب در سیستم دیوار برشی فولادی و پانل سخت شده به عنوان

زمینه به منظور بررسی دقت و دامنه کاربرد روابط ارائه شده برای مصالح و نسبت‌های لاغری مختلف ضروری می‌نماید [۲۲ و ۲].

۱-۱- تقسیم‌بندی صفحات با توجه به معیار لاغری

آیین نامه آشتو [۲۱] رفتار صفحات تحت بارگذاری برشی را با توجه به وقوع پدیده کمانش در آن‌ها در سه دسته کلی لاغر، متوسط و ضخیم تقسیم‌بندی می‌کند. بر این اساس، در صفحات لاغر (کمانش ارتجاعی)، ظرفیت کمانش برشی ورق (V_{Cr}) کوچک‌تر از ظرفیت برشی حد خطی (تناسب) آن ($V_p = b \times t \times \tau_p$) است (b عرض یا بعد کوچک‌تر ورق، t ضخامت ورق، τ_p تنش برشی حد خطی). در صفحات متوسط (کمانش غیرارتجاعی)، ظرفیت کمانش برشی ورق (V_{Cr}) بین ظرفیت برشی حد خطی (V_p) و ظرفیت اسمی تسلیم برشی ($V_y = b \times t \times \tau_y$) قرار می‌گیرد (τ_y تنش برشی حد خطی). در صفحات ضخیم (کمانش پلاستیک) نیز ظرفیت کمانش برشی ورق (V_{Cr}) بزرگ‌تر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن (V_y) است.

۱-۲- کمانش برشی

ظرفیت کمانش برشی صفحات در حالت الاستیک با فرض شرایط مرزی ساده از رابطه کلاسیک (۱) محاسبه می‌گردد. در رابطه (۱)، پارامتر K ضریب بارکمانشی است که تابع شرایط تکیه‌گاهی و نسبت ابعادی صفحات ($\varphi = a/b$) است (a طول یا بعد بزرگ‌تر ورق). با توجه به رابطه (۱)، ضریب کمانش برشی در صفحات مربعی شکل با نسبت ابعادی واحد، برای شرایط مرزی ساده معادل با ۹/۳۴ محاسبه می‌گردد. آیین نامه آشتو [۲۱] دامنه تغییرات نسبت لاغری و همچنین ظرفیت کمانشی را برای هر یک از محدوده‌های لاغر (کمانش ارتجاعی)، متوسط (کمانش غیرارتجاعی) و ضخیم (کمانش پلاستیک) به ترتیب مطابق با روابط (۲)، (۳) و (۴) پیشنهاد می‌دهد. نسبت لاغری (λ) و پارامتر لاغری (β) نیز بر اساس رابطه (۵) تعریف می‌شوند.

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

(۱)

simple support:

$$K = 5.34 + \frac{4}{\varphi^2} \text{ and } \varphi = \frac{a}{b} \geq 1$$

لاغر با با نسبت‌های لاغری مشخص (و یا در محدوده مشخصی از نسبت لاغری) صورت گرفته‌اند. در محدوده صفحات متوسط و ضخیم نیز مطالعه جامع رفتار و قابلیت جذب انرژی صفحات در این محدوده‌ها با استفاده از تحلیل‌های چرخه‌ای و استاتیکی غیرخطی به طور هم‌زمان کمتر مورد توجه بوده است. همچنین، در تحقیقات گذشته به صورت خاص در مورد مرزبندی و مشخصه‌های رفتاری صفحات در نسبت‌های لاغری بسیار بزرگ [۳۳، ۲۶، ۲۰-۱۷] و بسیار کوچک [۱۰-۱۲]، علی‌رغم کاربردهای موجود، کمتر صحبت شده است. به علاوه، همان‌طور که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، مطالعات گذشته [۲۲، ۲ و ۱] به وجود اختلاف بین نتایج مرزبندی محدوده‌ها در آشتو و نتایج تحلیل‌های المان محدود برای صفحات فلزی با جنس‌های مختلف اشاره داشته‌اند. همچنین برای محدوده‌های متوسط یا ضخیم نیز بین نتایج ظرفیت کمانشی صفحات فلزی مختلف از روابط آشتو و تحلیل‌های المان محدود نیز اختلاف مشاهده شده است [۵۰ و ۲۲].

با توجه به مطالب بالا، تحقیق حاضر با استفاده از روش المان محدود تاثیر وقوع کمانش و تسلیم را در خصوصیات رفتار خطی/غیرخطی و قابلیت جذب انرژی صفحات برشی فلزی با نسبت‌های لاغری مختلف مورد مطالعه قرار می‌دهد. دو نوع مصالح کاربردی فولادی (فولاد کربن‌دار^۱ (CS) و فولاد با تنش تسلیم پایین^۲ (LYP160) و یک نوع آلیاژ آلومینیوم (AL) برای صفحات فرض می‌شود. در نظر گرفتن چند نوع مصالح فلزی با خصوصیات مکانیکی مختلف، علاوه بر کاربرد اختصاصی نتایج به دست آمده برای هر نوع خاص، درک بهتری را از میزان تاثیرگذاری پارامترهای مختلف مکانیکی مصالح در رفتار صفحات و امکان تعمیر نتایج به دست آمده برای مصالح فلزی دیگر فراهم می‌آورد. در ابتدا، صفحات فلزی مختلف با توجه به ویژگی‌های رفتاری‌شان در ارتباط با وقوع کمانش و تسلیم در پنج محدوده پیشنهادی بسیار لاغر، لاغر، متوسط، ضخیم و بسیار ضخیم مشخصه‌گذاری و دسته‌بندی می‌شوند. سپس، با مطالعه آماری نتایج آنالیزهای عددی صفحات مختلف، ضمن مقایسه با روابط نظری موجود [۲۱]، روابط جدیدی جهت تعیین دقیق‌تر دامنه تغییرات لاغری در هر یک از محدوده‌های پنج‌گانه برای هر یک از مصالح فلزی ارائه می‌شود. به علاوه، امکان ارائه روابط جدیدی جهت تخمین دقیق‌تر بار کمانشی صفحات مختلف در محدوده‌های متوسط و ضخیم بررسی می‌شود. در انتها نیز تاثیر جنس و نسبت لاغری صفحات در قابلیت استهلاک انرژی آن‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای به طور کیفی و کمی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

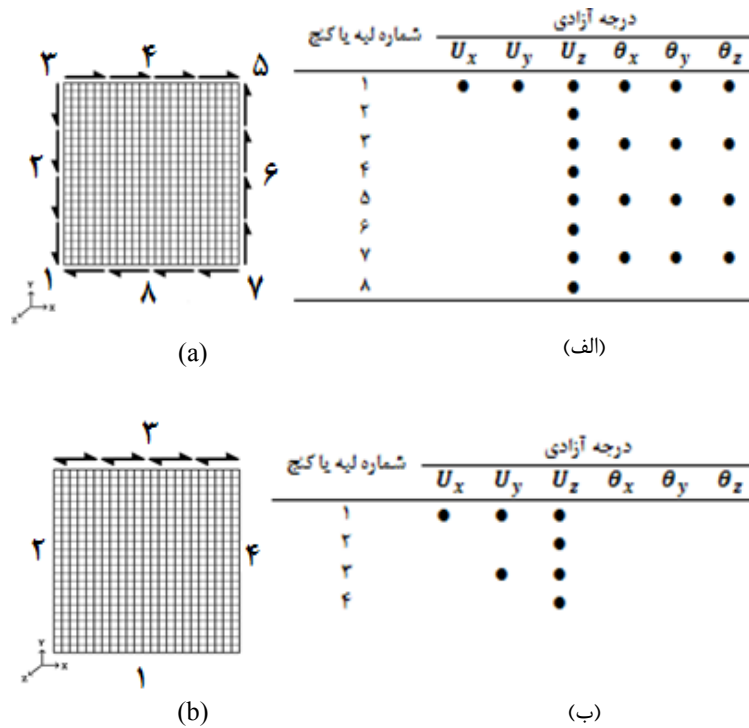
جاذب انرژی پیشنهاد و مطالعه کردند. علی‌نیا و دستفان [۲۶] و علی‌نیا و همکاران [۲۷] تاثیر استفاده از سخت کننده در بهبود قابلیت جذب انرژی صفحات و همچنین، الگوی گسترش و توسعه تنش‌ها و تسلیم در سطح صفحات لاغر را بررسی کردند. براندو و دی‌ماتیس [۳۸] قابلیت جذب انرژی پانل‌های برشی آلومینیومی نازک سخت شده را با استفاده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. محققان دیگر نیز رفتار صفحات برشی فولادی یا آلومینیومی نازک سخت نشده را تحت تاثیر حضور بازشوهایی مختلف [۳۹، ۳۰ و ۲۹] و یا ترک‌ها [۴۰، ۳۱ و ۲۳] مطالعه کردند.

در مقایسه با صفحات لاغر تحت بارگذاری برشی، سرعت رشد مطالعات در زمینه صفحات ضخیم‌تر به طور نسبی کند بوده است [۴۱]. اولین مطالعات در زمینه رفتار صفحات ضخیم و وقوع کمانش پلاستیک در آن‌ها از حدود هفت دهه پیش آغاز شد [۴۲-۴۴]. محققان مختلفی تحت بارگذاری‌های فشاری [۴۶، ۴۵ و ۴۱] و برشی [۴۸ و ۴۷] این تحقیقات را ادامه دادند. در سال‌های اخیر نیز قیطاسی و علی‌نیا [۲] و علی‌نیا و همکاران [۱]، کمانش برشی پلاستیک را در صفحات ضخیم با استفاده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی در نرم‌افزار المان محدود و بر اساس مدل رفتاری اسکود-رامبرگ برای دامنه مشخصی از نسبت‌های لاغری (40 تا 325) مورد بررسی قرار دادند و صفحات را با توجه به لاغری و رفتار کمانشی‌شان، به سه دسته لاغر، متوسط و ضخیم تقسیم‌بندی کردند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که، به ویژه برای صفحات رده متوسط، تا حدی بین نتایج تقسیم‌بندی آشتو و نتایج المان محدود اختلاف وجود دارد. مطالعات اولیه انجام شده توسط نویسندگان برای دامنه محدودی از نسبت لاغری نیز این موضوع را تایید می‌کند [۲۲]. همچنین، ژانگ و همکاران [۴۹] نیز با استفاده از روش آزمایشگاهی کمانش برشی فولاد با تنش تسلیم پایین را با لحاظ اثر تغییر شکل‌های پلاستیک مورد مطالعه قرار دادند. در آزمایش‌ها، بارگذاری برشی با اعمال گشتاور پیچشی به دو سمت نمونه‌های استوانه‌ای فولادی صورت گرفت. با توجه به نتایج، محققان نسبت عرض به ضخامت ۱۲ را به عنوان نسبت بحرانی عرض به ضخامت از نقطه نظر وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک برای فولاد با تنش تسلیم پایین پیشنهاد دادند.

۱-۴- ضرورت و اهداف تحقیق

همان‌طور که در مطالعات قبلی اشاره شده است، صفحات فلزی، با جنس‌ها و نسبت‌های لاغری مختلف، کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های مهندسی عمران دارند. مطالعات انجام شده در گذشته عمدتاً بر روی صفحات

1 Structural mild steel
2 Low yield point steel



شکل ۱. الگوی بارگذاری‌های برشی و شرایط تکیه‌گاهی صفحات، (الف): در تحلیل‌های خطی کمانشی و استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور)، (ب): در تحلیل‌های سیکلی

Fig. 1. Shear loading and support conditions used for, (a): linear buckling and nonlinear static analyses, (b): cyclic analyses

ساده انجام می‌شود. شکل ۱ شرایط تکیه‌گاهی و الگوی بارگذاری برشی را برای تحلیل‌های خطی/غیرخطی استاتیکی و چرخه‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تحلیل‌های استاتیکی از طریق اعمال نیرو در چهار وجه ورق با الگوی برشی برای ایجاد شرایط بارگذاری خالص برشی در صفحات استفاده گردید. بدین ترتیب امکان جابه‌جایی یا دوران آزاد اضلاع صفحه نسبت به یکدیگر تحت بارهای برشی فراهم است [۱]. همچنین، در تحلیل‌های چرخه‌ای، با توجه به ماهیت تحلیل‌ها که با اعمال و کنترل جابه‌جایی‌های (به جای نیرو) رفت و برگشتی در سیستم همراه است و عملاً، ایجاد شرایط بارگذاری خالص برشی در صفحه تا حدی دشوار است، بارگذاری برشی با اعمال جابه‌جایی‌های افقی رفت و برگشتی در لبه فوقانی ورق لحاظ گردید.

به جهت مدل‌سازی از المان پوسته‌ای^۲ با خاصیت انتگرال‌گیری کاهش یافته (S4R) استفاده می‌شود [۵۱]. مطالعات اولیه انجام شده توسط

۲- روش مطالعه

در این پژوهش به جهت شناخت ویژگی‌های رفتاری و باربری صفحات مختلف تحت الگوی بارگذاری برشی، بالغ بر ۱۱۰ صفحه مربع شکل آلومینیومی و فولادی با ابعاد ثابت (۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر مربع) و نسبت‌های لاغری مختلف با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس [۵۱] مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در کاربردهای متعارف، پانل‌های مستطیلی بلند (با نسبت طول به عرض بزرگ) معمولاً توسط سخت‌کننده‌های عرضی به زیرپانل‌های^۱ مربعی شکل تقسیم می‌شوند [۱۱]. در تحلیل صفحات از روش‌های تحلیل خطی کمانشی، غیرخطی استاتیکی و شبه-استاتیکی چرخه‌ای استفاده می‌شود. مطالعات برای سه جنس مختلف از مصالح متعارف و نسبتاً پرکاربرد فلزی، شامل دو نوع مصالح فولادی (فولاد کربندار (CS)، و فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP160)) و یک نوع مصالح آلومینیومی (Al) برای دامنه وسیعی از نسبت‌های لاغری ($\lambda = 10 \sim 2200$) و با فرض شرایط مرزی

جدول ۱. مشخصات مکانیکی مصالح مورد مطالعه [۵۲ و ۲]

Table 1. Different material properties used in this study [2, 52]

نوع مصالح	E (GPa)	E_t (GPa)	σ_p (MPa)	σ_y (MPa)	τ_p (MPa)	τ_y (MPa)	ν
آلومینیوم (AL)	۷۱/۷	۰/۶	۴۲۸	۵۰۳/۲	۲۴۷/۱	۲۹۰/۵	۰/۳۵
فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP160)	۲۰۰	۳/۸	۱۰۶/۲	۱۶۰	۶۱/۳	۹۲/۴	۰/۳
فولاد کربن دار (CS)	۲۱۰	۱/۴	۳۳۰	۳۴۵	۱۹۰/۵	۱۹۹/۲	۰/۳

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- تحلیل‌های خطی/غیرخطی استاتیکی

در این بخش، با مطالعه محدوده وسیعی از نسبت‌های لاغری مورد کاربرد، علاوه بر سه محدوده رفتاری کلاسیک (لاغر، متوسط و ضخیم)، دو محدوده بسیار لاغر و بسیار ضخیم نیز، با توجه به کاربردشان، پیشنهاد و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صفحات بسیار لاغر ظرفیت کمانش برشی ورق (V_{cr}) در مقایسه با ظرفیت نهایی (V_u) آن بسیار ناچیز فرض می‌شود ($V_{cr} \leq 0.1 \times V_u$). در صفحات بسیار ضخیم نیز اصولاً کمانش رخ نمی‌دهد و اصطلاحاً، ظرفیت کمانشی (V_{cr}) صفحه به صورت نظری بسیار بزرگ‌تر از ظرفیت نهایی (V_u) آن لحاظ می‌شود ($V_{cr} \gg V_u$) [۵۰].

۳-۱-۱- خصوصیات کلی رفتار صفحات

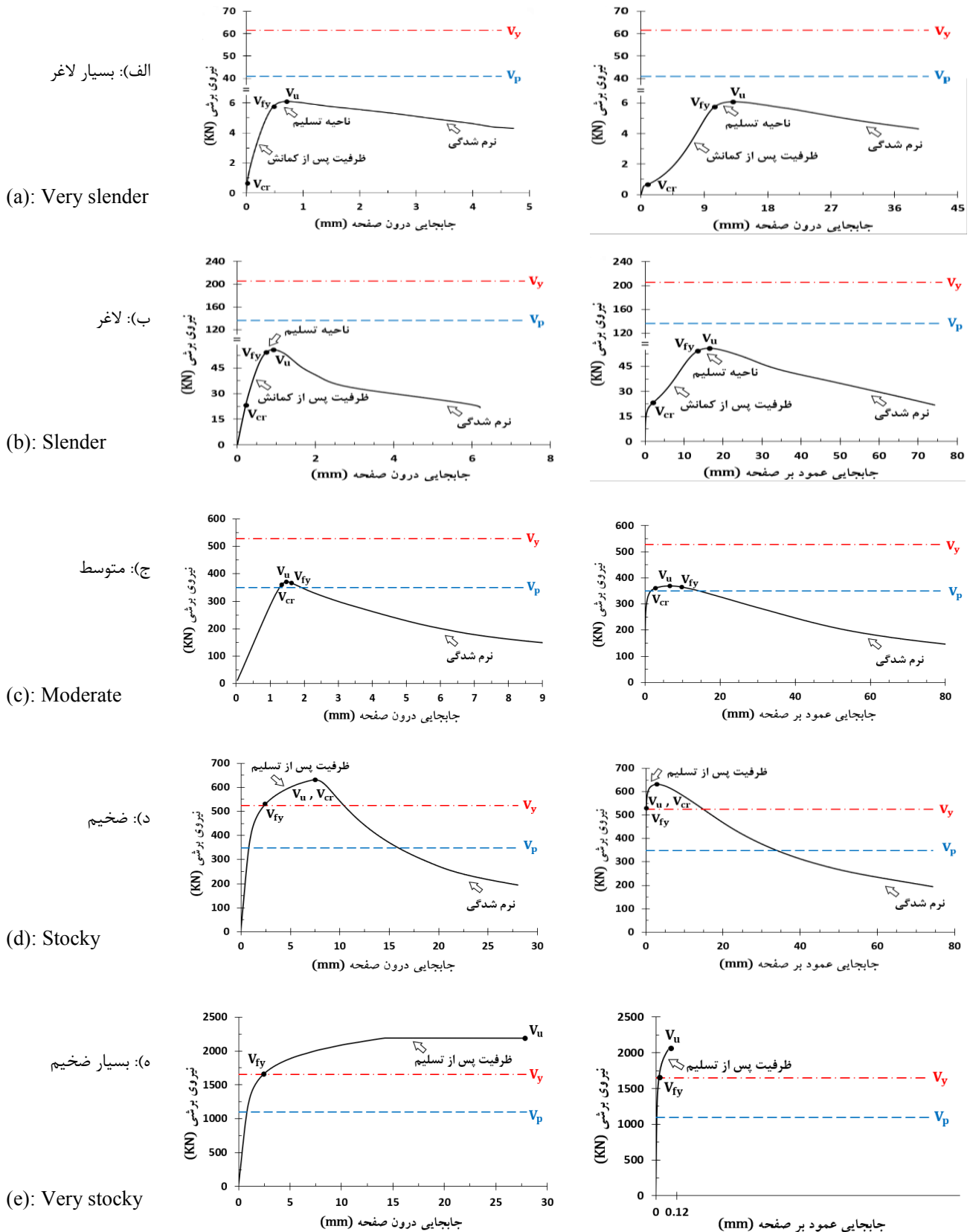
در این قسمت، در زمینه خصوصیات کلی باربری صفحات فلزی با توجه به نمونه منحنی‌های بار-جابجایی درون صفحه^۳ و خارج از صفحه^۴ (شکل ۲) برای هر یک از محدوده‌های پیشنهادی پنج‌گانه (بسیار لاغر (VS)، لاغر (S)، متوسط (M)، ضخیم (T) و بسیار ضخیم (VT)) با اختصار صحبت می‌شود. به جهت امکان مقایسه، نقاط مرتبط با لحظه وقوع کمانش (V_{cr})، اولین تسلیم (V_{fy}) و ظرفیت نهایی (V_u) صفحات نیز در شکل ۲ مشخص شده است. با توجه به نتایج:

- صفحات بسیار لاغر: ظرفیت کمانشی بسیار ناچیز، و ظرفیت پس از کمانش قابل توجهی دارند. با وقوع اولین تسلیم، سختی خود را تدریجاً از

نویسندگان اختلاف چندانی را در نتایج تحلیل صفحات مختلف با استفاده از المان پوسته‌ای در مقایسه با المان حجمی^۱ نشان نداد. مشابه با مطالعات قبلی انجام شده توسط نویسندگان [۳۱، ۳۲ و ۲۳]، حداکثر بعد مش‌بندی در مدل‌ها با توجه به نتایج آنالیز حساسیت و صحت‌سنجی (که در اینجا به جهت اختصار از تکرار آن صرف نظر می‌شود) معادل با ۲۰ میلی‌متر (مش‌بندی ۵۰ در ۵۰) به دست آمد. البته در قسمت‌های بعدی، از طریق مقایسه نتایج تنش بحرانی کمانشی به دست آمده از تحلیل المان محدود با نتایج روابط تئوری موجود، صحت روش مدل‌سازی و نتایج به دست آمده از نرم‌افزار به طور ضمنی تایید خواهد شد. با هدف تسهیل وقوع کمانش در صفحات و کمک به توسعه میدان کششی قطری در آن‌ها، نقص یا تغییر شکل اولیه^۲ بسیار کوچکی در جهت عمود بر صفحه مطابق با مود اول کمانشی آن در نظر گرفته می‌شود [۲۳ و ۲]. بیشینه مقدار این تغییر شکل اولیه معادل با ۰/۰۵ میلی‌متر، به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که تاثیر قابل توجهی بر نتایج به دست آمده از تحلیل‌های المان محدود نگذارد. لازم به ذکر است که در تحلیل‌های غیرخطی از منحنی‌های اسگود-رامبرگ که بر اساس خصوصیات مکانیکی مصالح مختلف مورد مطالعه (مدول الاستیسیته خطی (E ، مدول الاستیسیته ثانویه (E_t ، تنش‌های نرمال حد خطی (σ_p) و حد تسلیم (σ_y))، تنش‌های برشی حد خطی (τ_p) و حد تسلیم (τ_y) و نسبت پواسون (ν)) تعریف می‌شود، استفاده می‌گردد (جدول ۱ را ببینید).

3 In-plane
4 Out of plane

1 Solid
2 Initial imperfection



شکل ۲. الگوهای کلی منحنی‌های رفتار صفحات

Fig. 2. General behavior of shear panels in different slenderness ratio classes

۳-۱-۲- تقسیم‌بندی صفحات با توجه معیار لاغری

به جهت مقایسه کمی نتایج، جداول ۲ تا ۴ خلاصه نتایج تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی صفحات آلومینیومی و فولادی را برای شماری از لاغری‌ها ارائه می‌کند. با توجه به نتایج، در صفحات بسیار ضخیم در طول بارگذاری کماتش روی نمی‌دهد. ظرفیت بیشینه صفحات در این محدوده، بسته به نوع مصالح (نسبت مدول الاستیسیته ثانویه به اولیه)، تا حد مشخصی بزرگ‌تر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن می‌شود (برای فولاد با تنش تسلیم پایین، فولاد کربن‌دار و آلومینیوم به ترتیب معادل با ۱/۲۶، ۱/۰۸ و ۱/۰۴). در صفحات ضخیم، کماتش پلاستیک، فراتر از ظرفیت اسمی تسلیم برشی، هم‌زمان با رسیدن ورق به بیشینه مقاومت خود اتفاق می‌افتد. بنابراین در این محدوده، نسبت مقاومت ورق به ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن، بسته به نوع مصالح، تا حدی بزرگ‌تر از واحد است، لیکن با افزایش نسبت لاغری، برای مصالح مختلف، به سمت مقدار واحد میل می‌کند (برای فولاد با تنش تسلیم پایین، فولاد کربن‌دار و آلومینیوم به ترتیب بین ۱-۱/۲۶، ۱-۱/۰۸ و ۱-۱/۰۴). در صفحات متوسط، ظرفیت کماتشی ورق در بین ظرفیت برشی حد تناسب و ظرفیت اسمی تسلیم برشی آن قرار می‌گیرد و با وقوع کماتش (غیرارتجاعی)، صفحه به حداکثر مقاومت خود می‌رسد. بنابراین در این محدوده، نسبت مقاومت به ظرفیت اسمی تسلیم برشی ورق، با افزایش نسبت لاغری، از مقدار یک تا حد مشخصی کاهش می‌یابد (برای فولاد با تنش تسلیم پایین، آلومینیوم و فولاد کربن‌دار به ترتیب بین ۱-۰/۶۸، ۱-۰/۸۷ و ۱-۰/۹۶). در صفحات لاغر و بسیار لاغر، ورق در محدوده ارتجاعی از رفتار خود دچار کماتش می‌شود. در حالی که نسبت مقاومت به ظرفیت اسمی تسلیم برشی، در صفحات بسیار لاغر بسیار کوچک است، این نسبت در صفحات لاغر، بسته به جنس و نسبت لاغری، می‌تواند به حدود واحد نیز نزدیک شود (برای فولاد کربن‌دار، آلومینیوم و فولاد با تنش تسلیم پایین به ترتیب بین ۰/۰۸-۰/۹۵، ۰/۱۲-۰/۸۴ و ۰/۱-۰/۶۷ تغییر می‌کند). در جدول (۵) نیز با توجه به نتایج ارائه شده در جداول (۲) تا (۴) و پردازش آماری دامنه تغییرات نسبت (پارامتر) لاغری برای هر یک از محدوده‌های رفتاری با استفاده از نرم‌افزار (SPSS)، نتایج مرزبندی محدوده‌های لاغری برای مصالح مختلف ارائه، و با روابط پیشنهادی موجود [۲۱] مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود در محدوده‌های صفحات لاغر، متوسط و ضخیم تا حدی بین مرزبندی آشتو و نتایج المان محدود اختلاف وجود دارد. مشابه با نتایج به دست آمده در پژوهش‌های قبلی [۲۲]

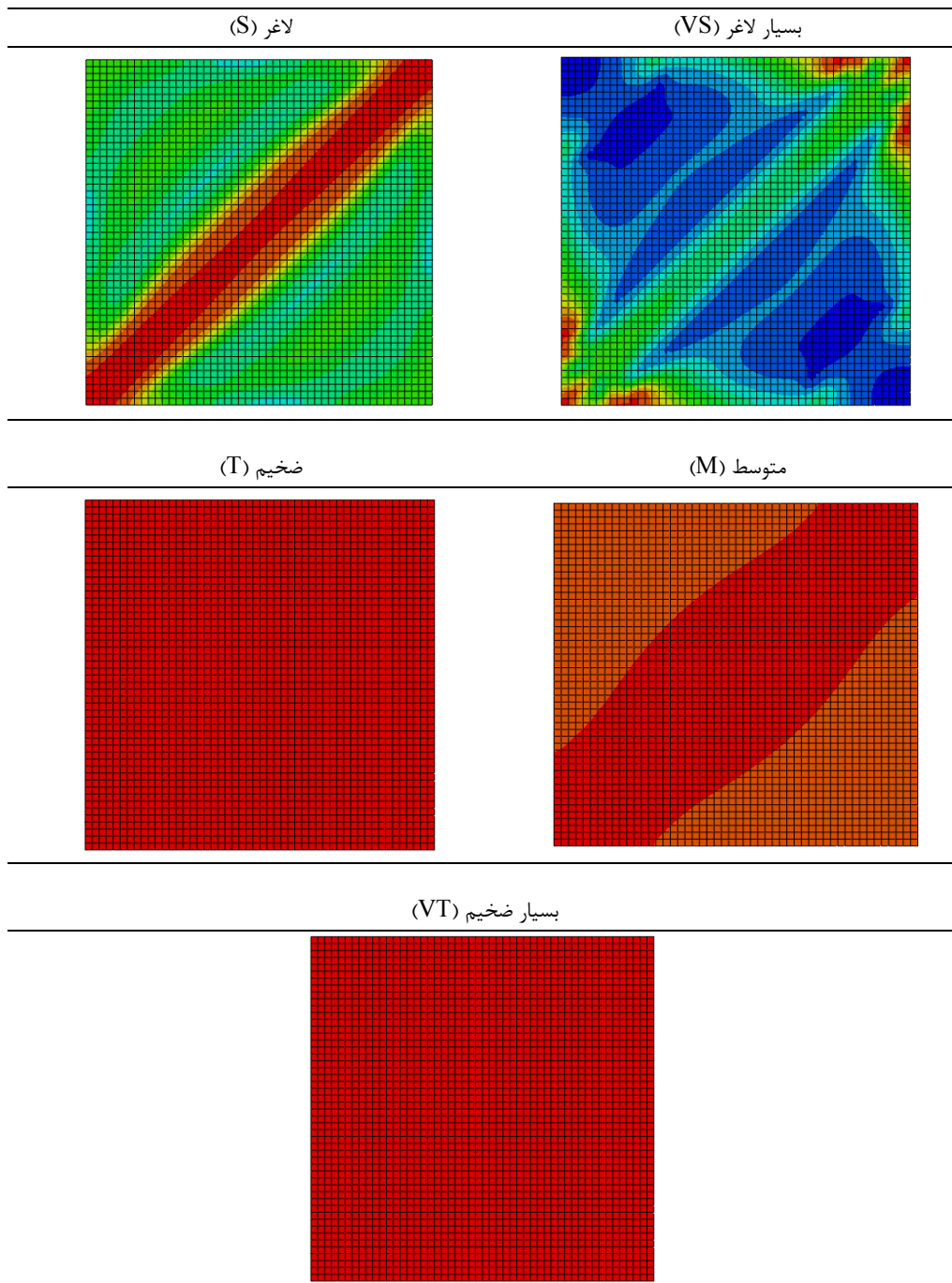
دست داده و پس از آن، ظرفیت باربری ناچیزی از خود تا رسیدن به بیشینه مقاومت نشان می‌دهند. با ادامه بارگذاری، ورق وارد فاز نرم‌شوندگی می‌شود. - صفحات لاغر: بسته به نسبت لاغری، ظرفیت کماتشی نسبتاً کم تا متوسط و در مقابل، ظرفیت پس از کماتش متوسط تا نسبت زیادی دارند. کمی بعد از وقوع اولین تسلیم، به بیشینه مقاومت خود می‌رسند.

- صفحات متوسط: بسته به مشخصات مصالح، ظرفیت‌های معادل با وقوع پدیده‌های کماتش (V_{cr})، اولین تسلیم (V_{fy}) و نهایی (V_u) در این صفحات به یکدیگر نزدیک است ($V_p < V_{cr}, V_{fy}, V_u < V_y$). برخلاف صفحات لاغر و بسیار لاغر، مقدار تغییر شکل‌های عمود بر صفحه به دلیل ظرفیت کماتشی نسبتاً بالاتر تا لحظه رسیدن به بیشینه مقاومت (V_u) چندان قابل توجه نیست.

- صفحات ضخیم (لاغری کم): در ظرفیتی معادل با ظرفیت اسمی تسلیم برشی (V_y)، تقریباً کل سطح ورق به شرایط تسلیم می‌رسد. پس از آن، صفحه باربری ناچیزی را با الگوی رفتار سخت‌شونده تا لحظه وقوع کماتش پلاستیک تجربه می‌کند. هم‌زمان با وقوع کماتش پلاستیک در صفحه، ورق به بیشینه ظرفیت خود (V_u) می‌رسد ($V_u > V_y$) و از این لحظه به بعد، توسعه تغییر شکل‌های عمود بر صفحه ورق آغاز می‌شود.

- صفحات بسیار ضخیم (لاغری بسیار کم): در ظرفیتی معادل با ظرفیت اسمی تسلیم برشی (V_y)، ورق به طور کامل شرایط می‌شود. پس از آن، به علت توسعه تنش‌ها در ناحیه سخت‌شونده از رفتار مصالح، ورق باربری محدودی را با رفتار سخت‌شونده (متناسب با مدول الاستیسیته ثانویه مصالح) تا رسیدن به بیشینه ظرفیت خود نشان می‌دهد. برخلاف صفحات رده‌های دیگر، به دلیل عدم وقوع کماتش، رفتار نرم‌شونده مشاهده نمی‌شود و تغییر شکل‌های عمود بر صفحه ورق بسیار ناچیز است.

شکل ۳ الگوی کلی توسعه تنش‌ها را در صفحات فلزی در لحظه رسیدن صفحه به مقاومت نهایی خود (V_u) مطالعه می‌کند. در صفحات بسیار لاغر، تنش‌ها تنها در مناطق محدودی از لبه‌های ورق در کنج‌های کششی آن به تنش تسلیم می‌رسد، در حالی که در سایر نواحی بسیار کوچک هستند. در صفحات لاغر، ورق در ناحیه بسیار باریکی در امتداد قطر کششی تسلیم می‌شود. در صفحات متوسط نیز در حالت کلی در مقایسه با صفحات لاغر و بسیار لاغر، تنش‌ها در سطح بزرگ‌تری از ورق در امتداد قطر کششی توسعه می‌یابد. در صفحات ضخیم و بسیار ضخیم، با الگوی نسبتاً مشابه، تقریباً کل سطح ورق در نهایت به صورت یکنواخت تسلیم می‌شود.



شکل ۳. الگوی توزیع تنش‌ها در حد نهایی مقاومت صفحات فلزی برشی

Fig. 3. General stress distribution at the ultimate state of shear panels in different slenderness ratio classes

جدول ۲. خلاصه نتایج تحلیل صفحات فولادی کربن دار (CS)

Table 2. Summary of results of carbon steel models (CS)

محدوده	t (mm)	$\lambda = b / t$	$\beta = \lambda \sqrt{\sigma_y / E}$	V_{fy} (kN)	V_{cr} (kN)	V_p (kN)	V_y (kN)	V_u (kN)
بسیار ضخیم (VT)	۱۰۰/۰۰	۱۰	۰/۴۰	۱۹۹۴۲/۶	-	۱۹۰۵۰/۰	۱۹۹۲۰/۰	۲۱۵۶۷/۵
	۲۵/۰۰	۴۰	۱/۶۲	۴۹۸۳/۸	-	۴۷۶۲/۵	۴۹۸۰/۰	۵۳۹۰/۷
ضخیم (T)	۲۲/۲۲	۴۵	۱/۸۲	۴۴۴۸/۵	۴۷۷۱/۸	۴۲۳۳/۳	۴۴۲۶/۷	۴۷۷۱/۸
	۱۶/۶۷	۶۰	۲/۴۳	۳۳۱۹/۸	۳۴۴۱/۹	۳۱۷۵/۰	۳۳۲۰/۰	۳۴۴۱/۹
	۱۲/۶۶	۷۹	۳/۲۰	۲۵۰۵/۵	۲۵۲۲/۶	۲۴۱۱/۴	۲۵۲۱/۵	۲۵۲۲/۶
متوسط (M)	۱۲/۵۰	۸۰	۳/۲۴	۲۴۶۹/۷	۲۴۸۱/۲	۲۳۸۱/۲	۲۴۹۰/۰	۲۴۸۱/۲
	۱۱/۴۹	۸۷	۳/۵۳	۲۱۹۴/۵	۲۱۹۵/۳	۲۱۸۹/۷	۲۲۸۹/۷	۲۱۹۵/۳
	۱۱/۳۶	۸۸	۳/۵۷	۲۱۵۳/۷	۲۱۵۵/۸	۲۱۶۴/۸	۲۲۶۳/۶	۲۱۵۵/۸
لاغر (S)	۵/۰۰	۲۰۰	۸/۱۱	۳۵۲/۲	۲۲۷/۸	۹۵۲/۵	۹۹۶/۰	۳۷۱/۴
	۲/۲۲	۴۵۰	۱۸/۲۴	۶۱/۳	۲۰/۰	۴۲۳/۳	۴۴۲/۷	۷۱/۴
	۱/۰۰	۱۰۰۰	۴۰/۵۳	۱۳/۸	۱/۸	۱۹۰/۵	۱۹۹/۲	۱۶/۱
بسیار لاغر (VS)	۰/۹۱	۱۱۰۰	۴۴/۵۸	۱۱/۱	۱/۳	۱۷۳/۲	۱۸۱/۱	۱۳/۵
	۰/۶۷	۱۵۰۰	۶۰/۸۰	۵/۹	۰/۵	۱۲۷/۰	۱۳۲/۸	۷/۹
	۰/۴۵	۲۲۰۰	۸۹/۱۷	۳/۶	۰/۲	۸۶/۶	۹۰/۶	۴/۵

محدوده، استفاده صرف از مدول الاستیسیته اولیه (E) در روابط، منطقی به نظر نمی‌رسد. به هر حال، مطالعه دقیق‌تر این نکته بررسی‌های بیشتری را با تمرکز کامل بر این موضوع می‌طلبد و خارج از دامنه تحقیق حاضر قرار می‌گیرد. به علاوه مقایسه نتایج تحلیل‌های المان محدود در جدول (۵) برای مصالح مختلف نیز نشان می‌دهد که صرف نظر از محدوده متوسط که نتایج مرزبندی فولاد کربن دار (CS) و آلومینیوم (Al) به یکدیگر نزدیک‌تر است، در مرز بین نواحی لاغر/بسیار لاغر و ضخیم/بسیار ضخیم، بین نتایج مصالح فولادی مختلف (CS, LYP160) با یکدیگر توافق بیشتری وجود دارد تا با مصالح آلومینیومی (Al).

و ۲]، مقایسه نتایج برای مصالح مختلف نیز نشان می‌دهد، که برخلاف روابط آستو، با تغییر جنس مصالح ورق، تغییراتی در دامنه‌های لاغری تعریف شده برای هر محدوده‌های لاغری به وجود می‌آید. احتمالاً دلیل این مشاهده به نحوه تعریف پارامتر لاغری (β) بر می‌گردد که به شکل مشابه برای محدوده‌های مختلف (کمانش ارتجاعی، کمانش غیرارتجاعی و کمانش خمیری) بر اساس پارامترهای تنش تسلیم مصالح (σ_y) و مدول الاستیسیته اولیه آن (E) بیان شده است. در حالی که به نظر می‌رسد که در تعیین مرز بین محدوده‌های لاغر/متوسط (کمانش ارتجاعی/غیرارتجاعی) استفاده از پارامتر تنش حد تناسب (σ_p) به جای تنش حد تسلیم (σ_y) مناسب‌تر باشد. همچنین، در تعیین مرز محدوده‌های متوسط/ضخیم (کمانش غیرارتجاعی/پلاستیک) نیز با توجه به تغییر مدول الاستیسیته مصالح در این

جدول ۳. خلاصه نتایج تحلیل صفحات فولادی با تنش تسلیم پایین (LYP160)

Table 3. Summary of results of low yield point steel models (LYP160)

محدوده	t (mm)	$\lambda = b / t$	$\beta = \lambda \sqrt{\sigma_y / E}$	V_{fy} (kN)	V_{cr} (kN)	V_p (kN)	V_y (kN)	V_u (kN)
بسیار ضخیم (VT)	۱۰۰/۰۰	۱۰	۰/۲۸	۹۲۲۸/۳	-	۶۱۳۰/۰	۹۲۳۸/۰	۱۱۶۵۷/۵
	۲۲/۲۲	۴۵	۱/۲۷	۲۰۷۶/۶	-	۱۳۶۲/۲	۲۰۵۲/۹	۲۵۹۰/۲
ضخیم (T)	۲۰/۰۰	۵۰	۱/۴۱	۱۸۵۳/۶	۲۳۳۱/۱	۱۲۲۶/۰	۱۸۴۷/۶	۲۳۳۱/۱
	۱۴/۲۹	۷۰	۱/۹۸	۱۳۲۱/۴	۱۶۱۴/۵	۸۷۵/۷	۱۳۱۹/۷	۱۶۱۴/۵
	۹/۶۲	۱۰۴	۲/۹۴	۸۷۰/۷	۸۹۵/۵	۵۸۹/۴	۸۸۸/۳	۸۹۵/۵
متوسط (M)	۹/۵۲	۱۰۵	۲/۹۷	۸۶۰/۰	۸۷۹/۰	۵۸۳/۸	۸۷۹/۸	۸۷۹/۰
	۶/۳۳	۱۵۸	۴/۴۷	۳۸۴/۶	۳۹۰/۶	۳۸۸/۰	۵۸۴/۷	۳۹۷/۲
	۶/۲۹	۱۵۹	۴/۵۰	۳۷۹/۵	۳۸۵/۱	۳۸۵/۵	۵۸۱/۰	۳۹۱/۸
لاغر (S)	۳/۳۳	۳۰۰	۸/۴۸	۱۰۰/۵	۶۳/۹	۲۰۴/۳	۳۰۷/۹	۱۰۱/۳
	۱/۶۷	۶۰۰	۱۶/۹۷	۲۳/۷	۶/۱	۱۰۲/۲	۱۵۴/۰	۲۶/۵
	۱/۱۱	۱۱۰۰	۳۱/۱۱	۷/۴	۱/۳	۵۵/۷	۸۴/۰	۸/۱
بسیار لاغر (VS)	۰/۶۷	۱۵۰۰	۴۲/۴۳	۴/۱	۰/۵	۴۰/۹	۶۱/۶	۴/۶
	۰/۵۶	۱۸۰۰	۵۰/۹۲	۳/۱	۰/۳	۳۴/۱	۵۱/۳	۳/۵
	۰/۴۵	۲۲۰۰	۶۲/۲۲	۲/۲	۰/۲	۲۷/۹	۴۲/۰	۲/۶

المان محدود و با استفاده از پردازش آماری داده‌ها با نرم‌افزار (SPSS)، روابط جدیدی برای ارزیابی بار کمانشی صفحات متوسط و ضخیم پیشنهاد می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، روابط پیشنهادی در غالب نسبت‌های لاغری قادر است با دقت نسبتاً بهتری در مقایسه با روابط آشتو [۲۱] بار کمانشی صفحات متوسط (کمانش غیرارتجاعی) و ضخیم (کمانش پلاستیک) را پیش‌بینی کند (به ترتیب روابط (۶) و (۷)).

لازم به ذکر است که پردازش آماری نتایج مربوط به صفحات متوسط تایید کرد که ارتباط معناداری بین ظرفیت کمانشی صفحات این رده و پارامترهای مدول الاستیسیته اولیه، ضریب کمانش برشی، تنش تسلیم مصالح و نسبت لاغری وجود دارد. بنابراین، همان‌طور که از مقایسه روابط (۶) و (۳) مشخص است، در ارائه رابطه (۶) برای ظرفیت کمانشی صفحات متوسط از الگویی مشابه با رابطه پیشنهادی آشتو استفاده شده است. در مورد صفحات

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

در اشکال ۴ و ۵ نتایج تنش بحرانی کمانشی به دست آمده از تحلیل عددی و روابط نظری موجود (روابط (۲) تا (۴)) به ترتیب برای محدوده‌های لاغر/بسیار لاغر و متوسط/ضخیم مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود و نتایج تحقیقات گذشته [۵۰، ۲۲ و ۲] نیز نشان می‌دهد، در محدوده صفحات لاغر و بسیار لاغر، روابط تئوری موجود (رابطه (۱) یا (۲)) و نتایج تحلیل‌های المان محدود توافق مناسبی دارند که این نتیجه به نوعی، موید صحت روش مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار نیز است. در مقابل در محدوده‌های صفحات متوسط و ضخیم، به نظر می‌رسد روابط نظری موجود (روابط (۳) و (۴)) در مقایسه با نتایج تحلیل‌های المان محدود تا حدی دچار اختلاف می‌شوند. به همین جهت، در این تحقیق با توجه به نتایج تحلیل‌های

جدول ۴. خلاصه نتایج تحلیل صفحات آلومینیومی (AL)

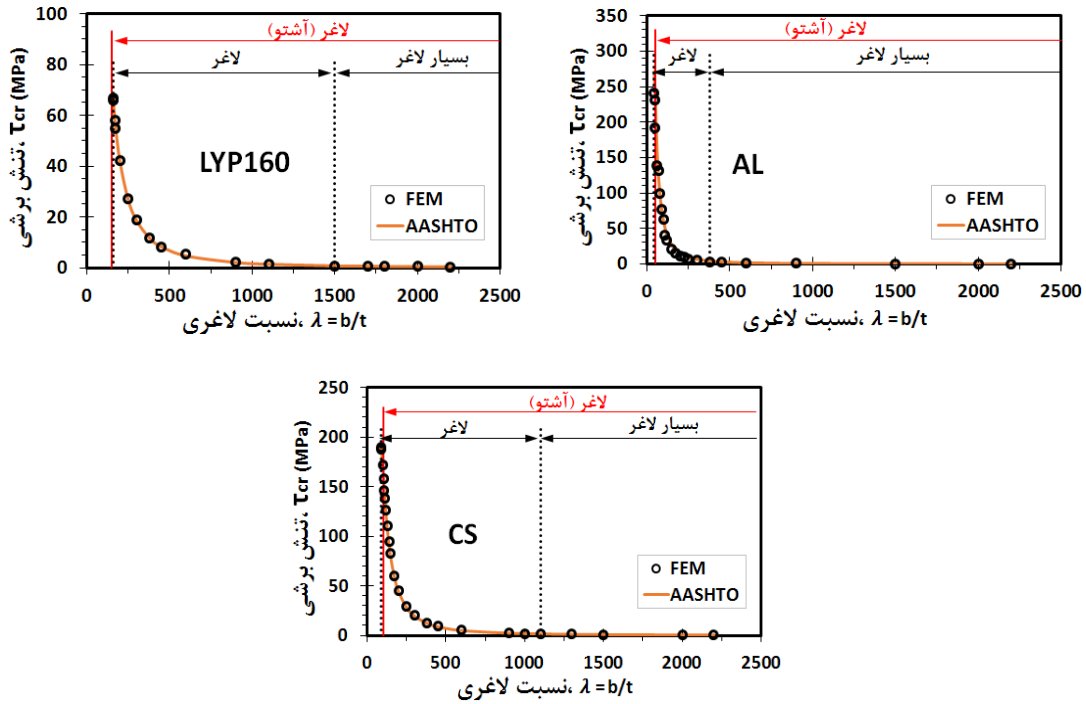
Table 4. Summary of results of aluminum models (AL)

محدوده	t (mm)	$\lambda = b / t$	$\beta = \lambda \sqrt{\sigma_y / E}$	V_{fy} (kN)	V_{cr} (kN)	V_p (kN)	V_y (kN)	V_u (kN)
بسیار ضخیم (VT)	۱۰۰/۰۰	۱۰	۰/۸۴	۲۹۰۸۵/۴	-	۲۴۷۱۰/۰	۲۹۰۵۰/۰	۳۰۰۶۵/۷
	۳۳/۳۳	۳۰	۲/۵۱	۹۶۹۷/۵	-	۸۲۳۶/۷	۹۶۸۳/۳	۱۰۰۲۰/۴
ضخیم (T)	۲۸/۵۷	۳۵	۲/۹۳	۸۱۵۸/۹	۹۱۰۲/۷	۷۰۶۰/۰	۸۳۰۰/۰	۸۵۸۷/۵
	۲۶/۳۲	۳۸	۳/۱۸	۷۴۶۲/۳	۷۷۵۷/۶	۶۵۰۲/۶	۷۶۴۴/۷	۷۷۵۷/۶
متوسط (M)	۲۵/۶۴	۳۹	۳/۲۷	۷۱۶۶/۳	۷۳۷۰/۴	۶۳۳۵/۹۰	۷۴۴۸/۷	۷۳۷۰/۴
	۲۳/۲۶	۴۳	۳/۶۰	۵۸۲۸/۵	۵۸۲۱/۸	۵۷۴۶/۵	۶۷۵۵/۸	۵۸۵۴/۳
لاغر (S)	۲۲/۷۳	۴۴	۳/۶۹	۵۵۲۴/۰	۵۴۸۲/۸	۵۶۱۵/۹	۶۶۰۲/۳	۵۵۴۴/۸
	۱۰/۰۰	۱۰۰	۸/۳۸	۹۰۰/۹	۶۲۹/۱	۲۴۷۱/۰	۲۹۰۵/۰	۱۰۴۳/۳
بسیار لاغر (VS)	۳/۳۳	۳۰۰	۲۵/۱۳	۸۶/۳	۱۷/۱	۸۲۳/۷	۹۶۸/۳	۱۲۲/۲
	۲/۶۳	۳۸۰	۳۱/۸۳	۵۵/۲	۸/۴	۶۵۰/۳	۷۶۴/۵	۷۷/۶
	۱/۶۷	۶۰۰	۵۰/۲۶	۲۴/۸	۲/۲	۴۱۱/۸	۴۸۴/۲	۳۱/۴
	۰/۶۷	۱۵۰۰	۱۲۵/۶۶	۶/۲	۰/۲	۱۶۴/۷	۱۹۳/۷	۷/۳
	۰/۴۵	۲۲۰۰	۱۸۴/۳۰	۳/۹	۰/۱	۱۱۲/۳	۱۳۲/۰	۴/۰

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

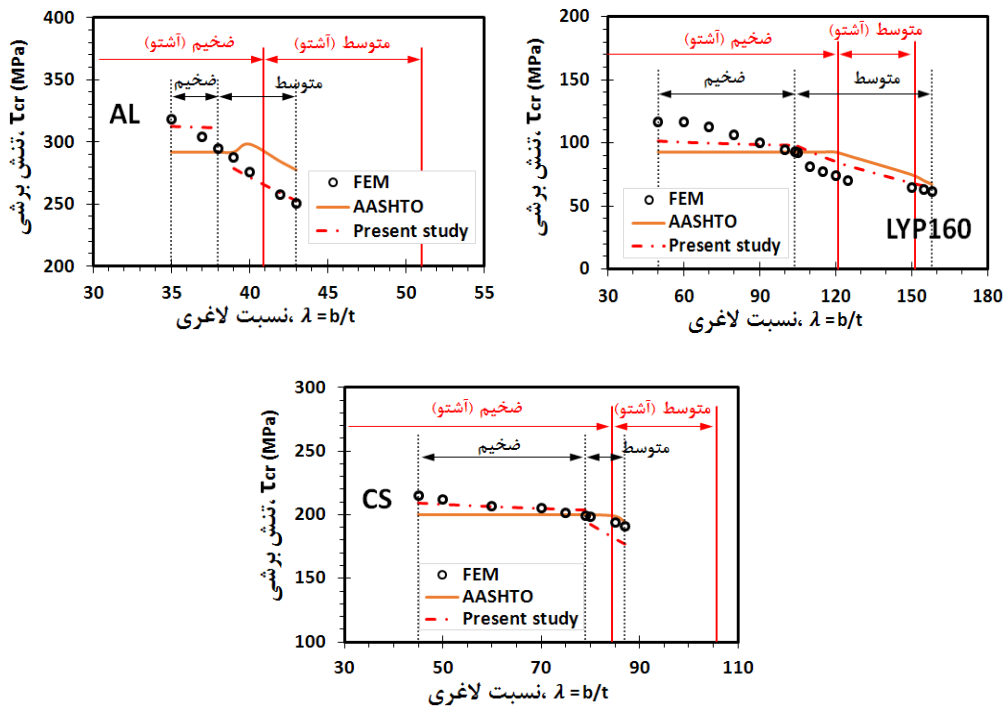
Table 5. Slenderness classification of different metal plates (using FE results) and comparison with AASHTO

	بسیار ضخیم (VT)		ضخیم (T)		متوسط (M)		لاغر (S)		بسیار لاغر (VS)		
	$\beta \leq y \sqrt{K}$		$x \sqrt{K} \leq \beta \leq y \sqrt{K}$						$x \sqrt{K} \leq \beta$		
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	
آشتو	-	-	-	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۴۰	۱/۴۰	-	-	-	
المان محدود	CS	-	۰/۵۳	۰/۵۳	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۱۵	۱/۱۵	۱۴/۵۹	۱۴/۵۹	-
	LYP160	-	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۹۶	۰/۹۶	۱/۴۶	۱/۴۶	۱۳/۸۸	۱۳/۸۸	-
	AL	-	۰/۸۲	۰/۸۲	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۱۸	۱/۱۸	۱۰/۴۲	۱۰/۴۲	-



شکل ۴. مقایسه نتایج بار کمانشی به دست آمده از تحلیل المان محدود با روابط تئوری موجود برای صفحات محدوده‌های لاغر و بسیار لاغر

Fig. 4. Comparison of buckling loads of slender and very slender plates from FE analyses and AASHTO



شکل ۵. مقایسه نتایج بار کمانشی به دست آمده از تحلیل المان محدود، روابط پیشنهادی و آیین‌نامه آشتو برای صفحات محدوده‌های متوسط و ضخیم

Fig. 5. Comparison of buckling loads of moderate and stocky plates from FE analyses, proposed equations and AASHTO

شکل ۶ خصوصیات باربری صفحات برشی فولادی و آلومینیومی را در طول بارگذاری تا لحظه رسیدن به مقاومت نهایی برای نسبت‌های (محدوده‌های) لاغری مختلف مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نتایج ارائه شده دامنه رفتار خطی یا غیرخطی صفحات (غیرخطی مکانیکی، هندسی یا هر دو) مورد توجه قرار گرفته است. به جهت ترسیم نتایج، ظرفیت‌های متناظر با وقوع اولین تسلیم، کمانش (الاستیک، غیرارتجاعی یا پلاستیک) یا حد نهایی باربری برای هر نسبت لاغری به صورت بی‌بعد و با تقسیم کردن ظرفیت مربوطه به مقاومت نهایی ورق مورد نظر حاصل شده است. همچنین به جهت فراهم آوردن امکان مقایسه راحت‌تر، دامنه تغییرات نسبت لاغری برای هر محدوده رفتاری بر اساس مطالعه حاضر و روابط آشتو در شکل ۶ به تفکیک ترسیم شده است. با توجه به نتایج:

- صفحات بسیار ضخیم: بسته به جنس صفحه و بدون توجه به نسبت لاغری، بخش قابل توجهی از باربری خود را در محدوده الاستیک از رفتار تجربه می‌کنند (در حدود ۹۵، ۸۰ و ۷۰ درصد به ترتیب برای مصالح آلومینیوم (Al)، فولاد کربن‌دار (CS) و فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP160)). با افزایش بارگذاری، ورق تسلیم می‌شود و از آن پس تا حد نهایی باربری رفتار آن به لحاظ مکانیکی غیرخطی می‌گردد، در حالی که رفتار آن به لحاظ هندسی همچنان خطی باقی می‌ماند.

- صفحات ضخیم: بسته به جنس صفحه و نسبت لاغری آن، بخش قابل توجهی از باربری صفحه، به ویژه برای نسبت‌های لاغری بزرگ‌تر، در محدوده خطی اتفاق می‌افتد. پس از آن با وقوع تسلیم در ورق، رفتار ورق تا بیشینه باربری، که هم‌زمان با وقوع کمانش (پلاستیک) در آن است، به لحاظ مکانیکی غیرخطی می‌شود. بنابراین مشابه با صفحات بسیار ضخیم، عملاً ورق تا لحظه رسیدن به بیشینه باربری خود رفتار غیرخطی هندسی (یا غیرخطی کامل) را تجربه نمی‌کند.

- صفحات متوسط: بسته به جنس صفحات، تقریباً کل باربری صفحه تا رسیدن به بیشینه ظرفیت در محدوده الاستیک از رفتار اتفاق می‌افتد و عملاً، دامنه رفتار غیرخطی (هندسی یا مکانیکی) ناچیز و قابل صرف نظر است. به بیان دیگر، بدون توجه به جنس صفحات، حداکثر دامنه رفتار خطی برای صفحات رده متوسط در مقایسه با سایر رده‌ها مشاهده می‌شود. با وقوع کمانش یا تسلیم به طور هم‌زمان یا با فاصله زمانی کوتاه از هم، صفحه به حداکثر ظرفیت باربری خود می‌رسد.

- صفحات لاغر و بسیار لاغر: در محدوده لاغری‌های کوچک‌تر، رفتار تا حدی مشابه با صفحات متوسط است و عمده باربری در فاز الاستیک اتفاق

رده ضخیم، برخلاف رابطه آشتو (رابطه (۴))، پارامترهای مدول الاستیسیته اولیه و ثانویه، ضریب کمانش برشی و نسبت لاغری، علاوه بر تنش تسلیم مصالح، در نتایج بار کمانشی تاثیرگذار تشخیص داده شدند. بنابراین در ارائه رابطه پیشنهادی برای صفحات این رده (رابطه (۷))، تاثیر پارامترهای ذکر شده نیز لحاظ شده است.

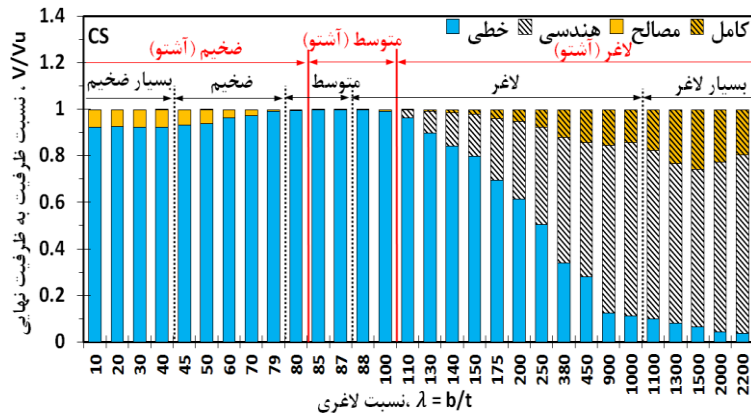
$$\tau_{cr} = 0.592 \frac{\sqrt{EK \sigma_y}}{\lambda} \quad (۶)$$

$$\tau_{cr} = 0.827 \sigma_y \times \left(\frac{KE_t}{\lambda E} \right)^{0.047} \quad (۷)$$

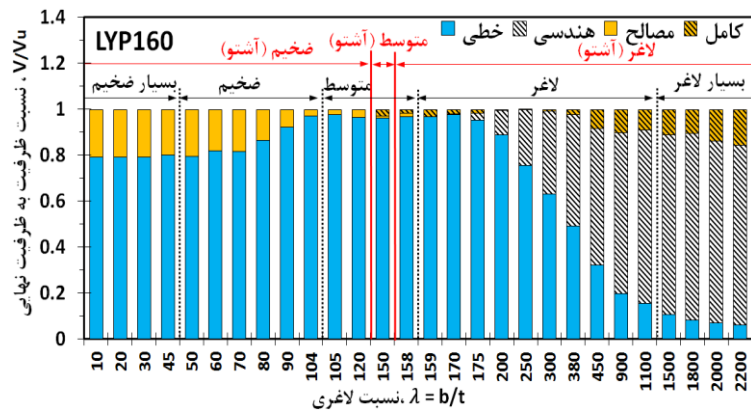
۳-۱-۴- مطالعه ترسیمی^۱ ویژگی‌های باربری صفحات در ارتباط با پدیده‌های کمانش و تسلیم

همان‌طور که می‌دانیم و قبلاً نیز اشاره شد، رفتار صفحات در طول بارگذاری بسته به نسبت لاغری‌شان متأثر از وقوع پدیده‌های کمانش (در صورت وقوع) و تسلیم است. در این ارتباط، آگاهی داشتن نسبت به زمان و شرایط وقوع این دو پدیده نسبت به یکدیگر یا ظرفیت نهایی کل، نه تنها از نظر درک بهتر رفتار صفحات به عنوان المان اصلی باربر یا بخشی از یک سیستم باربر می‌تواند با اهمیت باشد، بلکه در فرآیند طراحی چنین سازه‌هایی نیز می‌تواند رویکرد جدیدی را در طراحی آن‌ها برای سطوح مختلف بارگذاری به ارمغان آورد. به عنوان یک دیدگاه در طراحی، صفحات می‌توانند در محدوده رفتار خطی خود، سختی قابل توجهی را از خود نشان دهند و بدون آن که کمانش یا تسلیم را تجربه کنند، بارهای کوچک را به خوبی تحمل کنند. در بارهای بزرگ‌تر، بسته به فلسفه طراحی، ورق وارد فاز رفتار غیرخطی هندسی (کمانش) یا مکانیکی (تسلیم) می‌شود و امکان جذب انرژی بیشتر را برای سیستم، بدون کاهش قابل ملاحظه در سختی، فراهم می‌آورد. در بارهای بسیار بزرگ که ورق جابه‌جایی‌های بسیار بزرگی را تجربه می‌کند، رفتار ورق می‌تواند هم به لحاظ هندسی و هم مکانیکی غیرخطی (کامل) شود. این موضوع این امکان را به ورق می‌دهد که با فراهم آوردن سطح مطلوبی از ظرفیت تغییر شکلی^۲، ضمن کنترل انرژی ورودی زلزله به جذب انرژی بپردازد.

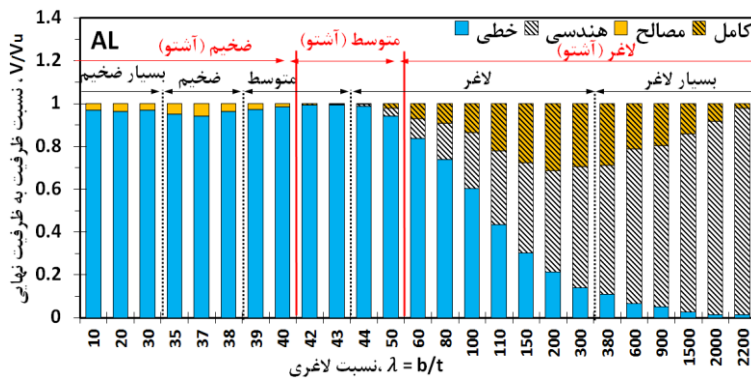
1 Info-graphic
2 Deformability



(الف)



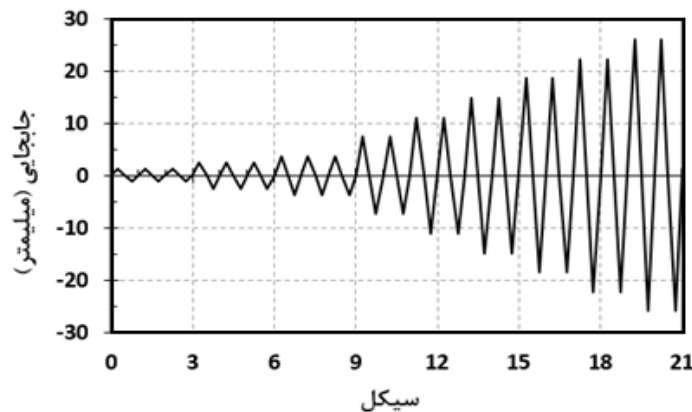
(ب)



(ج)

شکل ۶. تاثیر نسبت لاغری بر دامنه‌های رفتار خطی/غیرخطی صفحات فولادی و آلومینیومی تا لحظه رسیدن به بیشینه مقاومت، (الف): فولاد کربن‌دار (CS)، (ب): فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP160)، (ج): آلومینیوم (Al)

Fig. 6. Effect of slenderness ratio on the behavior characteristics of, (a): carbon steel (CS), (b): low yield point steel (LYP160), (c): aluminum (Al) shear panels



شکل ۷. تاریخچه اعمال بارگذاری چرخه‌ای

Fig. 7. Cyclic loading history

و رفتار چرخه‌ای صفحات مختلف با یکدیگر، از یک تاریخچه بارگذاری مشابه تا رسیدن به تغییر مکان نسبی حدود ۲۵/۹ میلی‌متر (تقریباً معادل با درصد دررفت ۰.۲/۵) برای مدل‌های مختلف استفاده گردید (شکل ۷). شرایط مرزی و الگوی بارگذاری برشی صفحات قبلاً در شکل ۱-ب تشریح شده است.

به طور کلی در بررسی قابلیت جذب انرژی یک صفحه با ابعاد (طول و عرض) و شرایط بارگذاری و تکیه‌گاهی مشخص، پارامترهای مختلفی نظیر ضخامت یا نسبت لاغری (که حجم مصالح به کار رفته و شرایط وقوع کمانش و تسلیم را در صفحه مشخص می‌کند)، مدول الاستیسیته اولیه، تنش تسلیم و مدول الاستیسیته ثانویه مصالح می‌تواند تاثیرگذار باشد. در این بخش سعی می‌شود ضمن ارائه نتایج به دست آمده در مورد تاثیر هر یک از موارد فوق صحبت شود.

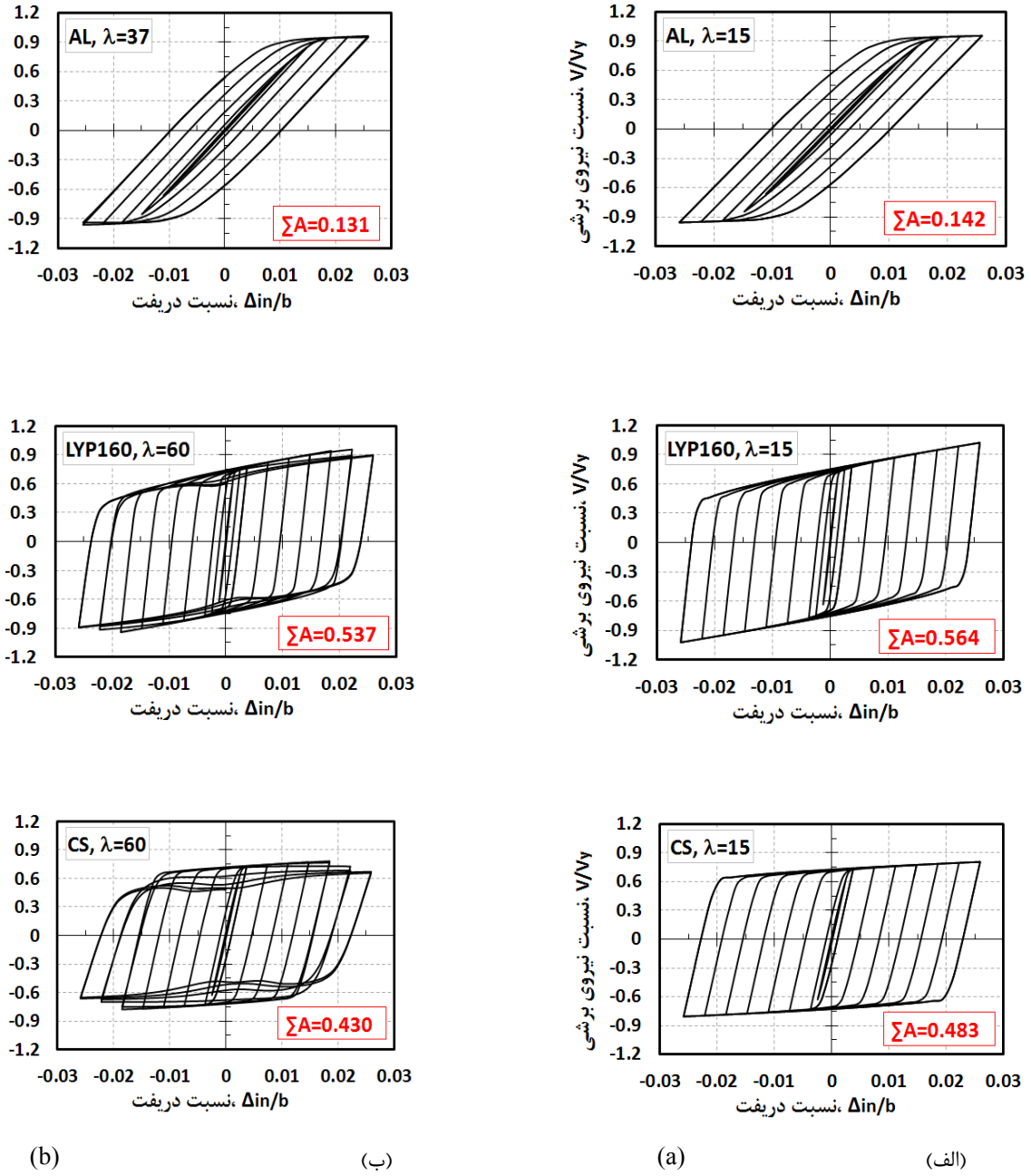
در شکل ۸ منحنی‌های هیستریزس^۱ پانلهای برشی فلزی بسیار لاغر تا بسیار ضخیم برای مصالح مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود محور قائم و افقی منحنیها به ترتیب نسبت به ظرفیت اسمی تسلیم برشی ورق $(V_y = b \times t \times \tau_y)$ و ارتفاع صفحات بی‌بعد (نرمال) شده‌اند. بدین ترتیب به نوعی تاثیر پارامتر تنش تسلیم مصالح مختلف از نتایج حذف می‌گردد و امکان مطالعه بهتر نتایج در ارتباط با سایر پارامترهای تاثیرگذار (مدول الاستیسیته اولیه و ثانویه، لاغری) فراهم می‌آید. همچنین به منظور امکان مقایسه کمی نتایج، مجموع سطح محصور شده

می‌افتد. پس از آن با وقوع کمانش، صفحه رفتار غیرخطی هندسی را تجربه می‌کند. بسته به نسبت لاغری، ظرفیت کمانشی صفحه در مقایسه با ظرفیت بیشینه آن می‌تواند قابل توجه یا ناچیز باشد. در ادامه هم‌زمان با وقوع تسلیم یا کمی پس از آن، ورق با تجربه رفتار غیرخطی کامل (هندسی و مصالح) به بیشینه ظرفیت باربری خود می‌رسد. با افزایش نسبت لاغری، به دلیل افت ظرفیت کمانشی ورق، تدریجاً دامنه رفتار خطی آن نیز کاهش می‌یابد. صرف‌نظر از نوع مصالح، در نسبت‌های لاغری بزرگ‌تر، عمده باربری ورق در محدوده پس از کمانش (غیرخطی هندسی) اتفاق می‌افتد. برای فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP160)، با افزایش نسبت لاغری ورق وقوع اولین تسلیم در آن تسریع می‌شود. برای فولاد کربن‌دار (CS) و آلومینیوم (Al) نیز رفتاری مشابه با فولاد با تنش تسلیم پایین مشاهده می‌شود، با این تفاوت که برای لاغری‌های بزرگ‌تر از یک نسبت لاغری مشخص، این روند عکس می‌شود.

۳-۲- تحلیل سیکلی و استهلاک انرژی

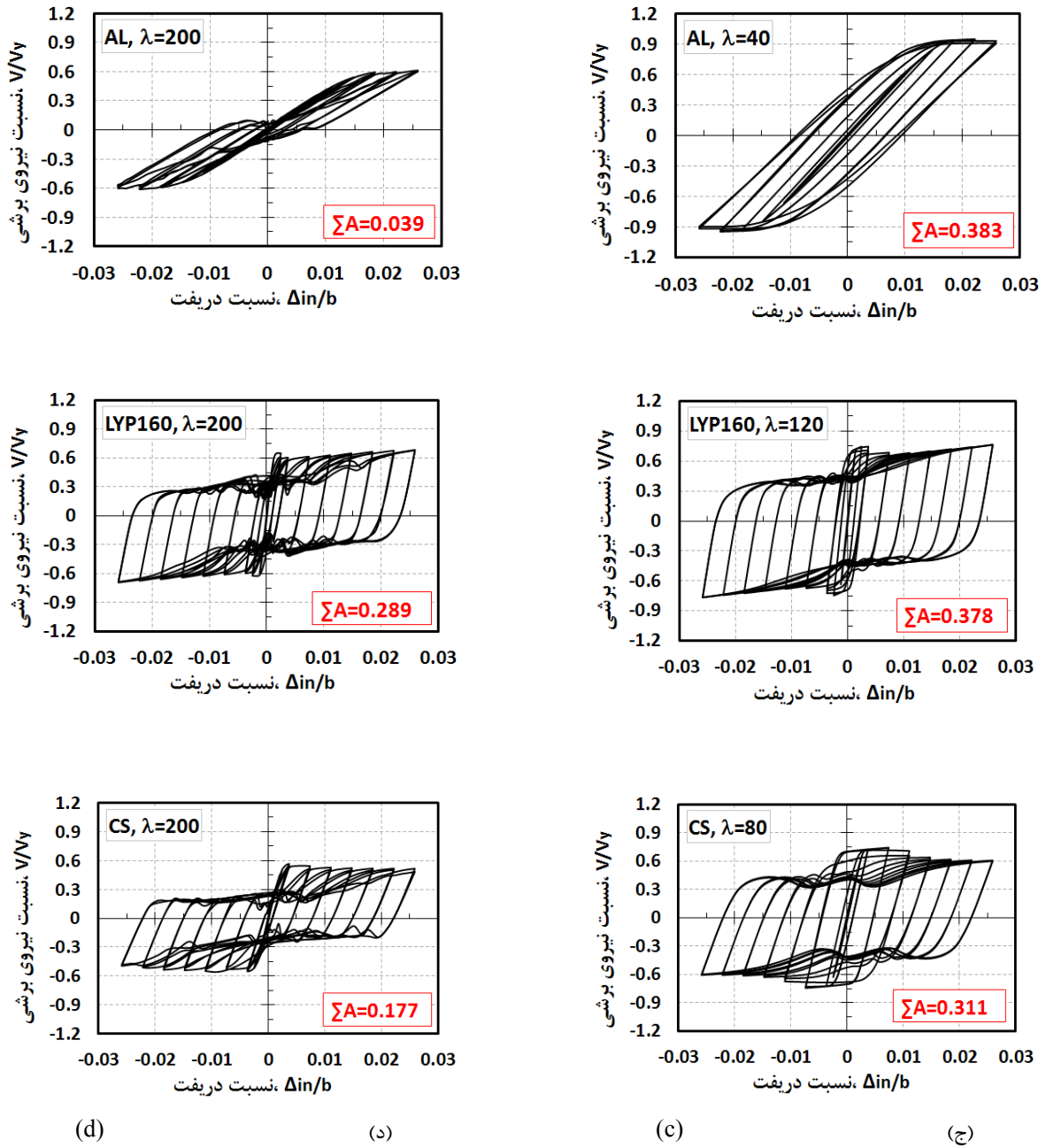
به جهت بررسی تاثیر جنس و مشخصات هندسی صفحات فلزی در خصوصیات جذب انرژی آن‌ها، برای هر یک از مصالح فولاد کربن‌دار (CS)، فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP160) و آلومینیوم (Al) تعدادی مدل با نسبت‌های لاغری مختلف (به گونه‌ای که معرف هر یک از محدوده‌های پنج‌گانه رفتار باشند) انتخاب می‌گردد و تحت آنالیز چرخه‌ای قرار می‌گیرد. به منظور فراهم آوردن امکان مقایسه منطقی و یکسان بین نتایج جذب انرژی

1 Hysteresis



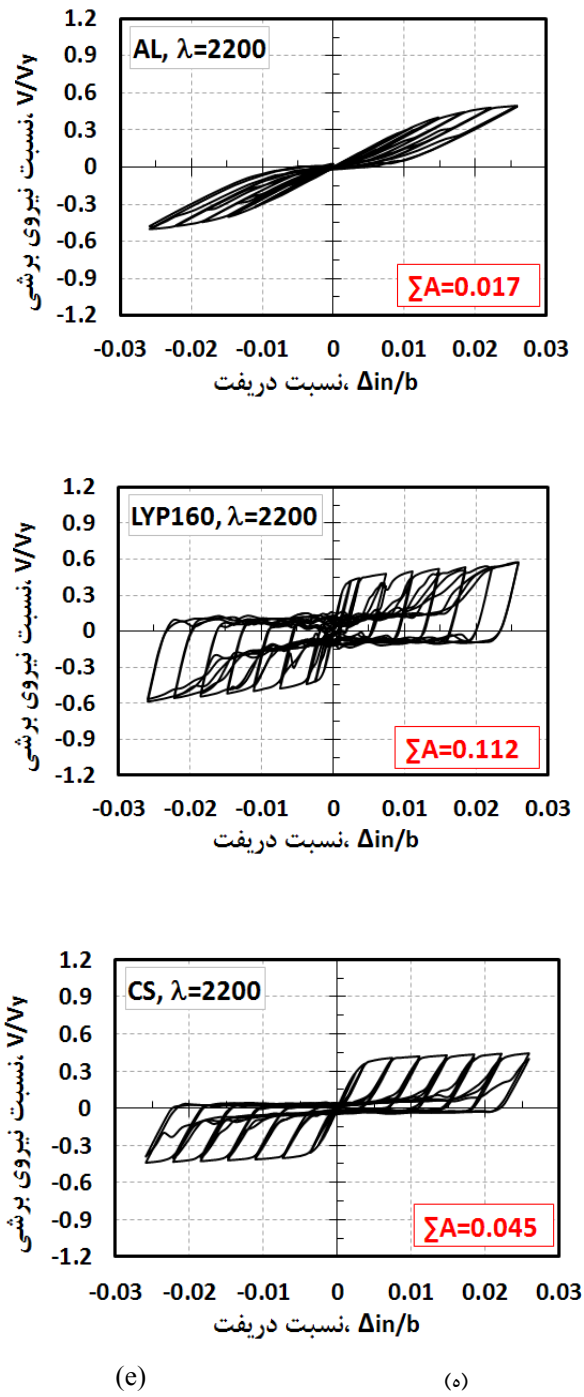
شکل ۸. منحنی‌های هیستریزیس پانل‌های برشی، الف): بسیار ضخیم (VT)، ب): ضخیم (VS)(T)

Fig. 8. Hysteresis curves of shear panels in different slenderness ratio classes, (a): very stocky, (b): stocky



شکل ۸. منحنی‌های هیستریزیس پانل‌های برشی، (ج): متوسط (M)، (د): لاغر (S)

Fig. 8. Hysteresis curves of shear panels in different slenderness ratio classes, (c): moderate, (d): slender



شکل ۸. منحنی‌های هیستریزیس پانل‌های برشی، (ه): بسیار لاغری (VS)

Fig. 8. Hysteresis curves of shear panels in different slenderness ratio classes, (e): very slender

مشابه (از نظر نسبت لاغری و تنش تسلیم) صفحات آلومینیومی به دلیل مدول الاستیسیته اولیه کوچک‌تر، منحنی‌های هیستریزس باریک‌تر و در نتیجه، قابلیت جذب انرژی به مراتب کوچک‌تری دارند.

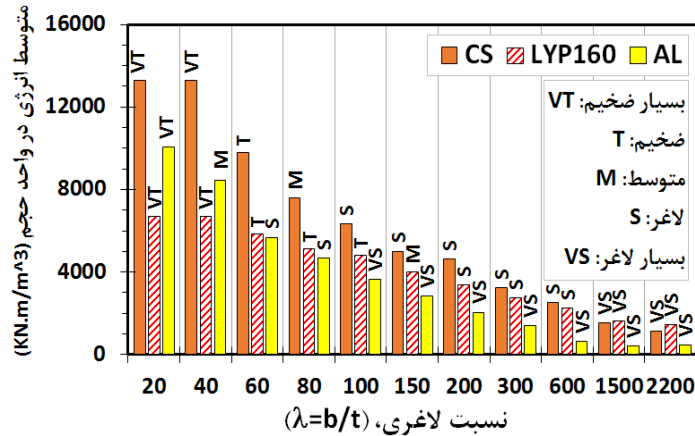
به جهت مطالعه هم‌زمان تاثیر پارامترهای مختلف در ارتباط با هندسه (ضخامت یا نسبت لاغری) و جنس (تنش تسلیم و مدول الاستیسیته اولیه و ثانویه) صفحات در قابلیت جذب انرژی، شکل ۹ متوسط انرژی جذب شده دو سیکل آخر را در واحد حجم صفحات فولادی و آلومینیومی برای نسبت‌های لاغری مختلف مقایسه می‌کند. با توجه به نتایج، در حالت کلی صرف نظر از نوع مصالح، با تغییر نسبت لاغری در محدوده صفحات بسیار ضخیم (VT)، انرژی جذب شده در واحد حجم تغییر نمی‌کند، لیکن در سایر محدوده‌ها (ضخیم (T)، متوسط (M)، لاغر (S) و بسیار لاغر (VS)) با افزایش نسبت لاغری، به علت وقوع کمانش، انرژی جذب شده در واحد حجم صفحات تدریجاً کاهش می‌یابد.

مقایسه نتایج در شکل ۹ برای مصالح مختلف در محدوده‌های بسیار ضخیم (VT)، ضخیم (T) و متوسط (M)، که رفتار صفحات عمدتاً تحت تاثیر وقوع پدیده تسلیم است، به گونه‌ای متفاوت با نتایج شکل ۸، حاکی از آن است که حداکثر جذب انرژی در واحد حجم به ترتیب برای مصالح فولاد کربن‌دار، آلومینیوم و فولاد با تنش تسلیم پایین اتفاق می‌افتد. این نتیجه تلویحاً در درجه اول به نقش برجسته تنش تسلیم و سپس مدول الاستیسیته مصالح دلالت دارد. در صفحات فولادی، با توجه به نزدیک بودن مدول الاستیسیته دو نوع فولاد و به دلیل تنش تسلیم بالاتر مصالح فولاد کربن‌دار نسبت به فولاد با تنش تسلیم پایین، قابلیت جذب انرژی فولاد کربن‌دار بالاتر است. قابلیت جذب انرژی صفحات آلومینیومی نیز به دلیل تنش تسلیم بالاتر آلومینیوم در مقایسه با فولاد با تنش تسلیم پایین، با وجود مدول الاستیسیته کمتر آلومینیوم نسبت به فولاد، از فولاد با تنش تسلیم پایین بالاتر است. همچنین با وجود تنش تسلیم بالاتر آلومینیوم نسبت به فولاد کربن‌دار، به دلیل اختلاف قابل توجه مدول الاستیسیته فولاد کربن‌دار نسبت به آلومینیوم و اختلاف نسبتاً کمتر تنش تسلیم فولاد کربن‌دار از آلومینیوم، قابلیت جذب انرژی صفحات فولادی کربن‌دار از صفحات آلومینیومی نظیر بالاتر است.

به علاوه مقایسه نتایج شکل ۹ برای مصالح مختلف در محدوده لاغر (S)، که رفتار مصالح عمدتاً تحت تاثیر پدیده کمانش است، نشان می‌دهد که در این محدوده نیز به ترتیب مدول الاستیسیته اولیه و تنش تسلیم مصالح در قابلیت جذب انرژی صفحات مختلف نقش برجسته‌ای دارند. با توجه به

توسط منحنی‌های هیستریزس نرمال شده نیز در کنار تصاویر نمایش داده شده است.

نتایج در شکل ۸ نشان می‌دهد که به طور کلی برای یک مصالح به خصوص با افزایش سیکل‌های بارگذاری، ظرفیت باربری صفحات رده بسیار ضخیم به دلیل توسعه تنش‌ها در بخش سخت‌شونده از منحنی تنش-کرنش مرتباً افزایش می‌یابد، در حالی که در صفحات سایر رده‌ها (ضخیم، متوسط، لاغر و بسیار لاغر)، به دلیل وقوع کمانش و کرنش‌های پسماند ناشی از سیکل‌های متعدد بارگذاری، تا حدی از ظرفیت باربری در سیکل‌های بالاتر کاسته می‌شود. کاهش نسبت لاغری در محدوده صفحات ضخیم و بسیار ضخیم، که رفتار صفحه عمدتاً تحت اثر وقوع تسلیم است، تاثیر چندانی در سطح محصور شده زیر منحنی‌های هیستریزس و در نتیجه، قابلیت جذب انرژی صفحات ندارد. در مقابل، در محدوده صفحات متوسط، لاغر و به ویژه بسیار لاغر، که به تدریج نقش کمانش در رفتار صفحات برجسته‌تر می‌شود، به دلیل وقوع کمانش و در نتیجه، پدیده تنگ‌شدگی^۱ در منحنی‌های هیستریزس، قابلیت جذب انرژی صفحات با کاهش نسبت لاغری به شدت تحت تاثیر قرار گرفته و از مقدار آن به سرعت کاسته می‌شود. مقایسه کیفی نتایج برای مصالح فولادی مختلف با یکدیگر در شکل ۸ نشان می‌دهد که الگوی منحنی‌های هیستریزس مصالح فولادی، که مدول الاستیسیته اولیه تقریباً یکسانی دارند، کم و بیش با یکدیگر مشابه است. البته، به دلیل اختلاف شیب (مدول الاستیسیته) ثانویه منحنی‌های تنش-کرنش فولادها (جدول ۱ را ببینید)، امتداد منحنی‌های هیستریزس آن‌ها تا حدودی تحت تاثیر قرار گرفته است. ارزیابی کمی سطح محصور شده توسط منحنی‌های هیستریزس مصالح فولادی مختلف نیز ظاهراً به نقش مدول الاستیسیته ثانویه مصالح در قابلیت جذب انرژی صفحات اشاره دارد. در شرایط یکسان از نقطه نظر مدول الاستیسیته اولیه، نسبت لاغری و تنش تسلیم (با توجه به حذف تاثیر تنش تسلیم مصالح در نتایج)، به نظر می‌رسد که هر چه مدول الاستیسیته ثانویه مصالح صفحه بیشتر باشد، قابلیت جذب انرژی آن نیز بیشتر خواهد بود. با توجه به نتایج به دست آمده، برای نسبت‌های لاغری بزرگ‌تر، میزان تاثیر مدول الاستیسیته ثانویه مصالح در نسبت جذب انرژی صفحات به سرعت افزایش می‌یابد. همچنین، مقایسه کمی و کیفی نتایج صفحات فولادی و آلومینیومی در شکل ۸ با یکدیگر تحت شرایط بارگذاری تغییر شکل‌های یکسان به نقش برجسته مدول الاستیسیته اولیه مصالح را در قابلیت جذب انرژی صفحات اشاره دارد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در شرایط



شکل ۹. متوسط انرژی جذب شده دو سیکل آخر در واحد حجم صفحات برشی برای مصالح و نسبت‌های (محدوده‌های) لاغری مختلف

Fig. 9. Average dissipated energy per volume in the last two cycles for different shear panels

تسلیم پایین (LYP160) و آلومینیومی (Al) در دامنه بسیار وسیعی از نسبت لاغری ($10 \leq \lambda \leq 2200$) با فرض شرایط مرزی ساده مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج برجسته این تحقیق عبارتند از:

- صفحات بسیار لاغر در همان بارهای اولیه دچار کماتش می‌شوند. بنابراین عمده ظرفیت باربری آن‌ها در فاز پس از کماتش و بخش محدودی از ظرفیت آن‌ها نیز پس از وقوع اولین تسلیم تا بیشینه مقاومت اتفاق می‌افتد. گسترش تنش‌ها در این صفحات در طول بارگذاری بسیار محدود است و در بیشینه مقاومت، تنها نواحی محدودی در کنج‌های کششی صفحه به شرایط تسلیم می‌رسد.
- ظرفیت نهایی صفحات لاغر به سه بخش تقسیم می‌شود: ظرفیت الاستیک، ظرفیت پس از کماتش (غیرخطی هندسی) و ظرفیت پس از تسلیم صفحه کماتش کرده (غیرخطی کامل). در نسبت‌های لاغری کوچک‌تر، عمده ظرفیت صفحات لاغر در فاز الاستیک از رفتار تامین می‌شود. در نسبت‌های لاغری بزرگ‌تر، از میزان تاثیرگذاری ظرفیت الاستیک کاسته می‌شود و عمده ظرفیت باربری صفحات توسط رفتار غیرخطی (عمدتاً در فاز غیرخطی هندسی و تا حدی در فاز غیرخطی کامل) تامین می‌شود. گسترش تنش‌ها در این صفحات در طول بارگذاری نسبتاً محدود است و در بیشینه مقاومت، تنها نوار باریکی در راستای قطر کششی تسلیم می‌شود، در حالی که در سایر نواحی سطح تنش‌ها نسبتاً کوچک‌تر (به طور میانگین در حدود نصف تنش تسلیم) است.
- عمده باربری صفحات متوسط در محدوده الاستیک از رفتار اتفاق

نتایج، بهترین قابلیت جذب انرژی به ترتیب برای صفحات با مصالح فولاد کربن‌دار (CS)، فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP160) و آلومینیوم (Al) مشاهده می‌شود. صفحات آلومینیومی، به دلیل مدول الاستیسته کوچک‌تر در مقایسه با فولادها، کمترین قابلیت جذب انرژی را در این محدوده دارا هستند. در بین صفحات فولادی نیز، صفحات فولادی کربن‌دار به دلیل تنش تسلیم بالاتر قابلیت جذب انرژی بالاتری از خود نسبت به فولاد با تنش تسلیم پایین نشان می‌دهند. اگر چه، با افزایش نسبت لاغری، به دلیل کاهش نقش تنش تسلیم و احتمالاً پررنگ‌تر شدن نقش مدول الاستیسته اولیه و ثانویه مصالح، تدریجاً از میزان اختلاف بین جذب انرژی فولاد کربن‌دار و فولاد با تنش تسلیم پایین کاسته می‌شود. در ادامه، در نسبت‌های لاغری بسیار بزرگ (محدوده بسیار لاغر، VS) عملاً جذب انرژی فولاد با تنش تسلیم پایین (احتمالاً به دلیل توسعه نسبتاً بهتر نواحی تسلیم در سطح ورق) به میزان اندکی از فولاد کربن‌دار پیشی می‌گیرد، در حالی که صفحات آلومینیومی در این محدوده نیز به علت مدول الاستیسته کوچک‌تر هم‌چنان حداقل جذب انرژی را دارا هستند.

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش المان محدود، تاثیر جنس و نسبت لاغری صفحات برشی آلومینیومی و فولادی در خصوصیات باربری و جذب انرژی آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. در مطالعات انجام شده، بیش از ۱۱۰ صفحه مربع شکل فولادی (شامل فولاد کربن‌دار (CS) و فولاد با تنش

کربن‌دار (به دلیل مدول الاستیسیته قابل توجه و تنش تسلیم نسبتا بالا)، آلومینیوم (به دلیل تنش تسلیم بسیار بالا، با وجود مدول الاستیسیته کم) و فولاد با تنش تسلیم پایین (به دلیل تنش تسلیم پایین، با وجود مدول الاستیسیته بالا) مشاهده شد.

- در محدوده صفحات لاغر، که رفتار مصالح در طول بارگذاری عمدتا تحت تاثیر پدیده کمانش است، هر دو پارامتر مدول الاستیسیته اولیه و تنش تسلیم در قابلیت جذب انرژی صفحات نقش دارند، لیکن نقش مدول الاستیسیته اولیه مصالح، به ویژه با افزایش نسبت لاغری، برجسته تر می شود. با توجه به نتایج، بالاترین قابلیت جذب انرژی به ترتیب برای فولاد کربن‌دار (به دلیل مدول الاستیسیته اولیه و تنش تسلیم نسبتا بالا)، فولاد با تنش تسلیم پایین (به دلیل مدول الاستیسیته اولیه بالا، با وجود تنش تسلیم نسبتا پایین) و آلومینیوم (به دلیل مدول الاستیسیته اولیه پایین، با وجود تنش تسلیم بالا) مشاهده شد.

- در محدوده صفحات بسیار لاغر نیز، که رفتار مصالح در طول بارگذاری عمدتا تحت تاثیر پدیده کمانش است، صرفا مدول الاستیسیته اولیه و مدول الاستیسیته ثانویه مصالح صفحات نقش دارند. بنابراین در این محدوده، بالاترین قابلیت جذب انرژی به ترتیب برای فولاد با تنش تسلیم پایین (به دلیل مدول الاستیسیته اولیه و ثانویه قابل توجه)، فولاد کربن‌دار (به دلیل مدول الاستیسیته اولیه قابل توجه، با وجود مدول الاستیسیته ثانویه نسبتا کوچک) و آلومینیوم (به دلیل مدول الاستیسیته اولیه و ثانویه نسبتا کوچک) مشاهده شد.

۵- فهرست پارامترها

جدول ۶ پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق را ارائه می دهد.

می افتد. بسته به جنس صفحه و لاغری، معمولا در لحظه وقوع کمانش و یا کمی بعد از آن به بیشینه مقاومت خود می رسند و به فاصله کمی قبل یا پس از رسیدن به بیشینه ظرفیت، اولین تسلیم را تجربه می کنند. به طور کلی در حد نهایی مقاومت، سطح نسبتا گسترده تری از آن ها در امتداد قطر کششی تسلیم می شود.

- بسته به نسبت لاغری، بخش عمده تا تقریبا کل باربری صفحات رده ضخیم در فاز الاستیک از رفتار تامین می شود. پس از وقوع اولین تسلیم، به علت توسعه تنش ها در ناحیه سخت شونده از منحنی رفتار مصالح، ظرفیت پس از تسلیم بسیار محدودی تا حد نهایی ظرفیت شان نشان می دهند. با وقوع کمانش (پلاستیک) به حد نهایی ظرفیت می رسند. توسعه تنش ها در آن ها در طول بارگذاری تقریبا یکنواخت است و در لحظه وقوع اولین تسلیم، تقریبا کل سطح آن ها به طور هم زمان تسلیم می شود. در ناحیه پس از تسلیم، سطح تنش ها از تنش تسلیم فراتر می رود.

- بسته به جنس مصالح و بدون توجه به نسبت لاغری، صفحات بسیار ضخیم بخش مشخص و قابل توجهی از ظرفیت باربری خود را در ناحیه الاستیک از رفتار تامین می کنند و بنابراین، دارای ظرفیت پس از تسلیم محدودی تا بیشینه مقاومت شان هستند. توسعه تنش ها در آن ها شرایط کاملا یکنواختی دارد و با وقوع اولین تسلیم، کل سطح صفحه به طور هم زمان به شرایط تسلیم می رسد. در ناحیه پس از تسلیم نیز سطح تنش ها در کل سطح صفحه تاحدی از تنش تسلیم فراتر می رود.

- در محدوده صفحات بسیار ضخیم، ضخیم و متوسط، که رفتار مصالح در طول باربری عمدتا تحت تاثیر وقوع تسلیم است، تنش تسلیم و مدول الاستیسیته مصالح بیشترین نقش را در قابلیت جذب انرژی صفحات دارند. با توجه به نتایج، بالاترین قابلیت جذب انرژی به ترتیب برای فولاد

جدول ۶. فهرست پارامترها

Table 6. Nomenclature

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

- [12] 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.
- [13] M.M. Alinia, R. Sarraf Shirazi, On the design of stiffeners in steel plate shear walls, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10-11) (2009) 2069-2077.
- [14] Y. Xiao, X.Y. Xue, F.F. Sun, G.Q. Li, Postbuckling shear capacity of high-strength steel plate girders, *Journal of Constructional steel research*, 150 (2018) 475-490.
- [15] H.X. Yuan, X.W. Chen, M. Theofanous, Y.W. Wu, T.Y. Cao, X.X. Du, Shear behaviour and design of diagonally stiffened stainless steel plate girders, *Journal of Constructional Steel Research*, 153 (2019) 588-602.
- [16] T.M. Roberts, S. Sabouri-Ghomi, Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels, *Thin-Walled Structures*, 14(2) (1992) 139-151.
- [17] J.W. Berman, M. Bruneau, Experimental investigation of light-gauge steel plate shear walls, *Journal of Structural Engineering*, 131(2) (2005) 259-267.
- [18] 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.
- [19] S.A.A. Hosseinzadeh, M. Tehranizadeh, The wall-frame interaction effect in steel plate shear wall systems, *Journal of Constructional Steel Research*, 98 (2014) 88-99.
- [20] S.A.A. Hosseinzadeh, M. Tehranizadeh, Behavioral characteristics of code designed steel plate shear wall systems, *Journal of Constructional Steel Research*, 99 (2014) 72-84.
- [21] AASHTO, LRFD bridge design specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 2018.
- [22] 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.
- [23] M.M. Alinia, S.A.A. Hosseinzadeh, H.R. Habashi, [1] 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.
- [2] A. Gheitasi, M.M. Alinia, Slenderness classification of unstiffened metal plates under shear loading, *Thin-Walled Structures*, 48(7) (2010) 508-518.
- [3] M. Aydin Komur, Elasto-plastic buckling analysis for perforated steel plates subject to uniform compression, *Mechanics Research Communications*, 38(2) (2011) 117-122.
- [4] D.C. Rai, B.J. Wallace, Aluminium shear-links for enhanced seismic resistance, *Earthquake engineering structural dynamics*, 27(4) (1998) 315-342.
- [5] D.C. Rai, Inelastic cyclic buckling of aluminum shear panels, *Journal of engineering mechanics*, 128(11) (2002) 1233-1237.
- [6] G. De Matteis, F.M. Mazzolani, S. Panico, Pure aluminium shear panels as dissipative devices in moment-resisting steel frames, *Earthquake engineering structural dynamics*, 36(7) (2007) 841-859.
- [7] S. Jiang, Z. Xiong, X. Guo, Z. He, Buckling behaviour of aluminium alloy columns under fire conditions, *Thin-Walled Structures*, 124 (2018) 523-537.
- [8] Z.X. Wang, Y.Q. Wang, J. Sojeong, Y.W. Ouyang, Experimental investigation and parametric analysis on overall buckling behavior of large-section aluminum alloy columns under axial compression, *Thin-Walled Structures*, 122 (2018) 585-596.
- [9] V.T. Doan, B. Liu, Y. Garbatov, W. Wu, C.G. Soares, Strength assessment of aluminium and steel stiffened panels with openings on longitudinal girders, *Ocean Engineering*, 200 (2020) 107047.
- [10] M. Tuna, C. Topkaya, Panel zone deformation demands in steel moment resisting frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 110 (2015) 65-75.
- [11] M.M. Alinia, A study into optimization of stiffeners in plates subjected to shear loading, *Thin-walled structures*, 43(5) (2005) 845-860.

- engrg, 1998.
- [35] M. Rezaei, C.E. Ventura, H.G.L. Prion, Numerical investigation of thin unstiffened steel plate shear walls, in: Proceedings, 12th world conf. on earthquake engineering, 2000.
- [36] S.J. Chen, C. Jhang, Cyclic behavior of low yield point steel shear walls, *Thin-walled structures*, 44(7) (2006) 730-738.
- [37] G. De Matteis, R. Landolfo, F.M. Mazzolani, Seismic response of MR steel frames with low-yield steel shear panels, *Thin-walled structures*, 25(2) (2003) 155-168.
- [38] G. Brando, F. D'Agostino, G. De Matteis, Experimental tests of a new hysteretic damper made of buckling inhibited shear panels, *Materials structures*, 46(12) (2013) 2121-2133.
- [39] H. Valizadeh, M. Sheidaii, H. Showkati, Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls, *Journal of Constructional Steel Research*, 70 (2012) 308-316.
- [40] M.H. Taheri, P. Memarzadeh, Experimental and numerical study of compressive buckling stability of plates with off-center crack, *Theoretical Applied Fracture Mechanics*, 109 (2020) 102706.
- [41] J.W. Hutchinson, *Plastic buckling*, Vol. 14 Academic Press Inc., 1974.
- [42] G. Gerard, Critical shear stress of plates above the proportional limit, *Journal of Applied Mechanics*, (1948).
- [43] P.P. Bijlaard, Theory and tests on the plastic stability of plates and shells, *Journal of the Aeronautical Sciences*, 16(9) (1949) 529-541.
- [44] E.Z. Stowell, A unified theory of plastic buckling of columns and plates, *NACA Technical note 1556*, (1948).
- [45] E.Z. Stowell, Critical shear stress of an infinitely long plate in the plastic region, *NACA Tech. note 1681*, (1948).
- [46] T. Inoue, Analysis of plastic buckling of rectangular steel plates supported along their four edges, *International journal of solids structures*, 31(2) (1994) 219-230.
- [47] T. Inoue, Analysis of plastic buckling of steel plates in Numerical modelling for buckling analysis of cracked shear panels, *Thin-Walled Structures*, 45(12) (2007) 1058-1067.
- [24] M.M. Alinia, A. Gheitasi, M. Shakiba, Postbuckling and ultimate state of stresses in steel plate girders, *Thin-walled structures*, 49(4) (2011) 455-464.
- [25] R.A. Soares, L. Palermo, L.C. Wrobel, Application of the radial integration method for the buckling analysis of plates with shear deformation, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 118 (2020) 250-264.
- [26] M.M. Alinia, M. Dastfan, Behaviour of thin steel plate shear walls regarding frame members, *Journal of constructional steel research*, 62(7) (2006) 730-738.
- [27] M.M. Alinia, H.R. Habashi, A. Khorram, Nonlinearity in the postbuckling behaviour of thin steel shear panels, *Thin-walled structures*, 47(4) (2009) 412-420.
- [28] M.M. Alinia, M. Shakiba, H.R. Habashi, Shear failure characteristics of steel plate girders, *Thin-Walled Structures*, 47(12) (2009) 1498-1506.
- [29] J.K. Paik, Ultimate strength of perforated steel plates under edge shear loading, *Thin-Walled Structures*, 45(3) (2007) 301-306.
- [30] C. Pellegrino, E. Maiorana, C. Modena, Linear and non-linear behaviour of steel plates with circular and rectangular holes under shear loading, *Thin-Walled Structures*, 47(6-7) (2009) 607-616.
- [31] 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) 422-431.
- [32] 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.
- [33] H.R. Habashi, M.M. Alinia, Characteristics of the wall-frame interaction in steel plate shear walls, *Journal of Constructional Steel Research*, 66(2) (2010) 150-158.
- [34] M. Rezaei, C.E. Ventura, H.G.L. Prion, A. Lubbell, Unstiffened steel plate shear walls: Shake table testing, in: Proceedings, sixth US national conf. on earthquake

- [50] Z. Aliarab, S.A.A. Hosseinzadeh, Behavioral characteristics of steel shear panels with different materials and slenderness ratios, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(4) (2021) 24-24.
- [51] Abaqus, analysis user's manual, version 6.16, Hibbitt, Karlsson, Sorenson, Inc., (HKS), 2016.
- [52] S.J. Chen, C.C. Chang, Experimental study of low yield point steel gusset plate connections, *Thin-walled structures*, 57 (2012) 62-69.
- shear based on the Tresca yield criterion, *International journal of solids structures*, 33(26) (1996) 3903-3923.
- [48] P. Tuğcu, Effect of axial loading on plastic buckling of long strips under pure shear, *Computers structures*, 66(2-3) (1998) 155-161.
- [49] C. Zhang, H. Wu, T. Zhu, X. Lin, J. Zhao, Q. Wang, Accurate prediction of shear buckling capacity of low-yield-strength steel considering plastic deformations, *Journal of Constructional Steel Research*, 172 (2020) 106183.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Aliarab, S.A.A Hosseinzadeh, *Effect of buckling and yielding phenomena on the behavior of steel and aluminum shear panels*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(3) (2022) 981-1004.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19178.7092](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19178.7092)

