



http://journaliss.ir

منحنی بار-خیز ورق دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید در لبه‌ها و ارائه یک رابطه کاربردی برای برآورد مقدار خیز ماکزیمم حد الاستیک ورق

سید ابراهیم سادات خلدردی^{۱*}

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی تربت جام، تربت جام، ایران

*تربت جام، صندوق پستی ۹۵۷۱۸۴۹۶۴۹، s.e.sadatkholerdi@tjamcaas.ac.ir

چکیده

ورق‌های نازک در دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید در لبه‌ها (SSSW) در بارهای جانبی کوچک، کمانش کرده و این کمانش منجر به خیز (تغییر شکل خارج از صفحه) در ورق می‌شود. شروع کمانش ورق در بارهای جانبی کوچک باعث می‌شود تا ورق دیوار در ناحیه وسیعی دارای رفتار پس‌کمانشی الاستیک باشد. برای مهندسان سازه و معماری، آگاهی از مقدار خیز ورق در بارهای مختلف، بسیار حائز اهمیت است؛ لذا بررسی تغییرات بار جانبی نسبت به خیز نظیر آن در ناحیه پس از کمانش الاستیک، دارای اهمیت به‌سزایی است. در تحقیقات گذشته، دستگاه معادلات فن‌کارمن برای به‌دست‌آوردن میدان تغییر مکان ورق دیوار در ناحیه پس‌کمانشی الاستیک با استفاده از روش گالرکین حل شده و با استفاده از ظرفیت برشی نهایی، منحنی دوخطی ایده‌آل بار جانبی-تغییر مکان افقی دیوار، تقریب زده شده و یک رابطه برای سختی الاستیک این دیوارها ارائه شده است. در این مقاله با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از حل دستگاه معادلات فن‌کارمن برای دیوارهای مختلف (تغییرات در عرض، ارتفاع، ضخامت ورق دیوار و تغییرات در ستون فرعی کنار دیوار)، خیز ورق دیوار در ناحیه الاستیک محاسبه شده و منحنی نیروی برشی-خیز در این ناحیه رسم شده است. همچنین یک رابطه کاربردی برای برآورد مقدار خیز ماکزیمم حد الاستیک ورق دیوار (خیز ماکزیمم متناظر با اولین نقطه از تسلیم ورق دیوار)، با استفاده از یادگیری ماشین و به‌کارگیری تکنیک رگرسیون خطی، ارائه شده است.

واژگان کلیدی

دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید (SSSW)، پس‌کمانشی الاستیک، خیز ورق، معادلات فن‌کارمن، یادگیری ماشین

Load-Deflection Curve of Semi-Supported Steel Shear Wall, and Presentation of a Practical Relationship for Estimating the Maximum Elastic Deflection of the Plate

S.E. Sadat kholerdi

Abstract

Thin plates in semi-supported steel shear walls (SSSW) buckle under small lateral loads, and this buckling leads to deflection (out-of-plane displacement) in the plate. The onset of buckling at small lateral loads causes the wall plate to exhibit elastic post-buckling behavior over a wide range. For structural and architectural engineers, knowing the amount of plate deflection under different loads is crucial. Therefore, investigating the variation of lateral load with respect to the corresponding deflection in the elastic post-buckling region is of significant importance. In previous research, the von Kármán plate equations have been solved using the Galerkin method to obtain the displacement field of the wall plate in the elastic post-buckling region. Utilizing the ultimate shear capacity, a bilinear idealization of the lateral load-horizontal displacement curve of the wall has been approximated, and a relationship for the elastic stiffness of these walls has been presented. In this paper, using the results obtained from solving the von Kármán equations for different walls (variations in width, height, plate thickness, and changes in the secondary column), the deflection of the wall plate in the elastic region is obtained, and the load-deflection curve in this region is plotted. Furthermore, a practical relationship is presented for estimating the maximum elastic deflection of the wall plate (the maximum deflection corresponding to the first yield point of the wall plate), using machine learning and applying linear regression techniques.

Keywords

Semi-Supported Steel Shear Wall, Elastic Post-Buckling, Plate Deflection, Von-Karman Equation, Machine Learning



دیوارهای برشی فولادی به‌عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در نظر گرفته می‌شوند که از اوایل سال ۱۹۷۰، معرفی و در برخی از ساختمان‌ها استفاده شده‌اند [۱]. در چند دهه اخیر، ویژگی‌های سازه‌ای این سیستم از قبیل سختی، شکل‌پذیری و جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفته است [۲-۲۸]. مشکل اصلی در دیوارهای برشی فولادی، تنش‌های بزرگ ناشی از میدان کشش بر ستون‌های متصل به ورق دیوار می‌باشد که این امر باعث می‌شود تا از مقاطع بزرگی برای این ستون‌ها استفاده شود که از نظر اقتصادی به‌صرفه نیست. محققین برای از بین بردن این تنش‌ها، فرض کردند که ورق دیوار فقط به تیرهای طبقات متصل شود [۲۹-۳۰]. در دو دهه قبل، محققین از ایده جداسازی ستون با ورق دیوار استفاده کردند و سیستمی با نام دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید را پیشنهاد دادند که در این سیستم، ورق دیوار متصل به ستون‌های فرعی است و بارهای ثقلی را تحمل نمی‌کند و فقط به گسترش تنش‌های ناشی از میدان کششی در ورق دیوار کمک می‌کنند [۳۱].

در ادامه، جهانپور و همکاران ظرفیت برشی نهایی دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید را با استفاده از یک روش تحلیلی به‌دست آوردند [۳۲-۳۴] و سادات خلردی و جهانپور رفتار این سیستم را از ابتدای بارگذاری تا اولین نقطه از تسلیم ورق دیوار بررسی کردند و منحنی بار-تغییر مکان این سیستم را رسم و یک رابطه کاربردی برای سختی الاستیک این دیوار ارائه نمودند [۳۵-۳۷]. علاوه بر آن، چند مطالعه آزمایشگاهی [۳۸-۴۰]، اجزای محدودی [۴۱-۵۳] و تحلیلی [۵۴-۵۵] برای بررسی رفتار این سیستم صورت گرفته است.

کمانش برشی الاستیک ورق دیوار در درصدهای کوچکی از بار برشی تسلیم دیوار اتفاق می‌افتد و ناحیه پس‌کمانشی الاستیک وسیعی در این سیستم شکل می‌گیرد [۳۶]. در این ناحیه، ورق دیوار دارای رفتار غیرخطی هندسی با مصالح الاستیک خطی است. با استفاده از معادلات ورق فن‌کارمن^۱ و حل آن و همچنین استفاده از معیار فن‌میسز^۲ می‌توان نیروی برشی حد تسلیم ورق دیوار را به‌دست آورد و در نهایت خیز متناظر با نیروی برشی حد تسلیم ورق نیز به‌دست می‌آید. معادلات فن‌کارمن با دو رابطه دیفرانسیل غیرخطی مرتبه چهارم همبسته بیان می‌شوند [۵۶].

روش‌های مختلفی برای حل معادلات فن‌کارمن و رفتار پس‌کمانشی ورق‌ها ارائه شده‌اند که می‌توان به روش اغتشاشات^۳ [۵۷-۶۱]، روش گالرکین^۴ [۶۲-۶۵]، روش انرژی [۶۶] و روش مدل دو نواری [۶۷] اشاره کرد. در مرجع [۲۷]، روش گالرکین به‌صورت یک روش نیمه‌تحلیلی به‌منظور حل معادلات فن‌کارمن برای ورق دیوار سیستم دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید در یک طبقه میانی به‌کار گرفته شده است. این حل منجر به‌دست‌آوردن مجهولات معادلات فن‌کارمن (تابع خیز و تنش ایری) در سطوح مختلف بارگذاری در ناحیه پس‌کمانش الاستیک ورق دیوار می‌شود که با به‌دست‌آمدن این مجهولات و استفاده از معیار فن‌میسز، تنش برشی متناظر با اولین نقطه از تسلیم ورق به‌دست می‌آید. ورق دیوار به‌عنوان یک صفحه نازک فرض می‌شود که لبه‌های موازی آن دارای شرایط مرزی متفاوت هستند؛ در محل اتصال دیوار به تیرهای طبقات، تکیه‌گاه ساده و در محل اتصال دیوار به ستون‌های فرعی، لبه آزاد سخت‌شده فرض شده است.

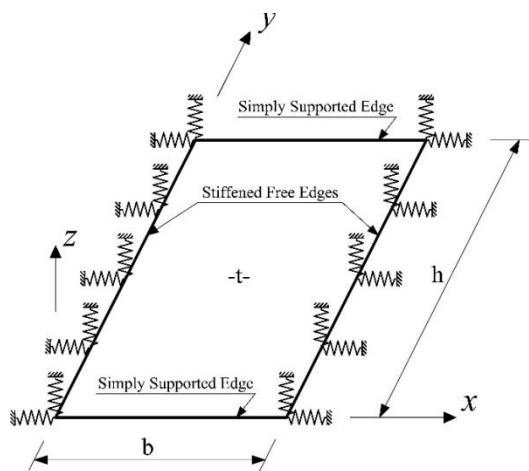
با وجود این مطالعات، تاکنون منحنی بار-خیز دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید در لبه‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. برای مهندسان سازه و معماری، آگاهی از مقدار خیز ورق در بارهای مختلف، بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، روش گالرکین برای حل معادلات فن‌کارمن برای ورق دیوار سیستم دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید در یک طبقه میانی به‌کار گرفته شده است که با حل این معادله، مجهولات که شامل تابع خیز و تابع تنش ایری هستند به‌دست می‌آیند. یک تابع سینوسی با یک مجهول به‌عنوان تابع تغییرشکل که شرایط مرزی را ارضا می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. سپس، یک روش تحلیلی برای تعیین خیز ورق، توسعه داده می‌شود. نتایج عددی با مدل عددی مقایسه می‌شود. همچنین یک رابطه کاربردی برای برآورد خیز ماکزیمم حد الاستیک ورق دیوار با استفاده از یادگیری ماشین و به‌کارگیری تکنیک رگرسیون خطی، ارائه شده است.

۲- مدل سازه‌ای

شکل (۱) شمای کلی از سیستم دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید و شکل (۲) یک طبقه میانی از دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید را نشان می‌دهد. فرض شده است که تیرهای بالایی و پایینی طبقات به‌صورت کاملاً صلب هستند و اتصال مفصلی بین آن‌ها و ستون‌های اصلی وجود دارد. بنابراین در شکل (۲) انتهای تیرهای طبقات با تکیه‌گاه مفصلی نشان داده شده‌اند. نیروهای جانبی

³ Perturbation
⁴ Galerkin

¹ von Karman
² von Mises



شکل ۴- مدل سازه‌ای ورق دیوار

۳- تعیین خیز ورق (جابجایی خارج از صفحه)

در این بخش، با استفاده از روش تحلیلی، خیز ورق به دست می‌آید. هنگامی که بارهای جانبی بر سیستم دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید در ناحیه پس‌کمانشی اعمال می‌شود، خیز ورق دیوار (جابجایی خارج از صفحه) به وجود می‌آید. خیز ورق در راستای z ، $w=w(x, y)$ است که در شکل (۴) نشان داده شده است.

روابط (۱) و (۲)، معادلات فن کارمن را نشان می‌دهند که تابع تغییر مکان خارج از صفحه (w) و تابع تنش ایری (F)، توابع مجهول هستند.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \frac{t}{D} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = E \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ سختی خمشی، (E) و (ν) به ترتیب مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فولاد هستند. بر اساس دستگاه مختصات تعریف شده در شکل (۴)، شرایط مرزی هندسی ورق دیوار به صورت روابط (۳) الی (۵) بیان می‌شود.

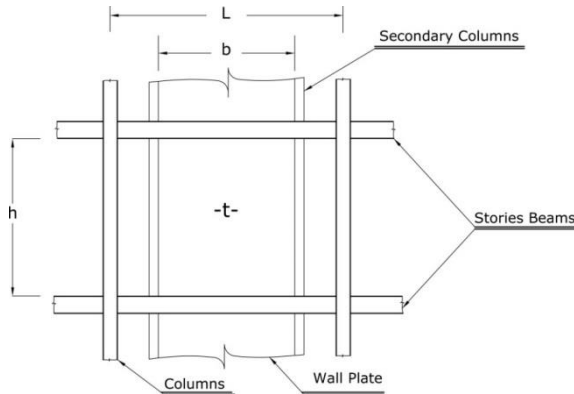
$$y = 0, h \Rightarrow \begin{cases} w = 0 \\ M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$x = 0 \Rightarrow \begin{cases} M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0 \\ V_x - \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] = k_s w(0, y) \end{cases} \quad (4)$$

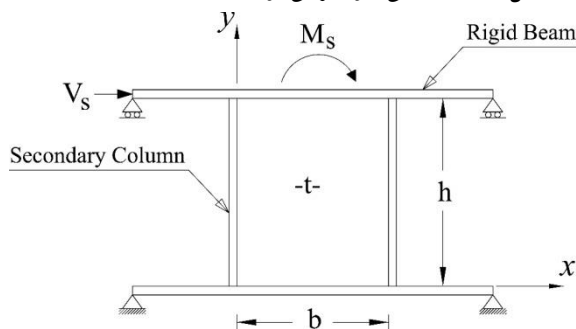
$$x = b \Rightarrow \begin{cases} M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0 \\ V_x - \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] = k_s w(b, y) \end{cases} \quad (5)$$

طبقات بالاتر، نیروی برشی طبقه (V_s) و لنگر واژگونی (M_s) را ایجاد می‌کنند. عرض، ارتفاع و ضخامت ورق دیوار به ترتیب (b) ، (h) و (t) هستند. M_s و V_s به ترتیب تنش‌های برشی (τ_{xy}) و تنش‌های خمشی (σ_y) بر روی لبه‌های بالایی و پایینی ورق دیوار ایجاد می‌کنند که در شکل (۳) نشان داده شده است.

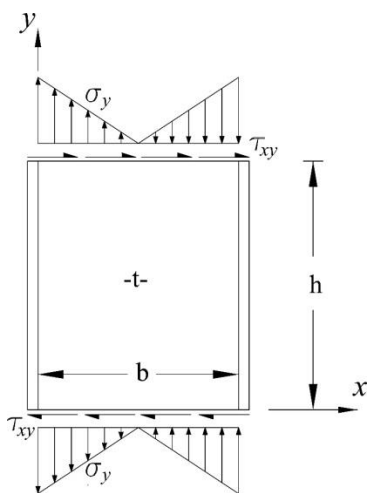
شکل (۴) ورق دیوار را با شرایط مرزی آن نشان می‌دهد. ستون‌های فرعی به صورت فنرهای خطی گسترده در دو جهت عمودی (x و z) فرض شده‌اند. سختی محوری فنرها متناظر با ممان اینرسی ستون‌های فرعی (I_{xx} و I_{zz}) است.



شکل ۱- شمای کلی دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید در لبه‌ها [۳۲]



شکل ۲- یک طبقه میانی تحت بارهای جانبی



شکل ۳- تنش‌های برشی و خمشی اعمال شده بر لبه‌های ورق دیوار

$$M_{y,in} = M_s + V_s(h - y) \quad (12)$$

$$I_s = \frac{tb^3}{12} + 2 \left[I_{zz} + A_c \left(\frac{b}{2} \right)^2 \right] \quad (13)$$

در رابطه (12)، $(M_{y,in})$ لنگر خمشی درون صفحه‌ای است که تنش‌های کششی و فشاری در راستای y ایجاد می‌کند. در رابطه (13)، (I_s) ممان اینرسی کل مقطع SSSW، (I_{zz}) ممان اینرسی ستون فرعی حول محور z و (A_c) مساحت مقطع عرضی ستون فرعی است. رابطه (10) برای پیدا کردن حل همگن معادله (2) به کار می‌رود که به صورت رابطه (14) بیان شده است. این حل، تابع تنش ایری (F_h) را قبل از کمانش ورق توصیف می‌کند.

$$F_h = -\tau xy - \frac{M_s + V_s(h - y)}{12 I_s} x^2(2x - 3b) \quad (14)$$

برای پیدا کردن حل خصوصی رابطه (2) که با (F_p) نشان داده می‌شود، رابطه (9) در سمت راست رابطه (2) جای‌گذاری می‌شود.

$$\nabla^4 F_p = \frac{1}{b^2 h^2} A^2 E \pi^4 (P_1^2 - P_2 P_3) \quad (15)$$

در رابطه (15):

$$P_1 = \left[m \sin \frac{\pi x}{b} \cos \left(\frac{m \pi x}{b} - \frac{m \pi \alpha y}{h} \right) + \cos \frac{\pi x}{b} \sin \left(\frac{m \pi x}{b} - \frac{m \pi \alpha y}{h} \right) \right] \cos \frac{\pi y}{h} \quad (16)$$

$$+ \left[m \sin \frac{\pi x}{b} \sin \left(\frac{m \pi x}{b} - \frac{m \pi \alpha y}{h} \right) - \cos \frac{\pi x}{b} \cos \left(\frac{m \pi x}{b} - \frac{m \pi \alpha y}{h} \right) \right] m \alpha \sin \frac{\pi y}{h}$$

$$P_2 = \left[2m \cos \frac{\pi x}{b} \cos \left(\frac{m \pi x}{b} - \frac{m \pi \alpha y}{h} \right) - (1 + m^2) \sin \frac{\pi x}{b} \sin \left(\frac{m \pi x}{b} - \frac{m \pi \alpha y}{h} \right) \right] \sin \frac{\pi y}{h} \quad (17)$$

$$P_3 = \left[2m \alpha \cos \frac{\pi y}{h} \cos \left(\frac{m \pi x}{b} - \frac{m \pi \alpha y}{h} \right) + (1 + m^2 \alpha^2) \sin \frac{\pi y}{h} \sin \left(\frac{m \pi x}{b} - \frac{m \pi \alpha y}{h} \right) \right] \sin \frac{\pi x}{b} \quad (18)$$

سمت راست رابطه (15) برای پیدا کردن شکل کلی حل

خصوصی تابع تنش ایری (F_p) به کار می‌رود.

$$F_p = A^2 E \left\{ \begin{aligned} & f_1 \cos \frac{2\pi x}{b} + f_2 \cos \frac{2\pi y}{h} + f_3 \cos \left(\frac{2\pi x}{b} - \frac{2\pi y}{h} \right) \\ & + f_4 \cos \left(\frac{2\pi x}{b} + \frac{2\pi y}{h} \right) + f_5 \cos \left(\frac{2\pi m x}{b} - \frac{2\pi m \alpha y}{h} \right) + \\ & f_6 \cos \left[\frac{2\pi(1-m)x}{b} + \frac{2\pi m \alpha y}{h} \right] + \\ & f_7 \cos \left[\frac{2\pi m x}{b} - \frac{2\pi(1+\alpha m)y}{h} \right] + \\ & f_8 \cos \left[\frac{2\pi(1+m)x}{b} - \frac{2\pi m \alpha y}{h} \right] + \\ & f_9 \cos \left[\frac{2\pi m x}{b} + \frac{2\pi(1-\alpha m)y}{h} \right] \end{aligned} \right. \quad (19)$$

که ضرایب بی‌بعد و مجهول $(f_1$ تا $f_9)$ با جای‌گذاری رابطه

(19) در رابطه (15) به دست می‌آیند. حاصل آن با روابط (20) الی

(28) بیان می‌شود.

$$f_1 = \frac{m^2 \alpha^2 + 1}{64 r^2} \quad (20)$$

$$f_2 = \frac{r^2 (m^2 + 1)}{64} \quad (21)$$

$$f_3 = -\frac{r^2 m^2}{128} \left(\frac{\alpha - 1}{r^2 + 1} \right)^2 \quad (22)$$

در روابط (4) و (5)، (k_s) سختی فنرهای عمود بر صفحه در شکل (4) است که به صورت زیر بیان می‌شود.

$$k_s = \begin{cases} \frac{48 E I_{xx}}{y^3} & ; y < \frac{h}{2} \\ \frac{48 E I_{xx}}{(h-y)^3} & ; y \geq \frac{h}{2} \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه (6)، (I_{xx}) ممان اینرسی مقطع ستون فرعی حول محور x است. با توجه به روش نیمه‌تحلیلی گالرکین، برای تابع تغییر شکل از توابع سینوسی رابطه (7) استفاده شده است.

$$w(x, y) = A \left[\sin \frac{\pi x}{b} \sin \left(\frac{m \pi x}{b} - \frac{m \pi \alpha y}{h} \right) + \beta \right] \sin \frac{\pi y}{h} \quad (7)$$

که (A) پارامتر مجهول است؛ $(m \geq 3)$ تعداد نیم‌موج‌ها در راستای میدان کشش که برای کمانش متقارن ورق دیوار به صورت اعداد فرد در نظر گرفته شده و (α) مقدار ثابت برای تنظیم زاویه میدان کشش است. می‌توان نشان داد که قبل از تسلیم ورق دیوار، $\beta = \beta(y)$ جواب‌های قابل قبولی به دست می‌دهد. همچنین، $\beta = \beta(y)$ برای نشان دادن تغییر مکان خارج از صفحه ستون‌های فرعی استفاده شده است. تابع تغییر شکل پیشنهاد شده، رابطه (3) و قسمت اول روابط (4) و (5) را ارضا می‌کند. با توجه به رابطه (7) و با استفاده از بخش دوم رابطه (4) (یا رابطه (5))، β تعیین می‌شود:

$$\beta(y) = \frac{D \pi^3}{k_s b h^2} [r^2 (1 + 3m^2) + 2 - \nu] \sin \frac{m \alpha \pi y}{h} \quad (8)$$

که $(r = h/b)$ نسبت ورق دیوار است. در تحقیق قبلی نشان داده شده است که برای دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید معمول، β مقدار قابل اغمازی نسبت به دیگر پارامترها در رابطه (7) دارد و به همین دلیل از آن صرف‌نظر می‌شود [35 و 36]. به عبارتی دیگر، ستون‌های فرعی، تغییر مکان خارج از صفحه قابل توجهی قبل از اولین نقطه از تسلیم ورق ندارند. سرانجام رابطه (7) اصلاح شده و به صورت رابطه (9) بیان می‌شود. بدین ترتیب می‌توان ورق دیوار را به صورت چهار لبه ساده در نظر گرفت.

$$w(x, y) = A \sin \frac{\pi x}{b} \sin \frac{\pi y}{h} \sin \left(\frac{m \pi x}{b} - \frac{m \pi \alpha y}{h} \right) \quad (9)$$

با توجه به شکل (3)، رابطه (10) شرایط مرزی نیروی ورق دیوار را بیان می‌کند. در این رابطه، تنش‌های کششی با علامت مثبت در نظر گرفته شده‌اند.

$$y = 0, h \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -\tau \\ \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = -\frac{M_{y,in}}{I_s} \left(x - \frac{b}{2} \right) \end{cases} \quad (10)$$

در رابطه (10):

$$\tau = \frac{V_s}{b t} \quad (11)$$

$$G_7 = -4\pi^2 \left\{ \begin{aligned} & f_1 \cos \frac{2\pi x}{b} + f_3 \cos \left(\frac{2\pi x}{b} - \frac{2\pi y}{h} \right) \\ & + f_4 \cos \left(\frac{2\pi x}{b} + \frac{2\pi y}{h} \right) + m^2 f_5 \cos \left(\frac{2m\pi x}{b} - \frac{2m\pi y}{h} \right) \\ & + (1-m)^2 f_6 \cos \left[\frac{2\pi(1-m)x}{b} + \frac{2m\pi y}{h} \right] \\ & + m^2 f_7 \cos \left[\frac{2m\pi x}{b} - \frac{2\pi(1+m)y}{h} \right] \\ & + (1+m)^2 f_8 \cos \left[\frac{2\pi(1+m)x}{b} - \frac{2m\pi y}{h} \right] \\ & + m^2 f_9 \cos \left[\frac{2m\pi x}{b} + \frac{2\pi(1-m)y}{h} \right] \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

$$G_8 = \left\{ \begin{aligned} & m\pi \sin \frac{\pi x}{b} \cos \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) \\ & + \cos \frac{\pi x}{b} \sin \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) \end{aligned} \right\} \cos \frac{\pi y}{h} \quad (39)$$

$$+ m\alpha \left\{ \begin{aligned} & m \sin \frac{\pi x}{b} \sin \left[\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right] \\ & - \cos \frac{\pi x}{b} \cos \left[\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right] \end{aligned} \right\} \sin \frac{\pi y}{h}$$

$$G_9 = \frac{V_s x(x-b)}{2EI_s} - \frac{\tau}{E} \quad (40)$$

$$G_{10} = 4\pi^2 \left\{ \begin{aligned} & f_3 \cos \left(\frac{2\pi x}{b} - \frac{2\pi y}{h} \right) - f_4 \cos \left(\frac{2\pi x}{b} + \frac{2\pi y}{h} \right) \\ & + m^2 \alpha f_5 \cos \left(\frac{2m\pi x}{b} - \frac{2m\pi y}{h} \right) \\ & - m\alpha(1-m)f_6 \cos \left[\frac{2\pi(1-m)x}{b} + \frac{2m\pi y}{h} \right] \\ & + m(1+m)f_7 \cos \left[\frac{2m\pi x}{b} - \frac{2\pi(1+m)y}{h} \right] \\ & + m\alpha(1+m)f_8 \cos \left[\frac{2\pi(1+m)x}{b} - \frac{2m\pi y}{h} \right] \\ & - m(1-m)f_9 \cos \left[\frac{2m\pi x}{b} + \frac{2\pi(1-m)y}{h} \right] \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

سرانجام، رابطه (۳۰)، تبدیل به یک معادله مرتبه سوم نسبت

به پارامتر مجهول A می‌شود (معادله (۴۲)):

$$(S_1 + S_2 + S_3)A + (S_4 + S_5 + S_6)A^3 = 0 \quad (42)$$

در معادله (۴۲):

$$S_1 = \frac{\pi^2}{12(1-v^2)} \left(\frac{t}{h} \right)^2 \int_0^h \int_0^b (G_1 + G_2) \bar{w} dx dy \quad (43)$$

$$S_2 = \int_0^h \int_0^b G_5 G_6 \bar{w} dx dy \quad (44)$$

$$S_3 = 2r^2 \int_0^h \int_0^b G_8 G_9 \bar{w} dx dy \quad (45)$$

$$S_4 = \frac{4\pi^2}{b^2} \int_0^h \int_0^b G_3 G_4 \bar{w} dx dy \quad (46)$$

$$S_5 = \frac{1}{b^2} \int_0^h \int_0^b G_5 G_7 \bar{w} dx dy \quad (47)$$

$$S_6 = \frac{2r}{b^2} \int_0^h \int_0^b G_8 G_{10} \bar{w} dx dy \quad (48)$$

حل غیربندیی رابطه (۴۲) دو ریشه یکسان با علامت‌های

مختلف (رابطه (۴۹)) ارائه می‌دهد که مقدار مثبت آن در رابطه

(۹) به کار گرفته می‌شود. سپس، خیز خارج از صفحه ورق و تابع

تنش ایری در هر نقطه به دست می‌آید.

$$A = \pm \sqrt{-\frac{S_1 + S_2 + S_3}{S_4 + S_5 + S_6}} \quad (49)$$

$$f_4 = -\frac{r^2 m^2 (\alpha + 1)^2}{128 (r^2 + 1)} \quad (23)$$

$$f_5 = \frac{r^2 (1 + \alpha^2)}{64 m^2 (r^2 + \alpha^2)^2} \quad (24)$$

$$f_6 = -\frac{r^2}{128} \left[\frac{m-1}{(m-1)^2 r^2 + m^2 \alpha^2} \right]^2 \quad (25)$$

$$f_7 = -\frac{r^2}{128} \left[\frac{m\alpha + 1}{m^2 r^2 + (m\alpha + 1)^2} \right]^2 \quad (26)$$

$$f_8 = -\frac{r^2}{128} \left[\frac{m+1}{(m+1)^2 r^2 + m^2 \alpha^2} \right]^2 \quad (27)$$

$$f_9 = -\frac{r^2}{128} \left[\frac{m\alpha - 1}{m^2 r^2 + (m\alpha - 1)^2} \right]^2 \quad (28)$$

در نهایت، تابع تنش ایری (F) به دست می‌آید:

$$F = F_h + F_p \quad (29)$$

روش گالرکین برای رابطه (۱) به کار برده می‌شود تا ضریب

مجهول A به دست آید:

$$\frac{\pi^2 E t}{h^2} \int_0^h \int_0^b \left\{ \begin{aligned} & A \left[\frac{\pi^2}{12(1-v^2)} \left(\frac{t}{h} \right)^2 (G_1 + G_2) + G_5 G_6 + 2r^2 G_8 G_9 \right] \\ & + \frac{A^3}{b^2} (4\pi^2 G_3 G_4 + G_5 G_7 + 2r G_8 G_{10}) \end{aligned} \right\} \bar{w} dx dy = 0 \quad (30)$$

در رابطه (۳۰):

$$\bar{w} = \sin \frac{\pi x}{b} \sin \frac{\pi y}{h} \sin \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) \quad (31)$$

$$G_1 = 4m\alpha \left\{ \begin{aligned} & [1 + r^2 + m^2(r^2 + \alpha^2)] \sin \frac{\pi x}{b} \cos \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) \\ & + 2r^2 m \cos \frac{\pi x}{b} \sin \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) \end{aligned} \right\} \cos \frac{\pi y}{h} \quad (32)$$

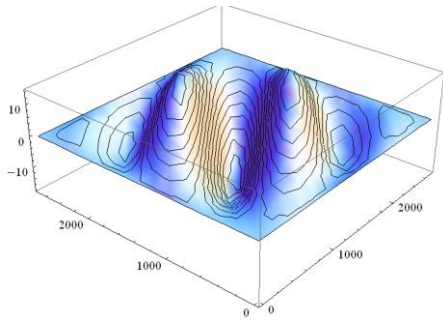
$$G_2 = \left\{ \begin{aligned} & -4r^2 m [1 + r^2 + m^2(r^2 + \alpha^2)] \\ & \cos \frac{\pi x}{b} \cos \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) \\ & + \left[r^4 (1 + 6m^2 + m^4) + 2r^2 (1 + m^2) (1 + m^2 \alpha^2) \right] \\ & + (1 + 6m^2 \alpha^2 + m^4 \alpha^4) \end{aligned} \right\} \sin \frac{\pi x}{b} \sin \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) \quad (33)$$

$$G_3 = \left\{ \begin{aligned} & 2m \cos \frac{\pi x}{b} \cos \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) \\ & - (1 + m^2) \sin \frac{\pi x}{b} \sin \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) \end{aligned} \right\} \sin \frac{\pi y}{h} \quad (34)$$

$$G_4 = f_2 \cos \frac{2\pi y}{h} + f_3 \cos \left(\frac{2\pi x}{b} - \frac{2\pi y}{h} \right) + f_4 \cos \left(\frac{2\pi x}{b} + \frac{2\pi y}{h} \right) + m^2 \alpha^2 f_5 \cos \left(\frac{2m\pi x}{b} - \frac{2m\pi y}{h} \right) + m^2 \alpha^2 f_6 \cos \left[\frac{2(1-m)\pi x}{b} + \frac{2m\pi y}{h} \right] + f_7 \cos \left[\frac{2m\pi x}{b} - \frac{2(1+m)\pi y}{h} \right] + m^2 \alpha^2 f_8 \cos \left[\frac{2(1+m)\pi x}{b} - \frac{2m\pi y}{h} \right] + (1-2m\alpha)^2 f_9 \cos \left[\frac{2m\pi x}{b} + \frac{2(1-m)\pi y}{h} \right] \quad (35)$$

$$G_5 = 2m\alpha \cos \frac{\pi y}{h} \sin \frac{\pi x}{b} \cos \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) + (1 + m^2 \alpha^2) \sin \frac{\pi x}{b} \sin \frac{\pi y}{h} \sin \left(\frac{m\pi x}{b} - \frac{m\pi y}{h} \right) \quad (36)$$

$$G_6 = \frac{b-2x}{2EI_s} [M_s + V_s(h-y)] \quad (37)$$



شکل ۶- شکل تغییر یافته ورق دیوار طبق رابطه (۹) و روش تحلیلی

جدول (۱) مقایسه بین نتایج روش تحلیلی و اجزای محدود را نشان می‌دهد. این نتایج شامل بار برشی حد تسلیم و خیز مرکز ورق دیوار (خیز ماکزیمم حد الاستیک) زمانی که سیستم تحت بار برشی حادی تسلیم است را نشان می‌دهد. مقایسه‌های انجام شده، بیانگر سازگاری مناسب بین دو روش است.

۶- مثال‌ها

روش حل ارائه شده برای چندین مثال با خواص هندسی مختلف طبق جدول (۲) به کار گرفته شده است. همه مدل‌ها دارای مصالح با مدول یانگ ۲۰۰ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال هستند. مقاطع ستون‌های فرعی به صورت مقاطع ناودانی دابل (2UNP) در نظر گرفته شده‌اند. ستون‌های فرعی استفاده شده دارای کوچک‌ترین مقطع برای دیوار هستند، طوری که کمناش خارج از صفحه برای SSSW تا وقتی که به ظرفیت برشی نهایی خود برسد، اتفاق نمی‌افتد [۳۴]. در این مدل‌ها سعی شده است تا تأثیر تغییرات ضخامت، عرض و ارتفاع ورق دیوار و تغییرات ستون فرعی کنار دیوار بر خیز ورق دیوار (جابه‌جایی خارج از صفحه) و نیروی برشی متناظر با آن در ناحیه پس‌کمانشی الاستیک مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲) می‌توان گفت:

۱- با افزایش ضخامت ورق (برای مثال، مدل‌های ۱ الی ۴)، به دلیل جلوگیری از کمانش ستون‌های فرعی، مقاطع آن‌ها نیز تغییر می‌کند و بر اساس آن با افزایش ضخامت ورق، مقدار نیروی برشی متناظر با اولین نقطه از تسلیم ورق، افزایش پیدا می‌کند و خیز ماکزیمم متناظر با آن کاهش می‌یابد.

۲- با افزایش مقطع ستون‌های فرعی (برای مثال، مدل‌های ۲۵ الی ۲۹)، نیروی برشی و همچنین خیز ماکزیمم متناظر آن نیز افزایش پیدا می‌کند.

۳- با افزایش عرض ورق دیوار (برای مثال مدل‌های ۵۵ الی ۶۰)، نیروی برشی و همچنین خیز ماکزیمم متناظر آن نیز افزایش پیدا می‌کند.
 ۴- با افزایش ارتفاع ورق دیوار (برای مثال، مدل‌های ۱۵، ۹۳ و ۱۱۷)، نیروی برشی کاهش ولی خیز ماکزیمم متناظر آن افزایش می‌یابد.
 شکل (۷) نمودار بار برشی-خیز را در ناحیه پس‌کمانشی الاستیک نشان می‌دهد.

۴- بار برشی در اولین نقطه از تسلیم ورق

از آنجا که روش تحلیلی ارائه شده برای ناحیه پس‌کمانشی الاستیک کاربردی است، بار جانبی تا تسلیم شدن اولین نقطه از ورق، قابل افزایش است. بنابراین نیروی برشی حد تسلیم (V_{fy}) که معادلات (۱) و (۲) را ارضا می‌کند، به دست می‌آید. از معیار فون میسز (رابطه (۵۰)) برای تعیین مقدار تنش در نقاط مختلف ورق دیوار استفاده می‌شود.

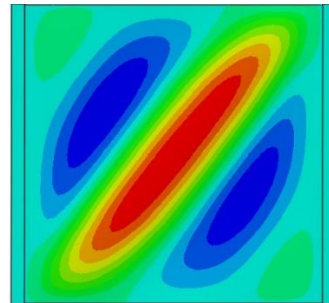
$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \quad (50)$$

که در آن (σ_e) شدت تنش معادل، (σ_x) ، (σ_y) و (τ_{xy}) تنش‌های درون‌صفحه‌ای هستند. برای پیدا کردن مختصات نقاط بحرانی که تسلیم از آنجا شروع می‌شود، معادلات (۵۱) بایستی به‌طور هم‌زمان حل شوند.

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_e}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_e}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (51)$$

۵- مقایسه روش تحلیلی و اجزای محدود

در مدل‌های اجزای محدود (FE) که برای صحت‌سنجی روش تحلیلی در نظر گرفته شده‌اند، تحلیل غیرخطی هندسی با کنترل تغییر مکان در نرم‌افزار ABAQUS به کار گرفته شده است. برای ورق و ستون‌های فرعی از المان چهار گرهی Shell با ابعاد مش ۵۰ در ۵۰ استفاده شده است. از آنجا که ورق در بالا و پایین دیوار به تیرهای صلب متصل است شرایط تکیه‌گاه ساده برای این لبه‌ها در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، لبه‌های بالا و پایین برای حرکت افقی به ترتیب آزاد و مقید هستند. لبه‌های چپ و راست ورق دیوار به صورت لبه‌های آزاد سخت شده در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۵)، شکل تغییر یافته ورق دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید با عرض ۲۷۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۲۷۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۵ میلی‌متر و ستون فرعی 2UNP120 را در اولین نقطه از تسلیم ورق و شکل (۶)، شکل تغییر یافته ورق دیوار طبق رابطه (۹) و روش تحلیلی نشان می‌دهد.



شکل ۵- شکل تغییر یافته ورق دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید با عرض ۲۷۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۲۷۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۵ میلی‌متر و ستون فرعی 2UNP120 در اولین نقطه از تسلیم ورق

۷- ارائه یک رابطه کاربردی برای برآورد مقدار خیز

ماکزیمم حد الاستیک با استفاده از یادگیری ماشین

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، در این مقاله با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از حل دستگاه معادلات فن‌کارمن برای دیوارهای مختلف که در این دیوارها پارامترهای هندسی عرض، ارتفاع، ضخامت ورق و ستون فرعی کنار دیوار متغیر هستند، خیز ورق دیوار در ناحیه الاستیک به‌دست آمده و منحنی بار برشی-خیز در این ناحیه رسم شده است. با استفاده از یادگیری ماشین^۱ و به‌کارگیری تکنیک رگرسیون خطی برای ۱۲۶ مدل ارائه‌شده طبق جدول (۲)، رابطه (۵۲) برای برآورد مقدار خیز ماکزیمم حد الاستیک ورق دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید پیشنهاد می‌شود.

$$w_{me} = 0.0041b + 0.0041h - 0.5422t + 0.0044unp - 2.6627 \quad (52)$$

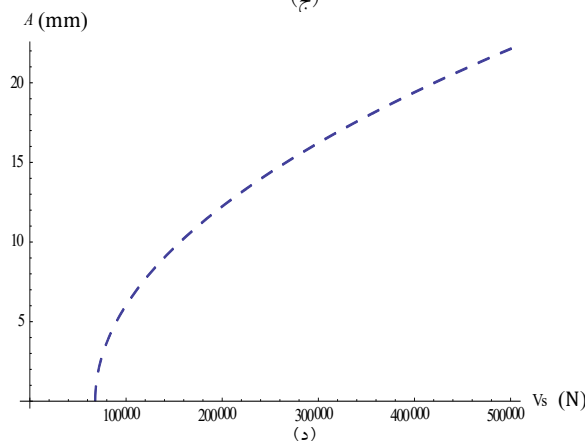
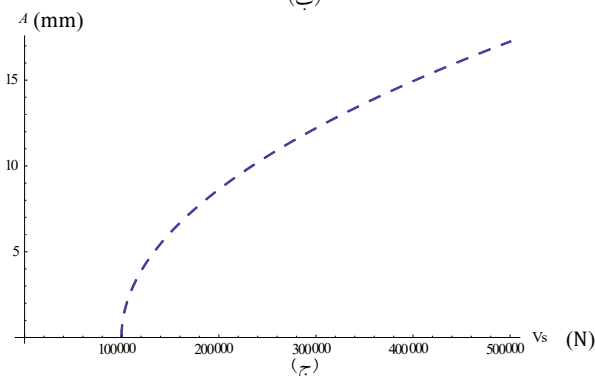
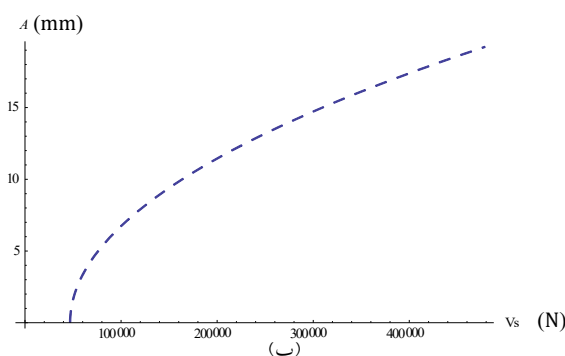
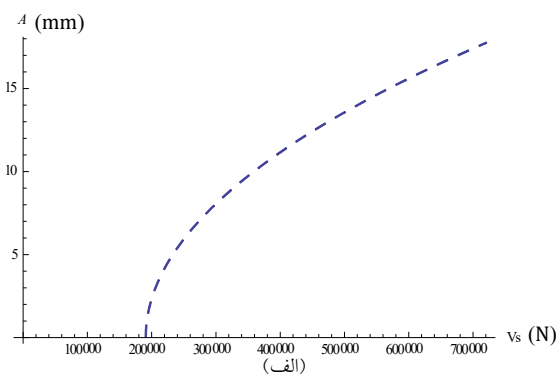
که در آن (b)، (h) و (t) به‌ترتیب عرض، ارتفاع و ضخامت دیوار بر حسب میلی‌متر و (unp) شماره ستون فرعی کنار دیوار و (w_{me}) خیز ماکزیمم حد الاستیک بر حسب میلی‌متر است.

برای مقایسه دقیق عملکرد الگوریتم رگرسیون خطی، از سه معیار ارزیابی کلیدی استفاده شد که هر یک جنبه متفاوتی از دقت پیش‌بینی را می‌سنجد:

۱- ضریب تعیین (R²): این معیار نشان می‌دهد که مدل تا چه اندازه توانسته تغییرات متغیر وابسته را توضیح دهد. مقدار R² بین صفر و یک قرار می‌گیرد که مقدار یک نشان‌دهنده بهترین حالت است. به عبارت دیگر، R² نسبتی از واریانس در متغیر وابسته است که توسط متغیرهای مستقل قابل پیش‌بینی است.

۲- خطای جذر میانگین مربعات (RMSE): این معیار یکی از پرکاربردترین معیارهای ارزیابی در مسائل پیش‌بینی است که با محاسبه جذر میانگین مجذور تفاضل بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی به‌دست می‌آید و مقدار کم‌تر آن نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است. به دلیل به توان ۲ رساندن خطاها در محاسبه این معیار، RMSE به خطاهای بزرگ حساسیت بیش‌تری نشان می‌دهد و به آن‌ها وزن بیش‌تری می‌دهد.

۳- میانگین قدر مطلق خطا (MAE): این معیار میانگین قدرمطلق تفاضل بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی را محاسبه می‌کند و مقادیر کم‌تر آن نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است. از آنجاکه در محاسبه این معیار از قدرمطلق استفاده می‌شود و خطاها به توان نمی‌رسند، MAE برخلاف RMSE به تمام خطاها



شکل ۷- نمودار بار برشی-خیز در ناحیه پس‌کمانشی الاستیک دیوار با عرض ۲۷۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۲۷۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۵ میلی‌متر و ستون فرعی 2UNP120، (ب) دیوار با عرض ۳۰۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۲۷۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۳ میلی‌متر و ستون فرعی 2UNP120، (ج) دیوار با عرض ۲۴۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۲۷۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۴ میلی‌متر و ستون فرعی 2UNP120، (د) دیوار با عرض ۲۷۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۳۷۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۴ میلی‌متر و ستون فرعی 2UNP100

¹ Machine Learning

² Root Mean Square Error

³ Mean Absolute Error

(چه بزرگ و چه کوچک) وزن یکسانی می‌دهد و نسبت به داده‌های پرت حساسیت کم‌تری دارد.

استفاده هم‌زمان از این سه معیار امکان ارزیابی جامع‌تر عملکرد مدل‌ها را فراهم می‌کند. درحالی‌که R^2 دیدگاه کلی از توانایی مدل در توضیح تغییرات متغیر وابسته را ارائه می‌دهد، RMSE و MAE به‌ترتیب دقت پیش‌بینی‌ها را با تأکید بر خطاهای بزرگ و بدون در نظر گرفتن بزرگی خطاها ارزیابی می‌کنند.

در الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مجموعه داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم می‌شود. این تقسیم‌بندی امکان ارزیابی دقیق عملکرد مدل را فراهم می‌کند. بخش آموزش که شامل ۸۰ درصد داده‌های تصادفی انتخاب شده است، برای یادگیری و تنظیم پارامترهای مدل استفاده می‌شود. ۲۰ درصد باقی‌مانده به‌عنوان داده‌های آزمون، معیار سنجش کارایی و راستی‌آزمایی مدل را

تشکیل می‌دهند. رگرسیون خطی، با وجود سادگی ساختار، نتایج قابل‌قبولی ارائه کرد. این الگوریتم کلاسیک با ضریب تعیین $0/9678$ برای داده‌های آموزش و $0/9560$ برای داده‌های آزمون، عملکرد خوبی نشان داد. مقادیر RMSE و MAE برای داده‌های آموزش به‌ترتیب $0/6576$ و $0/5041$ ، و برای داده‌های آزمون $0/4660$ و $0/3898$ محاسبه شد.

در جدول (۲) مقایسه بین مقادیر خیز ماکزیمم حد الاستیک به‌دست‌آمده از رابطه (۵۲) با مقادیر تحلیلی برای ۱۲۶ مدل ارائه شده است. مقایسه نشان می‌دهد که سازگاری بسیار مناسبی بین مقادیر تحلیلی و مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه (۵۲) برقرار است و می‌توان از این رابطه برای برآورد خیز ماکزیمم حد الاستیک دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید استفاده نمود.

جدول ۱- مقایسه بین نتایج روش تحلیلی و اجزای محدود

عرض دیوار (میلی‌متر)	ارتفاع دیوار (میلی‌متر)	ضخامت ورق دیوار (میلی‌متر)	ستون فرعی کنار دیوار (دوبل‌ناودانی)	نیروی برشی حد تسلیم ورق (کیلونیوتن)			خیز ماکزیمم حد الاستیک ورق (میلی‌متر)		
				روش تحلیلی	مدل اجزای محدود	اختلاف (%)	روش تحلیلی	مدل اجزای محدود	اختلاف (%)
۱۸۰۰	۲۷۰۰	۲	۸۰	۱۷۶	۱۶۳	۷/۹	۱۵/۰۳	۱۵/۷	۴/۳
۱۸۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۰۰	۲۶۶	۲۴۱	۱۰/۴	۱۴/۶۶	۱۶/۱	۸/۹
۱۸۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۰۰	۳۶۸	۳۴۵	۶/۷	۱۴/۲۶	۱۶/۳	۱۲/۵
۱۸۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۲۰	۵۰۰	۴۶۱	۸/۴	۱۳/۹	۱۶/۴	۱۵/۲
۲۱۰۰	۲۷۰۰	۲	۸۰	۲۰۰	۱۷۴	۱۴/۹	۱۶/۴۶	۱۵/۹	۳/۵
۲۱۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۰۰	۳۰۲	۲۷۰	۱۱/۸	۱۶/۱۶	۱۶/۴	۱/۵
۲۱۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۰۰	۴۰۵	۳۶۷	۱۰/۴	۱۵/۶۴	۱۶/۵	۵/۲
۲۱۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۲۰	۵۶۰	۵۳۰	۵/۷	۱۵/۱۷	۱۶/۸	۹/۷
۲۴۰۰	۲۷۰۰	۲	۸۰	۲۲۶	۲۱۰	۷/۶	۱۷/۶۶	۱۶/۲	۹
۲۴۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۰۰	۳۵۰	۳۱۸	۱۰	۱۷/۳۶	۱۶/۵	۵/۲
۲۴۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۰۰	۴۶۲	۴۴۰	۵	۱۶/۹	۱۷/۵	۳/۴
۲۴۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۲۰	۶۲۸	۶۰۵	۳/۸	۱۶/۴۸	۱۷/۹	۷/۹

جدول ۲- نتایج به‌دست‌آمده از روش تحلیلی و مقایسه آن با رابطه (۵۲) برای مدل‌های مختلف

شماره مدل	عرض دیوار (میلی‌متر)	ارتفاع دیوار (میلی‌متر)	ضخامت ورق دیوار (میلی‌متر)	ستون فرعی کنار دیوار (دوبل‌ناودانی)	نیروی برشی حد تسلیم ورق (کیلونیوتن)	رابطه (۵۲) تحلیلی	خیز ماکزیمم حد الاستیک ورق (میلی‌متر)	اختلاف (%)
۱	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۲	۸۰	۱۷۶	۱۵/۰۳	۱۵/۰۵	۰/۱۷
۲	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۰۰	۲۶۶	۱۴/۶۶	۱۴/۶۰	-۰/۴۱
۳	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۰۰	۳۶۸	۱۴/۲۶	۱۴/۰۶	-۱/۴۳
۴	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۲۰	۵۰۰	۱۳/۹	۱۳/۶۰	-۲/۱۷



۵	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۲	۸۰	۲۰۰	۱۶/۴۶	۱۶/۲۸	-۱/۰۸
۶	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۰۰	۳۰۲	۱۶/۱۶	۱۵/۸۳	-۲/۰۸
۷	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۰۰	۴۰۵	۱۵/۶۴	۱۵/۲۹	-۲/۳۰
۸	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۲۰	۵۶۰	۱۵/۱۷	۱۴/۸۳	-۲/۲۶
۹	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۲	۸۰	۲۲۶	۱۷/۶۶	۱۷/۵۱	-۰/۸۳
۱۰	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۰۰	۳۵۰	۱۷/۳۶	۱۷/۰۶	-۱/۷۵
۱۱	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۰۰	۴۶۲	۱۶/۹	۱۶/۵۲	-۲/۳۱
۱۲	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۲۰	۶۲۸	۱۶/۴۸	۱۶/۰۶	-۲/۵۹
۱۳	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲	۸۰	۲۷۲	۱۸/۸۸	۱۸/۷۴	-۰/۷۲
۱۴	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۰۰	۴۰۸	۱۸/۶	۱۸/۲۹	-۱/۶۹
۱۵	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۰۰	۵۳۰	۱۸	۱۷/۷۵	-۱/۴۲
۱۶	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۲۰	۷۲۰	۱۷/۷۴	۱۷/۲۹	-۲/۵۸
۱۷	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۲	۸۰	۳۱۲	۱۹/۶۹	۱۹/۹۷	۱/۴۳
۱۸	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۰۰	۴۶۶	۱۹/۴۲	۱۹/۵۲	۰/۵۲
۱۹	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۰۰	۵۹۰	۱۸/۶	۱۸/۹۸	۱/۹۹
۲۰	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۲۰	۷۹۵	۱۸/۳۱	۱۸/۵۲	۱/۱۶
۲۱	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۲	۸۰	۳۵۶	۲۰/۳۶	۲۱/۲۰	۳/۹۸
۲۲	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۰۰	۵۳۱	۲۰/۱۱	۲۰/۷۵	۳/۰۹
۲۳	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۰۰	۶۳۰	۱۸/۶	۲۰/۲۱	۷/۹۶
۲۴	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۲۰	۸۵۸	۱۸/۴۶	۱۹/۷۵	۶/۵۵
۲۵	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۲۰	۲۸۴	۱۴/۹	۱۴/۶۹	-۱/۴۴
۲۶	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۴۰	۲۹۰	۱۵/۰۹	۱۴/۷۸	-۲/۱۲
۲۷	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۶۰	۲۹۵	۱۵/۲۵	۱۴/۸۶	-۲/۵۹
۲۸	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۸۰	۲۹۹	۱۵/۳۷	۱۴/۹۵	-۲/۷۹
۲۹	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۳	۲۰۰	۳۰۲	۱۵/۴۶	۱۵/۰۴	-۲/۷۹
۳۰	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۲۰	۴۲۹	۱۵/۹۴	۱۵/۳۸	-۳/۶۶
۳۱	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۴۰	۴۳۸	۱۶/۱۵	۱۵/۴۶	-۴/۴۳
۳۲	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۶۰	۴۴۶	۱۶/۳۴	۱۵/۵۵	-۵/۰۶
۳۳	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۸۰	۴۵۲	۱۶/۴۸	۱۵/۶۴	-۵/۳
۳۴	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۴	۲۰۰	۴۵۸	۱۶/۲۲	۱۵/۷۳	-۳/۱۲
۳۵	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۲۰	۳۶۵	۱۷/۶۱	۱۷/۱۵	-۲/۶۹
۳۶	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۴۰	۳۷۷	۱۷/۹۴	۱۷/۲۴	-۴/۰۸
۳۷	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۶۰	۳۸۲	۱۸/۰۷	۱۷/۳۲	-۴/۳۰
۳۸	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۸۰	۳۸۶	۱۸/۱۸	۱۷/۴۱	-۴/۴۱
۳۹	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۳	۲۰۰	۳۹۱	۱۸/۲۹	۱۷/۵۰	-۴/۵۱
۴۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۲۰	۴۳۰	۱۸/۴۵	۱۸/۳۸	-۰/۳۹

۴۱	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۴۰	۴۵۳	۱۸/۶۶	۱۸/۴۷	۱-/۰۵
۴۲	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۶۰	۴۶۸	۱۸/۷۱	۱۸/۵۵	-۰/۸۴
۴۳	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۸۰	۴۸۰	۱۸/۷۲	۱۸/۶۴	-۰/۴۱
۴۴	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۳	۲۰۰	۴۹۰	۱۸/۶۵	۱۸/۷۳	۰/۴۳
۴۵	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۲۰	۴۷۸	۱۹/۴۶	۱۹/۶۱	۰/۷۶
۴۶	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۴۰	۴۹۴	۱۹/۸۱	۱۹/۷۰	-۰/۵۸
۴۷	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۶۰	۴۹۶	۱۹/۸۶	۱۹/۷۸	-۰/۳۸
۴۸	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۸۰	۵۰۰	۱۹/۹۴	۱۹/۸۷	-۰/۳۴
۴۹	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۳	۲۰۰	۵۰۵	۲۰/۰۵	۱۹/۹۶	-۰/۴۵
۵۰	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۲	۱۲۰	۳۷۱	۲۰/۵۴	۲۱/۳۸	۳/۹۳
۵۱	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۲	۱۴۰	۳۷۳	۲۰/۶	۲۱/۴۷	۴/۰۵
۵۲	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۲	۱۶۰	۳۷۸	۲۰/۷۴	۲۱/۵۶	۳/۷۹
۵۳	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۲	۱۸۰	۳۸۲	۲۰/۸۶	۲۱/۶۴	۳/۶۳
۵۴	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۲	۲۰۰	۳۸۶	۲۰/۹۷	۲۱/۷۳	۳/۵۱
۵۵	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۲۰	۳۹۷	۱۴/۲۵	۱۴/۱۵	-۰/۷۳
۵۶	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۲۰	۴۴۲	۱۵/۸	۱۵/۳۸	-۲/۷۵
۵۷	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۲۰	۵۰۰	۱۷/۰۴	۱۶/۶۱	-۲/۶۱
۵۸	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۲۰	۵۶۸	۱۸/۰۱	۱۷/۸۴	-۰/۹۷
۵۹	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۲۰	۶۴۷	۱۸/۸۸	۱۹/۰۷	۰/۹۸
۶۰	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۴	۱۲۰	۷۳۳	۱۹/۵۷	۲۰/۳۰	۳/۵۸
۶۱	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۲۰	۲۹۱	۱۴/۷۸	۱۴/۶۹	-۰/۶۲
۶۲	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۲۰	۳۲۸	۱۶/۲۵	۱۵/۹۲	-۲/۰۸
۶۳	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۲۰	۳۷۵	۱۷/۴۶	۱۷/۱۵	-۱/۸۲
۶۴	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۲۰	۴۳۰	۱۸/۴۶	۱۸/۳۸	-۰/۴۴
۶۵	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۲۰	۴۹۲	۱۹/۲۸	۱۹/۶۱	۱/۶۸
۶۶	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۳	۱۲۰	۵۶۰	۱۹/۹۵	۲۰/۸۴	۴/۲۶
۶۷	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۲	۱۴۰	۲۰۴	۱۵/۳۳	۱۵/۳۲	-۰/۰۷
۶۸	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۲	۱۴۰	۲۳۴	۱۶/۷۹	۱۶/۵۵	-۱/۴۶
۶۹	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۲	۱۴۰	۲۷۰	۱۷/۹۸	۱۷/۷۸	-۱/۱۳
۷۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲	۱۴۰	۳۰۹	۱۸/۸۶	۱۹/۰۱	۰/۷۸
۷۱	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۲	۱۴۰	۳۵۵	۱۹/۶۵	۲۰/۲۴	۲/۹۱
۷۲	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۲	۱۴۰	۴۰۵	۲۰/۲۷	۲۱/۴۷	۵/۵۸
۷۳	۱۸۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۶۰	۵۶۳	۱۳/۷۸	۱۳/۷۸	۰
۷۴	۲۱۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۶۰	۶۱۸	۱۵/۳۸	۱۵/۰۱	۲/۴۶
۷۵	۲۴۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۶۰	۶۹۲	۱۶/۶۶	۱۶/۲۴	-۲/۵۸
۷۶	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۶۰	۷۹۵	۱۷/۹۱	۱۷/۴۷	-۲/۵۲

۷۷	۳۰۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۶۰	۸۸۳	۱۸/۵۲	۱۸/۷۰	۰/۹۶
۷۸	۳۳۰۰	۲۷۰۰	۵	۱۶۰	۹۹۷	۱۹/۲۲	۱۹/۹۳	۳/۵۶
۷۹	۱۸۰۰	۳۲۰۰	۲	۸۰	۲۰۰	۱۶/۸۷	۱۷/۱۰	۱/۳۷
۸۰	۱۸۰۰	۳۲۰۰	۳	۱۰۰	۲۹۲	۱۶/۱۳	۱۶/۶۵	۳/۱۳
۸۱	۱۸۰۰	۳۲۰۰	۴	۱۰۰	۳۹۲	۱۵/۵۶	۱۶/۱۱	۳/۴۱
۸۲	۱۸۰۰	۳۲۰۰	۵	۱۲۰	۵۰۶	۱۴/۳۴	۱۵/۶۵	۸/۴۰
۸۳	۲۱۰۰	۳۲۰۰	۲	۸۰	۲۲۰	۱۸/۷۷	۱۸/۳۳	۲/۳۷
۸۴	۲۱۰۰	۳۲۰۰	۳	۱۰۰	۳۱۸	۱۸/۰۴	۱۷/۸۸	-۰/۸۹
۸۵	۲۱۰۰	۳۲۰۰	۴	۱۰۰	۴۲۳	۱۷/۵۷	۱۷/۳۴	-۱/۳۴
۸۶	۲۱۰۰	۳۲۰۰	۵	۱۲۰	۵۴۰	۱۶/۴۴	۱۶/۸۸	۲/۶۳
۸۷	۲۴۰۰	۳۲۰۰	۲	۸۰	۲۴۶	۲۰/۳۷	۱۹/۵۶	-۴/۱۲
۸۸	۲۴۰۰	۳۲۰۰	۳	۱۰۰	۳۵۳	۱۹/۶۳	۱۹/۱۱	-۱/۷۲
۸۹	۲۴۰۰	۳۲۰۰	۴	۱۰۰	۴۶۵	۱۹/۲۰	۱۸/۵۷	-۳/۴۰
۹۰	۲۴۰۰	۳۲۰۰	۵	۱۲۰	۵۸۹	۱۸/۱۲	۱۸/۱۱	-۰/۰۳
۹۱	۲۷۰۰	۳۲۰۰	۲	۸۰	۲۷۷	۲۱/۷۱	۲۰/۷۹	-۴/۴۰
۹۲	۲۷۰۰	۳۲۰۰	۳	۱۰۰	۳۹۵	۲۰/۹۵	۲۰/۳	-۳
۹۳	۲۷۰۰	۳۲۰۰	۴	۱۰۰	۵۱۸	۲۰/۵۷	۱۹/۸۰	-۳/۹۰
۹۴	۲۷۰۰	۳۲۰۰	۵	۱۲۰	۶۵۱	۱۹/۵۱	۱۹/۳۴	-۰/۸۶
۹۵	۳۰۰۰	۳۲۰۰	۲	۸۰	۳۱۷	۲۳/۰۲	۲۲/۰۲	-۴/۵۲
۹۶	۳۰۰۰	۳۲۰۰	۳	۱۰۰	۴۴۴	۲۲/۰۸	۲۱/۵۷	-۲/۳۶
۹۷	۳۰۰۰	۳۲۰۰	۴	۱۰۰	۵۸۰	۲۱/۴	۲۱/۰۳	-۳/۳۸
۹۸	۳۰۰۰	۳۲۰۰	۵	۱۲۰	۷۲۵	۲۰/۶۸	۲۰/۵۷	-۰/۵۱
۹۹	۳۳۰۰	۳۲۰۰	۲	۸۰	۳۵۸	۲۴/۰۲	۲۳/۲۵	-۳/۲۹
۱۰۰	۳۳۰۰	۳۲۰۰	۳	۱۰۰	۴۹۹	۲۳/۰۵	۲۲/۸۰	-۱/۰۹
۱۰۱	۳۳۰۰	۳۲۰۰	۴	۱۰۰	۶۴۹	۲۲/۷۱	۲۲/۲۶	-۲/۰۳
۱۰۲	۳۳۰۰	۳۲۰۰	۵	۱۲۰	۸۱۰	۲۱/۶۸	۲۱/۸۰	۰/۵۷
۱۰۳	۱۸۰۰	۳۷۰۰	۲	۸۰	۲۱۶	۱۷/۷۲	۱۹/۱۵	۷/۴۹
۱۰۴	۱۸۰۰	۳۷۰۰	۳	۱۰۰	۳۱۴	۱۶/۹۸	۱۸/۷۰	۹/۲۰
۱۰۵	۱۸۰۰	۳۷۰۰	۴	۱۰۰	۴۶۵	۱۷/۵۵	۱۸/۱۶	۳/۳۵
۱۰۶	۱۸۰۰	۳۷۰۰	۵	۱۲۰	۵۴۶	۱۵/۴۱	۱۷/۷۰	۱۲/۹۶
۱۰۷	۲۱۰۰	۳۷۰۰	۲	۸۰	۲۳۲	۲۰/۰۵	۲۰/۳۸	۱/۶۴
۱۰۸	۲۱۰۰	۳۷۰۰	۳	۱۰۰	۳۳۴	۱۹/۳	۱۹/۹۳	۳/۱۶
۱۰۹	۲۱۰۰	۳۷۰۰	۴	۱۰۰	۴۴۱	۱۸/۸۳	۱۹/۳۹	۲/۸۸
۱۱۰	۲۱۰۰	۳۷۰۰	۵	۱۲۰	۵۵۸	۱۷/۶۷	۱۸/۹۳	۶/۶۸
۱۱۱	۲۴۰۰	۳۷۰۰	۲	۸۰	۲۵۲	۲۱/۹۸	۲۱/۶۱	۱/۶۹
۱۱۲	۲۴۰۰	۳۷۰۰	۳	۱۰۰	۳۶۰	۲۱/۲۱	۲۱/۱۶	-۰/۲۳

۱۱۳	۲۴۰۰	۳۷۰۰	۴	۱۰۰	۴۷۳	۲۰/۸۳	۲۰/۶۲	-۱/۰۳
۱۱۴	۲۴۰۰	۳۷۰۰	۵	۱۲۰	۵۹۵	۱۹/۷۳	۲۰/۱۶	-۲/۱۵
۱۱۵	۲۷۰۰	۳۷۰۰	۲	۸۰	۲۷۷	۲۳/۶۳	۲۲/۸۴	-۳/۴۴
۱۱۶	۲۷۰۰	۳۷۰۰	۳	۱۰۰	۳۹۵	۲۲/۸۹	۲۲/۳۹	-۲/۲۳
۱۱۷	۲۷۰۰	۳۷۰۰	۴	۱۰۰	۵۱۵	۲۲/۵۲	۲۱/۸۵	-۳/۰۷
۱۱۸	۲۷۰۰	۳۷۰۰	۵	۱۲۰	۶۴۴	۲۱/۴۵	۲۱/۳۹	-۰/۲۶
۱۱۹	۳۰۰۰	۳۷۰۰	۲	۸۰	۳۰۷	۲۵/۰۷	۲۴/۰۷	-۴/۱۳
۱۲۰	۳۰۰۰	۳۷۰۰	۳	۱۰۰	۴۳۶	۲۴/۳۱	۲۳/۶۲	-۲/۹۲
۱۲۱	۳۰۰۰	۳۷۰۰	۴	۱۰۰	۵۶۶	۲۳/۹۶	۲۳/۰۸	-۳/۸۲
۱۲۲	۳۰۰۰	۳۷۰۰	۵	۱۲۰	۷۰۴	۲۲/۹	۲۲/۶۲	-۱/۲۲
۱۲۳	۳۳۰۰	۳۷۰۰	۲	۸۰	۳۴۶	۲۶/۵۲	۲۵/۳۰	-۴/۸۰
۱۲۴	۳۳۰۰	۳۷۰۰	۳	۱۰۰	۴۸۲	۲۵/۵۲	۲۴/۸۵	-۲/۶۹
۱۲۵	۳۳۰۰	۳۷۰۰	۴	۱۰۰	۶۲۴	۲۵/۲	۲۴/۳۱	-۳/۶۷
۱۲۶	۳۳۰۰	۳۷۰۰	۵	۱۲۰	۷۷۴	۲۴/۱۵	۲۳/۸۵	-۱/۲۴

۸- نتیجه گیری

در تحقیقات گذشته، دستگاه معادلات فن کارمن برای به دست آوردن میدان تغییر مکان ورق دیوار برشی فولادی نیمه مفید در لبه ها در ناحیه پس کمانشی الاستیک با استفاده از روش گالرکین حل شده و با استفاده از ظرفیت برشی نهایی، منحنی دو خطی ایده آل بار جانبی-تغییر مکان افقی دیوار، تقریب زده شده است. در این مقاله با استفاده از نتایج به دست آمده از حل دستگاه معادلات فوق برای دیوارهای مختلف (تغییرات در عرض، ارتفاع، ضخامت ورق دیوار و تغییرات ستون فرعی کنار دیوار)، خیز ورق دیوار (جابه جایی خارج از صفحه) و نیروی برشی در ناحیه پس کمانشی الاستیک مورد بررسی قرار گرفته و منحنی نیروی برشی-خیز نیز رسم شده است. همچنین یک رابطه کاربردی بسیار مفید برای برآورد مقدار خیز ماکزیمم حد الاستیک با استفاده از یادگیری ماشین و به کارگیری تکنیک رگرسیون خطی، ارائه شده است.

- [15] Qiu, J., Zhao, Q., Yu, C., and Wang, Z. (2022), "Lateral behavior of trapezoidally corrugated wall plates in steel plate shear walls, Part 2: Shear strength and post-peak behavior", *Thin-Walled Structures*, 174, p.109103.
- [16] Qiu, J., Zhao, Q., Wang, Z., and Yu, C. (2022), "Lateral behavior of trapezoidally corrugated wall plates in steel plate shear walls, Part 1: Elastic buckling", *Thin-Walled Structures*, 174, p.109104.
- [17] Roberts, T.M. (1995), "Seismic resistance of steel plate shear walls", *Engineering Structures*, 17(5), pp.344-351.
- [18] Sabouri-Ghomi, S., and Mamazizi, S. (2015), "Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings", *Thin-Walled Structures*, 86, pp.56-66.
- [19] Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C.E., and Kharrazi, M.H. (2005), "Shear analysis and design of ductile steel plate walls", *Journal of Structural Engineering*, 131(6), pp.878-889.
- [20] Sabouri-Ghomi, S., and Sajjadi, S.R.A. (2012), "Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, 75, pp.152-159.
- [21] Tong, J., Wu, R., and Wang, L. (2023), "Experimental and numerical investigations on seismic behavior of stiffened corrugated steel plate shear walls", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 52(12), pp.3551-3574.
- [22] Tong, J.Z., Wang, L.Q., Wu, R.M., Hou, J., Li, Q.H., and Xu, S.L. (2024), "Cyclic test and analysis of UHTCC-enhanced buckling-restrained steel plate shear walls", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 53(13), pp.4006-4031.
- [23] Topkaya, C., and Atasoy, M. (2009), "Lateral stiffness of steel plate shear wall systems. Thin-walled structures", 47(8-9), pp.827-835.
- [24] Wang, M., Yang, W., Shi, Y., and Xu, J. (2015), "Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials", *Journal of Constructional Steel Research*, 107, pp.194-210.
- [25] Wu, R.M., Yu, C.Q., Wang, L.Q., and Tong, J.Z. (2025), "Shear elastic buckling of corrugated steel plate shear walls with stiffeners considering torsional rigidity", *Thin-Walled Structures*, 206, p.112646.
- [26] Wu, R.M., Wang, L.Q., Tong, J.Z., Tong, G.S., and Gao, W. (2024), "Elastic buckling formulas of multi-stiffened corrugated steel plate shear walls", *Engineering Structures*, 300, p.117218.
- [27] Wang, M., Shi, Y., Xu, J., Yang, W., and Li, Y. (2015), "Experimental and numerical study of unstiffened steel plate shear wall structures", *Journal of Constructional Steel Research*, 112, pp.373-386.
- [28] Zirakian, T., and Zhang, J. (2015), "Structural performance of unstiffened low yield point steel plate shear walls", *Journal of Constructional steel research*, 112, pp.40-53.
- [29] Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.L., and Elwi, A.E. (1998), "Cyclic test of four-story steel plate shear
- [1] Astaneh-Asl, A. (2001), "Seismic behavior and design of steel shear walls", Moraga, CA: Structural Steel Educational Council.
- [2] Astaneh-Asl, A., and Zhao, Q. (2001), "Cyclic tests of steel shear walls", Research Project. Berkeley: Department of Civil and Environmental Engineering, University of California.
- [3] Azandariani, A.G., Gholhaki, M., and Azandariani, M.G. (2022), "Assessment of damage index and seismic performance of steel plate shear wall (SPSW) system", *Journal of Constructional Steel Research*, 191, p.107157.
- [4] Alinia, M.M., and Shirazi, R.S. (2009), "On the design of stiffeners in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10-11), pp.2069-2077.
- [5] Caccese, V., Elgaaly, M., and Chen, R. (1993), "Experimental study of thin steel-plate shear walls under cyclic load", *Journal of Structural Engineering*, 119(2), pp.573-587.
- [6] Chen, S.J., and Jhang, C. (2006), "Cyclic behavior of low yield point steel shear walls", *Thin-walled Structures*, 44(7), pp.730-738.
- [7] Chen, S.J., and Jhang, C. (2011), "Experimental study of low-yield-point steel plate shear wall under in-plane load", *Journal of Constructional Steel Research*, 67(6), pp.977-985.
- [8] Dou, C., Xie, C., Wang, Y., and Yang, N. (2023), "Cyclic loading test and lateral resistant behavior of flat-corrugated steel plate shear walls", *Journal of Building Engineering*, 66, p.105831.
- [9] Emami, F., Mofid, M., and Vafai, A. (2013), "Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls", *Engineering Structures*, 48, pp.750-762.
- [10] Emami, F., and Mofid, M. (2014), "On the hysteretic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(2), pp.94-104.
- [11] Jiang, Z.Q., Yan, T., Zhang, A.L., Su, L., and Shen, C.J. (2022), "Experimental research on special steel frame with stiffened double steel plate shear wall", *Journal of Constructional Steel Research*, 189, p.107067.
- [12] Liu, X., Zhang, W., Yu, C., Li, Y., Jiang, Z., and Yu, S. (2022), "Experimental study on cold-formed steel shear walls with different corrugated steel sheathings", *Journal of Constructional Steel Research*, 199, p.107639.
- [13] Lubell, A.S., Prion, H.G., Ventura, C.E., and Rezai, M. (2000), "Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading", *Journal of Structural Engineering*, 126(4), pp.453-460.
- [14] Machaly, E.B., Safar, S.S., and Amer, M.A. (2014), "Numerical investigation on ultimate shear strength of steel plate shear walls" *Thin-Walled Structures*, 84, pp.78-90.

- [42] Broujerdian, V., Pahnabi, R., and Ghamari, A. (2023), "Semi-supported steel plate shear wall with oblique sides. *Scientia Iranica*, 30(3), pp.891-901.
- [43] Cao, Y., Asadi, M.H., Alyousef, R., Baharom, S., Alaskar, A., Alabduljabbar, H., Mohamed, A.M., and Assilzadeh, H. (2023), "Investigation of semi-supported steel plate shear walls with different infill plates under cyclic loading" *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 51(2), pp.740-763.
- [44] Hou, J., Wang, L.Q., Tong, J.Z., Tong, G.S., and Jiang, J.L. (2023), "Easy-to-use formulas for predicting ultimate shear resistance and tension field distribution of semi-supported steel plate shear walls", *Thin-Walled Structures*, 185, p.110597.
- [45] سادات خلردی، س.ا.، جهانپور، ع.، برخوردار، م.ع. و فرخزاد، م. (۱۳۹۶)، "تأثیر فولاد نرم و تغییرات ضخامت ورق و بررسی ضخامت و جهت قرارگیری الیاف در شکل‌پذیری و مقاومت نهایی دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید تقویت‌شده با الیاف پلیمری شیشه (GFRP)"، سازه و فولاد، ۱۱ (۲۱)، ص. ۲۹-۴۲.
- [46] سادات خلردی، س.ا. و برخوردار، م.ع. (۱۳۹۳)، "تأثیر فولاد نرم و تغییرات ضخامت ورق در رفتار پس‌کمانشی و مقاومت نهایی دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید"، سازه و فولاد، ۸ (۱۵)، ص. ۲۹-۳۸.
- [47] Momeni, S., Siahpolo, N., and Jahanpour, A.R. (2024), "Numerical study on semi-supported steel composite shear wall at the edges under near and far-fault loading", *Sharif Journal of Civil Engineering*, 40(1), pp.99-112.
- [48] Momeni, S., Siahpolo, N., and Jahanpour, A. (2024), "Feasibility study of using concrete veneer in semi-supported steel shear wall at the edges", *Modares Civil Engineering Journal*, 24(3), pp.85-102.
- [49] Nayel, I.H., Ghamari, A., and Broujerdian, V. (2022), "On the behavior of an innovative four-layer semi-supported steel plate shear wall", *Case Studies in Construction Materials*, 17, p.01427.
- [50] Sadat Kholerdi, S.E., Nazarimofrad, E., Farrokhzad, M., and Topal, U. (2018), "Evaluation of the seismic behavior of semi-supported steel shear walls with different ratio and shape of openings", *Australian Journal of Structural Engineering*, 19(2), pp.118-130.
- [51] Zeynali, S., and Moharrami, H. (2024), "Nonlinear dynamic behavior of semi-supported steel shear walls", *Journal of Earthquake and Tsunami*, 18(02), p.2350037.
- [52] Ghamari, A., Akbarpour, A., and Ghanbari, A. (2019), "Improving behavior of semi-supported steel plate shear walls", *Journal of Central South University*, 26(10), pp.2891-2905.
- [53] Hou, J., Wang, L.Q., Tong, J.Z., Xu, S.L., and Tong, G.S. (2023), "Shear resistance design of semi-supported buckling-restrained steel plate shear walls: analytical and numerical investigation", *Journal of Building Engineering*, 78, p.107582.
- [54] Kontoni, D.P.N., Ghamari, A., Omid, M.S.P., and Ilia, G. (2023), "Improving the behavior of semi-supported wall", *Journal of Structural Engineering*, 124(2), pp.112-120.
- [30] Xue, M. (1994), "Interaction of steel plate shear panels with surrounding frame members. Proc. *Struct. Stability Res*", Council Annual. Technical. Session, Bethlehem, pp.339-354.
- [۳۱] محرمی، ح.، حبیب‌نژاد، ا.، مزروعی، ع. و علیزاده، ح. (۱۳۸۴)، "دیوارهای برشی فولادی نیمه‌نگهداری‌شده در لبه‌ها"، گزارش تحقیقاتی شماره ۱-۶۷۹، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.
- [32] Jahanpour, A., Moharrami, H., and Aghakoochak, A. (2011), "Evaluation of ultimate capacity of semi-supported steel shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 67(6), pp.1022-1030.
- [33] Jahanpour, A., and Moharrami, H. (2015), "Evaluation of behavior of the secondary columns in semi-supported steel shear walls", *Thin-Walled Structures*, 93, pp.94-101.
- [۳۴] محرمی، ح. و جهانپور، ع. (۱۳۹۵)، "تحلیل و طراحی حدی دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید"، تهران: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.
- [35] Sadat Kholerdi, S.E., and Jahanpour, A. (2020), "Bilinear Load-Displacement Curve of Semi-supported Steel Shear Walls", *International Journal of Steel Structures*, 20(2), pp.504-524.
- [۳۶] سادات خلردی، س.ا. و جهانپور، ع. (۱۳۸۴)، "سختی الاستیک دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید"، مهندسی عمران مدرس، ۱۹ (۲)، ص. ۸۵-۹۹.
- [۳۷] سادات خلردی، س.ا. و جهانپور، ع. (۱۳۹۹)، "رابطه کاربردی برای سختی الاستیک دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید در لبه‌ها"، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
- [38] Jahanpour, A., Jönsson, J., and Moharrami, H. (2012), "Seismic behavior of semi-supported steel shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, 74, pp.118-133.
- [39] Shekastehband, B., Azaraxsh, A.A., Showkati, H., and Pavir, A. (2017), "Behavior of semi-supported steel shear walls: Experimental and numerical simulations", *Engineering Structures*, 135, pp.161-176.
- [40] Shekastehband, B., Azaraxsh, A.A., and Showkati, H. (2018), "Experimental seismic study on shear walls with fully-connected and beam-only-connected web plates", *Journal of Constructional Steel Research*, 141, pp.204-215.
- [41] Bahmaei, J., and Siahpolo, N. (2021), "Studding the Behavior of Semi-supported Steel Shear Wall against Monotonic and Cyclic Loads", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(4), pp.1545-1558.



- steel plate shear walls using diagonal stiffeners", *ce/papers*, 6(3-4), pp.919-924.
- [55] Nayel, I.H., Broujerdian, V., and Ghamari, A. (2022), "Investigating the behavior of semi-supported steel plate shear walls compounded of two flat and two corrugated plates: a numerical and parametrical study", *International Journal of Civil Engineering*, 20(10), pp.1197-1210.
- [56] Chajes, A. (1974), "Principles of structural stability theory", (No Title).
- [57] Sun, G., Kennedy, D., and Williams, F.W. (2000), "A post-buckling analysis for isotropic prismatic plate assemblies under axial compression", *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(9), pp.1783-1803.
- [58] Byklum, E., and Amdahl, J. (2002), "A simplified method for elastic large deflection analysis of plates and stiffened panels due to local buckling", *Thin-Walled Structures*, 40(11), pp.925-953.
- [59] Wang, H., Ou, M., and Wang, T. (1991), "Post-buckling behaviour of orthotropic rectangular plates", *Computers and Structures*, 41(1), pp.1-5.
- [60] Hui-shen, S. (1989), "Postbuckling behaviour of rectangular plates under combined loading", *Thin-Walled Structures*, 8(3), pp.203-216.
- [61] Cole, J.D., and Bell, G.I. (1970), "Perturbation methods in applied mathematics", (No Title).
- [62] Paik, J.K., and Lee, M.S. (2005), "A semi-analytical method for the elastic-plastic large deflection analysis of stiffened panels under combined biaxial compression/tension, biaxial in-plane bending, edge shear, and lateral pressure loads", *Thin-Walled Structures*, 43(3), pp.375-410.
- [63] Dai, H., Yue, X., and Atluri, S. (2014), "Solutions of the von Kármán plate equations by a Galerkin method, without inverting the tangent stiffness matrix", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 9(2), pp.195-226.
- [64] Yukio, U., Rashed, S.M., and Paik, J.K. (1987), "An incremental Galerkin method for plates and stiffened plates", *Computers and Structures*, 27(1), pp.147-156.
- [65] Ferreira, P.S., and Virtuoso, F.B. (2014), "Semi-analytical models for the post-buckling analysis and ultimate strength prediction of isotropic and orthotropic plates under uniaxial compression with the unloaded edges free from stresses", *Thin-Walled Structures*, 82, pp.82-94.
- [66] Stamatelos, D.G., Labeas, G.N., and Tserpes, K.I. (2011), "Analytical calculation of local buckling and post-buckling behavior of isotropic and orthotropic stiffened panels", *Thin-Walled Structures*, 49(3), pp.422-430.
- [67] Bakker, M.C.M., Rosmanit, M., and Hofmeyer, H. (2007), "Elastic post-buckling analysis of compressed plates using a two-strip model", *Thin-Walled Structures*, 45(5), pp.502-516.