

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

ارائه روش جدید محاسبه ضخامت ورق معادل جهت طراحی دیوارهای برشی فولادی دارای سخت کننده با استفاده از مدل اندرکنش ورق و قاب

مجید قلهکی^{۱*}، فرزانه احمدنژاد^۲، امید رضائی فر^۳

۱-دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲-دانشجوی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳-دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

امروزه استفاده از دیوارهای برشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی لرزه‌ای کارآمد در افزایش مقاومت و سختی ساختمان‌ها در دو بخش نوسازی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها مورد توجه فراوان قرار گرفته است. در این مقاله، ظرفیت و سختی برشی دیوار برشی فولادی دارای سخت کننده تحت آرایش‌های مختلف سخت کننده اعم از افقی، قائم و ترکیبی به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت روابط پیشنهادی برای تعیین ضخامت ورق معادل بدون سخت کننده ارائه شده است تا با استفاده از روابط ارائه شده و روابط روش اندرکنش ورق با قاب بتوان دیوار برشی فولادی با سخت کننده را طرح نمود. نتایج حاکی از پیش‌بینی مناسب ظرفیت و سختی سیستم دیوار برشی فولادی دارای سخت کننده با استفاده از روابط پیشنهادی بوده و میزان خطا به کمتر از ۱۵ درصد محدود گردیده است.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی با سخت کننده، روش اندرکنش ورق و قاب، ظرفیت برشی، سختی برشی، رابطه پیشنهادی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2018.109765.1404	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2018.109765.1404	۱۳۹۸/۰۶/۱۰	۱۳۹۷/۰۱/۲۹	۱۳۹۷/۰۱/۲۹	۱۳۹۶/۱۲/۲۳	۱۳۹۶/۰۹/۱۸
مجید قلهکی mgholhaki@semnan.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

Presentation of a new method for calculating the equivalent thickness to design stiffened steel shear walls using Plate frame interaction model

Gholhaki, M.^{1*}, Ahmadnejad, F², Rezayfar, O.

- ¹Associate professor, civil faculty, Semnan university, Semnan, iran
- ²Master of Civil Engineering, civil faculty, Semnan university, Semnan, iran
3- Associate professor, civil faculty, Semnan university, Semnan, iran

ABSTRACT

Nowadays, Steel plate shear walls have been considered as the lateral load resisting system in buildings in increasing the strength and stiffness of structures in two sections of seismic reconstruction and improvement. In this paper, the shear strength and stiffness of a stiffened steel plate shear walls under various stiffeners configuration horizontal, vertical and combined structures with finite element method has been studied and finally the proposed equations for determining the unstiffened equivalent thickness of the steel plate. The proposed model is used to design a stiffened steel plate shear wall using the proposed equations of the plate frame interaction method. The results indicate a acceptable prediction of the capacity and stiffness of the stiffened steel shear walls using proposed equations and the error rate has been less than 15%.

ARTICLE INFO

Received: 30/05/2017
Revised: 05/09/2017
Accepted: 28/11/2017

Keywords:

stiffened SPSW,
Plate frame interaction
method,
shear capacity,
shear stiffness,
proposed equations

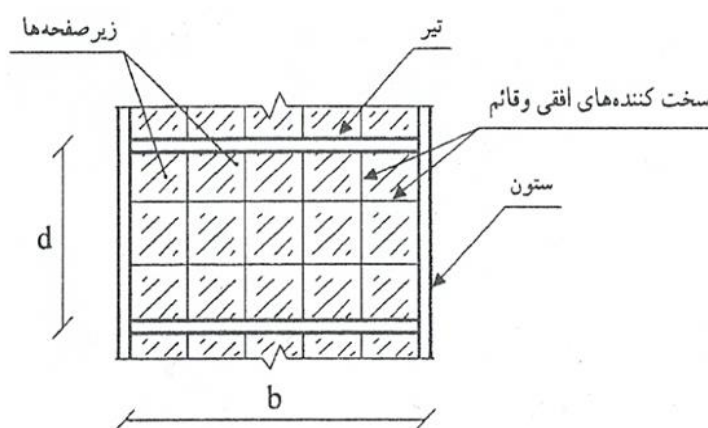
All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.109765.1404

*Corresponding author: Gholhaki, M
Email address: mgholhaki@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

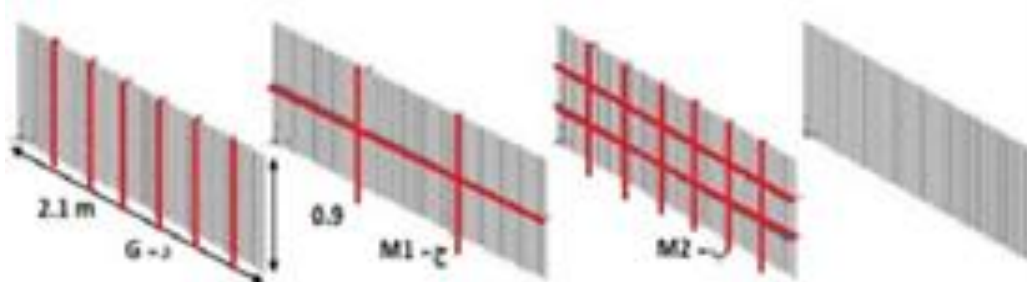
برای جلوگیری از کمانش ورق فولادی به خصوص در ناحیه الاستیک، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، می‌توان ورق فولادی را به کمک سخت‌کننده‌های عمودی و افقی تقویت نمود. با توجه به مقاومت بالای ورق فولادی، با بهره‌گیری از مقاومت پس‌کمانشی آن، ضخامت ورق حتی در دیوارهای برشی فولادی بلند و برای نیروهای برشی بزرگ، کم و یا به عبارت دیگر ورق فولادی نازک می‌باشد. بدین لحاظ می‌توان برای جلوگیری از کمانش آن تحت اثر بارهای سرویس و به جای افزایش ضخامت ورق که کاملاً غیر اقتصادی می‌باشد از سخت‌کننده‌ها برای تقویت آن استفاده نمود. تقویت ورق نه تنها از کمانش آن تحت اثر بارهای سرویس جلوگیری می‌نماید بلکه باعث بهبود رفتار آن به ویژه در محیط پلاستیک نیز می‌گردد.



شکل ۱: دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده

۱-۲- تاریخچه تحقیقات

در سال ۱۹۷۳ تاکاهاشی و همکاران [۱]، اولین سری از آزمایشات را بر روی دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده، به منظور بررسی اثر مقدار ممان اینرسی سخت‌کننده‌ها بر روی کمانش ورق انجام دادند. در برنامه آن‌ها یک نمونه دیوار برشی فولادی بدون تقویت به همراه سه نمونه دارای سخت‌کننده قرار داشت. نتایج نشان داد که چنانچه میزان ممان اینرسی سخت‌کننده‌ها از مقداری کمتر باشد کمانش کلی در ورق رخ داده و با انتخاب ممان اینرسی مناسب برای سخت‌کننده‌ها، کمانش به زیرورق‌ها منتقل می‌شود. (شکل ۲)



شکل ۲: نحوه آرایش سخت‌کننده‌ها در آزمایش تاکاهاشی و همکاران [۱]

در سال ۲۰۰۰ مجید قلهکی [۲]، به بررسی آنالیز غیر خطی دیوار برشی فولادی تقویت‌شده با بازشورپرداخت، در سال ۲۰۰۷ علی‌نیا و دستفان [۳]، به مقایسه رفتار پانل‌های سخت‌نشده (نازک) و سخت‌شده پرداختند. در سال ۲۰۰۸ صبوری و عزیزی [۴]، با استناد بر آزمایش‌های صورت گرفته توسط تاکاهاشی و همکاران، در ابتدا با استفاده از روابط تئوری کلاسیک به ارائه رابطه ساده‌ای جهت تعیین

حداقل ممان اینرسی سخت‌کننده‌ها برای سه نوع آرایش آزمایش تاکاهاشی پرداختند و سپس برای تعیین حداقل ممان اینرسی سخت‌کننده‌ها از نرم‌افزار المان محدود ANSYS استفاده کردند.

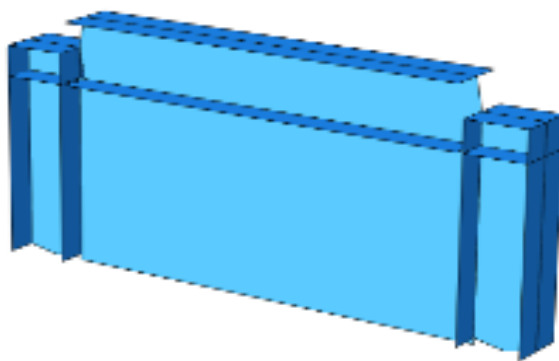
در سال ۲۰۰۹، سجادی و صبوری [۵]، به بررسی میزان جذب انرژی و ضریب رفتار دیوارهای برشی فولادی شکل‌پذیر با سخت‌کننده با بازشو و بدون بازشو پرداختند. آزمایش بر روی پنج نوع دیوار برشی فولادی که یکی از نمونه‌ها بدون سخت‌کننده و چهار نمونه دیگر دارای سخت‌کننده و از نوع با بازشو و بدون بازشو بودند انجام گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که ضریب رفتار دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده و با سخت‌کننده به ترتیب برابر با ۱۶/۱ و ۱۷/۱ است و میزان جذب انرژی دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده در تغییر مکان‌های مختلف در حدود ۲۰ تا ۳۶ درصد کمتر از دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده است. همچنین آن‌ها دریافتند که در دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده سهم جذب انرژی قاب از کل نمونه به ترتیب برابر با ۵۰ و ۶۷ درصد می‌باشد.

در سال ۲۰۱۲ ژیان گونی و همکاران [۶]، ۳ نمونه دیوار برشی فولادی سخت‌شده را مورد آزمایش قرار دادند و ظرفیت مقاومت جانبی نمونه‌ها را بررسی کردند.

در سال ۲۰۱۵ قلهکی و قدکساز [۷]، به مطالعه عددی اثر بازشوه‌های متمرکز و گسترده بر روی سختی و مقاومت پانل‌های برشی فولادی تقویت شده پرداخته و ضرایب رفتار آن‌ها را با یکدیگر مقایسه نمودند.

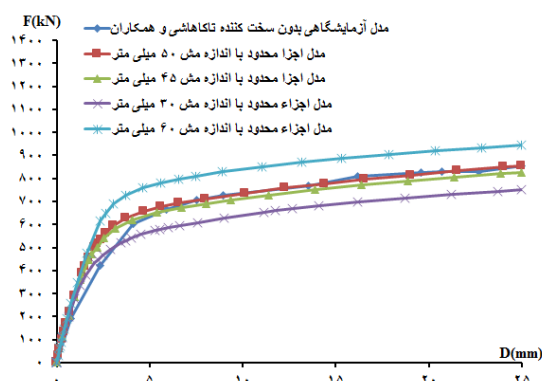
۲- تطبیق مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی بدون سخت‌کننده تاکاهاشی و همکاران [۱]، که یک دیوار برشی فولادی با عرض دهانه ۲/۱ متر، ارتفاع ۰/۹ متر و ضخامت ورق ۳/۲ میلیمتر با تنش تسلیم $f_y = 310$ مگاپاسکال و تنش حدنهایی $f_u = 504$ مگاپاسکال است، جهت مدلسازی و اعتبار سنجی انتخاب گردید. مدل آزمایشگاهی فوق دارای قاب پیرامونی مفصلی است. بر این اساس در روش اجزاء محدود، اتصال تیر به ستون به صورت مفصلی و با مثلثی نمودن جان تیر و اتصال آن به بال ستون مدلسازی شده و از این روش برای مدلسازی اتصال مفصلی پای ستون به کف نیز استفاده شد (شکل ۳). از المان Shell چهار گرهی در نرم افزار ABAQUS [۸] برای مدلسازی ورق و قاب پیرامونی استفاده گردید. همچنین برای تیر و ستون های محیطی از پروفیل IPB300 استفاده شد.



شکل ۳: مدل اجزاء محدود

شکل (۴) مقایسه نتایج مدلسازی و آزمایشگاهی را نشان داده که نتایج مدلسازی در اندازه مش‌های متفاوت ارائه شده و نتایج نشان می‌دهد که مدلسازی با مش ۵۰ میلی متر انطباق مناسب تری با نتایج آزمایشگاهی داشته، لذا از این ابعاد مش بندی برای دیگر مدلسازی‌ها استفاده شده است.



شکل ۴: منحنی نیرو - تغییر مکان مدل اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی

۳- تعیین خصوصیات اینرسی حداقل برای سخت کننده‌ها

در طراحی دیوار برشی فولادی تقویت شده، چنانچه ممان اینرسی سخت کننده‌ها به میزان مناسب انتخاب نشود، کمانش کلی در ورق رخ داده و ورق فولادی نه تنها نمی‌تواند از تمام ظرفیت خود استفاده کند، بلکه به دلیل ممانعت از تشکیل میدان کششی قطری کامل (به دلیل حضور سخت کننده‌ها) ظرفیت آن از یک دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده نیز کمتر خواهد بود. لذا ممان اینرسی سخت کننده‌ها باید به گونه‌ای انتخاب و طراحی گردد که مود کمانش کلی در ورق رخ نداده بلکه کمانش در هر یک از زیرصفحه‌ها تشکیل شود. در این مقاله نیز روابط ارائه شده تجربی، بر مبنای حاکمیت مود کمانش در زیرصفحه‌ها تبیین شده است.

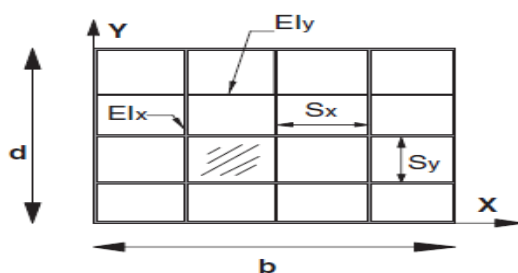
جهت تحقق تبدیل مود کمانش کلی ورق به مود کمانش موضعی در هر زیرصفحه، باید رابطه (۱) که مربوط به ورق ارتوتروپیک است ارضا گردد [۴].

$$\left(\frac{I_x}{S_x} + \frac{t_w^3}{12(1-\nu^2)}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{I_y}{S_y} + \frac{t_w^3}{12(1-\nu^2)}\right)^{0.25} \geq \frac{t_w^3}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{d}{S_x}\right)^2 \cdot \left(\frac{k_L}{k_G}\right) \quad (1)$$

که در آن K_g ضریب کمانش کلی ورق است که با توجه به اتصال ساده ورق به اعضای محیطی برابر با $3/64$ محاسبه شده و K_L ضریب کمانش موضعی ورق بوده و از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$\begin{cases} k_L = 5.35 + \frac{4}{(S_y/S_x)^2} & \frac{S_y}{S_x} \geq 1 \\ k_L = 4 + \frac{5.35}{(S_y/S_x)^2} & \frac{S_y}{S_x} < 1 \end{cases} \quad (2)$$

سایر پارامترهای رابطه (۱) در شکل (۴) نشان داده شده است.



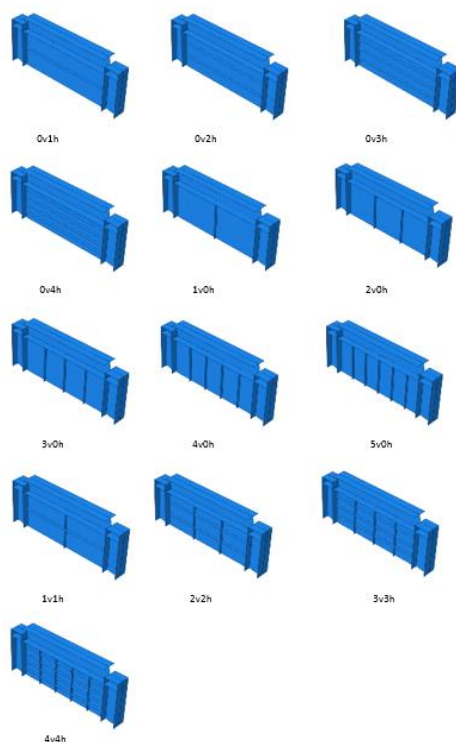
شکل ۵: مشخصات هندسی پانل و سخت کننده‌ها

با توجه به شکل (۵) در صورت استفاده از ضخامت و ابعاد یکسان برای سخت کننده‌های افقی و قائم ($I_x=I_y$) و نیز با جایگزین نمودن I_s به جای I_x و I_y در رابطه (۱) و نیز با توجه به مقادیر S_x و S_y حاصله از هر یک از آرایش‌های سخت کننده‌ها مطابق شکل (۳)، مقدار ممان اینرسی مورد نیاز (I_s) برای سخت کننده‌های افقی و قائم مدل‌های مورد بررسی، محاسبه می‌شود. لذا با انتخاب سخت کننده‌ها با عرض و ضخامت مناسب، ممان اینرسی متناظر با ابعاد انتخابی، از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$I_s = \frac{1}{12} t_s \cdot (b_s)^3 \quad (3)$$

۳-۱- بررسی اجزا محدود نمونه‌ها

با توجه به اینکه در این مقاله هدف، بررسی وضعیت سختی و مقاومت فقط ورق تقویت شده می‌باشد لذا اتصالات تیر به ستون قاب و همچنین پای ستون‌ها بصورت مفصلی طراحی شده و همچنین سختی تیرها و ستون‌های قاب بر اساس سختی و مقاومت سخت‌ترین ورق تقویت شده طراحی شده تا اینکه از تمام ظرفیت ورق تقویت شده استفاده شده و قاب پیرامونی دچار تسلیم نگردد. به منظور بررسی رفتار پانل‌های سخت شده تحت آرایش‌های مختلف سخت کننده به تعداد مدل‌های زیادی نیاز است، بدین منظور ۳۹ مدل به ابعاد مدل تاکاهاشی و همکاران با آرایش سخت کننده و ضخامت ورق متفاوت تهیه شد. جهت سهولت در تشخیص مدل‌ها از حروف زیر جهت نامگذاری نمونه‌ها استفاده شده است. به عنوان مثال در نام 1v1h-3.2 که حرف v مخفف کلمه Vertical و حرف h مخفف کلمه Horizontal بوده و اعداد کنار این حروف تعداد سخت کننده قائم و افقی را نشان داده و عدد ۳/۲ ضخامت ورق به میلی‌متر را نشان می‌دهد به عبارت دیگر نام نمونه عبارتست از نمونه با یک سخت کننده قائم و یک سخت کننده افقی و ضخامت ورق ۳/۲ میلی‌متر. شکل ۶ سیزده نمونه دیوار برشی فولادی با آرایش‌های مختلف سخت کننده را نشان می‌دهد که با توجه به سه ضخامت ۱/۳، ۲/۳ و ۳/۲ در مجموع ۳۹ عدد نمونه مدلسازی شده مورد بررسی قرار گرفت.



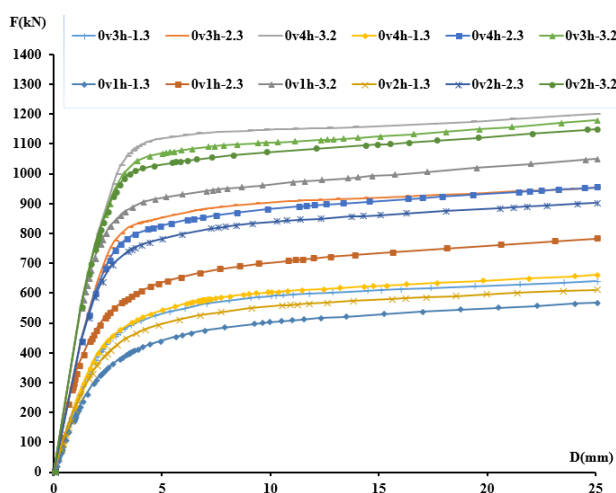
شکل ۶: نمونه‌های دیوار برشی فولادی با سخت کننده

۳-۲- تحلیل نتایج

بارگذاری نمونه‌ها بصورت بارافزون و در تراز تیر آن‌ها صورت پذیرفت. پس از مدلسازی و بارگذاری نمونه‌ها تا حد تسلیم شدگی ورق منحنی‌های بار-تغییر مکان آنها به دست آمد.

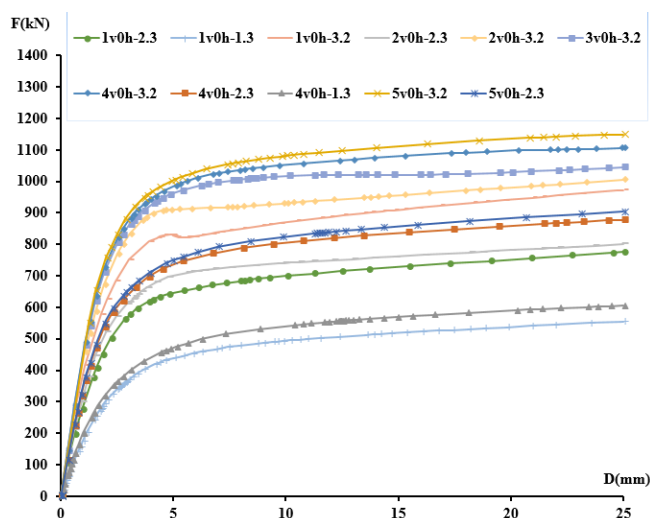
۳-۳- بررسی منحنی بار-تغییر مکان تحت تحلیل بار افزون

در اثر فرآیند افزودن سخت‌کننده به ورق فولادی برشی، انتظار می‌رود که مقاومت نهایی و سختی پانل افزایش یابد. در شکل ۷ نمودار بارافزون نمونه‌های دارای سخت‌کننده‌های صرفاً افقی با ضخامت‌های مختلف ورق با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقاومت و سختی نمونه‌ها با افزایش سخت‌کننده‌ها و ضخامت ورق افزایش پیدا می‌کند.



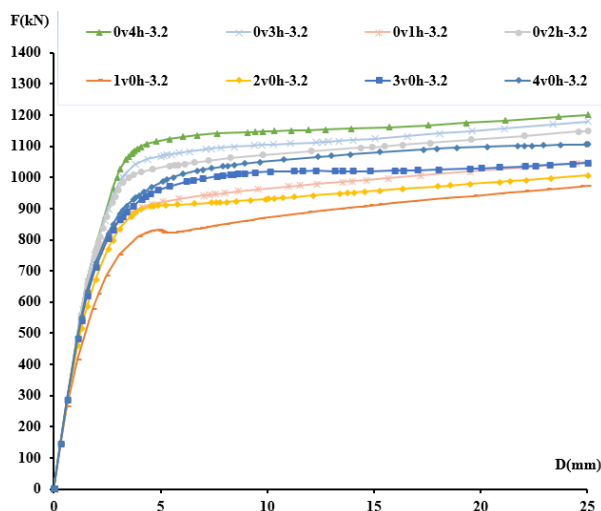
شکل ۷: نمودار بارافزون نمونه‌های با سخت‌کننده افقی

در شکل ۶ نمودار بارافزون نمونه‌های دارای سخت‌کننده‌های صرفاً قائم با ضخامت‌های مختلف ورق با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها و ضخامت ورق، مقاومت و سختی نمونه افزایش پیدا می‌کند.



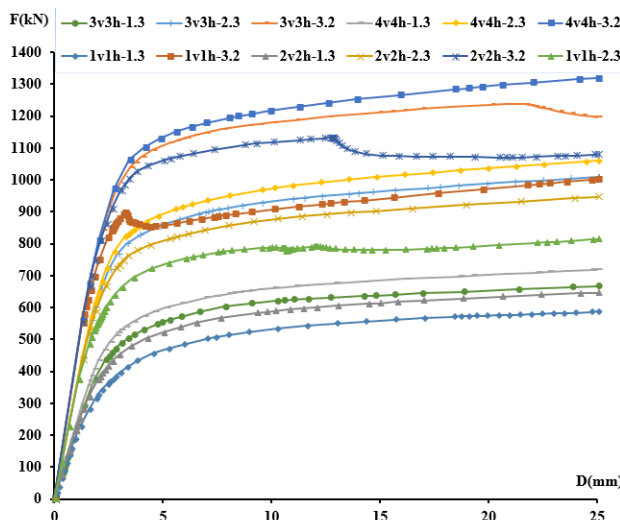
شکل ۸: نمودار بارافزون نمونه‌های با سخت‌کننده قائم

به منظور بررسی اثر سخت کننده های افقی و قائم، در یک ضخامت ورق ثابت مثلاً $3/2$ میلی متری، مطابق شکل ۹ نمونه های با سخت کننده های صرفاً افقی و صرفاً قائم مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده می شود اثر سخت کننده های افقی بر روی سختی و مقاومت مدل ها بیشتر بوده که این مسأله می تواند مربوط به طول بیشتر دهانه نسبت به ارتفاع و در نتیجه طول بیشتر سخت کننده های افقی نسبت به قائم باشد که البته تحقیق بیشتری در این زمینه نیاز است.



شکل ۹: مقایسه نمونه های دارای سخت کننده افقی و دارای سخت کننده قائم به ضخامت $3/2$ میلی متر

در شکل ۱۰ نمودار بارافزون نمونه های با سخت کننده ترکیبی در ضخامت های مختلف ورق با یکدیگر مقایسه شده است.

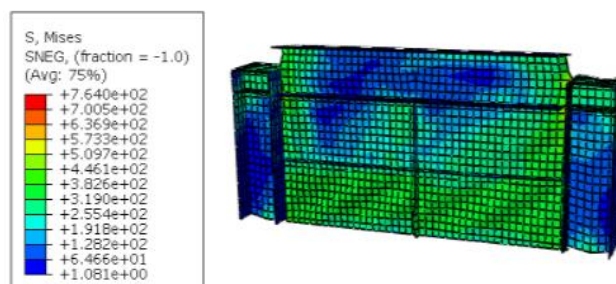


شکل ۱۰: نمودار بارافزون نمونه های با سخت کننده ترکیبی

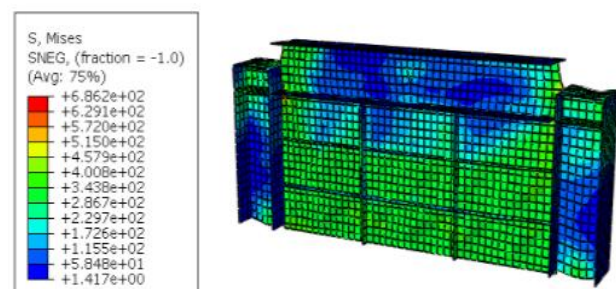
همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود بیشترین مقاومت و سختی مربوط به نمونه $4v4h$ با ضخامت $3/2$ میلی متر و کمترین آن مربوط به نمونه $1v1h$ با ضخامت $1/3$ میلی متر می باشد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش تعداد سخت کننده، سختی و مقاومت آن ها افزایش می یابد. نقاط شکستگی در منحنی ها مربوط به تسلیم شدگی برخی از زیرصفحه ها و سخت کننده ها می باشد.

۳-۴- بررسی وضعیت تنش در مدل‌ها

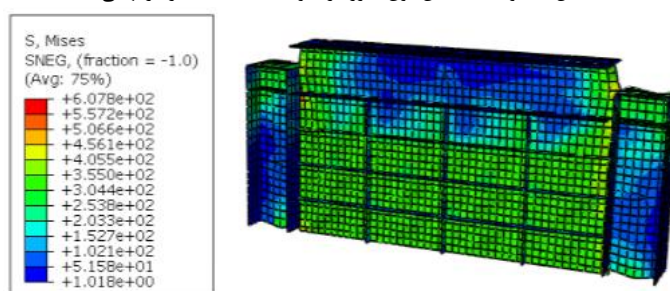
در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نحوه تشکیل میدان کشش قطری در مدل با سخت‌کننده ترکیبی به ضخامت $1/3$ میلی‌متر به عنوان نمونه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با انتخاب میزان سخت‌کننده مناسب، از مود کماتش کلی جلوگیری شده و کماتش در زیرصفحه‌ها تشکیل گردیده است. در دیگر نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف نیز به همین ترتیب کماتش در زیرصفحه‌ها تشکیل گردیده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مشاهده می‌شود بیشترین تنش، مربوط به ناحیه گوشه اتصال ورق به قاب و ناحیه اتصال تیر به ستون و کمترین تنش در ناحیه تیر و ستون می‌باشد. در ورق نیز از پایین به بالا میزان تنش کاهش یافته است.



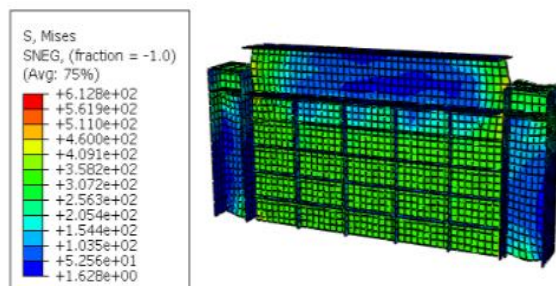
شکل ۱۱: وضعیت تنش فون میزز در نمونه 1v1h-1.3 در بار نهایی



شکل ۱۲: وضعیت تنش فون میزز در نمونه 2v2h-1.3 در بار نهایی



شکل ۱۳: وضعیت تنش فون میزز در نمونه 3v3h-1.3 در بار نهایی



شکل ۱۴: وضعیت تنش فون میزز در نمونه 4v4h-1.3 در بار نهایی

همانطور که مشاهده می‌شود هر چه تعداد سخت‌کننده‌ها افزایش می‌یابد کمانش در ورق کمتر و محدودتر شده و کمانش از زیرصفحه‌های پایین ورق شروع گردیده و به تدریج به سمت بالا گسترش می‌یابد.

۳-۵- تعیین مقاومت و سختی نمونه‌ها

مقاومت و سختی کلیه نمونه‌ها، با ترسیم منحنی دو خطی ایده‌آل محاسبه و نتایج در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: مقاومت و سختی نمونه‌ها

نمونه	ضخامت ورق (mm)			سختی ورق (mm)		
	۱/۳	۲/۳	۳/۲	۱/۳	۲/۳	۳/۲
	مقاومت (N)			سختی (N/m)		
0v1h	۵۷۷,۶۳۳	۸۳۲,۲۹۵	۱۰۶,۱۴۴,۰	۲۱۴,۲۲۰	۳۱۱,۳۱۰	۴۱۸,۰۲۰
0v2h	۶۱۳,۶۴۸	۹۰۰,۴۱۱	۱۱۵,۱۷۷,۰	۲۲۷,۸۲۰	۳۲۷,۰۰۰	۴۳۳,۰۸۰
0v3h	۶۴۵,۰۲۷	۹۵۰,۲۸۵	۱۲۰,۹۳۴,۰	۲۳۳,۲۷۰	۳۳۶,۶۱۰	۴۴۲,۷۰۰
0v4h	۶۸۰,۰۷۴	۱۰۰,۳۴۱,۰	۱۲۶,۰۳۳,۰	۲۴۱,۴۱۰	۳۴۳,۹۰۰	۴۵۵,۸۷۰
1v0h	۵۵۴,۹۳۸	۷۷۵,۸۴۵	۹۷۲,۵۸۳	۱۹۱,۱۴۰	۲۹۵,۸۳۰	۴۱۶,۵۶۰
2v0h	۵۷۲,۰۴۵	۸۰۱,۱۴۴	۱۰۰,۵۷۷,۰	۲۰۳,۵۶۰	۳۲۴,۴۱۰	۴۴۲,۶۱۰
3v0h	۵۸۷,۳۱۱	۸۴۱,۶۷۳	۱۰۴,۵۱۵,۰	۲۱۴,۲۲۰	۳۳۲,۵۰۰	۴۴۳,۵۷۰
4v0h	۶۰۵,۹۰۶	۸۷۸,۵۲۱	۱۱۰,۶۳۶,۰	۲۲۷,۸۲۰	۳۴۱,۵۰۰	۴۴۹,۶۹۰
5v0h	۶۳۱,۱۴۴	۹۰۴,۲۱۵	۱۱۴,۸۶۱,۰	۲۳۳,۲۷۰	۳۶۰,۵۸۰	۴۵۴,۶۷۰
1v1h	۵۸۷,۰۲۲	۹۰۷,۳۲۰	۱۰۰,۱۷۵,۰	۲۲۴,۷۸۰	۳۴۱,۵۰۰	۴۳۳,۰۸۰
2v2h	۶۴۶,۴۹۸	۹۴۶,۶۲۰	۱۰۷,۹۷۷,۰	۲۳۳,۲۷۰	۳۵۰,۲۰۰	۴۳۷,۰۶۰
3v3h	۶۶۶,۶۳۷	۱۰۰,۸۵۱,۰	۱۱۹,۶۸۳,۰	۲۳۶,۰۲۰	۳۵۷,۶۱۰	۴۴۸,۵۷۰
4v4h	۷۱۸,۷۲۰	۱۰۵,۹۴۰,۰	۱۳۱,۸۵۳,۰	۲۴۲,۲۷۰	۳۶۷,۴۵۰	۴۵۹,۲۵۰

۳-۶- ارائه رابطه تعیین ضخامت ورق معادل

با استفاده از روش اندرکنش ورق و قاب ارائه شده توسط صبوری [۹]، می‌توان مقاومت و سختی ورق دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده را به دست آورد. رابطه (۴) مقدار مقاومت و رابطه (۵) مقدار سختی ورق بدون سخت‌کننده را نشان می‌دهد.

$$F = \frac{bt}{\tau} \sigma_0 \quad (۴)$$

$$K_w = \frac{Ebt}{\tau \square} \quad (۵)$$

در روابط فوق، σ_0 تنش حدجاری شدن ورق فولادی در آزمایش تک محوری کششی، t ضخامت ورق فولادی، E ضریب ارتجاعی، b عرض ورق و d ارتفاع ورق می‌باشد.

روابط فوق بر اساس تئوری میدان کششی قطری و فقط برای دیوارهای برشی فولادی نازک بدون سخت‌کننده کاربرد دارد. دیوارهایی که در آن‌ها ورق، قبل از تسلیم‌شدگی برشی داخل صفحه دچار کمانش شده و در اثر میدان کششی قطری و مقاومت پس کمانشی، تحمل نیرو می‌نمایند. اما تاکنون روابط مشخصی برای تعیین سختی و مقاومت ورق‌های تقویت‌شده ارائه نشده است. میزان و مقدار سخت‌کننده‌ها در ورق می‌تواند باعث دو مود کمانشی کلی و موضعی گردد که مود کمانش کلی به دلیل کاهش سختی و مقاومت، مدنظر نبوده و لذا مود

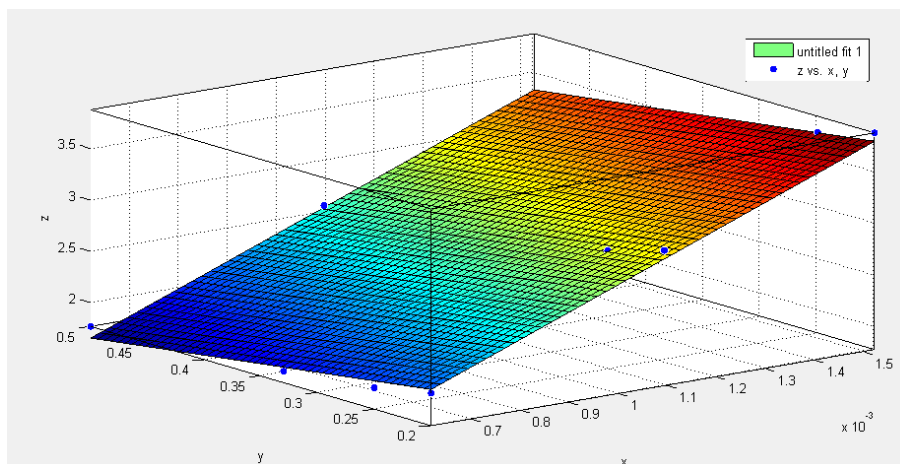
کمانش موضعی در زیرصفحه‌ها مطلوب است. در عین حال مقدار سخت‌کننده‌ها می‌تواند خود باعث ایجاد دو مود تسلیم در زیرصفحه‌ها گردد. چنانچه مقدار سخت‌کننده‌ها از اندازه‌ای بیشتر شود، زیرصفحه‌ها خود همانند یک صفحه چاق عمل نموده و قبل از ورود به مرحله کمانش، دچار تسلیم‌شدگی برشی داخلی صفحه می‌گردند که این مود به دلیل افزایش تعداد سخت‌کننده‌ها، کاملاً غیر اقتصادی است. لذا در این مقاله، مقدار سخت‌کننده‌ها به گونه‌ای تعبیه شده است که در زیرصفحه‌ها، کمانش قبل از تسلیم‌شدگی برشی رخ داده و اصطلاحاً زیرصفحه‌ها، خود همانند یک ورق نازک عمل کنند. در ادامه، بر اساس مطالعه ۳۹ پانل برشی تقویت شده روابطی ارائه می‌گردد که در آن بتوان ضخامت ورق بدون سخت‌کننده معادل با ورق دارای تقویت را محاسبه نموده و سپس از روابط ساده ارائه شده برای ورق‌های بدون تقویت (روابط ۴ و ۵) بتوان سختی و مقاومت این گونه ورق‌ها را محاسبه و در طراحی به کار گرفت.

پارامترهای مد نظر در تعیین ضخامت ورق معادل از روی پارامترهای ورق تقویت شده عبارتند از: ضخامت ورق دارای سخت‌کننده، لاغری ورق دارای سخت‌کننده که عبارت از نسبت بعد بزرگتر پانل به ضخامت ورق می‌باشد و نسبت عرض، طول و مساحت هریک از زیرصفحه‌ها به عرض، طول و مساحت کل ورق دارای سخت‌کننده.

روابطی که از طریق این پارامترها به دست می‌آید به دو دسته تقسیم می‌شود که هر کدام با سه پارامتر معین می‌گردد. در دسته اول، رابطه‌ای بین سه پارامتر، نسبت عرض زیرصفحه به عرض کل صفحه (d^2/d) ، یا نسبت طول صفحه به طول کل صفحه (b^2/b) ، یا نسبت مساحت زیرصفحه به مساحت کل صفحه (A^2/A) و لاغری ورق با سخت‌کننده تقسیم بر توان ۴ ضخامت ورق دارای سخت‌کننده (λ/t^4) و ضخامت ورق بدون سخت‌کننده (t) ارائه شده است و در دسته دوم رابطه‌ای بین سه پارامتر، تعداد سخت‌کننده (n) ، لاغری ورق دارای سخت‌کننده تقسیم بر توان ۴ ضخامت ورق دارای سخت‌کننده (λ/t^4) و ضخامت ورق بدون سخت‌کننده (t) ارائه شده است. در تمام روابط بدست آمده از الگوی $Z = a + bx + cy$ استفاده شده است. علاوه بر این برای هر دسته از روابط معادلات مجزایی برای تعیین سختی و مقاومت بر اساس ضخامت ورق معادل ارائه شده است.

۴- ارائه روابط برای تعیین مقاومت دیوار برشی فولادی دارای سخت‌کننده

با تعیین پارامترهای نسبت عرض زیرصفحه به عرض کل صفحه (d^2/d) ، لاغری ورق دارای سخت‌کننده تقسیم بر توان ۴ ضخامت ورق دارای سخت‌کننده (λ/t^4) و ضخامت ورق بدون سخت‌کننده (t) برای ۱۲ نمونه دارای سخت‌کننده افقی ۱۲ نقطه در فضا به دست می‌آید، که در آن $x = \lambda/t^4$ و $y = d^2/d$ ، $z = t$ می‌باشد. با عبور صفحه‌های از این ۱۲ نقطه در فضا مطابق شکل ۱۴، رابطه ۶ که در آن ضخامت ورق معادل t برای ورق بدون سخت‌کننده در حالت وجود سخت‌کننده‌های افقی ارائه شده است، به دست می‌آید.



شکل ۱۴: صفحه عبور داده شده بر ۱۲ نقطه مربوط به ورق دارای سخت‌کننده افقی

رابطه ۶ در واقع ضخامت ورق معادل برای حالت ورق دارای سخت کننده افقی بوده که با استفاده از مقدار t به دست آمده از رابطه ۶ و جایگذاری آن در رابطه‌ها، می‌توان مقاومت ورق دارای سخت کننده افقی را بر اساس روابط ساده مدل اندرکنش ورق با قاب محاسبه نمود.

$$t = 3.8 - 0.0024 \lambda/t^4 - 1.5 d'/d \quad (۶)$$

با تعیین پارامترهای تعداد سخت کننده (n)، لاغری ورق دارای سخت کننده تقسیم بر توان ۴ ضخامت ورق دارای سخت کننده (λ/t^4) و ضخامت ورق بدون سخت کننده (t) برای نمونه‌ها با سخت کننده افقی ۱۲ نقطه در فضا به دست می‌آید، که $z = t$ ، $y = n$ و $x = \lambda/t^4$ می‌باشد. با رسم این ۱۲ نقطه در فضا و عبور صفحه‌ای از آنها رابطه ۷ بدست می‌آید.

$$t = 2.9 - 0.0024 \lambda/t^4 + 0.16 n \quad (۷)$$

به همین ترتیب با به دست آوردن پارامترهای ۱۵ نمونه دارای سخت کننده قائم و ۱۲ نمونه دارای سخت کننده ترکیبی به ترتیب ۱۵ و ۱۲ نقطه در فضا ترسیم شده و با عبور صفحه‌ای با معادله خطی، رابطه مورد نظر به دست آمده است.

تنها تفاوت در پارامتر y رابطه می‌باشد که در نمونه دارای سخت کننده قائم مقدار y برابر b'/b (نسبت عرض زیرصفحه به عرض صفحه) و در نمونه دارای سخت کننده ترکیبی مقدار y برابر A'/A (نسبت مساحت زیرصفحه به مساحت صفحه) می‌باشد. روابط ۸ و ۹ روابط نوع اول و دوم برای تعیین مقاومت دیوار برشی دارای سخت کننده‌های قائم را نشان می‌دهد.

$$t = 3.3 - 0.002 \lambda/t^4 - 1.1 b'/b \quad (۸)$$

$$t = 2.66 - 0.002 \lambda/t^4 + 0.1 n \quad (۹)$$

و رابطه نوع اول برای تعیین مقاومت دیوار برشی دارای سخت کننده‌های ترکیبی برابر رابطه ۱۰ می‌باشد.

$$t = 3.6 - 0.002 \lambda/t^4 - 2.5 A'/A \quad (۱۰)$$

۴-۱- ارائه روابط برای تعیین سختی دیوار برشی فولادی دارای سخت کننده

برای تعیین سختی ورق تقویت شده و تعیین ضخامت ورق معادل، مجدداً فرآیند تعیین روابط، مشابه روابط تعیین مقاومت، صورت پذیرفته و روابط زیر به دست آمد.

رابطه نوع اول و دوم برای تعیین سختی دیوار برشی دارای سخت کننده‌های افقی برابر روابط ۱۱ و ۱۲ بدست آمد.

$$t = 3.5 - 0.0024 \lambda/t^4 - 0.8 d'/d \quad (۱۱)$$

$$t = 3 - 0.0024 \lambda/t^4 + 0.1 n \quad (۱۲)$$

همچنین رابطه نوع اول برای تعیین سختی دیوار برشی دارای سخت کننده‌های قائم برابر رابطه ۱۳ و رابطه نوع اول برای تعیین سختی دیوار برشی فولادی دارای سخت کننده‌های ترکیبی برابر رابطه ۱۴ به دست آمد.

$$t = 3.5 - 0.0026 \lambda/t^4 - b'/b \quad (۱۳)$$

$$t = 3.4 - 0.0025 \lambda/t^4 - 0.8 A'/A \quad (۱۴)$$

۲-۴- کنترل صحت روابط ارائه شده تعیین ضخامت، ورق معادل دیوار برشی فولادی دارای سخت کننده

به منظور صحت سنجی روابط پیشنهادی ۶ الی ۱۴ دو حالت دیوار برشی فولادی یکی با نسبت ابعاد ۱/۵ برابر نسبت به ابعاد دیوارهای برشی فولادی قبلی و دیگری با نسبت ابعاد ۲ برابر نسبت به ابعاد آن‌ها در نظر گرفته شده، مقاومت و سختی این دو نسبت از مدل‌ها از طریق روابط ۶ الی ۱۴ و پس از تعیین ضخامت ورق معادل به کمک روش اندرکنش ورق و قاب محاسبه شده و بار دیگر مقاومت و سختی مدل‌ها از طریق مدلسازی نمونه‌ها در نرم افزار آباکوس به دست آمد. در نهایت با مقایسه مقاومت و سختی به دست آمده از دو روش و تعیین درصد خطا، صحت رابطه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۵- مدلسازی در نرم افزار و تعیین مقاومت و سختی نمونه‌ها

در نرم افزار آباکوس دیوار برشی فولادی دارای سخت کننده با عرض ۳۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۳/۲ میلی‌متر و بار دیگر دیوار برشی فولادی دارای سخت کننده با عرض ۴۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۳/۲ میلی‌متر در سه حالت دارای سخت کننده افقی و سخت کننده قائم و سخت کننده ترکیبی مدلسازی گردید. تعداد سخت کننده‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شد که فاصله آن‌ها در مقایسه با نمونه‌های قبلی تغییر چندانی نداشته باشد. همچنین ممان اینرسی نیز با توجه به این که کماتش کلی رخ ندهد تعیین گردید (سخت کننده‌های به عرض ۶ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب گردید). پس از مدلسازی و بارگذاری بارافزون، مقاومت و سختی مدل‌ها تعیین گردید.

۶- پیش بینی مقاومت و سختی نمونه‌ها با روابط پیشنهادی

نمونه‌های به ابعاد $۳/۲ \times ۹۰۰ \times ۲۱۵۰$ و $۳/۲ \times ۹۰۰ \times ۴۲۰۰$ مجدداً با توجه به روابط ۶ الی ۱۴ مورد بررسی قرار گرفت. لذا ابتدا ضخامت ورق معادل با توجه به نوع و تعداد سخت کننده‌ها تعیین و سپس با استفاده از روابط ۴ و ۵، مقاومت و سختی نمونه‌ها تعیین گردید.

۷- مقایسه نتایج و تعیین درصد خطا

پس از محاسبه مقاومت و سختی مدل‌ها به دو روش اجزاء محدود و روش ضخامت معادل ورق و روش اندرکنش ورق با قاب، نتایج با یکدیگر مقایسه و میزان خطا و دقت مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۳ یکی از چندین مقایسه بین دو روش برای نمونه‌های مختلف بوده که به عنوان نمونه برای سخت کننده صرفاً افقی ارائه شده است. مقدار درصد خطا در واقع تفاوت مقدار مقاومت یا سختی روش اجزاء محدود و روش اندرکنش ورق با قاب (با استفاده از ضخامت ورق معادل) تقسیم بر مقدار روش اجزاء محدود است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار خطا به کمتر از ۱۴ درصد محدود گردیده و لذا روابط پیشنهادی از اعتبار کافی برخوردار است. با استفاده از دیگر روابط نیز روند مشابهی انجام و مقدار خطا در تمامی روابط به کمتر از ۱۵ درصد محدود شده بود. لذا در مجموع، روابط از اعتبار کافی برخوردار هستند.

جدول ۳: مقایسه مقاومت نمونه‌های دارای سخت کننده افقی به دو روش

b = ۳۱۵۰ mm (عرض ورق)						
تعداد سخت کننده افقی	λ/t^4	d/d	t رابطه ۶ (mm)	F رابطه ۴ (نیوتن)	F آباکوس (نیوتن)	درصد خطا
۱	۹/۳۹	۰/۵	۳۱۰۲۷	۱۴۷,۸۱۶,۲	۱۵۹,۴۵۵,۰	-۷/۸۷
۲	۹/۳۹	۰/۳۳	۳۱۲۸	۱۶۰,۳۶۶,۶	۱۷۱,۶۵۴,۰	-۷/۱۰
۳	۹/۳۹	۰/۲۵	۳۱۴۰	۱۶۶,۱۲۵,۶	۱۷۳,۵۸۳,۰	-۳/۸۸
۴	۹/۳۹	۰/۲	۳۱۴۸	۱۶۹,۷۸۷,۴	۱۹۳,۵۴۰,۰	-۱۳/۴۰
b = ۴۲۰۰ mm (عرض ورق)						
۱	۱۲/۵۲	۰/۵	۳۱۰۲	۱۹۶,۵۹۹,۳	۱۸۳,۹۴۰,۰	۶/۹۵
۲	۱۲/۵۲	۰/۳۳	۳۱۲۷	۲۱۳,۱۹۹,۸	۱۸۸,۳۸۵,۰	۱۱/۶۴
۳	۱۲/۵۲	۰/۲۵	۳۱۳۹	۲۲۱,۰۱۱,۸	۱۹۵,۶۲۹,۰	۱۱/۴۸
۴	۱۲/۵۲	۰/۲	۳۱۴۷	۲۲۵,۸۹۴,۳	۲۲۷,۲۹۹,۰	-۰/۶۲

۸- صحت سنجی روابط با نمونه‌های با ابعاد دیگر

با توجه به این که در صحت سنجی روابط، از مدل‌هایی استفاده شد که نسبت به مدل‌های قبل فقط عرض ورق تغییر نموده و سعی شد شرایط قبلی از جمله فاصله بین سخت‌کننده‌ها در مدل‌ها حفظ شود لذا برای اطمینان بیشتر به صحت روابط از سه نمونه دیوار برشی فولادی دیگر که ابعاد متفاوت تری دارند استفاده گردید. بر این اساس سه نمونه با ابعاد ورق، $۶ \times ۲۵۰۰ \times ۵۰۰۰$ ، $۵ \times ۲۵۰۰ \times ۲۵۰۰$ و $۴ \times ۱۸۰۰ \times ۴۲۰۰$ که به ترتیب دارای، ۷، ۳ و ۴ سخت‌کننده افقی می باشند در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل گردیده و مقاومت هر یک از نمونه‌ها تعیین شد. از طرف دیگر مقاومت و سختی نمونه‌ها از طریق رابطه ۶ و ۴ پیش بینی گردید. جدول ۴ مقایسه بین نتایج را نشان می‌دهد.

جدول ۴: مقایسه بین مقاومت دو روش اجزاء محدود و روابط پیشنهادی

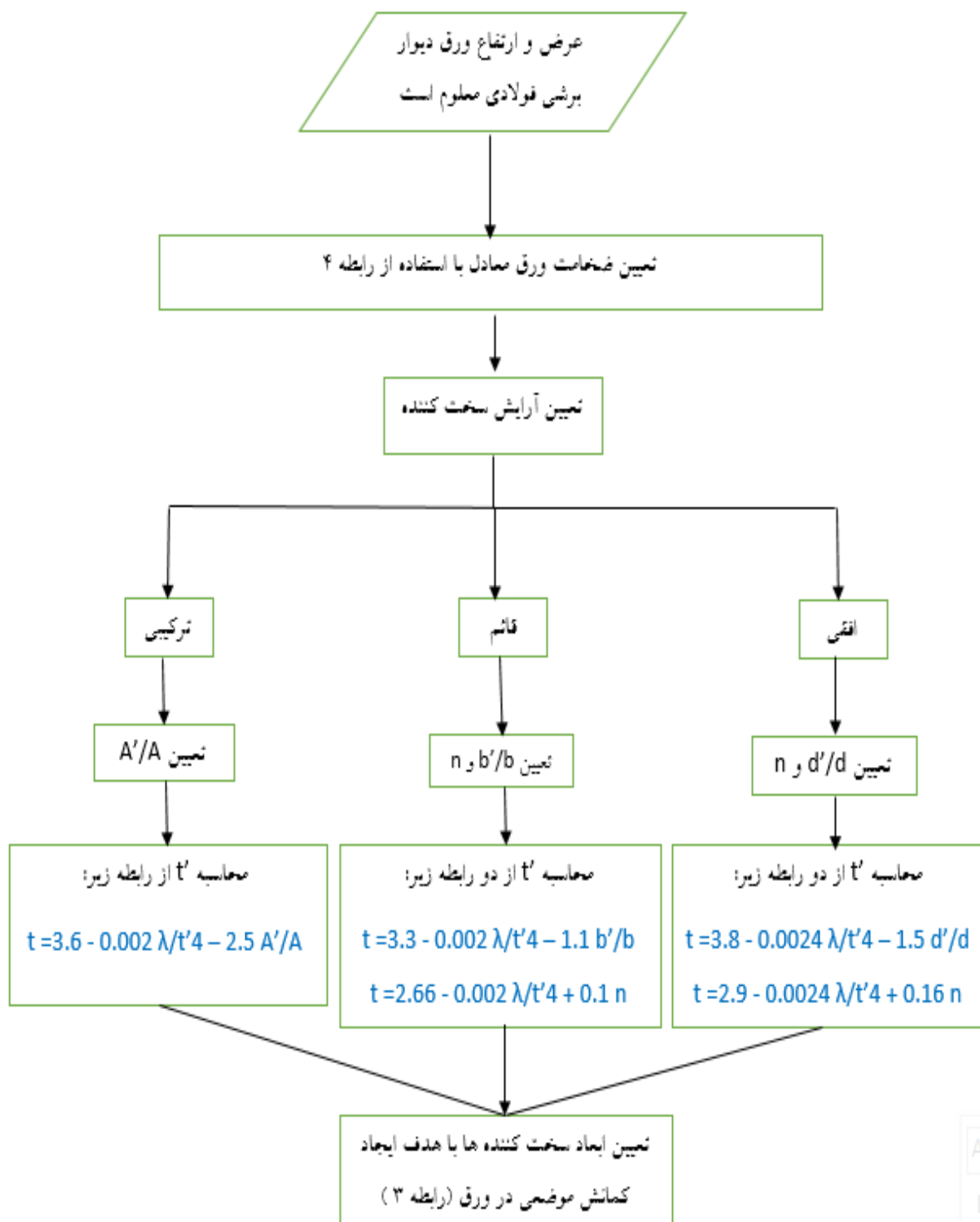
۵۰۰۰ X ۲۵۰۰ X ۶ (ابعاد ورق)						
درصد خطا	F آباکوس (نیوتن)	F رابطه ۴ (نیوتن)	t رابطه ۶ (mm)	d'/d	λ/t^4	تعداد سخت‌کننده افقی
۶/۹۸	۲۶۰,۳۰۷,۰	۲۷۹,۸۴۹,۲	۳/۶۲	-۰/۱۲۵	-۰/۶۴	۷
۵۰۰۰ X ۲۵۰۰ X ۵ (ابعاد ورق)						
۱۳/۵	۲۲۹,۳۱۸,۰	۲۶۵,۱۳۹,۹	۳/۴۲	-۰/۲۵	۱/۶	۳
۴۲۰۰ X ۱۸۰۰ X ۴ (ابعاد ورق)						
۷/۹	۲۰۹,۱۹۰,۰	۲۲۷,۲۰۹,۲	۳/۴۹	-۰/۲	۴/۱	۴

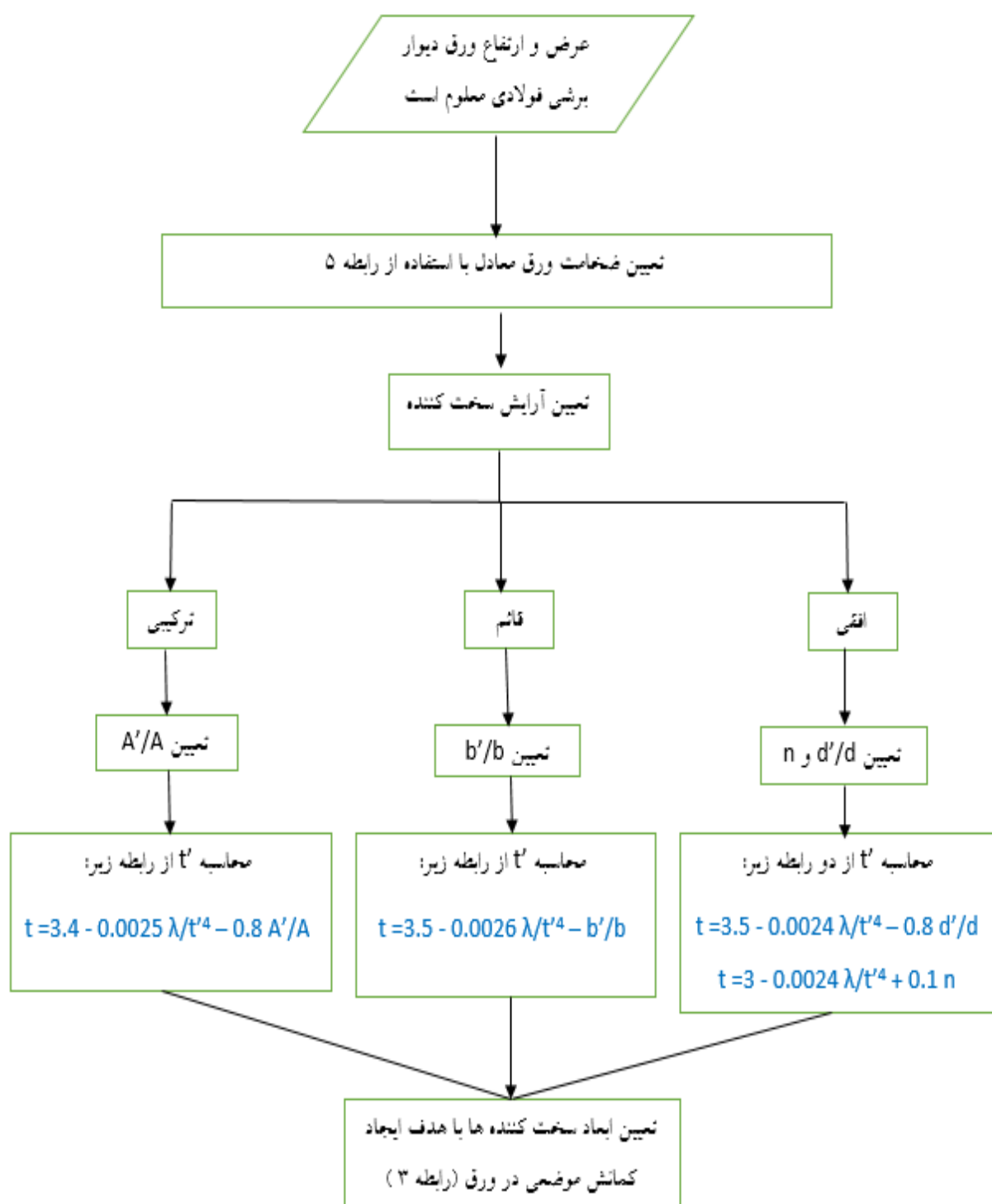
همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود درصد خطا به کمتر از ۱۵ درصد محدود بوده در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌هایی که دارای ابعاد متفاوتی نسبت به نمونه ابتدایی هستند، روابط پیشنهادی می‌تواند با دقت مناسبی ضخامت معادل ورق بدون سخت‌کننده را پیش بینی نماید.

۹- ارائه روند طراحی دیوارهای برشی فولادی دارای سخت‌کننده

به منظور جمع‌بندی بحث‌های گذشته و ارائه یک روش ساده جهت طراحی دیوارهای برشی فولادی دارای سخت‌کننده، شکل‌های ۱۵ و ۱۶ فلوجارت طراحی دیوارها بر اساس مقاومت و سختی با استفاده از روابط مدل اندرکنش ورق با قاب در دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده و استفاده از مفهوم ضخامت ورق معادل را نشان می‌دهند. بر این اساس، ابتدا فرض می‌شود که قرار است یک دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده با استفاده از رابطه ۴ یا ۵ طراحی شده و ضخامت ورق معادل (t) محاسبه شود. سپس با انتخاب نوع آرایش سخت‌کننده‌ها، ضخامت ورق دارای سخت‌کننده (t^*) محاسبه و بر اساس آن و با توجه به رابطه ۳، مقدار سخت‌کننده کافی برای جلوگیری از کمانش کلی محاسبه می‌گردد. نکته حائز اهمیت استفاده از ضریب رفتار دیوارهای برشی فولادی دارای سخت‌کننده در محاسبه نیروهای جانبی طراحی می‌باشد.

شکل ۱۵: فلوجارت طراحی دیوار برشی فولادی با سخت کننده بر اساس مقاومت





شکل ۱۶: فلوجارت طراحی دیوار برشی فولادی با سخت کننده بر اساس سختی

۹- نتیجه گیری

۳۹ مدل دیوار برشی فولادی دارای سخت کننده با آرایش های سخت کننده صرفاً افقی، صرفاً قائم و ترکیبی مدلسازی و تحت تحلیل بار افزون قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر سخت کننده های افقی در مقاومت و سختی نمونه ها بیشتر از سخت کننده های قائم و اثر سخت کننده های ترکیبی از دو حالت افقی و قائم بیشتر است. براساس مطالعات ریاضی، روابط ۶ الی ۱۴ برای تعیین ضخامت ورق معادل دیوار برشی فولادی دارای سخت کننده به منظور مدلسازی دیوارهای دارای سخت کننده با دیوارهای بدون سخت کننده و استفاده از روابط ۴ و ۵، جهت تعیین مقاومت و سختی پانل های برشی، ارائه گردید.

مقایسه نتایج مقاومت و سختی پانل های دارای سخت کننده به دو روش اجزاء محدود و روابط مدل اندرکنش ورق با قاب، نشان داد که روابط پیشنهادی برای تعیین ضخامت ورق معادل، از دقت مناسبی برای نسبت های مختلف دیوارهای برشی فولادی و آرایش های مختلف سخت کننده برخوردار بوده و مقدار خطا به زیر ۱۵ درصد محدود می گردد.

در پایان نیز دو فلوجارت برای طراحی دیوارهای برشی فولادی دارای سخت کننده با استفاده از مفهوم ضخامت ورق معادل و روابط اندرکنش ورق با قاب در دیوارهای برشی فولادی بدون سخت کننده ارائه گردید.

مراجع

[1] Takahashi, Y., Takeda, T., Takemoto, Y., and Takagi, M. " Experimental study on thin steel shear walls and particular steel bracings under alternative horizontal load ", Preliminary Report, IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures acted on by Well Defined Repeated loads, Lisbon, Portugal, PP.185-191. (1973).

[2] Gholhaki, M. " Non-Linear Analysis of stiffened steel plate shear wall with opening." Ms Thesis in Civil Engineering, Civil Engineering College at K.N. Toosi university, Tehran, Iran. (2000).

[3] Alinia, M.M., Dastfan, M.. " Cyclic behavior, deformability and rigidity of stiffened steel shear panels ". Journal Of Constructional Steel Research. 63: 554-563. (2007).

[4] Saeid Sabouri-Ghomi, Mehdi H. K. Kharrazi, Salah-E-Deen Mam-Azizi and Ramin Asad Sajadi. " Buckling Behavior Improvement Of Steel Plate Shear Wall Systems " struct.design tall spec. Build.17, 823-837 (2008).

[5] Sabouri, S and Asad Sajadi, R. " Experimental investigation of force factor and energy absorption ductile steel plate shear walls with stiffeners and without stiffener ". National conference on steel & structures (2011).

[6] Jian-Guo Nie, Li Zhu, Jian-sheng Fan, Yi-Lung Mo. " Lateral resistance capacity of stiffened steel plate shear walls " Thin-Walled Structures 67-155-167. (2013).

[۷] مجید قلهکی و محمد باقر قدکساز، "اثر بازشوی متمرکز و گسترده بر پارامترهای رفتاری پانل های برشی فولادی تقویت شده"، ژورنال مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۳، پاییز ۹۴.

[8] ABAQUS (2011), Standard version 6.10.1, and ABAQUS standard users.

[۹] سعید صبوری قمی، سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی، مقدمه ای بر دیوار های برشی فولادی، نشر انگیزه، بهار ۱۳۸۰.