

Investigating the effect of corrugated plates Arrangements on the Seismic Behaviour of Steel Shear Wall Frames

Amir Hossein Noruzi¹, Ali Jalaeifar^{2*}

1- MSc of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad university, North Tehran branch, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad university, North Tehran branch, Tehran, Iran

ABSTRACT

Nowadays, the use of corrugated steel shear walls with sinusoidal, triangular, and trapezoidal waveforms, which are a type of corrugated steel wall without the use of stiffeners, is recommended for delaying the premature occurrence of buckling in the plate. The arrangement of corrugated plates in the structural frame alters seismic parameters; therefore, this research focuses on investigating various arrangements of inclined corrugated plates. To achieve this, experimental specimens are first validated under cyclic quasi-static loading using ABAQUS finite element software. Subsequently, the design of four different arrangements of inclined corrugated sheets with three types of trapezoidal, sinusoidal, and triangular waveforms, each with three different thicknesses, is conducted and compared with vertical and horizontal arrangements. Finally, an optimized model is introduced. Based on the obtained results, the triangular waveform demonstrated better seismic performance in terms of energy absorption, initial stiffness, and ultimate strength. As for thickness, increasing the wall thickness improved its seismic behavior. Additionally, the arrangement with the highest energy absorption and ultimate strength was found in the first arrangement; however, its behavior in the cyclic curve was asymmetric. Therefore, by implementing the triangular waveform in arrangement number 1 in a double configuration, this issue has been addressed in the optimized model.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 January 2024

Revise Date: 17 May 2024

Accept Date: 24 July 2024

Keywords:

Corrugated Steel Shear Walls
Inclined Corrugated Plates
Seismic Behavior
Energy Absorption
Strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.431357.3303](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.431357.3303)

*Corresponding author: Ali Jalaeifar
Email address: a.jalaeifar@iau-tnb.ac.ir

مطالعه اثر آرایش ورق‌های مورب در رفتار لرزه‌ای قاب‌های دارای دیوار برشی فولادی

امیرحسین نوروزی^۱، علی جلائی فر^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

چکیده

امروزه استفاده از دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار که نوعی دیوار برشی فولادی سخت شده بدون استفاده از سخت‌کننده می‌باشد، برای به تأخیرانداختن وقوع کماتش زود هنگام در ورق توصیه شده است. نحو قرارگیری ورق موج‌دار در قاب سازه باعث تغییر پارامترهای لرزه‌ای می‌شود؛ لذا در این پژوهش به بررسی آرایش‌های مختلف ورق‌های موج‌دار مورب پرداخته می‌شود. برای این کار ابتدا با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای از نوع شبه‌استاتیکی صحت سنجی می‌شوند، سپس به طراحی ۴ نوع آرایش مختلف ورق موج‌دار مورب در سه نوع شکل موج دوزنقه‌ای، سینوسی و مثلثی با سه نوع ضخامت مختلف انجام گرفته است و همراه با آرایش‌های قائم و افقی مقایسه خواهد شد. در نهایت یک مدل بهینه شده معرفی می‌گردد. بر اساس نتایج به دست آمده، شکل موج مثلثی از نظر جذب انرژی، سختی اولیه و مقاومت نهایی عملکرد لرزه‌ای بهتری داشته است، از نظر ضخامت با بیش تر شدن ضخامت دیوار، رفتار لرزه‌ای آن بهبود پیدا کرده است. همچنین اغلب بیش‌ترین جذب انرژی و مقاومت نهایی در آرایش شماره ۱ بوده است؛ اما رفتار این آرایش در منحنی چرخه‌ای نامتقارن بوده است. بنابراین با اجرای آرایش شماره ۱ مثلثی به صورت دویل به عنوان مدل بهینه شده این مشکل مرتفع گردیده است.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار، ورق موج‌دار مورب، رفتار لرزه‌ای، جذب انرژی، مقاومت.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2024.431357.3303	۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۳/۰۵/۰۳	۱۴۰۳/۰۵/۰۳	۱۴۰۳/۰۲/۲۸	۱۴۰۲/۱۱/۱۰
			*نویسنده مسئول:		
			علی جلائی فر		
			a.jalaeefar@iau-tnb.ac.ir		
			پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

زمین لرزه، لرزش ناگهانی سطح زمین به واسطه آزاد شدن انرژی ناشی از جابه‌جایی صفحات تکتونیکی در امتداد گسل‌ها می‌باشد. نیروی زلزله می‌تواند آسیب‌های جدی و حتی خرابی را برای سازه‌ها به وجود آورد. در طول زمان محققان گوناگونی سیستم‌های مختلفی را برای تحمل بارهای جانبی مورد بررسی قرار داده‌اند که در این میان، پارامترهای مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و اقتصادی بودن طرح از بااهمیت‌ترین پارامترهایی می‌باشد که تأمین هم‌زمان آن‌ها در یک سیستم به‌راحتی صورت نمی‌پذیرد. دیوار برشی فولادی یک سیستم باربر جانبی به‌منظور مقاومت در برابر برش جانبی طبقه، لنگر ایجاد شده از برش جانبی و همچنین کنترل دررفت سازه تعیین می‌شود. این دیوار فقط به‌منظور مقابله در برابر بارهای جانبی اجرا می‌شود و نمی‌توان از آن انتظار مقاومت در برابر بارهای ثقلی را داشت. هر چند ممکن است ستون‌های اطراف ورق فولادی و تیرهای طبقات در بالا و پایین ورق فولادی تحت اثر بارهای ثقلی قرار بگیرند. در این سیستم قاب نیز ممکن است در تحمل بارهای جانبی وارده مشارکت داشته باشد، اما تأمین سختی و مقاومت جانبی این سیستم به عملکرد ورق فولادی برمی‌گردد [۱].

از مزیت‌های قابل توجه در دیوار برشی فولادی می‌توان به شکل‌پذیری بالا، سختی مناسب، رفتار هیستریزس پایدار، جذب انرژی و مقاومت بالا اشاره نمود، از طرفی دیگر به دلیل وزن کم دیوار برشی فولادی باعث کاهش هزینه‌ها و اقتصادی شدن سیستم باربر جانبی و فونداسیون می‌شود [۲]. در ساختار دیوار برشی فولادی به دلیل گستردگی اتصال‌ها و مصالح در قاب، توزیع تنش‌ها بهینه‌تر از سیستم‌های مقاوم دیگر در برابر بارهای صورت‌گرفته و رفتار این دیوار در ناحیه غیرخطی مناسب‌تر است. در این بین، دیوارهای برشی موجدار با توجه به قابلیت‌های و مزیت‌های بهتر در جذب انرژی در سالیان اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

امامی و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۳ آزمایش‌هایی بر روی دیوار برشی فولادی انجام دادند. در این پژوهش تجربی برای مقایسه نسبت شکل‌پذیری، سختی و ظرفیت جذب انرژی سه نوع دیوار برشی موج‌دار، ذورنقه ای قائم، ذورنقه ای افقی و دیوار برشی سخت نشده انتخاب شد. نتایج نشان داد سختی اولیه، ظرفیت جذب انرژی و نسبت شکل‌پذیری نمونه‌های موج‌دار در مقایسه با نمونه سخت نشده بیش‌تر می‌باشد و صرفاً مقاومت نهایی نمونه سخت نشده نسبت به نمونه‌های موج‌دار بیش‌تر می‌باشد. تانگ و جیو [۴] در سال ۲۰۱۸ طی پژوهشی به بررسی مقاومت دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار به همراه سخت‌کننده پرداختند، آن‌ها با قراردادن یک نبشی در وسط دیوار و با استفاده از تحلیل المان محدود از نوع غیرخطی، دیوار را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که استفاده از سخت‌کننده خواهد توانست کماتش ورق را به‌خوبی کاهش داده و قادر است شکل‌پذیری و مقاومت برشی را ارتقا بخشد. لو و همکاران [۵] در سال ۲۰۲۱ در خصوص تجزیه و تحلیل عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی کامپوزیتی موج‌دار-فولاد-صفحه‌ای بر اساس شکست گوشه آزمایشاتی انجام شد. این مطالعه به بررسی عملکرد هیستریزس دیوارهای برشی کامپوزیتی ورق فولادی موج‌دار می‌پردازد. شش دیوار برشی برای تحقیقات آزمایشگاهی برای تجزیه و تحلیل فرآیند شکست و حالت، نمودارهای هیستریزس، نمودارهای پوش دسته محنی، ظرفیت استهلاک انرژی و سختی طراحی شد. نتایج نشان می‌دهد نسبت به دیوار برشی فولادی ساده، دیوار برشی کامپوزیتی با ورق فولادی موج‌دار در عملکرد هیستریزس، اتلاف انرژی و کاهش زوال سختی بهبود چشمگیری داشت. همچنین در دیوار برشی فولادی کامپوزیتی موج‌دار افقی مقاومت نهایی، انرژی کرنش الاستیک، انرژی کرنش پلاستیک و مصرف انرژی بالا رفته و باعث بهبود در تنش تسلیم فولاد شده است. وانگ و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۱ به بررسی رابطه بین سختی درون صفحه و سختی خارج صفحه در سیستم دیوار برشی قاب با عضو مهارلبه ای برای رسیدن به یک عملکرد خوب در صفحه می‌پردازند. برای بررسی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی با صفحه موج‌دار سه نمونه تحت بارگذاری سیکلی قرار داده شد. جن و همکاران [۷] در سال ۲۰۲۲ بررسی عددی و آزمایشگاهی دیوارهای برشی ورق فولادی موج‌دار چند شبکه ای مونتاز شده انجام شد. هدف از این مطالعه توسعه یک دیوار برشی صفحه فولادی موج‌دار چند شبکه ای مونتاز شده است که می‌تواند به طور قابل توجهی سختی پیش کماتش خارج از صفحه را افزایش دهد. برای تأیید رفتار لرزه‌ای، سه آزمایش چرخه‌ای شبه‌استاتیکی انجام شد و نشان داد که می‌تواند ظرفیت اتلاف انرژی بهتری را حفظ کند. وای یو و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۲ به بررسی عملکرد دیوار برشی صفحه فولادی موج‌دار افقی ساخته شده با شکل خاص پرداختند. یک دیوار برشی فولادی موج‌دار با شکل خاص ساخته شده که می‌تواند در داخل دیوارهای سازه پنهان شود برای کاربرد در ساختمان‌های مسکونی

پیشنهاد شده است. آزمایش‌های شبه‌استاتیکی بر روی دو نمونه دیوار برشی فولادی موج‌دار با شکل خاص انجام و شبیه‌سازی‌های المان محدود نیز انجام شد. پس از صحت سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی یک مطالعه پارامتری با پیکربندی دیوارها و موقعیت‌های ستون داخلی مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که صفحات برشی موج‌دار تحت کمانش الاستیک زودرس قرار گرفتند، بنابراین منجر به افت ناگهانی مقاومت در هنگام کمانش و سطوح مقاومت پایین پس از کمانش شدند. پانل‌های برشی با موفقیت وارد حالت تسلیم برشی شدند و تا رسیدن به ۲٪ درفیت در حالت برشی پایدار در صفحه باقی ماندند.

۲- ضرورت تحقیق

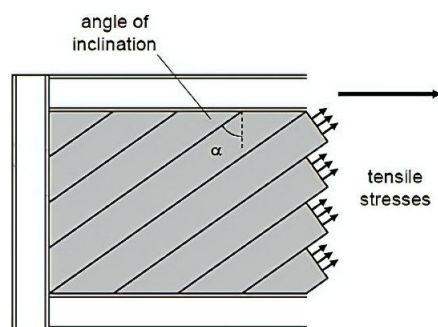
سیستم‌های دیوارهای برشی فولادی موج‌دار با توجه به قابلیت‌های آن، از اهمیت بالایی برخوردار است. دیوار برشی فولادی موج‌دار مقاومت برشی الاستیک و سختی خارج از صفحه بالایی را تحمل می‌کند. دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار قادر به تسلیم در سطح نیرویی از پیش تعیین شده است و به واسطه تغییر شکل غیر ارتجاعی بدون هیچ‌گونه باریک‌شدگی در نمودارهای چرخه‌ای، باعث جذب انرژی می‌شود. علاوه بر این با توجه به هندسه ورق در صفحات موج‌دار، نسبت انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری سیستم دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار بسیار زیاد می‌باشد. در حالی که مطالعات متعددی در مورد آرایش صفحات موج‌دار عمودی و افقی در دیوارهای برشی انجام شده است، این موضوع نیازمند توجهی فراتر از آرایش‌های موجود می‌باشد. این مهم شامل آرایش‌های مختلفی است که می‌تواند بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی موج‌دار تأثیر بگذارد. بنابراین، این مطالعه به بررسی آرایش‌های مختلف صفحات موج‌دار با شکل موج‌های مختلف می‌پردازد و تأثیر ضخامت‌های مختلف صفحه را در این آرایش‌ها بررسی می‌کند. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به مدل‌سازی ۳۳ نمونه‌ی دیواربرشی فولادی دارای ورق موج‌دار مورب در شکل ورق‌های دوزنقه‌ای، سینوسی و مثلثی در ضخامت‌های مختلف پرداخته و نتایج موردنظر استخراج شده است. این نتایج شامل شکل‌پذیری، مقاومت نهایی، سختی اولیه و جذب انرژی می‌باشد که با مقایسه آن با سایر پژوهش‌ها می‌تواند نقش مهمی در انتخاب نوع آرایش دیوارهای برشی فولادی در صنعت ساخت و ساز ایفا نماید.

۳- تئوری

رفتار دیوار برشی فولادی با استفاده از نظریه‌ی میدان کشش قطری قابل تبیین می‌باشد. میدان کشش قطری در دیوار برشی فولادی در واقع به این صورت است که بارهای وارد شده به خود را به صورت کشش در قطر اصلی و فشار جزئی در قطر دیگر تحمل می‌کند. مقاومت کم قطر فشاری باعث می‌شود که ورق فولادی در اثر بارهای کم دچار کمانش بشود. پس از کمانش برشی ورق، توزیع تنش ورق تمایل به برگرداندن ورق به حالت پایدار را دارد، به این دلیل پس از کمانش، ورق‌ها ظرفیت باربری زیادی از خود نشان می‌دهند. درحالی‌که در سیستم‌های میله‌ای پس از کمانش باعث کاهش ظرفیت باربری و تخریب نامطلوب می‌شوند. اما در دیوار برشی فولادی این‌گونه نیست و با افزایش بار تقریباً سطح وسیعی از ورق تسلیم شده و در میدان کشش قطری مشارکت می‌کند [۱]. در ورق فولادی زاویه تنش‌های کششی (شکل ۱) که منجر به تشکیل میدان کششی قطری می‌شود، بر اساس AISC-341 [۹] به صورت (معادله ۱) محاسبه می‌گردد.

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left[\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right]} \quad (1)$$

در این رابطه t_w ، L و h به ترتیب ضخامت ورق فولادی، عرض و ارتفاع ورق، I_c و A_c به ترتیب ممان اینرسی و سطح مقطع ستون و A_b سطح مقطع تیر می‌باشد. این معادله توربن و همکاران [۱۰] جهت بررسی دیوارهای برشی لاغر و تقویت نشده ارائه شد و بر اساس تئوری میدان کشش قطری واگنر [۱۱] استوار گردید، در پیوست آیین‌نامه نامه کانادا این معادله ارائه شده است.



شکل ۱: میدان کشش قطری

ضوابط طرح و محاسبه اعضای فولادی با جان های موج دار در پیوست D بخش سیزدهم آیین نامه اروپا موسوم به اجزای سازه صفحه ای [۱۲] ارایه شده است. ضوابط این قسمت از آیین نامه، ورقهای با موج های سینوسی و دوزنقه ای را در بر میگیرد. باتوجه به رفتار مشابه دیوارهای برشی فولادی با تیروورق ها که به صورت عمودی در سازه قرار میگیرند، از این ضوابط میتوان در ارزیابی های رفتاری و طراحی آنها نیز استفاده نمود. در تیروورق های با جان موج دار، مقاومت خمشی توسط بال های کششی و فشاری و مقاومت برشی توسط جان تیروورق ها تأمین میگردد. مقاومت برشی در ورق های موج دار همانند ورق های صاف میباشد با این تفاوت که در ورقهای موج دار این مقاومت در یک ضریب کاهش ناشی از کمانش کلی و موضعی ضرب میگردد. در ورق های موج دار، کمانش کلی در کل ورق رخ داده ولی کمانش موضعی تنها در قسمت های صاف موجود در ورقهای موج دار مانند ورق های دوزنقه ای شکل رخ میدهد [۱۳]. مقاومت برشی ورق های موج دار مطابق با (معادله ۲) محاسبه میگردد.

$$V_{Rd} = X_c \frac{f_y}{\gamma_t \sqrt{3}} at \quad (2)$$

در رابطه ی بالا a پهنای ورق در راستای موج ، t ضخامت ورق ، V_{Rd} مقاومت برشی مورق موج دار ، f_y مقاومت تسلیم و X_c ضریب کاهش مقاومت بر اساس کمانش جان که از روابط (معادله ۳) و (معادله ۴) بر اساس نوع کمانش موضعی یا کلی جان حاصل می-شود.

$$X_{c,l} = \frac{1.15}{0.9 + \lambda_{c,l}} \leq 1.0 \quad (3)$$

$$X_{c,g} = \frac{1.15}{0.9 + \lambda_{c,g}^2} \leq 1.0 \quad (4)$$

در روابط بالا $\lambda_{c,l}$ و $\lambda_{c,g}^2$ لاغری جان و به صورت تابعی از تنش کمانش برشی بحرانی الاستیک و مقاومت تسلیم در کمانش محلی و کلی می باشند که از روابط (معادله ۵) و (معادله ۶) محاسبه می گردند.

$$\bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr,l} \sqrt{3}}} \quad (5)$$

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr,g} \sqrt{3}}} \quad (6)$$

اساساً مد حاکم در ورق های موج دار سینوسی کمانش برشی کلی است چرا که به دلیل عدم وجود قسمت صاف در ورق های موج دار با موج های سینوسی نسبت به ورق های با موج های دوزنقه ای از ایجاد کمانش موضعی ممانعت به عمل می آورد. در آئین نامه اروپا مقاومت کمانش برشی کلی بر اساس این که جان ورق موج دار به عنوان یک ورق ارتوتروپیک با سختی های D_x و D_y در جهت های طولی و عرضی جان عمل نماید محاسبه میشود. سختی های ورق در جهت های x و y جهت محاسبه لاغری های جان $\bar{\lambda}_{c,g}$ منجر به مقادیری میگردد که در محاسبه فاکتور کاهش جهت کمانش برشی کلی استفاده میشوند. تنش برشی بحرانی کشسان جان مطابق با معادله (معادله ۷) و تنش بحرانی برشی موضعی نیز مطابق معادله (معادله ۸) ارائه شده است [۱۳].

$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t\alpha^2} \sqrt[4]{D_x D_y^3} \quad (7)$$

$$\tau_{cr,l} = (5.34 + \frac{2Hs}{2t\alpha}) \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{2ts}{s} \quad (8)$$

در روابط بالا مطابق (شکل ۲) D_x و D_y سختی صفحه در جهت های x و y بوده که برابر است با:

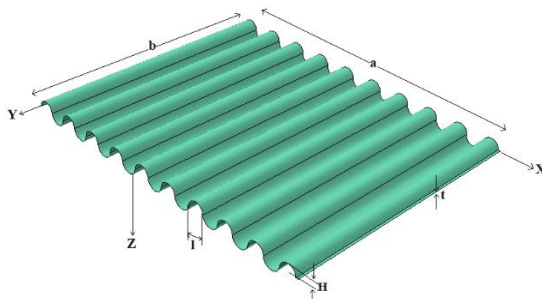
$$D_x = \frac{1}{s} \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (9)$$

$$D_y = EI_y \quad (10)$$

در روابط بالا ν ضریب پواسون، l طول گام موج، E ضریب کشسانی، I_y ممان اینرسی صفحه در جهت y مطابق رابطه (معادله ۱۱) ، H ارتفاع گام موج صفحه a ، راستای عمود بر موج ورق ، b بعد صفحه در راستای ورق و S طول غیر تاشده یک موج مطابق با رابطه (معادله ۱۲) می باشد.

$$I = 0.5H^2h \left[1 - \frac{0.81}{1 + 2.5\left(\frac{H}{2l}\right)^2} \right] \quad (11)$$

$$s = l \left(1 + \frac{\pi^2 H^2}{4l^2} \right) \quad (12)$$



شکل ۲: مشخصات هندسی ورق موج دار سینوسی

۴- صحت سنجی مدل سازی

برای بررسی عملکرد دیوار برشی فولادی با ورق موج دار و صحت سنجی مدل، نمونه‌های آزمایشگاهی امامی و همکاران [۳] شامل سه نوع دیوار برشی فولادی با ورق صاف، موج دار قائم و موج دار افقی انتخاب و مورد مدل سازی قرار گرفتند.

در این مدل سازی کلیه ی المان ها از نوع Shell می باشد. طول و عرض ورق قرار گرفته در قاب به ترتیب ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی متر می باشد. تیرهای بالا و پایین از نوع HE-B140 و ستون ها از نوع HEB160 می باشد. ضخامت ورق ۱.۲۵ میلی متر و زاویه ورق موج دار دوزنقه ای ۳۰ درجه مطابق (شکل ۵) می باشد. مشخصات و ابعاد قاب سه مدل مطابق (جدول ۱) می باشد.

جدول ۱: مشخصات طراحی نمونه ها بر حسب میلی متر [۳]

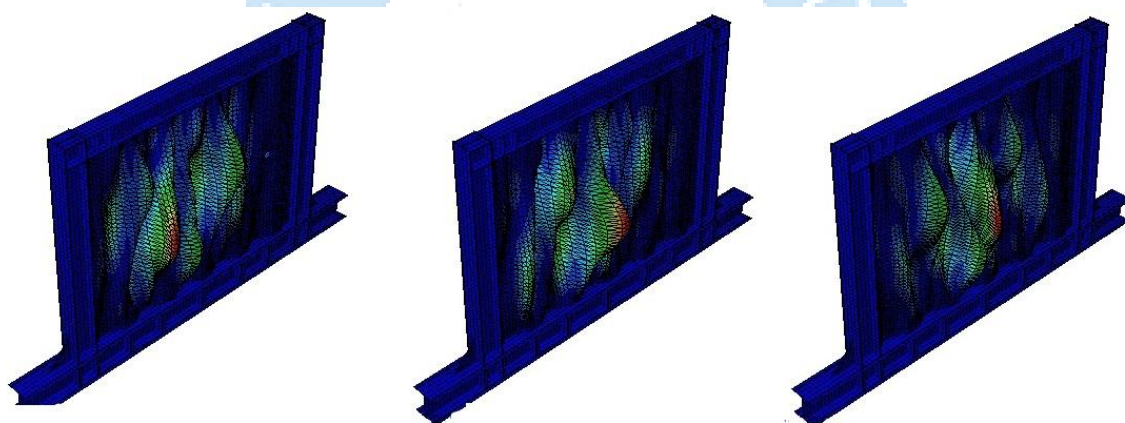
Specimens	Beam	Column	Plate thickness	L/t	h _s /t	Type panel
No. 1	HE-B140	HE-B160	1.25	1600	1200	Unstiffened
No. 2	HE-B140	HE-B160	1.25	1600	1200	Vertical corrugated
No. 3	HE-B140	HE-B160	1.25	1600	1200	Horizontal corrugated

در نمونه آزمایشگاهی امامی و همکاران جنس فولاد مصرفی از فولاد ST44 برای قاب و فولاد ST12 با تنش تسلیم پایین برای ورق موج دار دوزنقه ای بکار گرفته شده است، چگالی ۳۷۸۰ kg/m³، مدول یانگ ۲۱۰ GPa و ضریب پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح نمونه آزمایشگاهی در (جدول ۲) نشان داده شده است. [۳]

جدول ۲: مشخصات مصالح [۳]

Type	Young's modulus E (GPa)	Yield stress f_y (MPa)	Ultimate stress f_u (MPa)	f_y/f_u	Percent elongation (%)
Plate	210	207	290	0.71	41
Column	210	300	443	0.67	33
Beam	210	288	456	0.63	37

برای رفتار سخت‌شدگی با استفاده از سخت‌شدگی غیرخطی سینماتیک-ایزوتروپیک که در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS به نام سخت‌شدگی ترکیبی می‌باشد می‌توان رفتار بسیار دقیق خصوصاً در مدل‌هایی با بارگذاری چرخه‌ای به‌دست آورد؛ لذا از این نوع سخت‌شدگی استفاده است. در این پژوهش معیار تسلیم موردنظر از معیار تنش فون میسر می‌باشد. در نمونه‌های آزمایشگاهی بر خلاف نمونه‌های عددی که در یک محیط بدون نقص مدل‌سازی می‌شوند ممکن است در اثر حمل‌ونقل و عوامل محیطی دچار اعوجاج و ناصافی باشند و با توجه به این که میدان کشش قطری پس از کمانش ورق تشکیل خواهد شد؛ لذا برای انجام تحلیل غیرخطی در حالت بارگذاری سیکلیک نیاز به یک تحلیل کمانشی می‌باشد. بنابراین برای اعمال نقص اولیه ابتدا یک تحلیل کمانشی با سه حالت کمانش در دیوار انجام خواهد شد که نمونه‌ای از این سه حالت کمانش برای دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار قائم مطابق شکل ۴ نشان داده شده است. در ادامه نتایج این سه حالت کمانش با اعمال ضرایبی در مدل هندسی اولیه اعمال می‌شود و شبیه‌سازی نقص اولیه در ورق ایجاد می‌شود و در نهایت دیوار با نقص اولیه در تحلیل اصلی بکار گرفته می‌شود.

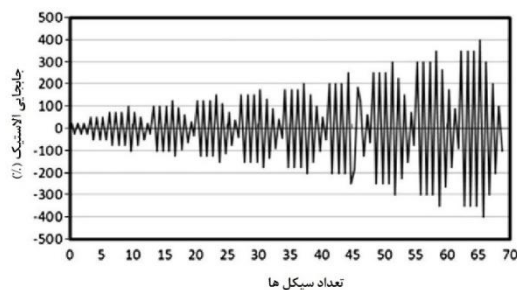


شکل ۳: تحلیل کمانش

پس از انجام تحلیل کمانشی حال تحلیل Dynamic implicit به‌صورت شبه‌استاتیکی که در آن روش حل انتگرال‌گیری به‌صورت ضمنی و از دسته تحلیل‌های استاندارد می‌باشد استفاده می‌شود تا با توجه به موج‌دار بودن ورق و پیچیدگی‌های مدل و مواجه شدن دائمی بعضی مدل‌ها با خطای واگرایی، مدل بصورت مناسبی همگرا شود. زمان انجام تحلیل ۳۰۰ در نظر گرفته شده است که هر گام زمانی با $\Delta t=1$ افزایش یافته است.

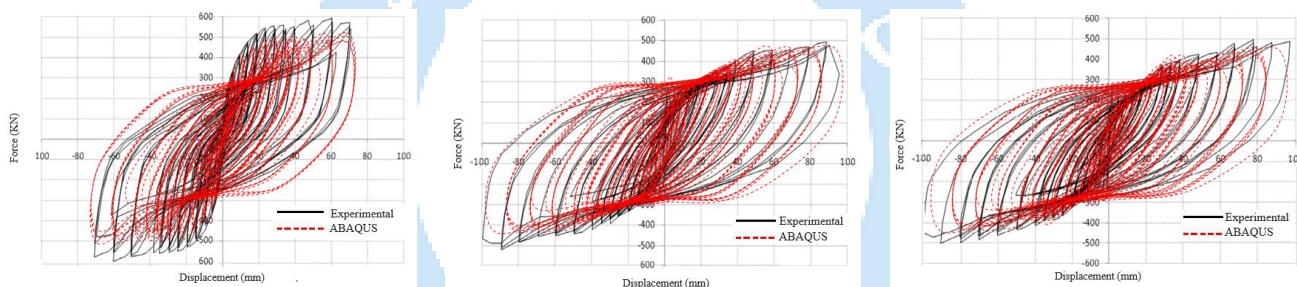
مطابق مدل آزمایشگاهی اتصال ستون‌ها و ورق فولادی به تیر صلب کف از نوع گیردار می‌باشد. به این جهت در مدل‌سازی درجات آزادی و دورانی در هر سه راستا اصلی مقید شده و برابر صفر می‌باشد. در تیر بالای قاب در مدل آزمایشگاهی مهار جانبی در اطراف تیر نصب شده است تا از حرکت در راستای عمود بر صفحه جلوگیری شود.

پروتکل بارگذاری در مدل‌های تحت بارگذاری رفت و برگشتی در آزمایش امامی و همکاران مطابق (شکل ۴) می‌باشد که این پروتکل بارگذاری بر اساس AC154 می‌باشد که محور قائم آن میزان جابه‌جایی و محور افقی آن تعداد سیکل‌ها می‌باشد و نوع جابه‌جایی کنترل می‌باشد.



شکل ۴: پروتکل بارگذاری

به منظور صحت سنجی مدل‌سازی و تحلیل دیوار برشی فولادی موج‌دار، مدل آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با ورق صاف، موج‌دار قائم و موج‌دار افقی مقاله امامی و همکاران در محیط برنامه اجزا محدود آباکوس مدل‌سازی شد و نتایج نمودارهای چرخه‌ای به دست آمده از مدل اجزا محدود با نمودارهای چرخه‌ای آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج صحت سنجی سه نمونه در (شکل ۵) و (جدول ۳) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، نتایج مدل ارائه شده از قابلیت خوبی برخوردار می‌باشد.



ج) نمونه ورق موج‌دار افقی

ب) نمونه ورق موج‌دار

الف) نمونه ورق صاف

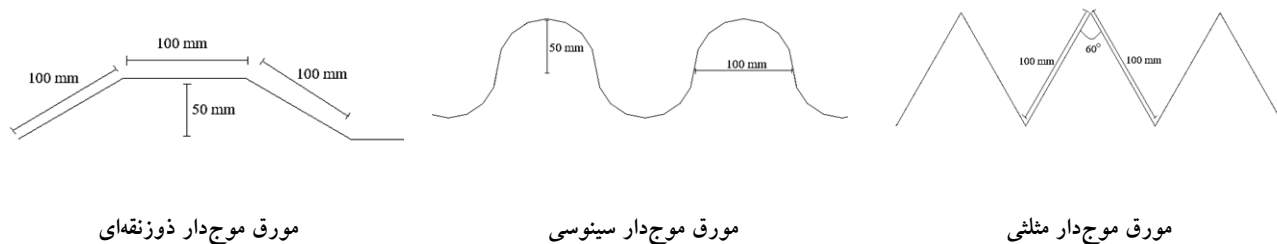
شکل ۵: مقایسه نتایج نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی با نمونه‌های المان محدود

جدول ۳: مقایسه مقاومت نهایی و میزان جذب انرژی نمونه های مختلف آزمایشگاهی با نمونه های المان محدود

نام نمونه	نوع مدل	مقاومت نهایی (KN)	جذب انرژی در دریفت ۴ درصد (KN m)
نمونه ورق صاف	آزمایشگاهی	۴۹۰	۴۵۰
	المان محدود	۴۶۱	۴۷۰
نمونه ورق موجدار	آزمایشگاهی	۵۰۰	۴۵۰
	المان محدود	۴۶۸	۴۵۸
نمونه ورق موجدار افقی	آزمایشگاهی	۵۸۰	۵۰۰
	المان محدود	۵۵۰	۵۲۳

۵- مدل سازی

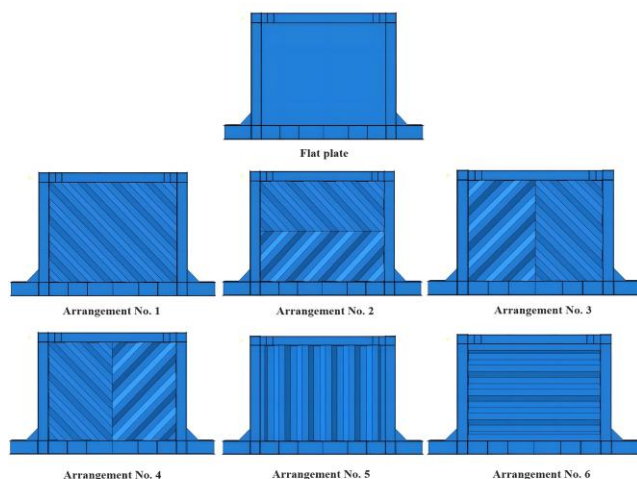
جهت مقایسه مدل ها با مقاله صحت سنجی در ابتدای مدل سازی، تمام متغیرها از قبیل شرایط مرزی، بارگذاری، نوع مصالح، ابعاد و اندازه قاب را مطابق مقاله صحت سنجی امامی و همکاران [۳] انتخاب می شود و متغیر متفاوت ما آرایش های مختلف قرارگیری ورق موجدار در درون قاب می باشد به این صورت که ابتدا آرایش های مختلف ورق موجدار با شکل موج سینوسی، دوزنقه ای و مثلثی با ضخامت ۱.۲۵ میلی متر مدل سازی و با یک دیگر مقایسه می شوند سپس با توجه به نتایج به دست آمده یکی از سه نوع شکل موج را انتخاب کرده و به بررسی ضخامت های ۰/۷۵ و ۱.۷۵ میلی متر ورق پرداخته و برای این مدل ها پارامترهای لرزه ای شامل سختی اولیه، جذب انرژی، مقاومت نهایی به دست آورده و بایک دیگر مقایسه خواهد شد. مشخصات مصالح قبلا در قسمت صحت سنجی در جدول (جدول ۲) ارائه شده است. شکل موج ورق مورد استفاده به صورت دوزنقه ای، سینوسی و مثلثی (شکل ۶) می باشد که زاویه موج ورق دوزنقه ای ۳۰ درجه و مثلثی ۶۰ درجه خواهد بود.



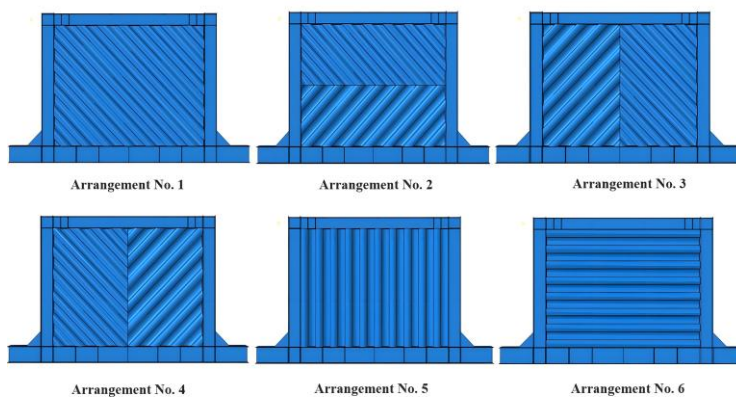
شکل ۶: مشخصات هندسی ورق ها

۵-۱- آرایش های قرارگیری ورق موجدار

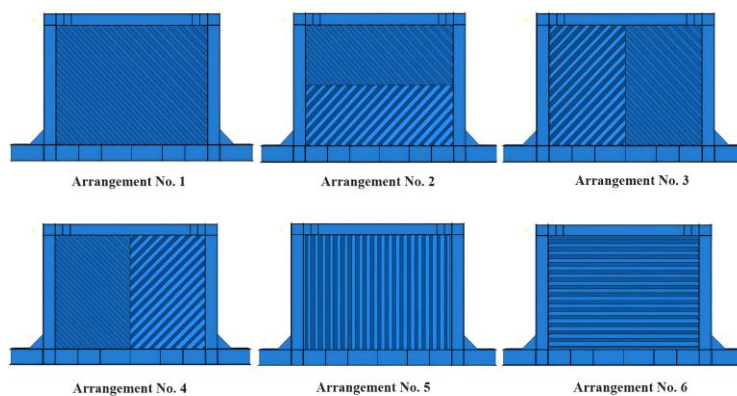
در (شکل ۷) مدل های آرایش ورق موجدار دوزنقه ای و صاف، در (شکل ۸) مدل های آرایش ورق موجدار سینوسی و در (شکل ۹) مدل های آرایش ورق موجدار مثلثی نشان داده شده است.



شکل ۷: آرایش‌های ورق موج‌دار ذوزنقه‌ای و ورق صاف



شکل ۸: آرایش‌های ورق موج‌دار سینوسی



شکل ۹: آرایش‌های ورق موج‌دار مثلثی

۵-۲- نحوه نام گذاری نمونه‌ها

برای نام گذاری نمونه‌ها حرف اول به ترتیب از چپ به راست معرف، شماره آرایش مدل، شکل هندسی ورق، ضخامت ورق می‌باشد. لازم به ذکر است برای ورق موجدار دوزنقه از مخفف trap، ورق سینوسی مخفف sin، برای ورق مثلثی از مخفف tri و برای ورق صاف از کلمه flat استفاده شده است. برای مثال به (جدول ۳) توجه فرمایید.

جدول ۳: راهنمای نام گذاری نمونه‌ها

Model name	arrangement No.	Plate type	Plate thickness (mm)
flat-1.25	---	Flat	1.25
2-tri-1.25	2	triangularly	1.25
5-trap-1.25	5	trapezoidally	1.25
3-sin-1.75	3	sinusoidally	1.75

۵-۳- پارامترهای لرزه‌ای

پارامترهای لرزه‌ای در واقع شامل پارامترهایی می‌باشند که مقدار نیروی برشی وارد شده به سازه را کاهش یا انرژی وارد شده به سازه ناشی از زلزله را کاهش می‌دهند. این پارامترها شامل سختی اولیه، مقاومت نهایی، اتلاف انرژی و می‌باشند.

سختی

هر عضو سیستم برابر لرزه‌ای به اندازه سختی خود نیروی زلزله را تحمل می‌کند به عبارتی میزان نیروی زلزله وارده به هر عضو بر مبنای میزان سختی آن عضو است. در منحنی بار - تغییر مکان سختی برابر شیب منحنی در ناحیه الاستیک می‌باشد.

مقاومت نهایی

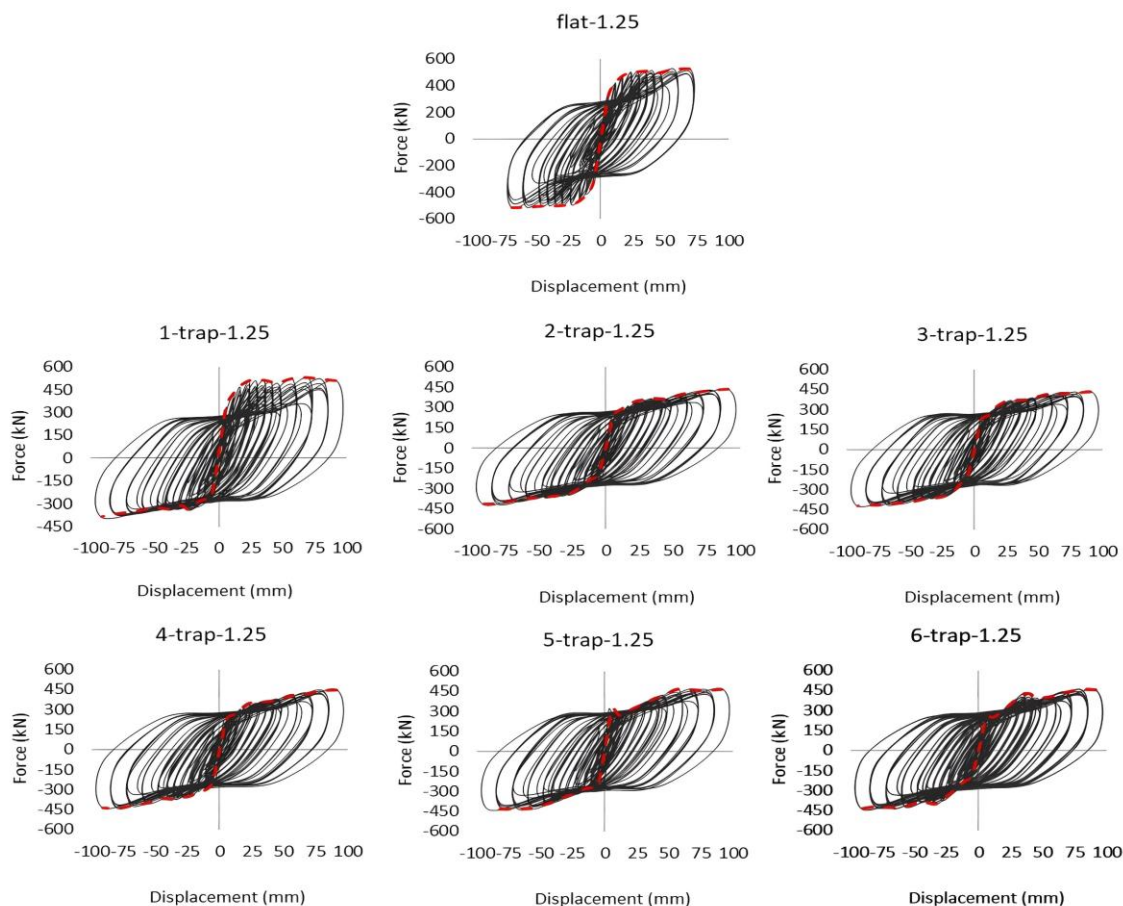
به مقدار بیشینه نیرو در منحنی پوش‌آور یا هیستریزس مقاومت نهایی گفته می‌شود و در واقع بیانگر این است که سازه این مقدار نیرو را می‌تواند تحمل کند و اگر نیرو بیش‌تر از این مقدار به سازه وارد شود سازه دچار افت مقاومت می‌شود.

جذب انرژی

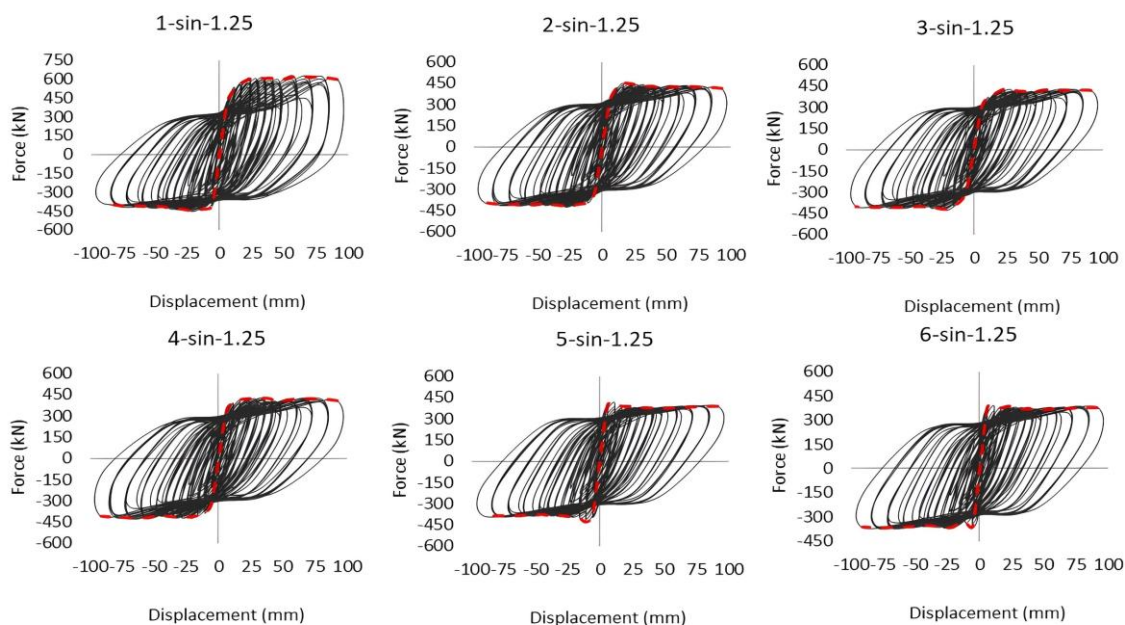
میزان جذب انرژی ناشی از زلزله به رفتار سازه در ناحیه غیرخطی وابسته است. در منحنی نیرو - تغییر مکان سطح زیر منحنی برابر با میزان اتلاف انرژی می‌باشد، در نمودار هیستریزس برای محاسبه اتلاف انرژی باید مساحت تک‌تک حلقه را محاسبه و در انتها باهم جمع می‌گردد که مجموع آن برابر اتلاف انرژی می‌باشد.

۶- بررسی شکل ورق‌ها

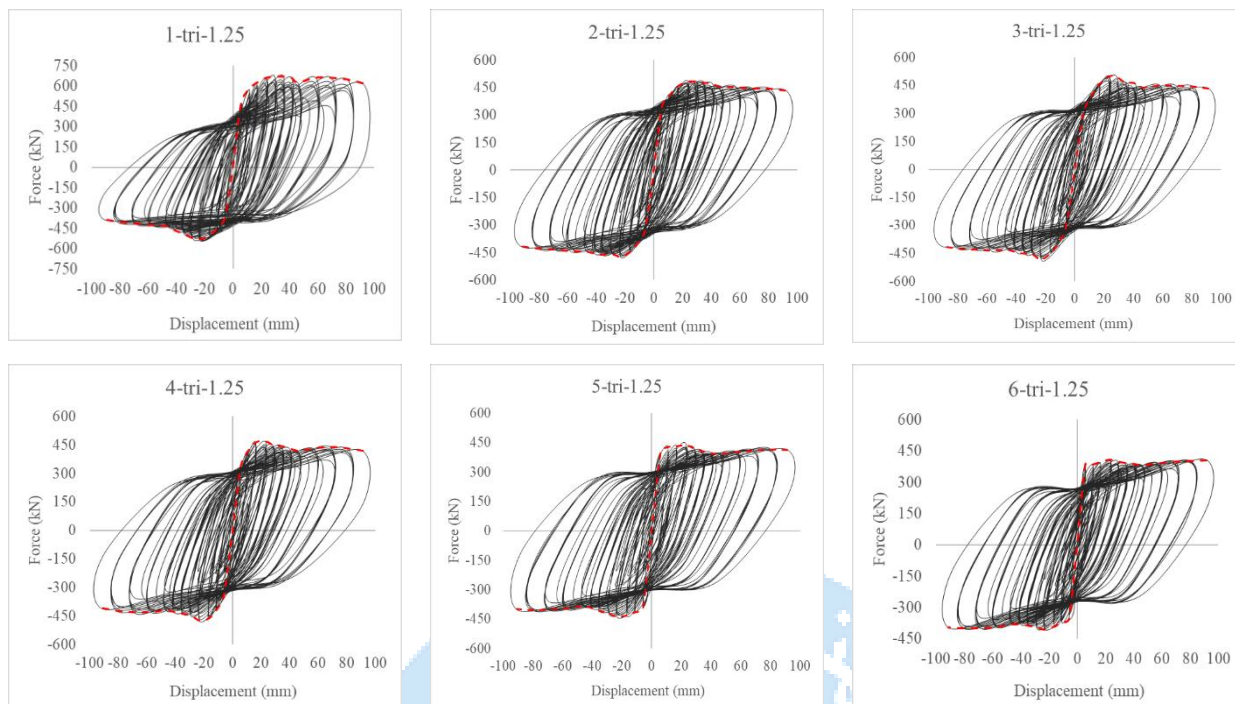
در (شکل ۱۰)، (شکل ۱۱) و (شکل ۱۲) نمودارهای هیستریزس آرایش‌ها با ورق‌های صاف، دوزنقه‌ای، سینوسی و مثلثی و نتایج آن‌ها انعکاس داده شده است. همچنین در (شکل ۱۳)، (شکل ۱۴) و (شکل ۱۵) به ترتیب به مقایسه سختی اولیه، مقاومت نهایی و شکل پذیری نمونه‌ها پرداخته شده است.



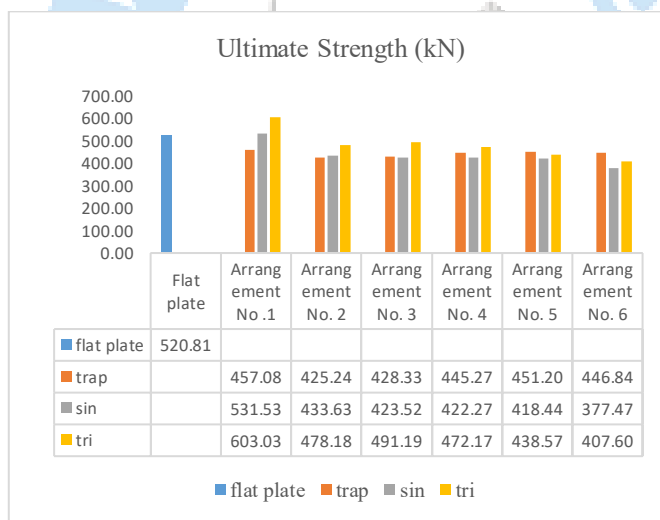
شکل ۱۰: نمودارهای هیستریزس نمونه ورق صاف و ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای با نوع آرایش



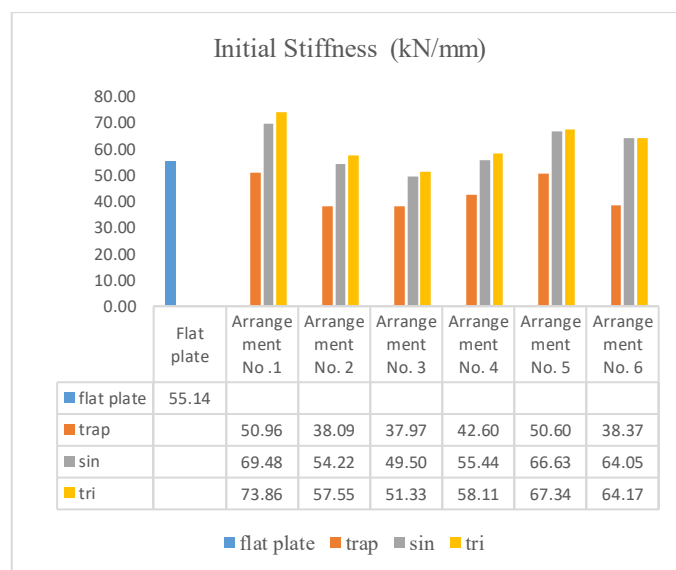
شکل ۱۱: نمودارهای هیستریزس ورق موج‌دار سینوسی با نوع آرایش



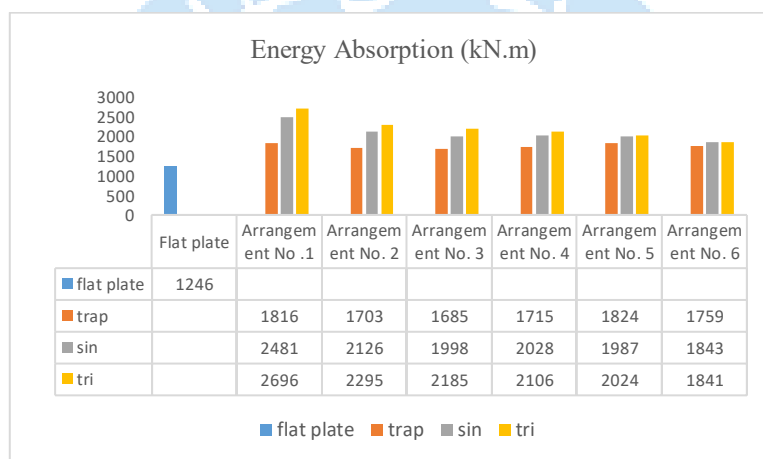
شکل ۱۲: نمودارهای هیستریزس ورق موج دار مثلثی با ۶ نوع آرایش



شکل ۱۳: نمودارهای مقایسه مقاومت نهایی شکل ورق های صاف، دوزنقه ای، سینوسی و مثلثی با ضخامت ۱.۲۵ میلی متر



شکل ۱۴: نمودارهای مقایسه سختی اولیه شکل ورق‌های صاف، دوزنقه‌ای، سینوسی و مثلثی با ضخامت ۱.۲۵ میلی‌متر



شکل ۱۵: نمودارهای مقایسه جذب انرژی شکل ورق‌های صاف، دوزنقه‌ای، سینوسی و مثلثی با ضخامت ۱.۲۵ میلی‌متر

سختی اولیه

سختی نمونه صاف برابر $55/14$ kN/mm می‌باشد همچنین بیش‌ترین مقدار سختی در نمونه‌های با ورق دوزنقه مربوط به مدل 1-trap-1.25 آرایش شماره ۱ با مقدار $50/96$ kN/mm می‌باشد. در نمونه‌های سینوسی بیش‌ترین مقدار سختی در مدل با نام 1-sin-1.25 با آرایش شماره ۱ با مقدار $69/48$ kN/mm می‌باشد. در نمونه‌های مثلثی نیز بیش‌ترین مقدار سختی مربوط به مدل 1-tri-1.25 با آرایش شماره ۱ با مقدار $73/86$ kN/mm می‌باشد. بیش‌ترین نمونه دارای سختی در بین شکل ورق‌های صاف، دوزنقه‌ای، سینوسی و مثلثی مربوط به مدل 1-tri-1.25 با آرایش شماره ۱ با شکل ورق مثلثی و مقدار $73/86$ kN/mm می‌باشد که درصد اختلاف با نمونه‌های flat-1.25، 1-trap-1.25 و 1-sin-1.25 به ترتیب برابر $25/34$ ٪، 31 ٪ و $5/93$ ٪ می‌باشد.

مقاومت نهایی

مقاومت نهایی نمونه صاف برابر $520/81$ kN می‌باشد. همچنین بیش‌ترین مقدار مقاومت نهایی در نمونه‌های با ورق دوزنقه، مربوط به مدل 1-trap-1.25 آرایش شماره ۱ با مقدار $457/08$ kN می‌باشد. در نمونه‌های سینوسی بیش‌ترین مقدار مقاومت نهایی در مدل با نام 1-

sin-1، شماره ۱ با مقدار $531/53$ kN می‌باشد. در نمونه‌های مثلثی نیز بیشترین مقدار مقاومت نهایی مربوط به مدل 1-tri-1.25 با آرایش شماره ۱ با مقدار $603/03$ kN می‌باشد همچنین در نمونه‌های مثلثی مقداری زوال مقاومت مشاهده می‌شود. بیشترین نمونه درای مقاومت نهایی در بین شکل ورق‌های صاف، دوزنقه‌ای، سینوسی و مثلثی مربوط به مدل 1-tri-1.25 با آرایش شماره ۱ و شکل ورق مثلثی با مقدار $603/03$ kN اختصاص دارد که درصد اختلاف با نمونه‌های flat-1.25، 1-trap-1.25 و 1-sin-1.25 به ترتیب برابر $13/63$ ، $24/20$ و $11/85$ ٪ می‌باشد.

جذب انرژی

جذب انرژی نمونه صاف برابر 1246 kN.m می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار سختی در نمونه‌های با ورق دوزنقه مربوط به مدل 5-trap-1.25 آرایش شماره ۵ با مقدار 1824 kN.m می‌باشد و پس از این نمونه دوزنقه ای 1-trap-1.25 با آرایش شماره ۱ و مقدار 1816 kN.m می‌باشد که اختلاف آن با نمونه 5-trap-1.25 فقط $0/4$ ٪ می‌باشد. در نمونه‌های سینوسی، مقدار جذب انرژی در نمونه 1-sin-1.25 با آرایش شماره ۱ و مقدار 2481 kN.m می‌باشد. بیشترین مقدار جذب انرژی در نمونه‌ها مثلثی نیز مربوط به مدل 1-tri-1.25 با آرایش شماره ۱ و مقدار 2696 kN.m می‌باشد. بیشترین نمونه دارای جذب انرژی در بین شکل ورق‌های صاف، دوزنقه‌ای، سینوسی و مثلثی مربوط به مدل 1-tri-1.25 با آرایش شماره ۱ با شکل ورق مثلثی و مقدار 2696 kN.m می‌باشد که درصد اختلاف با نمونه‌های flat-1.25، 1-sin-1.25 و 5-trap-1.25 به ترتیب برابر $53/78$ ، $32/34$ و $7/97$ ٪ می‌باشد.

۷- انتخاب شکل موج برتر

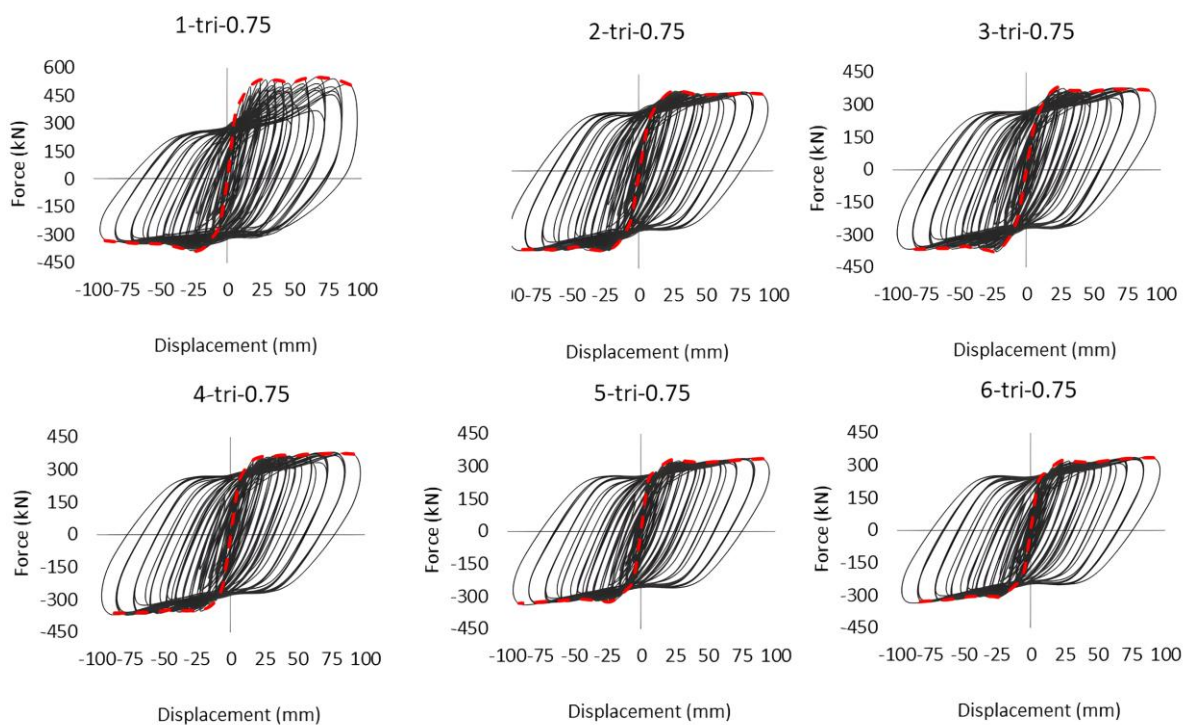
در (جدول ۴) به بررسی میانگین سختی اولیه، مقاومت نهایی و جذب انرژی ۶ آرایش در ورق‌های دوزنقه‌ای، سینوسی و مثلثی پرداخته شده است با توجه به این جدول بهترین سختی اولیه، مقاومت نهایی و جذب انرژی مربوط به ورق‌های مثلثی می‌باشد همچنین در نمونه‌ها مثلثی مقداری زوال مقاومت دیده شده، در ادامه مدل‌سازی ۶ نوع آرایش با ضخامت‌های $0/75$ و $1/75$ میلی‌متر از ورق موج‌دار مثلثی استفاده می‌شود.

جدول ۴: میانگین سختی اولیه، مقاومت نهایی و جذب انرژی نمونه‌های دوزنقه‌ای سینوسی و مثلثی

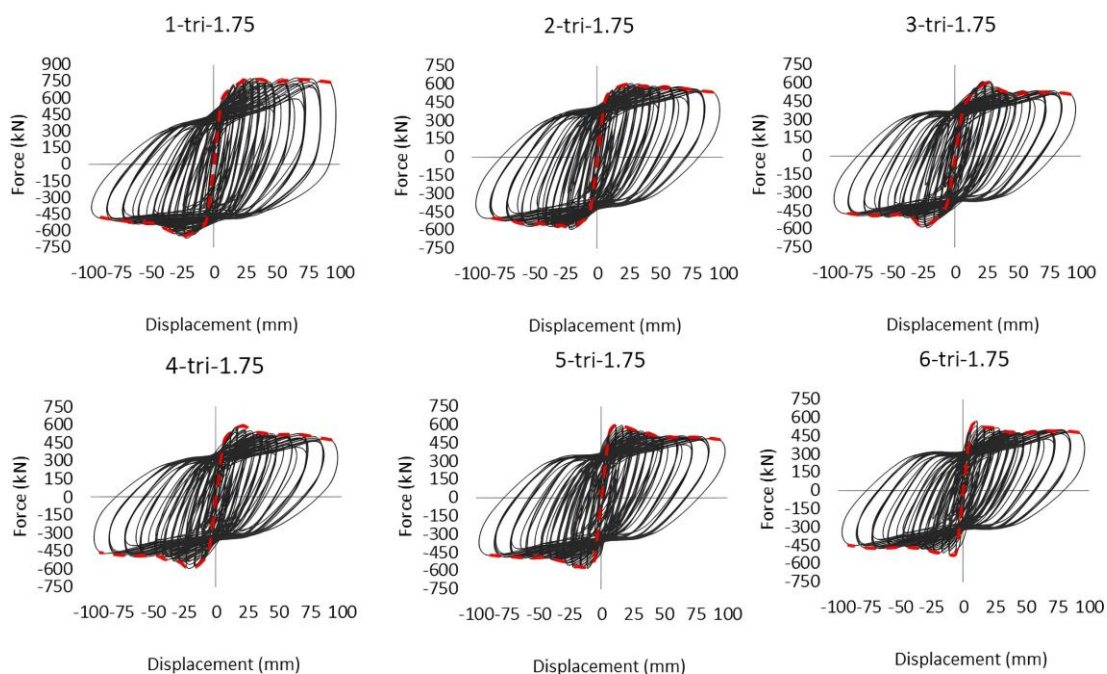
Plate type	Average initial stiffness kN/mm	Percentage difference	Average ultimate strength (kN)	Percentage difference	Average energy absorption (kN.m)	Percentage difference
Trapezoidally	43.10	30.55 %	442.33	8.19 %	1750	20.12 %
Sinusoidally	59.89	3.49 %	434.48	9.81 %	2077	5.20 %
Triangularly	62.06	---	481.79	--	2191	--

۷-۱- بررسی ضخامت‌های ورق موج‌دار مثلثی

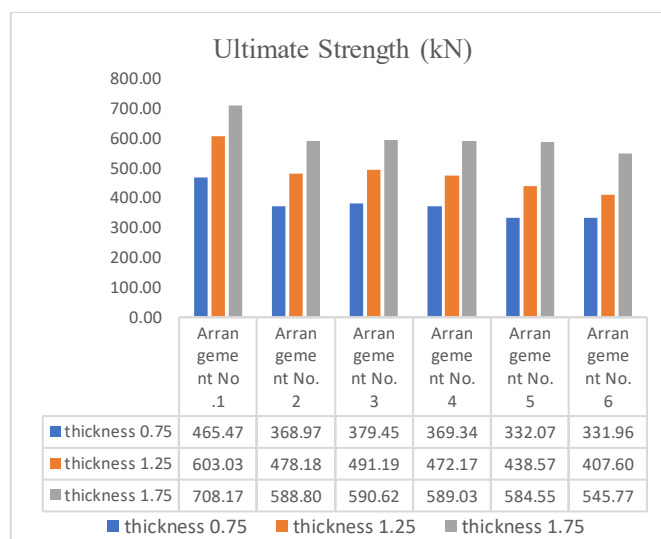
در (شکل‌های ۱۶ و ۱۷) نمودارهای هیستریزس ورق مثلثی با ضخامت‌های $0/75$ و $1/75$ میلی‌متر نشان داده شده است و نتایج آن‌ها انعکاس داده شده است. همچنین در نمودارهای (شکل ۱۸)، (شکل ۱۹) و (شکل ۲۰) به ترتیب به مقایسه سختی اولیه، مقاومت نهایی و شکل پذیری نمونه‌ها پرداخته شده است.



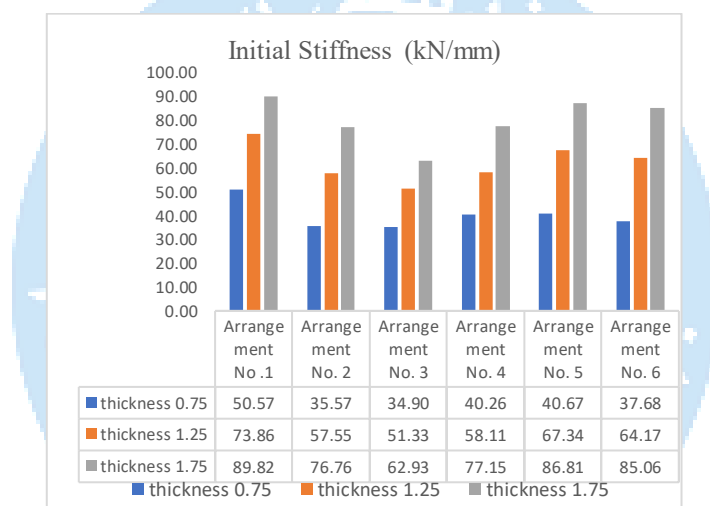
شکل ۱۶: نمودارهای هیستریزس ورق موج دار مثلثی با ضخامت ۰/۷۵ میلی متر



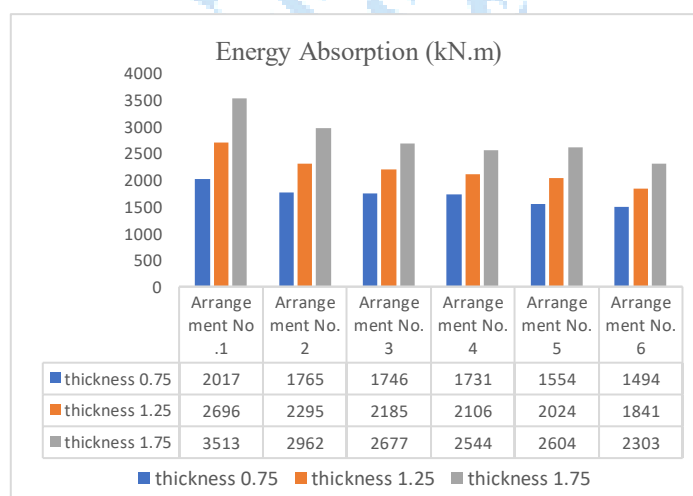
شکل ۱۷: نمودارهای هیستریزس ورق موج دار مثلثی با ضخامت ۱/۷۵ میلی متر



شکل ۱۸: نمودارهای مقایسه مقاومت نهایی شکل ورق مثلثی با ضخامت‌های ۰/۷۵، ۱/۲۵ و ۱/۷۵ میلی‌متر



شکل ۱۹: نمودارهای مقایسه سختی اولیه شکل ورق مثلثی با ضخامت‌های ۰/۷۵، ۱/۲۵ و ۱/۷۵ میلی‌متر



شکل ۲۰: نمودارهای مقایسه جذب انرژی شکل ورق مثلثی با ضخامت‌های ۰/۷۵، ۱/۲۵ و ۱/۷۵ میلی‌متر

سختی اولیه

بیشترین مقدار سختی در ورق‌های مثلثی با ضخامت 0.75 میلی‌متر مربوط به مدل 1-tri-1.25 با مقدار 50.57 kN/mm می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار سختی در ضخامت 1.25 میلی‌متر مربوط به مدل 1-tri-1.25 با مقدار 73.86 kN/mm می‌باشد. بیشترین مقدار سختی در نمونه‌های با ورق مثلثی با ضخامت 1.75 میلی‌متر نیز مربوط به مدل 1-tri-1.75 با آرایش شماره ۱ با مقدار 89.82 kN/mm می‌باشد. بیشترین نمونه دارای سختی در بین سه ضخامت ورق مربوط به مدل 1-tri-1.75 با آرایش شماره ۱ با ضخامت 1.75 میلی‌متر می‌باشد. مقدار آن برابر 89.82 kN/mm می‌باشد که اختلاف آن با ورق ضخامت 1.25 و 0.75 میلی‌متر به ترتیب برابر 17.76 و 43.69 ٪ می‌باشد.

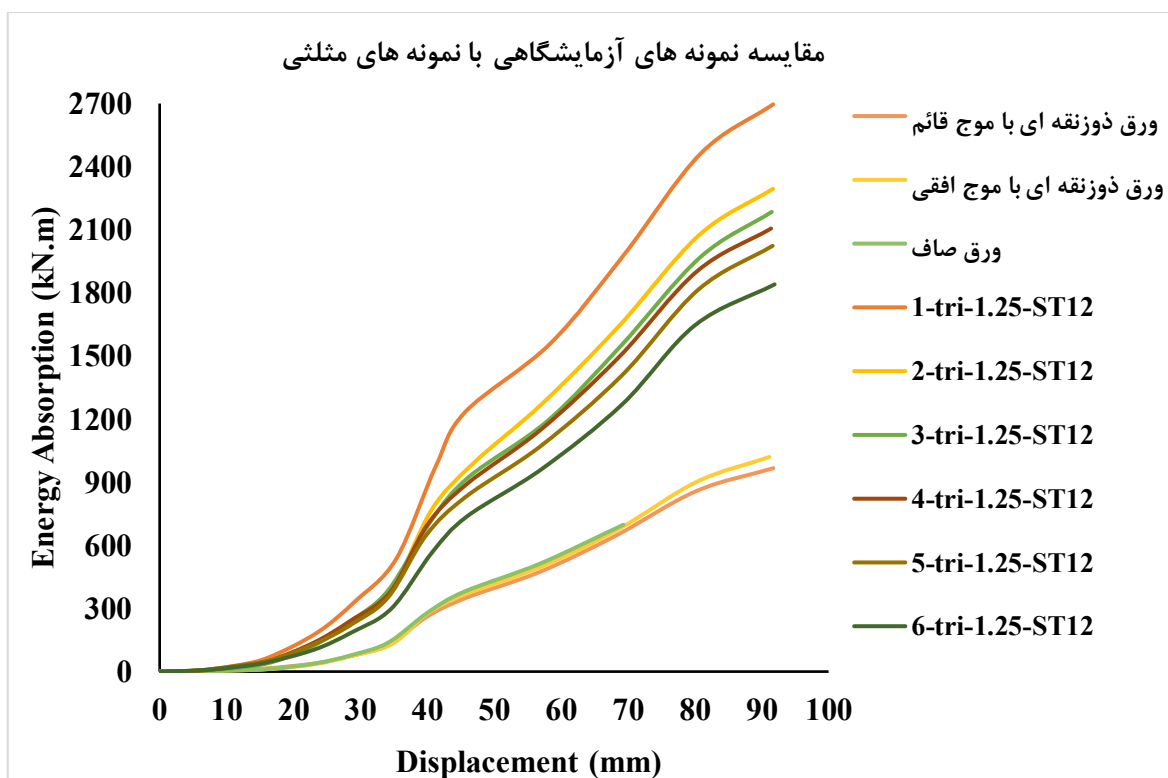
مقاومت نهایی

بیشترین مقدار مقاومت نهایی در ورق‌های مثلثی با ضخامت 0.75 میلی‌متر مربوط به مدل 1-tri-1.25 با مقدار 465.47 kN می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار مقاومت نهایی در ضخامت 1.25 میلی‌متر مربوط به مدل 1-tri-1.25 با مقدار 603.03 kN می‌باشد. بیشترین مقدار مقاومت نهایی در نمونه‌های با ورق مثلثی با ضخامت 1.75 میلی‌متر نیز مربوط به مدل 1-tri-1.75 با آرایش شماره ۱ با مقدار 708.17 kN می‌باشد. بیشترین نمونه دارای مقاومت نهایی در بین سه ضخامت ورق مربوط به مدل 1-tri-1.75 با آرایش شماره ۱ با ضخامت 1.75 میلی‌متر با مقدار 708.17 kN می‌باشد که اختلاف آن با ورق ضخامت 1.25 و 0.75 میلی‌متر به ترتیب برابر 14.84 و 34.27 ٪ می‌باشد.

جذب انرژی

بیشترین مقدار جذب انرژی در ورق‌های مثلثی با ضخامت 0.75 میلی‌متر مربوط به مدل 1-tri-1.25 با مقدار 2017 kN.m می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار جذب انرژی در ضخامت 1.25 میلی‌متر مربوط به مدل 1-tri-1.25 با مقدار 2696 kN.m می‌باشد. بیشترین مقدار جذب انرژی در نمونه‌های با ورق مثلثی با ضخامت 1.75 میلی‌متر نیز مربوط به مدل 1-tri-1.75 با آرایش شماره ۱ با مقدار 3513 kN.m می‌باشد. بیشترین نمونه دارای جذب انرژی در بین سه ضخامت ورق مربوط به مدل 1-tri-1.75 با آرایش شماره ۱ با ضخامت 1.75 میلی‌متر می‌باشد. مقدار آن برابر 3513 kN.m می‌باشد که اختلاف آن با ورق ضخامت 1.25 و 0.75 میلی‌متر به ترتیب برابر 23.23 و 42.60 ٪ می‌باشد.

در نهایت نیز نتایج بدست آمده از ضخامت 1.25 میلی‌متر در ورق‌های مثلثی با آرایش‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی امامی و همکاران [۳] در شکل ۲۱ در غالب میزان جذب انرژی بعنوان مهم‌ترین پارامتر مورد بررسی، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان دهنده اهمیت شکل موج ورق در میزان جذب انرژی دارد.



شکل ۲۱: مقایسه نتایج نمونه مثلثی با نتایج آزمایشگاهی در ضخامت ۱.۲۵ میلی متر

۷-۳- مود خرابی

مودهای خرابی هر یک از نمونه‌های مورد بررسی در ادامه ارائه می‌گردد.

آرایش‌های ورق دوزنقه‌ای با ضخامت ۱.۲۵ میلی متر

آرایش شماره ۱

باتوجه به شکل ۲۲، در این مدل تغییر شکل موج ورق به صورت نواری در قسمت فوقانی دیوار و به صورت نواری در طول ناحیه اتصال ورق به دیوار در سمت چپ دیوار شروع می‌شود و تقریباً تا گام‌های میانی تحلیل فقط در این ناحیه تغییر شکل موج‌ها رخ داده است. پس از آن موج‌های میانی ورق نیز شروع به تغییر شکل می‌کنند. در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر کمانش موضعی در بال‌های ستون در قسمت پایین دیوار قابل مشاهده است. در این نمونه تغییر شکل موج‌های ورق تقریباً کم می‌باشد و کمانش کلی در ورق رخ داده است.

آرایش شماره ۲

در این نمونه تغییر شکل ورق تقریباً از ناحیه مرکزی دیوار شروع می‌شود، بیش‌ترین مقدار تغییر شکل‌های رفت و برگشت موج‌ها در ناحیه میانی دیوار رخ داده است. در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر کمانش موضعی در بال‌های ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد، ناحیه سمت چپ دیوار کم‌ترین میزان تغییر شکل و مشارکت را در بار رفت و برگشتی دارا می‌باشد.

آرایش شماره ۳

در این دیوار تغییر شکل ورق از ناحیه بالای دیوار شروع می‌شود و تقریباً تا پایان تحلیل، تغییر شکل‌های ورق موج‌دار فقط در قسمت فوقانی و میانی دیوار وجود دارد و از قسمت میانی به پایین ورق هیچ‌گونه مشارکتی در بارهای رفت و برگشتی نداشته است. در جابه‌جایی

۹۰ میلی متر کمانش موضعی در بال پایین ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد، که این یک ایراد بزرگ می‌باشد. همچنین باتوجه به شکل زیر در این دیوار تیرها دچار خمش زیادی شده‌اند.

آرایش شماره ۴

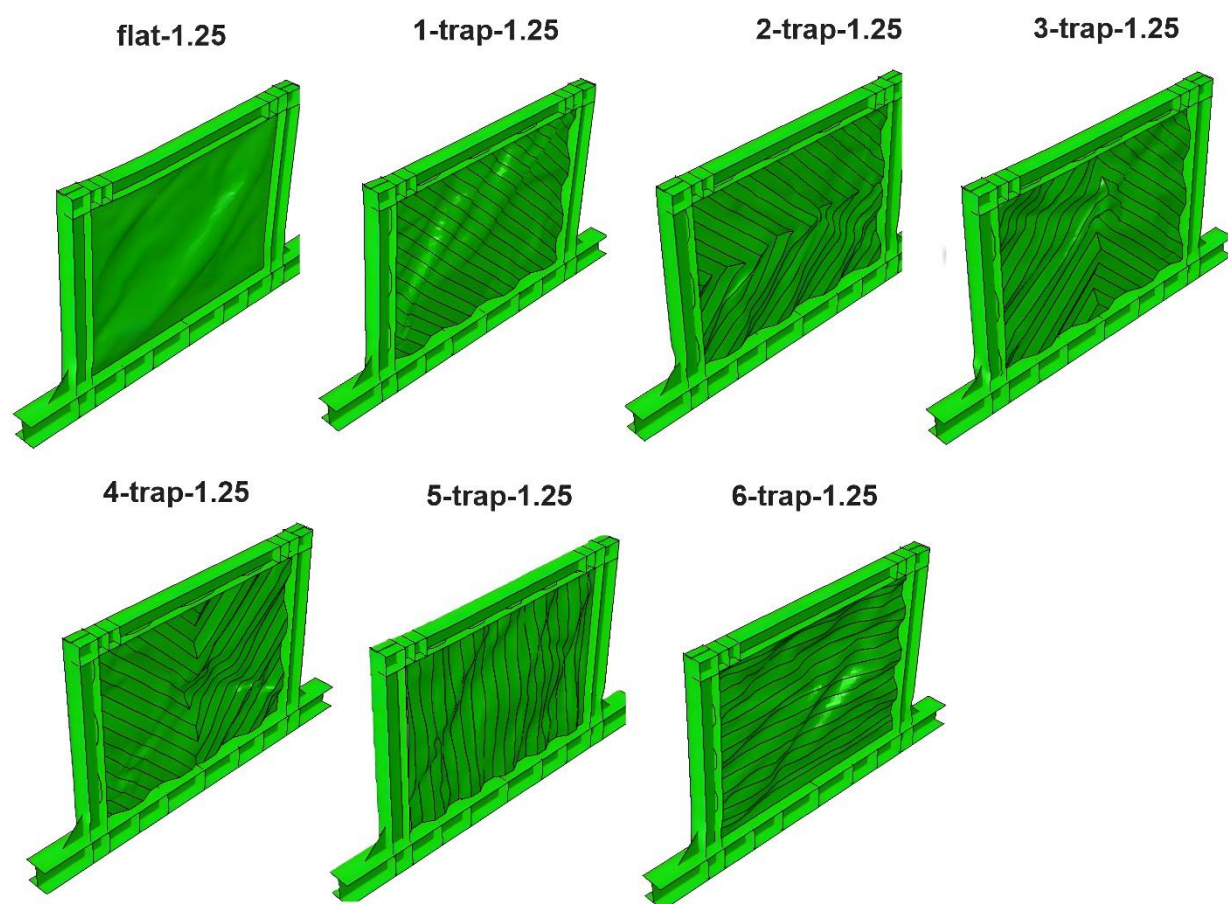
در این دیوار در آغاز تحلیل با میانه تحلیل بیش‌ترین تغییر شکل موج‌ها در موقعیت راست و پایین دیوار بوده است و به تدریج در میانه تحلیل ناحیه وسط دیوار نیز شروع به تغییر شکل می‌کنند. در طول تحلیل قسمت بالایی ورق دیوار مشارکتی بسیار کم‌تری نسبت به سایر قسمت‌ها در بار رفت و برگشتی داشته است.

آرایش شماره ۵

در این نمونه شروع تغییر شکل‌ها در کل ناحیه میانی ورق رخ داده است، در این نمونه تغییر شکل موج‌ها کم بوده است و کمانش کلی در کل ناحیه ورق بیش‌تر حاکم بوده است.

آرایش شماره ۶

در این دیوار تقریباً بیش‌ترین تغییر شکل موج‌ها و کمانش آن در ناحیه میانی دیوار رخ داده است. همچنین در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر کمانش موضعی در بال پایین ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲۲: مود خرابی ورق ذوزنقه‌ای با ضخامت ۱.۲۵ میلی متر

آرایش‌های ورق سینوسی با ضخامت ۱.۲۵ میلی متر

آرایش شماره ۱

باتوجه به شکل ۲۳، در این دیوار تغییر شکل‌های موج ورق از سمت چپ و بالای دیوار آغاز می‌شود و در طول تحلیل این تغییر شکل‌ها به صورت نواری در بالای دیوار و نواری در سمت چپ دیوار وجود دارند و تا به اینجا قسمت‌های میانی و پایین دیوار در موقعیت راست هیچ‌گونه تغییر شکلی را نداشته‌اند. در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر کمانش موضعی در بال پایین ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد.

آرایش شماره ۲

در این دیوار تغییر شکل موج ورق از سمت بالا و راست و همچنین پایین دیوار و چپ به صورت هم‌زمان آغاز می‌شوند و به تدریج نواحی میانی دیوار نیز دچار تغییر شکل می‌شوند. در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر کمانش موضعی در بال پایین ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد.

آرایش شماره ۳

در این نمونه تغییر شکل ورق از ناحیه فوقانی دیوار آغاز می‌گردد و تقریباً تا پایان تحلیل تغییر شکل ورق فقط در ناحیه فوقانی دیوار قابل مشاهده است در واقع قسمت میانی و پایین ورق هیچ‌گونه تغییر شکل و مشارکتی در بارهای رفت و برگشتی نداشته است که یک ایراد مهم محسوب می‌شود.

آرایش شماره ۴

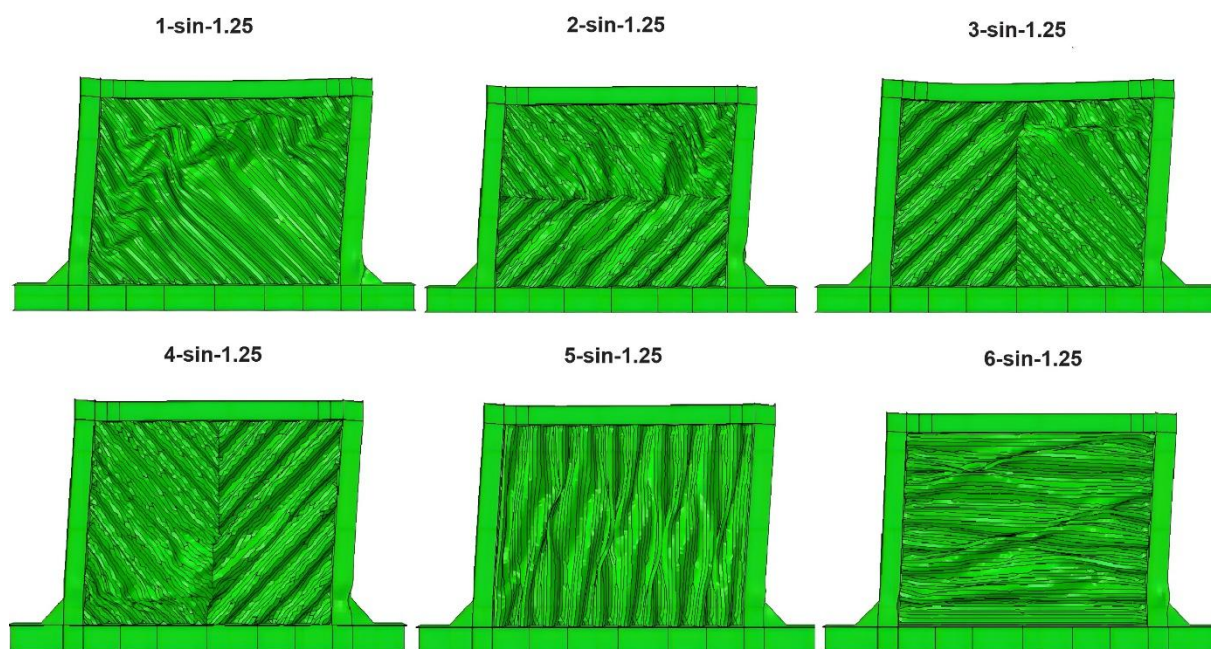
در این دیوار تغییر شکل ورق در ناحیه وسط و پایین دیوار آغاز می‌گردد و به تدریج تا جابه‌جایی حداکثر ۹۰ میلی متر به قسمت میانی دیوار سرایت می‌کند اما هیچ‌گونه تغییر شکلی در موج‌های ورق در طول تحلیل در قسمت فوقانی دیوار مشاهده نشده است در واقع قسمت فوقانی دیوار هیچ‌گونه مشارکتی در بارهای رفت و برگشت زلزله نداشته است. در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر کمانش موضعی در بال پایین ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد.

آرایش شماره ۵

در این نمونه تقریباً در طول تحلیل تغییر شکل موج‌های ورق در کل ناحیه میانی دیوار رخ داده است، همچنین سمت چپ و راست دیوار در محل اتصال به ستون‌ها تغییر شکل زیادی را متحمل شده‌اند به طوری که امکان جدا شدن ورق از ناحیه اتصال در این قسمت محتمل است. در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر کمانش موضعی در بال پایین ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد.

آرایش شماره ۶

در این نمونه در شروع تحلیل تغییر موج‌های ورق از ناحیه فوقانی و سمت راست آن آغاز شده و در طول تحلیل تقریباً همانند شکل زیگزاگ در کل ورق این تغییر شکل‌ها رخ داده است. در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر کمانش موضعی در بال پایین ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲۳: مود خرابی ورق سینوسی با ضخامت ۱.۲۵ میلی متر

آرایش‌های ورق مثلثی با ضخامت ۱.۲۵ میلی متر

آرایش شماره ۱

باتوجه به شکل ۲۴، تغییر شکل ورق از بالا سمت چپ شروع می‌شود به تدریج در میانه تحلیل این تغییر شکل افزایش می‌یابد در جابه‌جایی ۶۰ میلی متر چند موج میانی دیوار به صورت کامل در بارهای رفت و برگشت باز و بسته میشوند. در جابه‌جایی ۸۵ میلی متر موج میانی دیوار دچار اعوجاج و ناصافی زیادی شده و در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر کماتش موضعی در بال پایین ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد.

آرایش شماره ۲

در این نمونه تغییر شکل موج ورق در موقعیت جهت راست و بالا و موقعیت چپ و پایین دیوار شروع به تغییر شکل می‌کنند و در طول بارگذاری به تدریج این تغییر شکل در کل ورق دیوار گسترش می‌یابد. در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر بیش‌ترین تغییر شکل موج ورق در موقعیت میانی از سمت راست و کم‌ترین میزان تغییر شکل ورق در موقعیت میانی سمت چپ می‌باشد.

آرایش شماره ۳

در این نمونه تغییر شکل ورق از ناحیه فوقانی دیوار آغاز می‌گردد و تقریباً تا پایان تحلیل تغییر شکل ورق فقط در ناحیه فوقانی دیوار قابل مشاهده است در واقع قسمت میانی و پایین ورق هیچ‌گونه تغییر شکل و مشارکتی در بارهای رفت و برگشتی نداشته است که یک ایراد مهم محسوب می‌شود.

آرایش شماره ۴

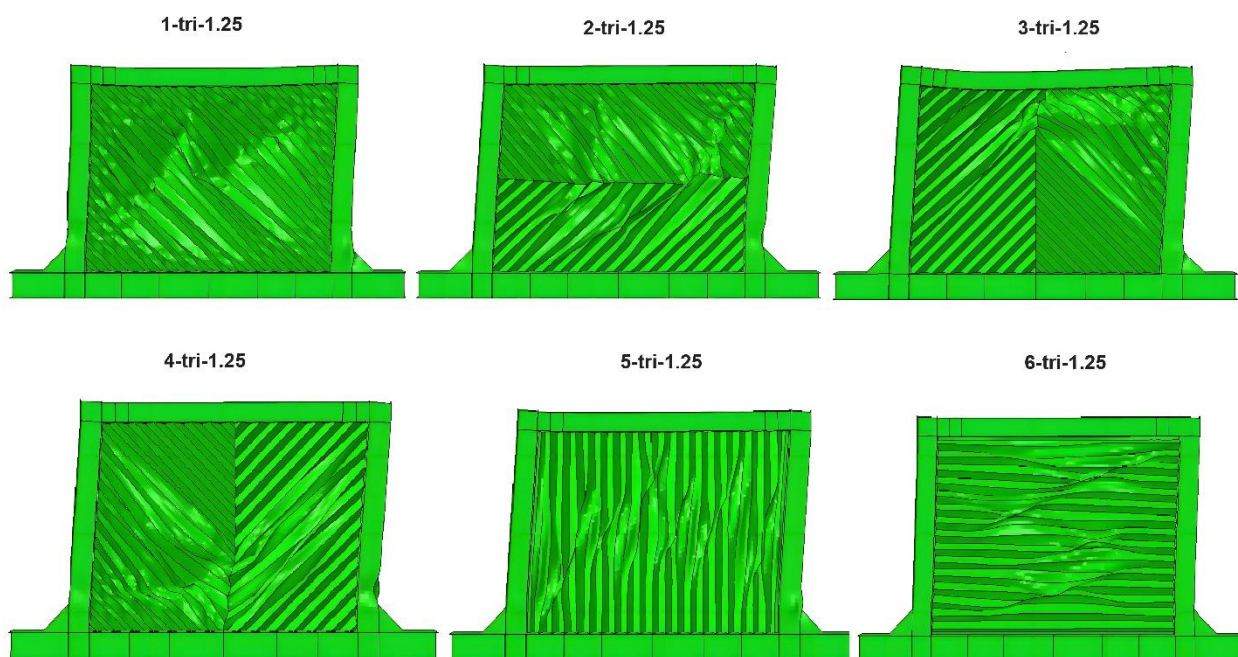
در این دیوار تغییر شکل ورق در ناحیه وسط و پایین دیوار آغاز می‌گردد و به تدریج تا جابه‌جایی حداکثر ۹۰ میلی متر به قسمت میانی دیوار سرایت می‌کند اما هیچ‌گونه تغییر شکلی در موج‌های ورق در طول تحلیل در قسمت فوقانی دیوار مشاهده نشده است در واقع قسمت فوقانی دیوار هیچ‌گونه مشارکتی در بارهای رفت و برگشتی نداشته است. در جابه‌جایی ۹۰ میلی متر کماتش موضعی در بال پایین ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد.

آرایش شماره ۵

در این نمونه تقریباً در طول تحلیل تغییر شکل موج‌های ورق در کل ناحیه میانی دیوار رخ داده است، همچنین سمت چپ و راست دیوار در محل اتصال به ستون‌ها تغییر شکل زیادی را متحمل شده‌اند به طوری که امکان جدا شدن ورق از ناحیه اتصال در این قسمت محتمل است. در جابه‌جایی ۹۰ میلی‌متر کمانش موضعی در بال پایین ستون‌ها قابل مشاهده می‌باشد.

آرایش شماره ۶

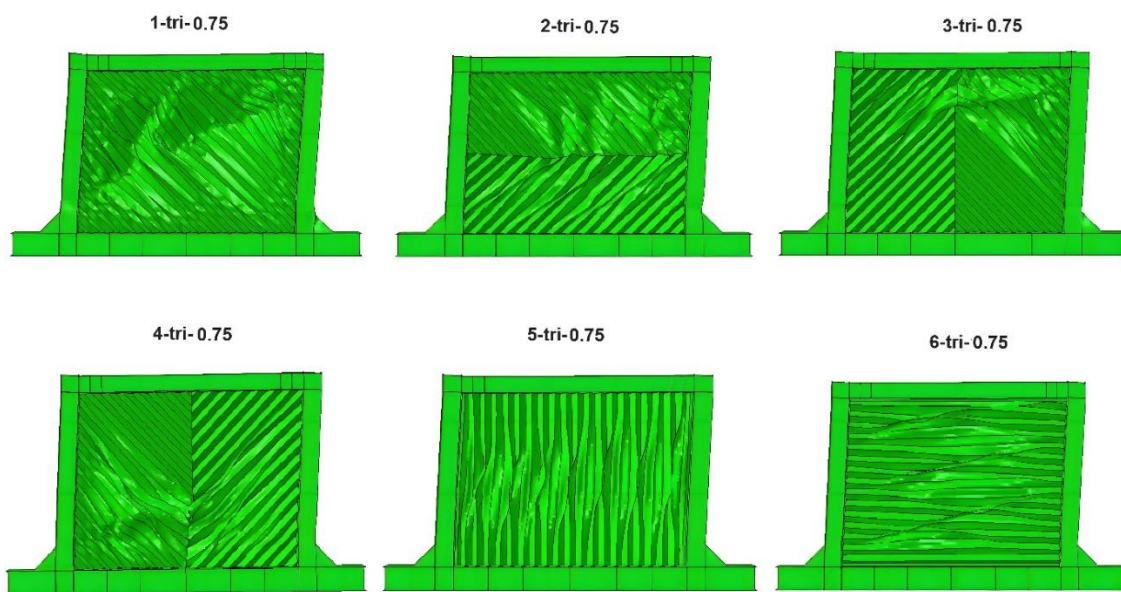
در این نمونه در شروع تحلیل تغییر موج‌های ورق از ناحیه فوقانی و سمت راست آن آغاز شده و در طول تحلیل تقریباً همانند شکل زیرگزاگ در کل ورق این تغییر شکل‌ها رخ داده است.



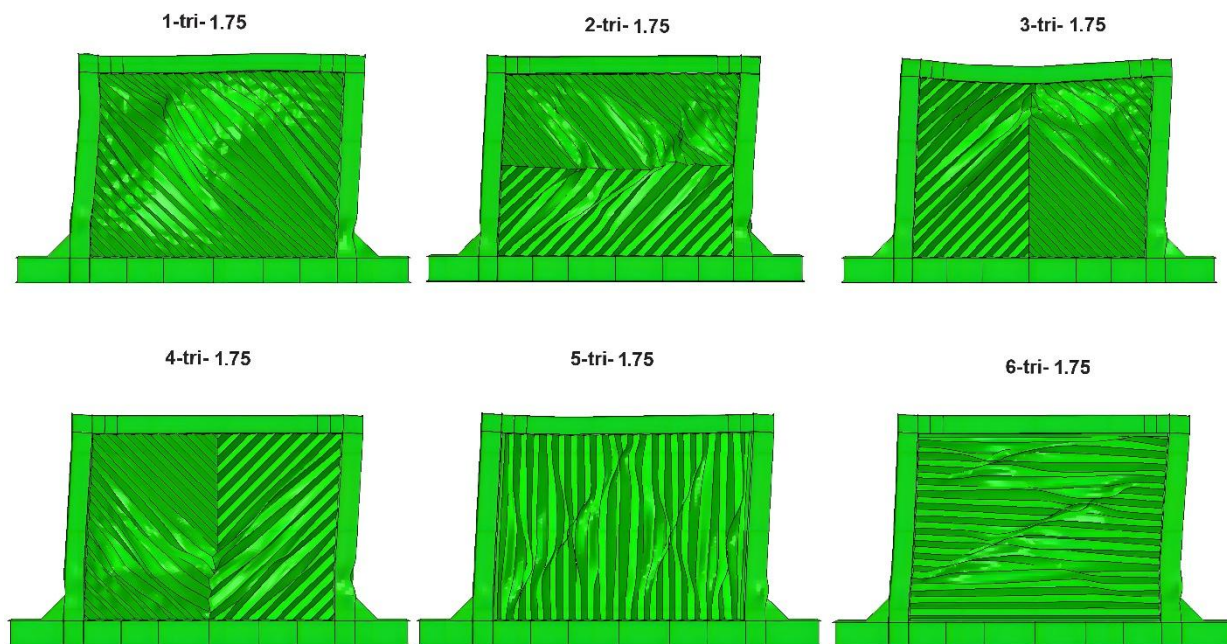
شکل ۲۴: مود خرابی ورق مثلثی با ضخامت ۱.۲۵ میلی‌متر

ورق‌های مثلثی با ضخامت ۰.۷۵ و ۱.۷۵ میلی‌متر

باتوجه به شکل‌های ۲۵ و ۲۶، مود خرابی در این ورق‌ها نیز همانند ورق‌های ۱.۲۵ میلی‌متر می‌باشد با این تفاوت که در در ورق‌های با ضخامت ۱.۷۵ میلی‌متر، تیرها و ستون‌های بعضی نمونه‌ها دچار خمش و کمانش شده‌اند.



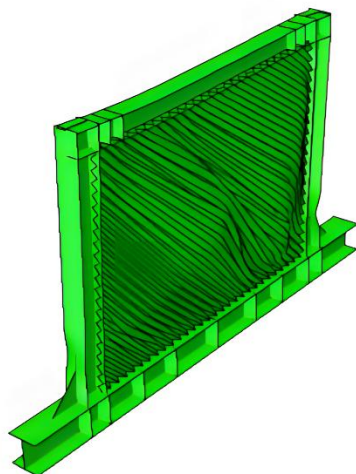
شکل ۲۵: مود خرابی ورق مثلثی با ضخامت ۰.۷۵ میلی متر



شکل ۲۶: مود خرابی ورق مثلثی با ضخامت ۱.۷۵ میلی متر

آرایش دوبل

باتوجه به شکل ۲۷، در این نمونه ورق دچار کماتش برون صفحه‌ای شده است.



شکل ۲۷: مود خرابی آرایش دوبل

۷-۳- جمع بندی ضخامت ورق و شکل موج

در (جدول ۵) به بررسی میانگین سختی اولیه، مقاومت نهایی و جذب انرژی ۶ آرایش در ورق‌های مثلثی با ضخامت ۰/۷۵، ۱.۲۵ و ۱.۷۵ میلی‌متر پرداخته شده است باتوجه به این جدول بهترین سختی اولیه، مقاومت نهایی و جذب انرژی مربوط به ورق‌های مثلثی با ضخامت ۱.۷۵ میلی‌متر و آرایش شماره ۱ می‌باشد. همچنین باتوجه به مطالب ذکر شده با کاهش فقط ۰/۵ میلی‌متر از ورق ۱.۲۵ میلی‌متر پارامترهای لرزه‌ای کاهش پیدا کرده و با اضافه کردن ۰/۵ میلی‌متر به ورق ۱.۲۵ پارامترهای لرزه‌ای افزایش پیدا کرده و باعث شده ورق مثلثی با آرایش شماره ۱ بیشترین مقدار جذب انرژی بین تمام نمونه‌ها تا به اینجای کار داشته باشد که نشان از اهمیت بسیار انتخاب ضخامت ورق مناسب برای دیوار برشی می‌باشد.

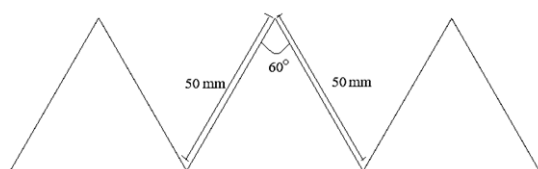
از نظر آرایش در اکثر نمونه‌ها بهترین آرایش مربوط به آرایش شماره ۱ بوده است؛ اما ذکر این نکته واجب است که باتوجه به نمودارهای هیستریزس این آرایش، این نمونه فاقد رفتار متقارن در رفت و برگشت نیروی چرخه‌ای می‌باشد؛ لذا برای رفع این مشکل در ادامه به بررسی آرایش دوبل با ورق مثلثی و ضخامت ۱.۲۵ میلی‌متر پرداخته می‌شود.

جدول ۵: میانگین سختی اولیه، مقاومت نهایی و جذب انرژی نمونه‌های مثلثی با ضخامت‌های ۰/۷۵، ۲۵ و ۱.۷۵ میلی‌متر

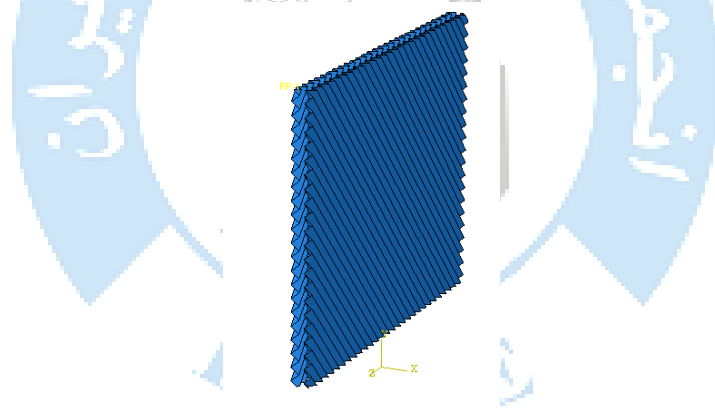
Plate type	Thickness (mm)	Average Initial stiffness (kN/mm)	Percentage difference	Average ultimate strength (kN)	Percentage difference	Average energy absorption (kN.m)	Percentage difference
Triangularly	0.75	39.94	56.18 %	374.54	37.70 %	1717.69	37.92 %
Triangularly	1.25	62.06	22.18 %	481.79	19.85 %	2191.08	20.81 %
Triangularly	1.25	79.75	---	601.16	---	2767.03	---

۴-۷- بررسی آرایش دوبل مثلثی

در تمام نمونه‌های آزمایش شده تا این قسمت آرایش شماره ۱ به جز ورق دوزنقه‌ای بیش‌ترین جذب انرژی و مقاومت بین نمونه‌ها داشته است اما همان‌طور که بارها در قسمت‌های مختلف ذکر شد این نمونه بر اساس منحنی‌های چرخه‌ای فاقد رفتار متقارن در کششی و فشاری بوده و قسمت فشاری آن دچار ضعف بوده است لذا در این قسمت برای رفع نامتقارن بودن رفتار این دیوار ۲ نمونه برای بررسی طراحی شده است، نمونه اول ورق مثلثی با نام 1-tri-2 با آرایش شماره ۱ با طول موج ۵۰ میلی‌متر (شکل ۲۸) و ضخامت ۲ میلی‌متر طراحی شده است و نمونه دوم ورق مثلثی دوبل با نام 1-tri-1 با آرایش شماره ۱ دوبل، طول موج ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر طراحی شده است. علت تفاوت ضخامت بین این دو نمونه در آن است که در واقع با قرار دادن ۲ ورق ۱ میلی‌متر در آرایش دوبل می‌توان مجموع ضخامت آن را که عدد ۲ میلی‌متر می‌باشد با نمونه اول که یک ورق ۲ میلی‌متر تک می‌باشد برابر دانست و امکان مقایسه این دو نمونه را باهم فراهم نمود. در (شکل ۲۹) نمونه طراحی ورق دوبل و در (شکل ۳۰) و (شکل ۳۱) نمودارهای هیستریزس نشان داده شده است.

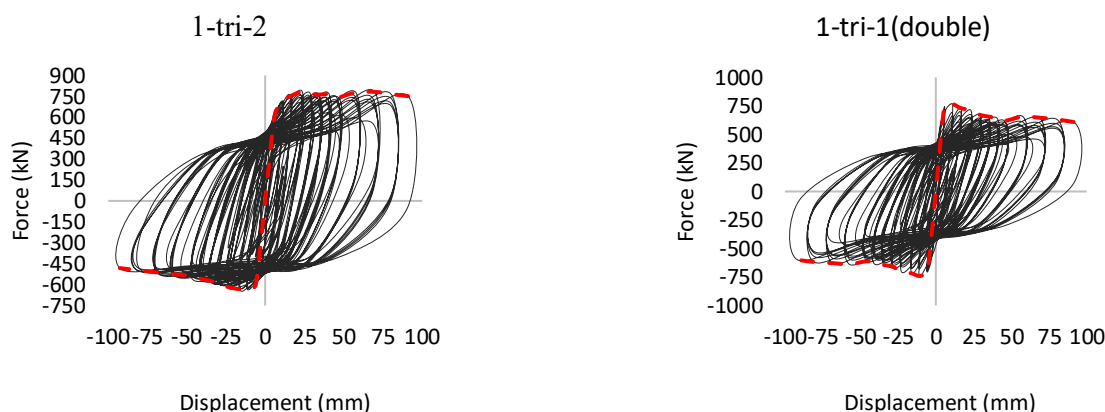


شکل ۲۸: مشخصات هندسی ورق موج‌دار مثلثی ورق دوبل و ورق ضخامت ۲ میلی‌متر



شکل ۲۹: آرایش ورق موج‌دار مثلثی به صورت دوبل

۴-۷- نمودارهای چرخه‌ای



شکل ۳۰: نمودار هیستریزیس ورق مثلی آرایش شماره ۱ با ضخامت ۱ میلی‌متر
شکل ۳۱: نمودار هیستریزیس ورق مثلی آرایش شماره ۲ با ضخامت ۲ میلی‌متر

در (جدول ۶) پارامترهای لرزه‌ای شامل سختی اولیه، مقاومت نهایی و جذب انرژی نشان داده شده است.

جدول ۶: پارامترهای لرزه‌ای مدل‌های 1-tri-2 و 1-tri-1(double)

specimens	Initial Stiffness (kN/mm)	Ultimate Strength (kN)	Energy Absorption (kN.m)
1-tri-2	100.39	709.20	3555
1-tri-1 (double)	126.29	753.12	2966

سختی اولیه

سختی اولیه نمونه 1-tri-1 (double) با آرایش دوبل افزایش یافته است و مقدار آن برابر $126/29 \text{ kN/mm}$ و درصد اختلاف آن با نمونه 1-tri-2 برابر $20/50\%$ می‌باشد.

مقاومت نهایی

مقاومت نهایی نمونه دوبل با نام 1-tri-1 (double) با مقدار $753/12 \text{ kN}$ نسبت به نمونه 1-tri-2 با مقدار $709/20 \text{ kN}$ افزایش یافته است به طوری که درصد اختلاف بین آن برابر $5/83\%$ می‌باشد.

جذب انرژی

مقدار جذب انرژی نمونه 1-tri-2 با مقدار 3555 kN.m نسبت به نمونه 1-tri-1 (double) با مقدار 2966 kN.m افزایش یافته به طوری که درصد اختلاف آن برابر $16/56\%$ می‌باشد.

جمع‌بندی آرایش دوبل

در این نمونه زوال مقاومت قابل مشاهده می‌باشد، سختی اولیه و مقاومت نهایی در این نمونه رشد صعودی داشته است. از نظر جذب انرژی آرایش دوبل جذب انرژی کمتری نسبت مدل عادی داشته؛ اما باید توجه نمود تا به اینجا، در اکثر نمونه‌ها آرایش شماره ۱

بیشترین جذب انرژی و مقاومت نهایی را داشته است؛ اما همانطور که بارها ذکر شد رفتار این آرایش در نمودار چرخه‌ای نامتقارن بوده است؛ اما با تغییر در هندسه این آرایش و ایجاد آرایش دوبل رفتار این نمونه کاملاً متقارن شده است.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به مدل‌سازی ۳۳ نمونه ی دیواربرشی فولادی دارای ورق موج‌دار تحت تحلیل شبه‌استاتیکی غیرخطی با بارگذاری چرخه‌ای پرداخته و خروجی‌های موردنظر استخراج شده است. برای اطمینان از نتایج تحقیق، نمونه آزمایشگاهی که به‌عنوان مرجع جهت صحت سنجی انتخاب شده را مدل‌سازی نموده و پس از اطمینان از صحت نتایج به بررسی آرایش‌های مختلف ورق‌های موج‌دار مورب در شکل ورق‌های دوزنقه‌ای، سینوسی و مثلثی در ضخامت‌های مختلف پرداخته شد. در ادامه به ارائه نتایج کلی به شرح ذیل پرداخته شده است.

- (۱) نتایج صحت سنجی مدل آزمایشگاهی نشان داد که نتایج این پژوهش قابل‌اعتماد و از دقت خوبی برخوردار است.
- (۲) در ارتباط با شکل موج دوزنقه‌ای و ورق صاف می‌توان به این نتیجه رسید. بیشترین مقاومت و سختی مربوط به ورق صاف است، اما درعین حال کمترین مقدار جذب انرژی مربوط به نمونه صاف می‌باشد. بیشترین مقدار جذب انرژی مربوط به نمونه با آرایش قائم است و پس از آن با اختلاف بسیار کم ۰/۴٪ مربوط به نمونه 1-trap-1.25 با آرایش شماره ۱ می‌باشد؛ اما رفتار نامتقارن در نمودارهای چرخه‌ای آن مشاهده شد.
- (۳) در مقایسه بین ورق صاف و موج‌دار دوزنقه با وجود سختی و مقاومت نمونه صاف اما جذب انرژی و شکل‌پذیری نمونه‌های موج‌دار دوزنقه‌ای بیش‌تر می‌باشند.
- (۴) در ارتباط با شکل موج سینوسی می‌توان به این نتیجه رسید. مقاومت نهایی، سختی اولیه و جذب انرژی در نمونه 1-sin-1.25 با آرایش ۱ بیشترین مقدار می‌باشد؛ اما رفتار نمودار چرخه‌ای نامتقارن می‌باشد. پس از آن بیشترین مقدار جذب انرژی و مقاومت نهایی در نمونه 2-sin-1.25 می‌باشد و نمودار آن رفتار کاملاً متقارن از خود نشان داده است.
- (۵) در ارتباط با شکل موج مثلثی می‌توان به این نتیجه رسید. در نمونه‌های مثلثی مقداری زوال مقاومت در نمودارهای آن مشاهده شد. بیشترین سختی اولیه، جذب انرژی و مقاومت نهایی در نمونه 1-tri-1.25 با آرایش ۱ می‌باشد که این نمونه همچنان رفتار نامتقارن در نمودارهای چرخه‌ای از خود نشان داده است. پس از آن نمونه 2-tri-1.25 با آرایش شماره ۲ بیشترین مقدار جذب انرژی را داشته و نمودار آن نیز متقارن می‌باشد. کمترین مقدار جذب انرژی مربوط به نمونه‌های با آرایش قائم و افقی می‌باشند.
- (۶) با توجه مقادیر پارامترهای سختی، مقاومت جذب انرژی ورق مثلثی به‌عنوان بهترین شکل ورق برای بررسی پارامتر ضخامت‌های مختلف ورق انتخاب شد.
- (۷) در ارتباط با بررسی ضخامت‌های مختلف در ورق مثلثی می‌توان به این نتیجه رسید. کمترین مقدار جذب انرژی، سختی اولیه و مقاومت نهایی در ورق‌های با ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر وجود داشته است.
- (۸) در ضخامت ۱.۷۵ میلی‌متر بیشترین مقدار سختی اولیه، مقاومت نهایی و جذب انرژی در تمام ۶ نوع آرایش وجود دارد. به طوری که نسبت به ورق ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر سختی اولیه ۳۹/۹۴٪، مقاومت نهایی ۵۶/۱۸٪ و جذب انرژی ۳۷/۹۲٪ افزایش یافته است.
- (۹) بیشترین مقدار جذب انرژی در آرایش شماره ۱ با نام 1-tri-1.75 رخ داده و پس از آن نمونه 2-tri-1.75 قرار دارد.

۱۰) در ارتباط با بررسی آرایش دوبل (double) 1-tri-1 در ورق مثلی می توان به این نتیجه رسید. نمودار هیستریزس این نمونه دارای زوال مقاومت می باشد، همچنین سختی اولیه و مقاومت نهایی در این نمونه نسبت به نمونه 1-tri-2 رشد صعودی داشته است. اما جذب انرژی نمونه دوبل در مقایسه با 1-tri-2 کاهش پیدا کرد.

۱۱) در تمام نمونه های بررسی شده تا به اینجا، در اکثر نمونه ها آرایش شماره ۱ بهترین مقدار پارامترهای لرزه ای را داشته است؛ اما همانطور که بارها ذکر شد رفتار این آرایش در نمودار چرخه ای نامتقارن بوده است؛ اما با تغییر درهندسه این آرایش و ایجاد آرایش دوبل رفتار این نمونه کاملاً متقارن شده است.

۱۲) باتوجه به نتایج برترین آرایش، آرایش شماره ۱ به صورت دوبل کار شده و پس از آن آرایش شماره ۲ انتخاب می شود. علت انتخاب آرایش شماره ۱ به دلیل وجود رفتاری کاملاً متقارن، جذب انرژی بالا و زوال مقاومت بسیار کم تر نسبت به مدل های مثلی مشابه می باشد.

منابع

- [۱] Broujerdian V, Ghamari A. (2021): Steel Plate Shear Walls.
- [۲] Emami, F., & Mofid, M. (2014). On the hysteretic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(2), 94-104.
- [۳] Emami, F., Mofid, M., & Vafai, A. (2013). Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. *Engineering Structures*, 48, 750-762.
- [۴] Tong, J. Z., & Guo, Y. L. (2018). Shear resistance of stiffened steel corrugated shear walls. *Thin-Walled Structures*, 127, 76-89.
- [۵] Luo, Q., Wang, W., Sun, Z., Xu, S., & Wang, B. (2021). Seismic performance analysis of corrugated-steel-plate composite shear wall based on corner failure. *Journal of Constructional Steel Research*, 180, 106606.
- [۶] Wang, W., Luo, Q., Sun, Z., Wang, B., & Xu, S. (2021, February). Relation analysis between out-of-plane and in-plane failure of corrugated steel plate shear wall. In *Structures* (Vol. 29, pp. 1522-1536). Elsevier.
- [۷] Jin, S., Wang, Q., Zhou, J., & Bai, J. (2022). Experimental and numerical investigation of assembled multi-grid corrugated steel plate shear walls. *Engineering Structures*, 251, 113544.
- [۸] Yu, Y., Lin, S., Zhao, F., Tian, P., & Jiang, L. (2022). A built-up type horizontally corrugated steel plate shear wall with a special shape. *Engineering Structures*, 250, 113458.
- [۹] AISC, A. (2007). Steel design guide 20, steel plate shear walls.
- [۱۰] Thorburn, L. J., Montgomery, C. J., & Kulak, G. L. (1983). Analysis of steel plate shear walls.
- [۱۱] Wagner, H. (1931). Flat sheet metal girder with very thin metal web: Part 1: General theories and assumptions. National Advisory Committee for Aeronautics.
- [۱۲] Eurocode 3 (2003), Design of steel structures Part 5/1: Plated structural elements, European Committee for Standardization .
- [۱۳] Majidinia, Z., Mehdizadeh, K., Sadeghi, A., & Hashemi, S. V. (2020). Investigation of the Factors affecting the Ductility of Steel Plate Shear Wall with Corrugated Sheet under Cyclic Loading. *Analysis of Structure and Earthquake*, 17(1), 55-69.