

اثر تراکم موج بر رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورقهای موجدار

مسعود قلی زاده¹، یاسر یدالهی²

1- عضو هیئت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت الله آملی، آمل

2- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه شمال، آمل

¹ m.gholizadeh@iauamol.ac.ir

² Yadollahi.y.271@gmail.com

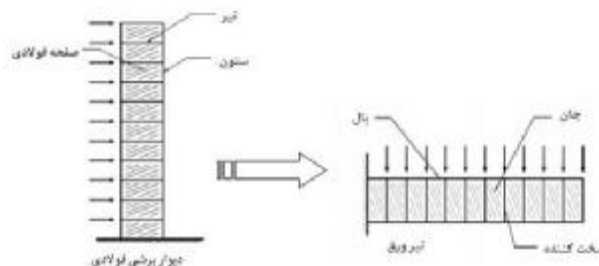
خلاصه

دیوارهای برشی فولادی از جمله سیستم های نوین در سازه های بلند مرتبه و ساختمانهای با اهمیت زیاد می باشد. این نوع سیستم سازه ای در بیشتر مناطق لرزه خیز از جمله ژاپن، آمریکا، کانادا و مکزیک بکار گرفته شده است و در دو نوع سخت شده و سخت نشده استفاده می شود. دیوارهای برشی فولادی دارای مزایای بسیار زیادی نسبت به سیستم های مشابه مقاوم در برابر بارهای جانبی می باشد بطوریکه دارای ظرفیت باربری، اتلاف انرژی، سختی و شکل پذیری زیادی می باشد و همچنین باعث کاهش وزن سازه و کاهش نیروهای ناشی از زلزله به سازه می گردد. دیوارهای برشی فولادی سخت نشده دارای هزینه اجرایی کمتری نسبت به دیوارهای سخت شده بوده و استفاده از این نوع دیوارها نیز در دنیا متداولتر می باشد. یکی از نوآوری های که در این نوع دیوارها در چند سال اخیر بکار رفته است، استفاده از ورقهای موجدار به جای ورقهای ساده می باشد. اولین کاربرد این نوع از ورقها در جان تیر ورقها بوده است و در سالهای اخیر آزمایشهای متعددی بر روی دیوارهای برشی فولادی با ورقهای موجدار انجام شده است. با توجه به جدید بودن این نوع ورقها در سیستم دیوارهای برشی فولادی، در این مقاله به بررسی اثر میزان تراکم موجهای این ورقها بر رفتار قاب متشکل از آن پرداخته شده است. نتایج این مقاله بر اساس روش اجزای محدود و با استفاده از نرم افزار ANSYS حاصل شده است. نتایج حاصل از این بررسی نشان داده است که با افزایش پارامتر میزان تراکم موجها اولاً سختی سیستم افزایش یافته ثانیاً میزان ظرفیت باربری و اتلاف انرژی نیز روند صعودی داشته است.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، ورق موجدار، ظرفیت باربری، تراکم موج، اتلاف انرژی

1. مقدمه

دیوارهای های برشی فولادی در حدود سه دهه اخیر در بیشتر کشورهای پیشرفته و لرزه خیز از جمله آمریکا، ژاپن، کانادا در ساخت سازه های بلند مرتبه استفاده می شود. این سیستم دارای مزایای بسیار مناسبی نسبت به دیگر سیستم های مشابه مانند دیوار برشی بتنی و مهاربندهای فولادی می باشد. از جمله مزایای این سیستم ظرفیت باربری بالا، شکل پذیری مناسب، ظرفیت جذب انرژی بالا، سختی مناسب، کاهش وزن سازه و کاهش هزینه های ساخت فونداسیون، کیفیت بهتر و سرعت ساخت بالا اشاره نمود. ساختار کلی دیوارهای برشی فولادی عبارتست از اعضای محیطی شامل تیر و ستونها و صفحات پرکننده فولادی در فضای بین آنها. دیوارهای برشی فولادی در دو نوع می باشند، نوع اول دیوارهای برشی ساده یا سخت نشده و نوع دوم دیوارهای برشی فولادی سخت شده. این سیستم ها از لحاظ عملکردی مشابه تیر ورقها می باشند بطوریکه با توجه به شکل (1)، در این سیستم، ستونها نقش بال تیر ورق، ورق فولادی به عنوان جان آن و تیر های عرضی مانند سخت کننده های موجود در جان تیروورق عمل می نمایند.



شکل 1: تشابه دیوار برشی فولادی با تیروورق [1]



در زمینه دیوارهای برشی فولادی سخت شده و سخت نشده مطالعات و فعالیت های آزمایشگاهی و نظری متعددی صورت گرفته است. از جمله محققانی که در زمینه دیوارهای سخت شده و سخت نشده فعالیت های تحقیقاتی و آزمایشگاهی انجام داده اند عبارتند از: برمن و بروئو، صبوری قمی و روبرتز، کولاک و همکاران، ناکاشیما و همکاران، ناکاگاوا و همکاران، تاناکا و ساساکی، دما تیز و همکارانش [2]، کیسو و همکاران و غیره. تحقیقات بر روی دیوار های برشی فولادی با ورقهای موجدار محدود بوده و بیشتر فعالیت ها در این زمینه بر روی تیر ورقها انجام شده است. در سیستم تیر ورق از این ورقها در جان بصورت قائم استفاده می شد. از جمله تحقیقات انجام یافته بر روی تیوررقهای ساخته شده از ورق موجدار می توان به فعالیت های آزمایشگاهی پترسون و کارد، روتول، لیوو، ایزلی، آراونا و ادلونند، الغالی و داغر، عثمان [3] و ژیاو وانگ اشاره کرد. از جمله تحقیقات انجام یافته در زمینه استفاده از ورق های موجدار در قابهای فولادی می توان به فعالیت های آزمایشگاهی مو و پرنگ [4]، برمن و بروئو، چوزا و همکاران [5]، بوزیدار و همکاران [6] و آلكساندر [7] اشاره نمود.

کلیه تحقیقات انجام یافته فوق در زمینه دیوار های برشی فولادی با ورقهای موجدار بصورت آزمایشگاهی بوده است و بیشتر به بررسی رفتار کلی این دیوارهای تحت بارگذاری جانبی سیکلی و یکنواخت پرداخته شده است و به مزیت های بیان شده در مورد این سیستم دست یافتند. با توجه به آزمایشگاهی بودن فعالیت های موجود و هزینه بر بودن آنها، کمتر به بررسی سایر مولفه های موجود در این دیوارها از جمله اثر ضخامت دیوار، ارتفاع موج، اثر همزمان ضخامت و گام موج و سایر پارامترهای موثر بر رفتار این نوع دیوار پرداخته شده است. از اینرو در این مقاله اثر برخی از این پارامترها بررسی شده است.

2. معیار های طراحی ورق های موجدار

قوانین محاسبه مقاومت طراحی اعضای فولادی با جانهای موجدار در پیوست D بخش سیزدهم آئین نامه اروپا موسوم به المانهای سازه صفحه ای [8] وجود دارد. این ضوابط منحصراً مربوط به تیر های با جان موجدار می باشد. قوانین این قسمت از آئین نامه ورقهای با موجهای سینوسی و دوزنقه ای را در بر می گیرد اگر چه حالات حدی مربوط به ورقهای با جان موجدار مشابه تیر ورقهای با جان ساده می باشد. با توجه به رفتار مشابه دیوار های برشی فولادی با تیر ورقها که بصورت قائم در سازه قرار می گیرند، از این قوانین می توان در ارزیابی های رفتاری و طراحی آنها نیز استفاده نمود. در تیر ورقهای با جان موجدار مقاومت خمشی توسط بالهای کششی و فشاری و مقاومت برشی منحصراً توسط جان تیر ورقها تحمل می گردد. مقاومت برشی در ورقهای برشی در ورقهای موجدار همانند ورقهای صاف می باشد با این تفاوت که در ورقهای موجدار این مقاومت در یک ضریب کاهش ناشی از کماتش کلی و محلی ضرب می گردند. در ورقهای موجدار، کماتش کلی در کل ورق رخ داده ولی کماتش محلی تنها در قسمتهای صاف موجود در ورقهای موجدار مانند ورقهای دوزنقه ای شکل رخ می دهد. مقاومت برشی ورقهای موجدار مطابق با رابطه (1) محاسبه می گردد.

$$V_{Rd} = c_c \frac{f_y}{g_{MI} \sqrt{3}} a.t \quad (1)$$

در رابطه فوق t ضخامت ورق، a پهنای ورق در راستای موج، V_{Rd} مقاومت برشی ورق موجدار، f_y مقاومت تسلیم، c_c ضریب کاهش مقاومت بر اساس کماتش جان که از روابط (2) و بر اساس نوع کماتش موضعی یا کلی جان حاصل می شود.

$$c_{c,g} = \frac{1.15}{0.9 + \bar{I}_{c,g}} \leq 1.0 \quad \text{و} \quad c_{c,l} = \frac{1.15}{0.9 + \bar{I}_{c,l}} \leq 1.0 \quad (2)$$

در رابطه فوق $\bar{I}_{c,g}$ و $\bar{I}_{c,l}$ لاغری جان و بصورت تابعی از تنش کماتش برشی بحرانی الاستیک و مقاومت تسلیم در کماتش محلی و کلی ($t_{cr,l}$ و $t_{cr,g}$) می باشند که از رابطه (3) محاسبه می گردد.

$$\bar{I}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_y}{t_{cr,l} \sqrt{3}}} \quad \text{و} \quad \bar{I}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_y}{t_{cr,g} \sqrt{3}}} \quad (3)$$

اساساً مد حاکم در ورقهای موجدار سینوسی کماتش برشی کلی است چراکه به دلیل عدم وجود قسمت صاف در ورقهای موجدار با موجهای سینوسی نسبت به ورقهای با موجهای دوزنقه ای از ایجاد کماتش محلی ممانعت به عمل می آورد. در آئین نامه اروپا مقاومت کماتش برشی کلی بر اساس اینکه جان ورق موجدار به عنوان یک ورق ارتوتروپیک با سختی های D_x و D_y در جهت های طولی و عرضی جان عمل نماید محاسبه می شود. سختی های ورق در جهات x و y جهت محاسبه لاغری های جان $\bar{I}_{c,g}$ منجر به مقادیری می گردد که در محاسبه فاکتور کاهش جهت کماتش



برشی کلی استفاده می شوند. تنش بحرانی الاستیک کمانش برشی کلی جان مطابق با معادله (4) بدست می آید. در معادله (5) نیز تنش کمانش بحرانی کمانش برشی محلی ارائه شده است.

$$t_{cr,g} = \frac{32.4}{t.a^2} \sqrt{D_x \cdot D_y^3} \quad (4)$$

$$t_{cr,l} = (5.34 + \frac{2.H.s}{2.t.a}) \frac{p^2 E}{12(1-n^2)} \frac{2.t}{s} \quad (5)$$

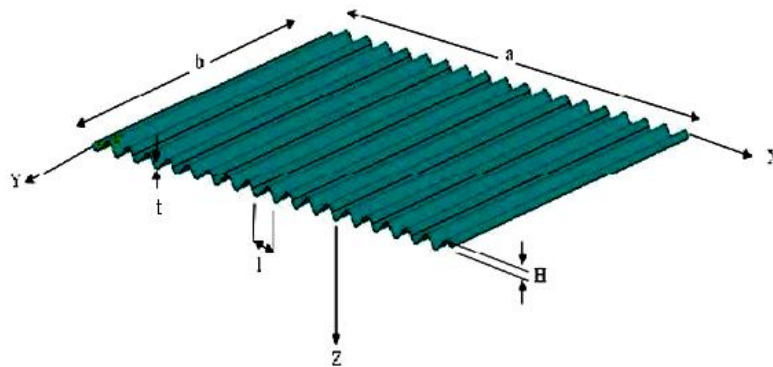
در روابط فوق مطابق شکل (2)، D_x و D_y سختی صفحه در جهات X و Y بوده که برابر است با:

$$D_x = \frac{1}{s} \frac{Eh^3}{12(1-n^2)} \quad \text{و} \quad D_y = EI_y \quad (6)$$

در روابط فوق E مدول الاستیسته، n ضریب پواسون، l طول گام موج صفحه، h ضخامت صفحه، I_y ممان اینرسی صفحه در جهت y مطابق رابطه (7)، H ارتفاع گام موج صفحه، a بعد صفحه در راستای عمود بر موج ورق، b بعد صفحه در راستای ورق و s طول غیر تاشده یک موج مطابق با رابطه (8) می باشد.

$$I = 0.5H^2h \left[1 - \frac{0.81}{1 + 2.5(H/2l)^2} \right] \quad (7)$$

$$s = l \left(1 + \frac{p^2 H^2}{4l^2} \right) \quad (8)$$

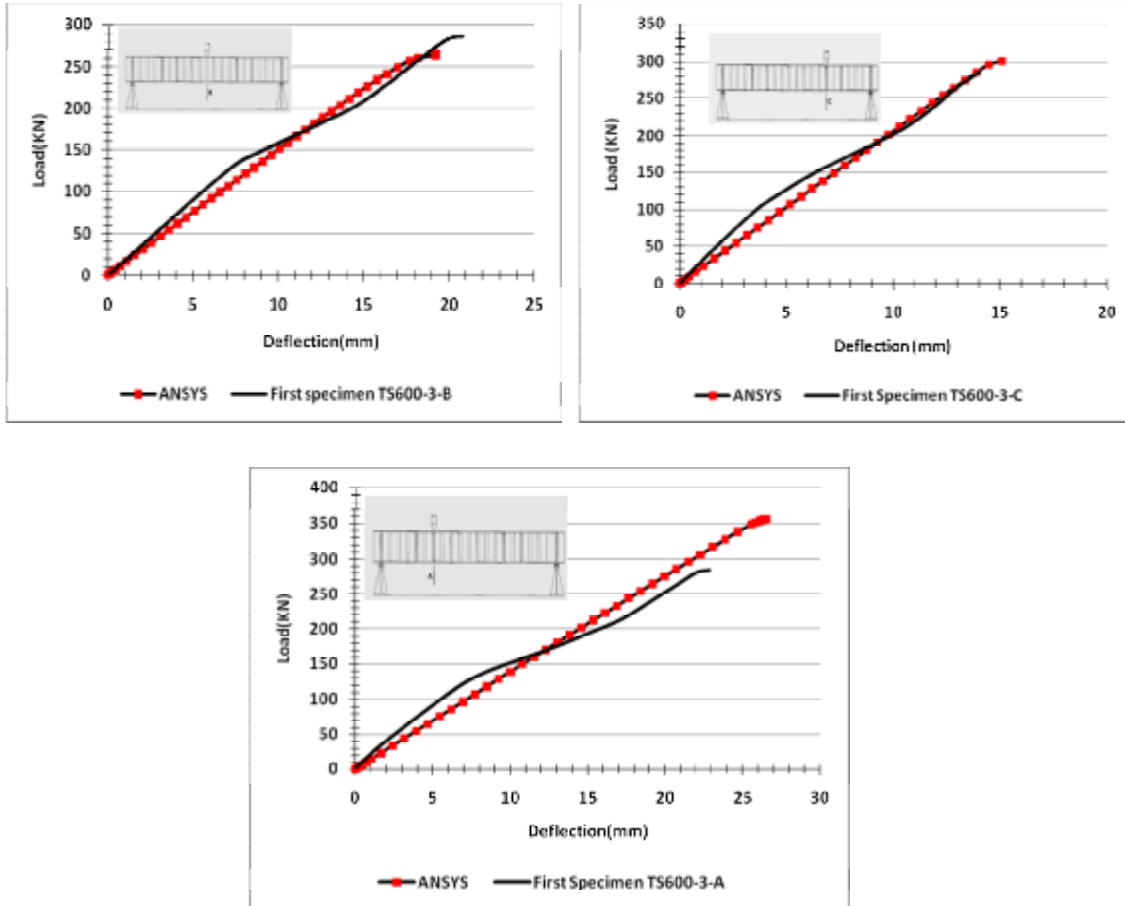


شکل 2: مشخصات هندسی ورق موجدار با موجهای سینوسی

3. مدلسازی و بررسی صحت آن

3.1. صحت یابی مدلسازی

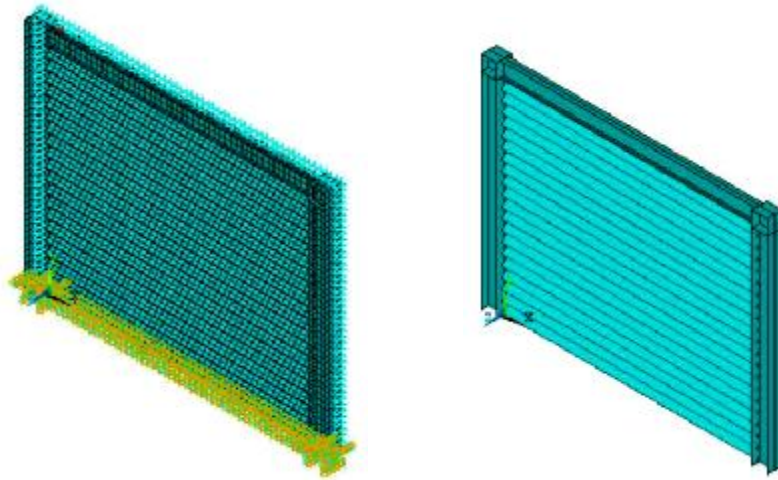
جهت بررسی عملکرد صحیح نرم افزار در مدلسازی و تعیین دقت آن نیاز به مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از نرم افزار اجزای محدود ANSYS می باشد. در این جا از مطالعه آزمایشگاهی موجود در مرجع [1]، نمونه های اول TS600-3 استفاده شده است. در این نمونه ها تیر ورقهایی با جان دوزنقه ای شکل تحت بارگذاری یکنواخت قرار گرفتند. مصالح فولادی مصرفی بصورت الاستوپلاستیک بوده و دارای مدول الاستیسته 200000 مگاپاسکال، ضریب پواسون 0/3، مقاومت تسلیم 355 مگاپاسکال می باشند و به دلیل فولادی بودن مصالح از معیار ون میسز جهت ارزیابی نتایج استفاده شده است. در مدلسازی نمونه های آزمایشگاهی در نرم افزار اجزای محدود از المان Shell143 جهت مدل نمودن ورقهای بال، جان و سخت کننده ها استفاده شده است. تیرها بصورت تک دهانه و دو سر ساده بوده و بارگذاری هر تیر بصورت یکنواخت تحت بار متمرکز بود. جهت تحلیل غیرخطی نمونه ها از روش نیوتن رافسون استفاده شده است و برای همگرایی بهتر و افزایش دقت نتایج، ابعاد المانها 50 میلیمتر و گامهای بارگذاری به میزان 0/001 در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (3) مدلسازی در ANSYS دارای دقت قابل قبولی نسبت به مدل های آزمایشگاهی می باشد. و نشان دهنده صحت مدلسازی و المانهای انتخابی می باشد.



شکل 3: نتایج صحت یابی مدل اجزای محدود و مدل آزمایشگاهی عثمان¹ [10]

3.2. مشخصات مدل‌های شبیه‌سازی شده

مدل‌های مورد بررسی دیوارهای یک طبقه و یک دهانه به عرض دهانه 3000 و ارتفاع 2432 میلیمتر می‌باشند. اعضای مرزی از ستونهای IPB180 و تیر IPE180 ساخته شده‌اند. ورقهای فولادی پرکننده در دهانه قاب از نوع ورقهای با موجهای سینوسی می‌باشند که بصورت صلب به اعضای مرزی در محیط نرم افزار مدل شده است. در شکل (4) مدل دیوار برشی فولادی یک طبقه با ورقهای موجدار نشان داده شده است. شرایط مرزی تمامی مدل‌های موجود در این مقاله بصورتی است که از تغییر مکان خارج صفحه اعضای مرزی جلوگیری شده است و دیوار در تکیه گاه کاملاً می‌باشد. جهت تحلیل غیرخطی مدلها از دو مشخصه غیرخطی مصالح با تنش تسلیم 240 مگاپاسکال، ضریب پواسون 0/3، مدول الاستیسیته 200000 مگاپاسکال و مدول الاستیسیته مماسی معادل با 3 درصد مدول الاستیسیته و غیرخطی هندسی ناشی از تغییر شکل‌های بزرگ استفاده شده است.



شکل 4: مدل دیوار یک طبقه با موجهای سینوسی

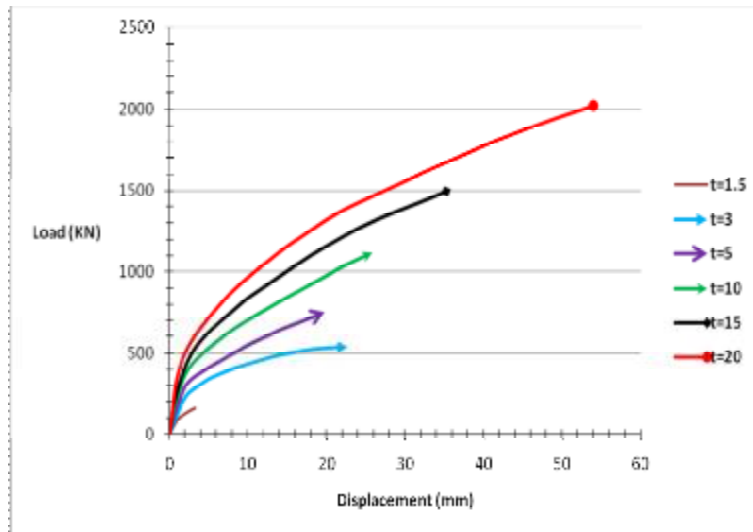
4. بررسی نتایج

4.1. اثر ضخامت ورق موجدار

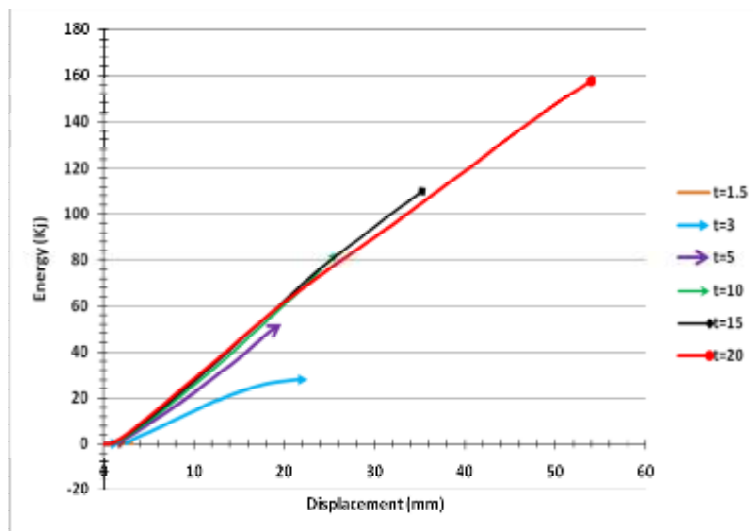
جهت بررسی اثر ضخامت ورق موجدار از دو دیوار به عرض 3000 و ارتفاع 2432 میلیمتر استفاده شده است که با ستونهایی از مقاطع IPB180 و تیر IPE180 احاطه شده اند. در این دیوار ارتفاع گام موج ورق 9/5 میلیمتر و طول موج های ورق 60 میلیمتر بوده که از ضخامت های 1/5، 3، 5، 10، 15 و 20 میلیمتر تشکیل شده است. مطابق جدول (1) و شکل های (5) و (6) با افزایش ضخامت ورق موجدار بر میزان ظرفیت باربری، اتلاف انرژی و شکل پذیری دیوار بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

جدول 1- نتایج حاصل از اثر ضخامت ورق موجدار با ارتفاع موج 9.5 و طول موج 60 میلیمتر

$T_p(\text{mm})$	$P_u(\text{KN})$	$E_u(\text{Kj})$	$U_x(\text{mm})$	$T_{von}(\text{Mpa})$
1.5	166/46	0/17	3/23	247/25
3	539/76	28	22/68	744/15
5	750	52/1	19/74	995/20
10	1146/86	83/35	25/83	1244
15	1495/3	110/06	35/24	1373
20	2021/7	157/46	54/01	1567



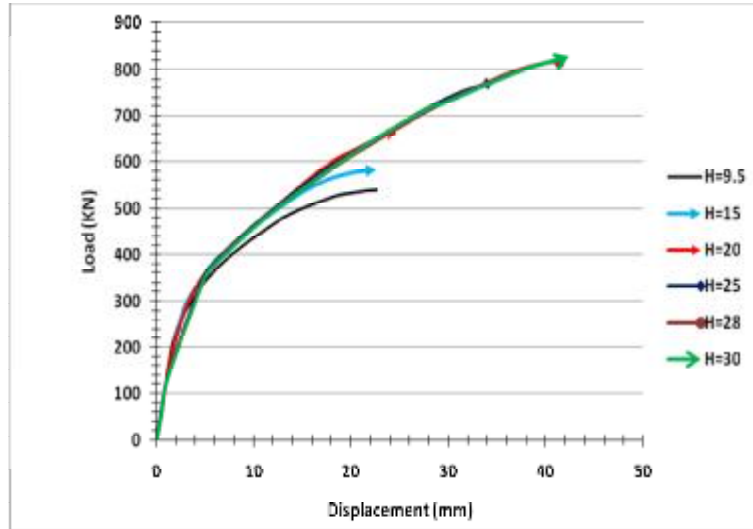
شکل 5: نمودار بار - تغییر مکان دیوار فولادی با ورق موجدار به ارتفاع موج 9.5 و طول موج 60 میلیمتر و ضخامت متفاوت ورق



شکل 6: نمودار اتلاف انرژی - تغییر مکان دیوار فولادی با ورق موجدار به ارتفاع موج 9.5 و طول موج 60 میلیمتر و ضخامت متفاوت ورق

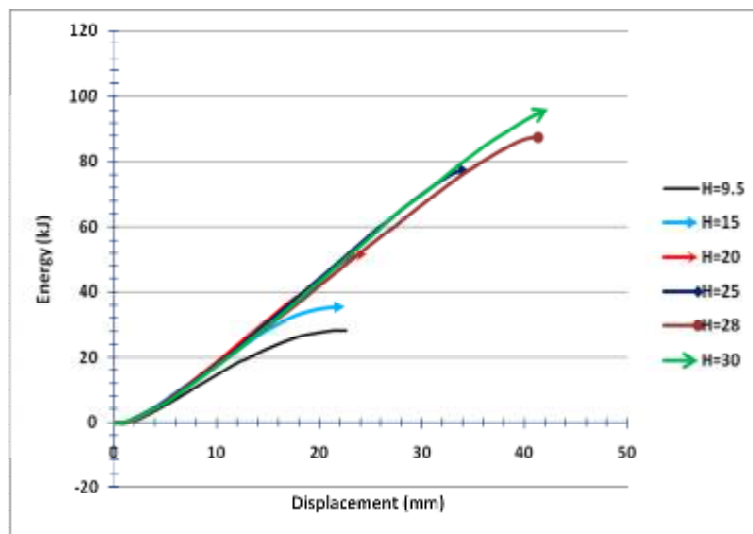
2.4. اثر ارتفاع موج ورق

با افزایش ارتفاع موج ورق بر میزان سختی پیچشی ورق دیوار افزوده می گردد و از میزان تغییر مکانهای خارج صفحه آن نیز کاسته خواهد شد که در این بخش جهت بررسی اثر این پارامتر، با ثابت بودن سایر مشخصات دیوار فولادی اعم از اعضای مرزی و ابعاد دیوار، از ورقه‌های موجدار به ارتفاع موج 9/5، 15، 20، 25، 28، 30 میلیمتر و به ضخامت ورق 3 میلیمتر و طول موج 60 میلیمتر استفاده شده است. همانطوری که در نمودار شکل (7) نشان داده شده است با افزایش ارتفاع ورق موجدار اگرچه تغییر وزن ورق دیوار ناچیز بوده است اما میزان تغییر ظرفیت باربری دیوار بسیار قابل ملاحظه است از طرفی با افزایش ارتفاع گام موج ورق بر میزان شکل پذیری دیوار نیز افزوده می گردد.



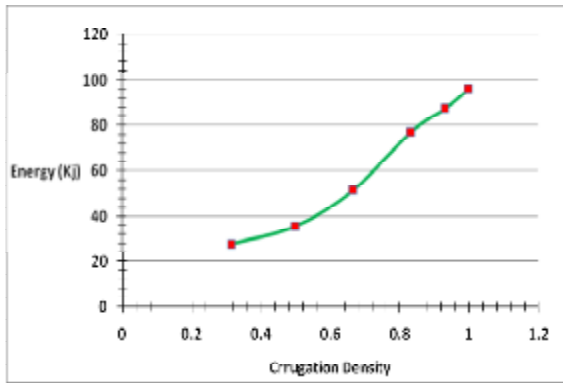
شکل 7: نمودار بار - تغییر مکان دیوار فولادی با ارتفاع موج متفاوت ورق

از طرف دیگر افزایش ارتفاع گام موج ورق همانطور که در شکل (8) نشان داده شده است بر میزان اتلاف انرژی دیوار تاثیر قابل ملاحظه ای داشته است، که این نشان دهنده شکل پذیر بودن این نوع از دیوار ها می باشد. در بررسی این شش نمونه دیوار مشاهده شده است که با افزایش ارتفاع موج ورق از میزان تغییر شکل های قطری خارج صفحه وسط پانل کاسته شده و دیوار در محل اتصال به اعضای محیطی دچار کماتش موضعی می گردد.

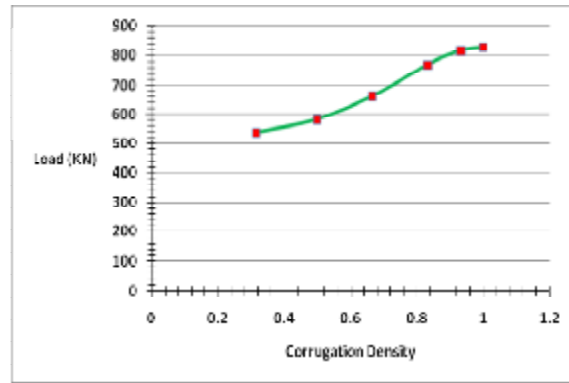


شکل 8: نمودار اتلاف انرژی - تغییر مکان دیوار فولادی با ارتفاع موج متفاوت ورق

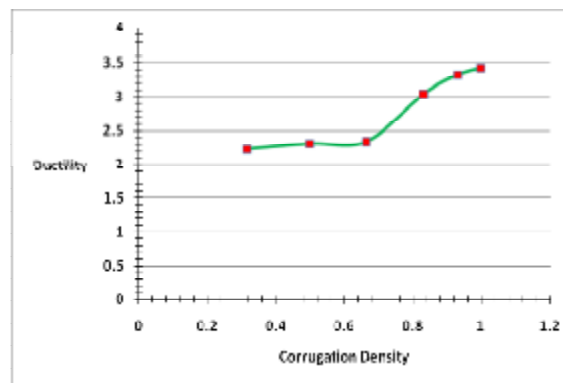
نتیجه مهم دیگری که می توان از ارتفاع موج ورق های موجدار بدست آورد، اثر تراکم موج ورق در دیوار می باشد. این پارامتر که نسبت پهنای کلی ورق موجدار (فاصله قائم بین رئوس موج های ورق نسبت به محور مرکزی گذرنده از ورق) به طول هر گام موج می باشد $(\frac{2H}{l})$. با بررسی این پارامتر در شش نمونه فوق مشاهده شده است که با افزایش تراکم موج های ورق در دیوار مطابق نمودار های شکل (9) بر میزان ظرفیت باربری، اتلاف انرژی و شکل پذیری دیوار بطور قابل ملاحظه ای افزوده خواهد شد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل 9: نمودارهای اثر تراکم موج ورق بر (الف) ظرفیت باربری، (ب) اتلاف انرژی، (ج) شکل پذیری

5. نتیجه گیری

با بررسی اثر ضخامت ورق و ارتفاع موج ورق در دیوارهای برشی فولادی با ورقهای موجدار با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ANSYS مشاهده شده که:

- 1- در دیوارهای فولادی با ورقهای موجدار در صورتیکه که ضخامت ورق افزایش یابد تغییرات در میزان ظرفیت باربری، شکل پذیری و اتلاف انرژی بسیار قابل ملاحظه می باشد.
- 2- با افزایش ارتفاع موج ورق موجدار اگرچه میزان تغییرات وزنی ورق ناچیز می باشد اما میزان تغییرات ظرفیت باربری، شکل پذیری و اتلاف انرژی آن بسیار مناسب می باشد که می توان از این گزینه به عنوان یک موضوع کلیدی در طراحی ها استفاده نمود.
- 3- در دیوارهای فولادی با ورقهای موجدار با افزایش تراکم موج ورق، ظرفیت باربری، اتلاف انرژی و میزان شکل پذیری دیوار افزایش می یابد و می توان در این نوع دیوارها با افزایش ناچیز در وزن کلی دیوار و استفاده از ورقهای با تراکم موج بیشتر به این رفتار مناسب دست یافت.

6. مراجع

۱. یدالهی، ی، غلامپور، س، و سیدپور، س.م، (1389)، " بررسی رفتار دیوار برشی فولادی سخت شده تحت بار جانبی، " مجموعه مقالات اولین همایش ملی مهندسی عمران، دانشگاه پردیسان، بابلسر، ایران، 12 آذر.

2. De Matteis, G., Formisano, A., Panico, S. and Mazzolani, F.M, (2008), "Numerical and experimental analysis of pure aluminium shear panels with welded stiffeners," Computers and Structures, p.545-555.
3. Usman, F., (2001), " Shear Buckling of trapezoidal plate," master of science thesis, university technology malaysia



4. Mo, Y. L. and Perng, S. F., (2000), "Hybrid RC Frame-Steel Wall Systems," *Composite and Hybrid Systems*, ACI SP-196, p.189-213.
5. Chosa, K., Kashiwai, K., Kono, S. and Watanabe, F., (2006), "Fundamental Study on Corrugated Steel Webs Used as Shear Walls," *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan*, Vol.C2, p. 721-722.
6. Stojadinovic, B. and Tipping, S., (2008), "STRUCTURAL TESTING OF CORRUGATED SHEET STEEL SHEAR WALLS," University of California at Berkeley
7. Borjes, I.A., (2009), "Behavior of Corrugated Metal Panels for use as Storm Shutters," Doctor of Philosophy Thesis, UNIVERSITY OF PUERTO RICO.
8. Eurocode 3 1993-1-5 (2003), "Design of steel structures Part 1.5 : Plated structural elements,".
9. Tanaka, Y., Ichioka, Y., Kono, S., Ohta, Y. and F. Watanabe, (2008), "Precast Prestressed Portal Frames with Corrugated Steel Panel Dampers," the 14th World Conference on Earthquake Engineering, China.
10. Yazeed, E. and Ahmed, S., (2007), "Design aspects of steel I-girders with corrugated steel webs," *Electronic Journal of Structural Engineering*, 7.
11. Kiyamaz, G., Coskun, E., Cosgun, C. and Seckin, E., (2010), " Transverse load carrying capacity of sinusoidally corrugated steel web beams with web openings," *Steel and Composite Structures*, Vol. 10, No. 1, p. 69-85.
12. Ahmed, S. and Yazeed, E., (2005), "Plate girders with corrugated steel webs," *AISC engineering Journal*, Vol 42, No. 1, pp. 1-13.
13. Gentilinia, C., Nobilea, L. and Seffenb, K. A., (2009), "Numerical analysis of morphing corrugated plates," *Procedia Engineering* 1, p. 79–82.
14. Galambos, T.V, (1998), "Guide to stability design criteria for metal structures," 5th ed., John Wiley and Sons, NY, SA.
15. Timoshenko, S. and Krieger, S.W., (1959), "Theory of Plates and Shells," McGraw-Hill, Second Edition.