# توسعه یک مدل ارتوتروپ برای رفتار چرخهای دیوارهای برشی فولادی دارای ورق جان موجدار ذوزنقهای

مهسا صفرنورالله'، پرهام معمارزاده\*۲

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد <sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

(دریافت: ۳۰/۱۰/۳۰، پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۸، نشر آنلاین: ۹۹/۱۲/۱۸

### چکیدہ

دیوار برشی فولادی یک سیستم مقاوم جانبی است که در دو نوع سختشده و سختنشده وجود دارد. در انواع سختشده، جزئیات اجرایی زیادی وجود دارد که وقت، هزینه و نظارت بیشتری را می طلبد. دیوار برشی فولادی با جان موجدار، سامانه نوینی است که بهعنوان گزینه جایگزین برای انواع دیوار سختشده موردتوجه قرار گرفته است. ورقهای موجدار هندسه پیچیدهای دارند و مدل سازی آنها در نرمافزارهای متداول موجود مشکل است. برای برون رفت از مسئله پیچیدگی مدل سازی ورقهای موجدار، میتوان بهجای این ورقها، با کمک روابط مکانیک مواد، ورقهای تخت با خواص ارتوتروپ (Orthotropic) جایگزین نمود. هدف این تحقیق، ارائه یک روند مشخص برای محاسبه خواص مکانیکی یک ورق تخت ارتوتروپیک، جایگزین ورق موجدار و نیز بررسی دقت مدل تخت ارتوتروپ در پیش بینی رفتار یکنوا و چرخهای دیوار برشی موجدار است. بدین منظور، نتایج تحلیل مدل های ارتوتروپ و موجدار ذوزنقهای دیوار برشی فولادی با مشخصات مختلف موجها باهم مقایسه شده است. در پایان، با بررسی نتایج مدل های مختلف در نرمافزار اجزاء محدود موجدار ذوزنقهای دیوار برشی فولادی با مشخصات مختلف موجها باهم مقایسه شده است. در پایان، با بررسی نتایج مدل های مختلف در نرمافزار اجزاء محدود آباکوس (ABAQUS) مشخص شد که روش پیشنهادی میتواند با تقریب مناسبی رفتار یکنوا و چرخهای دیوار برشی فولادی با ورق موجدار ذوزنقه ای را برشی فولادی با می مند که روش پیشنهادی میتواند و بی می با کمک رواند برشی فولادی با مرافزار اجزاء محدود بیش بینی نماید.

**کلیدواژهها**: دیوار برشی فولادی موجدار، ورق ارتوتروپ، ورق موجدار ذوزنقهای، رفتار یکنوا و چرخهای.

### ۱– مقدمه

دیوار برشی فولادی نوعی سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی باد و زلزله میباشد که در چند دهه اخیر برای طراحی و تقویت ساختمانهای بلندمرتبه مورداستفاده قرار گرفته است. این سیستم شامل پانلهای فولادی پرکننده است که توسط اعضای قاب پیرامون که همان تیر و ستونها هستند احاطه میشود. دیوارهای برشی فولادی در حال حاضر در دو نوع سختشده و سختنشده ساخته میشوند. با استناد به تحقیقات انجامشده میتوان گفت درمجموع، انواع سختشده از نظر عملکرد لرزهای و بهرهبرداری مناسبتر میباشند (Emami و همکاران، ۲۰۱۳).

در کنار فواید زیاد انواع سختشده نسبت به سختنشده، وجود سختکنندهها و جزئیات اجرایی زیاد در انواع سختشده وقت و هزینه زیاد و نیز نظارت بیشتری را میطلبد. لذا اخیراً استفاده از دیوار برشی فولادی با ورق موجدار ذوزنقهای بهعنوان گزینهای

برای رفع مشکلات انواع سختشده موردتوجه قرار گرفته است (Emami) و همکاران، ۲۰۱۳).

دیوارهای برشی فولادی با ورق موجدار ذوزنقهای مزیتهایی نسبت به دیوار برشی فولادی تخت دارند، که میتوان به قابلیت اتلاف انرژی بالا، سختی اولیه مناسب، شکلپذیری قابلتوجه و همچنین افزایش سختی خمشی ورق فولادی به علت مقطع موجدار آن اشاره نمود (Tong و همکاران، ۲۰۱۵).

به منظور طراحی دیوار برشی فولادی نیاز به شبیه سازی و تحلیل آن در نرمافزارهای اجزاء محدود است. ورق موجدار ذوزنقه ای هندسه پیچیده ای دارد و مدل سازی آن در نرم افزارهای مختلف زمان بر و مشکل است؛ یک ترفند برای رفع این مشکل آن است که ورق موجدار ذوزنقه ای دارای هندسه پیچیده با یک ورق تخت با خواص ارتوتروپ ماده جایگزین شود.

و همکاران در سالهای ۱۹۶۹ و ۱۹۷۵، روابطی را برای محاسبه صلبیت خمشی دیافراگم موجدار ذوزنقهای برحسب

<sup>\*</sup> نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۴۲۲۹۲۶۰۰-۰۳۱

آدرس ايميل: safarnourollah.mahsa@gmail.com (م. صفرنورالله)، p-memar@iaun.ac.ir (پ. معمارزاده).

مشخصات مکانیکی و هندسی دیافراگم ارائه نمودند. Briassoulis در ۱۹۸۶ با توسعه و اصلاح روابط تحلیلی ارائهشده توسط سایر محققین، خواص ارتوتروپ معادل یک ورق موجدار سینوسی را با روابط تحلیلی دارای دقت بالاتر ارائه نمود.

Samanta و همکاران در ۱۹۹۹، به توسعه روابطی برای محاسبه صلبیت کششی ورق موجدار ذوزنقهای پرداخته، با در نظر گرفتن صلبیت کششی علاوه بر صلبیت خمشی به بررسی رفتار غیرخطی هندسی ورق موجدار در مفهوم ونکارمن<sup>۱</sup> پرداختند. ایشان ورق موجدار را با یک ورق تخت ارتوتروپ معادل جایگزین نمودند. آنها با انجام یک سری تحلیلهای استاتیکی و دینامیکی بهروش اجزاء محدود بر روی مدلهای موجدار و مدلهای ارتوتروپ<sup>۲</sup> معادل، همبستگی مناسبی را بین نتایج مدلهای متناظر برای شرایط تکیهگاهی ساده و گیردار نشان دادند؛ همچنین، دریافتند که افزایش تعداد موجها در ورقهای موجدار ذوزنقهای موجب افزایش همبستگی نتایج میگردد.

Liew و همکاران در سالهای ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹، برای تحلیل غیرخطی دینامیکی و نیز تحلیل ارتعاش آزاد ورقهای موجدار سختشده و سختنشده به روش بدون شبکه گالرکین<sup>۳</sup> و براساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول از مدل ارتوتروپ معادل استفاده نمودند. این محققین ورق موجدار سختشده را بهصورت ورق ارتوتروپ سختشده مدل کردند؛ بهاینصورت که سختکنندهها را بهعنوان تیرهایی به مدل ارتوتروپ معادل اضافه نمودند. مقایسه نتایج تحلیل این مدلها با نتایج سایر محققین مطابقت خوبی را نشان میداد.

در پژوهش دیگری Xia و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک مدل تحلیلی مبتنی بر همگنسازی<sup>۴</sup> به روش جزء حجمی نماینده (RVE)<sup>۵</sup> برای تحلیل ورقهای موجدار با شکل موجهای مختلف ارائه نمودند. از محدودیتهای مدل مزبور، میتوان به پیچیدگی بیشتر این مدل نسبت به مدل ارتوتروپ معادل ارائهشده توسط سایر محققین اشاره نمود. با این حال، روش مزبور میتواند برای ورقهای موجدار ساختهشده با شکل موجهای مختلف مورداستفاده قرار گیرد.

Tong و همکاران در سال ۲۰۱۵ با محاسبه صلبیت خمشی ورق موجدار ذوزنقهای با استفاده از روابط ارائهشده توسط Easley (۱۹۶۹)، بار کمانشی دیوار برشی فولادی سختشده و سختنشده را بهدست آوردند. مقایسه نتایج مدل ارتوتروپ معادل با نتایج ارائهشده در مراجع برای بار کمانش توافق خوبی را نشان میداد.

1. Von Karman

- 2. Orthotropic
- 3. Galerkin
- 4. Homogenisation

Park و همکاران در ۲۰۱۶، عبارات صریحی را برای محاسبه صلبیت مؤثر کششی و خمشی و همچنین صلبیت مؤثر برشی برای پانلهای مرکب<sup>6</sup> موجدار پیشنهاد نمودند.

Aoki و همکاران در ۲۰۱۷ به ارزیابی عددی و آزمایشگاهی بسامد طبیعی مودهای مختلف ورق موجدار پرداختند. به این  $D_{11}^{eq}$  منظور، صلبیت خمشی ورقهای موجدار شامل  $D_{22}^{eq}$ ،  $D_{66}^{eq}$  ,  $D_{12}^{eq}$  را برحسب مشخصات مکانیکی و هندسی ورق موجدار برای مدلسازی ورق ارتوتروپ معادل ارائه نمودند. نتایج نشان داد که پیشبینیهای مدل ورق معادل فقط برای مودهای پایین رضایتبخش است.

در فرآیند معادلسازی یک ورق موجدار با یک ورق ارتوتروپ معادل به روشهای مختلف ارائهشده توسط محققین در مراجعی که پیشتر شرح داده شد، صلبیت خمشی ورق ارتوتروپ معادل بر اساس خصوصیات هندسی و مادی ورق موجدار بهدست میآید. برای مدلسازی ورق ارتوتروپ معادل در نرمافزارهای تجاری اجزاء برشی و نیز ضریب پواسون<sup>۷</sup> ورق در جهتهای مختلف است. موضوع چگونگی محاسبه ویژگیهای متشکله ورق ارتوتروپ با استفاده از صلبیتهای خمشی ورق بهدلیل بیشتر بودن تعداد متغیرهای مجهول نسبت به متغیرهای معلوم، چالشی در مدلسازی ورق ارتوتروپ معادل محسوب میشود.

برای رفع این چالش، Tharian و همکاران در ۲۰۱۳، با فرض تعدادی پیشفرض، رابطهای را برای محاسبه ضخامت معادل برای ورق ارتوتروپ معادل ارائه نمودند. این رابطه متشکل از جملههایی به شکل سری نیمه بینهایت و نیز تنش بیشینه در ورق موجدار بود. آنها با استفاده از پیش فرضها و ضخامت معادل موفق به ارائه روشی برای محاسبه ویژگیهای متشکله ورق ارتوتروپ معادل شدند. این محققین با انجام یک سری تحلیلهای استاتیکی و کمانشی نشان دادند که روش مزبور منجر به نتایج رضایتبخشی برای تخمین خیز و بار کمانشی و نیز تخمین مقاومت نهایی با دقت حدود ۱۸/۵ درصد برای ورقهای موجدار با شرایط مرزی ساده می شود؛ در حالی که نتایج برای ورق های با شرایط مرزی ساده- گیردار چندان رضایت بخش نبود. علاوه بر ضعف این روش، در مورد ورق های دارای شرایط مرزی گیردار، چالش دیگر موجود در روش پیشنهادشده توسط Tharian و همکاران (۲۰۱۳) آن است که برای محاسبه تنش بیشینه مورداستفاده در محاسبه ضخامت معادل، الزام به مدلسازی و تحلیل ورق موجدار وجود

<sup>5.</sup> Representative Volume Element

<sup>6.</sup> Composite

<sup>7.</sup> Poisson's Ratio

دارد که این امر خود از پیچیدگی برخوردار بوده و با هدف سادهسازی مدل پیچیده ورق موجدار سازگار نیست.

همچنین در سال ۲۰۱۶ Zhou و همکاران با فرض جابهجاییهای محوری یکسان در دو مدل همگن موجدار و ارتوتروپ معادل، ویژگیهای متشکله ورق ارتوتروپ معادل برای جان موجدار یک شاهتیر قوطی شکل را بهطور مستقیم برحسب مشخصات مکانیکی و هندسی ورق موجدار جان ارائه نمودند. نتایج توافق خوبی را برای تغییر شکل شاهتیر در دو مدل مزبور نشان میداد.

هدف مقاله حاضر این است که برای کاهش حجم محاسبات اجزاء محدود و سادهسازی شبکهبندی، با استفاده از قوانین مقاومت مصالح و روابط ارائهشده برای صلبیت خمشی ورقهای موجدار ذوزنقهای توسط سایر محققین، فرآیند سادهای را برای تعیین ویژگیهای متشکله مدل ارتوتروپ معادل پیشنهاد نموده، کفایت فرآیند پیشنهادشده را در مدلسازی دیوارهای برشی فولادی با ورق جان موجدار ذوزنقهای بررسی نماید.

گفتنی است، عمده مطالعات پیشین انجامشده در این موضوع، مربوط به ورقهای دارای شرایط مرزی مشخص ساده یا گیردار بوده، کمتر به ورقهای دارای شرایط مرزی نیمهصلب مثل ورق جان دیوار برشی فولادی پرداخته شده است. ورق جان دیوار برشی فولادی بهدلیل اتصال به تیرها و ستونهای پیرامونی، بهصورت یک ورق با شرایط مرزی نیمهصلب عمل مینماید. یادآوری میشود که مطالعه انجامشده بر روی دیوار برشی فولادی در مرجع (Tong و همکاران، ۲۰۱۵) صرفاً منحصر به تعیین بار کمانشی است و به بررسی رفتار بار – جابهجایی دیوار برشی نمی پردازد؛ علاوه بر آن، در مرجع (Tong و همکاران، ۲۰۱۵) برای محاسبه علاوه بر آن، در مرجع (Tong و همکاران، ۲۰۱۵) برای محاسبه محاسبه ویژگیهای متشکله مدل ارتوتروپ معادل نمی پردازد. در بررسی انجامشده توسط نویسندگان، گزارش منتشرشدهای در زمینه تحلیل بار – جابهجایی دیوار برشی فولادی موجدار با استفاده زمینه تحلیل بار – جابهجایی دیوار برشی فولادی موجدار با استفاده

### ۲- تئوری

شکل (۱) یک ورق موجدار ذوزنقهای را نشان میدهد. ورق-های موجدار ذوزنقهای بهدلیل هندسه مقطعشان دارای صلبیت متفاوت در جهتهای مختلف بوده، رفتار ارتوتروپ از خود نشان میدهند.





معادله حاکم بر رفتار خمشی ورقهای ارتوتروپ بهصورت رابطه (۱) است (Timoshenko و همکاران، ۱۹۵۹):

$$D_{x}\frac{\partial^{4}w}{\partial x^{4}} + 2(D_{1} + 2D_{xy})\frac{\partial^{4}w}{\partial x^{2} \partial y^{2}} + D_{y}\frac{\partial^{4}w}{\partial y^{4}} = q \qquad (1)$$

بهطوریکه، w خیز ورق، xD و Dy بهترتیب صلبیت خمشی در جهتهای x و y هستند؛ مقدار H نیز از رابطه (۲) بهدست میآید (Timoshenko و همکاران، ۱۹۵۹):

$$H = D_1 + 2D_{xy} \tag{(1)}$$

بهطوریکه، *D<sub>xy</sub>* سختی پیچشی ورق است، و *D* برای یک ورق موجدار ذوزنقهای، ناچیز و برابر صفر منظور میشود (Timoshenko و همکاران، ۱۹۵۹). صلبیتهای خمشی و پیچشی یک ورق موجدار ذوزنقهای برحسب مشخصات مکانیکی و هندسی ورق موجدار با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه است (Tong و همکاران، ۲۰۱۵):

$$D_x = \frac{EI_x}{\lambda} \tag{(7)}$$

$$D_y = \frac{Et^3 \lambda}{12 q} \tag{f}$$

$$D_1 \sim 0$$
 ( $\Delta$ )

$$D_{xy} = \frac{Et^3}{6(1+\nu)} \frac{q}{\lambda} \tag{(5)}$$

به طوری که، E و  $\nu$  به ترتیب، مدول الاستیسیته  $^{\wedge}$  و ضریب پواسون و t ضخامت ورق موجدار است؛  $\lambda$  مشخصه هندسی موج ذوزنقه ای؛ و q طول ضلع شیب دار مقطع ذوزنقه ای یک موج است

8. Elasticity Modulus

(شکل (۲)).  $I_x$ ، ممان اینرسی مقطع یک موج ذوزنقهای حول محور خنثای خود از رابطه زیر بهدست میآید:

$$I_x = 2d_1 ta^2 + \frac{4ta^3}{3\sin\gamma} \tag{Y}$$

به طوری که، متغیرهای هندسی a، d1 و γ در شکل (۲) نشان داده شده است. شده است.

$$D_x = \frac{E_x t^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \tag{(A)}$$



شکل ۲- هندسه مقطع موجدار (Tong و همکاران، ۲۰۱۵)

$$D_{y} = \frac{E_{y}t^{3}}{12(1 - v_{x}v_{y})}$$
(9)

$$D_{xy} = \frac{G_{xy}t^3}{6} \tag{1.1}$$

به طوری که،  $E_x$  و  $E_x$  به ترتیب مدول الاستیسیته ورق ارتوتروپ در امتداد محورهای x و  $G_{xy}$  مدول برشی است؛ هم چنین،  $v_x$  و  $v_x$  ضرایب پواسون ورق ارتوتروپ به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\nu_{x} = \left| \frac{\varepsilon_{y}}{\varepsilon_{x}} \right| \quad g \quad \nu_{y} = \left| \frac{\varepsilon_{x}}{\varepsilon_{y}} \right| \tag{11}$$

بهطوری که،  $x^3$  و  $y^3$  بهترتیب کرنشهای محوری در امتداد محورهای  $x \ e \ y$  می باشند. با داشتن مشخصات مکانیکی و هندسی ورق موجدار می توان از روابط (۳) تا (۶) صلبیت خمشی ورق را محاسبه نمود؛ بدین ترتیب، سمت چپ روابط (۸) تا (۱۰) معلوم است. در سمت راست روابط (۸) تا (۱۰)، پنج متغیر مجهول مربوط به ویژگیهای متشکلهی ورق ارتوتروپ معادل شامل  $x^3$ .  $y^3$  و به ویژگیهای متشکلهی ورق ارتوتروپ معادل شامل  $x^3$ .  $y^3$  و زوردن پنج متغیر مجهول با داشتن تنها سه متغیر معلوم X. و آوردن پنج متغیر مجهول با داشتن تنها سه متغیر معلوم X. و نیاز به برخی پیش فرض ها و نیز یک فرآیند مشخص دارد که در این مقاله پیشنهاد و به آن پرداخته می شود. یافتن پیش فرض های

9. Isotropic
10. Betti's Reciprocal Theorem

مناسب و نیز ارائه یک فرآیند مشخص برای بهدست آوردن پنج متغیر ارتوتروپیک مجهول با استفاده از سه متغیر ایزوتروپ<sup>۹</sup> معلوم، نوآوری و سهم این مقاله در مکانیک دیوارهای برشی موجدار محسوب می شود. با صرفنظر نمودن از تأثیر موجها بر رفتار خمشی ورق موجدار حول محور x (شکل (۱)) می توان پیش فرض زیر را در نظر گرفت:

 $Ey = E \tag{11}$ 

همچنین مطابق مرجع (Tharian و همکاران، ۲۰۱۴) فرض میشود:

$$\nu_x = \nu \tag{11}$$

بهطوری که، E و v مشخصات مکانیکی ورق موجدار، پیش تر معرفی شده است. براساس نظریه متقابل بتی  $v_{s}$  می توان  $v_{y}$  را از رابطه زیر بهدست آورد (۲۰۰۴ ، Szilard):

$$\frac{D_x}{D_y} = \frac{\nu_x}{\nu_y} \tag{14}$$

سپس، مدول  $E_x$  با استفاده از رابطه (۸) به صورت زیر به دست  $a_{n}$ می آید:

$$E_x = \frac{12D_x}{t^3} \tag{10}$$

سپس، مدول  $E_y$  با استفاده از رابطه (۹) بهصورت زیر بهدست میآید:

$$E_y = \frac{12D_y}{t^3} \tag{19}$$

همچنین، مدول برشی G<sub>xy</sub> با استفاده از رابطه (۱۰) بهصورت زیر محاسبه می شود:

$$G_{xy} = \frac{12D_{xy}}{t^3} \tag{1Y}$$

چنان که ملاحظه می شود ابتدا براساس مشخصات هندسی موجها، سختی خمشی ورق موجدار ( $D_x$ ,  $D_y$  و  $D_y$ ) با استفاده از روابط ( $^{(7)}$ ), ( $^{(7)}$ ) و ( $^{(7)}$ ) محاسبه می شود؛ سپس با استفاده از همان w- $E_x$ ) و ( $^{(7)}$ ) محاسبه می شود؛ سپس با استفاده از همان w- $E_y$  و  $w_D$ ) ورق ارتوتروپ براساس روابط ( $^{(10)}$ ) تا ( $^{(11)}$ ) محاسبه می شود. بنابراین، روابط مزبور تضمین کننده آن است که سختیهای خمشی مدلهای موجدار و ارتوتروپ یکسان باشند. سختیهای خمشی مدلهای موجدار و ارتوتروپ یکسان باشند. محدود، علاوه بر لزوم مشخص نمودن مدولهای ارتجاعی و برشی محدود، علاوه بر لزوم مشخص نمودن مدولهای ارتجاعی و برشی  $E_x$ ,  $E_x$ 

ورودی به نرمافزار معرفی شود. مقادیر مدول برشی Gxz و Gyz برابر با Gxy منظور می شود. گفتنی است، یکی از برتری های فرآیند معادل سازی ارائه شده در این مقاله، یکسان بودن ضخامت ورق موجدار و ورق ارتوتروپ معادل می باشد؛ در حالی که، در بیش تر فرآیندهای معادل سازی موجود بررسی شده توسط نویسندگان، یک مرحله اضافه برای محاسبه ضخامت معادل نیز وجود دارد.

#### ۳– مدلسازی عددی

بهمنظور بررسی کفایت فرآیند معرفی شده در محاسبه ویژگیهای متشکله ورق ارتوتروپ معادل و نیز پیشفرضهای در نظر گرفته شده در پیشبینی رفتار دیوار برشی فولادی با استفاده از روش ورق ارتوتروپ معادل مثالهای مختلفی ارائه خواهد شد. در ابتدا به مدلسازی اجزاء محدود یک قطعه دیوار برشی فولادی با ورق ذوزنقهای موجدار که توسط Emami و همکاران (۲۰۱۳) مورد آزمایش قرار گرفته، پرداخته می شود. سپس، نتایج بار-جابهجایی بهدست آمده از آزمایش (Emami و همکاران، ۲۰۱۳) با نتایج مدل اجزاء محدود دیوار برشی فولادی با ورق موجدار مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار می گیرد. هم چنین، نتایج مدل اجزاء محدود دیوار برشی فولادی دارای ورق ارتوتروپ معادل با مدل اجزاء محدود دیوار برشی دارای ورق موجدار مقایسه شده، کفایت فرآيند پيشنهادشده براى تعيين مشخصات مدل ارتوتروپ معادل مورد ارزیابی قرار می گیرد. در ادامه، با مقایسه نتایج مدل دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و با ورق ارتوتروپ معادل برای مشخصات مختلف هندسی موجها و نیز ضخامت ورق، تأثیر متغیرهای مختلف هندسی بر دقت مدل ارتوتروپ معادل موردبررسی قرار می گیرد.

### ۳-۱- مشخصات نمونه آزمایشگاهی

به منظور اعتبار سنجی مدل اجزاء محدود، نمونه دیوار برشی فولادی آزمایش شده توسط Emami و همکاران (۲۰۱۳) انتخاب و مدل عددی آن در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس ساخته می شود. مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی در شکل (۳) نشان داده می شود. ورق و اجزاء مرزی دیوار برشی مزبور به تر تیب از جنس فولاد St12 و St14 است. پانل پرکننده دیوار برشی فولادی به صورت موجدار ذوزنقه ای با جهت گیری افقی ساخته شده، به طوری که مشخصات هندسی مقطع موجدار ذوزنقه ای با تعداد ۸ نیم موج (۸=۸) مطابق شکل (۴) است.



شکل ۳- مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی (ابعاد به میلیمتر) (Emami و همکاران، ۲۰۱۳)



شکل ۴- مشخصات هندسی مقطع موجدار (ابعاد به میلیمتر)

خواص مکانیکی فولاد مصرفی در اجزاء تشکیلدهنده دیوار نیز مطابق جدول (۱) میباشد.

جدول ۱- خواص مكانيكي فولاد مصرفي (Emami و همكاران،

| (1+11  |                            |                    |                    |          |                          |  |
|--|----------------------------|--------------------|--------------------|----------|--------------------------|--|
| کرنش<br>پلاستیک (٪)<br>(متناظر تنش<br>نهایی) | افزایش<br>نسبی طول<br>(./) | تنش نهایی<br>(MPa) | تنش تسلیم<br>(MPa) | نوع مقطع | فولاد<br>مصرفی           |  |
| ٣/٣  | ٣/٣                        | 442                | ۳۰۰                | IPB160   | بال و جان<br>ستونها      |  |
| ٣/٧  | ٣/٧                        | 408                | ۲۸۸                | IPB140   | بال و جان<br>تیر فوقانی  |  |
| ٣/٧  | ٣/٧                        | 408                | ۲۸۸                | IPB200   | بال و جان<br>تیر کف      |  |
| ۴/۱  | ۴/۱                        | ۲٩٠                | ۲۰۷                | Plate    | ورق<br>پرکنندہ<br>موجدار |  |
|  |                            |                    |                    |          |                          |  |

# ۲-۲- اعتبارسنجی مدل اجزاءمحدود

با استفاده از نرمافزار اجزاءمحدود آباکوس، دو نوع مدل عددی از نمونه آزمایشگاهی (Emami و همکاران، ۲۰۱۳) ساخته میشود. در نوع اول، ورق پرکننده دیوار برشی بهصورت موجدار و در دیگری بهصورت ورق تخت با خواص ارتوتروپ است (شکل (۵)).

در مدلسازی، ورقهای پرکننده بهطور مستقیم به اعضای پیرامونی متصل شده، از مدلسازی ورقهای اتصال پشتبند و یا

نبشیها صرفنظر می گردد. کلیه اجزاء تشکیل دهنده مدل دیوار برشی فولادی با استفاده از گزینه Merge بههم متصل شده، از زیر شاخه Interaction استفاده نمی شود. برای مدل سازی دیوار برشی از جزء پوسته S4R استفاده می شود. مشخصات مصالح مدل دارای ورق موجدار مطابق جدول (۱) است. در مدل ارتوتروپ معادل، مشخصات مصالح قاب پیرامونی مطابق جدول (۱) و معادل، مشخصات مصالح ورق تخت ارتوتروپ با استفاده از فرآیند پیشنهادشده در این مقاله روابط (۱۲) تا (۱۷) محاسبه، در نرمافزار وارد می شود. رفتار مصالح در ناحیه پلاستیک با ورود متغیرهای تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش پلاستیک متناظر آن به نرمافزار تعریف می شود. جدول (۱) کرنش های متناظر تنش نهایی برای مصالح ورق، تیر و ستون را نشان می دهد.



شکل ۵- مدل اجزاءمحدود دیوار برشی فولادی: الف) با ورق موجدار، ب) با ورق تخت دارای خواص ارتوتروپ

گفتنی است که علاوه بر منظور نمودن غیرخطی مادی با معرفی پلاستیسیته<sup>۱۱</sup> مصالح، لازم است گزینه غیرخطی هندسی نیز در نرمافزار فعال گردد تا تحلیل براساس فرض تغییر شکلهای بزرگ انجام گردد و امکان کمانش ورق فراهم شود. برای مدل سازی رفتار ارتوتروپیک دیوار برشی معادل موجدار در نرمافزار آباکوس، از ورق نوع اعاشاه استفاده می شود که متغیرهای ورودی آن عبارتاند از  $E_2$ ،  $E_2$ ،  $E_1$  و  $E_2$ . برای مثال برای یک ورق موجدار با مشخصات ۲۵ دا ۲۵ و د26. برای مثال برای یک ورق موجدار با مشخصات ۲۵ دا ۲۵ و ۱۲۰ سال (۱۲) به صورت ورق موجدار با مشخصات ۲۵ مالا روابط (۱۲) تا (۱۷) به صورت  $E_2 = E_7 = 3.84 \times 1013$ محاسبه می شود.

شرایط تکیه گاهی اعمالی نیز بدین صورت است که تیر پایین در محل پیچهای موجود در نمونه آزمایشگاهی مفصل شده و تیر بالا نیز به منظور جلوگیری از حرکت خارج از صفحه اعضای قاب، در جهت عمود بر قاب بسته می شود. بار به صورت کنترل جابه جایی به میزان ۵٪ ارتفاع (معادل ۸۰ میلی متر) در بالای قاب اعمال می شود. برای حصول جابه جایی های خارج از صفحه ورق پر کننده، یک نقص اولیه ساختاری<sup>۱۳</sup> در ورق ایجاد می شود. نقص اولیه به-صورت شکل مود اول کمانش برشی دیوار منظور می شود. براساس مطالعه معمارزاده (۱۳۸۸)، بیشینه نقص ساختاری مدل های تحقیق حاضر در محدوده ضخامت جان در نظر گرفته می شود تا صرفاً قابلیت جابه جایی بیرون از صفحه ورق جان را امکان پذیر سازد و اثر ثانویه ای در نتایج ایجاد نکند.

در ورقهای نازک به علت بروز پدیده کمانش، حصول هم گرایی عددی با دشواری همراه است. از اینرو، ورق به یک شبکهبندی ریز نیاز دارد. برای به دست آوردن یک شبکه مناسب، یکسری تحلیل حساسیت انجام و براساس آن ابعاد اجزاء محدود ۵×۵ سانتیمتر انتخاب شد (شکل (۶)). پس از تعیین اندازه شبکه، تحلیل استاتیکی غیرخطی و چرخهای بر روی مدل موجدار انجام شده، نمودارهای بار – جابه جایی استخراج میشود. در شکل (۷) نمودارهای حاصل از تحلیل عددی با منحنی پوش حاصل از نتایج آزمایشگاهی مقایسه میشود. شکل مزبور، مطابقت قابل قبولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی را نشان می دهد. در حالی که نتایج عددی و آزمایشگاهی برای سختی اولیه انطباق بالایی دارند، درصد کم تر از نیروی آزمایشگاهی می باشد. گفتنی است که نمودار عددی شکل (۷) مربوط به دیوار برشی موجدار است و نرمافزار قادر به تحلیل و هم گرایی مدل ارتوتروپ معادل آن نیست؛ علت این

11. Plasticity

12. Lamina

13. Initial Imperfection



امر، عدد بالای نسبت  $\frac{Ex}{Ev}$  برای مدل ارتوتروپ معادل مربوط به

شکل ۷- مقایسه نتایج عددی حاضر با دادههای آزمایشگاهی (Emami و همکاران، ۲۰۱۳)

# ۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش با ارائه مثالهای مختلف، تأثیر متغیرهایی مانند ضخامت ورق، تعداد نیم موجها و نیز زاویه مقطع موجهای ورق جان بر میزان تطابق نتایج حاصل از تحلیل عددی مدل دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و با ورق تخت ارتوتروپ تحت بارگذاری یکنوا و چرخهای موردبررسی قرار می گیرد. بارگذاری چرخهای طبق پروتکل AC154 است (شکل (۸)). مقدار AED <sup>۱۰</sup> مطابق مرجع (Emami و همکاران، ۲۰۱۳) برابر با ۲۰/۳ میلی متر

14. Approximate Elastic Displacement

میباشد. بهمنظور در ک آسان، مدلهای موردبررسی در این تحقیق با شناسههایی به شرح زیر معرفی میشوند.



شکل ۸- بارگذاری چرخهای شبه استاتیکی (Emami) و همکاران، ۲۰۱۳)

۴-۱- معرفی شناسه مدلهای دیوار برشی فولادی

برای هر مدل دیوار برشی موردمطالعه یک شناسه در نظر  $\mathcal{R}$ رفته میشود. بهطورکلی، شناسه مدل دیوار برشی دارای ورق موجدار بهصورت T- $\gamma$ -N- $t_{e}$  و شناسه مدل دیوار برشی دارای ورق تخت ارتوتروپ بهصورت V-N- $t_{e}$  تعریف می شود. T و O بهترتیب معرف ورق ذوزنقهای و ورق ارتوتروپ معادل می باشند.  $\gamma$  معرف زاویه مقطع موج در ورق جان است (شکل (۲))؛ N تعداد نیم موجها و  $t_{w}$  ضخامت ورق جان می باشد.

# $(t_w)$ ائیر ضخامت جان $(t_w)$

برای بررسی تأثیر ضخامت ورق جان، علاوه بر دیوار برشی با ضخامت ۱/۲۵ میلیمتر (موردمطالعه در بخش ۳–۲)، چهار دیوار برشی دیگر با ضخامتهای ۲، ۳، ۴ و ۵ میلیمتر به دو صورت موجدار و تخت ارتوتروپ مدلسازی شده، تحت بارگذاری پوش آور از نوع کنترل جابهجایی و بارگذاری چرخهای تحلیل شدند. مشخصات هندسی مقطع موجدار ذوزنقهای موردمطالعه در این بخش در جدول (۲) تعریف شده است.

### جدول ۲- مشخصات هندسی مقطع موجدار جان دیوارهای

|                            | طالعه                      | برشی موردم    |        |   |
|----------------------------|----------------------------|---------------|--------|---|
| <i>d</i> <sub>1</sub> (mm) | <i>d</i> <sub>2</sub> (mm) | <i>a</i> (mm) | (deg)y | N |
| 222/88                     | 14/22                      | ۵             | ٣٠     | ۶ |

نتایج بار – جابهجایی مدلهای دیوار برشی با ورق موجدار و با ورق ارتوتروپ معادل برای ضخامتهای مختلف جان تحت بارگذاری یکنوا و چرخهای بهترتیب در شکلهای (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. چنان که دیده می شود، مدل ارتوتروپ معادل

توانسته پیش بینی مناسبی را از رفتار یکنوا و چرخهای دیوار برشی موجدار برای ضخامتهای مختلف جان ارائه نماید؛ ظرفیت نهایی پیش بینی شده توسط مدل ارتوتروپ معادل در حدود ۲۰٪ تا ۱۳٪ برای ضخامتهای مختلف موردمطالعه، کمتر از مدل موجدار است؛ در حالی که، سختی اولیه حاصل از روش ارتوتروپ معادل اندکی بیش تر از روش تحلیل مدل موجدار می اشد.

در شکل (۱۱) مقادیر مقاومت نهایی حاصل از تحلیل مدلهای موجدار و ارتوتروپ آورده شده است. علت آن که تحلیل مدل ارتوتروپ معادل برای برخی از مدلهای موجدار ارائهشده در شکل (۹) نتوانسته تا جابهجایی نهایی مدل موجدار ادامه یابد آن است که در مدلهای ارتوتروپ، تفاوت نسبتاً بالای مدولهای الاستیک در جهتهای  $x \ e \ y$  از نظر عددی موجب دشواری فرآیند هم گرایی شده قادر به پیشروی نتایج تا جابهجایی نهایی مدل موجدار نمی باشد. خوشبختانه این امر و نیز افت مقاومت نهایی مدل ارتوتروپ نسبت به مدل موجدار اهمیت چندانی ندارد؛ زیرا که در عمل و در مقاصد طراحی، میزان دریفت<sup>۱۵</sup> مجاز در حدود ۴٪ منظور می شود و مدلهای بررسی شده به خوبی تا جابهجایی را منطق می معادل حدود ۱۲ درصد دریفت است انطباق بالایی را نشان می دهد.

میزان جذب انرژی پیش بینی شده توسط مدل ارتوتروپ معادل در بارگذاری چرخهای در حدود ۲۵/۵٪ تا ۳/۶٪ برای ضخامتهای مختلف موردمطالعه، کمتر از مدل موجدار است. در بیش تر موارد دیده می شود که افزایش ضخامت جان موجب کاهش اختلاف نتایج مدلهای موجدار و ارتوتروپ می شود. در شکل (۱۲) مقادیر جذب انرژی حاصل از تحلیل مدل های موجدار و ارتوتروپ آورده شده است.



شکل ۹- مقایسه نمودار نیرو- جابهجایی دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و ورق ار توتروپ برای ضخامتهای مختلف جان تحت بارگذاری یکنوا



شکل ۱۰- مقایسه نمودار نیرو- جابهجایی دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و ورق ار توتروپ برای ضخامتهای مختلف جان تحت بارگذاری چرخهای

15. Drift



شکل ۱۱– نتایج عددی مدل ها با متغیر ضخامت جان تحت بارگذاری یکنوا



بارگذاری چرخهای

# ۴-۳- تأثير زاويه مقطع موج (γ)

زاویه مقطع موجها در مدل مورداستفاده در اعتبارسنجی (بخش ۳–۲) معادل ۳۰ درجه است. بهمنظور بررسی میزان دقت روش ارتوتروپ معادل علاوه بر زاویه ۳۰ درجه، زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه نیز برای موجهای واقع در جان با ضخامتهای ۲ و ۵ میلیمتر در نظر گرفته شد. مشخصات هندسی مقطع ورق موجدار ذوزنقهای در مدلهای دیوار برشی موردبررسی در این بخش در جدول (۳) معرفی شده است. نتایج بار – جابهجایی حاصل از تحلیل مدلهای دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و با ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری یکنوا برای زوایای مختلف  $\gamma$  در شکلهای (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات هندسی مقطع ورق موجدار در مدلهای دیوار برشی با زوایای مختلف مقطع موجها (۲)

|                 |                            | -             | · · · •        |   |                            |
|-----------------|----------------------------|---------------|----------------|---|----------------------------|
| (mm) <i>d</i> 1 | (mm) <i>d</i> <sub>2</sub> | (mm) <i>a</i> | (deg) $\gamma$ | Ν | (mm) <i>t</i> <sub>w</sub> |
| ۲۳۲/۶۸          | 14/87                      | ۵             | ٣٠             | ۶ | ۵ و ۲                      |
| ۲۳۵/۹           | 14                         | ٧             | ۴۵             | ۶ | ۵ و ۲                      |
| 74.             | ١.                         | ٩             | ۶.             | ۶ | ۵ و ۲                      |





چنان که دیده میشود، تطابق مناسبی بین نتایج تحلیل مدلهای موجدار و ارتوتروپ وجود دارد. همچنین، مدل ارتوتروپ معادل برای دیوارهای برشی با زوایای مختلف مقطع موج، مقادیر کمتری را برای مقاومت نهایی و مقادیر بیشتری را برای سختی اولیه مدل نسبت به نتایج تحلیل مدل موجدار پیشبینی مینماید. در شکلهای (۱۵) و (۱۶) مقادیر مقاومت نهایی مدلها داده شده است. مطابق جدولهای مزبور، تخمین مدل ارتوتروپ برای میزان مقاومت نهایی پایین تر از مقادیر حاصل از تحلیل مدلهای موجدار است. با افزایش زاویه مقطع موج اختلاف نتایج مدلهای ارتوتروپ و موجدار کمتر میشود؛ همچنان که با افزایش زاویه مقطع موج، مقدار مقاومت نهایی مدل ارتوتروپ در حدود ٪۰/۲ تا ۱۳٪ با نتایج مدل موجرار اختلاف دارد.



شکل ۱۵- نتایج عددی مدلهای دیوار برشی دارای جان با ضخامت ۲ میلیمتر و با زوایای مختلف مقطع موج تحت بارگذاری یکنوا

شکل ۱۷- مقایسه نمودار نیرو- جابهجایی دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری چرخهای برای ضخامت جان ۲ میلیمتر با زاویه مقطع موج: الف) 30=γ، ب) 45=γ، ج) 60=γ

T-45-6-5

نتایج بار- جابهجایی حاصل از تحلیل مدلهای دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و با ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری چرخهای برای زوایای مختلف γ در شکلهای (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، تطابق مناسبی بین نتایج تحلیل مدلهای موجدار و ارتوتروپ وجود دارد. همچنین، مدل ارتوتروپ معادل برای دیوارهای برشی با زوایای مختلف مقطع موج، مقادیر کمتری را برای جذب انرژی مدل نسبت به نتایج تحلیل مدل موجدار پیشبینی مینماید. در شکلهای (۱۹) و (۲۰) مقادیر جذب انرژی مدلها داده شده است. مطابق شکلهای مزبور، با افزایش زاویه مقطع موج، اختلاف نتایج مدلهای ارتوتروپ و موجدار بیشتر میشود



شکل ۱۸- مقایسه نمودار نیرو- جابهجایی دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری چرخهای برای ضخامت جان ۵ میلیمتر با زاویه مقطع موج الف) 30=7، ب) 45=7، ج) 60=7



شکل ۱۹– نتایج عددی مدلهای دیوار برشی دارای جان با ضخامت ۲ میلیمتر و با زوایای مختلف مقطع موج تحت بارگذاری چرخهای



شکل ۲۰– نتایج عددی مدلهای دیوار برشی دارای جان با ضخامت ۵ میلیمتر و با زوایای مختلف مقطع موج تحت بارگذاری چرخهای

همچنان که با افزایش زاویه مقطع موج، مقدار جذب انرژی مدل ارتوتروپ در حدود ۰/۲٪ تا ۷٪ با نتایج مدل موجدار اختلاف دارد.

## (N) تأثير تعداد نيم موج (N)

تعداد نیم موجها در مدل مورداستفاده در اعتبار سنجی (بخش ۳–۲) معادل ۸ عدد است. به منظور بررسی میزان دقت روش ار توتروپ معادل علاوه بر تعداد ۸ نیم موج، تعداد ۴ و ۶ نیم موج نیز برای جان دیوار برشی فولادی با ضخامتهای ۲ و ۵ میلی متر در نظر گرفته شد. مشخصات هندسی (شکل (۲)) مقطع ورق موجدار ذوزنقه ای در مدل های دیوار برشی موردبررسی در این بخش در جدول (۴) معرفی شده است.

جدول ۴- مشخصات هندسی مقطع ورق موجدار در مدلهای دیوار برشی با تعداد مختلف نیمموج (N)

|                            | <b>C1</b> 1 1              |        |         |            |  |  |
|----------------------------|----------------------------|--------|---------|------------|--|--|
| <i>d</i> <sub>1</sub> (mm) | <i>d</i> <sub>2</sub> (mm) | A (mm) | γ (deg) | $t_w$ (mm) |  |  |
| 301/62                     | 17/77                      | ۵      | ٣٠      | ۵ و ۲      |  |  |
| 222/88                     | 17/77                      | ۵      | ٣٠      | ۵ و ۲      |  |  |
| 14.11                      | 17/77                      | ۵      | ٣٠      | ۵ و ۲      |  |  |



شکل ۲۲- مقایسه نمودار نیرو- جابهجایی دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری یکنوا برای ضخامت جان ۵ میلیمتر با تعداد نیمموج: الف) 4=۸، ب) 6=۸، ج) 8=8



شکل ۲۳- نتایج عددی مدلهای دیوار برشی دارای جان با ضخامت ۲ میلیمتر و با تعداد مختلف نیمموج تحت بارگذاری یکنوا

نتایج بار- جابهجایی حاصل از تحلیل مدلهای دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و با ورق ارتوتروپ تحت بار یکنوا برای تعداد مختلف نیمموج در شکلهای (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است. چنانچه دیده میشود، تطابق مناسبی بین نتایج تحلیل مدلهای موجدار و ارتوتروپ وجود دارد. همچنین، مدل ارتوتروپ معادل برای دیوارهای برشی با تعداد نیمموجهای مختلف مقادیر کمتری را برای مقاومت نهایی و مقادیر بیشتری را برای سختی اولیه مدل نسبت به نتایج تحلیل مدل موجدار پیشبینی مینماید.





در شکلهای (۲۳) و (۲۴) مقادیر مقاومت نهایی مدلها داده شده است. مطابق جدولهای مزبور، تخمین مدل ارتوتروپ برای مقاومت نهایی پایین تر از مقادیر حاصل از تحلیل مدلهای موجدار است.



شکل ۲۴– نتایج عددی مدلهای دیوار برشی دارای جان با ضخامت ۵ میلیمتر و با تعداد مختلف نیمموج تحت بارگذاری یکنوا



شکل ۲۵- مقایسه نمودار نیرو- جابهجایی دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری چرخهای برای ضخامت جان ۲ میلیمتر با تعداد نیمموج: الف) N=4، ب) 6=N، ج) 8=N

با افزایش تعداد نیم موج اختلاف نتایج مدل های ارتوتروپ و موجدار کمتر می شود؛ با افزایش تعداد نیم موجها اختلاف بین مدل ارتوتروپ و موجدار کاهش می یابد، هم چنین با افزایش تعداد نیم موج، مقدار مقاومت نهایی مدل ارتوتروپ به طور متوسط حدود ۱۵٪ و ۲/۵٪ به ترتیب برای ضخامت های ۲ و ۵ میلی متر جان با نتایج مدل موجدار اختلاف دارد؛ و هم چنین نتایج بار – جابه جایی حاصل از تحلیل مدل های دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و با ورق ارتوتروپ برای تعداد مختلف نیم موج تحت بار گذاری چرخه ای در شکل های (۲۵) و (۲۶) نشان داده شده است.





چنانچه دیده می شود، تطابق مناسبی بین نتایج تحلیل مدل های موجدار و ارتوتروپ وجود دارد. همچنین، مدل ارتوتروپ

معادل برای دیوارهای برشی با تعداد نیمموجهای مختلف مقادیر کمتری را برای جذب انرژی نسبت به نتایج تحلیل مدل موجدار پیشبینی مینماید.

در شکلهای (۲۷) و (۲۸) مقادیر جذب انرژی مدلها داده شده است. مطابق جدولهای مزبور، با افزایش تعداد نیمموج اختلاف نتایج مدلهای ارتوتروپ و موجدار بیشتر میشود؛ همچنانکه با افزایش تعداد نیمموج، مقدار جذب انرژی مدل ارتوتروپ بهطور متوسط حدود ٪۲/۵ و ۵٪ بهترتیب برای ضخامتهای ۲ و ۵ میلیمتر جان با نتایج مدل موجدار اختلاف دارد.



شکل ۲۷- نتایج عددی مدلهای دیوار برشی دارای جان با ضخامت ۲ میلیمتر و با تعداد مختلف نیمموج تحت بارگذاری چرخهای



شکل ۲۸- نتایج عددی مدلهای دیوار برشی دارای جان با ضخامت ۵ میلیمتر و با تعداد مختلف نیمموج تحت بارگذاری چرخهای

# ۵- دیوار برشی موجدار ذوزنقهای با جهتگیری قائم

مطالعه انجامشده توسط نویسندگان بر روی دیوارهای برشی فولادی با ورق موجدار ذوزنقهای قائم نشان داد که فرآیند معادلسازی ارائهشده در این مقاله، در خصوص دیوارهای برشی با موجهای قائم نیز همچون دیوارهای با موجهای افقی منجر به نتایج

مناسبی میشود در زیر برای رعایت اختصار، به ارائه نتایج مربوط به یک نمونه دیوار برشی با موجهای قائم با مشخصات ارائهشده در جدول (۵) اکتفا می شود.

جدول ۵- مشخصات هندسی مدل مقطع موجدار ذوزنقهای با جهتگیری قائم

| t <sub>w</sub><br>(mm) | N | γ<br>(deg) | a (mm) | d2<br>(mm) | d <sub>1</sub><br>(mm) | شناسه نمونه                       |
|------------------------|---|------------|--------|------------|------------------------|-----------------------------------|
| ۱/۲۵                   | ۶ | ۳۰         | ۵      | ۱۷/۳۲      | 818/18                 | $T$ - $\gamma$ -N- t <sub>w</sub> |
| ۱/۲۵                   | ۶ | ۳۰         | ۵      | 17/32      | 318/18                 | 0- γ-N- t <sub>w</sub>            |

شکلهای (۲۹) و (۳۰) نمودارهای نیرو- جابهجایی دیوار برشی موجدار با موجهای قائم زیر نیروهای یکنوا و چرخهای را نشان میدهد. چنان که دیده می شود تطابق قابل قبولی بین نتایج دیوار برشی موجدار و دیوار برشی ارتوتروپ معادل آن وجود دارد.



شکل ۲۹- مقایسه نمودار نیرو- جابهجایی دیوار برشی فولادی با ورق موجدار ذوزنقهای با جهتگیری قائم و دیوار ارتوتروپ معادل آن زیر بارگذاری یکنوا



شکل ۳۰- مقایسه نمودار نیرو- جابهجایی دیوار برشی فولادی با ورق موجدار ذوزنقهای با جهتگیری قائم و دیوار ارتوتروپ معادل آن زیر بارگذاری چرخهای

### ۶- نتیجهگیری

این مقاله روشی را برای معادلسازی ورق موجدار جان یک دیوار برشی فولادی با یک ورق تخت ارتوتروپ ارائه مینماید.

- Park KJ, Jung K, Kim YW, "Evaluation of homogenized effective properties for corrugated composite panels", Composite Structures, 2016, 140, 644-654.
- Samanta A, Mukhopadhyay M, "Finite element static and dynamic analyses of folded plates", Engineering Structures, 1999, 21, 3, 277-287.
- Szilard R, "Theories and applications of plate analysis", Classical, Numerical and Engineering Methods, John Wiley and Sons, 2004.
- Tharian MG, Gopalakrishnan NC, "Orthotropic plate model of hat stiffened plate", Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2014, 228, 3, 262-271.
- Timoshenko S, Woinowsky-Krieger S, "Theory of plate and shells", McGraw-Hill, New York, 1959.
- Tong J, Gue Y, "Elastic buckling behavior of steel trapezoidal corrugated shear walls with vertical stiffeners", Thin-Walled Structures, 2015, 95, 31-39.
- Xia Y, Friswell MI, Saavedra-Flores EI, "Equivalent models of corrugated panels", International Journal of Solids and Structures, 2012, 49, 13, 1453-1462.
- Zhou M, Liu Z, Zhang J, "Equivalent computational models and deflection calculation methods of box girders with corrugated steel webs", Engineering Structures, 2016, 127, 615-634.

- بهمنظور بررسی کفایت و دقت روش ارائهشده در ارزیابی رفتار دیوار برشی فولادی، مدلهای ارتوتروپ معادلی از دیوارهای برشی موجدار با متغیرهای مختلف ضخامت جان، زاویه مقطع موج و تعداد نیم موجها تحلیل شده، با نتایج دیوار برشی موجدار متناظر مقایسه گردید. از بررسی های انجام شده می توان موارد زیر را دریافت:
- روش پیشنهادشده در این مقاله دارای کفایت و دقت مناسبی برای پیش بینی رفتار یکنوا و چرخهای دیوار برشی فولادی با ورق جان موجدار ذوزنقهای است. در کلیه مدلهای بررسی شده حاضر با متغیرهای مختلف یاد شده، مقدار مقاومت نهایی و سختی اولیه بهدست آمده از روش پیشنهادی بهتر تیب اندکی کمتر و بیش تر از نتایچ مدلهای موجدار است. در بیش تر موارد بررسی شده، روش ارائه شده برای مدلهای با ضخامت کمتر نتایج دقیق تری را بهدست می دهد. هم چنان که، کاهش زاویه مقطع موج و نیز افزایش تعداد موجها موجب بالا رفتن دقت نتایج این روش می شود. در مدلهای بر سی شده در این تحقیق با متغیرهای مختلف یاد شده، بیش ترین اختلاف مشاهده شده بین نتایج مدلهای ار توتروپ معادل با نتایج مدلهای موجدار متناظر برای مقاومت نهایی و میزان جذب انرژی

# ۷- مراجع

- معمارزاده پ، "بررسی تئوریک دیوار برشی فولادی سختنشده با ورق نازک جان"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۱۳۸۸.
- Aoki Y, Maysenhölder W, "Experimental and numerical assessment of the equivalent-orthotropic-thinplate model for bending of corrugated panels", International Journal of Solids and Structures, 2017, 108, 11-23.
- Briassoulis D, "Equivalent orthotropic properties of corrugated sheets", Computers and Structures, 1986, 23, 2, 129-138.
- Easley TJ, McFarland ED, "Buckling of Light Gage Corrugated Metal Shear Diaphragms", Journal of
- Structural Division. ASCE, 1969, 95, 1497-1516. Easley TJ, "Buckling Formulas for Corrugated Metal Shear Diaphragms", Journal of Structural Division. ASCE, 1975 101, 1403-1417.
- Emami F, Mofid M, Vafai A, "Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls", Engineering Structures, 2013, 48, 750-762.
- Liew KM, Peng LX, Kitipornchai S, "Nonlinear analysis of corrugated plates using a fsdt and a meshfree method", Computational Methods for Applied Mechanical Engineering, 2007, 196, 2358-2376.
- Liew KM, Peng LX, Kitipornchai S, "Vibration analysis of corrugated reissner-mindlin plates using a meshfree galerkin method", International Journal of Mechanical Sciences, 2009, 51, 642-652.



# **EXTENDED ABSTRACT**

# Development of an Orthotropic Model for Cyclic Behavior of Steel Shear Walls having Trapezoidal Corrugated Web Plate

Mahsa Safarnourallah, Parham Memarzadeh\*

Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Received: 20 January 2020; Accepted: 08 March 2021

### **Keywords**:

Corrugated steel plate shear wall, Orthotropic sheet, Trapezoidal corrugated sheet, Monotonic and cyclic behavior.

## 1. Introduction

The steel plate shear wall is a lateral force resisting system, of two types of stiffened and unstiffened. The manufacturing of the stiffened type is time-consuming, costly, and needs more supervision; because of many executive details. Steel plate shear wall with a corrugated web is a new system that has been considered as an alternative for all types of stiffened walls. Corrugated sheets have complex geometry and their modeling is difficult in existing conventional software. To overcome the complexity of the modeling of corrugated sheets, flat sheets with orthotropic material properties can be replaced instead of these sheets by the help of material mechanics science. This research aims to provide a specific process for calculating the mechanical properties of an alternative orthotropic flat sheet to the corrugated sheet, and to study the accuracy of the orthotropic model in predicting the monotonic and cyclic behavior of corrugated shear walls. For this purpose, the results of the analyses of the orthotropic and trapezoidal corrugated models of the steel plate shear wall with different characteristics of the waves are compared and the accuracy of the proposed method is examined.

# 2. Methodology

Based on the geometric characteristics of corrugated sheets, the flexural stiffness of corrugated sheets ( $D_x$ ,  $D_y$  and  $D_{xy}$ ) (Tong et al., 2015) is calculated; then, using the same flexural stiffness of corrugated sheet, the elastic and shear modulus ( $E_x$ ,  $E_y$  and  $G_{xy}$ ) of the orthotropic sheet are calculated based on relationships 1 to 3. Therefore, these relationships ensure that the flexural stiffnesses of corrugated and orthotropic models are the same.

The  $E_x$  modulus is obtained using Eq. (1) as follows:

$$E_x = \frac{12D_x}{t^3} \tag{1}$$

Then, the modulus  $E_y$  is obtained using Eq. (2) as follows:

$$E_y = \frac{12D_y}{t^3} \tag{2}$$

Also, the  $G_{xy}$  shear modulus is calculated using Eq. (3) as follows:

\* Corresponding Author

E-mail addresses: safarnourollah.mahsa@gmail.com (Mahsa Safarnourallah), p-memar@iaun.ac.ir (Parham Memarzadeh).

$$G_{xy} = \frac{12D_{xy}}{t^3} \tag{3}$$

In orthotropic sheet modeling using conventional finite element software, in addition to the need to specify the elastic and shear modulus of  $E_x$ ,  $E_y$  and  $G_{xy}$ , it is necessary to introduce  $G_{xz}$  and  $G_{yz}$  values as input data to the software. The shear modulus values  $G_{xz}$  and  $G_{yz}$  are equal to  $G_{xy}$ . It should be noted that one of the advantages of the equivalence process presented in this paper is the same thickness of corrugated sheet and equivalent orthotropic sheet; however, in most of the existing equivalence processes reviewed by the authors, there is a step of calculating the equivalent thickness.

### 3. Results and discussion

By examining the effect of variables such as sheet thickness, several semiconductors and cross-sectional angles of life sheets on the degree of conformity of the results of numerical analysis of steel shear wall model with the corrugated sheet and orthotropic flat sheet under uniform and cyclic loading is investigated. Cycle loading is according to the AC154 protocol (Fig. 1). The value of AED (Approximate Elastic Displacement) according to the reference (Emami et al., 2013) is equal to 20.3 mm, and the results of orthotropic and trapezoidal models of steel shear wall traction with different wave characteristics are compared.



Fig. 1. Cyclic loading protocol (Emami et al., 2013)

### 4. Conclusions

This paper presents a method for comparing the corrugated sheet of a steel shear wall with an orthotropic flat sheet. To evaluate the adequacy and accuracy of the proposed method in assessing the behavior of steel shear walls, orthotropic models of corrugated shear walls with different variables of thickness, wavelength and some of semiconductors analyzed were compared with the corresponding corrugated shear wall results. The following can be deduced from the studies:

The method proposed in this paper has sufficient adequacy and accuracy to predict the uniform and cyclic behavior of steel shear wall with trapezoidal corrugated sheet. In all the studied models with the mentioned variables, the amount of final strength and initial stiffness obtained from the proposed method are slightly less and more than the results of corrugated models, respectively. In most of the cases studied, the proposed method for models with lower thickness gives more accurate results. Also, reducing the wavelength angle and increasing the number of waves increases the accuracy of the results of this method. In the models studied in this study with the mentioned different variables, the maximum difference observed between the results of orthotropic models is equivalent to the results of the corresponding corrugated models for the final strength and energy absorption rate is about 15%.

### 5. References

Emami F, Mofid M, Vafai A, "Experimental study on cyclic behavior of trapezoid ally corrugated steel shear walls", Engineering Structures, 2013, 48, 750-762.

Tong J, Gue Y, "Elastic buckling behavior of steel trapezoidal corrugated shear walls with vertical stiffeners", Thin-Walled Structures, 2015, 95, 31-39.