

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

مهسا صفرنورالله^۱، پرهام معمارزاده^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد

(دریافت: ۹۸/۱۰/۳۰، پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۸، نشر آنلاین: ۹۹/۱۲/۱۸)

چکیده

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 می‌طلبد. دیوار برشی فولادی با جان موج‌دار، سامانه نوینی است که به‌عنوان گزینه جایگزین برای انواع دیوار سخت‌شده مورد توجه قرار گرفته است. ورق‌های موج‌دار هندسه پیچیده‌ای دارند و مدل‌سازی آن‌ها در نرم‌افزارهای متداول موجود مشکل است. برای برون‌رفت از مسئله پیچیدگی مدل‌سازی ورق‌های موج‌دار، می‌توان به‌جای این ورق‌ها، با کمک روابط مکانیک مواد، ورق‌های تخت با خواص ارتوتروپ (Orthotropic) جایگزین نمود. هدف این تحقیق، ارائه یک‌روند مشخص برای محاسبه خواص مکانیکی یک ورق تخت ارتوتروپیک، جایگزین ورق موج‌دار و نیز بررسی دقت مدل تخت ارتوتروپ در پیش‌بینی رفتار یکنوا و چرخه‌ای دیوار برشی موج‌دار است. بدین منظور، نتایج تحلیل مدل‌های ارتوتروپ و موج‌دار دوزنقه‌ای دیوار برشی فولادی با مشخصات مختلف موج‌ها باهم مقایسه شده است. در پایان، با بررسی نتایج مدل‌های 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 دوزنقه‌ای را پیش‌بینی نماید.

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

۱- مقدمه

برای رفع مشکلات انواع سخت‌شده مورد توجه قرار گرفته است

(Emami و همکاران، ۲۰۱۳).

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

به‌منظور طراحی دیوار برشی فولادی نیاز به شبیه‌سازی و تحلیل آن در نرم‌افزارهای اجزاء محدود است. ورق موج‌دار دوزنقه‌ای هندسه پیچیده‌ای دارد و مدل‌سازی آن در نرم‌افزارهای مختلف زمان‌بر و مشکل است؛ یک ترفند برای رفع این مشکل آن است که ورق موج‌دار دوزنقه‌ای دارای هندسه پیچیده با یک ورق تخت با خواص ارتوتروپ ماده جایگزین شود.

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

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 مورد استفاده 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 در مجموع، 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 دوزنقه‌ای به‌عنوان گزینه‌ای

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

Aoki و همکاران در ۲۰۱۷ به ارزیابی عددی و آزمایشگاهی بسامد طبیعی مودهای مختلف ورق موج‌دار پرداختند. به این منظور، صلبیت خمشی ورق‌های موج‌دار شامل D_{11}^{eq} ، D_{12}^{eq} ، D_{66}^{eq} ، D_{22}^{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 به دست می‌آید. برای مدل‌سازی ورق ارتوتروپ معادل در نرم‌افزارهای تجاری اجزاء محدود نیاز به ویژگی‌های متشکله ورق شامل مدول ارتجاعی و برشی و نیز ضریب پواسون^۷ ورق در جهت‌های مختلف است. موضوع چگونگی محاسبه ویژگی‌های متشکله ورق ارتوتروپ با استفاده از صلبیت‌های خمشی ورق به دلیل 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 پیش‌فرض‌ها 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 می‌شود؛ درحالی‌که نتایج برای ورق‌های با شرایط مرزی ساده-گیردار چندان رضایت‌بخش نبود. علاوه بر ضعف این روش، در مورد ورق‌های دارای شرایط مرزی گیردار، چالش دیگر موجود در روش پیشنهادشده توسط Tharian و همکاران (۲۰۱۳) آن است که برای محاسبه تنش بیشینه مورد استفاده در محاسبه ضخامت معادل، الزام به مدل‌سازی و تحلیل ورق موج‌دار وجود

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 دوزنقه‌ای پرداخته، با در نظر گرفتن صلبیت کششی علاوه بر صلبیت خمشی به بررسی رفتار غیرخطی هندسی ورق موج‌دار در مفهوم ون کارمن^۱ پرداختند. ایشان ورق موج‌دار را با یک ورق تخت ارتوتروپ معادل جایگزین نمودند. آن‌ها با انجام یک سری تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی به روش اجزاء محدود بر روی مدل‌های موج‌دار و مدل‌های ارتوتروپ^۲ معادل، همبستگی مناسبی را بین نتایج مدل‌های متناظر برای شرایط تکیه‌گاهی ساده و گیردار نشان دادند؛ همچنین، دریافته‌اند که افزایش تعداد موج‌ها در ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای موجب افزایش همبستگی نتایج می‌گردد.

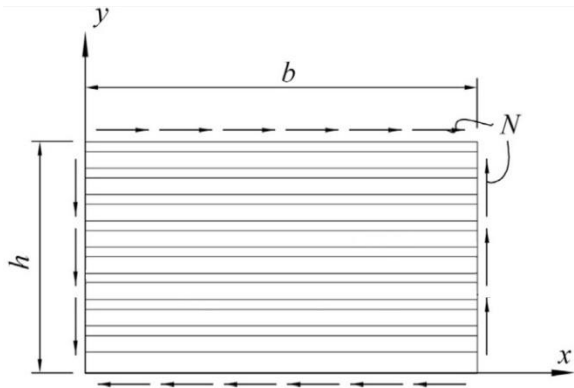
Liew و همکاران در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹، برای تحلیل غیرخطی دینامیکی و نیز تحلیل ارتعاش آزاد ورق‌های موج‌دار سخت‌شده و سخت‌نشده به روش بدون شبکه گالرکین^۳ و براساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول از مدل ارتوتروپ معادل استفاده نمودند. این محققین ورق موج‌دار سخت‌شده را به صورت ورق ارتوتروپ سخت‌شده مدل کردند؛ به این صورت که سخت‌کننده‌ها را به عنوان 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^۴ به روش جزء حجمی نماینده (RVE)^۵ 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 مورد استفاده قرار گیرد.

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

5. Representative Volume Element
 6. Composite
 7. Poisson's Ratio

1. Von Karman
 2. Orthotropic
 3. Galerkin
 4. Homogenisation



شکل ۱- ورق موجدار دوزنقه‌ای تحت بار برشی

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

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_1 + 2D_{xy}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q \quad (1)$$

به طوری که، w خیز ورق، D_x و D_y به ترتیب صلبیت خمشی در جهت‌های x و y هستند؛ مقدار H نیز از رابطه (۲) به دست می‌آید (Timoshenko و همکاران، ۱۹۵۹):

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

به طوری که، D_{xy} سختی پیچشی ورق است، و D_1 برای یک ورق موجدار دوزنقه‌ای، ناچیز و برابر صفر منظور می‌شود (Timoshenko و همکاران، ۱۹۵۹). صلبیت‌های خمشی و پیچشی یک ورق موجدار دوزنقه‌ای برحسب مشخصات مکانیکی و هندسی ورق موجدار با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه است (Tong و همکاران، ۲۰۱۵):

$$D_x = \frac{EI_x}{\lambda} \quad (3)$$

$$D_y = \frac{Et^3 \lambda}{12 q} \quad (4)$$

$$D_1 \sim 0 \quad (5)$$

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

به طوری که، E و ν به ترتیب، مدول الاستیسیته^۸ و ضریب پواسون و t ضخامت ورق موجدار است؛ λ مشخصه هندسی موج دوزنقه‌ای؛ و q طول ضلع شیب‌دار مقطع دوزنقه‌ای یک موج است

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 قوطی‌شکل را به‌طور مستقیم برحسب مشخصات مکانیکی و هندسی ورق موجدار جان ارائه نمودند. نتایج توافق خوبی را برای تغییرشکل 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 دوزنقه‌ای 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 دوزنقه‌ای 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 به دلیل اتصال به تیرها و ستون‌های پیرامونی، به صورت 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 نمی‌پردازد؛ علاوه بر آن، در مرجع (Tong و همکاران، ۲۰۱۵) برای محاسبه بار کمانش به‌طور مستقیم از صلبیت خمشی استفاده نموده، به محاسبه ویژگی‌های متشکله مدل ارتوتروپ معادل نمی‌پردازد. در بررسی انجام‌شده توسط نویسندگان، گزارش منتشرشده‌ای در زمینه تحلیل بار- جابه‌جایی دیوار برشی فولادی موجدار با استفاده از ورق ارتوتروپ معادل به جای ورق جان موجدار یافت نشد.

۲- تئوری

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

مناسب و نیز ارائه یک فرآیند مشخص برای به دست آوردن پنج متغیر ارتوتروپیک مجهول با استفاده از سه متغیر ایزوتروپ^۹ معلوم، نوآوری و سهم این مقاله در مکانیک دیوارهای برشی موج دار محسوب می شود. با صرف نظر نمودن از تأثیر موج ها بر رفتار خمشی ورق موج دار حول محور x (شکل (۱)) می توان پیش فرض زیر را در نظر گرفت:

$$E_y = E \quad (12)$$

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

$$\nu_x = \nu \quad (13)$$

به طوری که، E و ν مشخصات مکانیکی ورق موج دار، پیش تر معرفی شده است. براساس نظریه متقابل بتی^{۱۰}، می توان ν_y را از رابطه زیر به دست آورد (Szilard، ۲۰۰۴):

$$\frac{D_x}{D_y} = \frac{\nu_x}{\nu_y} \quad (14)$$

سپس، مدول E_x با استفاده از رابطه (۸) به صورت زیر به دست می آید:

$$E_x = \frac{12D_x}{t^3} \quad (15)$$

سپس، مدول E_y با استفاده از رابطه (۹) به صورت زیر به دست می آید:

$$E_y = \frac{12D_y}{t^3} \quad (16)$$

همچنین، مدول برشی G_{xy} با استفاده از رابطه (۱۰) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$G_{xy} = \frac{12D_{xy}}{t^3} \quad (17)$$

چنان که ملاحظه می شود ابتدا براساس مشخصات هندسی موج ها، سختی خمشی ورق موج دار (D_x ، D_y و D_{xy}) با استفاده از روابط (۳)، (۴) و (۶) محاسبه می شود؛ سپس با استفاده از همان سختی های خمشی ورق موج دار، مدول های ارتجاعی و برشی (E_x ، E_y و G_{xy}) ورق ارتوتروپ براساس روابط (۱۵) تا (۱۷) محاسبه می شود. بنابراین، روابط مزبور تضمین کننده آن است که سختی های خمشی مدل های موج دار و ارتوتروپ یکسان باشند.

در مدل سازی ورق ارتوتروپ با استفاده از نرم افزارهای رایج اجزاء محدود، علاوه بر لزوم مشخص نمودن مدول های ارتجاعی و برشی E_x ، E_y و G_{xy} لازم است مقادیر G_{yz} و G_{xz} نیز به عنوان داده های

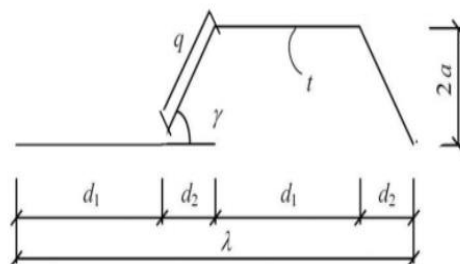
(شکل (۲)). I_x ، ممان اینرسی مقطع یک موج دوزنقه ای حول محور خنثای خود از رابطه زیر به دست می آید:

$$I_x = 2d_1ta^2 + \frac{4ta^3}{3\sin\gamma} \quad (7)$$

به طوری که، متغیرهای هندسی d_1 ، a و γ در شکل (۲) نشان داده شده است.

ارتباط صلبیت های خمشی و پیچشی یک ورق ارتوتروپ با مشخصات مکانیکی و هندسی آن به صورت روابط زیر است:

$$D_x = \frac{E_x t^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \quad (8)$$



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

$$D_y = \frac{E_y t^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \quad (9)$$

$$D_{xy} = \frac{G_{xy} t^3}{6} \quad (10)$$

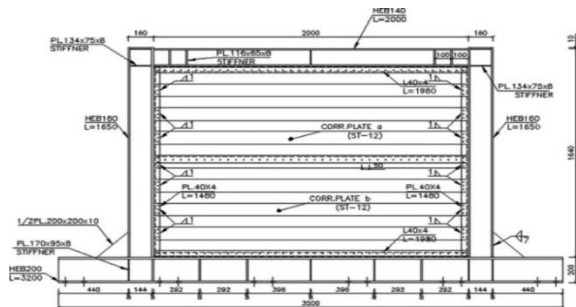
به طوری که، E_x و E_y به ترتیب مدول الاستیسیته ورق ارتوتروپ در امتداد محورهای x ، y و G_{xy} مدول برشی است؛ همچنین، ν_x و ν_y ضرایب پواسون ورق ارتوتروپ به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\nu_x = \left| \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \right| \quad \text{و} \quad \nu_y = \left| \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \right| \quad (11)$$

به طوری که، ϵ_x و ϵ_y به ترتیب کرنش های محوری در امتداد محورهای x و y می باشند. با داشتن مشخصات مکانیکی و هندسی ورق موج دار 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 ویژگی های متشکله ی ورق ارتوتروپ معادل شامل E_x ، E_y و G_{xy} ، ν_x و ν_y در جمع دارای پنج متغیر مجهول است. به دست آوردن پنج متغیر مجهول با داشتن تنها سه متغیر معلوم E ، ν و t 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



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



شکل ۴- مشخصات هندسی مقطع موجدار (ابعاد به میلی متر)

خواص مکانیکی فولاد مصرفی در اجزاء تشکیل دهنده دیوار نیز مطابق جدول (۱) می باشد.

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد مصرفی (Emami و همکاران، ۲۰۱۳)

فولاد مصرفی	نوع مقطع	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	نسبی طول نهایی (%)	افزایش پلاستیک (%)	کرنش (متناظر تنش نهایی)
بال و جان ستون ها	IPB160	۳۰۰	۴۴۳	۳/۳	۳/۳	
بال و جان تیر فوقانی	IPB140	۲۸۸	۴۵۶	۳/۷	۳/۷	
بال و جان تیر کف	IPB200	۲۸۸	۴۵۶	۳/۷	۳/۷	
ورق پرکننده موجدار	Plate	۲۰۷	۲۹۰	۴/۱	۴/۱	

۳-۲- اعتبارسنجی مدل اجزاء محدود

با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، دو نوع مدل عددی از نمونه آزمایشگاهی (Emami و همکاران، ۲۰۱۳) ساخته می شود. در نوع اول، ورق پرکننده دیوار برشی به صورت موجدار و در دیگری به صورت ورق تخت با خواص ارتوتروپ است (شکل ۵).

در مدل سازی، ورق های پرکننده به طور مستقیم به اعضای پیرامونی متصل شده، از مدل سازی ورق های اتصال پشت بند و یا

ورودی به نرم افزار معرفی شود. مقادیر مدول برشی G_{yz} و G_{xz} برابر با G_{xy} 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 بیشتر فرآیندهای معادل سازی موجود بررسی شده توسط نویسندگان، یک مرحله اضافه برای محاسبه ضخامت معادل نیز وجود دارد.

۳-۳- مدل سازی عددی

به منظور بررسی کیفیت فرآیند معرفی شده در محاسبه ویژگی های متشکله ورق ارتوتروپ معادل و نیز پیش فرض های در نظر گرفته شده در پیش بینی رفتار دیوار برشی فولادی با استفاده از روش ورق ارتوتروپ معادل مثال های مختلفی ارائه خواهد شد. در ابتدا به مدل سازی اجزاء محدود یک قطعه دیوار برشی فولادی با ورق دوزنقه ای موجدار که توسط Emami و همکاران (۲۰۱۳) مورد آزمایش قرار گرفته، پرداخته می شود. سپس، نتایج بار-جابجایی به دست 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، کیفیت فرآیند پیشنهاد شده برای تعیین 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 موج ها و نیز ضخامت ورق، تأثیر متغیرهای مختلف هندسی بر دقت مدل ارتوتروپ معادل مورد بررسی قرار می گیرد.

۳-۱- مشخصات نمونه آزمایشگاهی

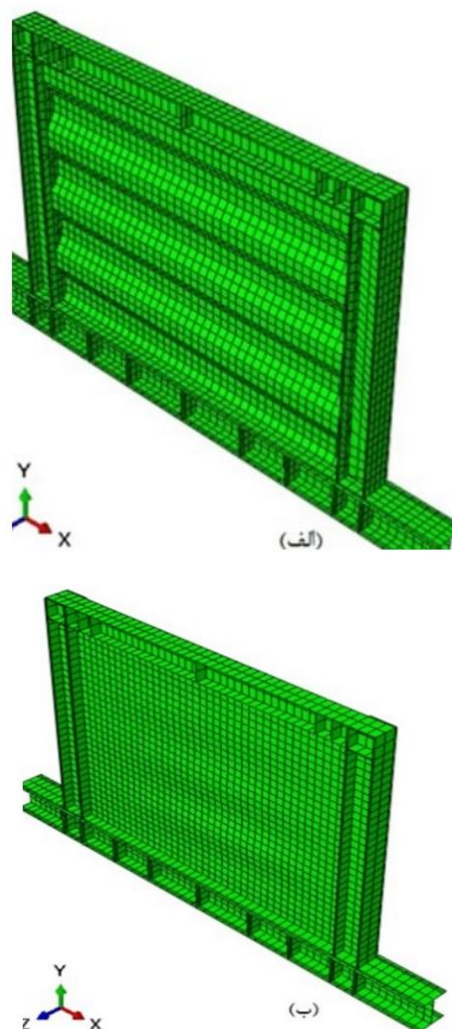
به منظور اعتبارسنجی مدل اجزاء محدود، نمونه دیوار برشی فولادی آزمایش شده توسط Emami و همکاران (۲۰۱۳) انتخاب و مدل عددی آن در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس ساخته می شود. مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی در شکل (۳) نشان داده می شود. ورق و اجزاء مرزی دیوار برشی مزبور به ترتیب از جنس فولاد St12 و St44 است. پانل پرکننده دیوار برشی فولادی به صورت موجدار دوزنقه ای با جهت گیری افقی ساخته شده، به طوری که مشخصات هندسی مقطع موجدار دوزنقه ای با تعداد ۸ نیم موج ($N=8$) مطابق شکل (۴) است.

گفتنی است که علاوه بر منظور نمودن غیرخطی مادی با معرفی پلاستیسیته^{۱۱} مصالح، لازم است گزینه غیرخطی هندسی نیز در نرم‌افزار فعال گردد تا تحلیل براساس فرض تغییرشکل‌های بزرگ انجام گردد و امکان کمانش ورق فراهم شود. برای مدل‌سازی رفتار ارتوتروپیک دیوار برشی معادل موج‌دار در نرم‌افزار آباکوس، از ورق نوع lamina استفاده می‌شود که متغیرهای ورودی آن عبارت‌اند از $E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$. برای مثال برای یک ورق موج‌دار با مشخصات $t=1/25\text{mm}$ ، $\gamma=30$ ، $q=20\text{mm}$ و $N=8$ ، متغیرهای ورودی لامینا^{۱۲} براساس روابط (۱۲) تا (۱۷) به صورت $E_1=E_x=3.84 \times 10^{13}$ ، $E_2=E_y=3.9 \times 10^{12}$ ، $G_{12}=G_{xy}=1.75 \times 10^{10}$ محاسبه می‌شود.

شرایط تکیه‌گاهی 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 می‌شود. بار به صورت کنترل جابه‌جایی به میزان ۵٪ ارتفاع (معادل ۸۰ میلی‌متر) در بالای قاب اعمال می‌شود. برای حصول جابه‌جایی‌های خارج از صفحه ورق پرکننده، یک نقص اولیه ساختاری^{۱۳} در ورق ایجاد می‌شود. نقص اولیه به صورت شکل مود اول کمانش برشی دیوار منظور می‌شود. براساس مطالعه معمارزاده (۱۳۸۸)، بیشینه نقص ساختاری مدل‌های تحقیق حاضر در محدوده ضخامت جان در نظر گرفته می‌شود تا صرفاً قابلیت جابه‌جایی بیرون از صفحه ورق جان را امکان‌پذیر سازد و اثر ثانویه‌ای در نتایج ایجاد نکند.

در ورق‌های نازک به علت بروز پدیده کمانش، حصول هم‌گرایی عددی با دشواری همراه است. از این‌رو، ورق به یک شبکه‌بندی ریز نیاز دارد. برای به‌دست آوردن یک شبکه مناسب، یکسری تحلیل حساسیت انجام و براساس آن ابعاد اجزاء محدود 5×5 سانتی‌متر انتخاب شد (شکل (۶)). پس از تعیین اندازه شبکه، تحلیل استاتیکی غیرخطی و چرخه‌ای بر روی مدل موج‌دار انجام شده، نمودارهای بار-جابه‌جایی 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 می‌دهد. درحالی‌که نتایج عددی و آزمایشگاهی برای سختی اولیه انطباق بالایی دارند، تخمین عددی نیروی متناظر با جابه‌جایی ۸۰ میلی‌متر حدود ۱۰ درصد کم‌تر از نیروی آزمایشگاهی می‌باشد. گفتنی است که نمودار عددی شکل (۷) مربوط به دیوار برشی موج‌دار است و نرم‌افزار قادر به تحلیل و هم‌گرایی مدل ارتوتروپ معادل آن نیست؛ علت این

نبشی‌ها صرف‌نظر می‌گردد. کلیه اجزاء تشکیل‌دهنده مدل دیوار برشی فولادی با استفاده از گزینه Merge به هم متصل‌شده، از زیرشاخه Interaction استفاده نمی‌شود. برای مدل‌سازی دیوار برشی از جزء پوسته S4R استفاده می‌شود. مشخصات مصالح مدل دارای ورق موج‌دار مطابق جدول (۱) است. در مدل ارتوتروپ معادل، مشخصات مصالح قاب پیرامونی مطابق جدول (۱) و مشخصات هندسی و مصالح ورق تخت ارتوتروپ با استفاده از فرآیند پیشنهادشده در این مقاله روابط (۱۲) تا (۱۷) محاسبه، در نرم‌افزار وارد می‌شود. رفتار مصالح در ناحیه پلاستیک با ورود متغیرهای تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش پلاستیک متناظر آن به نرم‌افزار تعریف می‌شود. جدول (۱) کرنش‌های متناظر تنش نهایی برای مصالح ورق، تیر و ستون را نشان می‌دهد.



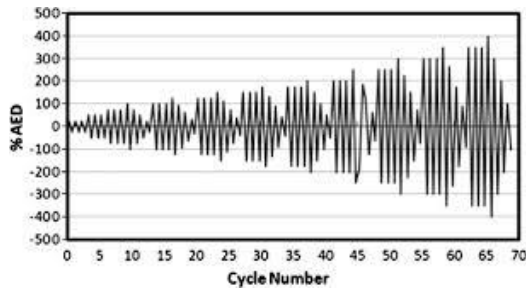
شکل ۵- مدل اجزاء محدود دیوار برشی فولادی: (الف) با ورق موج‌دار، (ب) با ورق تخت دارای خواص ارتوتروپ

12. Lamina

13. Initial Imperfection

11. Plasticity

می‌باشد. به منظور درک آسان، مدل‌های مورد بررسی 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 مورد مطالعه یک شناسه در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی، شناسه مدل دیوار برشی دارای ورق موج‌دار به صورت $T-\gamma-N-t_w$ و شناسه مدل دیوار برشی دارای ورق تخت ارتوتروپ به صورت $O-\gamma-N-t_w$ تعریف می‌شود. T و O به ترتیب معرف ورق دوزنقه‌ای و ورق ارتوتروپ معادل می‌باشند. γ زاویه مقطع موج در ورق جان است (شکل (۲))؛ N تعداد نیم‌موج‌ها و t_w ضخامت ورق جان می‌باشد.

۴-۲- تأثیر ضخامت جان (t_w)

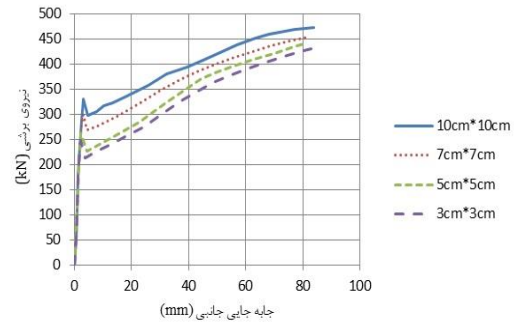
برای بررسی تأثیر ضخامت ورق جان، علاوه بر دیوار برشی با ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر (مورد مطالعه در بخش ۳-۲)، چهار دیوار برشی دیگر با ضخامت‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر به دو صورت موج‌دار و تخت ارتوتروپ مدل‌سازی شده، تحت بارگذاری پوش‌آور از نوع کنترل جابه‌جایی و بارگذاری چرخه‌ای تحلیل شدند. مشخصات هندسی مقطع موج‌دار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

جدول ۲- مشخصات هندسی مقطع موج‌دار جان دیوارهای

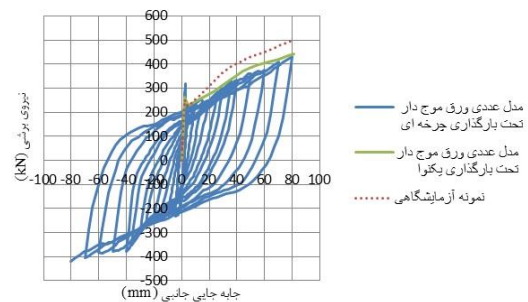
برشی مورد مطالعه				
d_1 (mm)	d_2 (mm)	a (mm)	(deg) γ	N
۲۳۲/۶۸	۱۷/۳۲	۵	۳۰	۶

نتایج بار- جابه‌جایی مدل‌های دیوار برشی با ورق موج‌دار و با ورق ارتوتروپ معادل برای ضخامت‌های مختلف جان تحت بارگذاری یکنوا و چرخه‌ای به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. چنان‌که دیده می‌شود، مدل ارتوتروپ معادل

امر، عدد بالای نسبت $\frac{E_x}{E_y}$ برای مدل ارتوتروپ معادل مربوط به نمونه آزمایشگاهی می‌باشد.



شکل ۶- تحلیل حساسیت به مش‌بندی

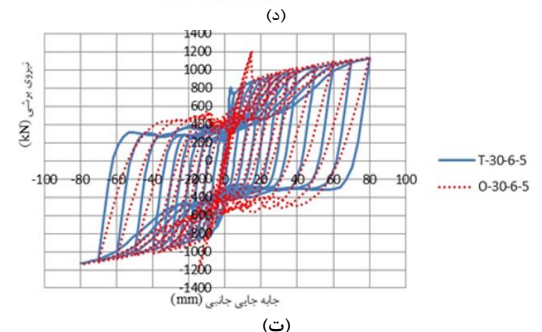
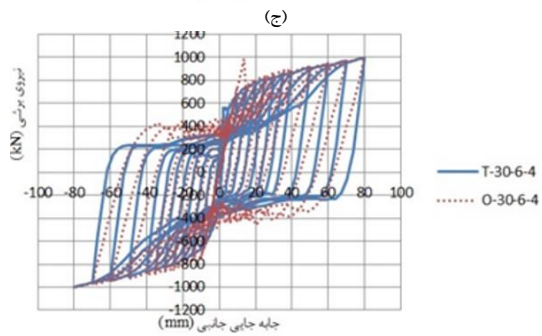
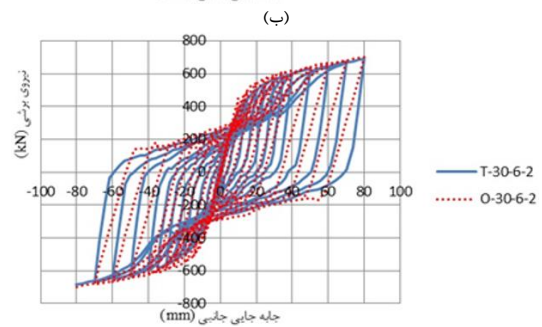
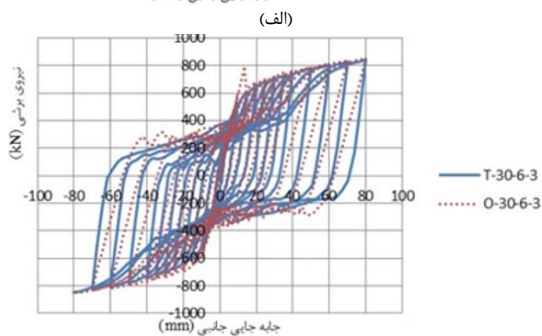
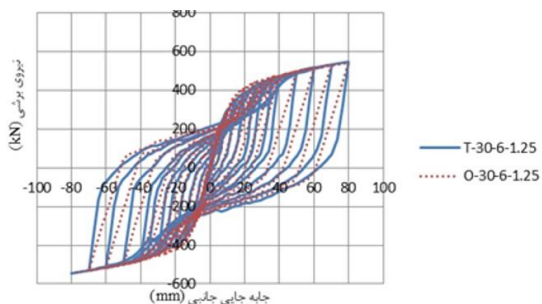


شکل ۷- مقایسه نتایج عددی حاضر با داده‌های آزمایشگاهی (Emami و همکاران، ۲۰۱۳)

نویسندگان بنا به تجربه دریافتند که نرم‌افزار فقط قادر به تحلیل آن دسته از مدل‌های ارتوتروپ است که نسبت $\frac{E_x}{E_y}$ آن‌ها عددی کمتر از حدود ۲۵ باشد؛ درحالی‌که در مورد مدل آزمایشگاهی Emami و همکاران (۲۰۱۳) این نسبت در حدود عدد ۱۰۰۰ می‌باشد. علت نسبت بالای $\frac{E_x}{E_y}$ برای مدل آزمایشگاهی مزبور، بزرگ بودن نسبی دامنه موج‌های دوزنقه‌ای (a) است. از این رو، تحلیل رفتار یکنوا (monotonic) و چرخه‌ای (cyclic) مدل ارتوتروپ معادل نمونه آزمایشگاهی به دلیل عدم همگرایی ناشی از نسبت بالای $\frac{E_x}{E_y}$ امکان‌پذیر نبود.

۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش با ارائه مثال‌های مختلف، تأثیر متغیرهایی مانند ضخامت ورق، تعداد نیم‌موج‌ها 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 مورد بررسی قرار می‌گیرد. بارگذاری چرخه‌ای طبق پروتکل AC154 است (شکل (۸)). مقدار AED ۱۴ مطابق مرجع (Emami و همکاران، ۲۰۱۳) برابر با ۲۰/۳ میلی‌متر

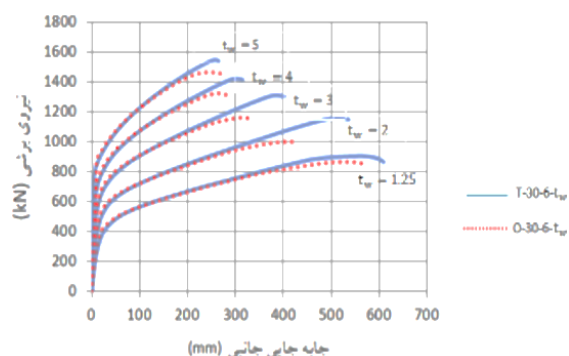


شکل ۱۰- مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و ورق ارتوتروپ برای ضخامت‌های مختلف جان تحت بارگذاری چرخه‌ای

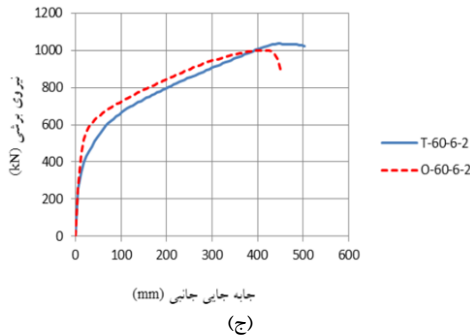
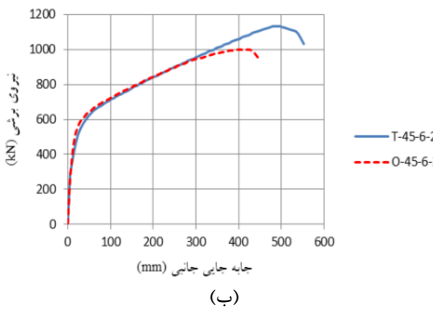
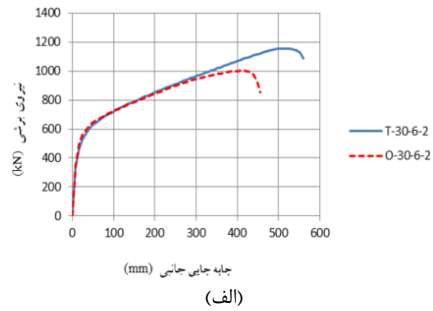
توانسته پیش‌بینی مناسبی را از رفتار یکنوا و چرخه‌ای دیوار برشی موج‌دار برای ضخامت‌های مختلف جان ارائه نماید؛ ظرفیت نهایی پیش‌بینی شده توسط مدل ارتوتروپ معادل در حدود ۴٪ تا ۱۳٪ برای ضخامت‌های مختلف مورد مطالعه، کم‌تر از مدل موج‌دار است؛ درحالی‌که، سختی اولیه حاصل از روش ارتوتروپ معادل اندکی بیش‌تر از روش تحلیل مدل موج‌دار می‌باشد.

در شکل (۱۱) مقادیر مقاومت نهایی حاصل از تحلیل مدل‌های موج‌دار و ارتوتروپ آورده شده است. علت آن‌که تحلیل مدل ارتوتروپ معادل برای برخی از مدل‌های موج‌دار ارائه شده 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 و y لازم نظر عددی موجب دشواری فرآیند هم‌گرایی شده قادر به پیشروی نتایج تا جابه‌جایی نهایی مدل موج‌دار نمی‌باشد. 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 دررفت^{۱۵} مجاز در حدود ۴٪ منظور می‌شود و مدل‌های بررسی شده به خوبی تا جابه‌جایی ۲۰۰ میلی‌متر که معادل حدود ۱۲ درصد دررفت است انطباق بالایی را نشان می‌دهد.

میزان جذب انرژی پیش‌بینی شده توسط مدل ارتوتروپ معادل در بارگذاری چرخه‌ای در حدود ۵٪ تا ۳۶٪ برای ضخامت‌های مختلف مورد مطالعه، کم‌تر از مدل موج‌دار است. در بیش‌تر موارد دیده می‌شود که افزایش ضخامت جان موجب کاهش اختلاف نتایج مدل‌های موج‌دار و ارتوتروپ می‌شود. در شکل (۱۲) مقادیر جذب انرژی حاصل از تحلیل مدل‌های موج‌دار و ارتوتروپ آورده شده است.

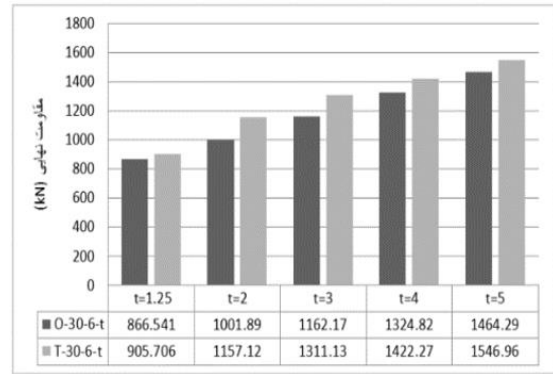


شکل ۹- مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و ورق ارتوتروپ برای ضخامت‌های مختلف جان تحت بارگذاری یکنوا

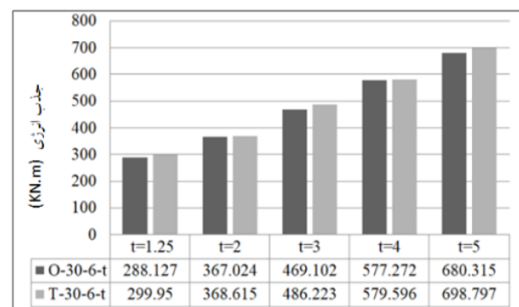


شکل ۱۳- مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری یکنوا برای ضخامت جان ۲ میلی‌متر با زاویه مقطع موج: (الف) $\gamma=30$ ، (ب) $\gamma=45$ ، (ج) $\gamma=60$

چنان‌که 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 پایین‌تر از مقادیر حاصل از تحلیل مدل‌های موج‌دار است. با افزایش زاویه مقطع موج اختلاف نتایج مدل‌های ارتوتروپ و موج‌دار کم‌تر می‌شود؛ هم‌چنان‌که با افزایش زاویه مقطع موج، مقدار مقاومت نهایی مدل ارتوتروپ در حدود ۰/۲٪ تا ۱۳٪ با نتایج مدل موج‌دار اختلاف دارد.



شکل ۱۱- نتایج عددی مدل‌ها با متغیر ضخامت جان تحت بارگذاری یکنوا



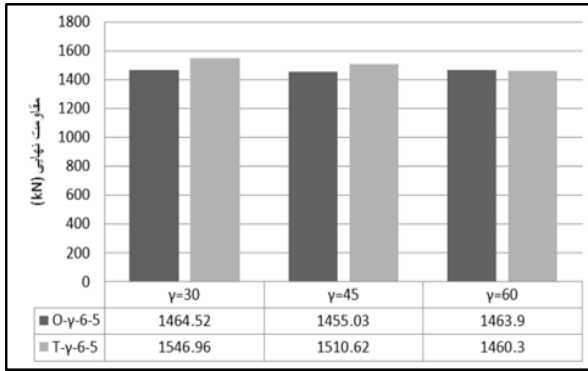
شکل ۱۲- نتایج عددی مدل‌ها با متغیر ضخامت جان تحت بارگذاری چرخه‌ای

۳-۴- تأثیر زاویه مقطع موج (γ)

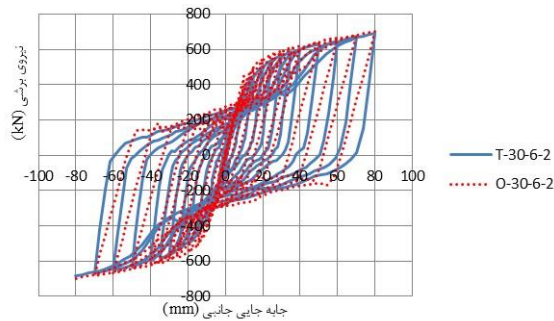
زاویه مقطع موج‌ها در مدل مورد استفاده در اعتبارسنجی (بخش ۳-۲) معادل ۳۰ درجه است. به منظور بررسی میزان دقت روش ارتوتروپ معادل علاوه بر زاویه ۳۰ درجه، زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه نیز برای موج‌های واقع در جان با ضخامت‌های ۲ و ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مشخصات هندسی مقطع ورق موج‌دار دوزنقه‌ای در مدل‌های دیوار برشی مورد بررسی 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 γ 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 (γ)

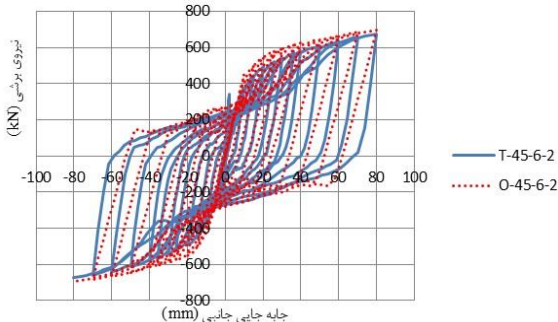
(mm) d_1	(mm) d_2	(mm) a	(deg) γ	N	(mm) t_w
۲۳۲/۶۸	۱۷/۳۲	۵	۳۰	۶	۲ و ۵
۲۳۵/۹	۱۴	۷	۴۵	۶	۲ و ۵
۲۴۰	۱۰	۹	۶۰	۶	۲ و ۵



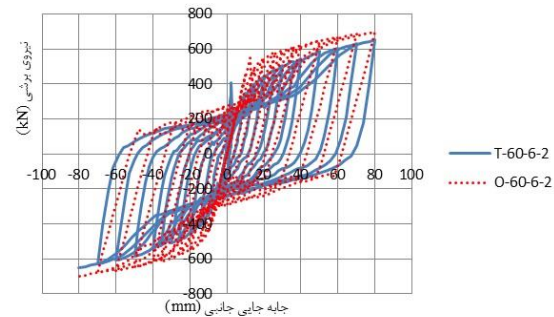
شکل ۱۶- نتایج عددی مدل‌های دیوار برشی دارای جان با ضخامت ۵ میلی‌متر و با زوایای مختلف مقطع موج تحت بارگذاری یکنوا



(الف)

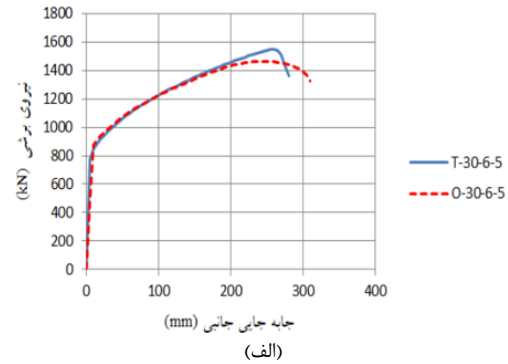


(ب)

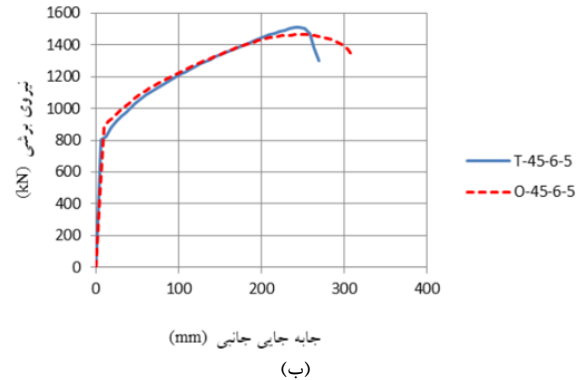


(پ)

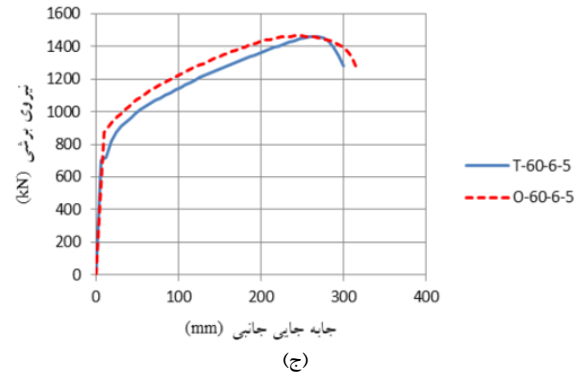
شکل ۱۷- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری چرخه‌ای برای ضخامت جان ۲ میلی‌متر با زاویه مقطع موج: (الف) $\gamma=30$ ، (ب) $\gamma=45$ ، (ج) $\gamma=60$



(الف)

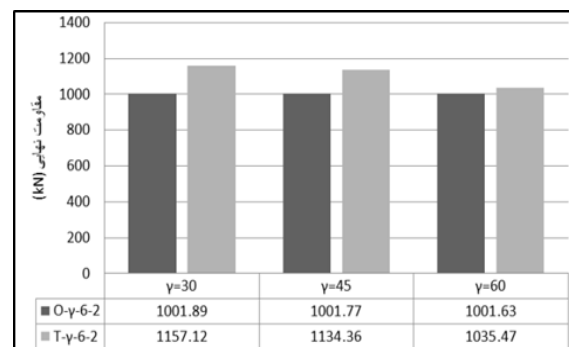


(ب)

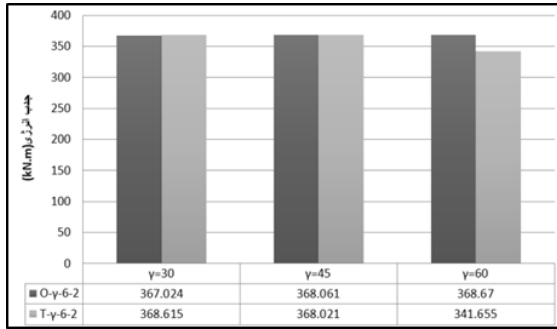


(ج)

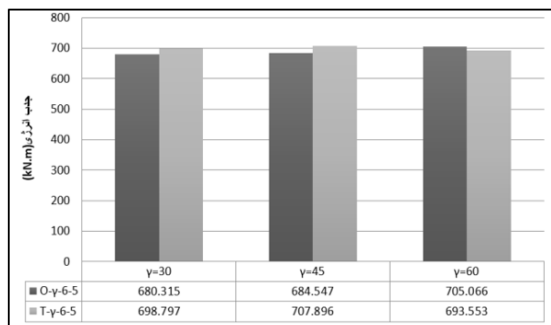
شکل ۱۴- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری یکنوا برای ضخامت جان ۵ میلی‌متر با زاویه مقطع موج: (الف) $\gamma=30$ ، (ب) $\gamma=45$ ، (ج) $\gamma=60$



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



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

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

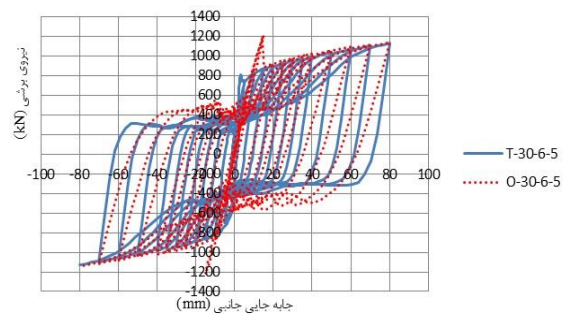
۴-۴- تأثیر تعداد نیم‌موج (N)

تعداد نیم‌موج‌ها در مدل مورد استفاده در اعتبارسنجی (بخش ۳-۲) معادل ۸ عدد است. به منظور بررسی میزان دقت روش ارتوتروپ معادل علاوه بر تعداد ۸ نیم‌موج، تعداد ۴ و ۶ نیم‌موج نیز برای جان دیوار برشی فولادی با ضخامت‌های ۲ و ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مشخصات هندسی (شکل ۲) مقطع ورق موج‌دار دوزنقه‌ای در مدل‌های دیوار برشی مورد بررسی در این بخش در جدول (۴) معرفی شده است.

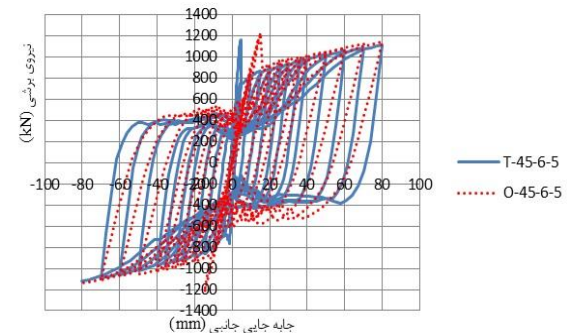
جدول ۴- مشخصات هندسی مقطع ورق موج‌دار در مدل‌های

دیوار برشی با تعداد مختلف نیم‌موج (N)					
d_1 (mm)	d_2 (mm)	A (mm)	γ (deg)	t_w (mm)	
۳۵۷/۶۸	۱۷/۳۲	۵	۳۰	۲	۵
۲۳۲/۶۸	۱۷/۳۲	۵	۳۰	۲	۵
۱۷۰/۱۸	۱۷/۳۲	۵	۳۰	۲	۵

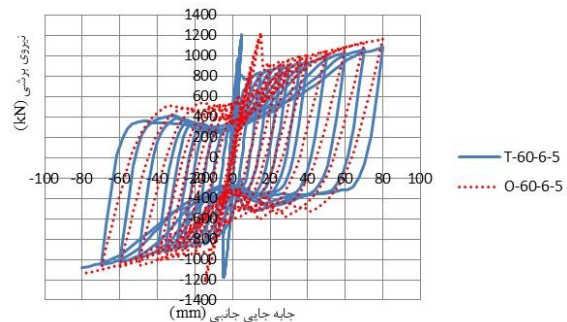
نتایج بار-جاب‌جایی حاصل از تحلیل مدل‌های دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و با ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری چرخه‌ای برای زوایای مختلف γ در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، تطابق مناسبی بین نتایج تحلیل مدل‌های موج‌دار و ارتوتروپ وجود دارد. هم‌چنین، مدل ارتوتروپ معادل برای دیوارهای 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.



(الف)

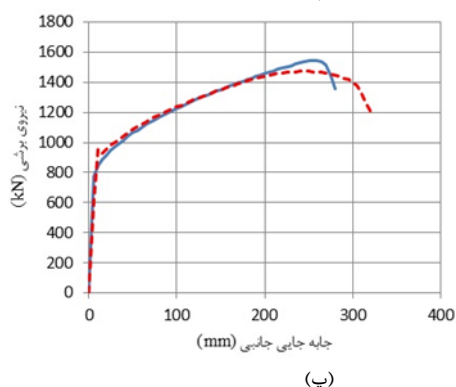
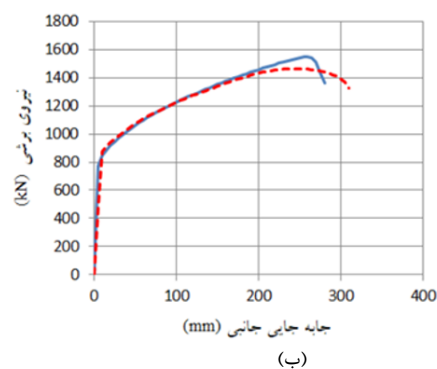
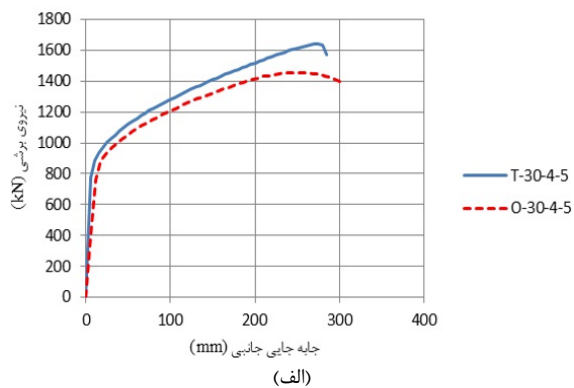


(ب)



(پ)

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

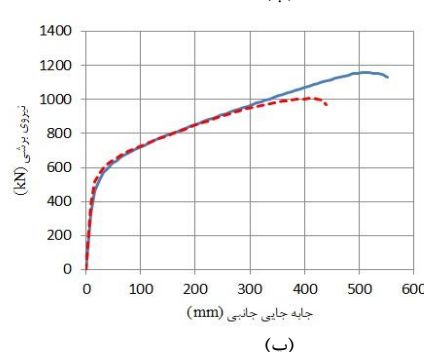
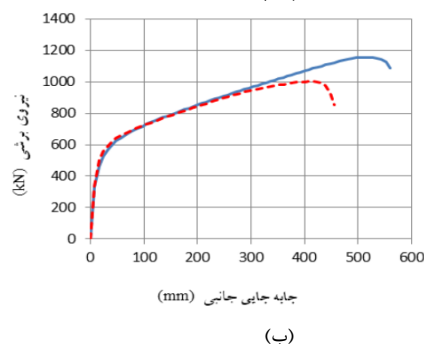
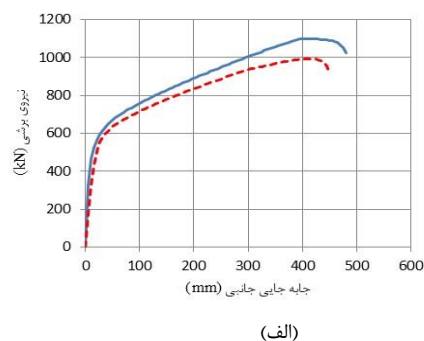


شکل ۲۲- مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری یکنوا برای ضخامت جان ۵ میلی‌متر با تعداد نیم‌موج: (الف) N=4، (ب) N=6، (ج) N=8

مقاومت نهایی (kN)	N=4		N=6		N=8	
	O-30-N-5	T-30-N-5	O-30-N-5	T-30-N-5	O-30-N-5	T-30-N-5
	1456.48	1643.45	1464.52	1546.96	1471.65	1546.96

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

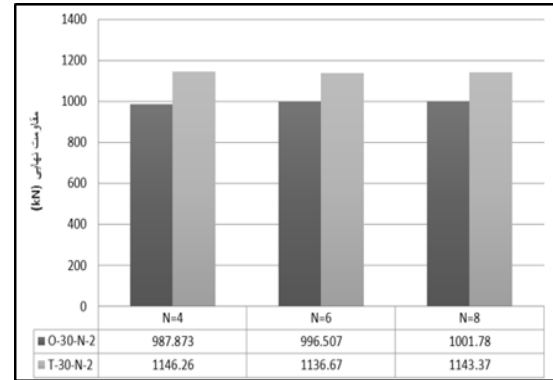
نتایج بار- جابه‌جایی حاصل از تحلیل مدل‌های دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و با ورق ارتوتروپ تحت بار یکنوا برای تعداد مختلف نیم‌موج در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است. چنانچه دیده می‌شود، تطابق مناسبی بین نتایج تحلیل مدل‌های موج‌دار و ارتوتروپ وجود دارد. همچنین، مدل ارتوتروپ معادل برای دیوارهای 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.



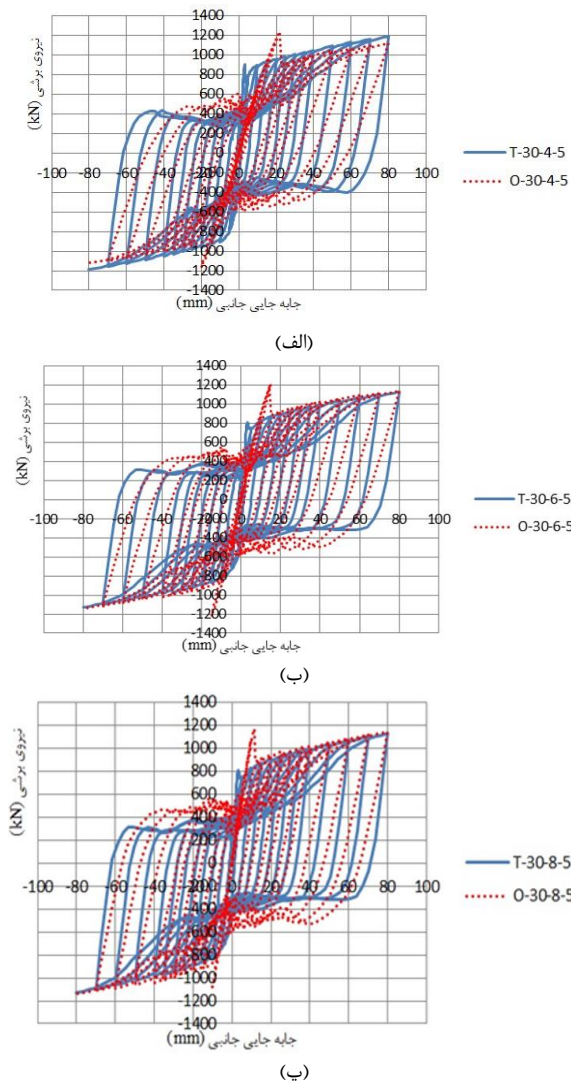
شکل ۲۱- مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری یکنوا برای ضخامت جان ۲ میلی‌متر با تعداد نیم‌موج: (الف) N=4، (ب) N=6، (ج) N=8

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

با افزایش تعداد نیم موج اختلاف نتایج مدل های ارتوتروپ و موج دار کم تر می شود؛ با افزایش تعداد نیم موج ها اختلاف بین مدل ارتوتروپ و موج دار کاهش می یابد، همچنین با افزایش تعداد نیم موج، مقدار مقاومت نهایی مدل ارتوتروپ به طور متوسط حدود ۱۵٪ و ۷/۵٪ به ترتیب برای ضخامت های ۲ و ۵ میلی متر جان با نتایج مدل موج دار اختلاف دارد؛ و همچنین نتایج بار- جابه جایی حاصل از تحلیل مدل های دیوار برشی فولادی با ورق موج دار و با ورق ارتوتروپ برای تعداد مختلف نیم موج تحت بارگذاری چرخه ای در شکل های (۲۵) و (۲۶) نشان داده شده است.

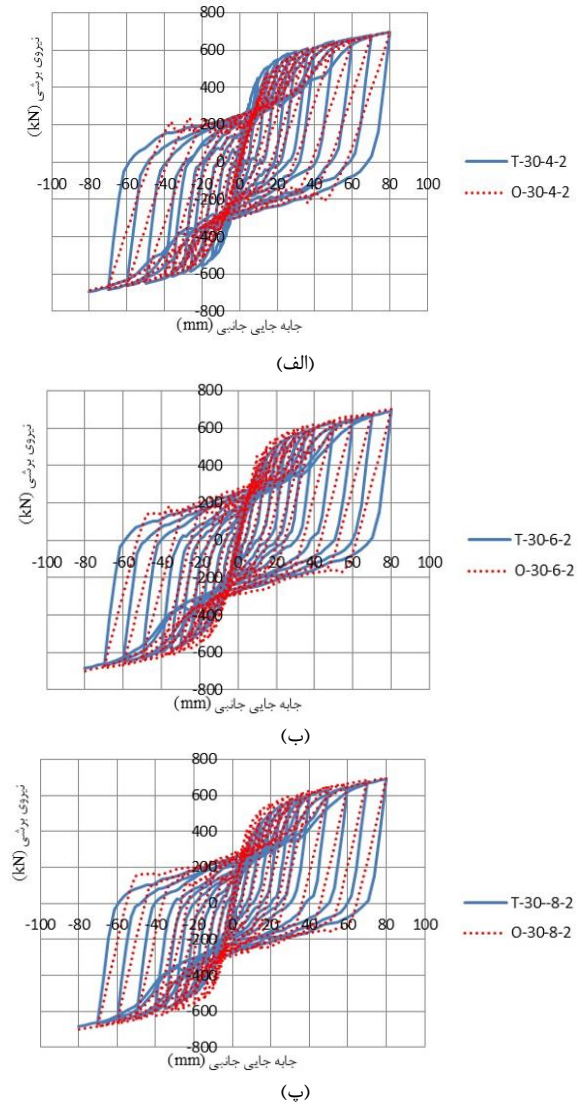


شکل ۲۴- نتایج عددی مدل های دیوار برشی دارای جان با ضخامت ۵ میلی متر و با تعداد مختلف نیم موج تحت بارگذاری یکنوا



شکل ۲۶- مقایسه نمودار نیرو- جابه جایی دیوار برشی فولادی با ورق موج دار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری یکنوا برای ضخامت جان ۵ میلی متر با تعداد نیم موج:
(الف) N=4، (ب) N=6، (ج) N=8

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



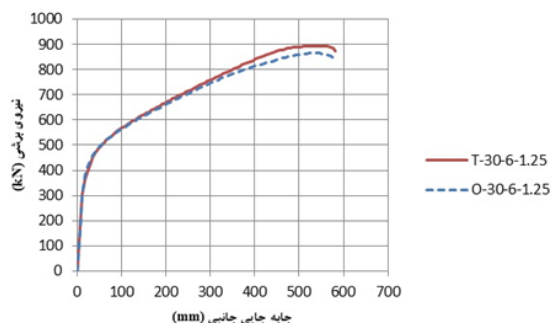
شکل ۲۵- مقایسه نمودار نیرو- جابه جایی دیوار برشی فولادی با ورق موج دار و ورق ارتوتروپ تحت بارگذاری چرخه ای برای ضخامت جان ۲ میلی متر با تعداد نیم موج:
(الف) N=4، (ب) N=6، (ج) N=8

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

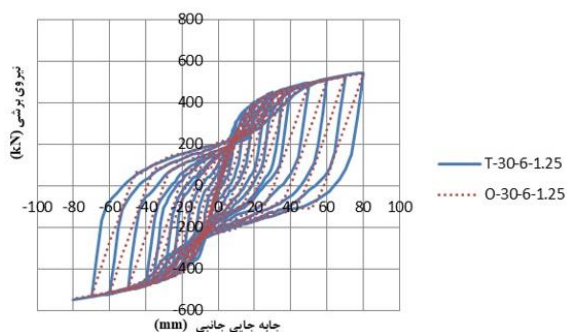
جدول ۵- مشخصات هندسی مدل مقطع موج‌دار دوزنقه‌ای با جهت‌گیری قائم

شناسه نمونه	d_1 (mm)	d_2 (mm)	a (mm)	γ (deg)	N	t_w (mm)
T- γ -N- t_w	۳۱۶/۱۳	۱۷/۳۲	۵	۳۰	۶	۱/۲۵
O- γ -N- t_w	۳۱۶/۱۳	۱۷/۳۲	۵	۳۰	۶	۱/۲۵

شکل‌های (۲۹) و (۳۰) نمودارهای نیرو- جابه‌جایی دیوار برشی موج‌دار با موج‌های قائم زیر نیروهای یکنوا و چرخه‌ای را نشان می‌دهد. چنان‌که دیده می‌شود 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 دوزنقه‌ای با جهت‌گیری قائم و دیوار ارتوتروپ معادل آن زیر بارگذاری یکنوا



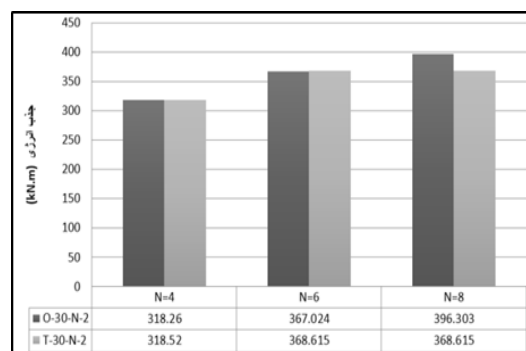
شکل ۳۰- مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار دوزنقه‌ای با جهت‌گیری قائم و دیوار ارتوتروپ معادل آن زیر بارگذاری چرخه‌ای

۶- نتیجه‌گیری

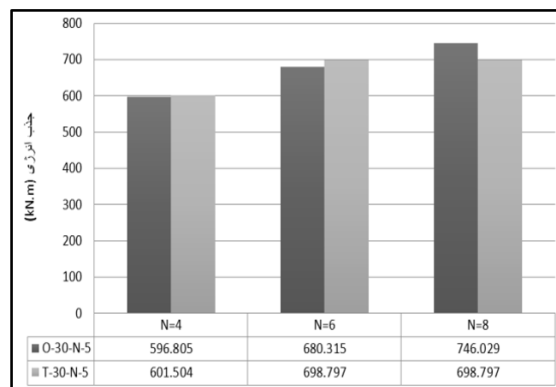
این مقاله روشی را برای معادل‌سازی ورق موج‌دار جان یک دیوار برشی فولادی با یک تخت ارتوتروپ ارائه می‌نماید.

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 دوزنقه‌ای با جهت‌گیری قائم

مطالعه انجام‌شده توسط نویسندگان بر روی دیوارهای برشی فولادی با ورق موج‌دار دوزنقه‌ای 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

- 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.
- Szilarad 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.

به منظور بررسی کفایت و دقت روش ارائه شده در ارزیابی رفتار دیوار برشی فولادی، مدل‌های ارتوتروپ معادلی از دیوارهای برشی موج‌دار با متغیرهای مختلف ضخامت جان، زاویه مقطع موج و تعداد نیم‌موج‌ها تحلیل شده، با نتایج دیوار برشی موج‌دار متناظر مقایسه گردید. از بررسی‌های انجام شده می‌توان موارد زیر را دریافت:

روش پیشنهاد شده در این مقاله دارای کفایت و دقت مناسبی برای پیش‌بینی رفتار یکنوا و چرخه‌ای دیوار برشی فولادی با ورق جان موج‌دار دوزنقه‌ای است. در کلیه مدل‌های بررسی شده حاضر با متغیرهای مختلف یاد شده، مقدار مقاومت نهایی و سختی اولیه به دست آمده از روش پیشنهادی به ترتیب اندکی کم‌تر و بیش‌تر از نتایج مدل‌های موج‌دار است. در بیش‌تر موارد بررسی شده، روش ارائه شده برای مدل‌های با ضخامت کم‌تر نتایج دقیق‌تری را به دست می‌دهد. هم‌چنان‌که، کاهش زاویه مقطع موج و نیز افزایش تعداد موج‌ها موجب بالا رفتن دقت نتایج این روش می‌شود. در مدل‌های بررسی شده در این تحقیق با متغیرهای مختلف یاد شده، بیش‌ترین اختلاف مشاهده شده بین نتایج مدل‌های ارتوتروپ معادل با نتایج مدل‌های موج‌دار متناظر برای مقاومت نهایی و میزان جذب انرژی حدود ۱۵٪ می‌باشد.

۷- مراجع

- معمارزاده پ، "بررسی تئوریک دیوار برشی فولادی سخت نشده با ورق نازک جان"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۱۳۸۸.
- Aoki Y, Maysenhölder W, "Experimental and numerical assessment of the equivalent-orthotropic-thin-plate 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 mesh-free 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:

$$E_x = \frac{12D_x}{t^3} \quad (1)$$

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

$$E_y = \frac{12D_y}{t^3} \quad (2)$$

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).

$$G_{xy} = \frac{12D_{xy}}{t^3} \quad (3)$$

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.

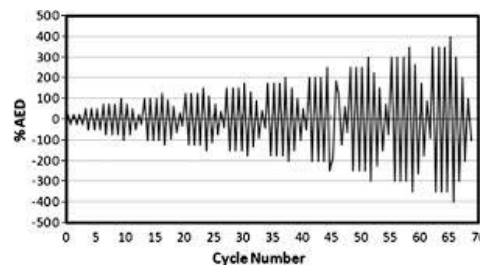


Fig. 1. Cyclic loading protocol (Emami et al., 2013)

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.