مطالعه تحلیلی ظرفیت برشی تیر ورق های با جان موج دار

نادر فنائی[1]، مسعود ارشادی[2]

چکیده :

تیر ورق ها با جان عمیق امروزه به طور گسترده در دهانه های بزرگ ساختمانهای فولادی، ساختمانهای بلند و نیز پل ها مورد استفاده قرار می گیرند. عمق زیاد جان، این تیر ورق ها را در برابر پدیده کمانش برشی آسیب پذیر می سازد که برای کنترل این موضوع بایستی یا ضخامت جان را افزایش داد و یا از سخت کننده های عرضی جان استفاده نمود که هر دو روش باعث افزایش وزن تیر ورق می گردد. راه حل دیگر، موجدار کردن جان برای افزایش مقاومت آن در برابر پدیده کمانش است. در این تحقیق در ابتدا یک مدل اجزاء محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده و سپس مدلهای عددی مختلف از تیرهای با جان موجدار با تغییر در پارامتر طول موج جان تیر ساخته شده و توسط نرم افزار آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته است تا اثر طول موج جان تیر بر ظرفیت برشی تیر مشخص گردد. تیرها تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفتند و مشاهده شد سختی اولیه تیر ورق های با جان مسطح بیشتر است ولی سطح زیر نمودار هیسترزیس که معرف میزان انرژی تلف شده ناشی از تغییر شکلهای پلاستیک است، برای تیر ورق با جان موجدار بزرگتر است که نشان می دهد موج دار کردن جان مسطح، تأثیر زیادی در میزان جذب انرژی تیر ورق دارد. البته با کاهش طول موج جان تیر ورق، مقدار این انرژی جذب شده افزایش می یابد. مشاهده گردید که انرژی جذب شده تیر ورق با جان منحنی به طول موج 25 سانتی متر در مقایسه با تیر ورق مسطح تقریباً 50 درصد بیشتر می باشد که این میزان افزایش در جذب انرژی، بیانگر عملکرد بهتر تیر ورق با جان منحنی نسبت به تیر ورق معمولی می باشد.

1 – مقدمه و کلیات پژوهش انجام شده

1 – 1 : توضیحات

نخست کاربرد تیرها با جان موجدار در صنعت هوانوردی و اسکلت داخلی هواپیماهای جت صورت گرفت. در حقیقت ایده ی تیرها با جان موجدار اولین بار توسط مهندسین مکانیک برای استفاده در اسکلت هواپیماهای جت مطرح گردید و به فاصله ی کوتاهی کاربرد آن در مهندسی عمران مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. اولین بار در سال 1961 ایده ی جان های لاغر تیرها و کاربرد آنها در صنعت ساختمان مطرح گردید. در دهه ی هفتاد میلادی تحقیقاتی بر روی این تیرها در دانشگاه براتیسلاوا انجام گرفت. آنها برروی رفتار اتصال بالها به جان و نوع و چگونگی شکست آنها مطالعه کردند و دریافتند که شکل موج و سطح مقطع بر رفتار اتصال بالها به جان بسیار موثر است. درسال 1979 تحقیقاتی بر روی رفتار خستگی جوش اتصال بال به جان تحت بارهای چرخه ای صورت گرفت. نتایج آنها نشان می داد که این تیرها تا 50٪ نسبت به تیرها با جان مسطح و سخت کننده نسبت به بارهای چرخه ای عمر خستگی بیشتری دارند. همچنین در دهه هشتاد محققینی در سوئد روی رفتار برشی تیرها با جان موجدار تمرکزکردند و در چندین مقاله بر رفتار تیرهای با جان موجدار تحت بار متمرکز و برشی مطالعه کرده و تست های آزمایشگاهی انجام دادند. نتایج این تست های برای صحت سنجی روش اجزا محدود مورد استفاده قرار گرفت. در سال 1981 اولین بار روش اجزا محدود به وسیله کامپیوتر برای مدل سازی تیرها با جان موجدار به کارگرفت. با آنکه از مدتها پیش اثر جان موجدار بر کاهش ضخامت جان مورد بررسی قرار گرفته بود اما تحقیقی جامع بر روی آن صورت نگرفت. در سال 1987 مطالعاتی روی اثر بهره گیری از تیرهای با جان موجدار در وزن مصالح مصرفی صورت گرفت که نشان داد تیرهای با جان موجدار تا حدود 30٪ از تیر های با جان مسطح و ظرفیت استاتیکی یکسان سبک تر هستند. با پیشرفت علم اجزای محدود و نرم افزارهای کاربردی در این حوزه، در سا لهای اخیر نیز تحقیقاتی بر رفتار خمشی، برشی و ظرفیت باربری بارهای متمرکز مبنایی جدید برای تحقیق روی تیرها با جان موجدار انجام شده است.

[1] استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fanaie@kntu.ac.ir
[2] کارشناس ارشد مهندسی زلزله دانشگاه آزادعلوم تحقیقات تهران (کرمانشاه)، دانشجوی دکتری سازه دانشگاه آزاد خرم اباد، masoud_ershadi65@yahoo.com

در سال 2005 در کانادا روش اجزا محدود را برای بررسی و مقایسه ی کمانش پیچشی جانبی تیر ها با جان موجدار به کار گرفته شد. در سال 2008 برای اولین بار بررسی کمانش برشی اندرکنشی انجام شد و روابط ارائه شده توسط محققین قبلی با رابطه ای دقیق تر تکمیل گردید. به دلیل اینکه روابط موجود به علت پیچیدگی رفتار اندرکنشی پراکندگی زیادی داشتند. بنابراین با استفاده از رابطه ارائه شده معیاری جدید برای طراحی برشی تیر ها با جان موجدار ارائه شد. در نتیجه مطالعات گسترده توسط محققین ، علاوه بر استفاده ی گسترده از تیرها با جان موجدار در صنعت پل سازی در صنعت ساختمان نیز بهره گیری از تیرها با جان موجدار در حال گسترش است. با توجه به اینکه در این پژوهش از روش المان محدود توسط نرم افزار آباکوس برای مطالعه تیرها ی با جان عمیق استفاده گردیده است بنابراین در این فصل روش المان محدود معرفی شده و دلایل استفاده از نرم افزار ABAQUS ارائه شده است. می توان چنین بیان کرد که با استفاده از روش المان محدود، بررسی و مشاهده تنش ها در نقاط مختلف سازه راحت تر است. بنابراین روش اجزای محدود یک ابزار قوی برای حل عددی محدوده وسیعی از مسائل مهندسی است. به طور ساده می توان گفت که روش المان محدود عبارتست از تقسیم سازه به تعداد زیادی از المان های کوچکتر و یا به عبارتی شبکه بندی مدل با المانهای مثلثی،مربعی که شکل ساده تری نسبت به شکل کلی سازه دارند. برخی از مزیتهای این نرم افزار که باعث انتخاب آن گردیده شامل دقت بالای نرم‌افزار در تحلیل مسائل مختلف مهندسی، قابلیت بسیار بالا در مدل سازی انواع سازه های فولادی و تنوع بسیار زیاد المان‌های موجود در کتابخانه نرم افزار می باشد.

2 – تاریخچه تحقیقات

پس از مطالعاتی که در باره ی کاربرد تیرها با جان موجدار در صنعت هوانوردی و اسکلت داخلی هواپیماهای جت صورت گرفت شاید بتوان Basler را آغازگر مطالعات سازه بر روی آنها دانست[1]. Basler اولین بار در سال 1961روی ایده ی جان های لاغر تیرها و کاربرد آنها در صنعت ساختمان مطالعه کرد[2]. اما اولین روابط و مطالعات آزمایشگاهی توسط Easley و Mcfarland در سال 1969 ارائه شد[3] . آنها اولین بار رابطه ای تقریبی برای تنش بحرانی کمانش کلی در جان موجدار ارائه کردند و صحت آن را با تست های آزمایشگاهی اثبات نمودند. این رابطه که بر اساس تئوری صفحات قرار دارد امروزه نیز با اندکی تغییر و تصحیح برای پیش بینی مقدار تنش بحرانی در کمانش کلی جان موجدار مورد استفاده قرار می گیرد. در دهه ی هفتاد میلادی تحقیقاتی بر روی این تیرها در دانشگاه براتیسلاوا انجام گرفت. در سال Libov 1972 برروی رفتار اتصال بالها به جان و نوع و چگونگی شکست آنها مطالعه کرد و دریافت که شکل موج و سطح مقطع بر رفتار اتصال بالها به جان بسیار موثر است. درسال 1979 دو محقق به نامهای Korashy و Varga روی رفتار خستگی جوش اتصال بال به جان تحت بارهای چرخه ای مطالعه نمودند[4]. نتایج آنها نشان می داد که این تیرها تا 50٪ نسبت به تیرها با جان مسطح و سخت کننده نسبت به بارهای چرخه ای عمر خستگی بیشتری دارند. این تحقیق راه را برای کاربرد این تیرها در صنعت پل سازی بیش از پیش هموار کرد. در دهه هشتاد محققین در دانشگاه Chalmers سوئد روی رفتار برشی تیرها با جان موجدار متمرکز گردیدند[5]. Leiva در دانشگاه Chalmers در چندین مقاله بر رفتار تیرهای با جان موجدار تحت بار متمرکز و برشی مطالعه کرد و تست های آزمایشگاهی انجام داد. نتایج تست های Leiva در مطالعات Luo و Edlundبرای صحت سنجی روش اجزا محدود مورد استفاده قرار گرفت[6]. در سال Cesotto 1981 اولین بار روش اجزا محدود را به وسیله کامپیوتر برای مدل سازی تیرها با جان موجدار به کارگرفت. با آنکه از مدتها پیش اثر جان موجدار بر کاهش ضخامت جان مورد بررسی قرار گرفته بود اما تحقیقی جامع بر روی آن صورت نگرفت. در سال Heywood 1987 روی اثر بهره گیری از تیرهای با جان موجدار در وزن مصالح مصرفی مطالعه کرد. او دریافت که تیرها با جان موجدار تا حدود 30٪ از تیر های با جان مسطح و ظرفیت استاتیکی یکسان سبک تر هستند[7].

Lindner و Aschinger در سال 1988 روی نمونه های آزمایشگاهی کار کردند و با در نظر گرفتن رفتار اندرکنشی کمانشی مقدار 70٪ تنش کمانش برشی را به عنوان معیاری برای طراحی معرفی نمودند[8] در سال Hamilton 1993 در دانشگاه Maine در آمریکا مطالعاتی را آغازکرد که چند سال بعد زمینه ی یکی از موثرترین تحقیقات در این زمینه شد. در سال Luo 1996 و Edlund اولین تحقیق جامع را با استفاده از روش اجزا محدود و کارکرد کامپیوتر بر روی تیر ها با جان موجدار انجام دادند[9]. آنها اثبات کردند که از روش اجزا محدود می شود به

شکلی موثر برای مطالعه ی رفتار تیرها با جان موجدار استفاده کرد. آنها بر تاثیر پارامترهای شکل موج بر رفتار برشی آن متمرکز شدند و در نهایت عدم کارایی مناسب فرمولهای کمانش برشی موجود و محدودیت های آن را نشان دادند[10] .

در سالهای 1996 و 1997 سه محقق در دانشگاه Maine در ادامه ی کارهای Smith و Hamilton در سالهای 1992 و 1993 شروع به کار بر روی تیرها با جان موجدار با استفاده از تست های آزمایشگاهی و مدل های اجزا محدود نمودند. Elgaaly ، Hamilton و Seshadri با تحقیقات خود بر رفتار خمشی، برشی و ظرفیت باربری بارهای متمرکز مبنایی جدید برای تحقیق روی تیرها با جان موجدار قرار دادند[11] . آنها در ابتدا نقص های موجود در نمونه های آزمایشگاهی گذشته را از بین بردند و با در نظر گرفتن هر سه نوع کمانش موضعی و کلی الاستیک و کمانش غیر الاستیک معیار مناسبی برای ظرفیت باربری برشی تیرها با جان موجدار ارائه کردند. آنها همچنین برای اولین بار رفتار خمشی این تیر ها را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که تاثیر شکل و مصالح جان موجدار بر رفتار خمشی این تیر ها قابل چشم پوشی است. آنها اثر نقص اولیه برون صفحه ای را بر ظرفیت باربری برشی جان آشکار کردند و نقص های موجود در مدل سازی اجزا محدود را برطرف نمودند. سه مقاله ای که این سه محقق ارائه دادند به عنوان مرجع اصلی مقالات در مورد تیرها با جان موجدار پذیرفته شده است.[12]

Sayed-Ahmed در سال 2005 در کانادا روش اجزا محدود را برای بررسی و مقایسه ی کمانش پیچشی جانبی تیر ها با جان موجدار به کار گرفت[13]. او ابتدا روش فاکتور هم ارز را مورد بررسی قرار داد و سپس به مقایسه ی رفتار کمانشی پیچشی تیر با جان مسطح و موجدار پرداخت. بر اساس نتایج Sayed-Ahmed تیرها با جان موجدار ذوزنقه ای میتوانند 12٪ تا 37٪ نسبت به تیرها با جان مسطح مقاومت کمانشی پیچشی جانبی بیشتری از خود نشان دهند . در سال 2008 Yi برای اولین بار به بررسی کمانش برشی اندرکنشی پرداخت. او روابط ارائه شده توسط محققین قبلی را با رابطه ای که خود ارائه داد مقایسه کرد و رابطه خود را رابطه ای دقیق تر ارزیابی نمود.[14]روابط موجود به علت پیچیدگی رفتار اندرکنشی پراکندگی زیادی داشتند. Yi با استفاده از رابطه ارائه داده ی خود معیاری جدید برای طراحی برشی تیر ها با جان موجدار ارائه کرد که مبنای جدیدی برای مطالعات بعدی شد .Saus و Braxtan با بررسی نتایج تمام نمونه های آزمایشگاهی موجود سعی در تصحیح رابطه Moon کردند. تحقیقات آنها در نوع خود کامل ترین مطالعه بر روی ظرفیت برشی تیر ها با جان موجدار محسوب می شود. آنها ابتدا با توجه به پراکندگی نتایج موجود سعی در کنار گذاشتن نتایج پرخطا نمودند. سپس رابطه Moon را اصلاح کرده و با نتایج باقی مانده آن را صحت سنجی کردند. رابطه ای که آنها ارائه دادند با روابط دیگر مقایسه شد و کارایی مطلوب آن در بازه های مختلف به اثبات رسید[15].

3 – روش ایجاد مدل المان محدود تیر ورق های مورد مطالعه

در طرح و ساخت تیر ورق های با جان عمیق، استفاده از جان موج دار به دلیل افزایش سختی خارج از صفحه و مقاومت کمانشی، در سال های اخیر مورد توجه و استفاده روز افزون قرار گرفته است. شکل پروفیل های مختلفی مانند سینوسی و ذوزنقه ای برای جان این تیر ورق ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق با ایجاد مدل سه بعدی اجزای محدود ، تحلیل تنش های تیر ورق های فولادی با پروفیل موج سینوسی، ذورنقه ای ، مسطح و ترکیبی با ملاحظه مود های مختلف کمانش مورد مطالعه قرار است. همچنین مطالعه پارامتریک جهت ارزیابی تاثیر پارامترهای هندسی مختلف در ظرفیت برشی جان این تیر ورق ها صورت گرفته است. با استفاده از مدل یاد شده مطالعات پارامتریک در ظرفیت برشی برای موج های سینوسی نیز انجام شده و تاثیر طول موج در ظرفیت برشی نهایی تیر ورق مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین در این تحقیق ، هفت مدل تیر ورق با جان عمیق و با مشخصات زیر، به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS مورد مطالعه عددی قرار می گیرند. جهت مقایسه و ارزیابی صحیح رفتار تیر ورق ها با شرایط یکسان، مشخصات هندسی تمامی تیر ورق ها شامل طول و سطح مقطع آنها یکسان فرض شده است. بنابراین طول تمامی تیرورق ها 12m و سطح مقطع تمامی آنها I شکل می باشد. ارتفاع جان 55cm و پهنای بال 20cm لحاظ شده است. برای انجام آنالیز تیر ورق ها ، در اولین مرحله این تحقیق، ایجاد تمامی مدل های هندسی تیر ورق لازم است که در نرم افزار پیشرفته مدل سازی CATIA انجام گردیده است. مدل های هندسی ایجاد شده از تیر ورق ها، پس از انتقال به محیط نرم افزار ABAQUS به منظور تولید المان ها و ایجاد مدل المان محدود مورد استفاده قرار می گیرند. در ادامه این تحقیق، مدل سازی تمامی تیر ورق ها در نرم افزار CATIA مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات هندسی آنها ارائه شده است.

3 – 1 : مدل تیر ورق شماره 2 با جان سینوسی

این مدل یک تیر ورق I شکل با جان سینوسی موج دار است که ضخامت جان $t_w = 6mm$ و ضخامت بال آن $t_f = 6mm$ می باشد. همچنین طول تیرورق 12m ، ارتفاع جان 55cm و پهنای بال آن 20cm و مشابه سایر مدل ها است. لازم به ذکر است که در تیر ورق شماره 2 ، طول نیم موج سینوسی، b=25cm در نظر گرفته شده است. بنابراین جان این تیر ورق موج دار شامل 24 موج سینوسی کامل به طول 50cm می باشد. لازم به ذکر است که، پارامتر طول موج در سایر مدل ها به صورت متغیر فرض شده و مورد مطالعه می گیرد. با توجه به محاسبات صورت گرفته طول جان سینوسی این تیر ورق L = 13.108m به دست آمده است.

3 – 2 : مدل تیر ورق شماره 3 با جان سینوسی

این مدل یک تیر ورق I شکل با جان سینوسی موج دار است که ضخامت جان $t_w = 6mm$ و ضخامت بال آن $t_f = 6mm$ می باشد. همچنین طول تیرورق 12m ، ارتفاع جان 55cm و پهنای بال آن 20cm مشابه سایر مدل ها است. طول نیم موج سینوسی جان تیر ورق در این مدل b=50cm در نظر گرفته شده و بنابراین طول نیم موج سینوسی نسبت به مدل قبلی دو برابر شده است. جان این تیر ورق موج دار شامل 12 موج سینوسی کامل به طول 100 cm می باشد. با توجه به محاسبات صورت گرفته طول جان این تیر L = 12.288 m می باشد.

3 – 3 : مدل تیر ورق شماره 4 با جان سینوسی

این مدل یک تیر ورق I شکل با جان سینوسی موج دار است که ضخامت جان $t_w = 6mm$ و ضخامت بال آن $t_f = 6mm$ می باشد. همچنین طول تیرورق 12m ، ارتفاع جان 55cm و پهنای بال آن 20cm و مشابه سایر مدل ها است. طول نیم موج سینوسی جان تیر ورق در این مدل b=75cm در نظر گرفته شده است. بنابراین جان این تیر ورق موج دار شامل 8 موج سینوسی کامل به طول 150 cm می باشد. با توجه به محاسبات صورت گرفته طول جان این تیر L_B = 12.13 m می باشد.

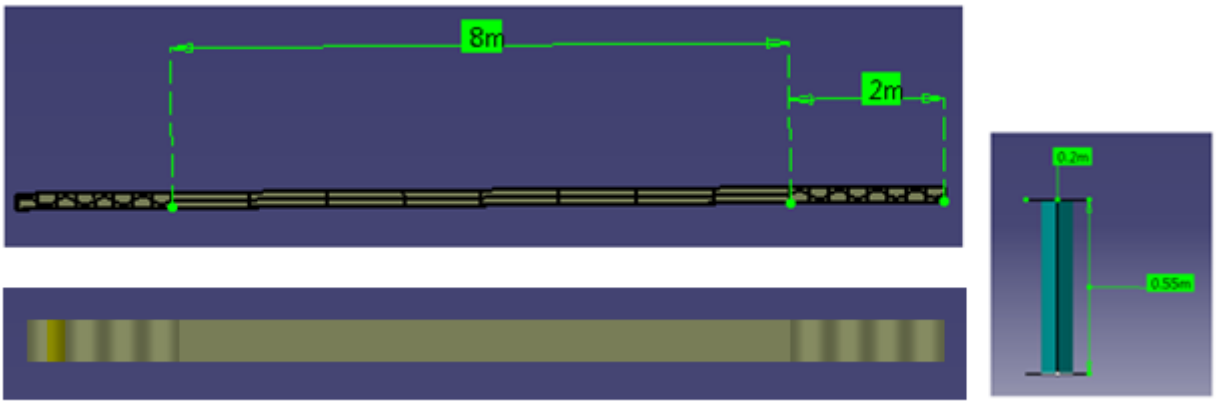
3 – 4 : مدل تیر ورق شماره 5 با جان سینوسی

این مدل یک تیر ورق I شکل با جان سینوسی موج دار است که ضخامت جان $t_w = 6mm$ و ضخامت بال آن $t_f = 6mm$ می باشد. همچنین طول تیرورق 12m ، ارتفاع جان 55cm و پهنای بال آن 20cm است. طول نیم موج سینوسی جان تیر ورق، در این مدل b=100cm در نظر گرفته شده است. بنابراین جان این تیر ورق موج دار شامل 6 موج سینوسی کامل به طول 200 cm می باشد. با توجه به محاسبات صورت گرفته طول جان این تیر L = 12.07 m می باشد.

3 – 5 : مدل تیر ورق شماره 6 با جان ترکیبی مسطح و سینوسی

مشابه سایر مدل ها ، این مدل نیز یک تیر ورق I شکل، با جان ترکیبی سینوسی موج دار و مسطح است که ضخامت جان $t_w = 6mm$ و ضخامت بال آن $t_f = 6mm$ می باشد. همچنین طول کلی تیرورق 12m ، ارتفاع جان 55cm و پهنای بال آن 20cm است. آنچه که این تیر ورق را از سایر مدل ها متمایز می کند، این است که جان تیر ورق ترکیبی بوده و شکل یکنواختی ندارد به طوری که، بخش موج دار سینوسی جان

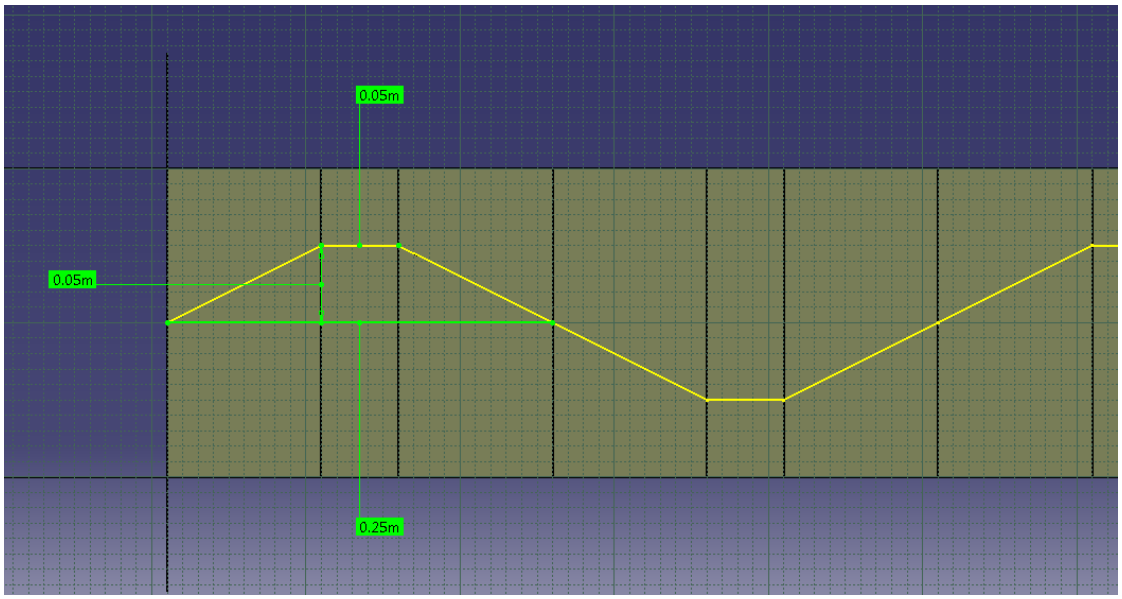
تیر به طول 2m از هر طرف لحاظ شده است. همچنین طول نیم موج سینوسی جان تیر ورق، b=25cm فرض می گردد. بنابراین جان تیر ورق در هر طرف شامل 4 موج سینوسی کامل به طول 50cm می باشد. همچنین قسمت میانی جان تیرورق به طول 8m، مسطح فرض می گردد. مشخصات هندسی این تیر ورق مطابق شکل زیر در نرم افزار CATIA نشان داده شده است :

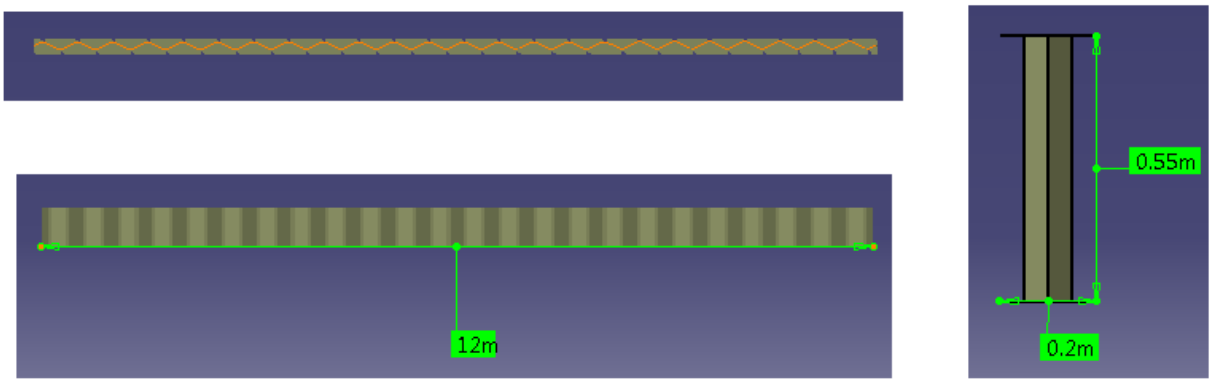


شکل 1 تیر ورق با جان ترکیبی مسطح و سینوسی

3 – 6 : مدل تیر ورق شماره 7 با جان ذوزنقه ای

این مدل یک تیر ورق I شکل با جان ذوزنقه ای است که ضخامت جان $t_w = 6mm$ و ضخامت بال آن $t_f = 6mm$ می باشد. همچنین طول تیرورق 12m ، ارتفاع جان 55cm و پهنای بال آن 20cm است. طول نیم موج ذورنقه ای b=25cm ، عرض قسمت مسطح موج 5cm و عمق موج 5cm در نظر گرفته شده است. بنابراین جان این تیر ورق موج دار، شامل 24 موج ذوزنقه ای کامل به طول 50 cm می باشد.





شکل 2 تیر ورق با جان ذوزنقه ای

3 – 7 : بررسی مدل المان محدود تیر ورق ها

نخستین گام در تحلیل المان محدود یک سازه ، ایجاد مدل هندسی آن است. کاربر باید بتواند مدل هندسی مورد نظر را ایجاد نموده و آن را در صورت نیاز اصلاح نماید و یا قسمتهای نامطلوب را حذف کند. بنابراین پس از اعمال تغییرات می توان هندسه مورد نظر را به صورت نهایی ایجاد کرد. برای انجام این کار روشهای مختلفی وجود دارد که در نرم افزارهای مد ل سازی تعبیه شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق برای مدل سازی هندسی از نرم افزار CATIA استفاده شده است. سپس فایلهای ایجاد شده با فرمت IGES ذخیره می گردند. این فایلها به نرم افزار ABAQUS، منتقل شده و جهت مش زدن و تولید المان ها مورد استفاده قرار می گیرند. در هر شبیه سازی اجزاء محدود تقسیم بندی هندسه واقعی سازه با استفاده از اجزای کوچک تری به نام المان می باشد. هر المان بیان گر یک جزء جدا شده از سازه است. المان ها در نقاطی که به آنها گره گفته می شود به هم متصل می گردند. به مجموعه گره ها و المان ها مش گفته می شود. در یک آنالیز تنش، جابجایی ها متغیرهای اصلی بوده و توسط روش المان محدود محاسبه می شوند. پس از آنکه جابجایی ها تعیین گردید، می توان کرنش ها و تنش ها را به سادگی با استفاده از آنها محاسبه نمود. در مسائل اجزاء محدود تبدیل معادلات به ماتریس ادامه کار را راحت تر خواهد کرد. بنابراین نیروهای داخلی و خارجی به شکل ماتریسی تبدیل خواهند شد. در این تحقیق برای ایجاد مدل المان محدود تیرورق ها از نرم افزار ABAQUS استفاده می گردد.

3 – 8 : ایجاد مدل المان محدود تیر ورق های مورد مطالعه

مدل های هندسی ایجاد شده از تیر ورق ها، پس از انتقال به محیط نرم افزار ABAQUS به منظور تولید المان ها و ایجاد مدل المان محدود مورد استفاده قرار می گیرند. در حقیقت با استفاده از نرم افزار CATIA مدل های هندسی تیر ورق ها ساخته شده و فایل آنها با فرمت IGES به نرم افزار ABAQU انتقال پیدا کرده است. سپس با استفاده از امکانات نرم افزار ABAQUS المان های مورد نیاز تولید گردید. یکی از تمایزات اساسی بین انواع المان‌های مختلف، نوع هندسه آن می‌باشد.جابجایی‌ها یا دیگر درجات آزادی در گره‌های المان محاسبه می‌شود. در نقاط دیگر المان، جابجایی‌ها با درون‌یابی از جابجایی‌های گره‌ای محاسبه می‌شود. مدل هندسی تیر ورق های ایجاد شده از نوع پوسته ای (SHELL)هستند که در مقالات مرجع متعددی برای انجام این گونه آنالیزها از المان های پوسته ای S4R استفاده شده است. المان S4R برای تحلیل غیرخطی پوسته های نازک تا نسبتا ضخیم تخت و منحنی به کار گرفته شده است. این المان قابلیت پلاستیک شدن، سخت شدگی تنش، و تغییرشکلهای بزرگ را دارا می باشد . بنابراین در این تحقیق برای مدل سازی المان محدود تیر ورق های مورد مطالعه، از المان های S4R که یک المان چهار نودی دو انحنایی با انتگرال کاهش یافته است، استفاده می شود. هر گره از این المان دارای شش درجه آزادی یعنی سه درجه انتقال و یک درجه

دوران می باشد. در اشکال زیر، مدل المان محدود تمامی تیر ورق ها ی مورد مطالعه، بر اساس مدل های هندسی و ابعاد آنها به صورت دقیق نشان داده شده است.

3 – 9 : خصوصیات مصالح مورد استفاده برای تیر ورق ها

تیر ورق های مورد مطالعه در این تحقیق از جنس آلیاژ فولاد در نظر گرفته شده اند. خصوصیات مکانیکی این آلیاژ فولاد، بر طبق استاندارد ASTM E8 و توسط دستگاه سروو هیدرولیک INSTRON8802 به دست آمده است. در تمامی تحلیل ها، رفتار مصالح فولادی تیر ورق ها به صورت الاستیک – پلاستیک در نظر گرفته شده است. به کمک بخش خطی نمودار تنش –کرنش خصوصیات الاستیک فولاد، شامل مدول یانگ و نسبت پواسون در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1 : مشخصات مصالح مورد استفاده برای تیر ورق ها

	$E(\frac{N}{m^2})$	v(Poisson Ratio)	$\rho(\frac{kg}{m^3})$
فولاد	210E9	0.3	7850

برای تعریف رفتار پلاستیک مصالح فولاد بر اساس منحنی تنش-کرنش ، باید نقاطی از این منحنی را در بخش تعریف رفتار پلاستیک مصالح فولادی در نرم افزار ABAQUS وارد نمود. لازم به ذکر است که در سطر اول ، مقدار کرنش پلاستیک متناظر با نقطه تسلیم صفر وارد می گردد. در حقیقت این نقطه ، شروع پلاستیک شدن مصالح فولادی می باشد. در جدول 2 خصوصیات پلاستیک مصالح فولادی تیر ورق ها ارائه شده است.

جدول 2 : خصوصیات پلاستیک مصالح فولادی تیر ورق ها

Plastic Strain	Yield Stress (Mpa)
0	365
0.02	370
0.03	375
0.04	410
0.06	430

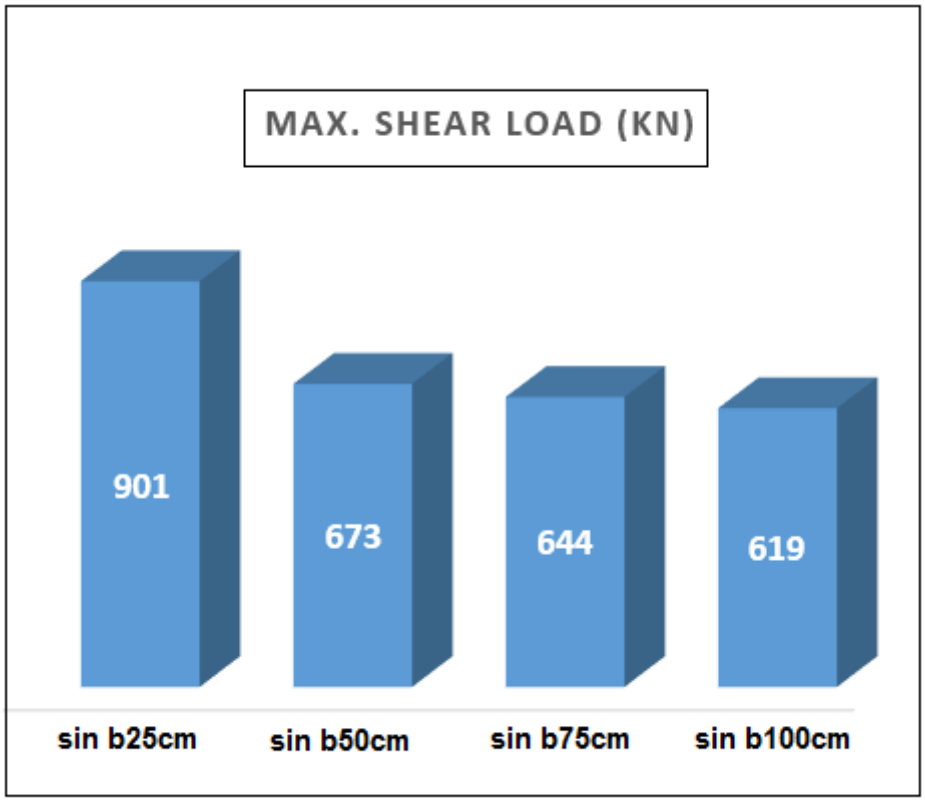
0.08	450
0.10	460
0.12	463
0.14	465
0.15	467

نرم افزار ABAQUS قادر است که رفتار الاستیک – پلاستیک تیرها را در هنگام تحلیل لحاظ نماید. بنابراین از مسیر PROPERTY می توان خصوصیات مصالح تیر ورق های فولادی را بر اساس اطلاعات ارائه شده در جداول قبل تعریف نمود. در شکل زیر روش تعریف رفتار مصالح الاستیک – پلاستیک فولاد، در نرم افزار المان محدود ABAQUS نشان داده شده است.

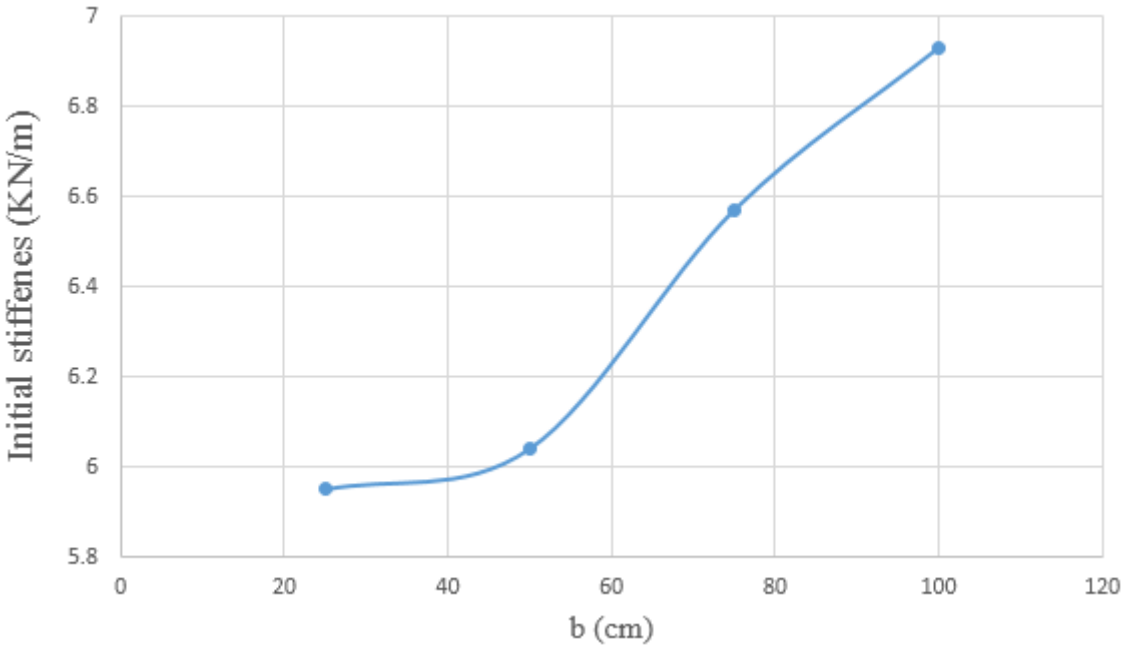
5 – نتیجه گیری و پیشنهادات

5 – 1 : نتایج تحلیل تیر ورق های با جان سینوسی

استفاده از تیر ورق های با جان عمیق موج دار سینوسی ، به دلیل استحکام کمانشی بالا دارای استفاده روز افزون است. در این بخش تاثیر پارامتر طول موج بر ظرفیت برشی تیر ورق های با جان موج دار سینوسی به روش المان محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. تمامی مدل های تیر ورق دارای مقطع I شکل هستند که ضخامت جان $t_w = 6mm$ و ضخامت بال آنها $t_f = 6mm$ می باشد. همچنین طول تیرورق ها 12m ، ارتفاع جان 55cm و پهنای بال آنها 20cm می باشد. در تمامی مدل های تیر ورق، مقدار دامنه موج a=5cm و پارامتر متغیر مورد مطالعه در تحقیق طول نیم موج b می باشد . مقدار پارامتر طول نیم موج b ، در مدل های مختلف تیر ورق 25 ، 50 ، 75 و 100 سانتیمتر در نظر گرفته شده است که تمامی آنها مدل های متداول و از نظر امکان تولید، عملی می باشند. نتیجه گیری می شود که با افزایش جابجایی، استحکام برشی تیر ورق ها به صورت خطی افزایش می یابد. میزان نیروی برشی متناسب با جابجایی تیر ورق افزایش می یابد و در یک جابجایی پایین، با وجود بار زیاد در تیر ورق از ظرفیت برشی به صورت فروجهشی کاسته می شود. پس از این افت قابل توجه در نمودار، کاهش استحکام برشی همراه با افزایش جابجایی درتیر ورق موج دار ادامه می یابد و سپس نمودار به حالت پایدار و یکنواختی می رسد به طوری که این روند در تمامی مدل های تیر ورق دیده می شود. بر اساس نمودار ماکزیمم استحکام برشی تیر ورق ها به ترتیب 901 KN ، 673KN ، 644KN و 619 KN می باشد. ملاحظه می شود که با افزایش طول موج سینوسی، میزان استحکام برشی تیر ورق کاهش پیدا می کند.



شکل **3** مقایسه استحکام برشی تیر ورق های با جان سینوسی



شکل **4** ارزیابی سختی اولیه تیر ورق های با جان سینوسی

سطح زیر نمودار Load-Displacement بیان گر انرژی جذب شده توسط سیستم می باشد. با مقایسه این نمودارها، مشاهده می شود که با کاهش طول موج سینوسی انرژی جذب شده توسط سیستم افزایش می یابد.

همچنین ، میزان انرژی جذب شده توسط تیر ورق های سینوسی به ترتیب 290.56 kj، 210.78 kj، 206.51 kj و 199.55 kj برای تیر ورق های b=25cm ، b=50 cm ، b=75cm و b=100cm می باشد. میزان انرژی جذب شده توسط تیر ورق b25cm ، در مقایسه با سایر مدل های تیر ورق سینوسی بالا تراست در حالی که در تیر ورق های با طول موج b=50 cm ، b=75cm و b=100cm اختلاف انرژی جذب شده به صورت آشکاری کاهش یافته است. در تیر ورق های با طول موج کم، تغییرات انرژی جذب شده بالا است در حالی که در تیر ورق های با طول موج بزرگتر، تغییرات انرژی جذب شده با افزایش طول موج قابل ملاحظه نیست. بنابراین نرخ کاهش انرژی جذب شده در تیر ورق های سینوسی با طول موج کم در مقایسه با تیر ورق های سینوسی با طول موج زیاد بسیار بالاتر است.بنابراین با توجه به تحلیل های ارائه شده می توان نتیجه گیری کرد که در تیر ورق ها ی با جان سینوسی با کاهش طول موج، میزان استحکام برشی ، سختی اولیه و جذب انرژی افزایش پیدا می کند.

5 – 2 : مود کمانش تیر ورق های با جان سینوسی

تحلیل های صورت گرفته نشان داد که در تمامی تیر ورق های با جان سینوسی، مود کمانش کلی در جان سینوسی تیر ورق ها به صورت قطری ایجاد می گردد. در شکل زیر مود کمانش کلی درجان تیر ورق های سینوسی نشان داده شده است. ضخامت پایین جان تیر ورق های سینوسی، سبب می شود که تنش کمانشی کمتر از تنش جاری شدن باشد و به بیان دیگر کمانش در جان تیر ورق ها رخ می دهد. بررسی ها نشان داد که با افزایش طول موج سینوسی ، استحکام برشی جان تیر ورق ها کاهش پیدا می کند. همچنین تاثیر افزایش طول موج سینوسی جان تیر ورق، در تغییر مود کمانش اندک است مشاهده می شود که تنش های ایجاد شده در اثر بارهای برشی توسط جان تیر ورق تحمل می شود و بال تیر ورق نقش کمی در تحمل تنش های برشی دارد و به نظر می رسد که بیشتر تنش های کششی ناشی از خمش را متحمل می شود.

5 – 3 : نتایج تحلیل تمامی مدل های تیر ورق با جان مسطح، سینوسی، ترکیبی و ذوزنقه ای

استفاده از تیر ورق های فلزی با استفاده از جان موج دار و بال های فلزی در حال افزایش است. بنابراین نحوه عملکرد این تیر ها مورد توجه بسیاری از محققین و مهندسین می باشد. در این تحقیق رفتار مدل های مختلف تیرورق با جان عمیق و شکل جان مسطح، سینوسی، ذوزنقه ای و ترکیبی بر اساس آنالیز غیر خطی المان محدود، به کمک نرم افزار قدرتمند ABAQUS (version6.12-1) مورد بررسی قرار می گیرد. بنابراین هفت مدل تیر ورق با جان عمیق و با مشخصات هندسی زیر، به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS مورد مطالعه عددی قرار گرفته و نتایج مورد نیاز ارائه شده است. مشخصات هندسی تمامی تیر ورق ها شامل طول و سطح مقطع آنها یکسان فرض شده است. بنابراین طول تمامی تیرورق ها 12m و سطح مقطع تمامی آنها I شکل می باشد. ارتفاع جان 55cm و پهنای بال 20cm لحاظ شده است. در این تحقیق مطالعه تاثیر شکل جان تیر ورق بر عملکرد آن مورد توجه می باشد.

5 – 4 : ارزیابی استحکام برشی تیر ورق های با جان عمیق

مشاهده می گردد، که روندی مشخص در نمودار تمامی مدل های تیر ورق با جان عمیق وجود دارد، بدین ترتیب که با افزایش جابجایی، استحکام برشی تیر ورق ها به صورت خطی افزایش می یابد و نیروی برشی متناسب با جابجایی تیر ورق افزایش می یابد. با افزایش بیشتر بار، در یک جابجایی نسبتا کم، استحکام برشی به حداکثر رسیده و پس از آن ظرفیت برشی به صورت فروجهشی افت می کند. همچنین ، کاهش استحکام

برشی همراه با افزایش جابجایی درتیر ورق ادامه می یابد و سپس نمودار به حالت پایدار و یکنواخت می رسد . مشاهده می شود که در تیر ورق های سینوسی با افزایش طول موج ، ظرفیت برشی کاهش پیدا می کند. استحکام برشی تیر ورق سینوسی b25cm از بقیه مدل های تیر ورق بیشتر است هر چند که در مقایسه با تیر ورق ذوزنقه ای b25cm اختلاف کمی دارد. تیر ورق های سینوسی با طول موج بزرگتر استحکام برشی کمتری دارند به طوری که استحکام برشی b100 اختلاف کمی با مدل تیر ورق با جان مسطح دارد. ملاحظه می شود که استحکام برشی تمامی تیر ورق ها بیشتر از تیر ورق با جان مسطح است. این امر به دلیل موج دار کردن جان تیر ورق ها و در نتیجه افزایش سختی خارج صفحه ورق جان است. همچنین در خصوص تیر ورق با جان ترکیبی استحکام بالاتری نسبت به مدل تیر ورق مسطح و تیر ورق های سینوسی b50cm ، b75cm و b100cm نشان می دهد. باید توجه کرد که جان این تیر ورق از هر طرف به اندازه 2m با طول نیم موج b25cm موج دار شده و بخش میانی جان به طول هشت متر مسطح می باشد. بنابراین به نظر می رسد که طول موج کمb25cm تاثیر بسیار زیادی در استحکام برشی نهایی ایجاد می کند به طوری که حتی استحکام برشی بالاتری از مدل b50cm که تمامی جان آن موج دار بوده، نشان می دهد. بنابراین می توان چنین بیان کرد که انتخاب طول موج کم برای تیر ورق های با جان موج دار تاثیر بسیار چشمگیری در افزایش ظرفیت برشی دارد. همچنین مشاهده می شود که تیر ورق با جان ذوزنقه ای b25cm از استحکام برشی مناسبی برخوردار است و اختلاف استحکام برشی آن با تیر ورق سینوسی b25cm پایین می باشد. اما در شرایط مشابه تیر ورق های با جان سینوسی استحکام برشی بیشتری از تیر ورق های با جان ذوزنقه ای نشان می دهند.

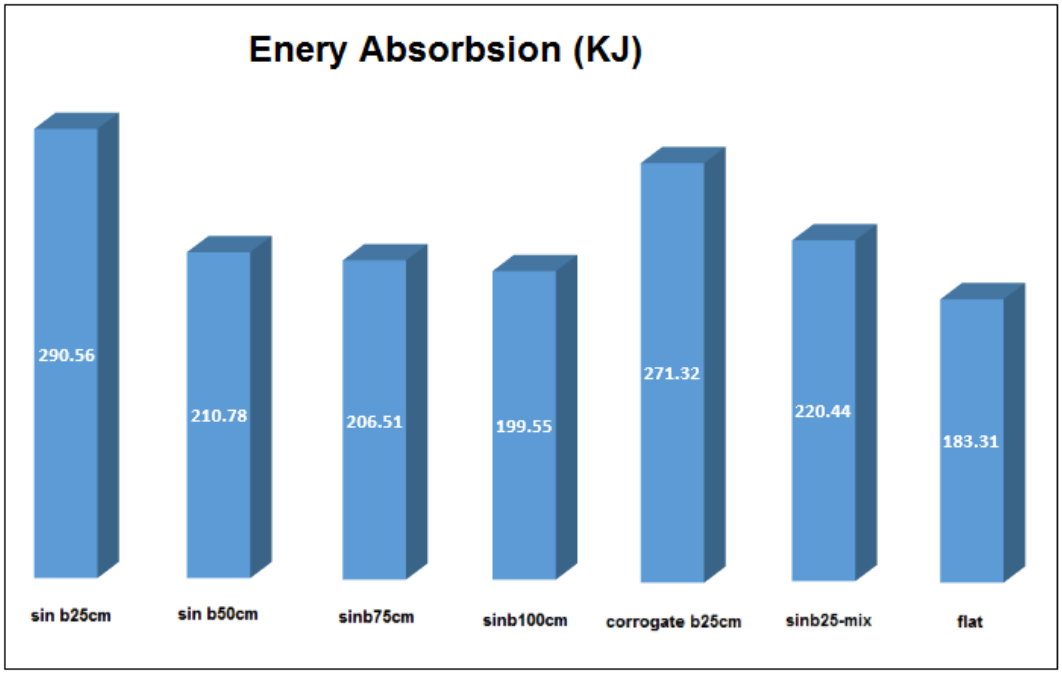
در تیر ورق های با جان عمیق sin- b25cm، sin- b50 cm ، sin- b75cm و sin-b100cm ، ذوزنقه ای b-25cm ، ترکیبی b-25cm و مسطح ، ماکزیمم استحکام برشی تیر ورق ها به ترتیب 901 KN ، 673KN ، 644KN و 619 KN ، 890KN ، 690KN و 591KN می باشد. می توان چنین بیان کرد که تیر ورق های با جان سینوسی b25cm و جان ذوزنقه ای b25cm ، دارای استحکام برشی مناسبی هستند هر چند که استحکام برشی تیر ورق با جان سینوسی b25cm افزایشی 1.23% را نشان می دهد. همچنین موج دار کردن سینوسی جان تیر ورق مسطح، با طول نیم موج b25cm ، b50cm ، b75cm و b100cm سبب افزایش استحکام برشی 52.45% ، 13.87% ،8.97% ، 4.74% می گردد. بنابراین تاثیر طول موج کم، در افزایش ظرفیت برشی جان موج دار بسیار پر اهمیت است. استفاده از موج ذوزنقه ای b25cm در جان تیر ورق، باعث افزایش استحکام برشی 50.59% می گردد. جان ترکیبی باعث افزایش 16.75% در ظرفیت برشی شده است که در مقایسه با جان های سینوسی با طول موج بزرگ قابل توجه است.

5 – 5 : ارزیابی سختی اولیه تیر ورق های با جان عمیق

همان طور که در بخش های قبل اشاره گردید، Load-Displacement بیان گر سختی اولیه تیر ورق می باشد. سختی اولیه سیستم در تیر ورق با جان عمیق sin- b25cm، sin- b50 cm ، sin- b75cm و sin-b100cm ، ذوزنقه ای b-25cm ، ترکیبی b-25cm و مسطح ، به ترتیب 5.95 KN/m ، 6.04 KN/m ، 6.57KN/m ، 6.93 KN/m ، 8.75KN/m ، 7.46 KN/m و14.33 KN/m می باشد. بیشترین سختی اولیه در تیر ورق با جان مسطح است در حالی که تیر ورق با جان سینوسی b25cm کمترین سختی اولیه را دارد. همچنین می توان بیان کرد که در تیر ورق های با جان سینوسی ، با افزایش طول موج سینوسی سختی اولیه سیستم افزایش می یابد. بنابراین در تیر ورق های سینوسی با طول موج کم، نرخ افزایش سختی اولیه پایین است اما با افزایش طول موج سینوسی، نرخ افزایش سختی اولیه قابل ملاحظه می باشد. تیر ورق با جان ترکیبی ، دارای سختی اولیه قابل ملاحظه ای است به طوری که سختی اولیه آن از تمامی مدل های سینوسی بیشتر می باشد. به نظر می رسد که وجود بخش میانی مسطح جان به طول هشت متر، تاثیر زیادی در بالا بودن سختی اولیه این تیر ورق دارد. همچنین سختی اولیه این تیر ورق از تیر ورق های ذوزنقه ای و مسطح کمتر است. تیر ورق با جان ذوزنقه ای دارای سختی اولیه بالایی است اما از سختی اولیه مدل مسطح کمتر است. می توان چنین بیان کرد که جان ذوزنقه ای متشکل از بخش های مسطحی است که به شکل زاویه دار به همدیگر اتصال پیدا کرده اند. بنابراین انتظار می رود که سختی اولیه آن از جان های کاملا" منحنی سینوسی بالاتر باشد.

5 – 6 : ارزیابی انرژی جذب شده توسط تیر ورق های با جان عمیق

در این بخش انرژی جذب شده توسط تیر ورق هایی با شکل موج مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد. میزان انرژی جذب شده در تیر ورق های با جان عمیق sin- b25cm ،sin- b50 cm ، sin- b75cm و sin-b100cm ، ذوزنقه ای b-25cm ، ترکیبی b-25cm و مسطح ، به ترتیب 290.56KJ ، 210.78KJ ، 206.51 KJ ، 199.55 KJ ، 271.32 KJ ، 220.44 KJ و 183.31 KJ می باشد. موج دار کردن جان مسطح تاثیر زیادی در میزان جذب انرژی تیر ورق دارد. مدل تیر ورق سینوسی b25cm دارای بیشترین میزان جذب انرژی است به طوری که انرژی جذب شده توسط آن 58.47% بیشتر از مدل مسطح می باشد. همچنین با افزایش طول موج در تیر ورق های سینوسی ، انرژی جذب شده کاهش پیدا می کند اما در تیر ورق های با طول موج بزرگتر، تغییرات انرژی جذب شده با افزایش طول موج قابل ملاحظه نیست. همچنین در تیر ورق با جان ترکیبی میزان انرژی جذب شده در مقایسه با تیر ورق های با جان سینوسی b50cm ، b75cm و b100cm بیشتر است که این زفتار ناشی از وجود جان موج دار با طول موج کم b=25cm در دو طرف این تیر ورق می باشد. مشاهده می گردد که میزان انرژی جذب شده تیر ورق با جان ذوزنقه ای b25cm قابل ملاحظه است اما نسبت به انرژی جذب شده توسط تیر ورق با جان سینوسی b25cm به اندازه 6.89% کمتر می باشد هر چند که شکل ذوزنقه ای جان تیر ورق باعث افزایش 48.08% در میزان جذب انرژی آن نسبت به تیر ورق مسطح شده است.

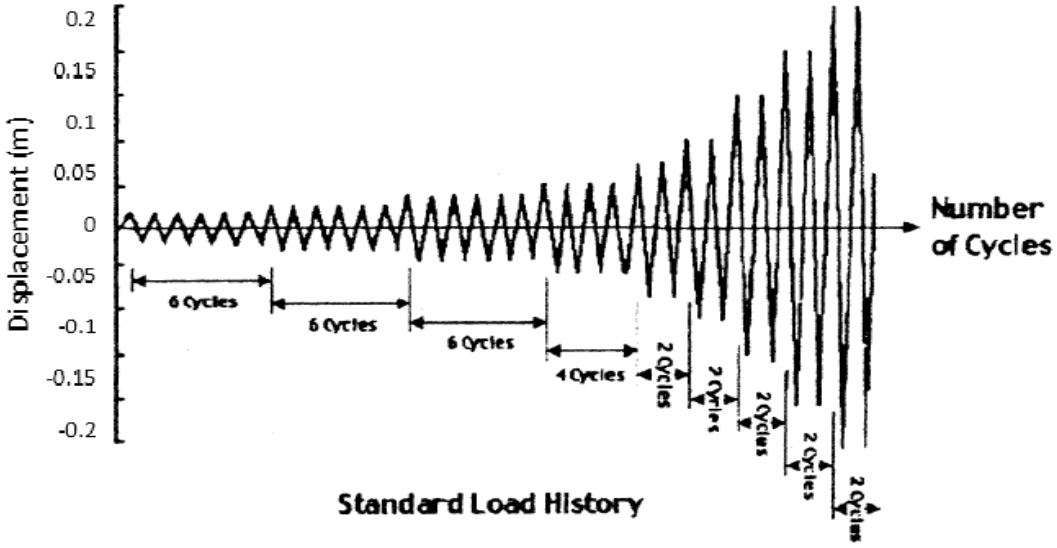


شکل 5 ارزیابی انرژی جذب شده توسط تیر ورق های با جان عمیق

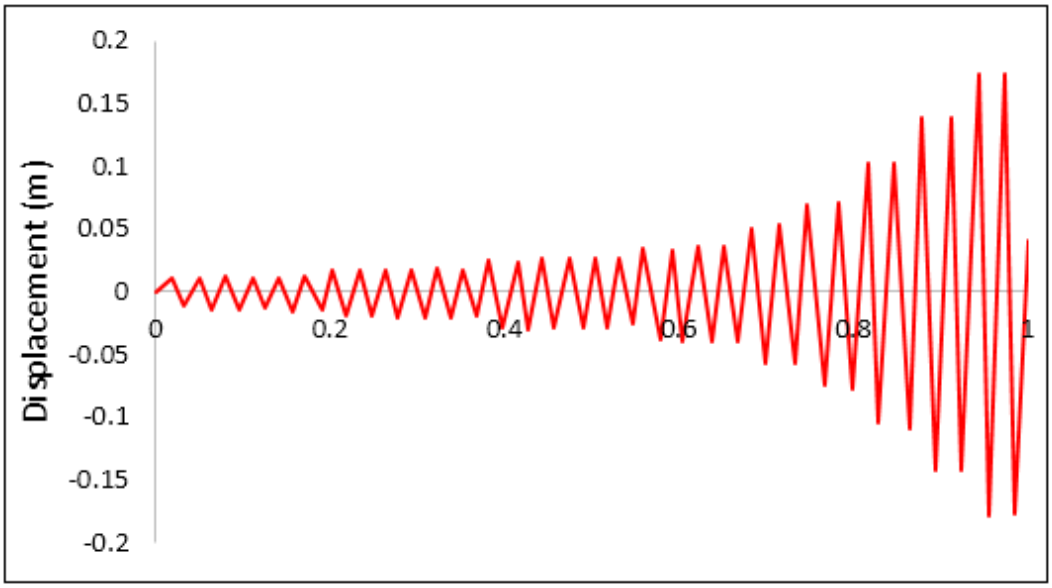
5 – 7 : بررسی عملکرد لرزه ای مدل های تیر ورق

برای بررسی عملکرد لرزه ای تیر ورق های با جان عمیق دو روش وجود دارد. روش اول، ساخت نمونه های آزمایشگاهی است که نیاز به هزینه و زمان زیادی دارد. روش دوم مدل سازی و تحلیل غیر خطی مدل المان محدود است. این روش هزینه و زمان کمی نیاز دارد و در سالیان اخیر رواج پیدا کرده و پیشرفت هایی در این زمینه ایجاد شده است. این روش حتی قبل از انجام تست های آزمایشگاهی به عنوان گزینه ای برای رفتار سنجی و روشی برای انتخاب نمونه های آزمایشگاهی مطرح می گردد و تعداد سعی و خطاها را برای رسیدن به هدف مطلوب کاهش می دهد. به هر حال

امروزه این دو روش به موازات هم ، پشتیبانی و انجام می شوند. تاکنون مدل های مختلفی برای آزمایش در آزمایشگاه ساخته شده اند و یا در نرم افزار مدل سازی شده اند، که همگی معادل هستند. در شکل زیر مدل شماتیک از مدل های ایجاد شده در این پایان نامه نشان داده شده است.



شکل 6 نمودار تاریخچه زمانی



شکل 7 بارگذاری تاریخچه زمانی استاندارد اعمال شده در ABAQUS

6 : بحث و نتیجه گیری

با افزایش جابجایی، استحکام برشی تیر ورق ها به صورت خطی افزایش می یابد که ناشی از سختی الاستیک اولیه تیر ورق ها می باشد. همچنین میزان نیروی برشی متناسب با جابجایی تیر ورق افزایش می یابد و در یک جابجایی نسبتا پایین، با وجود بار زیاد در تیر ورق از ظرفیت برشی به صورت فروجهشی کاسته می شود. پس از این افت قابل توجه ، کاهش استحکام برشی همراه با افزایش جابجایی درتیر ورق موج دار ادامه می یابد و سپس به حالت پایدار و یکنواختی می رسد به طوری که این روند در تمامی مدل های تیر ورق دیده می شود. همچنین مدلهای عددی مختلف از

تیرهای با جان موجدار با تغییر در پارامتر طول موج جان تیر ساخته شده و توسط نرم افزار آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته است تا اثر طول موج جان تیر بر ظرفیت برشی تیر ورق ها تعیین گردد. در بررسی تأثیر طول موج جان در این تحقیق، دیده شد که در تیر ورق با جان منحنی با کاهش طول موج سینوسی، ظرفیت برشی تیر ورق افزایش می یابد و همچنین مقاومت آن نیز در برابر کمانش پیچشی جانبی افزایش می یابد. از طرفی در طول موج های سینوسی بزرگ دیده می شود که اختلاف زیادی بین میزان ظرفیت برشی تیر ورق با افزایش طول موج نیست اما در طول موج های کوتاه جان سینوسی، این اختلاف قابل توجه است به طوری که تیر سینوسی با جان 25 سانتی متر نسبت به تیر با جان 50 سانتی متر دارای ظرفیت برشی بالاتری به میزان 25.36 درصد است، این در حالی است که تیر سینوسی با جان 75 سانتی متر نسبت به تیر با جان 100 سانتی متر دارای 4.38 درصد ظرفیت برشی بالاتر است. بنابراین در تیر ورق های با طول موج بالا، افزایش طول موج سینوسی تاثیر چشمگیری در کاهش ظرفیت برشی ندارد. از طرفی دیگر به نظر می رسد که با افزایش طول موج سینوسی، جان تیر ورق بازتر می شود که همین عامل باعث ایجاد کمانش کلی زودهنگام در جان تیر ورق می گردد و بنابراین استحکام برشی نهایی کاهش پیدا می یابد. ارزیابی سختی اولیه تیر ورق های با جان سینوسی را می توان بر اساس شیب قسمت خطی نمودار بار – جابجایی انجام داد. لذا مشاهده گردید که با افزایش طول موج سینوسی، میزان سختی الاستیک اولیه سیستم بیشتر می گردد. همچنین در تیر ورق های سینوسی با طول موج کم، میزان افزایش سختی اولیه کمتراست اما با افزایش طول موج سینوسی، میزان تغییرات افزایش سختی اولیه قابل ملاحظه می باشد. با توجه به سطح زیر نمودار بار – جابجایی ، در طی بارگذاری برای تیر ورق ها ی با جان سینوسی با کاهش طول موج میزان جذب انرژی افزایش پیدا می کند. تحلیل های صورت گرفته نشان داد که در تمامی تیر ورق های با جان سینوسی، مود کمانش کلی در جان سینوسی تیر ورق ها به صورت قطری ایجاد می گردد.

از طرفی با مقایسه ای دیگر برای ارزیابی کلی تمامی مدل های تیر ورق با شکل های مختلف جان، مشاهده می شود که استحکام برشی تمامی تیر ورق های با جان سینوسی، ذوزنقه ای و ترکیبی بیشتر از تیر ورق با جان مسطح است. این امر به دلیل موج دار کردن جان تیر ورق ها و در نتیجه افزایش سختی خارج صفحه ورق جان است. همچنین تیر ورق با جان ترکیبی استحکام بالاتری نسبت به مدل تیر ورق مسطح دارد. از طرفی دیده شد که ظرفیت برشی تیر ورق ترکیبی قابل توجه بوده و از تیر ورق های سینوسی با طول موج سینوسی 50، 75 و 100 سانتی متر بالاتر است. باید توجه کرد که جان این تیر ورق از هر طرف به اندازه 2 متر با طول موج 25 سانتی متری موج دار شده و بخش میانی جان به طول هشت متر مسطح می باشد. بنابراین به نظر می رسد که وجود طول موج پایین 25 سانتی متری در جان این تیر ورق تاثیر بسیار زیادی در استحکام برشی نهایی ایجاد می کند به طوری که حتی استحکام برشی بالاتری از مدل سینوسی با جان 50 سانتی متری که تمامی جان آن موج دار بوده، نشان می دهد. بنابراین می توان تاکید کرد که انتخاب طول موج کم برای تیر ورق های با جان موج دار تاثیر بسیار چشمگیری در افزایش ظرفیت برشی دارد. همچنین مشاهده می شود که تیر ورق با جان ذوزنقه ای با طول موج 25 سانتی متر از استحکام برشی مناسبی برخوردار است و استحکام برشی آن نزدیک به تیر ورق سینوسی با همین طول موج لیکن اندکی پایین تر می باشد. به طور کلی در شرایط مشابه تیر ورق های با جان سینوسی استحکام برشی بیشتری از تیر ورق های با جان ذوزنقه ای نشان می دهند.

همچنین مشاهده می شود که بیشترین سختی اولیه در تیر ورق با جان مسطح است در حالی که تیر ورق با جان سینوسی با طول موج 25 سانتی متر دارای کمترین سختی اولیه می باشد. می توان بیان کرد که در تیر ورق های با جان سینوسی ، با افزایش طول موج سینوسی سختی اولیه سیستم افزایش می یابد. بنابراین در تیر ورق های سینوسی با طول موج کم، نرخ افزایش سختی اولیه پایین است اما با افزایش طول موج سینوسی، نرخ افزایش سختی اولیه قابل ملاحظه می باشد. تیر ورق با جان ترکیبی ، دارای سختی اولیه قابل ملاحظه ای است به طوری که سختی اولیه آن از تمامی مدل های با جان سینوسی بیشتر می باشد. به نظر می رسد که وجود بخش میانی مسطح جان به طول هشت متر، تاثیر زیادی در بالا بودن سختی اولیه این تیر ورق دارد. اما سختی اولیه این تیر ورق از تیر ورق های ذوزنقه ای و مسطح کمتر است. همچنین دیده شد که تیر ورق با جان ذوزنقه ای دارای سختی اولیه بالایی است اما از سختی اولیه مدل مسطح کمتر است. می توان چنین توجیه نمود که جان ذوزنقه ای متشکل از بخش های مسطحی است که به شکل زاویه دار به همدیگر اتصال پیدا کرده اند بنابراین با توجه به اثر مسطح بودن این بخش ها انتظار می رود که سختی اولیه آن از جان های کاملا" منحنی سینوسی بالاتر باشد.

همچنین در خصوص میزان جذب انرژی می توان بیانن کرد که موج دار کردن جان مسطح تاثیر زیادی در میزان جذب انرژی تیر ورق دارد. مدل تیر ورق سینوسی با جان 25 سانتی متری دارای بیشترین میزان جذب انرژی است به طوری که انرژی جذب شده توسط آن 58.47 درصد بیشتر

از مدل مسطح می باشد. از نتایج مهم دیگر اینکه مشخص شد که با افزایش طول موج در تیر ورق های سینوسی ، انرژی جذب شده کاهش پیدا می کند. در تیر ورق های با طول موج بزرگتر، میزان انرژی جذب شده با افزایش طول موج قابل ملاحظه نیست لیکن در تیر ورق های با طول موج کم، کاهش بیشتر طول موج تاثیر زیادی بر میزان جذب انرژی دارد. در تیر ورق با جان ترکیبی میزان انرژی جذب شده در مقایسه با تیر ورق های سینوسی با طول موج سینوسی 50، 75 و 100 سانتی متر بالاتر است. که این رفتار ناشی از وجود جان موج دار با طول موج 25 سانتی متری در دو طرف این تیر ورق می باشد. مشاهده می گردد که میزان انرژی جذب شده تیر ورق با جان ذوزنقه ای 25 سانتی متری قابل ملاحظه است اما نسبت به انرژی جذب شده توسط تیر ورق با جان سینوسی 25 سانتی متری به اندازه 6.89 درصد کمتر می باشد هر چند که شکل ذوزنقه ای جان تیر ورق باعث افزایش 48 درصدی در میزان جذب انرژی آن نسبت به تیر ورق مسطح شده است. بنابراین موج دار کردن جان تیر ورق ها تاثیر بسیار زیادی در میزان جذب انرژی در طی بارگذاری دارد به طوری که این اثر در شرایط مشابه برای جان های سینوسی چشمگیر تر است.

منابع و مراجع

[1] گودرزی خویگانی محمد علی، رجایی حسین. تحلیل تنش برشی در جان تیرورق ها با جان موجدار. پژوهشنامه ی حمل و نقل، سال چهارم، شماره ی اول، بهار 1386.

[2] Basler K. Strength of plate girder in shear.J Struct Div. ASCE 1961;(ST7):151-180.

[3] Chan CL,Khalid YA,Sahari BB,Hamouda AMS. Finit element analysis of corrugated web beams under bending. Journal of Constructional Steel Research 2002;58 1391–1406.

[4] Driver RG, Abbas HH, Sause R. Shear behavior of corrugated web bridge girders. Journal of Structural Engineering 2006;132(2):195–203.

[5] Easley JT, Mcfarland DE. Buckling of light-gauge corrugated metal shear diaphragms.J Struct Div. ASCE 1969;95(ST7):1497–516.

[6] Elgaaly M, Hamilton RW, Seshadri A. Shear strength of beam with corrugated webs. J Struct Eng, ASCE 1996;122(4):390-8.

[7] Elgaaly M, Seshadri A, Hamilton RW. Bending strength of steel beams with corrugated webs. Journal of Structural Engineering ASCE 1997;123(6):772–82

[8] Heywood P. Corrugated boxgirder web lowers bridge weight and cost . ENR 1987;32

[9] Jian-Guo Nie , Li Zhu , Mu-Xuan Tao, Liang Tang. Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs. Journal of Constructional Steel Research 85 (2013) ;105–115.

[10] Korashy, M., and Varga, J. “Comparative evaluation of fatigue strength of beams with web plate stiffened in the traditional way and by corrugation.” Acta Tech. Acad. Sci. Hung . 1979., 89, 309–346.

[11] Lindner J, Aschinger R. Grenzschubtragfähigkeit von I-trägern mit trapezförmig profilierten Stegen. Stahlbau 1988;57(12):377–80.

[12] Luo R, Edlund B. Shear capacity of plate girders with trapezoidally corrugated webs. Journal of Thin-Walled Structures 1996;26(1):19–44.

[13] Moon J, Yi J, Choi BH, Lee H-E. Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs. Journal of Constructional Steel Research 2008;65(5) 1198–205.

[14] Sause R,Braxtan TN.Shear strength of trapezoidal corrugated steel web.Journal of Constrauctional Steel Research 67 (2011); 223-236.

[15] Sayed-Ahmed EY. Behavior of steel and (or) composite girders with corrugated steel webs. Canadian Journal of Civil Engineering 2001;656–72.