

## تحلیل تنش‌های برشی در جان تیر ورقهای با جان عمیق موج‌دار\*

محمد علی گودرزی خویگانی، دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

حسین رجایی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

E-mail: hrajae@aut.ac.ir

### چکیده:

در طرح و ساخت تیر ورقهای با جان عمیق استفاده از جان موج دار به دلیل افزایش سختی خارج صفحه و مقاومت کمانشی آن، بدون بکارگیری سخت کننده‌های قائم، در دهه‌های اخیر مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. نوع خاصی از جانهای فلزی موج دار به همراه بالهای بتنی پیش تنیده در قالب تیرهای مرکب در پلها به طور وسیع به کار گرفته شده است. شکل پروفیل‌های مختلفی که معمولاً برای موج جان این تیرها مورد استفاده قرار می‌گیرد دوزنقه‌ای، زیگزاگ و سینوسی است. این تحقیق با تعیبه یک مدل سه بعدی اجزای محدود، تحلیل تنش‌های برشی در جان تیر ورقهای فولادی با پروفیل موج دوزنقه‌ای را با ملاحظه مدهای مختلف کمانشی، مورد مطالعه قرار می‌دهد. همچنین بررسی پارامتریک جهت ارزیابی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف در ظرفیت برشی نهایی جان این تیرورقها انجام شده است. این پارامترها برای موجهای دوزنقه‌ای عبارتند از: (۱) زاویه موج دوزنقه‌ای (۲) طول قسمت مسطح موج (۳) عمق موج (۴) ضخامت جان (۵) ارتفاع مقطع. با استفاده از مدل یاد شده مطالعات پارامتریک در برش، برای موج‌های سینوسی نیز دنبال شده و تأثیر طول موج و دامنه موج را در ظرفیت نهایی برش مورد بررسی قرار داده است. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج حاصل از روابط تحلیلی موجود برای صفحات مسطح، فرض رفتار صفحات ارتوتروپیک را برای جان موج‌دار در حالت وقوع کمانشی کلی جان مورد تأیید قرار می‌دهد. بر پایه نتایج عددی حاصل شده، مزایا و معایب جانهای با پروفیل موج سینوسی و دوزنقه‌ای در پایان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: اجزای محدود، تحلیل غیرخطی، تیرهای با جان موج‌دار، موج دوزنقه‌ای، موج سینوسی، روش عددی

### ۱. مقدمه

حذف سخت کننده‌های عرضی می‌شود و امکان استفاده از جان نازک‌تر را نیز مهیا می‌کند. تیر ورقهای فلزی، متشکل از جان موج‌دار و بالهای فلزی، بیشتر در ساختمانها و تیر ورقهای مرکب متشکل از جان موج‌دار و بالهای بتنی پیش تنیده بیشتر در پلها بکار می‌رود (شکل ۱). ایده استفاده از تیرهای فولادی

یک روش اقتصادی برای جلوگیری از کمانش جان، موج‌دار کردن آن است. برای جلوگیری از کمانش جان تیر ورقهای I شکل معمولی با جان مسطح یا باید ضخامت جان را زیاد و یا از سخت کننده‌های عرضی و طولی استفاده کرد، در حالی که موج‌دار کردن جان با افزایش سختی خارج صفحه ورق باعث

تیرهای بتنی، به دلیل جایگزینی جان بتنی با یک ورق فولادی سبک کاهش قابل توجهی در وزن تیر حاصل می‌شود.

- اصلی‌ترین نقص تیر ورقهای با جان موج‌دار، افزایش هزینه‌های مربوط به ساخت ورق‌های موج‌دار است. هر چند با بکارگیری جانهای موج‌دار، هزینه‌های مربوط به استفاده از سخت‌کننده‌های عرضی و ضخیم‌تر بودن جان وجود ندارد.

## ۱-۲ مرور تحقیقات انجام شده

ویژگیهای یاد شده باعث شد تا نحوه عملکرد این تیرها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گیرد. این تحقیقات نخستین بار بوسیله گروه تحقیقاتی به نام BTP در فرانسه آغاز گردید و سپس توسط Cheyreyzy & Combault در سال ۱۹۹۰ Yoda و همکاران (۱۹۹۴)، Lebon (۱۹۹۸) و Johnson & Cafolla (۱۹۹۷)، Elmetwally & Loov (۱۹۹۸) در خصوص ویژگیهای مختلف این تیر ورقها مطالعات گسترده‌ای انجام گرفت. اما گزارش نسبتاً جامع از ظرفیت باربری این تیرها در سال ۱۹۹۷ و به وسیله Elgaaly منتشر شده است [5].

Zhang & Li نیز در سال ۲۰۰۰ در مورد تیرهای با جان تماماً موج‌دار به تحقیق پرداختند [8].

در سالهای اخیر علاوه بر این که تحقیقات پژوهشگران در زمینه استفاده از ظرفیت برشی تیرورقهای فلزی ادامه دارد [16,15,14,10]، سایر زمینه‌های تحقیقاتی جدید در مورد این تیرها حول سه محور اصلی شامل استفاده از تیرهای مرکب با بال بتنی و جان موج‌دار فولادی [19,18,11,10]، بررسی اثرات خستگی در این تیرها (استفاده از تیر ورقها در پلها تحت بارهای دوره‌ای ناشی از حرکت بارهای دینامیکی، امکان ظهور پدیده خستگی در این تیرها را افزایش می‌دهد) [13,19] و همچنین امکان نورد گرم و استفاده از ظرفیت خمشی جان موج‌دار علاوه بر مزایای برشی آن [8,12]، ادامه دارد.

خلاصه نتایج حاصل از این تحقیقات به شرح زیر است:

○ در تیرهای با جان موج‌دار وظیفه تحمل تنش‌های خمشی به طور کامل با بالهاست و وظیفه تحمل برش با جان تیر است. به عبارت دیگر هیچ اندرکنشی بین برش و خمش

با جان موج‌دار، اولین بار در ساختهای صنعتی با ضخامت جان حدود ۲ تا ۵ میلیمتر مطرح شد. با این کار نسبت ارتفاع به ضخامت جان می‌تواند تا مقدار ۲۶۰ افزایش یابد. این نسبت برای تیرورقهای با جان موج‌دار بکار گرفته شده در پلها، تا مقدار ۴۰۰ هم استفاده شده است.

## ۲. مزایا و معایب

در جمع بندی کلی، ویژه گی‌های بارز جان های موج دار را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد.

- موج دار کردن جان باعث می‌شود تا کماتش جان به صورت موضعی در قسمتهای مسطح موج اتفاق افتد و نتیجتاً افزایش در مقاومت نهایی کماتشی جان ایجاد شود.

- موج‌دار کردن جان باعث کاهش سختی محوری آن می‌شود که در نتیجه اثر عوامل ایجاد کننده کرنش محوری جان نظیر نیروهای محوری ناشی از خمش، تغییرات دما، خزش و جمع شدگی در جان تیر کم می‌شود و در نتیجه حساسیت در مقابل کماتش در جان کاهش می‌یابد و اثرات ناشی از خطاهای ساخت در افزایش تنش‌های محوری کم رنگ‌تر می‌شود.

- برای تیر ورقهای فلزی با جان موج‌دار، باید ضخامت بال قدری افزایش یابد، زیرا کماتش موضعی در عرضی بیشتر از نصف بال اتفاق می‌افتد و همچنین جان تیر در مقابل تنش‌های خمشی مقاومتی نمی‌کند. [1]

- در تیرهای مرکب به دلیل پیش تنیده بودن بالها، جان تحت تنش‌های محوری قرار می‌گیرد، اما جانهای موج‌دار به علت عدم سختی محوری و امکان وقوع تغییر شکل در راستای محور جان، تحت تأثیر تنش‌های محوری ایجاد شده قرار نمی‌گیرند. این ویژگی به خاصیت آکاردئونی جان معروف است. [2]

- در خصوص تیرورق‌های قوطی شکل که جان آنها از ورقهای فلزی موج‌دار ساخته شده است، مقاومت در مقابل تنش‌های برشی ناشی از اثرات پیچشی بارهای خارجی افزایش می‌یابد. همچنین توزیع تنش در این تیرها یکنواخت‌تر است [3].

- کاهش ضخامت جان و حذف سخت‌کننده‌ها و هزینه‌های مربوط به جوشکاری آنها باعث کاهش وزن و در نتیجه اقتصادی‌تر شدن تیرهای با جان موج‌دار می‌شود. خصوصاً در

بحرانی برای صفحات، بر اساس روابط ارائه شده تئوریک به صورت رابطه زیر است [9].

$$\tau_{cre} = K_s \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (1)$$

که در آن:  $b$  پهنای قسمت مسطح موج (شکل ۲) و  $t$  ضخامت جان است.  $K_s$  ضریب کمانشی است که براساس شرایط تکیه‌گاهی تعیین می‌شود.

$$K_s = 5.34 + 2.31 \left(\frac{b}{h_w}\right) - 3.44 \left(\frac{b}{h_w}\right)^2 + 8.39 \left(\frac{b}{h_w}\right)^3 \quad (2)$$

$$K_s = 5.34 + 4 \left(\frac{b}{h_w}\right)^2 \quad (3)$$

$$K_s = 8.98 + 5.6 \left(\frac{b}{h_w}\right)^2 \quad (4)$$

اگر قسمت مسطح موج دوزنقه‌ای در بالا و پایین دارای شرایط گیردار و از طرف چپ و راست دارای شرایط تکیه‌گاهی ساده در نظر گرفته شود رابطه (۲) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این حالت برای تیرهای با بال بتنی صادق است [۱۱].

اگر صفحه مسطح موج را در هر چهار طرف ساده فرض کنیم از رابطه (۳) استفاده می‌شود. رابطه (۴) برای حالتی است که چهارطرف صفحه شرایط تکیه‌گاه ساده فرض شود. این حالت برای تیرهای با بال فلزی صادق است. اگر شرایط چهار طرف گیردار را برای کمانش موضعی قسمت مسطح جان در نظر بگیریم، نتایج تئوری، مقادیر دست بالایی را ارائه می‌دهند و اگر فرض کنیم قسمت مسطح موج دوزنقه‌ای به صورت دو طرف گیردار و دو طرف ساده است، نتایج به دست آمده نسبت به نتایج آزمایشگاهی مقادیر کمتری از خود نشان می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد مقدار میانگین حالات یاد شده با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد [5].

## ۲-۳-۱ حالت مد کمانش کلی برای جان‌های موج‌دار

### دوزنقه‌ای

بررسی‌های محققین نشان می‌دهند که اگر عمق موج دوزنقه‌ای کم و یا به عبارت دیگر عرض قسمت مسطح پانل کوچک باشد، معمولاً کمانش به صورت کلی در طول چند موج و در راستای قطر اتفاق می‌افتد و دیگر به صورت موضعی محدود به قسمتهای مسطح موج نیست. در این حالت جان به صورت

در نظر گرفته نمی‌شود و در نتیجه ظرفیت خمشی این تیرها برابر با ممان پلاستیک بال است. [4]

○ با مترکم‌تر شدن موج جان، کمانش به صورت کلی در جان اتفاق می‌افتد ولی در موجهای بازتر، کمانش به صورت موضعی در قسمتهای مسطح موج اتفاق می‌افتد [5].

○ تحت بارهای جانبی وارد شده به بال، دو ساز و کار لهیدگی برای جان وجود دارد. یا این که بال به سمت جان کمانه کرده و بدون در نظر گرفتن جان تا حد جاری شدن بال پیش می‌رود و یا این که جان در محل زیر بار در اثر خمش بال در جهت قائم جاری می‌شود. در هر دو ساز و کار، مقدار بار نهایی به نقطه اثر بار و پارامترهای موج بستگی دارد. افزایش ارتفاع مقطع باعث افزایش ظرفیت برشی تیر می‌شود، درحالی که در مقاومت لهیدگی درمقابل بارهای جانبی بی‌تأثیر است [6].

○ به طور کلی تیورقهای با زاویه موج بیشتر و جان و بال ضخیم‌تر، مقاومت نهایی بیشتری در لهیدگی و برش از خود نشان می‌دهند [7].

○ کمانش موضعی بال تحت فشار در عرضی بیشتر از نصف بال اتفاق می‌افتد. مشاهدات انجام شده، زاویه موج را به عنوان اصلی‌ترین پارامتر در تعیین عرض مؤثر بال معرفی می‌کند [1].

○ بررسی اثر پارامترهای موج سینوسی بر روی مقاومت نهایی تیرهای با جان تماماً موج‌دار بیانگر افزایش ۱/۵ تا ۲ برابری در مقاومت کمانشی این تیرهاست [8].

## ۲-۲ تنش‌های برشی در تیر ورقهای با جان موج‌دار

به طور کلی سه نوع مد کمانشی متفاوت برای تیورقهای با جان موج‌دار در مقابل برش وجود دارد. مد کمانش کلی، مد کمانش موضعی و مد کمانش نیمه کلی.

## ۲-۲-۱ حالت مد کمانش موضعی برای موج‌های دوزنقه‌ای

کمانش موضعی محدود به قسمتهای مسطح یک موج دوزنقه‌ای است. اگر قسمتهای مسطح یک موج دوزنقه‌ای به صورت یک صفحه مسطح در نظر گرفته شود که از بالا و پایین به بالها و از اطراف به قسمتهای مورب موج متصل است، آنگاه تنش برشی

تیرهای آزمایش شده به صورت دو سر ساده است که مدل المان محدود، به دلیل تقارن فقط برای نیمی از تیر بر پا شده است (شکل ۲). بار در انتهای سمت چپ تیر و به صورت متمرکز، بر روی بال بالای تیر اعمال می‌شود. عرض اعمال بار در تمام تحلیلها برابر با یک سانتیمتر است.

از سخت کننده‌های قائم در زیر محل اعمال بار و در محل تکیه گاهها استفاده شده است. اتصال بال به جان به صورت پیوسته می‌باشد و از مدل کردن جوش بال به جان صرفنظر شده است. تعداد المانها در ارتفاع جان ۳۰ عدد در نظر گرفته شده و بال‌ها و سخت کننده‌های قائم به دلیل عدم تأثیر در فرآیند کمانش برشی جان با حداقل تعداد المان مدل سازی شده است.

تحلیل غیر خطی استاتیکی با در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ بیانگر حالت کمانش غیر خطی است. برای تحلیل غیر خطی از نرم افزار ANSYS 5.4 استفاده شده است. در این تحلیل هم اثر غیر خطی حاصل از مصالح و هم اثر غیر خطی هندسی در نظر گرفته شده است. از المان SHELL93 که در کتابخانه نرم افزار موجود است برای مدل سازی بال و جان و سخت کننده‌ها استفاده شده است.

این المان نه گرهی خاصیت پلاستیک شدن را دارا می‌باشد. تنش جاری شدن  $f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$  و ضریب پواسون  $\nu = 0.3$  و ضریب ارتجاعی مصالح  $E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  در نظر گرفته شده است. از منحنی الاستیک- پلاستیک کامل برای مدل رفتاری مصالح استفاده شده است. تنش‌های پسماند در نظر گرفته نشده و از روش نیوتن- رافسون کامل به همراه روند تکراری کمان قوسی برای انجام تحلیل غیر خطی استفاده شده است. افزایش بار خارجی در یک روند تکراری تا رسیدن به تعادل ادامه می‌یابد.

### ۳-۱ بررسی صحت مدل و ارزیابی آن

در سال ۱۹۹۵ Elgaaly و همکارانش [5]، ۴۲ آزمایش بر روی ۲۱ نمونه تیر دو سر ساده (شکل ۴) انجام دادند که از چهار شکل پروفیل دوزنقه‌ای با ابعاد متفاوت در این تیرها استفاده شده است. پارامترهای تعریف کننده موج دوزنقه‌ای در شکل ۳ نمایان است.

صفحات ارتوتروپیک عمل می‌کند. تنش بحرانی کمانش برای صفحات ارتوتروپیک به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{cre} = K_g \frac{(D_y^{.25} D_x^{.75})}{t_w h_w^2} \quad (5)$$

$$D_X = \frac{E \cdot I_X}{C} = \frac{E}{C} \left( 2bt(h/2)^2 + \frac{th^3}{6 \sin \theta} \right) \quad (6)$$

$$D_Y = \left( \frac{C}{S} \right) \frac{Et^3}{12} \quad (7)$$

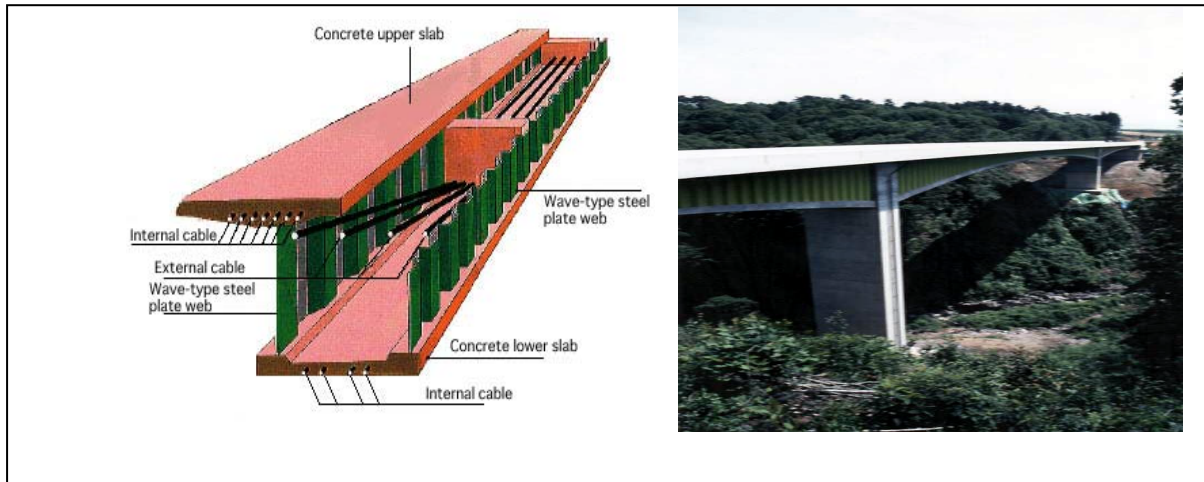
C طول افقی موج و S طول واقعی موج می باشد (شکل ۲).  $K_g$  ضریب کمانشی است که به شرایط انتهایی بستگی دارد و مقدار آن برای تکیه گاه ساده برابر با ۳۶ و برای حالت تکیه گاه گیردار برابر ۶۸/۴ است. رابطه (۷) با فرض عدم دوران بالها صادق است و  $K_g$  برای تمام تیرها می‌تواند برابر با ۳۶ در نظر گرفته شود، بجز در حالتی که بالها بتنی باشد که مقدار ۶۸/۴ مناسب است. بعضی محققین این مقدار را برای تیرهای کامپوزیت برابر با ۶۰/۴ پیشنهاد می‌کنند [11]. باید توجه کرد که چه در حالت کمانش موضعی و چه در حالت کمانش کلی، اگر  $\tau_{cre}$  از مقدار  $0.8\tau_y$  بیشتر شود، باید از کمانش غیر کشسان در محاسبه تنش بحرانی به شکل زیر استفاده کنیم:

$$\tau_{crei} = \sqrt{0.8\tau_{cre}\tau_y} \quad (8)$$

$$\tau_{cre} > 0.8\tau_y$$

### ۳. هندسه مدل، بارگذاری و شرایط مرزی

در این قسمت با استفاده از تحلیل غیر خطی به روش المان محدود، به بررسی اثر پارامترهای هندسی مختلف بر بار بحرانی کمانش تیرهای با جان موج دار با پروفیل دوزنقه ای پرداخته شده است. برای این کار پس از معرفی هندسه مدل المان محدود، نمونه‌های آزمایش شده توسط القالی [5] به وسیله مدل مذکور تحلیل شده و صحت عملکرد آن بر پایه نتایج حاصل از این آزمایشات تأیید می‌شود. پس از تأیید مدل المان محدود، علاوه بر انجام مطالعات پارامتریک برای موجهای دوزنقه‌ای، موجهای سینوسی نیز به وسیله آن تحلیل شده و اثر طول موج و دامنه موج بر مقاومت نهایی آنها جهت امکان مقایسه نتایج مدل و نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

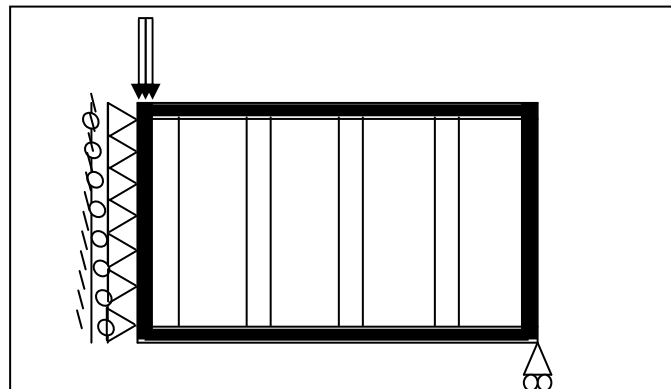


(الف)

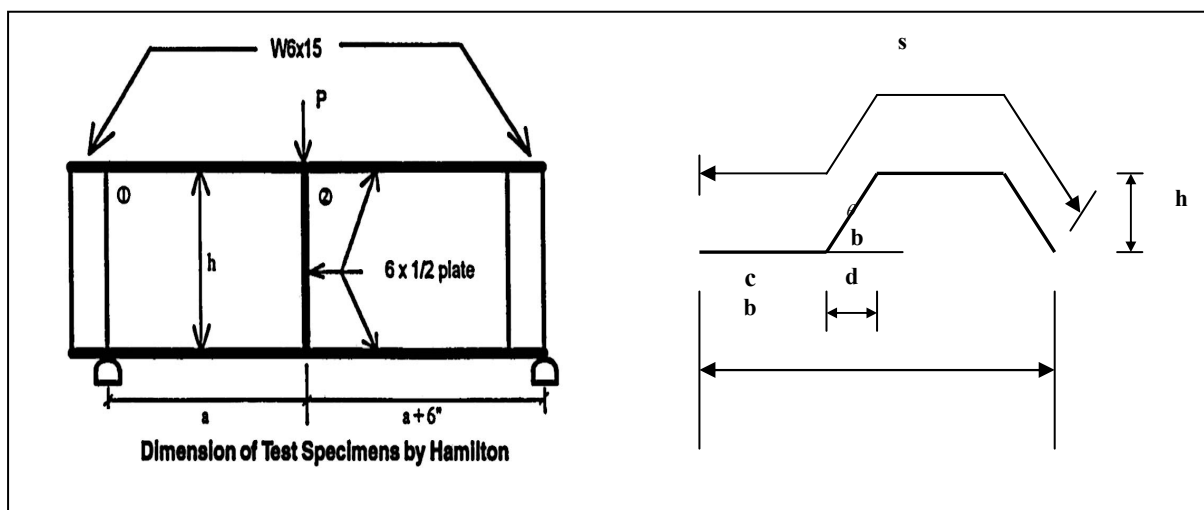
شکل ۱. الف. پل هوندانی در ژاپن

(ب)

شکل ۱. ب. جزئیات تیر مرکب با جان فولادی وبالهای بتنی پس تنیده

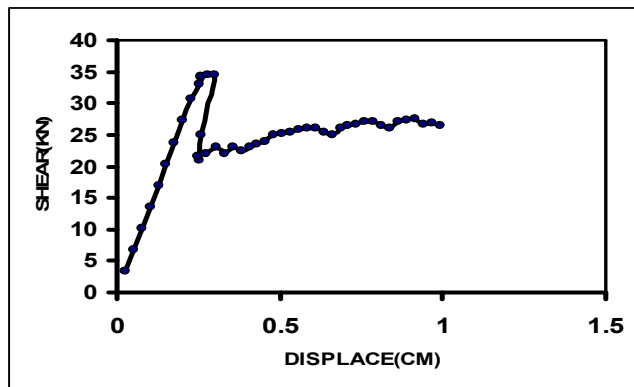


شکل ۲. شکل شماتیک مدل المان محدود نصف تیر



شکل ۳. ب. شکل شماتیک تیرهای آزمایش شده [5]

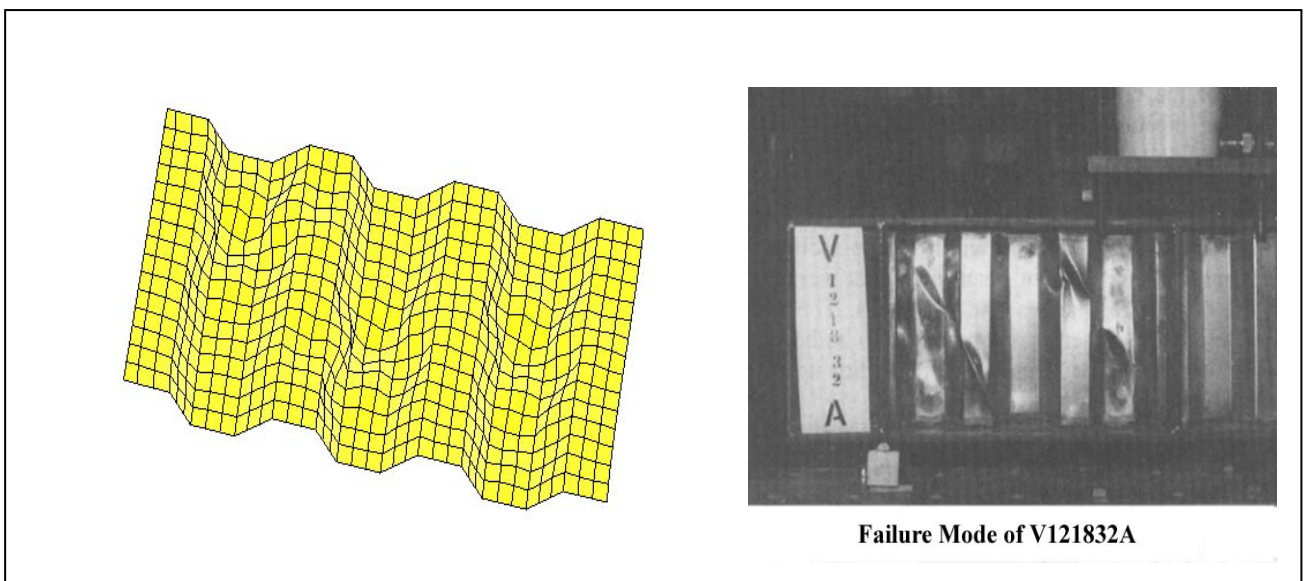
شکل ۳. الف. پارامترهای تعریف کننده موج دوزنقه‌ای



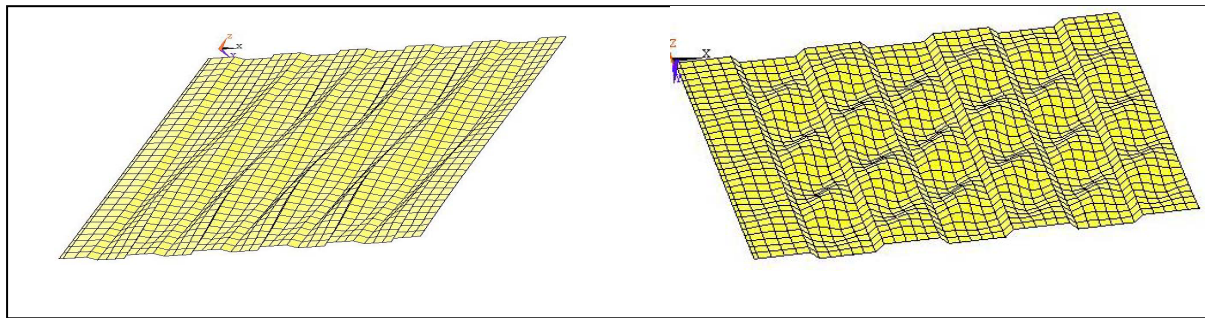
شکل ۴. منحنی بار تغییر مکان برای نمونه V121832A حاصل از تحلیل اجزای محدود

جدول ۱. مقایسه نتایج حاصل از مدل المان محدود با نتایج آزمایشگاهی (ابعاد برحسب سانتیمتر می باشد و پارامترها در شکل ۲ معرفی شده اند.  $V_f$  و  $V_e$  به ترتیب نیروی برشی نهایی تحمل شده توسط تیر در آزمایش و تحلیل می باشند).

شماره نمونه	t (cm)	H (cm)	b (cm)	d (cm)	h (cm)	$V_e$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$V_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$V_f/V_e$
121216A	.063	30.48	3.81	2.54	2.54	50.06	57.5	1.14
121216B	.077	30.48	3.81	2.54	2.54	85.12	87.67	1.03
121832A	.063	45.72	4.98	2.64	5.08	34.49	36.8	1.07
121832A	.063	45.72	4.19	2.34	3.33	61.86	67.5	1.09
181821B	.077	45.72	4.19	2.34	3.33	93.45	109.5	1.17
241216A	.063	60.96	3.81	2.54	2.54	75	95	1.26



شکل ۵. شکل کمانش یافته برای نمونه آزمایشگاهی [12] V121832A در مقایسه با شکل کمانشی تحلیلی



شکل ۶. حالت کمانش یافته نمونه‌های B1, B3 (کمانش کلی و موضعی جان)

جدول ۲. نتایج حاصل از تحلیل المان محدود برای تنش برشی بحرانی با تغییر مقدار عرض قسمت مسطح موج

	b	Tf	Tcrel	Tcre g	Tf/ Tcrel	Tf/ Tcreg	Tf/ Ty
<b>B1</b>	<b>13</b>	902	785	1876	<b>1.14</b>	<b>0.48</b>	<b>0.26</b>
<b>B2</b>	<b>10</b>	1464	1317	1843	<b>1.11</b>	<b>0.79</b>	<b>0.42</b>
<b>B3</b>	<b>8</b>	1957	2120	1813	<b>0.92</b>	<b>1.07</b>	<b>0.56</b>
<b>B4</b>	<b>5</b>	1875	5220	1750	<b>0.35</b>	<b>1.07</b>	<b>0.54</b>

جدول ۳. نتایج حاصل از تحلیل با تغییرات عمق موج

	h	Tf	Tcrel	Tcre g	Tf/ Tcrel	Tf/ Tcreg	Tf/ Ty
h1	1.5	1251	1317	1230	0.95	1.02	0.36
h2	2	1464	1317	1843	1.11	0.79	0.42
h3	3	1280	1317	3275	0.97	0.40	0.4
h4	5	1293	1317	6652	0.98	0.20	0.38

#### ۴. مطالعه پارامترهای هندسی مؤثر در ظرفیت

##### نهایی مدل (تیرهای با موج دوزنقه‌ای)

مدل المان محدود به کار رفته همان مدل قبلی است که با نتایج آزمایشگاهی برای موجهای دوزنقه‌ای کالبره وصحت عملکرد آن با نتایج آزمایشگاهی تأیید شد. پارامترهای هندسی مورد بررسی برای موجهای دوزنقه‌ای عبارتند از: زاویه موج دوزنقه‌ای، طول قسمت مسطح موج، عمق موج، ضخامت جان و ارتفاع مقطع. پارامترهای مذکور در شکل ۲ نشان داده شده است. عرض و ضخامت بال در تمام نمونه‌ها ثابت و برابر  $b_f = 15$  و  $t_f = 15$  است. پارامترهای هندسی مورد بررسی برای موجهای دوزنقه‌ای عبارتند از: زاویه موج دوزنقه‌ای، طول قسمت مسطح موج، عمق موج، ضخامت جان و ارتفاع مقطع. پارامترهای مذکور در شکل ۳

برای بررسی صحت عملکرد مدل، پنج نمونه از تیرهای آزمایش شده در ابعاد گوناگون انتخاب شده و بوسیله مدل مذکور تحلیل شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل در جدول ۱ آورده شده است. H ارتفاع تیر و t ضخامت جان را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی مقادیر بالاتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. این افزایش با توجه به حضور عیوب اولیه در نمونه‌های آزمایشگاهی کاملاً قابل توجیه است. نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی مقادیر بالاتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

خرابی حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی از نظر نوع مدکمانشی همان خرابی حاصل از آزمایش‌ها است. منحنی بار تغییر- مکان برای یکی از تیرهای مورد بررسی برای نمونه در شکل ۴ ارایه شده است. حالت کمانش یافته این نمونه در شکل ۵ نمایان است.

است و انتظار می‌رود که کماتش کلی در سرتاسر ارتفاع جان رخ دهد. در حالی که با افزایش عمق موج، کماتش به صورت موضعی و در قسمت مسطح موجهای دوزنقه‌ای اتفاق می‌افتد. وقتی کماتش موضعی رخ دهد، افزایش عمق موج به دلیل تأثیر ناچیز بر شرایط قسمت مسطح موج تأثیر چندانی بر بار بحرانی کماتش ندارد. این موضوع برای نمونه‌های  $h_2$  و  $h_3$  و  $h_4$  صادق است، اما در نمونه  $h_1$  به دلیل عمق کم موج، کماتش در مد کلی اتفاق افتاده و بنابراین بار بحرانی کاهش قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان گفت که در یک مد مشخص، عمق موج تأثیر چندانی بر مقدار نهایی بار گسیختگی ندارد (شکل ۷).

#### ۴-۳ اثرات ناشی از تغییر زاویه موج

برای بررسی اثر زاویه موج دوزنقه‌ای بر بار بحرانی کماتش سه نمونه بررسی شده است. سایر مقادیر ثابت نگه داشته شده‌اند. زاویه موج با مقادیر 60 و 45 و  $\alpha=30$  تغییر کرده است. نتایج حاصل مطابق جدول ۴ است. با افزایش زاویه موج مقدار بار بحرانی کماتش تحت نیروهای برشی افزایش می‌یابد. اگر زاویه موج کوچک باشد، کماتش از نوع کلی است و با زیاد شدن زاویه موج، کماتش از نوع موضعی می‌شود. پس از وقوع کماتش موضعی، زیاد شدن زاویه موج تأثیر چندانی در افزایش ظرفیت باربری ندارد. این موضوع به دلیل تأثیر ناچیز زاویه موج بر شرایط حاکم بر قسمت مسطح موج است. (شکل ۸)

#### ۴-۴ اثر ارتفاع مقطع (H)

برای بررسی تأثیر تغییر ارتفاع مقطع چهار نمونه مورد بررسی گرفته‌اند. ارتفاع مقطع با مقادیر 120 و 100 و 80 و  $H=60$  سانتیمتر تغییر داده شده است. سه نمونه اول در اثر کماتش موضعی و نمونه چهارم در اثر کماتش کلی باربری خود را از دست داده‌اند. افزایش میزان باربری تقریباً به تناسب افزایش ارتفاع، افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل افزایش سطح مقطع برش است. نمونه‌های  $H_1$  و  $H_2$  و  $H_3$  که در اثر کماتش موضعی گسیخته شده‌اند، با نتایج حاصل از تئوری کاملاً منطبق هستند. افزایش ارتفاع مقطع باعث تغییر مد کماتش از حالت موضعی به حالت کلی می‌شود (شکل ۹).

نشان داده شده است. عرض و ضخامت بال در تمام نمونه‌ها ثابت و برابر  $b_f=15$  و  $t_f=15$  است.

#### ۴-۱ اثر تغییرات عرض قسمت مسطح موج دوزنقه‌ای (b)

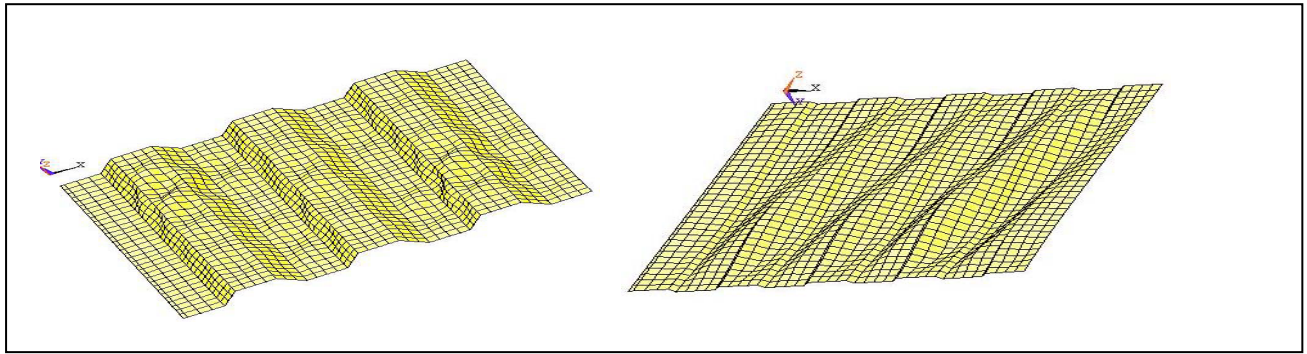
برای بررسی اثر طول قسمت مسطح موج بر ظرفیت برشی نهایی و نوع کماتش حاصل شده، چهار نمونه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مقادیر عمق موج ( $h=2$ )، زاویه موج ( $\alpha=45$ )، ارتفاع مقطع ( $H=100$ ) و ضخامت جان ( $t_w=0.1$ ) در انجام تحلیل ثابت است و عرض قسمت مسطح موج با مقادیر 13cm و 10 و 8 و  $b=5$  تغییر داده شده است. نتایج مطابق با جدول ۲ است. (همه تنش‌ها بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر و همه ابعاد بر حسب سانتیمتر می‌باشد).

در جدول فوق  $T_f$  تنش اسمی گسیختگی حاصل از تحلیل المان محدود،  $T_{crel}$  تنش بحرانی کماتش موضعی است که با توجه به عرض قسمت مسطح موج به دست می‌آید و برابر با متوسط نتایج حاصل از رابطه (۱) با فرض شرایط گیردار و ساده است.  $T_{reg}$  تنش بحرانی در حالت کماتش کلی با فرض رفتار ارتوتروپیک جان و  $T_y$  تنش جاری شدن در برش است که با توجه به معیار وان میسر برابر با  $F_y/\sqrt{3}=3464$  است. با افزایش مقدار  $b$  کماتش موضعی و با کاهش مقدار  $b$  کماتش کلی حاکم می‌شود. جدول (۲) انطباق نسبتاً خوب نتایج حاصل از المان محدود را با روابط تئوری و فرضیهایی که در بخش پیش برای کماتش موضعی و کماتش کلی ارایه شد، نشان می‌دهد. در نمونه‌های که کماتش موضعی حاکم است، نتایج حاصل از تحلیل به مقدار کماتش موضعی نزدیک‌تر است و در نمونه‌های که کماتش ناحیه‌ای و کلی اتفاق می‌افتد، نتایج به مقادیر  $T_{reg}$  نزدیک‌تر است (شکل ۶).

#### ۴-۲ اثر ناشی از تغییرات عمق موج (h)

برای بررسی اثر عمق موج، چهار نمونه مورد توجه قرار گرفته‌اند. مقدار عمق موج با مقادیر ۱/۵ و ۲ و ۳ و ۵ سانتیمتر تغییر داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل، برای بار بحرانی کماتش در جدول ۳ آورده شده است. کماتش برای نمونه  $h_1$  از نوع کماتش کلی و برای سایر نمونه‌ها از نوع کماتش موضعی است. با کم شدن عمق موج، رفتار صفحه جان به صورت یکپارچه‌تر

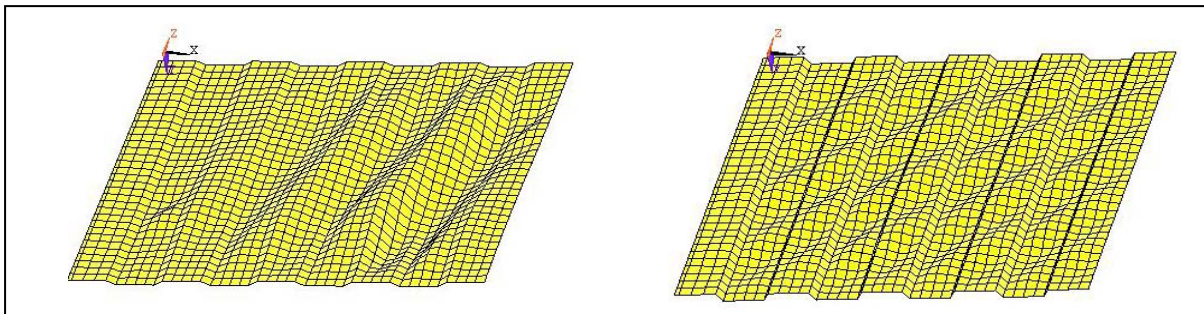




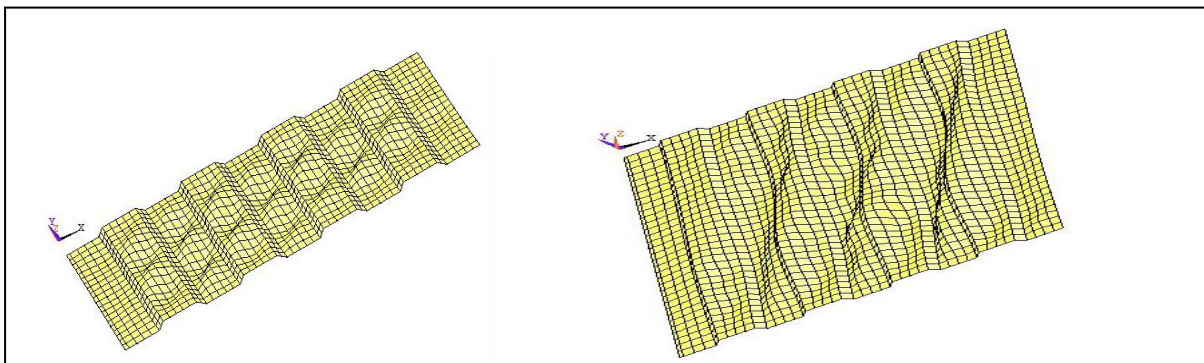
شکل ۷. حالت کماتش یافته نمونه‌های h1, h4

جدول ۴. نتایج حاصل از تحلیل برای تغییرات زاویه موج دوزنقه‌ای

	$\alpha$	Tf	Tcrel	Tcreg	Tf/Tcrel	Tf/Tcreg	Tf/Ty
$\alpha_1$	30	1160	1320	1058	0.88	1.10	0.34
$\alpha_2$	45	1464	1320	1843	1.11	0.79	0.42
$\alpha_3$	60	1565	1320	2553	1.19	0.61	0.45



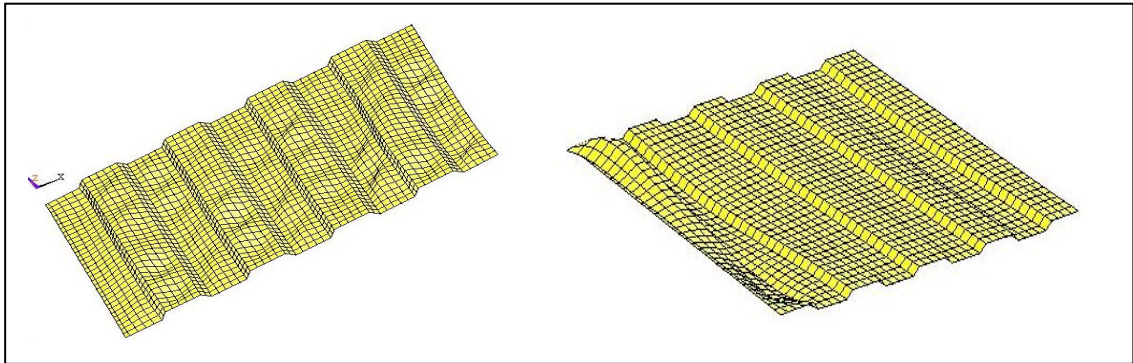
شکل ۸. حالت کماتش یافته نمونه‌های  $\alpha_1, \alpha_3$



شکل ۹. حالت کماتش یافته نمونه‌های H4, H1

جدول ۵. نتایج حاصل از تحلیل برای تغییرات ارتفاع مقطع

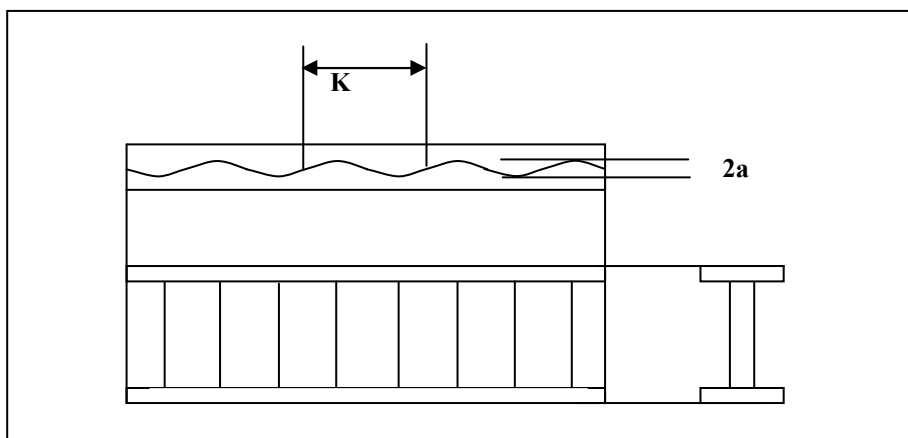
	H	T <sub>f</sub>	T <sub>c</sub> rel	T <sub>c</sub> reg	T <sub>f</sub> /T <sub>c</sub> rel	T <sub>f</sub> /T <sub>c</sub> reg	T <sub>f</sub> /T <sub>y</sub>
H1	60	1360	1337	5120	1.02	0.27	0.235
H2	80	1552	1324	2880	1.17	0.54	0.358
H3	100	1464	1317	1843	1.11	0.79	0.422
H4	120	1368	1313	1280	1.04	1.07	0.47



شکل ۱۰. حالت کمانش یافته نمونه‌های t1, t3

جدول ۶. نتایج حاصل از تحلیل برای تغییرات ضخامت جان

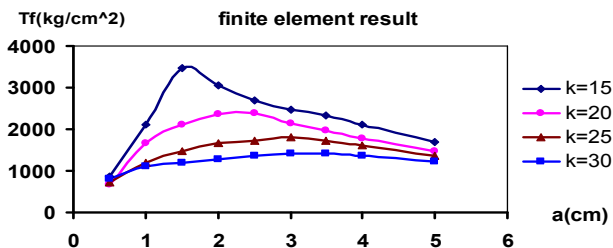
	t	T <sub>f</sub>	T <sub>c</sub> rel	T <sub>c</sub> reg	T <sub>f</sub> /T <sub>c</sub> rel	T <sub>f</sub> /T <sub>c</sub> reg	T <sub>f</sub> /T <sub>y</sub>
t1	.1	1464	1317	1843	1.11	0.79	0.42
t2	.2	2364	5271	2610	0.45	0.91	0.68
t3	.4	1755	$\frac{2108}{4}$	3692	0.08	0.48	0.506



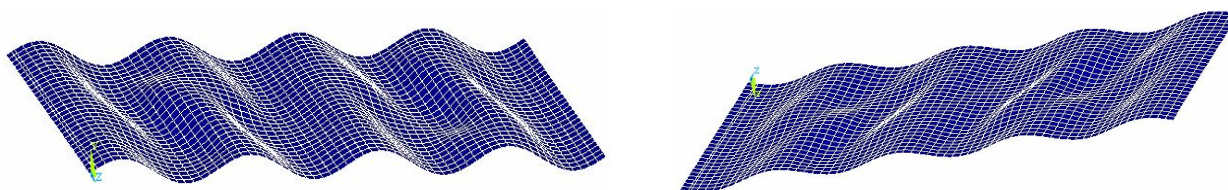
شکل ۱۱. پارامترهای هندسی موج سینوسی

جدول ۷. نتایج حاصل از تحلیل المان محدود (a نصف دامنه و K طول موج بر حسب سانتیمتر است)

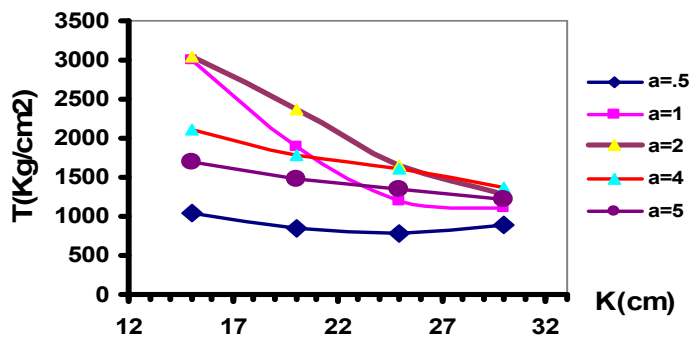
$\tau_f \left( \frac{kg}{cm^2} \right)$	a = 0.5 (cm)	a = 1 (cm)	a = 1.5 (cm)	a = 2 (cm)	a = 2.5 (cm)	a = 3 (cm)	a = 3.5 (cm)	a = 4 (cm)	a = 5 (cm)
K=10(cm)	2730	3464	3464	3464	3350	3250	-	-	-
K=15(cm)	1050	3000	3464	3050	2700	2460	2330	2100	1700
K=20(cm)	840	1900	2120	2360	2400	2150	1980	1780	1480
K=25(cm)	790	1200	1460	1660	1720	1800	1710	1600	1350
K=30(cm)	890	1100	1200	1290	1350	1420	1420	1360	1220



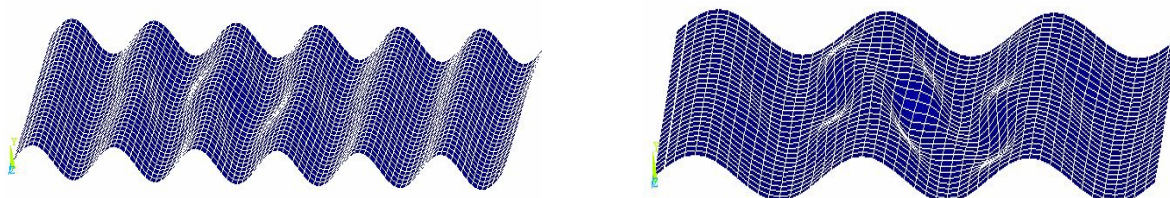
شکل ۱۲. تغییرات تنش برشی بحرانی در مقابل دامنه موج برای طول موج‌های مختلف



شکل ۱۳. شکل کمانشی برای نمونه‌های با نیم دامنه a = 0.5, 3.5 و طول موج برای λ = 25



شکل ۱۴. تغییرات تنش برشی بحرانی در مقابل دامنه موج برای طول موج‌های مختلف



شکل ۱۵. شکل کمانشی برای نمونه‌های با نیم دامنه a=3 و طول موج برای λ = 15,20,25,30

## ۴-۵ اثر تغییرات ضخامت جان

برای بررسی اثر ضخامت جان سه نمونه تحلیل شده است. ضخامت جان با مقادیر  $t = 1, 2, 4$  تغییر داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل در جدول ۶ آورده شده‌اند. با افزایش ضخامت مقطع کمانش از حالت موضعی در قسمت مسطح موج به حالت بسیار موضعی در نزدیک محل اعمال بار یا نزدیک تکیه‌گاه انتقال پیدا می‌کند.

نتایج حاصل از فرمولهای تئوری و نتایج حاصل از تحلیل بجز در نمونه  $t1$  تطابق چندانی ندارد و این بخاطر عدم ظهور کمانش کلی یا موضعی در نمونه  $t2, t3$  است. به طور کلی می‌توان گفت که با افزایش ضخامت جان، بار نهایی قابل تحمل توسط تیر افزایش می‌یابد. اگر باز هم ضخامت جان را افزایش دهیم ممکن است خرابی در سخت کننده‌ها اتفاق افتد (شکل ۱۰).

## ۵-۱ اثرات مربوط به تغییرات دامنه

با دقت در نتایج حاصل از تحلیل المان محدود برای موج‌های سینوسی مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه موج در مقدار طول موج ثابت، مقاومت برشی مقطع ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس روند نزولی از خود نشان می‌دهد. شکل ۱۲ بیانگر تغییرات تنش بحرانی حاصل از تحلیل نسبت به تغییرات دامنه (برای طول موج‌های مختلف با مقادیر  $K=15, 20, 25, 30$  سانتیمتر) است. با افزایش طول موج روند حساسیت تنش بحرانی نسبت به تغییرات مقدار دامنه کاهش می‌یابد. همچنین در طول موج ثابت با افزایش دامنه، مد کمانشی ابتدا به شکل نیمه کلی و سپس به صورت موضعی درفاصله بین دو نقطه اکسترمم موج اتفاق می‌افتد. پس از رخ دادن کمانش موضعی با افزایش بیشتر دامنه، مدکمانشی همچنان به صورت موضعی باقی می‌ماند. شکل ۱۳ بیانگر کمانش درمد کلی برای نمونه‌های با دامنه کوچک‌تر و کمانش موضعی برای دامنه‌های بزرگ‌تر است.

## ۵. برش در جانهای موج دار با پروفیل سینوسی

به منظور انجام مطالعات پارامتریک و بررسی اثر پارامترهای مختلف هندسی بر روی ظرفیت نهایی برش در موجهای سینوسی، از مدل المان محدود قسمت قبل استفاده شده که با نتایج آزمایشگاهی برای موجهای دوزنقه‌ای کالیبره شد. پارامترهای هندسی مؤثر برای پروفیل‌های سینوسی شامل طول موج ( $K$ ) و دامنه ( $a$ ) است. معادله موج به کار رفته از رابطه زیر پیروی می‌کند (شکل ۱۱).

$$y = a \cdot \sin \left( \frac{2 \pi x}{K} \right)$$

ضخامت جان  $t_w = 0.1$  سانتیمتر و ارتفاع مقطع  $h_w = 100$  سانتیمتر فرض شده است و در تمام نمونه‌ها ثابت است. عرض و ضخامت بال  $b_f = 15$  و  $t_f = 15$  سانتیمتر است. دامنه موج از مقدار  $1 \text{ cm}$  تا  $10 \text{ cm}$  تغییر داده شده است که تقریباً کلیه حالات متداول و عملی را از نظر امکان تولید در نظر می‌گیرد. نتایج حاصل از تحلیل المان محدود برای تنش بحرانی برشی در این نمونه‌ها در جدول ۶ آمده است.

## ۵-۲ اثرات مربوط به تغییرات طول موج

اگر تغییرات تنش برشی را در مقابل افزایش طول موج برای دامنه‌های مختلف، مورد بررسی قرار دهیم مشاهده می‌شود که با افزایش طول موج در حالت کمانش موضعی، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. اما اگر کمانش کلی رخ دهد، با افزایش طول موج، تنش بحرانی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد (شکل ۱۴). شکل ۱۵ بیانگر نوع کمانشی برای نمونه‌های با دامنه ثابت است. تأثیر افزایش طول موج در تغییر مد کمانشی بسیار اندک است. به عبارت دیگر تغییر در مد کمانشی، بیشتر به تغییرات دامنه وابسته است و نسبت به تغییرات طول موج حساسیت کمتری از خود نشان می‌دهد. به هر حال واضح است که افزایش طول موج تمایل به تغییر مد کمانشی از حالت کلی به حالت موضعی دارد.

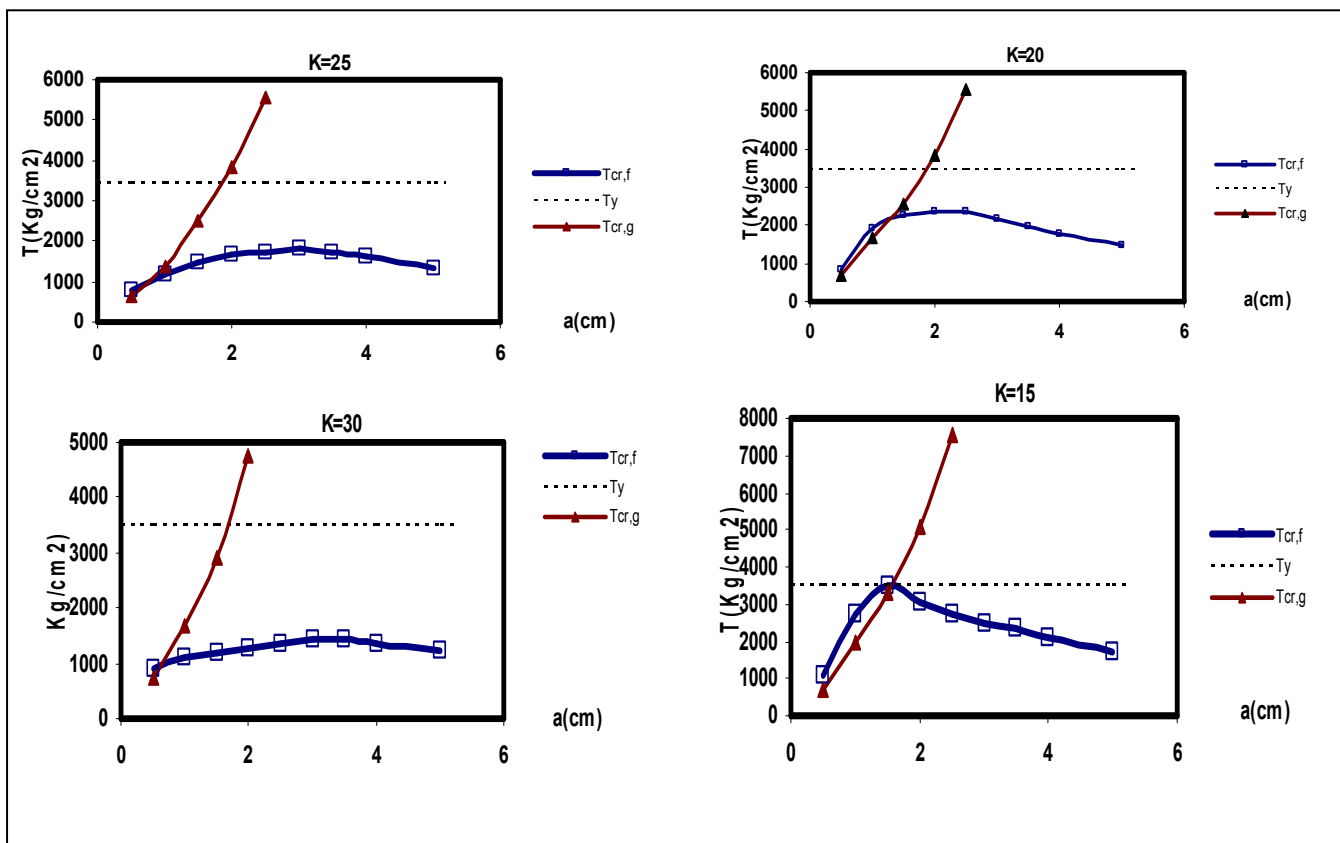
## ۵-۳ حالت مد کمانشی کلی

اگر برای کمانش کلی جان‌های با پروفیل سینوسی فرض رفتار ارتوتروپیک را ملاک عمل قرار دهیم، آنگاه می‌توان از روابط مربوط به صفحات ارتوتروپیک برای موج‌های سینوس هم استفاده کرد. برای این کار داریم [۵]:

$$\tau_{cre} = K_g \frac{(D_y^{.25} D_x^{.75})}{t_w h_w^2} \tag{10}$$

$$D_x = \frac{EI_x}{c} = \frac{E}{K} \int_0^K y^2 t_w ds = \frac{E}{K} \int_0^K a^2 \sin^2 \left( \frac{2\pi x}{K} \right) \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a^2}{K^2} \cos^2 \left( \frac{2\pi x}{K} \right)} dx$$

$$D_y = \frac{c}{s} \left( \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \right) = \frac{K}{\int_0^K \sqrt{1+y'^2} dx} \left( \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \right) = \frac{K}{\int_0^K \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a^2}{K^2} \cos^2 \left( \frac{2\pi x}{K} \right)} dx} \left( \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \right) \tag{11}$$



شکل ۱۶. نتایج حاصل از مدل عددی و نتایج تحلیلی برای کمانش کلی نمونه‌های مورد بررسی (Tcr,f) تنش بحرانی کمانش حاصل از حل عددی، Ty تنش جاری شدن در برش و Tcr,g تنش حاصل از رابطه (۱۰) است

حاصل از رابطه ۱۰ برای همه طول موجها به هم نزدیک هستند. اما با بزرگ‌تر شدن دامنه مقاومت برشی جان ابتدا افزایش می‌یابد تا به مقدار تنش جاری شدن مصالح در برش برسد و پس از آن با افزایش بیشتر دامنه موج به علت تغییر در مد کمانشی، مقاومت برشی مقطع کاهش می‌یابد.

نمودارهای شکل ۱۶ مقادیر حاصل از روابط فوق را با مقادیر حاصل از تحلیل عددی برای موج‌های سینوسی در ابعاد مورد بررسی مقایسه می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای دامنه‌های کم که کمانش جان در مد کلی رخ می‌دهد، مقادیر حاصل از تحلیل و تنش‌های بحرانی

جاری شدن شود و یا به عبارتی کماتش در جان تیر رخ دهد، آنگاه بر پایه مطالعات انجام شده در این تحقیق می توان با انتخاب دامنه موج در محدوده 3 تا 4 سانتیمتر به مقدار حداکثر مقاومت برشی رسید (این مقدار برای ابعاد معمول طول موج از 10 تا 30 سانتیمتر صادق است). اما به هر حال باید توجه کرد برای اطمینان از صحت نتایج حاصل، با توجه به این که تاکنون آزمایشهای محدودی در این رابطه انجام شده اند بایستی آزمایشهای بیشتری برای مقایسه نتایج به دست آمده از تئوری انجام شود. در خصوص موج های دوزنقه ای باید گفت که استفاده از موج های با طول قسمت مسطح و مورب یکسان منجر به دستیابی به بیشینه مقاومت برشی می شود. در این رابطه افزایش بیشتر زاویه موج، باعث افزایش مقاومت برشی می شود (زاویه موج با ملاحظات اجرایی نظیر عرض بال و محدودیت های ساخت نظیر امکان ایجاد خم های مربوطه کنترل می شود در حالی که ضخامت جان با توجه به محدودیت های ناشی از جوش اتصال بال به جان کنترل می شود).

#### ۴-۵ حالت مد کماتشی موضعی

همان طور که اشاره شد با افزایش دامنه و طول موج، مد کماتشی از حالت کماتش کلی به حالت موضعی میل می کند. در حالت کماتش موضعی، کماتش در فاصله ای به نسبت مسطح بین نقاط بیشینه و کمینه موج سینوسی رخ می دهد.

#### ۶. نتیجه گیری

در مجموع، از مقایسه نتایج می توان چنین بیان کرد که در شرایط مشابه، موج های سینوسی نسبت به موج های دوزنقه ای مقاومت برشی بیشتری از خود نشان می دهند. علی رغم این موضوع موج های دوزنقه ای به دلیل سهولت تولید، با استقبال بیشتری روبرو هستند. انتخاب ابعاد بهینه برای پروفیل موج در هر دو حالت دوزنقه ای و سینوسی، بستگی به ضخامت انتخابی برای جان و محدودیت های ساخت موج مربوطه دارد. اما در حالت استفاده از موج های سینوسی، اگر ضخامت جان به اندازه کافی کم باشد به طوری که تنش کماتشی کمتر از تنش

#### ۷. مراجع

1. Johnson, R. P. and Cafolla, J. (1997) "Local flange buckling in plate girders with corrugated webs", in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, vol. 122, No. 2, , pp. 148-156.
2. Huang, L., H.Hikosaka, H. and. Komine, K. (2004) "Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges", in: Computers and Structures.
3. Mo, Y.L., Jeng, C. and Chang, Y.S. (2000) "Torsion behaviors of prestressed concrete box girder bridges with corrugated steel webs". ACI Struct J; 97(6), pp.849-59
4. Elgaaly, M., Seshadri, A. and Hamilton, R.W. (1997) "Bending strength of steel beams with corrugated webs", J. Structural Engineering, ASCE 123 (6), pp.772-782.
5. Elgaaly, M., Hamilton, R.W. and Seshadri, A. (1996) "Shear strength of beams with corrugated webs", J. Struct. Eng. ASCE 122 (4) pp.390-398.
6. Elgaaly, M. and Seshadri, A. (1997) "Girders with corrugated webs under partial compressive edge loading", J. Struct. Eng. ASCE 123 (6) pp.783-791.
7. Elgaaly, M. and Seshadri, A. (1998) "Depicting the behavior of girders with corrugated webs up to failure using non-linear finite element analysis", Journal of Advances in Engineering Software; 29(3-6), pp.195-208.
8. Zhang, W., Li, Y., Zhou, Q. and Qi X. (2000) "Optimization of the structure of an H-beam with either a flat or a corrugated web", Part 3: Development and research on H-beams with wholly corrugated webs. In Journal of Materials Processing Technology; 101(1), pp.119-23.



15. Yamazaki, M. (2001) "Buckling strength of corrugated webs", Journal of Structural Engineering, ASCE, 47 A, pp. 19-26.
16. Abbas, H.H., Sause, R. and Driver, R.G. (2002) "Shear strength and stability of high performance steel corrugated web girders" Proceedings - Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council, pp. 361-387.
17. Gil, H., Lee, S., Lee, H. and Yoon, T. (2004) "Study on elastic buckling strength of corrugated web", Journal of Structural Engineering, ASCE, 24 (1 A), pp. 192-202
18. Sayed-Ahmed, E.Y (2003) "Composite bridges constructed with corrugated steel web box girders; Role of concrete bridges in sustainable development" - Proceedings of the International Symposium - Celebrating Concrete: People and Practice, pp. 43-52
19. Wang, C. S. and Nie, J. G. "State of the art of fatigue tests and fatigue performance of composite girders with corrugated steel webs" Journal of Harbin Institute of Technology, 37 (SUPPL. 2), pp. 222-225
20. گودرزی، محمد علی "تحلیل تنش در تیر ورق‌های عمیق با جان موج‌دار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، تیر ماه ۱۳۸۲، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
9. Timoshenko, S.P., Gere, S. P. (1961) "Theory of elastic stability", 2nd Edition, New York, McGraw Hill.
10. Johnson, RP, Ca.olla J.) 1997. ("Fabrication of steel bridge girders with corrugated webs". Struct Eng;75(8):133-5.
11. Johnson R.P., Cafolla, J. (1997) "Corrugated webs in plate girders for bridges", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings; 122(2), pp. 157-64.
12. Chan ,C. L., Khalid, Y.A, Shahari, B. B. and Hamouola, A. M. S. (2002) ."Finite element analysis of corrugated web beam under bending", Journal of Constructional Steel Research, 58, pp.1319-1406
13. Ibrahim, S.A., El-Dakhkhni, W.W. and Elgaaly, M.(2006) "Fatigue of corrugated-web plate girders: Analytical study", Journal of Structural Engineering" 132 (9), pp. 1381-1392
14. Abbas, H.H., Sause, R. and Driver, R.G. (2006) "Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loads", Journal of Engineering Mechanics, 132 (8), pp. 806-814