# 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: hrajaee@aut.ac.ir

#### چکیدہ:

درطرح 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 تیر ها مورد استفاده قرار می گیرد ذوزنقه ای، زیگزاگ و سینوسی است. این تحقیق با تعبیه یک مدل سه بعدی اجزای محدود ، تحلیل تنش های برشی در همچنین بررسی پارامتریک جهت ارزیابی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف کمانشی ، مورد مطالعه قرار می گیرد انجام شده است. این پارامتریک موج ذوزنقه ای را با ملاحظه مدهای مختلف کمانشی ، مورد مطالعه قرار میدهد. ومچنین بررسی پارامتریک جهت ارزیابی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف در ظرفیت برشی نهایی جان این تیرورقها انجام شده است. این پارامترها برای موجهای ذوزنقه ای عبارتنداز: (1) زاویه موج ذوزنقه ای (۲) طول قسمت مسطح موج (۳) عمق موج (2) ضخامت جان (۵) ارتفاع مقطع. با استفاده از مدل یاد شده مطالعات پارامتریک در برش، برای موج های 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 دان موجدار در حالت وقوع کمانشی کلی جان مورد تأیید قرار میده. بر پایه نتایج عددی حاصل شده، مزایا و معایب جانهای با پروفیل موج سینوسی و ذوزنقه ای در پایان مورد ارزیابی قرار میگیرد.

**واژه های کلیدی**: اجزای محدود، تحلیل غیرخطی، تیرهای با جان موجدار، موج ذوزنقهای، موج سینوسی، روش عددی

#### ۱. مقدمه

حذف سخت کنندههای عرضی می شود 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 می رود (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

\* تاریخ دریافت: ۸۰/۰۰/۱۰ – تاریخ پذیرش: ۸٥/۱۰/۲٤

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 می تواند تا مقدار ۲٦۰ افزایش یابد. این نسبت برای تیرورقهای با جان موجدار بکار گرفته شده در پلها، تا مقدار ۲۰۰ هم استفاده شده است.

#### ۲. مزایا ومعایب

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

- موج دار کردن جان باعث می شود تا کمانش جان به صورت
   موضعی در قسمتهای مسطح موج اتفاق افتد و نتیجتاً افزایش
   در مقاومت نهایی کمانشی جان ایجاد شود.
- موجدار کردن جان باعث کاهش سختی محوری آن می شود که در نتیجه اثر عوامل ایجاد کننده کرنش محوری جان نظیر نیروهای محوری ناشی از خمش، تغییرات دما، خزش و جمع شدگی در جان تیرکم می شود و در نتیجه حساسیت در مقابل کمانش در جان کاهش می یابد و اثرات ناشی از خطاهای ساخت در افزایش تنش های محوری کم رنگ تر می شود.
- برای تیر ورقهای فلزی با جان موجدار، باید ضخامت بال قدری افزایش یابد، زیرا کمانش موضعی در عرضی بیشتر از نصف بال اتفاق میافتد و همچنین جان تیر در مقابل تنشرهای خمشی مقاومتی نمیکند. [1]
- در تیرهای مرکب به دلیل پیش تنیده بودن بالها، جان تحت تنشهای محوری قرارمی گیرد، اما جانهای موجدار به علت عدم سختی محوری و امکان وقوع تغییر شکل در راستای محور جان، تحت تأثیر تنشهای محوری ایجاد شده قرار نمی گیرند. 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 یکنواخت ر است[3].
- کاهش ضخامت جان و حذف سخت کنندهها و هزینههای
   مربوط به جوشکاری آنها باعث کاهش وزن و درنتیجه
   اقتصادیتر شدن تیرهای با جان موج دار می شود. خصوصاً در

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

 اصلی ترین نقص تیر ورقهای با جان موجدار، افزایش هزینه های مربوط به ساخت ورق های موجدار است.
 هر چند با بکارگیری جانهای موجدار، هزینه های مربوط به استفاده از سخت کننده های عرضی و ضخیم تر بودن جان وجود ندارد.

#### ۲–۱ مرور تحقیقات انجام شده

ویژگیهای یاد شده باعث شد تا نحوه عملکرد این تیرها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گیرد. این تحقیقات نخستین باربوسیله گروه تحقیقاتی به نامBTP در فرانسه آغاز گردید و سپس توسط Cheyrezy & Combault در سال ۱۹۹۰ Johnson & (۱۹۹۸) Lebon (۱۹۹٤), په Johnson در نصوص ویژگیهای مختلف این تیر ورقها مطالعات گستردهای 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 وجان موجدار فولادی [19,18,11,10]، بررسی اثرات خستگی در این تیرها (استفاده این 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

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

- با متراکم تر 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 می شود. 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 می شود، در حالی که در مقاومت لهیدگی درمقابل بارهای جانبی بی تأثیر است [6].
- به طور کلی تیرورقهای 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 ازنصف بال
   اتفاق میافتد. مشاهدات انجام شده، زاویه موج را به عنوان
   اصلی ترین 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].

Y-Y تنش های برشی در تیر ورقهای با جان موج دار به طور کلی سه نوع مد کمانشی متفاوت برای تیرورقهای با جان موجدار در مقابل برش وجود دارد. مد کمانش کلی، مد کمانش موضعی و مد کمانش نیمه کلی.

Y-Y-I حالت مد کمانش موضعی برای موجهای ذوزنقهای کمانش موضعی محدود به قسمتهای مسطح یک موج ذوزنقهای است. اگر قسمتهای مسطح یک موج ذوزنقهای 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

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

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

که در آن: b پهنای قسمت مسطح موج (شکل۲) و t ضخامت جان است. Ks ضریب کمانشی است که براساس شرایط تکیهگاهی تعیین می شود.

$$K_{s} = 5.34 + 2.3 \left(\frac{b}{h_{w}}\right) - 3.44 \left(\frac{b}{h_{w}}\right)^{2} + 8.39 \left(\frac{b}{h_{w}}\right)^{3} \quad (\Upsilon)$$

$$K_{S} = 5.34 + 4 \left( \frac{b}{h_{W}} \right) \tag{(7)}$$

$$K_{s} = 8.98 + 5.6 \left(\frac{b}{h_{w}}\right)^{2} \tag{(\varepsilon)}$$

اگر قسمت مسطح موج ذوزنقهای دربالا 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 می شود. رابطه (٤) برای حالتی است که چهارطرف صفحه شرایط تکیه گاه 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 ارایه می دهند و اگر فرض کنیم قسمت مسطح موج ذوزنقه ای به صورت دو طرف گیردار و دو طرف ساده است، نتایج به دست آمده نسبت به نتایج آزمایشگاهی مقادیر کمتری از خود نشان می دهد. مطالعات نشان می دهد مقدار میانگین حالات یاد شده با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد [5].

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

بررسیهای محققین نشان میدهند که اگر عمق موج ذوزنقهای 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

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

$$\tau_{cre} = K_g \frac{\left(D_y^{.25} D_x^{.75}\right)}{t_w h_w^2}$$
(0)

$$D_X = \frac{E \cdot I_X}{C} = \frac{E}{C} \left( 2bt(h/2)^2 + \frac{th^3}{6\sin\theta} \right)$$
(7)

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

C طول افقی موج و S طول واقعی موج می باشد (شکل ۲).  $K_g$  ضریب کمانشی است که به شرایط انته ایی بستگی دارد و مقدار آن برای تکیه گاه ساده برابر با ۳۵ و برای حالت تکیه گاه گیردار برابر ۲۸/٤است. رابطه (۷) با فرض عدم دوران بالها صادق است و  $K_g$  برای تمام تیرها میتواند برابر با ۳۵ در نظر گرفته شود، بجز در حالتی که بالها بتنی باشد که مقدار ۲۸/۶ مناسب است. بعضی محققین این مقدار را برای تیرهای کامپوزیت برابربا است. بعضی محققین این مقدار را برای تیرهای کامپوزیت برابربا کمانش موضعی و چه در حالت کمانش کلی، اگر  $r_{cre}$  از مقدار  $\sqrt{78}$  بیشتر شود، باید از کمانش غیر کشسان در محاسبه تنش بحرانی به شکل زیر استفاده کنیم:

$$\tau_{crei} = \sqrt{0.8\tau_{cre}\tau_y} \tag{(A)}$$
$$\tau_{cre} \succ 0.8\tau_y$$

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 ذوزنقه 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 می شود. پس از تأیید مدل المان محدود، علاوه بر انجام مطالعات پارامتریک برای موجهای ذوزنقهای، 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 می گیرد.

پژوهشنامه حمل و نقل، سال چهارم، شماره اول، بهار۱۳۸۶

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 (شکل۲). بار در انتهای سمت چپ تیر و به صورت متمرکز، بر روی بال بالای تیر اعمال می شود. عرض اعمال بار در تمام تحلیلها برابر با یک سانتیمتر است.

از سخت کننده های قائم در زیر محل اعمال بار و در محل تکیه گاهها استفاده شده است. اتصال بال به جان به صورت پیوسته می باشد 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 کننده های قائم به دلیل عدم تأثیر در فرآیند کمانش برشی جان با حذاقل تعداد المان مدل سازی شده است .

تحلیل غیر خطی استاتیکی با در نظرگرفتن 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  $g_y = 6000 kg/cm^2$  و ضریب پواسون  $E = 2 \sqrt{2}$  و ضریب ارتجاعی مصالح U = 0.3در نظر گرفته شده است. از منحنی الاستیک پلاستیک کامل برای مدل رفتاری مصالح استفاده شده است. تنش های پسماند درنظر 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 می یابد.

۳-۱ بررسی صحت مدل و ارزیابی آن

در سال Elgaaly ۱۹۹۵ و همکارانش[5]، ٤٢ آزمایش بر روی ۲۱ نمونه تیر دو سر ساده (شکل ٤) انجام دادند که از چهار شکل پروفیل ذوزنقهای با ابعاد متفاوت در این تیرها استفاده شده است. پارامترهای تعریف کننده موج ذوزنقهای در شکل ۳ نمایان است.



شکل۳. ب. شکل شماتیک تیرهای آزمایش شده[5]

٤٥

شکل۳. الف. پارامترهای تعریف کننده موج ذوزنقهای



شکل٤. منحنى بار تغيير مکان براى نمونه V121832Aحاصل از تحليل اجزاى محدود

جدول ۱. مقایسه نتایج حاصل از مدل المان محدود با نتایج آزمایشگاهی (ابعاد برحسب سانتیمتر میباشد و پارامترها در شکل ۲ معرفی شدهاند. VfوVe به ترتیب نیروی برشی نهایی تحمل شده توسط تیر در آزمایش و تحلیل میباشند).

شماره نمونه	t (cm)	H (cm)	b (cm)	d (cm)	h (cm)	Ve (kg/cm^2)	Vf (kg/cm^2)	Vf/Ve
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 ۲. حالت کمانش یافته نمونه های 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	T <i>f</i> / Tcrel	Tf/ Tcreg	Tf/ Ty
<b>B1</b>	13	902	785	1876	1.14	0.48	0.26
<b>B2</b>	10	1464	1317	1843	1.11	0.79	0.42
<b>B3</b>	8	1957	2120	1813	0.92	1.07	0.56
<b>B4</b>	5	1875	5220	1750	0.35	1.07	0.54

جدول۳. نتایج حاصل از تحلیل با تغییرات عمق موج

	-							
	h	Tf	Tcrel	Tcre g	T <i>f/</i> Tcrel	Tf/ Tcreg	T <i>f</i> / 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	

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 نتابج 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 ۵ ارایه شده است. حالت کمانش یافته این نمونه در شکل ۵ نمایان است.

# ۸. مطالعه پارامترهای هندسی مؤثر در ظرفیت نهایی مدل (تیرهای با موج ذوزنقهای)

مدل المان محدود به کار رفته همان مدل قبلی است که با نتایج آزمایشگاهی برای موجهای ذوزنقهایی کالیبره وصحت عملکرد آن با نتایج آزمایشگاهی تأیید شد. پارامترهای هندسی مورد بررسی برای موجهای ذوزنقهای عبارتند از: زاویه موج ذوزنقهای، طول قسمت مسطح موج، عمق موج، ضخامت جان و ارتفاع مقطع. پارامتر های مذکور در شکل ۲ نشان داده شده است. عرض و ضخامت بال در تمام نمونهها ثابت و برابر 15 = f d c 21 = T است. پارامترهای هندسی مورد بررسی برای موجهای ذوزنقهای عبارتند از:

زاویه موج ذوزنقهای، طول قسمت مسطح موج، عمق موج، ضخامت جان و ارتفاع مقطع. پارامتر های مذکور در شکل ۳

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

# ۱-٤ اثر تغییرات عرض قسمت مسطح موج ذوزنقه ای (b)

برای بررسی اثر طول قسمت مسطح موج بر ظرفیت برشی نهایی و نوع کمانش حاصل شده، چهار نمونه مورد بررسی قرار گرفتهاند. مقادیر عمق موج (h=2)، زاویه موج = α) (45،ارتفاع مقطع (H=100) و ضخامت جان(0.1 wt) در انجام تحلیل ثابت است و عرض قسمت مسطح موج با مقادیر 13cm و10 و8 و5=ط تغییر داده شده است. نتایج مطابق با جدول۲ است. (همه تنشها بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر و همه ابعاد بر حسب سانتیمتر می باشد).

بر جدول فوق TT تنش اسمی گسیختگی حاصل از تحلیل المان در جدول فوق TT تنش اسمی گسیختگی حاصل از تحلیل المان محدود، Tcrel تنش بحرانی کمانش موضعی است که با توجه به عرض قسمت مسطح موج به دست می آید و برابر با متوسط نتایج حاصل از رابطه (۱) با فرض شرایط گیردار و ساده است. Tcreg تنش بحرانی در حالت کمانش کلی با فرض رفتار ارتوتروپیک جان و Ty تنش جاری شدن در برش است که با توجه به معیار وان میسز برابربا Fy/3=3464 است. با افزایش مقدار d کمانش موضعی و با کاهش مقدارd کمانش با افزایش مقدار d کمانش موضعی و با کاهش مقدار d کمانش با از المان محدود را با روابط تئوری و فرضهایی که در بخش پیش در نمونههای که کمانش موضعی حاکم است، نتایج حاصل از المان محدود را با روابط تئوری و فرضهایی که در بخش پیش برای کمانش موضعی و کمانش کلی ارایه شد، نشان میدهد. تحلیل به مقدار کمانش موضعی نزدیکتر است و در نمونههای که کمانش ناحیهای و کلی اتفاق می افتد، نتایج به مقادیر Tcreg کری که دمانش ناحیه ای و کلی اتفاق می افتد، نتایج به مقادیر در نمونه های

#### (h) اثر ناشی از تغییرات عمق موج (h)

برای بررسی اثر عمق موج، چهار نمونه مورد توجه قرار گرفتهاند. مقدار عمق موج با مقادیر ۱/۵و ۲و ۳و ۵ سانتیمتر تغییر داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل، برای بار بحرانی کمانش در جدول ۳ آورده شده است .کمانش برای نمونه h1 ازنوع کمانش کلی و برای سایر نمونه ها از نوع کمانش موضعی است. با کم شدن عمق موج، رفتار صفحه جان به صورت یکپارچهتر

پژوهشنامه حمل و نقل، سال چهارم، شماره اول، بهار ۱۳۸٦

است و انتظار میرود که کمانش کلی در سرتاسر ارتفاع جان رخ دهد. در حالی که با افزایش عمق موج، کمانش به صورت موضعی و در قسمت مسطح موجهای ذوزنقه ای اتفاق می افتد. وقتی کمانش موضعی رخ دهد، افزایش عمق موج به دلیل تأثیر ناچیز بر شرایط قسمت مسطح موج تأثیر چندانی بر بار بحرانی کمانش ندارد. این موضوع برای نمونه های h2 و h3 و h4 صادق است، اما در نمونه h1 به دلیل عمق کم موج، کمانش در مد کلی اتفاق افتاده و بنابراین بار بحرانی کاهش قابل ملاحظه ای از خود نشان می دهد. به طور کلی می توان گفت که در یک مد مشخص، نشان می دهد. به طور کلی می توان گفت که در یک مد مشخص، عمق موج تأثیر چندانی بر مقدار نهایی بار گسیختگی ندارد (شکل۷).

#### ٤–٣ اثرات ناشي از تغيير زاويه موج

برای بررسی اثر زاویه موج ذوزنقهای بر بار بحرانی کمانش سه نمونه بررسی شده است . سایر مقادیر ثابت نگه داشته شدهاند. زاویه موج با مقادیر 60 و 45 و 30=α تغییر کرده است . نتایج حاصل مطابق جدول ٤ است. با افزایش زاویه موج مقدار بار بحرانی کمانش تحت نیروهای برشی افزایش مییابد. اگر زاویه موج کوچک باشد ،کمانش از نوع کلی است و با زیاد شدن زاویه موج، کمانش از نوع موضعی میشود. پس از وقوع کمانش 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)

#### ٤-٤ 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 60 = H سانتیمتر تغییر داده شده است. سه نمونه اول در اثر کمانش موضعی و نمونه چهارم در اثر کمانش 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. نمونه های H1 و 2H و KH که در اثر کمانش موضعی گسیخته شدهاند، با نتایج حاصل از تئوری کاملا منطبق هستند. افزایش ارتفاع مقطع باعث تغییر مد کمانش از حالت موضعی به حالت کلی میشود (شکل ۹).



شکل۷. حالت کمانش یافته نمونه های h1,h4

	α	Tf	Tcrel	Tcre g	Tf/ Tcrel	Tf/ Tcreg	Т <i>f</i> / Ту
α1	30	1160	1320	1058	0.88	1.10	0.34
α2	45	1464	1320	1843	1.11	0.79	0.42
α3	60	1565	1320	2553	1.19	0.61	0.45

جدول ٤. نتایج حاصل از تحلیل برای تغییرات زاویه موج ذوزنقهای



شکل۸. حالتکمانش یافته نمونه های α1, α3



شكل ۹. حالت كمانش يافته نمونه هاى H4 , H1

گودرزیخویگانی و رجایی

	Н	Tf	Tcrel	Tcre g	Tf/ Tcrel	Tf/ Tcreg	T <i>f/</i> Ty
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

جدول ٥. نتایج حاصل از تحلیل برای تغییرات ارتفاع مقطع



شكل ۱۰. حالت كمانش يافته نمونه هاى t3 , t1

ضخامت جان	برای تغییرات	حاصل از تحليل	جدول٦. نتايج
-----------	--------------	---------------	--------------

	t	Tf	Tcrel	Tcreg	Tf/ Tcrel	Tf/ Tcreg	Т <i>f</i> / Ту
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	2108 4	3692	0.08	0.48	0.506



شکل۱۱. پارامترهای هندسی موج سینوسی

پژوهشنامه حمل و نقل، سال چهارم، شماره اول، بهار۱۳۸۶

$ au_f\left(rac{kg}{cm^2} ight)$	$\begin{array}{l} a = 0.5 \\ (cm) \end{array}$	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

جدول۷. نتایج حاصل از تحلیل المان محدود (a نصف دامنه و K طول موج بر حسب سانتیمتر است)



شکل۱۲. تغییرات تنش برشی بحرانی در مقابل دامنه موج برای طول موجهای مختلف



 $\lambda=25$  شکل ۲۵. شکل کمانشی برای نمونههای با نیم دامنه  $a=0.5,\,3.5$  و طول موج برای



شکل ۱٤ تغییرات تنش برشی بحرانی در مقابل دامنه موج برای طول موجهای مختلف



 $\lambda = 15,20,25,30$  شکل ۱۵. شکل کمانشی برای نمونه های با نیم دامنه a=3 و طول موج برای 15,20,25,30

#### ٤-٥ اثر تغييرات ضخامت جان

برای بررسی اثر ضخامت جان سه نمونه تحلیل شده است. ضخامت جان با مقادیرt =1,2,4 تغییر داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل در جدول ٦ 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 می کند.

نتایج حاصل از فرمولهای تئوری و نتایج حاصل از تحلیل بجز در نمونه 11 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. 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 ذوزنقهای کالیبره شد. پارامترهای هندسی مؤثر برای پروفیلهای سینوسی شامل طول موج (K) و دامنه ( ۲۵) 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 ضخامت جان  $h_w = 0.1$  سانتیمتر و ارتفاع مقطع  $h_w = 100$   $t_f = 15$  سانتیمتر فرض شده است و در تمام نمونهها ثابت است. عرض و ضخامت بال  $15 = {}_f d_e = 15$ سانتیمتر است. دامنه موج از مقدار 1cm تا 20 تغییرداده شده است که تقریباً کلیه حالات متداول و عملی را از نظر امکان تولید در نظر می گیرد . نتایج حاصل از تحلیل المان محدود برای تنش بحرانی برشی در این نمونهها در جدول ۲ آمده است.

#### 0–۱ 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 میافتد. پس از رخ دادن کمانش موضعی با افزایش بیشتر دامنه، میافتد. پس از رخ دادن کمانش موضعی باقی میماند. شکل ۳ میانگر کمانش درمد کلی برای نمونههای با دامنه کوچکتر و بیانگر کمانش موضعی برای دامنه کای برای نمونهای با دامنه کوچکتر و

#### ٥-٢ اثرات مربوط به تغييرات طول موج

اگر تغییرات تنش برشی را در مقابل افزایش طول موج برای دامنههای مختلف، مورد بررسی قرار دهیم مشاهده می شود که با افزایش طول موج در حالت کمانش موضعی، مقاومت برشی کاهش می یابد. اما اگر کمانش کلی رخ دهد، با افزایش طول موج، تنش بحرانی ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد (شکل ۱۶). 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 می دهد. به هر حال واضح است که افزایش طول موج تمایل به تغییر مد کمانشی از حالت کلی به حالت موضعی دارد.

#### ٥-٣ حالت مد كمانشي كلي

اگر برای کمانش کلی جان های 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[٥]:

\* تاریخ دریافت: ۸۰/۰۰/۱۰ – تاریخ پذیرش: ۸۰/۱۰/۲٤

٥٢

Archive of SID

تحلیل تنشهای برش در جان تیر ورقهای با جان عمیق موجدار

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

$$D_x = \frac{EI_x}{c} = \frac{E}{K} \int_{0}^{K} y^2 t_w ds = \frac{E}{K} \int_{0}^{K} a^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi x}{K}\right) \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a^2}{K^2} \cos^2 \left(\frac{2\pi x}{K}\right)} dx$$

$$D_y = \frac{c}{s} \left(\frac{Et_w^3}{12(1-v^2)}\right) = \frac{K}{\int_{0}^{K} \sqrt{1 + y'^2} dx} \left(\frac{Et_w^3}{12(1-v^2)}\right) = \frac{K}{\int_{0}^{K} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a^2}{K^2} \cos^2 \left(\frac{2\pi x}{K}\right)} dx$$
(11)



شکل۱۲. 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)

٥٣

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.

پژوهشنامه حمل و نقل، سال چهارم، شماره اول، بهار ۱۳۸٦

نمودارهای شکل ۱٦ مقادیر حاصل از روابط فوق را با مقادیر حاصل از تحلیل عددی برای موج های سینوسی در ابعاد مورد بررسی مقایسه میکند. همان گونه که مشاهده میشود برای دامنههای کم که کمانش جان در مد کلی رخ میدهد، مقادیرحاصل از تحلیل و تنشهای بحرانی

#### ۵-۶ حالت مد کمانشی موضعی

همان طور که اشاره شد با افزایش دامنه و طول موج، مد کمانـشی از حالت کمانش کلی به حالـت موضـعی میـل مـیکنـد.در حالـت کمانش موضعی، کمانش در فاصله ای به نسبت مسطح بـین نقـاط بیشینه و کمینه موج سینوسی رخ میدهد.

#### ٦. نتيجهگيرى

در مجموع، از مقایسه نتایج میتوان چنین بیان کرد که در شرایط مشابه، موج های سینوسی نسبت به موجهای ذوزنقهای مقاومت برشی بیشتری از خود نشان میدهند.

علی رغم این موضوع موجهای ذوزنقهای به دلیل سهولت تولید، با استقبال بیشتری روبهرو هستند. انتخاب ابعاد بهینه برای پروفیل موج در هر دو حالت ذوزنقهای و سینوسی، بستگی به ضخامت انتخابی برای جان و محدودیتهای ساخت موج مربوطه دارد . اما در حالت استفاده از موجهای سینوسی، اگر ضخامت جان به اندازه کافی کم باشد به طوری که تنش کمانشی 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
- 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

جاری شدن شود و یا به عبارتی کمانش در جان تیر رخ دهد، آنگاه بر پایه مطالعات انجام شده در این تحقیق می توان با انتخاب دامنه موج درمحدوده 3 تا 4 سانتيمتربه مقدارحداكثر مقاومت برشی رسید (این مقدار برای ابعاد معمول طول موج از 10 تا 30 سانتيمتر صادق است). اما به هر حال بايد توجه كرد براي اطمينان از صحت نتايج حاصل، با توجه به اين كه تاكنون آزمایشهای محدودی در این رابطه انجام شدهاند بایستی آزمایشهای بیشتری برای مقایسه نتایج به دست آمده از تئوری انجام شود. درخصوص موجهای ذوزنقهای باید گفت که استفاده از موجهای 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 میشود (زاویه موج با ملاحظات اجرایی نظیر عرض بال و محدوديتهاي ساخت نظير امكان ايجاد خمهاي مربوطه كنترل می شود در حالی که ضخامت جان با توجه به محدودیت های ناشى از جوش اتصال بال به جان كنترل مى شود).

corrugated webs", J. Struct. Eng. ASCE 122 (4) pp.390–398.

- 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 nonlinear finite element analysis", Journal of Advances in Engineering Software; 29(3–6), pp.195–208.
- 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.

پژوهشنامه حمل و نقل، سال چهارم، شماره اول، بهار ۱۳۸٦

- Yamazaki, M. (2001) "Buckling strength of corrugated webs", Journal of Structural Engineering, ASCE, 47 A, pp. 19-26.
- 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
- 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

 ۲۰. گودرزی ، محمد علی "تحلیل تنش در تیر ورق های عمیق با جان موجدار" ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانـشکده 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.
- Johnson, RP, Ca.olla J.) 1997.( "Fabrication of steel bridge girders with corrugated webs". Struct Eng;75(8):133–5.
- 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.
- 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-Dakhakhni, W.W. and Elgaaly, M.(2006) "Fatigue of corrugatedweb 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