

تحلیل غیر خطی تیر ورقهای عمیق با جان موج دار سینوسی

محمد علی گودرزی خویگانیⁱ محمود یحیاییⁱⁱ

چکیده:

در دهه اخیر استفاده از جان موج دار برای تیرهای عمیق، به دلیل افزایش سختی خارج صفحه و مقاومت کمانشی آن بدون استفاده از سخت کننده‌های قائم، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. خصوصاً تیرهای کامپوزیت با جان فلزی موج دار و بالهای بتنی پیش تنیده اخیراً در پلها به کار گرفته شده است. شکل پروفیل‌های مختلفی که معمولاً برای این تیرها مورد استفاده قرار می‌گیرد، ذوزنقه‌ای، زیگ زاگ و یا سینوسی می‌باشد. این مقاله با تشکیل یک مدل سه بعدی اجزاء محدود، تحلیل تنش‌های برشی در جان تیر ورقهای فولادی با جان سینوسی را با ملاحظه مدهای مختلف کمانشی، مورد توجه قرار می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی، فرض رفتار ارتوتروپیک برای صفحه جان تیر ورق را در حالت کمانش کلی مورد تایید قرار می‌دهد. همچنین با استفاده از نتایج عددی و با تعریف عرض موثر برای کمانش موضعی موج‌های سینوسی، رابطه موجود برای کمانش موضعی ورقهای مسطح، در تیرهای با موج سینوسی اصلاح شده است. این عرض موثر با بکارگیری ضریبی که به ابعاد هندسی موج سینوسی بستگی دارد، در فاصله خطی بین نقاط ماکزیمم و مینیمم موج حاصل می‌گردد. همچنین نتایج عددی مقدار دامنه بهینه موج سینوسی را برای حصول ماکزیمم مقاومت برشی جان تیر در ابعاد متعارف طول موج بدست می‌دهد.

کلمات کلیدی:

اجزاء محدود، تحلیل غیر خطی، تیرهای با جان موج دار، موج‌های سینوسی، روش عددی

Nonlinear Analysis of Plate Girders with Corrugated Web

Mohammad Ali Goodarzi and Mahmood Yahyai

ABSTRACT

The use of plate girders with corrugated sine wave web have been vastly increased due to more buckling strength and out of plane stiffness. Composite girders with corrugated web and pre-stress concrete flange have been recently used in bridges. Trapezoidal, zigzag and sine shapes are the plate forms that are used in this type of girders. In this paper a three dimensional finite element model with special concentration on buckling modes is considered to carry out analysis of girder and obtain shear stress having sine form corrugated plates. The results obtained from nonlinear analysis showed that the orthotropic behavior of web for global buckling is a true assumption. The available equation for global buckling of flat plates has been modified by defining an effective width for buckling of sine waves which is obtained by introducing a factor in linear distance between maximum and minimum points of wave, depending upon geometrical dimensions of sine waves. For a typical wave length, optimum amplitude of sine wave can also be determined from this analysis for maximum shear strength of the web.

KEY WORDS: Corrugated web, Plate girders, Nonlinear analysis, Buckling

ⁱ دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی magoodarzi@alborz.kntu.ac.ir

ⁱⁱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی yahyai@kntu.ac.ir

تحت تنش های محوری قرار می‌گیرد. اما جانهای موج دار به خاطر عدم سختی محوری و امکان وقوع تغییر شکل در راستای محور جان، تحت تاثیر تنش‌های محوری ایجاد شده قرار نمی‌گیرند. این ویژگی به خاصیت آکاردیونی جان معروف است [۲].

— تغییر شکل برشی تیرورقهای با جان موج دار در اثر تنش‌های برشی، اندکی بیشتر از تیرهای با جان مسطح است، اما این افزایش خیز، در مقایسه با تغییر شکلهای ناشی از خمش قابل صرف نظر است [۴].

— در خصوص تیرهای قوطی شکل که جان آنها از ورقهای فلزی موج دار ساخته شده است، مقاومت در مقابل تنش‌های برشی ناشی از اثرات پیچشی بارهای خارجی، افزایش می‌یابد. همچنین توزیع تنش در این تیرها یکنواخت تر است [۲].

— کاهش ضخامت جان و همچنین حذف سخت کننده‌ها و هزینه‌های مربوط به جوشکاری آنها باعث کاهش وزن و در نتیجه اقتصادی تر شدن تیرهای با جان موج دار می‌شود. به خصوص در تیرهای بتنی، به دلیل جایگزینی جان بتنی با یک ورق فولادی سبک کاهش قابل توجهی در وزن تیر حاصل می‌گردد.

— مهمترین ضعف در ایده استفاده از جان موج دار، افزایش هزینه‌های ساخت ورق‌های موج دار است. هر چند که با استفاده از جانهای موج دار، هزینه‌های مربوط به استفاده از سخت کننده‌های عرضی وجود ندارد.

۲-۱- مرور تحقیقات انجام شده

برخی از ویژگی‌های یاد شده که موثرتر بودن عملکرد این تیرها را در مقابل این تیرورقهای معمولی نشان می‌داد، باعث شد تا نحوه عملکرد این تیرها توسط محققان زیادی مورد مطالعه قرار گیرد. این تحقیقات اولین بار بوسیله تیم تحقیقاتی به نام BTP در فرانسه آغاز شد و سپس Cheyreyzy (۱۹۹۰)، Yoda (۱۹۹۳)، Lebon (۱۹۹۸)، Johnson و cafolla (۱۹۹۷)، Metwally و Loov (۱۹۹۸) در خصوص ویژگی‌های مختلف این تیر ورقها به بررسی پرداختند. گزارش به نسبت جامعی از ظرفیت باربری این تیرها در سال ۱۹۹۷ و به وسیله Elgaaly منتشر شده است. Zhang & Li نیز در سال ۲۰۰۰ در مورد تیرهای با جان موج دار کامل به تحقیق پرداختند. خلاصه نتایج حاصل از این تحقیقات به شرح ذیل است.

— در تیرهای با جان موج دار، هیچ اندرکنشی بین برش و خمش وجود ندارد و در نتیجه ظرفیت خمشی این تیرها برابر با ممان پلاستیک بال است [۴].

— با متراکم‌تر شدن موج، کمانش در مد کلی اتفاق می‌افتد ولی در موجهای بازتر، کمانش به صورت موضعی در قسمتهای

جان تیر ورقهای I شکل معمولی با جان مسطح، تحت اثر بارهای وارده می‌تواند در معرض کمانش قرار گیرد. برای جلوگیری از کمانش جان، می‌توان ضخامت جان را زیاد کرد و یا از سخت کننده‌های عرضی و طولی استفاده کرد. یک روش اقتصادی برای جلوگیری از کمانش جان، موج دار کردن آن است. این روش با افزایش سختی خارج صفحه ورق جان، باعث حذف سخت کننده‌های عرضی می‌شود. علاوه بر این، امکان استفاده از جان نازکتر نیز مهیا می‌گردد.

ایده استفاده از تیرهای فولادی با جان موج دار، اولین بار در ساختمان‌های 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 [۱۰ و ۱۱].

استفاده از تیرهای با جان موج دار در پلها تا نسبت ارتفاع به ضخامت ۴۰۰ هم به کار گرفته شده است. تیر ورقهای فلزی، متشکل از جان موج دار و بالهای فلزی، بیشتر در ساختمانها مورد استفاده قرار می‌گیرد و تیر ورقهای مرکب متشکل از جان موج دار و بالهای بتنی پیش تنیده بیشتر در پلها به کار می‌رود.

۱-۱- ویژگی های استفاده از جان موج دار

در مجموع ویژگیهای استفاده از جانهای موج دار در ساخت تیر ورقهای فلزی عمیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد.

— کاهش ضخامت جان، به همراه حذف سخت کننده‌های عرضی، منجر به استفاده از مصالح کمتر می‌گردد.

— موج دار کردن جان باعث می‌شود تا کمانش به صورت موضعی در قسمتهای مسطح موج اتفاق افتد و در نتیجه افزایش در تنش بحرانی کمانش جان بوجود آید.

— موج دار کردن جان باعث کاهش سختی محوری آن می‌گردد و در نتیجه نیروهای محوری ناشی از خمش، تغییرات دما، خزش و جمع شدگی در جان تیر کاهش می‌یابد. بنابراین جان فقط برای تحمل نیروهای برشی طراحی می‌شود و هیچ اندرکنشی بین بال و جان اتفاق نمی‌افتد.

— موج دار کردن جان باعث کاهش حساسیت در مقابل کمانش در جان می‌گردد که باعث کاهش اثرات ناشی از خطاهای ساخت در افزایش تنشهای محوری می‌شود.

— برای تیر ورقهای فلزی با جان موج دار، ضخامت بال باید مقداری افزایش یابد. زیرا کمانش موضعی در عرضی بیشتر از نصف بال اتفاق می‌افتد و همچنین جان تیر در مقابل تنش های خمشی مقاومتری از خود نشان نمی‌دهد [۱].

— در تیرهای کامپوزیت به دلیل پیش تنیده بودن بالها، جان

مسطح موج اتفاق می‌افتد [۵].

– تحت بارهای جانبی وارد شده به بال، دو سازوکار لهیدگی برای جان وجود دارد. یا اینکه بال به سمت جان کمانه کرده و بدون در نظر گرفتن جان تا حد جاری شدن بال پیش می‌رود و یا اینکه جان در محل زیر بار در اثر خمش بال در جهت قائم جاری می‌گردد. در هر دو سازوکار، مقدار بار نهایی به نقطه اثر بار و پارامترهای موج جان بستگی دارد [۶].

– به طور کلی تیرورقهای دارای شکل پروفیل نوزنقه‌ای با زاویه موج بیشتر و جان و بال ضخیم‌تر، مقاومت نهایی بیشتری در لهیدگی و برش از خود نشان می‌دهند [۷].

– کمانش موضعی بال تحت فشار در عرضی بیشتر از نصف بال اتفاق می‌افتد. مشاهدات، زاویه موج را به عنوان اصلی‌ترین پارامتر در تعیین عرض موثر بال معرفی می‌کند [۸].

– بررسی اثر پارامترهای موج سینوسی بر روی مقاومت نهایی تیرهای با جان تماماً موج دار، بیانگر افزایش ۱/۵ تا ۲ برابر در مقاومت کمانشی این تیرها است [۸].

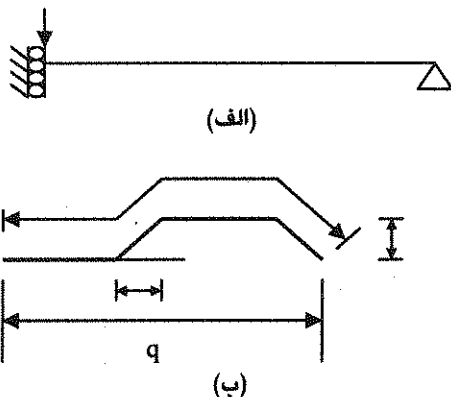
تحقیقات مزبور بیشتر در خصوص موجهای دارای پروفیل نوزنقه‌ای شکل انجام شده است.

این تحقیق علاوه بر تحلیل و بررسی عددی ظرفیت برشی تیر ورقهای با موج سینوسی، سعی دارد تا با مطالعات پارامتریک، اثر پارامترهای گوناگون موج را در تغییر مد کمانشی و میزان مقاومت نهایی در تحمل تنش‌های برشی برای جان موجدار از نوع سینوسی تعیین نماید.

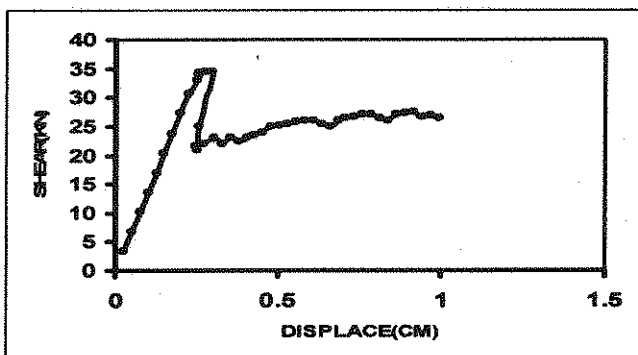
۲- هندسه مدل و شرایط مرزی

در ادامه، با استفاده از تحلیل غیر خطی به روش اجزای محدود، به بررسی اثر پارامترهای هندسی موثر بر بار برشی بحرانی کمانش برای تیرهای با جان موج دار سینوسی پرداخته می‌شود. برای این کار پس از معرفی هندسه مدل اجزای محدود، نمونه‌های آزمایش شده توسط Elgaaly [۵] بوسیله مدل مذکور تحلیل شده و صحت عملکرد آن بر پایه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها تأیید می‌گردد. پس از تأیید مدل اجزای محدود موج‌های سینوسی به وسیله این مدل تحلیل شده و اثر طول موج و دامنه موج بر مقاومت نهایی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از یک مدل اجزای محدود برای مدل سازی نصف تیرهای مورد بررسی استفاده شده که شرایط مرزی آن نظیر شکل ۱- الف است. 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 گاه استفاده شده است. اتصال بال به جان به

صورت پیوسته می‌باشد و از مدل کردن جوش بال به جان صرف‌نظر شده است. تعداد اجزای در ارتفاع جان ۳۰ عدد در نظر گرفته شده است (زیادتر کردن تعداد اجزا در ارتفاع جان در عمل تاثیر محسوسی بر باربری نهایی تیرها ندارد). بال‌ها و سخت کننده‌های قائم به دلیل عدم تاثیر در فرایند کمانش برشی جان با حداقل تعداد اجزای مدل سازی شده 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 اجزای SHELL93 که در کتابخانه نرم افزار موجود است برای مدل سازی بال و جان و سخت کننده‌ها استفاده شده است. این جزء نه گره‌ای، خاصیت پلاستیک شدن را دارد. 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.



شکل (۱): مدل شماتیک تیرهای مورد بررسی و پارامترهای هندسی موج نوزنقه‌ای



شکل (۲): منحنی بار تغییر مکان برای نمونه V121832A حاصل از تحلیل اجزای محدود

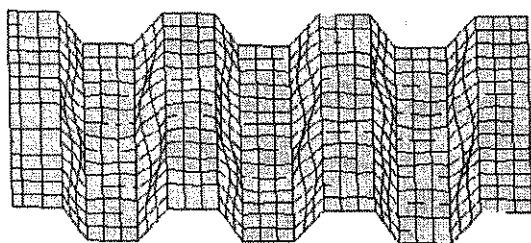
شماره نمونه	t (cm)	H (cm)	b (cm)	d (cm)	h (cm)	Ve (KN)	Vf (KN)	Vf/Ve
121216A	.063	30.48	3.81	2.54	2.54	50.06	57.5	1.14
121216B	.077	30.48	3.81	2.54	2.54	85.12	87.67	1.03
121832A	.063	45.72	4.98	2.64	5.08	34.49	36.8	1.07
121832B	.063	45.72	4.19	2.34	3.33	61.86	67.5	1.09
181821B	.077	45.72	4.19	2.34	3.33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

جدول (۱): مقایسه نتایج حاصل از مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی (ابعاد بر حسب سانتیمتر است).

$h_w = 100$ سانتیمتر فرض شده و در تمام نمونه‌ها ثابت است. عرض و ضخامت بال به ترتیب ۱۵ و ۱/۵ سانتیمتر است. دامنه موج از مقدار 1cm تا 10cm تغییر داده شده است که تقریباً کلیه حالات متداول و عملی از نظر امکان تولید و ساخت موج را در نظر می‌گیرد. نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود برای تنش بحرانی برشی بر حسب کیلو گرم بر سانتیمتر مربع در جدول (۲) آمده است.



Failure Mode of V121832A



شکل (۳): شکل کمانش یافته برای نمونه آزمایشگاهی V121832A [۵] در مقایسه با شکل کمانشی تحلیلی

۳- ارزیابی صحت عملکرد مدل

در سال ۱۹۹۶ Elgaaly و همکاران، بر روی ۲۱ نمونه تیر دو سر ساده انجام دادند که از چهار شکل پروفیل موج نوزنقه‌ای متفاوت در این تیرها استفاده شده است [۵].

برای بررسی صحت عملکرد مدل، شش نمونه از تیرهای آزمایش شده در ابعاد کاملاً متفاوت انتخاب و بوسیله مدل مذکور تحلیل شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی در جدول (۱) آورده شده است. H ارتفاع جان تیر و t ضخامت جان است و سایر پارامترها در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. متغیرهای V_f و V_e به ترتیب نیروی برشی نهایی تحمل شده توسط تیر در آزمایش و تحلیل اجزای محدود می‌باشند. 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. منحنی بار تغییر مکان برای نمونه مورد بررسی در شکل (۲) ارائه شده است. خرابی حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی از نظر نوع مد کمانشی همان خرابی حاصل از آزمایشها است (شکل ۳).

۴- برش در جان دار با پروفیل سینوسی

به منظور انجام مطالعات پارامتریک برای موج های دارای پروفیل سینوسی، از مدل اجزای محدود به کار رفته در قسمت قبل استفاده شده است که با نتایج آزمایشگاهی برای موجهای نوزنقه‌ای کالیبره شد و صحت عملکرد آن بر پایه نتایج آزمایشگاهی تایید شد. پارامترهای هندسی موثر برای پروفیل سینوسی شکل عبارتند از طول موج (K) و دامنه (2a). معادله موج به کار رفته از رابطه ذیل پیروی می‌کند.

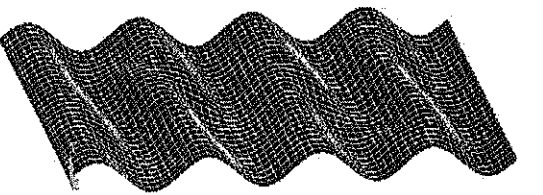
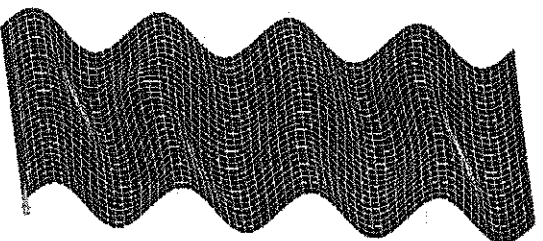
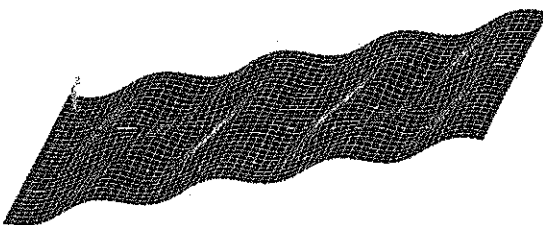
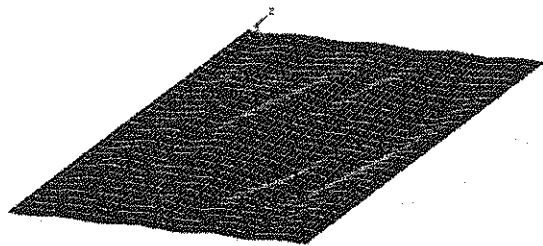
$$y = a \sin\left(\frac{2\pi x}{K}\right) \quad (1)$$

ضخامت جان $t_w = 0.1$ سانتیمتر و ارتفاع مقطع

$\tau_f \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$	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

جدول (۲): نتایج تنش برشی بحرانی حاصل از تحلیل برای طول موج و دامنه های متفاوت (a نیم دامنه و K طول موج است)

ع-۱- اثرات مربوط به تغییرات دامنه



شکل (۵): شکل کمانش یافته جان برای نمونه های با طول موج ثابت K=25

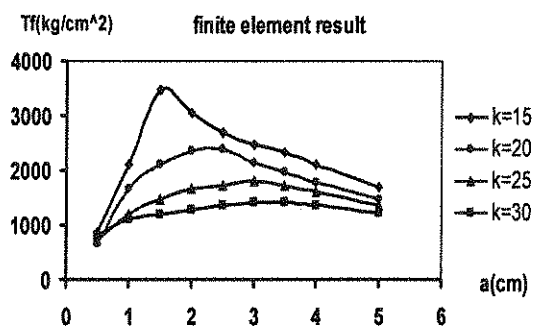
ع-۲- اثرات مربوط به تغییرات طول موج

اگر تغییرات تنش برشی نهایی را در مقابل افزایش طول موج برای دامنه های مختلف، بیان شود مشاهده می شود که با افزایش طول موج، مقاومت برشی کاهش می یابد. این موضوع

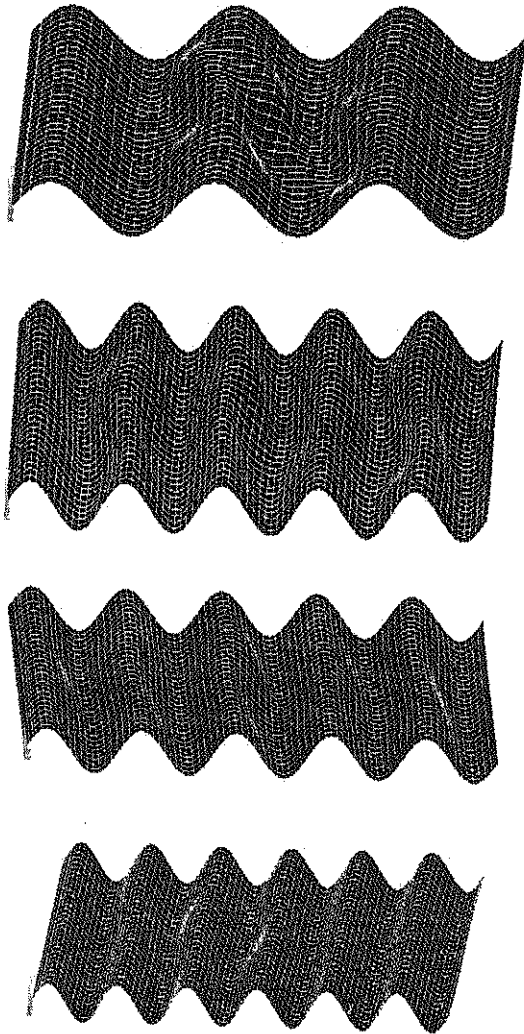
شکل (۴) بیانگر تغییرات تنش بحرانی حاصل از تحلیل اجزای محدود نسبت به تغییرات دامنه است (K=۱۵،۲۰،۲۵،۳۰). با دقت در نتایج حاصل از تحلیل مشاهده می گردد که با افزایش دامنه موج در طول موج ثابت، مقاومت برشی مقطع ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس روند نزولی از خود نشان می دهد.

با افزایش طول موج روند حساسیت تنش بحرانی نسبت به تغییرات مقدار دامنه کاهش می یابد. همچنین در طول موج ثابت با افزایش دامنه، مد کمانشی ابتدا به شکل نیمه کلی و سپس به صورت موضعی در فاصله بین دو نقطه اکسترمم موج اتفاق می افتد. پس از وقوع کمانش موضعی با افزایش بیشتر دامنه، مد کمانشی همچنان به صورت موضعی باقی می ماند.

شکل (۵) بیانگر حالت کمانش کلی برای نمونه های با دامنه کوچکتر و کمانش موضعی برای نمونه های با دامنه های بزرگتر است (نمونه های با نیم دامنه ۰/۵-۱/۵-۲/۵-۳-۴-۵ سانتیمتر و طول موج برای K=۲۵).



شکل (۴): تغییرات تنش برشی بحرانی در مقابل دامنه موج برای طول موج های مختلف (K طول موج و a نیم دامنه است)



شکل (۷): شکل کمناشی برای نمونه‌های با نیم دامنه ثابت $a=3$

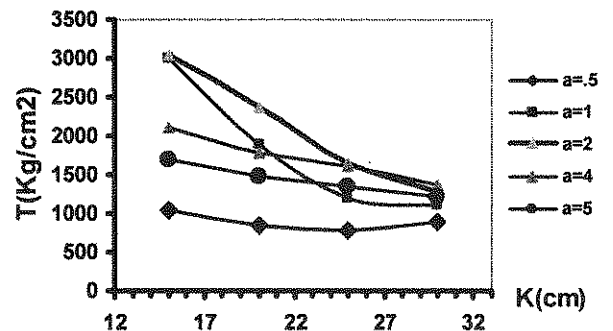
$$D_x = \frac{EI_x}{c} = \frac{E}{K_0} \int y^2 t_w ds = \quad (3)$$

$$\frac{E}{K_0} \int a^2 \sin^2\left(\frac{2\pi x}{K}\right) \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a^2}{K^2} \cos^2\left(\frac{2\pi x}{K}\right)} dx$$

۴-۴- حالت مد کمناشی موضعی

همانطور که اشاره شد با افزایش دامنه و طول موج، مد کمناشی از حالت کمناش کلی به حالت موضعی میل می‌کند. در حالت کمناش موضعی، کمناش در فاصله‌ای به نسبت مسطح بین نقاط ماکزیمم و مینیمم موج سینوسی رخ می‌دهد. اگر مقدار تنش بحرانی در حالت کمناش موضعی را از رابطه زیر محاسبه شود [۹]، نیاز به تعریف عرض مسطح معادل داریم که به صورت ضربی از فاصله خطی بین نقاط اکسترمم موج سینوسی قابل تعریف است. این عرض موثر را با b_e نشان

برای کمناش موضعی صادق است در حالی که وقتی کمناش کلی رخ دهد، با افزایش طول موج، تنش بحرانی مطابق شکل ۶ ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. تاثیر افزایش طول موج در تغییر مد کمناشی بسیار اندک است. به عبارت دیگر تغییر در مد کمناشی 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 سبب می‌شود مد کمناشی از حالت کلی به حالت موضعی تغییر یابد. شکل (۷) کمناش را در حالت موضعی و با دامنه ثابت نشان می‌دهد (نمونه‌های با نیم دامنه $a = 3$ سانتیمتر و طول موج برای ۱۵، $K = 20, 25, 30$).



شکل (۶): تغییرات تنش برشی در مقابل افزایش طول موج

۴-۳- حالت مد کمناشی کلی

اگر برای کمناش کلی جان‌های با پروفیل سینوسی فرض رفتار ارتوتروپیک را ملاک عمل قرار دهیم، آنگاه می‌توان از روابط مربوط به صفحات ارتوتروپیک به شکل زیر استفاده کرد. برای محاسبه تنش برشی بحرانی داریم [۵]:

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

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

$$\frac{K}{\int_0^{\frac{K}{2}} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a^2}{K^2} \cos^2\left(\frac{2\pi x}{K}\right)} dx} \left(\frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \right)$$

نزدیک شدن مد کمانشی از حالت نیمه موضعی به حالت موضعی، انطباق بهتری بین نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود با نتایج تئوری موجود است .

نمودارهای شکل (۹-ب) تغییرات مربوط به نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود را با نتایج مربوط به کمانش موضعی و کلی حاصل از روابط تئوری ارائه شده مقایسه می‌کند.

با دقت در این نمودارها مشخص می‌شود که در مقادیر کوچک دامنه می‌توان از روابط موجود، برای کمانش کلی استفاده کرد و در مقادیر متوسط برای دامنه موج، کمانش کلی صادق است و با زیاد شدن مقدار دامنه، روابط کمانش موضعی حاکم می‌گردد. بنابراین برای طراحی باید مقداری را برای تنش بحرانی کمانش تحت تنش‌های برشی در نظر گرفت که از مقادیر بحرانی در حالت کمانش موضعی و کلی و تنش جاری شدن کوچکتر باشد. در عمل می‌توان هر سه مقدار فوق را محاسبه کرد و کوچکترین را انتخاب نمود.

جدول (۳): مقایسه نتایج تحلیل و تئوری برای نمونه های باکمانش

موضعی (τ_1 تنش کمانشی موضعی از رابطه ۴ می‌باشد و τ_f

بیانگر مقادیر حاصل از تحلیل اجزای محدود است)

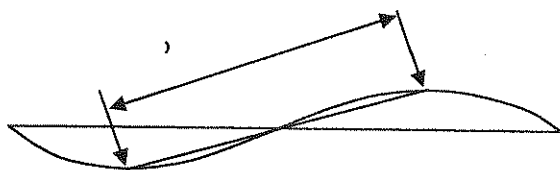
K	a	α	b_e	τ_1 ($\frac{kg}{cm^2}$)	τ_f ($\frac{kg}{cm^2}$)	τ_1/τ_f
25		0.56	7.78	2161	1800	1.20
30	3	0.55	8.96	1637	1420	1.15
20	3.5	0.58	7.15	2559	1980	1.29
25	3.5	0.56	8.157	1971	1710	1.15
30	3.5	0.56	9.27	1530	1420	1.07
20	4	0.6	7.68	2219	1780	1.24
25	4	0.57	8.58	1781	1600	1.11
30	4	0.56	9.63	1420	1360	1.04
15	5	0.7	8.83	1686	1700	0.99
20	5	0.63	8.96	1635	1480	1.10
25	5	0.6	9.60	1425	1350	1.05
30	5	0.58	10.48	1201	1220	0.98

$$\tau_{cre} = K_s \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b_1} \right)^2 \quad (4)$$

که در آن

$$b_1 = \alpha * b \quad (5)$$

$$b \sqrt{4a^2 \frac{K^2}{4}}$$



شکل (۸): نمایش پارامتر عرض معادل قبل از کالیبراسیون

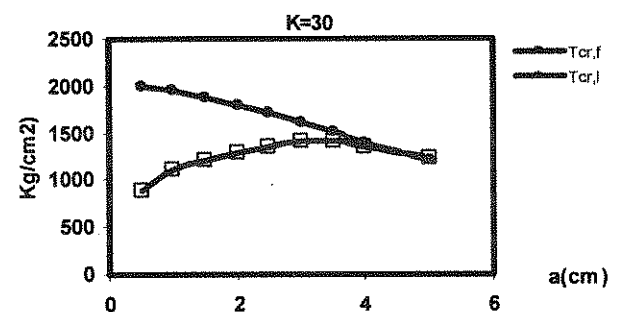
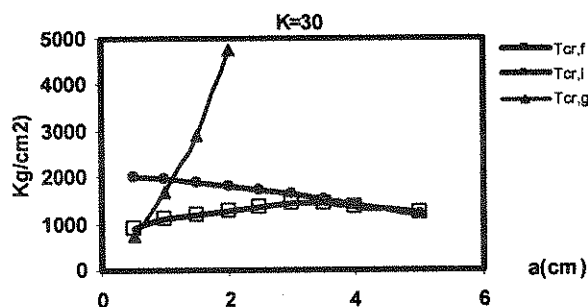
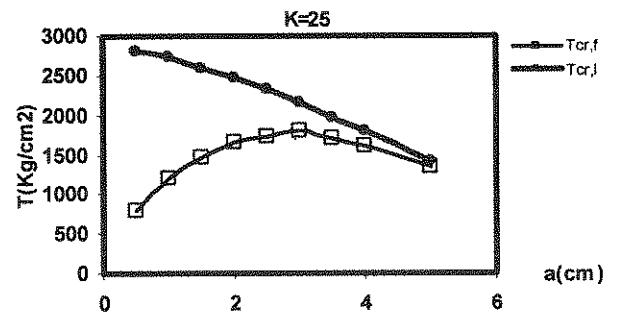
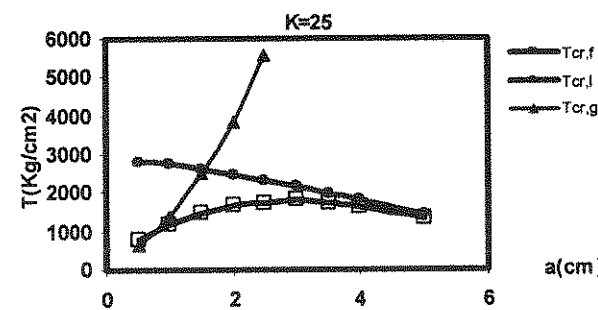
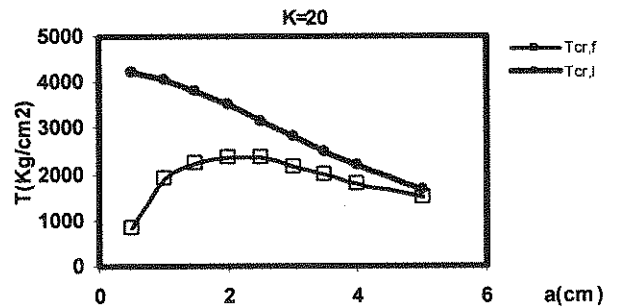
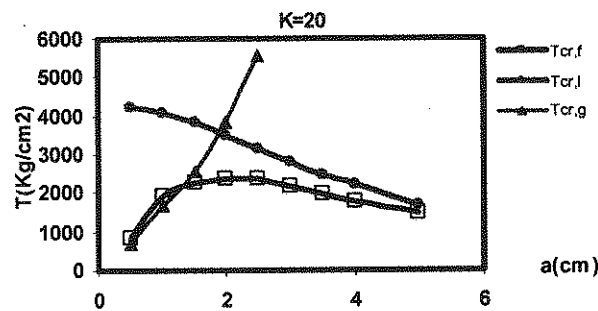
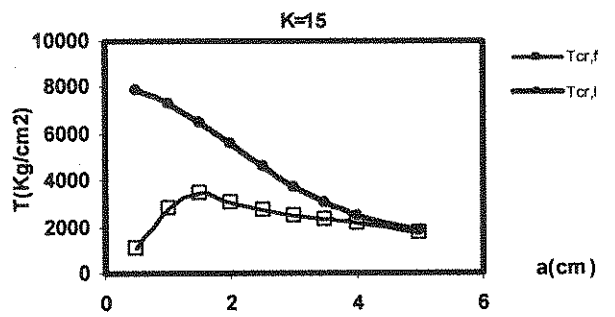
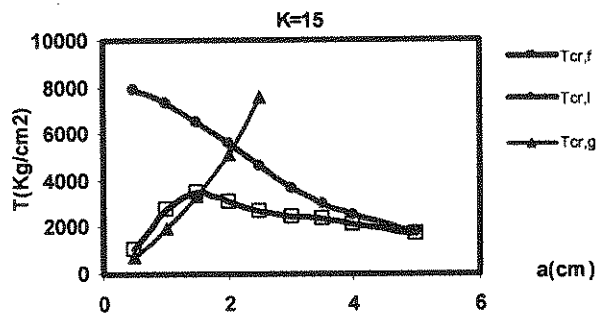
از آنجا که مقدار تنش کمانشی در حالت موضعی با مقدار b متناسب است و مقدار b نیز با نسبت (a/K) وابسته است. پس مقدار ضریب α نیز حتماً با مقدار a/k متناسب است. با فرض تغییرات درجه دوم α با نسبت (a/K) ، مقدار α را می‌توان به صورت زیر پیشنهاد کرد.

$$\alpha = m n \left(\frac{a}{K} \right)^2 \quad (6)$$

ضرایب m و n را می‌توان از طریق برازش با نتایج حاصل به صورت ذیل پیشنهاد کرد. این رابطه در گستره دامنه‌های مورد تحلیل در این مقاله ($K=15, 20, 25, 30$) قابل کاربرد است.

$$\alpha = .54 + 1.5 \left(\frac{a}{K} \right)^2 \quad (7)$$

با استفاده از مفهوم عرض موثر و قرار دادن آن در (۴)، مقدار تنش بحرانی با فرض کمانش موضعی برای کلیه نمونه‌ها در جدول (۳) محاسبه شده است. مقادیر محاسبه شده در جدول (۳) برای نمونه‌هایی که شکل کمانشی آنها در تحلیل اجزای محدود به صورت موضعی است، انطباق خوبی از خود نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد، نتایج اجزای محدود τ_f به طور متوسط ۱۱/۱ درصد با تنش تحلیلی اختلاف نشان می‌دهد (میانگین مقادیر جدول (۳)). شکل (۹-الف) بیانگر روند تغییرات تنش بحرانی در حالت کمانش موضعی، نسبت به تغییرات دامنه برای طول موجهای $K=15, 20, 25, 30$ می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش دامنه موج و به دلیل



شکل (۹-ب): مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج تئوری برای کمانش موضعی و کمانش کلی

شکل (۹-الف): مقایسه نتایج حاصل از اجزای محدود Tcr,f با نتایج تئوری با فرض طول معادل

۵- نتیجه گیری

در شرایط مشابه، موج‌های سینوسی نسبت به نوزنقه‌ای مقاومت برشی بیشتری از خود نشان می‌دهند. با این حال موج‌های با شکل پروفیل نوزنقه‌ای به دلیل سهولت تولید، با استقبال بیشتری روبرو هستند. انتخاب ابعاد بهینه برای پروفیل موج سینوسی بستگی به ضخامت انتخابی برای جان و محدودیت‌های ساخت موج دارد. اگر در استفاده از موج‌های نوزنقه‌ای، ضخامت جان به اندازه کافی کم باشد، به طوری که

Elgaaly M, Seshadri A. Depicting the behavior of girders with corrugated webs up to failure using non-linear finite element analysis. Journal of Advances in Engineering Software 1998;29(3-6):195-208.

Zhang W, Li Y, Zhou Q, Qi X, Widera GEO. 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. Journal of Materials Processing Technology 2000;101(1):119-23.

S.P. Timoshenko, J.M. Gere, Theory of Elastic Stability, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, 1961

Johnson RP, Cafolla J. Fabrication of steel bridge girders with corrugated webs. Struct Eng 1997;75(8):133-5.

Johnson RP, Cafolla J. Corrugated webs in plate girders for bridges. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings 1997;122(2):157-64.

محمد علی گودرزی، پایان نامه کارشناسی ارشد - تحلیل تنش در تیر ورق‌های عمیق با جان موج دار تیر ماه ۱۳۸۲ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

- [۷] تنش کمانشی کمتر از تنش جاری شدن گردد و یا به عبارت دیگر کمانش در جان تیر رخ دهد، آنگاه بر پایه مطالعات انجام شده در این تحقیق می‌توان با انتخاب دامنه موج در محدوده ۲ تا ۴ سانتیمتر به مقدار حداکثر مقاومت برشی رسید (این مقدار برای ابعاد معمول طول موج (از ۱۰ تا ۳۰ سانتیمتر) صادق است).
- [۸] دامنه موج با ملاحظات اجرایی نظیر عرض بال و محدودیت‌های ساخت نظیر امکان ایجاد خم موج سینوسی محدود می‌گردد و ضخامت جان با توجه به محدودیت‌های جوش مورد نیاز برای اتصال بال به جان محاسبه می‌شود. با افزایش دامنه موج سینوسی برای یک طول موج ثابت، ظرفیت تحمل تنش‌های برشی ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند و مد کمانشی ابتدا به صورت کلی و سپس به صورت نیمه کلی و در نهایت موضعی است. با افزایش طول موج، برای یک دامنه مشخص میزان تنش برشی بحرانی کاهش می‌یابد، اما افزایش طول موج سینوسی تأثیر چندانی بر روی تغییر مد کمانشی ندارد. به عبارت دیگر تغییرات دامنه موج سینوسی تعیین کننده اصلی تغییر مد کمانشی است. در حالت کمانش موضعی می‌توان از روابط تموشینکو برای ورق مسطح استفاده کرد (رابطه (۳)). این کار با تعریف عرض موثر از روی مشخصات موج امکان پذیر است که با توجه به نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود این عرض معادل به صورت رابطه (۵) پیشنهاد می‌گردد.

۶- مراجع

- [۱] R.P. Johnson, J. Cafolla, Local flange buckling in plate girders with corrugated webs, in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, vol. 122, No. 2, 1997, pp. 148-156.
- [۲] L. Huang, H.Hikosaka, K. Komine, Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges, in: Computers and Structures 2004
- [۳] Mo YL, Jeng C, Chang YS. Torsion behaviors of prestressed concrete box girder bridges with corrugated steel webs. ACI Struct J 2000;97(6):849-59
- [۴] M. Elgaaly, A. Seshadri, R.W. Hamilton, Bending strength of steel beams with corrugated webs, J. Struct. Eng. ASCE 123 (6) (1997) 772-782.
- [۵] M. Elgaaly, R.W. Hamilton, A. Seshadri, Shear strength of beams with corrugated webs, J. Struct. Eng. ASCE 122 (4) (1996) 390-398.
- [۶] M. Elgaaly, A. Seshadri, Girders with corrugated webs under partial compressive edge loading, J. Struct. Eng. ASCE 123 (6) (1997) 783-791.