

پیروست KEN



اتاق بازرگانی و صنایع و معادن تهران

## گزارش پژوهه تحقیقاتی

موضوع قرارداد

الف ت/۹۲/۸۲۲

عنوان گزارش:

بررسی رفتار تیورورقهای با جان موجدار در مقابل بارهای وارد و تهیه

دستورالعملهای مربوطه

مجری:

موسسه بهینه سازی طرحهای عمرانی راهبرد

تابستان ۱۳۹۲



# فهرست مطالب گزارش

شماره صفحه

## فصل اول:

### معرفی تیرورق با جان موجدار و کاربردهای آن در سازه‌ها

- |    |  |
|----|--|
| ۲  | ۱-۱- معرفی مزایای و معایب استفاده از جان موجدار            |
| ۵  | ۲-۱- کاربرد تیرورقهای با جان موجدار در پلها :              |
| ۹  | ۳-۱- کاربرد تیرورقهای با جان موجدار برای سازه‌های یک طبقه: |
| ۱۳ | ۴-۱- کاربرد تیرورقهای با جان موجدار در تیرهای کامپوزیتی:   |

## فصل دوم:

### تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای

- |    |   |
|----|---|
| ۲۰ | ۱-۲- مطالعات انجام شده برای تعیین ظرفیت برشی جان موجدار ذوزنقه‌ای:                |
| ۲۰ | ۱-۱-۱- جزییات آزمایش انجام شده توسط دکتر القالی و همکارانش:                       |
| ۲۶ | ۱-۱-۱-۱- ظرفیتنهایی برش بر اساس کمانش موضعی:                                      |
| ۲۹ | ۱-۱-۱-۲- ظرفیتنهایی برش بر اساس کمانش کلی:  |
| ۳۱ | ۱-۲- جمع‌بندی مطالعات بر روی رفتار برشی تیرورقهای با جان موجدار:                  |
| ۳۳ | ۲-۱- مطالعات انجام شده برای تعیین ظرفیت خمشی جان موجدار ذوزنقه‌ای:                |
| ۳۳ | ۲-۱-۱- جزییات آزمایش انجام شده بر روی ظرفیت خمشی تیرورقهای با جان ذوزنقه‌ای:      |
| ۳۶ | ۲-۱-۲- نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی ظرفیت خمشی تیرورقهای با جان ذوزنقه‌ای:    |
| ۴۱ | ۲-۲- جمع‌بندی مطالعات انجام شده برای تعیین ظرفیت خمشی تیرورقهای با جان موجدار     |
| ۴۲ | ۳-۱- مطالعات انجام شده برای تعیین ظرفیت لهیدگی جان موجدار ذوزنقه‌ای:              |
| ۴۴ | ۳-۲- تحقیقات انجام شده توسط لو - ادلوند بر روی ظرفیت لهیدگی جان موجدار ذوزنقه‌ای: |
| ۴۵ | ۳-۳- تحقیقات انجام شده توسط القالی بر روی ظرفیت لهیدگی جان موجدار ذوزنقه‌ای:      |
| ۵۳ | ۳-۳-۱- تاثیر وجود خمن یا برش صفحه‌ای بر روی مقاومت لهیدگی:                        |
| ۵۶ | ۳-۳-۲- جمع‌بندی تحقیقات بر روی مطالعات مربوط به لهیدگی جان:                       |

## فصل سوم:

### تیرورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی

۶۱	-۱-۳- مقدمه
۶۲	-۲-۳- رفتار تیرورقهای با موج سینوسی در خمین:
۶۳	-۱-۲-۳- ظرفیت خمین نهایی تیر سینوسی:
۶۴	-۲-۲-۳- ظرفیت خمین نهایی تیر تحت کمانش موضعی:
۶۷	-۳-۲-۳- ظرفیت خمین نهایی تیر تحت کمانش پیچشی- جانبی:
۷۱	-۴-۲-۳- ظرفیت نهایی تیرهای سینوسی تحت نیروهای برشی:
۸۲	-۵-۲-۳- ظرفیت لهیدگی نهایی تیرهای سینوسی تحت بارهای متمرکز

## فصل چهارم:

### روش طراحی تیرورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی

۸۷	-۱-۴- مقدمه
۸۸	-۱-۴- محاسبه نحوه باربری و کنترل مقاومت تیرورقهای سینوسی برای مصارف مهندسی
۸۸	-۲-۴- اثرات ناشی از لنگر خمینی در تیرهای سینوسی:
۸۸	-۱-۲-۴- نیروی حداکثر بال تحت خمین :
۸۹	-۲-۲-۴- نیروی حداکثر بال تحت خمین با فرض وقوع کمانش موضعی بال:
۹۱	-۳-۲-۴- نیروی حداکثر بال تحت خمین با فرض وقوع کمانش کلی بال:
۹۲	-۴-۲-۴- جمع‌بندی نحوه اعمال اثرات لنگر خمینی وارد شده به تیر سینوسی:
۹۳	-۳-۳-۴- اثرات ناشی از نیروی برشی در تیرهای سینوسی:
۹۳	-۱-۳-۴- کنترل کمانش موضعی در جان سینوسی
۹۴	-۲-۳-۴- کنترل کمانش کلی جان سینوسی
۹۶	-۴-۴- مقاومت لهیدگی جان در مقابل بارهای متمرکز وارد شده به تیرسینوسی:
۱۰۰	-۵-۴- جمع‌بندی:

## فصل اول:

### معرفی تیرورق با جان موجدار و کاربردهای آن در سازه‌ها

چکیده :

در این فصل ابتدا مزایا و معایب کاربرد تیرورق‌های با جان موجدار مختصراً ارائه می‌گردد و خلاصه‌ای از کاربردهای مختلف این نوع تیرورق تشریح می‌گردد. این کاربردها که شامل استفاده از این تیرورق‌ها در پله‌ها، سازه‌های یک طبقه صنعتی، ساختمانها و تیرهای کامپوزیتی ساده و پیش‌تنیده می‌باشد، در سالهای اخیر افزایش فراوان یافته است و لزوم تحقیقات بیشتر در زمینه‌ی اجرایی کردن بیشتر آنها را بیش از پیش نمایان کرده است.

## ۱-۱- معرفی مزایای و معایب استفاده از جان موجدار

تیر به عضوی گفته می‌شود که تحمل بارهای جانبی را داشته باشد. تفاوت اصلی تیوروقها با تیرهای معمولی در این است که تیوروقها ابعاد بزرگتری دارند و نمی‌توانند با استفاده از تکنولوژی تورد گرم تولید شوند. در نتیجه برای تهیه تیرووهای با ابعاد بزرگتر، ورقهای فولادی به صورت جداگانه بوسیله جوش به هم اتصال داده می‌شوند. به این تیرها اصطلاحاً تیوروق گفته می‌شود.

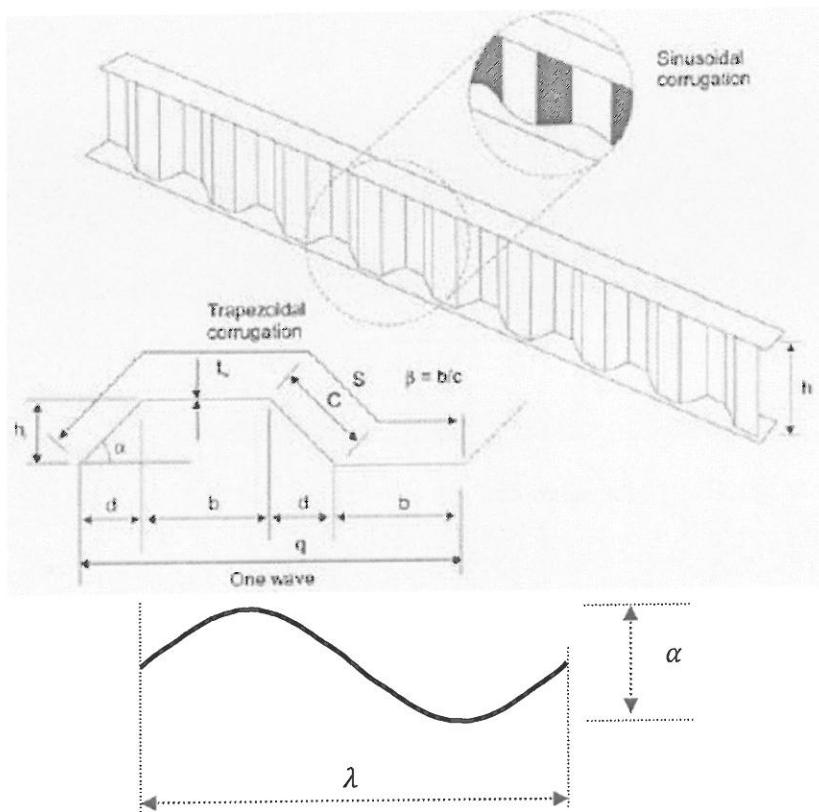
تیوروقها معمولاً از اتصال دو ورق به عنوان بال تیر و یک ورق به عنوان جان تیر تشکیل شده‌اند. وقتی به تیری بار وارد می‌شود، در مقاطع مختلف تیر، هم لنگر خمشی و هم نیروی برشی ایجاد می‌گردد. بالهای وظیفه تحمل خمش را دارند و جان تیر وظیفه تحمل نیروهای برشی را به عهده دارد. ورقهای تشکیل دهنده بال در نقاط اتصال به جان از هر دو طرف به هم جوش می‌شوند. به این ترتیب یک تیوروق تولید می‌شود که می‌تواند بارهای برشی و خمشی را تحمل کند.

اولین بار ایده اصلی استفاده از جان موجدار برای تیوروقها بر مبنای افزایش مقاومت کمانشی جان در مقابل بارهای وارد پدید آمد. با موجدار کردن جان تیوروق، سختی جان نسبت به جانهای مسطح افزایش یافته و نیازی به استفاده از جان ضخیم نیست. بنابراین استفاده از این نوع جان می‌تواند به کاهش وزن تیوروق از طریق کاهش وزن جان تیر منجر گردد. همانطور که اشاره شد، جان تیر وظیفه تحمل نیروهای برشی وارد بر تیر را به عهده دارد. بنابراین موجدار کردن جان نیز منجر به افزایش طرفیت برشی جان می‌گردد. فرم موج مورد استفاده برای شکل دهی جان تیر، غالباً از نوع موج ذوزنقه‌ای و سینوسی می‌باشد (شکل ۱-۱). البته فرم‌های دیگری نظیر موج مثلثی و مستطیلی نیز به طور وسیعی بکار گرفته شده است. اما موجهای ذوزنقه‌ای و اخیراً سینوسی با اقبال بیشتری مواجه بوده است.

سازندگان و کارشناسان در این رابطه معتقدند که استفاده از تیوروق با جان موجدار می‌تواند وزن تیوروق را تا حدود ۱۳ درصد نسبت به تیوروقهای معمولی که با سخت‌کننده تقویت شده‌اند، افزایش دهد. این تیوروقهای فولادی در سازه‌های مهندسی، بخصوص پلهای جاده‌ای در کشورهای امریکا، اورپا و ژاپن مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در ادامه با توضیح بیشتر معرفی خواهند شد.

سازندگان این نوع تیوروق بیشتر در اتریش و سوئیس و آلمان مستقر هستند. سیستم دیگری از این نوع تیرها را می‌توان با ترکیب بتن و فولاد تولید کرد. در این نوع تیرهای ترکیبی، بال تیر از بتن مسلح و جان تیر از ورق فولادی موجدار تشکیل می‌شود. این نوع تیر که اصطلاحاً تیر کامپوزیتی نامیده

می‌شود، اولین بار در فرانسه برای ساخت پل بکارگرفته شد. در خصوص این نوع تیر در ادامه همین فصل توضیحات مبسط‌تری ارائه خواهد شد.



شکل (۱-۱): شماتیکی از موج سینوسی و ذوزنقه‌ای برای استفاده در جان تیر

نکته مهمی که در خصوص این نوع تیر باید به آن اشاره کرد، مقاومت بهتر آنها در مقابل بارهای تکراریست. بارهای تکراری بارهایی هستند که در طول عمر مفید سازه، بارها و بارها تکرار می‌شوند. معروف است که پلهای جاده‌ای به دلیل عبور ماشین از روی آنها به مرور زمان دچار پدیده خستگی شده و عمر مفید آنها کاهش می‌یابد. محققین نشان داده‌اند که با بکارگیری تیرورقهای با جان موجدار، می‌توان مقاومت خستگی جان را تا حد ۵۰ درصد نیز افزایش داد [۱]. علاوه بر این، بدليل مقاومت خوب در مقابل خستگی و بدليل وزن کمتر تیرورقهای با جان موجدار، امکان بکارگیری آنها در دهانه‌های بزرگتر نیز مهیا می‌شود.

هر چقدر که نسبت ارتفاع جان تیرورق به ضخامت آن بیشتر باشد، بیانگر اقتصادی بودن بیشتر طرح است. اما با افزایش بیش از حد این نسبت، لاغری جان نیز به حد بحرانی رسیده و کمانش جان اتفاق

می‌افتد. در تیرورق‌های موجدار، به دلیل موجدار کردن جان، مقاومت کمانشی ان بشدت بالا رفته و باعث پایداری بیشتر تیرورق می‌گردد. بنابراین در تیرورق‌های با جان موجدار، نسبت ارتفاع به ضخامت جان می‌تواند حتی تا ۳۰۰ نیز افزایش یابد. بنابراین گزینه استفاده از تیرورق‌های با جان موجدار، بخصوص برای دهانه بزرگ بسیار اقتصادی و مناسب است.

در مجموع مزایای استفاده از این تیروقها را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود.

۱- با موجدار کردن جان، امکان استفاده از موج نازکتر فراهم می‌گردد و از این طریق، وزن تیرورق کاهش می‌یابد.

۲- با موجدار کردن جان، دیگر نیازی به استفاده از سخت گننده‌ها نیست و به این ترتیب عملیات اجرایی و نیاز به نیروی فنی کاهش می‌یابد

۳- مقاومت تیرورق‌های با جان موجدار در مقابل بارهای تکراری که منجر به پدیده خستگی می‌شود، نسبت به تیرورق‌های معمولی بیشتر است. این خاصیت منجر به استفاده بیشتر این تیرها در سازه‌های تحت بارگذاری تکراری نظیر پلها می‌گردد.

۴- سختی خمسی حول محور ضعیف تیر بشدت افزایش می‌یابد. این موضوع در هنگام حمل و نقل، اهمیت پیدا می‌کند. به این معنی که حمل و نقل تیرورق‌های موجدار با سهولت بیشتری نسبت به تیرورق‌های معمولی فراهم می‌شود

۵- خاصیت اکاردئونی جان موجدار، امکان استفاده از این نوع جان را در تیرهای کامپوزیتی پیش‌تنیده فراهم می‌کند.

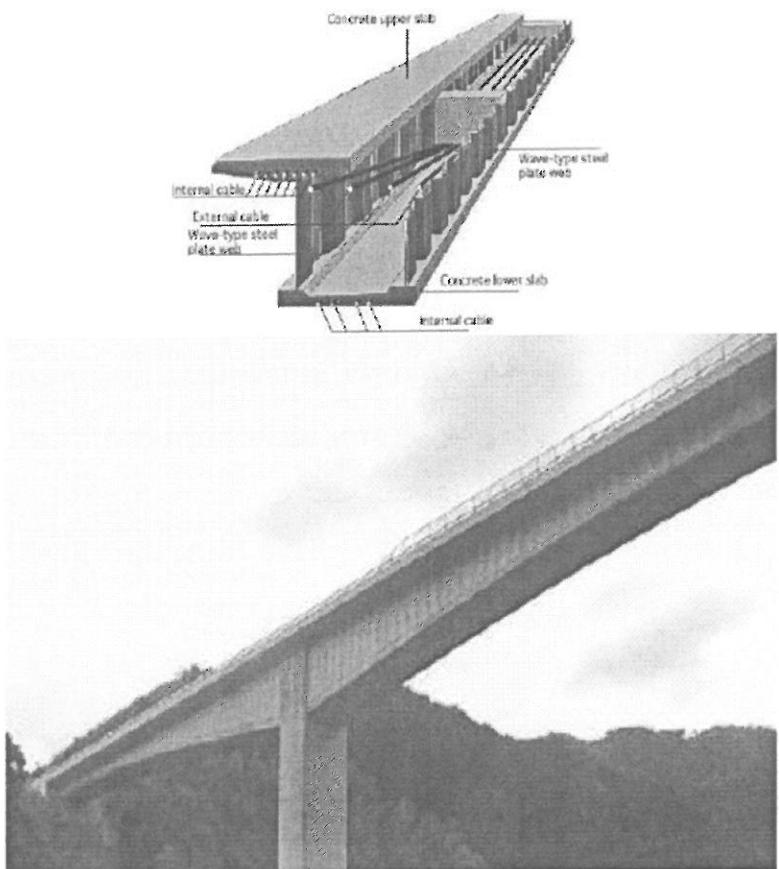
۶- زیبایی ظاهری تیرورق‌های با جان موجدار به مراتب از تیرورق‌های با جان مسطح بیشتر است.

البته باید توجه کرد که موجدار کردن جان هزینه‌های اضافی دارد. همچنین طاقت تیرورق‌های با جان موجدار در مقابل نیروهای خمسی نیز از تیرورق‌های معمولی اندکی کمتر است. اما در مجموع خواص فوق الذکر باعث توسعه روزافزون این تیرورقها در صنایع مختلف شده است. در ادامه به برخی از کاربردهای جان موجدار در سازه‌های مهندسی پرداخته می‌شود.

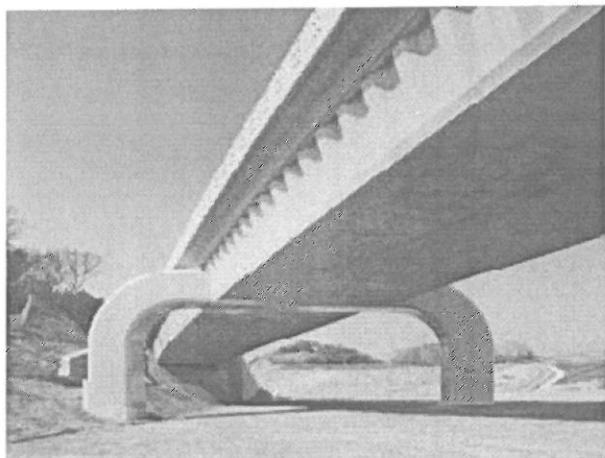
## ۱-۲- کاربرد تیرورق‌های با جان موجدار در پلها :

تیرهای بتنی دارای جان ضخیم بتنی هستند. این جان ضخیم بتنی می‌تواند با یک جان نازک فولادی موجدار جایگزین شود. از این طریق مقدار زیادی در وزن تیر بتنی کاهش داده می‌شود. خصوصاً اگر تیر بتنی از نوع پیش‌تنیده باشد، استفاده از جان موجدار فلزی در کنار بالهای بتنی می‌تواند به ترکیب بسیار مطلوبی از نظر عملکرد سازه‌ای منجر شود. زیرا تیر بتنی پیش‌تنیده معمولاً با ایجاد تنشهای پیش‌تنیدگی در جان همراه است. اما اگر جان موجدار باشد، هیچ مقاومتی در مقابل فشار ناشی پیش‌تنیدگی نمی‌کند.

این ترکیب تمام خواص تیر بتنی را دارد، ضمن اینکه وزن آن بسیار کمتر است. این نوع تیرهای عمیق که دارای بال بتنی و جان موجدار هستند، به اصطلاح تیر کامپوزیتی نامیده می‌شوند. این تیرها معمولاً در پلها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ژاپن این تیرها از سال ۱۹۷۶ بکارگرفته شدند و تاکنون حدود یکصد عدد از این نوع پلها ساخته شده است. در شکل ۱-۱ و ۲-۱ نمونه‌ای از این پلها و مکانسیم پیش‌تنیدگی آنها نشان داده شده است.

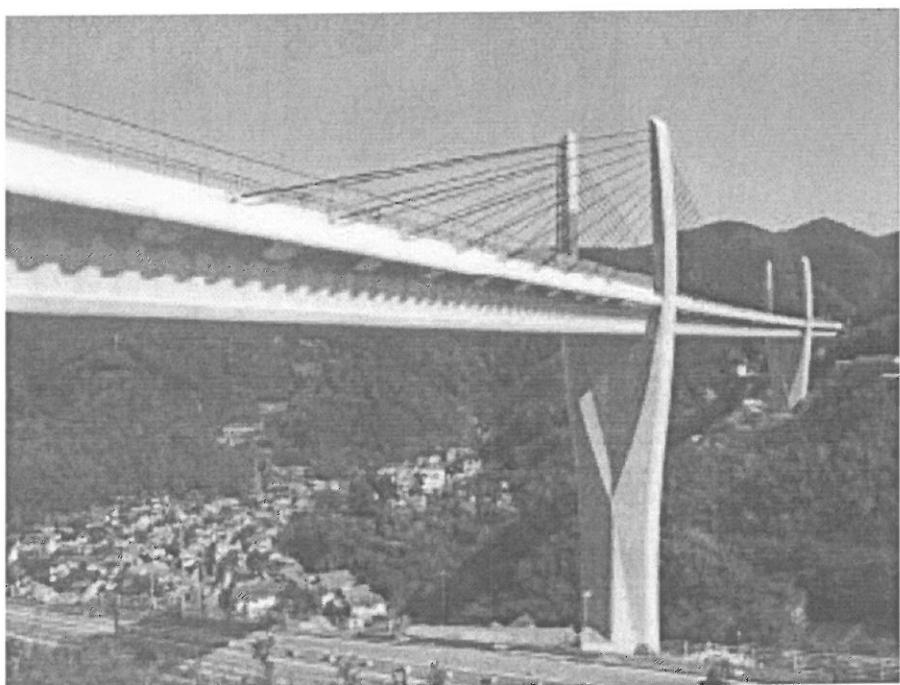


شکل ۱-۱: پل رودخانه کوکاوچی در ژاپن

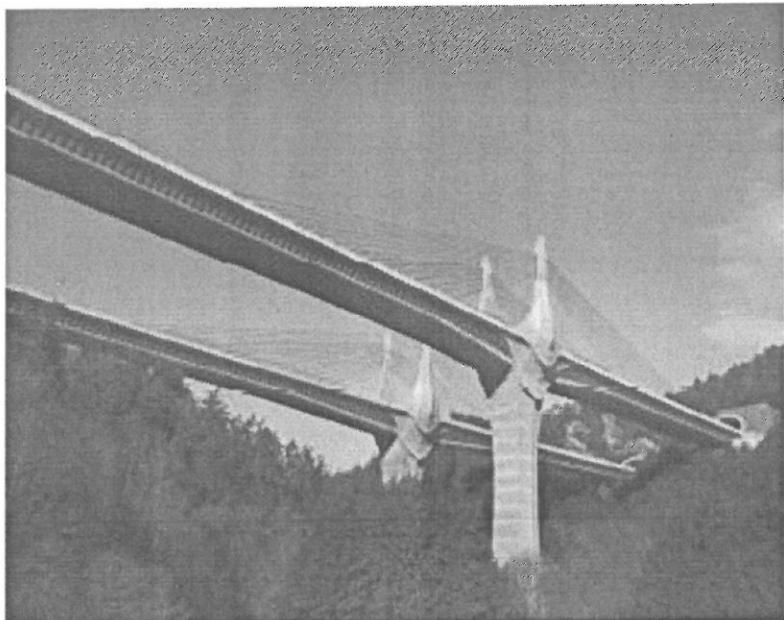


شکل ۱-۲: رمپ پل تویوتا

همچنین پلهای کابلی نیز بعضاً بر روی تیرهای کامپوزیتی دارای جان موجدار فولادی بنا می‌شوند. در اشکال زیر (۳-۱ و ۴-۱) دو نمونه از این پلهای نشان داده شده است. در برخی از پلهای کابلی ساخته شده در سالهای اخیر، دهانه‌های بیش از ۲۰۰ متر نیز با تیر کامپوزیتی با جان موجدار ساخته شده‌اند.



شکل ۱-۳: پل هیمی- یامه در ژاپن



شکل ۱-۴: پل امی-اتوری

گاهی بجای مقطع جعبه‌ای، از مقطع مثلثی برای پل استفاده می‌شود و بال پایین تیرورق با یک لوله جایگزین می‌شود. نمونه‌ای از این نوع پل که در فرانسه ساخته شده، در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. این پل دارای دهانه‌های ۵۳ متری بوده و ارتفاع تیرورقها حدوداً سه متر در نظر گرفته شده است. بال پایین تیرورقها نیز با یک لوله فولادی به قطر ۶۰ سانتیمتر جایگزین شده که درون این لوله با بتون پر شده است.



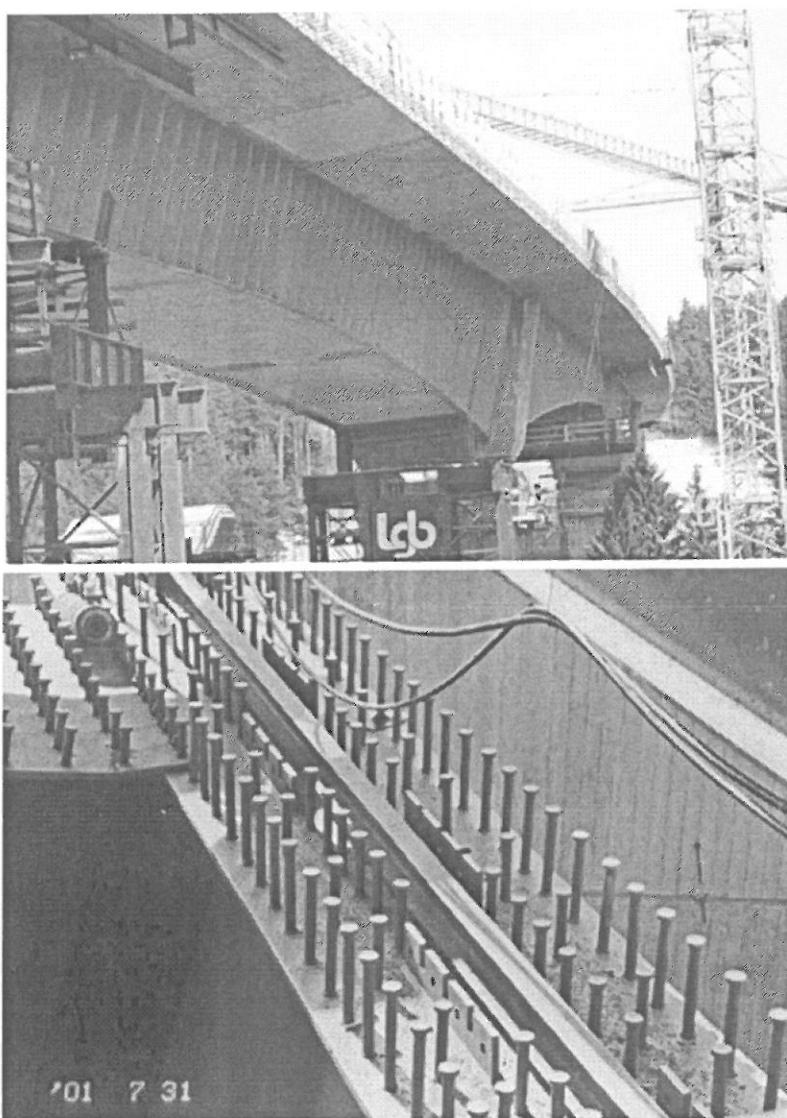
شکل ۱-۵: پل Maupre Viaduct در فرانسه

---

 معرفی تیرورق با جان موجدار و کاربردهای آن در سازه‌ها
 

---

نمونه‌ای دیگر از پلهای کامپوزیتی با ترکیب یک بال فولادی و یک بال بتنی و جان موجدار ساخته شده است. به عبارت دیگر همیشه در تیرها، یک بال تیر تحت نیروهای کشش و یک بال تیر تحت فشار قرار دارد. می‌توان بال بالایی که تحت فشار است را از بتن ساخت و بال پایینی که تحت کشش است همچنان از فولاد ساخته شده باشد. زیرا مقاومت فولاد در کشش به مراتب از مقاومت بتن بیشتر است. با این ترکیب از خواص مثبت هر دو مصالح بتن و فولاد استفاده بهینه شده است.



شکل ۱-۶: پل Altwipfergurund در المان و برشگیرهای اتصالی بال بتنی و جان موجدار فولاد

نمونه‌ای از این نوع پل در شکل ۱-۶ نشان داده است. این پل در آلمان ساخته شده و اولین پلی است که با استفاده از جان موجدار ساخته شده است. طول این پل حدود ۲۸۰ متر با سه دهانه می‌باشد که طول بزرگترین دهانه حدوداً برابر با ۱۱۵ متر می‌باشد. در این تیر بال بالای تیر از جنس بتن است و جان موجدار در داخل بال بتنی کار گذاشته شده است. برای اینکه جان موجدار از داخل بتن بیرون کشیده نشود و اتصال لازم را با بال بتنی داشته باشد، معمولاً از تعدادی زائد فولادی بر روی جان استفاده می‌شود. کار این زائددها اینست که بین جان فولادی و بال بتنی سطح تماس و درگیری ایجاد می‌کنند تا اتصال این دو محکمتر شود. نمونه‌ای از این میله‌های زائد که به اصطلاح برشگیر نامیده می‌شود نیز در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. جان موجدار فولادی در این نوع تیر کامپوزیتی از پایین به یک ورق فولادی متصل شده که در حکم بال پایین است.

### ۱-۳- کاربرد تیرورقهای با جان موجدار برای سازه‌های یک طبقه:

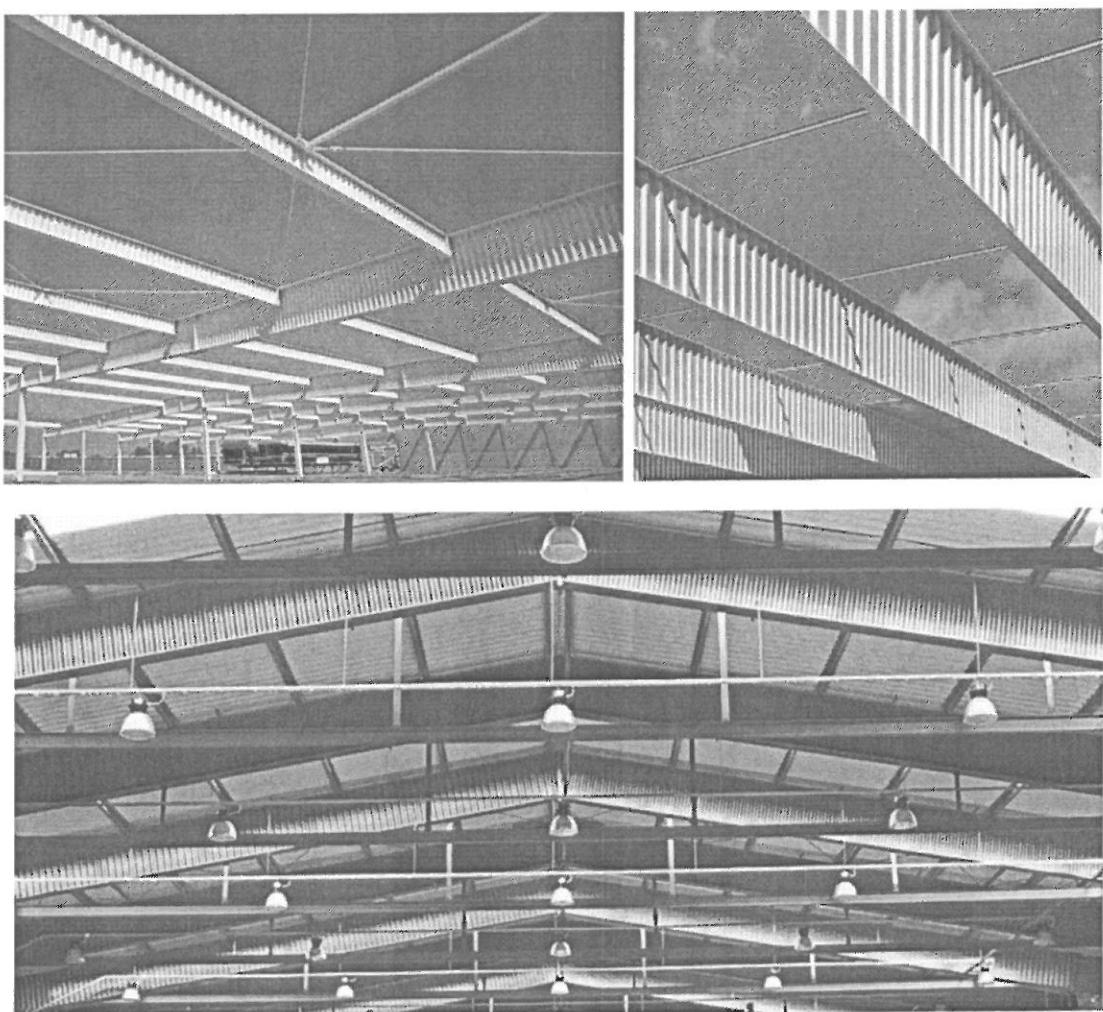
شاید اصلی‌ترین کاربرد تیرورقهای با جان موجدار برای سازه‌های یک طبقه با دهانه‌های نسبتاً بزرگ باشد. مثلاً سوله‌های نگهداری تجهیزات، ساختمانهای صنعتی، انبارها و ... از نمونه‌های بارز این نوع ساختمانها هستند. معمولاً در این سازه‌ها، دهانه‌های بارگذاری نسبت به تیرهای معمولی مورد استفاده در ساختمانها بیشتر بوده و طول مهاری بال تحت فشار نیز نسبت به حالت عادی بیشتر است. در این موقع، استفاده از تیرورق با جان موجدار می‌تواند گزینه مناسبی باشد. در تصاویر شکل ۱-۷ نمونه‌هایی از بکارگیری تیرورقهای با جان موجدار برای ساخت سازه‌های صنعتی نشان داده شده است.

این نوع تیرورقهای با جان موجدار به عنوان ستون نیز در برخی از ساختمانها بکار گرفته شده‌اند (شکل ۱-۸). لازم به ذکر است که استفاده از تیرورقهای با جان موجدار در نقش ستون، به عنوان عضوی که تحمل بارهای فشاری را به عهده دارد، چندان مزیتی ایجاد نمی‌کند. این موضوع به خاطر عدم مشارکت جان موجدار در تحمل بارهای فشاریست. اما اگر جان موجدار در ستونها به عنوان رابط برشی دو بال استفاده شود، می‌توان از آن برای ستون نیز استفاده کرد.

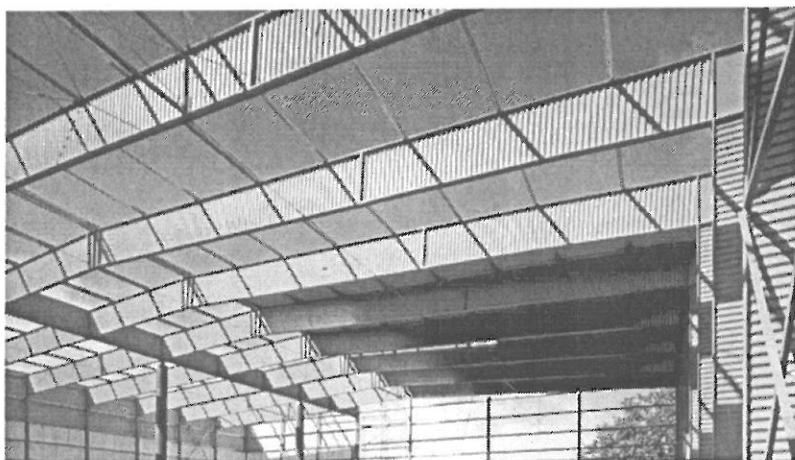
در تحقیقی که در یونان انجام شده یه سوله صنعتی با سه نوع المان مختلف مدلسازی شده است [2]. در مرحله اول از تیرورقهای معمولی با جان مسطح برای طراحی سوله استفاده شد و در مرحله دوم، از تیرورق با جان موجدار سینوسی برای طراحی سوله استفاده شد (شکل ۱-۹). در مرحله سوم نیز از تیر لانه‌زبوری برای مدلسازی المانهای سازه‌ای سوله بهره‌گیری به عمل آمد و مقایسه‌ای

بین این سه حالت از نظر میزان فولاد مصرفی برای طراحی سوله مذکور انجام گرفت. محاسبات کامپیویتری نشان داد که تیرورقهای با جان موجدار می‌تواند بین ۲۰ تا ۲۵ درصد وزن کل سوله را نسبت به تیرهای معمولی نورد گرم شده کاهش دهد. تصاویری از سازه مدلسازی شده در این تحقیق در شکل (۹-۱) نشان داده شده است.

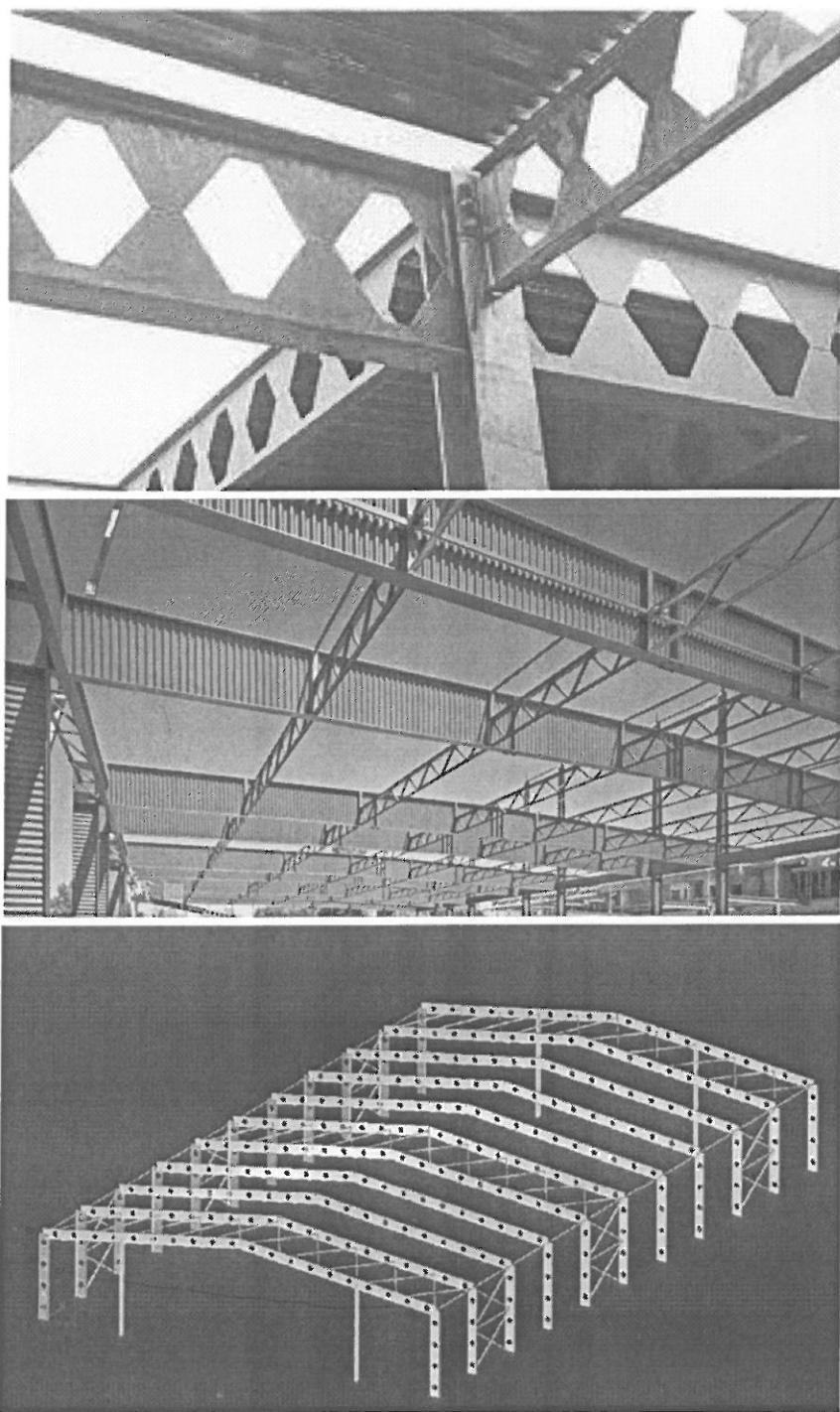
اگر چه تحقیق مذکور با فرض استفاده از تیرورق با ارتفاع ثابت در تیرهای سقفی سوله انجام شده است، اما به هر حال کاهش بیست درصدی فولاد مصرفی با توجه به این نکته که روابط طراحی برای جانهای موجدار هنوز بسیار محافظه کارانه است، رقم قابل توجهی بوده و بیانگر توجیه اقتصادی قابل قبول در استفاده از تیرورقهای موجدار در سازه‌های صنعتی تک طبقه می‌باشد.



شکل ۱-۷: نمونه‌هایی از بکارگیری تیرورقهای با جان موجدار در سازه‌های صنعتی یک طبقه با دهانه‌های نسبتاً بزرگ از ۶ تا ۲۰ متر



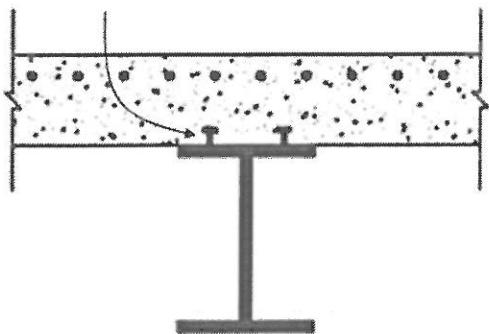
شکل A-۱: نمونه‌هایی از بکارگیری تیرورقهای با جان موجدار به عنوان ستون در سازه‌های صنعتی



شکل ۹-۱: مقایسه کامپوتری انجام شده در استفاده از تیرورقهای با جان موجدار با جانهای مسطح و جان تیرهای لانه زنبوری [2]

#### ۱-۴- کاربرد تیرورقهای با جان موجدار در تیرهای کامپوزیتی:

نوعی از تیرهای کامپوزیتی که از ترکیب جان فولادی موجدار و بالهای بتنی پیش‌تنیده تشکیل شده بود، در قسمت قبل معرفی شد. این نوع تیرها بیشتر در پلها کاربرد دارد. اما می‌توان تیرورقهای با جان موجدار را به طرق دیگری نیز با المانهای بتنی ترکیب کرد. به عنوان نمونه در ساختمان‌ها، معمولاً تیرورقها در زیر دال بتنی سقف قرار می‌گیرند. به این نوع سیستم سقفی که در شکل ۱۰-۱ نشان داده شده است، اصطلاحاً سیستم سقف کامپوزیت گفته می‌شود. در کشور ما نیز این نوع سقف به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع سقف، در واقع وظیفه تحمل فشار به بتن مسلح سقف داده شده و وظیفه تحمل کشش به عهده بال پایین فولادی است.

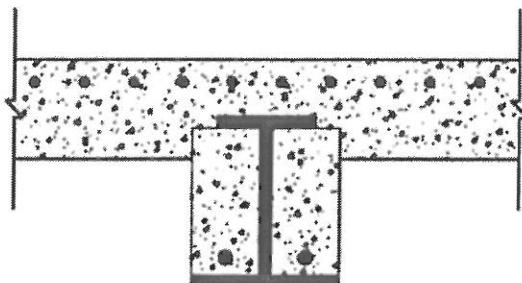


شکل ۱۰-۱: شماتیکی از سیستم سقف کامپوزیتی متداول

حال می‌توان همین ترکیب را عیناً با استفاده از تیرورق موجدار با دال بتنی مورد استفاده قرار داد. در سالهای اخیر مطالعاتی بر روی این نوع ترکیب سقف کامپوزیتی با جان موجدار انجام شده است. مثلاً در بزرگ‌ترین تحقیقاتی بر روی این تیرها انجام شده که نتیجه این تحقیقات منجر به دستورالعمل طراحی این نوع سقف شده است [3].

استفاده مستقیم از تیرورقهای با جان موجدار در زیر سقف بتنی ساده‌ترین نوع ایجاد سقف کامپوزیتی می‌باشد. در برخی موارد این نوع سقفها به دلیل افزایش ضخامت سقف و کاهش ارتفاع مفید طبقات ساختمان، مورد استقبال قرار نمی‌گیرند. برای حل مشکل مذکور لازم است که ارتفاع این نوع سقفها و یا به عبارتی ارتفاع تیرورق زیر سقفها کاهش یابد، اما در عین حالت ظرفیت برابری تغییر نکند و تغییر مکان تیر نیز در حد قابل قبول نگه داشته شود. برای اینکار، می‌توان از کابل‌های پیش‌تنیده در پایین تیرورق استفاده نمود (شکل ۱۱-۱). کابل‌های پیش‌تنیده با ایجاد فشار اولیه در بال پایین تیرورق باعث می‌شوند که تنشهای کششی ایجاد شده در اثر اعمال بار، با فشار اولیه ناشی از کشش کابلها خنثی شود. به این ترتیب با پیش‌تنیده کردن بال پایین تیرورق می‌توان مقاومت آن

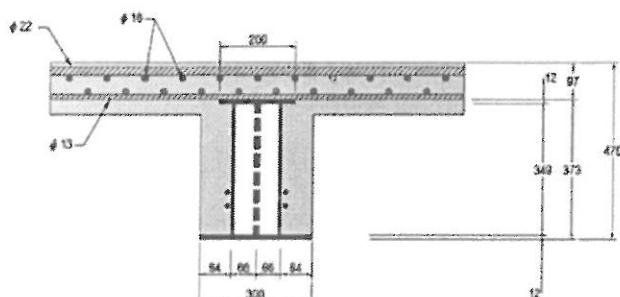
این، بتن بکار گرفته شده به فولاد در تحمل بارهای وارد نش داشته باشد. زیرا با وجود بتن در اطراف بال پایین، امکان پیش‌تنیدگی بیشتر فراهم می‌شود و باربری تیر باز هم افزایش می‌یابد. به این ترتیب می‌توان حتی تیرورق را مقداری بالا آورد. بطوریکه بال بالای آن در داخل دال بتنی قرار گیرد (شکل ۱۲-۱).



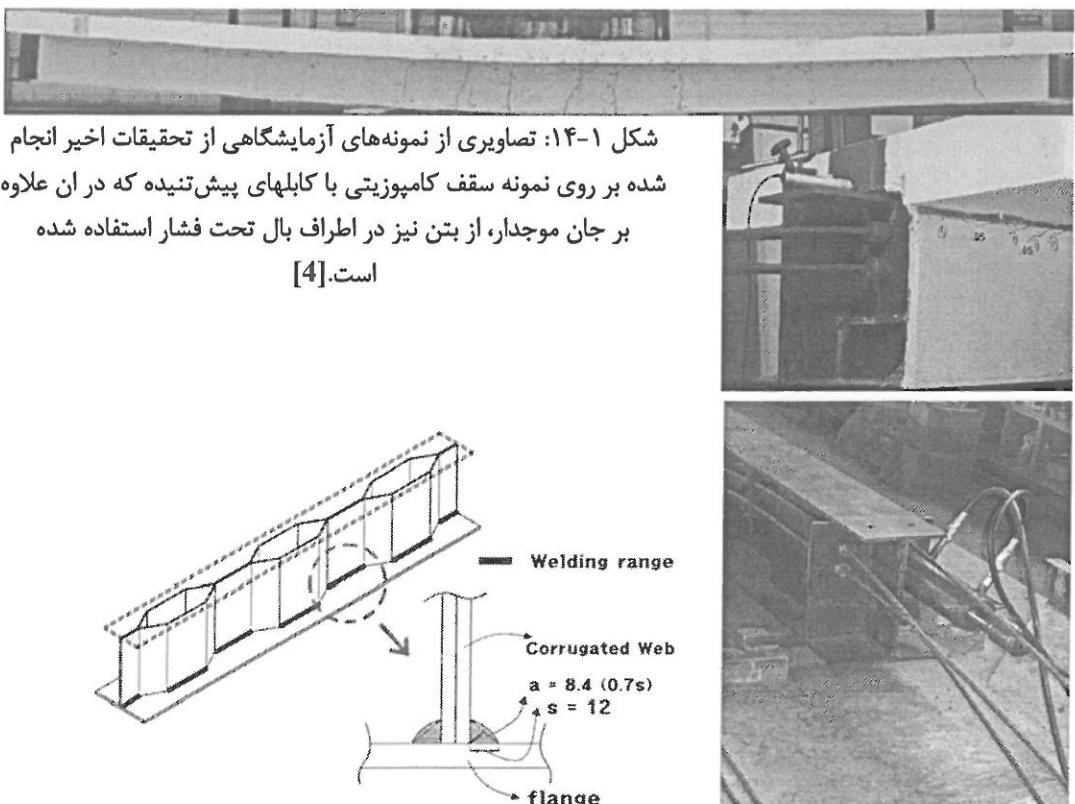
شکل ۱۲-۱: سقف کامپوزیتی با کابلهای پیش‌تنیده که در ان از بتن نیز در اطراف بال تحت فشار استفاده شده و بال بالای تیر در داخل دال بتنی فرو رفته است.

در همه موارد فوق، هم می‌توان از تیرورق ساده استفاده کرد و هم می‌توان از تیرورق با جان موجدار استفاده نمود. اما تیرورق با جان موجدار بدلیل چین خوردگی جان، با بتن اطراف خود به خوبی درگیر شده و تنشهای وارد شده را به طور مناسبی تحمل می‌کند (شکل ۱۳-۱).

در ارتباط با این نوع تیرها اخیراً تحقیقاتی در کشور کره انجام شده است [4][5] که نتایج این تحقیقات بیانگر عملکرد مثبت استفاده از این نوع تیرها می‌باشد (شکل ۱۴-۱).



شکل ۱۳-۱: سقف کامپوزیتی با کابلهای پیش‌تنیده که در ان علاوه بر جان موجدار، از بتن نیز در اطراف بال تحت فشار استفاده شده است.



شکل ۱۴-۱: تصاویری از نمونه‌های آزمایشگاهی از تحقیقات اخیر انجام شده بر روی نمونه سقف کامپوزیتی با کابل‌های پیش‌تنیده که در آن علاوه بر جان موجدار، از بتن نیز در اطراف بال تحت فشار استفاده شده است.  
[4].

### References:

- [1] Machacek, J. and Tuma, M., Fatigue life of girders with undulating web, *Journal of Constructional Steel Research* Vol. 62, 2006, pp. 168-177.
- [2] M. Athens "AN ECONOMIC PROPOSAL IN THE DESIGN OF THE ONE STOREY – LEVEL STEEL STRUCTURE. THE USE OF CASTELLATED AND SINUSOIDAL STEEL SECTION" *Recent Researches in Engineering Mechanics, Urban & Naval Transportation and Tourism* pp: 205 -210
- [3] A. G. Martins, R. H. Fakury, R. J. Pimenta, G. Queiroz, and F. C. Rodrigues, "Moment resistance of composite steel and concrete connection in sinusoidal-web girders," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 76, pp. 112–120, Sep. 2012.
- [4] K. S. Kim, D. H. Lee, S. M. Choi, Y. H. Choi, and S. H. Jung, "Flexural behavior of prestressed composite beams with corrugated web: Part I. Development and analysis," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, no. 6, pp. 1603–1616, Sep. 2011.
- [5] K. S. Kim and D. H. Lee, "Flexural behavior of prestressed composite beams with corrugated web: Part II. Experiment and verification," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, no. 6, pp. 1617–1629, Sep. 2011.

## فصل دوم:

### تیروورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای

چکیده :

در این فصل مطالعات انجام شده بر روی وجود مختلف رفتار سازه‌ای تیروورقهای با جان موجدار ذوزنقه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. عمدۀ این تحقیقات در سالهای ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۹ انجام گرفته‌اند. در همین بازه زمانی، مکانیسم رفتاری تیروورقهای با جان موجدار تا حد زیادی تبیین شد و اصول اولیه طراحی این تیروورقهای بنا نهاده شد. البته محققین در طی سالهای بعدی سعی کردند که اصلاحاتی بر روی روابط اولیه پیشنهاد شده ارائه کنند، اما چارچوب اولیه روابط و فلسفه‌های پشتیبانی کننده این اصول که در بازه زمانی مذکور بنا نهاده شد، حتی تا به امروز نیز کم و بیش ثابت مانده است. لذا در این فصل آزمایشاتی که برای استخراج این روابط مبنا قرار گرفتند، با جزئیات بیشتری تشریح می‌گردد تا مبین فهم رفتار این تیروورقهای باشد.

**مقدمه:**

ایده اصلی استفاده از جان موجدار برای تیرورقها بر مبنای افزایش مقاومت کمانشی جان در مقابل بارهای وارد می‌باشد. با موجدار کردن جان سختی صفحه جان نسبت به حالت مسطح افزایش یافته و در نتیجه نیاز به استفاده از جان ضخیمتر نیست. بنابراین استفاده از این نوع جان می‌تواند به کاهش وزن تیرورق از طریق کاهش وزن جان تیر منجر گردد.

استفاده از تیرورقهای با جان موجدار از سال ۱۹۶۰ در سوئد شروع شد. هر چند که در آن زمان، دانش چندانی نسبت به عملکرد این تیرورقها وجود نداشت و طراحان به دلیل عدم شناخت کافی از رفتار این تیرورقها، از ضرایب اطمینان بسیار بالاتری برای طراحی این تیرورقها استفاده می‌کردند.

به مرور مشخص شد که این تیرورقها، بدلیل داشتن جان موجدار در حمل و نقل نیز ساده‌تر انتقال می‌یابند و علاوه بر این برای اتصال جان آنها به بال، تنها نیاز به جوش یکطرفه است که از نظر اقتصادی نسبت به جوش دوطرفه دارای مزیت است. لازم به ذکر است که برای جان مسطح معمولاً نیاز به جوش دو طرفه بین بال و جان می‌باشد.

موجدار کردن جان در دو فرم ذوزنقه‌ای و یا سینوسی انجام می‌گیرد. البته فرم مثلثی و مستطیلی نیز برای چین دار کردن جان تیرورق به صورت محدودی بکار گرفته شده است، اما استفاده از موج ذوزنقه‌ای و اخیراً موج سینوسی بیشتر مد نظر سازندگان و بهره برداران قرار گرفته است.

ایده استفاده از جان موجدار نزدیک به پنجاه سال است که در نقاط مختلف دنیا مطرح است. در این مدت تحقیقات زیادی بر روی وجود مختلف رفتاری این تیرورقها انجام شده است. همانطور که در فصل پیش نیز اشاره شد، مزیت اصلی استفاده از جان موجدار، افزایش کمانش در مقابل نیروهای برشی در جان تیرورقها می‌باشد. لذا محققین بیشتر سعی کرده‌اند که این جنبه‌ی عملکردی تیرورقهای موجدار را در مطالعات خود مد نظر قرار دهند. در ادامه مروری بر روی مطالعات مهم انجام شده در این حوزه که بیشتر بر روی موج ذوزنقه‌ای انجام شده، ارائه می‌شود.

### ۱-۲- مطالعات انجام شده برای تعیین ظرفیت برشی جان موجدار ذوزنقه‌ای:

در سال ۱۹۸۱، در دانشگاه چالمرز، تحقیقاتی بر روی بررسی رفتار تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای آغاز شد. در این آزمایشات، پانزده تیرورق با ارتفاعهای متفاوت جان مورد آزمایش قرار گرفتند و نشان داده شد که شکل کمانش جان، کاملاً با عمق جان تیرورق در ارتباط است. نتایج و روش انجام آزمایشات مذکور در دو مقاله جداگانه با عنوان مقاومت برشی جان تیرورقهای با جان موجدار توسط دکتر القالی منتشر شد. در تحقیق اول چهار تیرورق مورد آزمایش قرار گرفت و در تحقیق دوم ۴۲ نمونه در قالب بیست و یک تیرورق مورد آزمایش قرار گرفت و روابطی برای بررسی تنشهای برشی در جان موجدار ارائه شد.

در این تحقیقات از روش‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای نیز برای بررسی نحوه خرابی تیرورقها استفاده شد و در نهایت نشان داده شد که کمانش موضعی بیشتر در موجهای با دامنه بیشتر اتفاق می‌افتد، در حالی که کمانش کلی جان تیرورق بیشتر در حالتی که دامنه و ضخامت جان کمتر است به وقوع می‌پیوند. مدل پیشنهادی القالی تا حال حاضر نیز با اندک تغییراتی برای بیان رفتار کمانش جان تیرورقهای با جان ذوزنقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۱-۱- جزییات آزمایش انجام شده توسط دکتر القالی و همکارانش [۱]:

چهار آزمایش اولیه در سال ۱۹۹۲ روی دو تیر با جان موجدار انجام گرفت. ارتفاع جان یکی از تیرهای آزمایش از  $45/7\text{cm}$  با پهنای بال  $15/2\text{cm}$  و ضخامت  $1/3\text{cm}$  ساخته شده بود. در تیر با ارتفاع  $30/5\text{cm}$  یک پانل برشی از جان موجدار ذوزنقه‌ای به ضخامت  $0/5\text{mm}$  و در نمونه دیگر با ضخامت  $0/75\text{mm}$  قرار داشت و جان موجدار در هر پانل به طور پیوسته به بالها جوش شده بود و تقویت کننده‌های قائم نیز به یک طرف جان جوش شدند. ولی در تیر به ارتفاع  $45/7\text{cm}$  هر دو پانل با ضخامت  $0/75\text{mm}$  و جوش بین جان و بال منقطع در یک نمونه و پیوسته در پانل دیگر انجام گرفت. شکل و ابعاد موج برای تمام پانلهای آزمایش شده در جدول (۱-۲) نشان داده شده است. بعد از انجام آزمایش بر روی هر پانل تیر، یک آزمایش ثانویه تکمیلی هم انجام گرفت. چهار آزمایش دیگر نیز بر روی تیر به عمق  $30/5\text{cm}$  و ارتفاع  $45/7\text{cm}$  ، به ترتیب برای جوش متناوب و پیوسته انجام گرفته است.

---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

**Corrugation Dimensions for Beams Tested by Smith**

Gauge number (1)	Thickness (mm) (2)	<i>q</i> (mm) (3)	<i>s</i> (mm) (4)	<i>d</i> (mm) (5)	<i>b</i> (mm) (6)	<i>h<sub>r</sub></i> (mm) (7)
26	0.455 (0.0179)	130.6 (5.14)	158.2 (6.227)	33.3 (1.3125)	31.9 (1.2575)	33.3 (1.3125)
22	0.750 (0.0295)	130.6 (5.14)	158.2 (6.227)	33.3 (1.3125)	31.9 (1.2575)	33.3 (1.3125)

Note: Numbers in parentheses are in inches

**جدول(۱-۲): ابعاد موج ذوزنقه‌ای جان برای تیرهای آزمایش شده توسط اسمیت**

پانل برش چین، در یکی از چهار آزمایش انجام شده توسط Smith در سال ۱۹۹۲ به طور ناگهانی گسیخته شده بود و علت آن گسیختگی جوش در بال بالاتر جان بود. ضخامت جان در این نمونه ۰/۴۵mm بود. نتایج حاصل از سه آزمایش روی تیر به ارتفاع ۳۰/۵cm انجام گرفته و بعد از تقویت کردن پانل گسیخته شده تا رسیدن به بار ۱۳/۳۵ton که معادل یک نیروی برش ۶/۶۷۵ton است، آزمایش ادامه یافت. جان در این نمونه در اثر بار واردہ به طور موضعی در مجاورت بار، کمانش کرد و در محل اتصال به بال، از آن جدا شد. از طرف دیگر جان تیر با ارتفاع ۴۵/۷cm که به طور متنابض به بالها و در امتداد قسمتهای افقی موج جوش داده شده بود، در یک بار معادل با ۴/۱ton به علت گسیختگی در انتهای جوشهای متنابض جان به بال و بدون اینکه هیچ کمانشی اتفاق بیافتد، گسیخته شده بود که بیانگر عدم تحمل جوش در مقابل بار بحرانی کمانش بود. آزمایش دوم روی تیر به ارتفاع ۴۵/۷cm انجام گرفت و تیر تحت بار ۱۸/۵ton معادل با نیروی برشی ۹/۲ton گسیخته شد. این گسیختگی ناشی از کمانش موضعی در عرض قسمتهای صاف یک موج ذوزنقه‌ایی اتفاق افتاد.

نتیجه نهایی از آزمایشات فوق الذکر، وجود تنشهای نسبتاً بالا در جوش این تیرها را مورد تایید قرار داد. همچنین مشخص شد که اگر اتصال بال به جان گسیخته شود، جان قادر نیست به مقاومت کمانشی نهایی خود برسد. ضمناً معلوم شد که ضخامت ۰/۵ میلی‌متر برای جان مقدار بسیار کمی است و نباید در آزمایشات بعدی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج ازمایشات فوق الذکر در جدول ۲-۲ آمده است.

Test Results by Smith						
Specimen number (1)	Thick-ness (in.) (2)	Yield stress (ksi) (3)	Failure load (kip) (4)	Thick-ness (mm) (5)	Yield stress (MPa) (6)	Failure load (KN) (7)
B12CW22S	0.0295	69.13	30.00	0.749	476.31	133.50
B18IW22S	0.0295	84.65	18.40	0.749	583.24	81.88
B18CW22S	0.0295	87.30	40.90	0.749	601.50	182.01

جدول (۲-۲): نتایج ازمایشات انجام شده توسط اسمیت

در سال ۱۹۹۵ نیز همیلتون ازمایشات را بر روی ۲۱ نمونه تیر با جان ذوزنقه‌ای دنبال کرد. در این آزمایشات، از چهار شکل متفاوت برای موج ذوزنقه‌ای استفاده شد که مشخصات این چهار نوع در جدول (۳-۲) و ابعاد نمونه‌های مذکور در جدول (۴-۲) ارائه شده است [1].

Panel Type (1)	b (mm) (2)	d (mm) (3)	h <sub>r</sub> (mm) (4)	θ (degrees) (5)	s (mm) (6)	q (mm) (7)
UFS	19.8 (0.78)	11.9 (0.47)	14.2 (0.56)	50.0	76.2 (3.00)	63.5 (2.50)
UF1X	38.1 (1.50)	25.4 (1.00)	25.4 (1.00)	45.0	148.1 (5.83)	127.0 (5.00)
UFX-36	41.9 (1.65)	23.4 (0.92)	33.3 (1.31)	55.0	165.1 (6.50)	130.6 (5.14)
UF2X	49.8 (1.96)	26.4 (1.04)	50.8 (2.00)	62.5	214.1 (8.43)	152.4 (6.00)

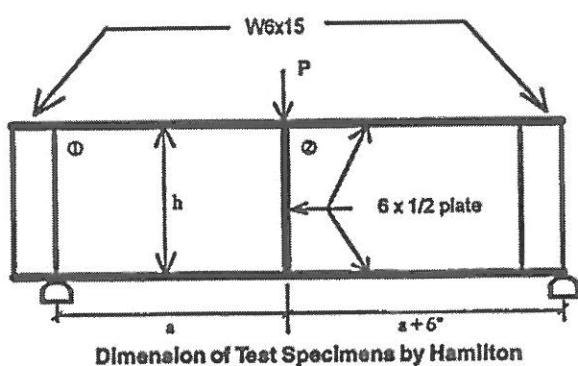
Note: Numbers in parentheses are in inches.

جدول (۳-۲): ابعاد موجههای ذوزنقه‌ای آزمایش شده توسط همیلتون [1]

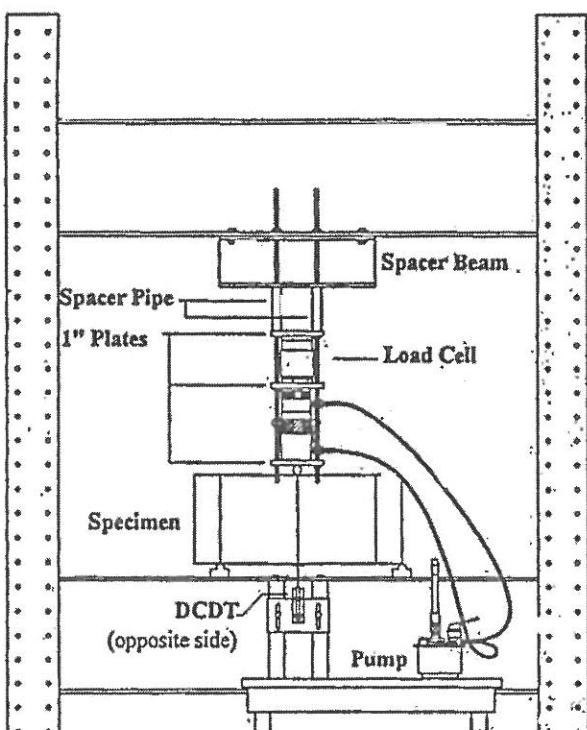
Identification (1)	a (in.) (2)	h (in.) (3)	a (mm) (4)	h (mm) (5)	Aspect ratio (a/h) (6)	Configuration (7)
V-PILOTA or B	12	12	304.8	304.8	1:1	UF1X
V121216A or B	12	12	304.8	304.8	1:1	UF1X
V121221A or B	12	12	304.8	304.8	1:1	UFX-36
V121232A or B	12	12	304.8	304.8	1:1	UF2X
V121809A or C	18	12	457.2	304.8	1.5:1	UFS
V121832A or B	18	12	457.2	304.8	1.5:1	UF2X
V122409A or C	24	12	609.6	304.8	2:1	UFS
V122421A or B	24	12	609.6	304.8	2:1	UFX-36
V122432A or B	24	12	609.6	304.8	2:1	UF2X
V181209A or C	12	18	304.8	457.2	1:1.5	UFS
V181216B or C	12	18	304.8	457.2	1:1.5	UF1X
V181221A or B	12	18	304.8	457.2	1:1.5	UFX-36
V181232A or B	12	18	304.8	457.2	1:1.5	UF2X
V181809A or C	18	18	457.2	457.2	1:1	UFS
V181816A or B	18	18	457.2	457.2	1:1	UF1X
V181821A or B	18	18	457.2	457.2	1:1	UFX-36
V181832A or B	18	18	457.2	457.2	1:1	UF2X
V241209A or C	12	24	304.8	609.6	1:2	UFS
V241216A or B	12	24	304.8	609.6	1:2	UF1X
V241221A or B	12	24	304.8	609.6	1:2	UFX-36
V241232A or B	12	24	304.8	609.6	1:2	UF2X

جدول (۴-۲): ابعاد پانلهای آزمایش شده توسط همیلتون

برای اطمینان از اینکه برش حتما در پانل انتخابی اتفاق بیفت، یکی از دهانه‌های تیر نسبت به دهانه دیگر بزرگتر در نظر گرفته شد تا برش حداکثر در پانل کوچکتر ایجاد شود (شکل ۱-۲). بالها و سخت کننده‌های مرکزی در تمام تیرها از ورق  $15 \times 1/3\text{cm}$  ساخته شدند. یک سخت کننده  $W6 \times 15$  نیز در هر دو انتهای صورت تقویت کننده‌های عمودی در بالای تکیه‌گاه به کار گرفته شده بود. جزئیات دستگاه آزمایش در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱-۲): ابعاد نمونه‌های آزمایش شده



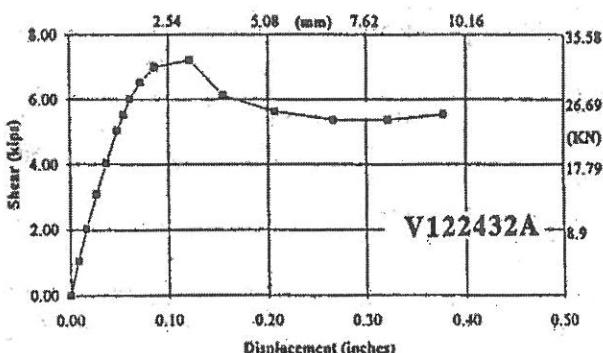
شکل (۲-۲): ابعاد دستگاه آزمایش

---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

جان کلیه نمونه‌ها دارای ضخامت ۰/۷۵ میلیمتر و ۰/۶۴ میلیمتر بود. تیرهای با جان ۰/۷۵ میلیمتر با حرف B و تیرهای با جان ۰/۶۴ میلیمتر با حرف A نشان داده شده‌اند. بدلیل حساسیت جوش، عمل جوشکاری در کارخانه و با کیفیت بالایی انجام شد. همانطور که در شکل (۳-۲) مشخص شده است، منحنی بار-تغییر مکان نشان داده شده در شکل (۳-۲) مقداری مقاومت پس از کمانش را برای نمونه‌ها نشان می‌دهد. گسیختگی ناگهانی نیز ناشی از کمانش بوده و ظرفیت تحمل بار بعد از گسیختگی تیر کاهش می‌یابد.



شکل (۳-۲): منحنی بار تغییر مکان یکی از نمونه‌های آزمایش شده

در قسمت دوم تحقیق، از یک مدل کامپیوتربی برای شبیه‌سازی رایانه‌ای نمونه‌های مذکور استفاده شد. نتایج حاصل از مدل کامپیوتربیا نتایج آزمایشات از روند مشابهی پیروی می‌کردند و خرابی اتفاق افتاده در نمونه‌ها نیز همان خرابی مشاهده شده در مدل المان محدود بود. با این تفاوت که مقادیر حاصل از روش کامپیوتربی از مقادیر بالاتری نسبت به مقادیر حاصل از آزمایش برخوردار بود (جدول ۲-۵). دلیل اصلی این موضوع حضور اجتناب ناپذیر عیوب اولیه در نمونه‌های آزمایش و امکان وقوع پدیده خستگی نمونه‌ها طی بارگذاریها و باربرداری‌های گوناگون عنوان شد.

تحلیل کامپیوتربی برای نمونه‌های مذکور با در نظر گرفتن عیوب اولیه بسیار به نتایج آزمایش نزدیک است. انطباق خوب نتایج تحلیل و آزمایش زمانی به دست می‌آید که عیوب اولیه نیز در نظر گرفته شود (جدول ۲-۶).

---

 تیورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

Finite-Element versus Test Results

Panel (1)	$V_e$ (experi- ment) (kip) (2)	$V_e$ (FEM) (kip) (3)	$V_o$ (experi- ment) (KN) (4)	$V_o$ (FEM) (KN) (5)	$V_o/V_e$ (6)
V121216A	11.25	13.53	50.06	60.21	1.20
V121216B	19.70	19.04	87.67	84.73	0.97
V121221A	10.40	11.89	46.28	52.91	1.14
V121221B	16.30	19.55	72.54	87.00	1.20
V121232A	9.25	9.58	41.16	42.63	1.04
V121232B	13.75	16.20	61.19	72.09	1.18
V121809A	14.20	16.21	63.19	72.13	1.14
V121809C	12.40	16.35	55.18	72.76	1.32
V121832A	7.75	7.29	34.49	32.44	0.94
V121832B	12.00	18.79	53.40	83.62	1.57
V122409A	13.00	14.95	57.85	66.53	1.15
V122409C	13.00	17.81	57.85	79.25	1.37
V122421A	9.73	11.23	43.30	49.97	1.15
V122421B	13.76	18.66	61.23	83.04	1.36
V122432A	7.00	8.26	31.15	36.76	1.18
V122432B	11.00	12.12	48.95	53.93	1.10
V181209A	18.20	22.94	80.99	102.08	1.26
V181209C	19.96	24.54	88.82	109.20	1.23
V181216B	21.00	17.33	93.45	77.12	0.83
V181216C	26.86	29.85	119.53	132.83	1.11
V181221A	13.90	15.03	61.86	66.88	1.08
V181221B	22.00	25.69	97.90	114.32	1.17
V181232A	11.60	9.97	51.62	44.37	0.86
V181232B	18.00	17.70	80.10	78.77	0.98
V181809A	18.50	22.23	82.33	98.92	1.20
V181809C	17.45	20.23	77.65	90.02	1.16
V181816A	16.80	18.76	74.76	83.48	1.12
V181816B	21.62	26.85	96.21	119.48	1.24
V181821A	12.70	15.81	56.52	70.35	1.25
V181821B	21.00	23.53	93.45	104.71	1.12
V181832A	11.90	11.96	52.96	53.22	1.01
V181832B	17.68	16.82	78.68	74.85	0.95
V241209A	15.91	19.10	70.80	85.00	1.20
V241209C	17.83	19.97	79.34	88.87	1.12
V241216A	16.99	24.50	75.61	109.03	1.44
V241216B	29.98	36.72	133.41	163.40	1.23
V241221A	17.37	20.79	77.30	92.52	1.20
V241221B	28.49	33.62	126.78	149.61	1.18
V241232A	15.53	15.80	69.11	70.31	1.02
V241232B	22.81	24.15	101.51	107.47	1.06

جدول (۵-۲): نتایج حاصل از آنالیز کامپیوترا

مشاهده شد که گسیختگی نمونه‌ها تماماً در اثر کمانش موضعی یا کمانش کلی بوده است. بنابراین آقای القالی و همکارانش پس از دسته‌بندی نوع کمانش جان به بررسی روابط تعوری حاکم بر این دو نوع خرابی یعنی کمانش موضعی جان و کمانش کلی جان پرداخته‌اند. در ادامه این دو حالت کمانشی برای نمونه‌ها مد نظر قرار می‌گیرد.

Effect of Imperfections, Specimen V121221B

$V_o$ (kip) (1)	Imper- fection amplitude (in.) (2)	$V_r$ (kip) (3)	$V_o$ (KN) (4)	Imper- fection amplitude (mm) (5)	$V_r$ (KN) (6)	$V_r/V_o$ (7)	$(V_r -$ $V_{no})$ $/V_{no}$ (%) (8)
16.3	0.00	19.55	72.54	0.00	87.00	1.20	0.0
16.3	0.31	18.59	72.54	7.87	82.73	1.14	-4.9
16.3	0.62	16.61	72.54	15.75	73.91	1.02	-15.0

Note:  $V_{no}$  = finite-element shear capacity with no imperfections.

جدول (۲-۶): نتایج حاصل از کامپیوتری با در نظر گرفتن عیوب اولیه

### ۱-۱-۱-۲- ظرفیتنهایی برش بر اساس کمانش موضعی:

در تمام نمونه‌هایی که کمانش به صورت موضعی اتفاق افتاده است، مشاهده شد که این کمانش محدود به قسمتهای صاف یک موج ذوزنقه‌ای است. اگر قسمتهای صاف یک موج ذوزنقه‌ای، به صورت یک سری صفحات مسطح که از بالا و پایین به بالها و از اطراف به قسمتهای مورب موج متصل هستند در نظر گرفته شود، آنگاه تنش الاستیک این صفحات به صورت زیر قابل محاسبه است.

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

که در آن  $b$  پهنه‌ای قسمت مسطح موج و  $t$  ضخامت جان است.  $k_s$  ضریب کمانشی است که براساس شرایط تکیه‌گاهی تعیین می‌گردد. اگر اتصال قسمت مسطح موج با بال تیرورق در بالا و پایین دارای شرایط گیردار، و اتصال قسمت مسطح موج از طرف چپ و راست دارای شرایط تکیه‌گاهی ساده فرض شود، آنگاه:

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

که  $h$  ارتفاع مقطع است. حال اگر شرایط هر چهار طرف صفحه مسطح موج گیردار فرض شود، آنگاه:

$$k_s = 8.98 + 5.6 \left( \frac{b}{h} \right)^2 \quad (3-2)$$

اگر  $\tau_{cre} > 0.8\tau_y$  باشد کمانش غیر الاستیک رخ می‌دهد و  $\tau_{cre}$  باید به صورت زیر اصلاح شود.

$$\tau_{cre} = (0.8\tau_{cre}\tau_y)^{0.5} \quad (4-2)$$

یادآوری می‌شود که برای نمونه‌های آزمایش شده چهار نوع ابعاد مختلف برای شکل موج ذوزنقه‌ایی اختبار شد که به غیر از نمونه‌های ساخته شده با ابعاد اولین موج بقیه نمونه‌ها به وسیله کمانش موضعی باربری خود را از دست دادند (شکل ۴-۲). بنابراین قائدتاً روابط تئوری فوق باید برای آنها صدق کند. همانطور که در جدول (۷-۲) نشان داده شده است، اگر شرایط چهار طرف گیردار برای کمانش موضعی قسمت مسطح جان در نظر گرفته شود، نتایج تئوری مقادیر دست بالایی را ارائه می‌دهند و اگر با فرض دو طرف گیردار و دو طرف ساده نتایج بدست اید، نتایج تئوری مقادیر دست پایینی نسبت به نتایج آزمایش ارائه میدهند. بنابراین یک مقدار متوسط برای نمونه‌ها از طریق تئوری پیشنهاد شده است که با نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارد (جدول ۷-۲).

علاوه بر کار رفته در جدول (۷-۲) مبین مفاهیم زیر است.

$\tau_{cre}$  بیانگر تنش در حالت کمانش الاستیک

$\tau_{ssf}$  بیانگر تنش برش بحرانی با فرض دو طرف گیردار دو طرف ساده برای پانل مسطح موج

$\tau_{fx}$  بیانگر تنش در حالت الاستیک با فرض گیرداری هر چهار طرف

$$\tau_{ave} = \left( \frac{\tau_{ssf} + \tau_{fx}}{2} \right)$$

$\tau_e$  بیانگر نتایج حاصل از آزمایش برای تنش برشی

$\tau_f$  بیانگر نتایج حاصل از شبیه سازی رایانه‌ای برای تنش برشی

باید توجه کرد که اگر  $\tau_{cre}$  از مقدار  $0.8\tau_y$  بیشتر شود، باید از کمانش غیرالاستیک استفاده شود.

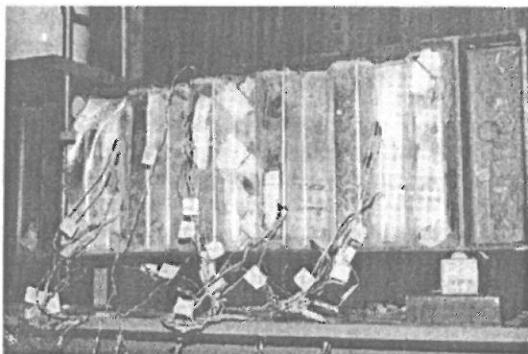
## تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای

Stresses Based on Local Buckling versus Stresses from Finite-Element Analysis

Panel (1)	$\tau_r$ (MPa) (2)	$\tau_o$ (MPa) (3)	$\tau_o/\tau_r$ (4)	$\tau_y$ (MPa) (5)	$\tau_{ref}$ (MPa) (6)	$\tau_t/\tau_{ref}$ (7)	$\tau_a$ (MPa) (8)	$\tau_t/\tau_a$ (9)	$\tau_r/\tau_{av}$ (10)
V121216A	309.5 (44.92)	257.3 (37.35)	0.83	389.8 (56.58)	282.6 (41.02)	1.10	378.1 <sup>a</sup> (54.87)	0.82	0.94
V121216B	363.2 (52.71)	375.8 (54.54)	1.04	383.8 (55.71)	353.3 <sup>a</sup> (51.27)	1.03	449.9 <sup>b</sup> (65.29)	0.95 <sup>b</sup>	0.99
V121221A	275.3 (39.95)	240.8 (34.95)	0.88	383.8 (55.71)	229.0 (33.23)	1.20	337.3 <sup>a</sup> (48.96)	0.82	0.97
V121221B	363.2 (52.72)	302.9 (43.96)	0.83	383.8 (55.71)	330.4 <sup>a</sup> (47.95)	1.10	420.3 <sup>b</sup> (61.00)	0.95 <sup>b</sup>	1.02
V121232A	218.3 (31.68)	210.8 (30.59)	0.97	383.8 (55.71)	129.3 (18.76)	1.69	207.8 (30.16)	1.05	1.30
V121232B	303.0 (43.97)	257.1 (37.32)	0.85	369.9 (53.69)	191.8 (27.84)	1.58	302.1 <sup>a</sup> (43.85)	1.00	1.23
V121832A	116.1 (24.11)	176.6 (25.63)	1.06	405.8 (58.89)	129.3 (18.76)	1.29	207.8 (30.16)	0.80	0.99
V121832B	298.1 (43.26)	190.3 (27.62)	0.64	324.2 (47.05)	263.0 <sup>a</sup> (38.17)	1.13	333.5 <sup>b</sup> (48.40)	0.92 <sup>b</sup>	1.02
V122421A	242.4 (35.18)	210.0 (30.48)	0.87	358.0 (51.96)	263.4 (38.23)	0.92	349.4 <sup>a</sup> (50.71)	0.69	0.79
V122421B	347.9 (50.49)	256.5 (37.23)	0.74	368.0 (53.41)	322.5 <sup>a</sup> (46.8)	1.08	410.2 <sup>b</sup> (59.53)	0.95 <sup>b</sup>	1.01
V122432A	188.2 (27.31)	159.5 (23.15)	0.85	411.8 (59.76)	129.3 (18.76)	1.46	207.8 (30.16)	0.91	1.12
V122432B	227.4 (33.01)	206.4 (29.96)	0.91	366.0 (53.12)	190.6 (27.66)	1.19	299.5 <sup>a</sup> (43.47)	0.76	0.93
V181216B	276.4 (40.12)	334.9 (48.61)	1.21	356.8 (51.78)	254.8 (36.98)	1.09	344.9 <sup>a</sup> (50.06)	0.80	0.92
V181216C	382.1 (55.46)	343.9 (49.91)	0.90	391.5 (56.82)	351.9 <sup>a</sup> (51.07)	1.09	450.1 <sup>b</sup> (65.33)	0.98 <sup>b</sup>	1.03
V181221A	239.7 (34.79)	221.7 (32.18)	0.93	333.4 (48.39)	211.2 (30.65)	1.14	303.2 <sup>a</sup> (44.01)	0.79	0.93
V181221B	327.8 (47.57)	280.7 (40.74)	0.86	349.6 (50.74)	303.8 <sup>a</sup> (44.09)	1.08	388.1 <sup>b</sup> (56.33)	0.94 <sup>b</sup>	1.00
V181232A	162.4 (23.57)	188.9 (27.42)	1.16	318.2 (46.19)	110.1 (15.98)	1.48	178.6 (25.92)	0.91	1.13
V181232B	229.6 (33.33)	233.6 (33.90)	1.02	347.5 (50.44)	173.5 (25.18)	1.32	279.7 <sup>a</sup> (40.60)	0.82	1.01
V181816A	287.2 (41.69)	257.2 (37.33)	0.90	341.3 (49.53)	274.8 <sup>a</sup> (39.88)	1.05	351.4 <sup>b</sup> (51.00)	0.84 <sup>b</sup>	0.93
V181816B	354.4 (51.44)	285.4 (41.42)	0.81	354.2 (51.40)	324.7 <sup>a</sup> (47.12)	1.09	415.2 <sup>b</sup> (60.26)	1.00 <sup>b</sup>	1.04
V181821A	242.1 (35.13)	194.4 (28.22)	0.80	318.3 (46.19)	229.2 <sup>a</sup> (33.26)	1.06	308.6 <sup>a</sup> (44.79)	0.78	0.90
V181821B	310.6 (45.08)	277.2 (40.23)	0.89	343.9 (49.91)	291.2 <sup>a</sup> (42.27)	1.07	372.1 <sup>b</sup> (54.01)	0.90 <sup>b</sup>	0.98
V181832A	190.8 (27.69)	189.8 (27.55)	1.00	397.8 (57.74)	114.9 (16.67)	1.66	186.2 (27.03)	1.02	1.27
V181832B	218.3 (31.68)	229.4 (33.30)	1.05	334.6 (48.57)	173.5 (25.18)	1.26	274.5 <sup>a</sup> (39.84)	0.80	0.98
V241216A	281.3 (40.83)	195.1 (28.32)	0.69	341.3 (49.53)	273.7 <sup>a</sup> (39.73)	1.03	351.1 <sup>b</sup> (50.95)	0.82 <sup>b</sup>	0.92
V241216B	340.1 (49.36)	277.7 (40.30)	0.82	339.2 (49.23)	338.4 <sup>a</sup> (49.11)	1.01	434.0 <sup>b</sup> (62.99)	1.00 <sup>b</sup>	1.00
V241221A	248.7 (36.09)	207.8 (30.16)	0.84	351.7 (51.05)	209.5 (30.41)	1.19	311.1 <sup>a</sup> (45.15)	0.80	0.96
V241221B	321.7 (46.69)	272.6 (39.57)	0.85	368.5 (53.48)	310.6 <sup>a</sup> (45.08)	1.04	398.0 <sup>b</sup> (57.77)	0.87 <sup>b</sup>	0.95
V241232A	185.1 (26.87)	182.0 (26.41)	0.98	388.5 (56.38)	118.4 (17.19)	1.56	193.3 (28.05)	0.96	1.19
V241232B	231.0 (33.53)	218.3 (31.68)	0.95	337.1 (48.93)	177.6 (25.78)	1.30	279.6 <sup>a</sup> (40.58)	0.83	1.01

Note: Numbers in parentheses are in ksi; and  $\tau_{av} = 0.5(\tau_{ref} + \tau_o)$ .<sup>a</sup>Inelastic buckling controls.<sup>b</sup> $\tau_r$  controls.

جدول (۷-۲): مقایسه بین نتایج حاصل از کمانش موضعی و نتایج آزمایش



Failure Mode of B12CW22S

شکل (۴-۲): کمانش موضعی یکی از نمونه‌های ازمایش شده

#### ۱-۱-۲-۲- ظرفیت نهایی برش بر اساس کمانش کلی:

اگر عمق موج ذوزنقه‌ای کم باشد و یا عرض قسمت مسطح پانل کوچک باشد، معمولاً کمانش به صورت کلی در طول چند موج اتفاق می‌افتد و دیگر به صورت موضعی محدود به قسمتهای مسطح موج نیست (شکل ۲-۵). در این حالت، کل صفحه جان به صورت صفحات ارتوتروپیک عمل می‌کند. تنش کمانشی در حالت الاستیک برای صفحات ارتوتروپیک به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$\tau_{c,g} = k_s \left( \frac{D_x^{0.25} D_y^{0.75}}{t h^2} \right) \quad (5-2)$$

که در رابطه فوق مقادیر بکار رفته به شکل زیر تعریف شده‌اند.

$$D_x = \left( \frac{q}{s} \right) \frac{E t^3}{12} \quad (6-2)$$

$$D_y = \frac{EI_y}{q} \quad (7-2)$$

$t$  ضخامت جان و  $k_s$  ضریب کمانشی برابر  $3/16$  برای شرایط تکیه‌گاه ساده و  $59/9$  برای شرایط تکیه‌گاه گیردار است.

باز هم اگر  $\tau_{cre} > 0.8\tau_y$  باشد، کمانش غیر الاستیک رخ می‌دهد و  $\tau_{c,g}$  باید به صورت زیر اصلاح شود.

$$\tau_{cre} = (0.8\tau_{cre}\tau_y)^{0.5} \quad (8-2)$$

---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

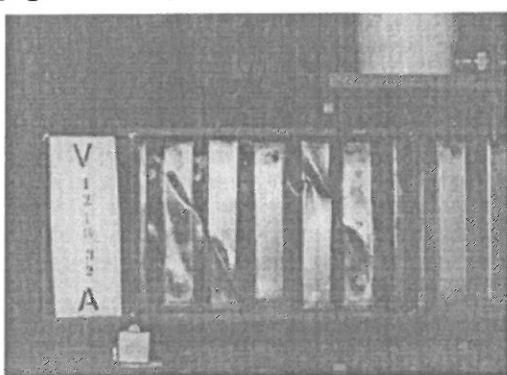
از بین نمونه‌های آزمایش شده فقط نمونه‌های ساخته شده از نوع موج ذوزنقه‌ای شماره یک به دلیل کم بودن عمق و متراکم بودن امواج دچار کمانش کلی شدند. جدول (۸-۲) بیانگر مقادیر حاصل از روابط تئوری، آزمایشگاهی و کامپیوتری نمونه‌هایی است که در اثر کمانش کلی گسیخته شده‌اند. از بین ۱۲ نمونه مندرج در جدول (۸-۲) چهار نمونه اول، دارای بار بحرانی بیشتر از حد جاری شدن هستند و در نتیجه تیز در اثر جاری شدن باربری خود را از دست می‌دهد. چهار نمونه دوم بوسیله کمانش غیر الاستیک و چهار نمونه آخر بوسیله کمانش الاستیک گسیخته شده‌اند. فرض رفتار ارتوتروپیک با توجه به نتایج آزمایشات و تحلیلهای کامپیوتری در حد قابل قبول است.

Stresses Based on Global Buckling Orthotropic Plate versus Finite-Element Analysis

Specimen (۱)	$\tau_t$ (MPa) (2)	$\tau_{cr}$ (MPa) (3)	$\tau_s/\tau_t$ (4)	$\tau_y$ (MPa) (5)	$\tau_{cr}$ (MPa) (6)	$\tau_{ed}$ (MPa) (7)	$\tau_{sp}$ (MPa) (8)	$\tau_t/\tau_{cr}$ (9)
V121809A	334.8 (48.59)	293.3 (42.57)	0.88	330.2 (47.92)	893.7 (129.7)	485.9 (70.52)	330.2 (47.92)	1.01
V121809C	377.0 (54.72)	285.9 (41.50)	0.76	385.8 (56.00)	845.8 (122.8)	511.0 (74.16)	385.8 (56.00)	0.98
V122409A	305.5 (44.34)	265.6 (38.55)	0.87	338.1 (49.07)	898.6 (130.4)	493.0 (71.55)	338.1 (49.07)	0.90
V122409C	391.8 (56.87)	286.0 (41.51)	0.73	358.0 (51.96)	866.0 (125.7)	498.0 (72.28)	358.0 (51.96)	1.10
V181209A	399.1 (57.93)	316.7 (45.96)	0.79	397.8 (57.74)	353.4 (51.29)	335.3 (48.67)	335.3 (48.67)	1.19
V181209C	391.2 (56.78)	318.3 (46.20)	0.81	341.6 (49.58)	369.2 (53.58)	317.6 (46.10)	317.6 (46.10)	1.23
V181809A	354.6 (51.26)	295.0 (42.82)	0.83	356.7 (51.77)	369.2 (53.58)	324.6 (47.11)	324.6 (47.11)	1.09
V181809C	316.0 (45.87)	272.6 (39.57)	0.86	322.4 (46.79)	372.9 (54.12)	310.1 (45.01)	310.1 (45.01)	1.02
V241209A	223.8 (32.48)	186.4 (27.06)	0.83	349.6 (50.74)	209.9 (30.46)	—	209.9 (30.46)	1.07
V241209C	229.3 (33.28)	204.8 (29.72)	0.89	358.0 (51.96)	211.8 (30.72)	—	211.8 (30.74)	1.08

Note:  $\tau_{cr} = \min(\tau_t, \tau_{ed}, \tau_{sp})$ , and the numbers in parentheses are in ksi.

جدول (۸-۲): نتایج حاصل از آنالیز کامپیووتریدر مقایسه با نتایج آزمایشات



Failure Mode of V121832A

شکل (۵-۲): کمانش کلی جان تیرورق ذوزنقه‌ای

### ۲-۱-۲- جمع بندی مطالعات بر روی رفتار برشی تیرورقهای با جان موجدار:

در یک جمع بندی کلی نتیجه مطالعات فوق الذکر را می‌توان در این عبارت خلاصه کرد که تیرهای با جان موج دار از نوع ذوزنقهای تحت نیروهای برشی بوسیله کمانش موضعی یا کمانش کلی جان جاری می‌شوند. برای محاسبه بار بحرانی در حالت کمانش موضعی می‌توان از روابط مربوط به کمانش الاستیک صفحات استفاده کرد و برای محاسبه بار بحرانی در حالت کمانش کلی فرض رفتار ارتوتروپیک از دقت قابل قبولی برخوردار است. چه در حالت کمانش موضعی و چه در حالت کمانش کلی، اگر تنش بحرانی کمانش از تنش جاری شدن جان بیشتر شود، بار گسیختگی به وسیله جاری شدن جان کنترل می‌گردد. علاوه بر مفاهیم فوق، موارد زیر به عنوان خلاصه نتایج تحقیقات انجام شده مذکور در بند ۱-۲ قابل ذکر است:

- جانهای نازک به علت کمانش موضعی یا کلی گسیخته می‌شوند.
- برای جانهایی که در معرض برش قرار دارند، مقاومت نهایی می‌تواند با دقت قابل قبولی از روابط مربوط به صفحات ارتوتروپیک بدست آید.
- هنگامی که موجهای ذوزنقهای باز هستند، یعنی زاویه موج ذوزنقهای کم است، ظرفیت پانل توسط کمانش موضعی برای قسمتهای صاف موج کننده است. کمانش کلی معمولاً برای موجهای ذوزنقهای متراکم‌تر که با کم کردن عرض مسطح بال و یا کاهش زاویه موج حاصل می‌شوند، به وقوع می‌پیوندد و فرض رفتار ارتوتروپیک برای آنها صادق است.
- برای کاربردهای عملی توصیه می‌شود که هر دو مقادیر کمانش اصلی و کمانش موضعی محاسبه شده و مقدار کوچکتر انتخاب گردد.

البته لازم به ذکر است که اگر چه کارهای تحقیقاتی انجام شده توسط القالی بر روی ظرفیت برشی تیرورقهای با جان موجدار، بعداً محور محاسبات مهندسی قرار گرفت. اما در سالهای بعدی نیز محققین مطالعات تکمیلی را ببروی کارهای القالی انجام دادند. مثلاً در سال ۲۰۰۵ دکتر سید احمد جزیيات بیشتری در رابطه با معادلات پیشنهادی القالی مطرح کرد و نشان داد که جان تیرورقهای با جان موجدار تنها نیروهای برشی را انتقال می‌دهند و نیروهای خمشی بیشتر توسط بالهای تیرورق تحمل می‌شوند [2]. او همچنین در مورد شرایط مرزی تیرورقهای با جان موجدار بحث کرد و اضافه کرد که تیرورقهای با جان موجداری که بال آنها فولادی است، بیشتر شرایط اتصال ساده در بین جان و بال عمل می‌کند. در حالی که برای جانهای موجداری که در کنار بالهای بتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، فرض رفتار تکیه‌گاه گیردار در میان بال و جان موجدار فرض معقولتریست.

همچنین در تحقیق اخیری که بر روی نیروهای برشی و نحوه عملکرد آن در جان تیرورقهای با جان موجدار در کره انجام شد، انتقاداتی به روش محاسبه تنشهای برشی که توسط آقای القالی پیشنهاد شده بود، انجام شد. در این تحقیق، روش قبلی مبنی بر کمانش موضعی و یا کلی جان را تا حدی محافظه کارانه اعلام نمود و پیشنهاد کرد که به جای آن، به اندرکنش این دو نوع کمانش توجه شود و به نوعی تنשنهایی بحرانی برای نیروهای برشی در تیرورقهای با جان موجدار، از ترکیب هر دو تنش موضعی و کلی استخراج گردد [4,3].

## ۲-۲- مطالعات انجام شده برای تعیین ظرفیت خمثی جان موجدار ذوزنقه‌ای:

در بخش قبل ظرفیت پرشی تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای ارائه شد. در رابطه با ظرفیت خمثی تیرورقهای با جان موجدار، همیلتون شاید اولین آزمایشات را در سال ۱۹۹۳ بر روی تیرورقهای با جان ذوزنقه‌ای انجام داد و سپس دکتر القالی روش‌های شبیه‌سازی کامپیوترا را برای بررسی ظرفیت خمثی این تیرها در سال ۱۹۹۷ بکار گرفت [۵]. او شش نمونه آزمایشگاهی را تا حد نهایی خمثی بارگذاری کرد و نتیجه گرفت که در هر شش نمونه، خرابی تیرورق به صورت حد جاری شدن بال و کمانش آن است. به این صورت که تنفس در بال تا حد جاری شدن به صورت خطی افزایش می‌یابد و سپس بال به صورت عمودی کمانه کرده و نمونه باربری خود را از دست می‌دهد. با این توصیف القالی نتیجه‌گیری کرد که تنشهای خمثی در جان بسیار آندک است و عملکاران جان در تحمل خمث نقشی ندارد. طبعاً اندرکنشی نیز بین خمث و برش در جان تیرورق وجود ندارد و تحمل خمث بطور کامل توسط بالهای تیرورق موجدار انجام می‌شود.

## ۱-۲- جزییات آزمایش انجام شده بر روی ظرفیت خمثی تیرورقهای با جان ذوزنقه‌ای:

در اینجا امکان توصیف و بررسی کلیه تحقیقات انجام گرفته درخصوص رفتار خمثی تیرورقهای با جان موج دار نیست. لذا فقط عملکرد خمثی نمونه‌هایی که توسط آقای القالی و همکارانش انجام گرفته‌اند، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد

در انجام تحلیلهای این محققین هم از روش‌های آزمایشگاهی و هم از روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی کامپیوترا استفاده شده است. مدل کامپیوترا بکاررفته قادر است نتایج حاصل از آزمایش و تحلیل را با درجه دقت بالایی بیان کند. آنالیز کامپیوترا دقیقاً همان نتایج آزمایشگاهی را تولید نمی‌کند و مقادیر بیشتری را به عنوان ظرفیت خمثی تیرورقهای ارائه می‌دهد.

مدل کامپیوترا برای بررسی اثرات عواملی مثل نسبت ضخامت بال و جان، تنشهای تسلیم، شکل چینها و رابطه تنفس-کرنش بکار گرفته شده است و توصیه‌های طراحی براساس مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی ارائه شده است.

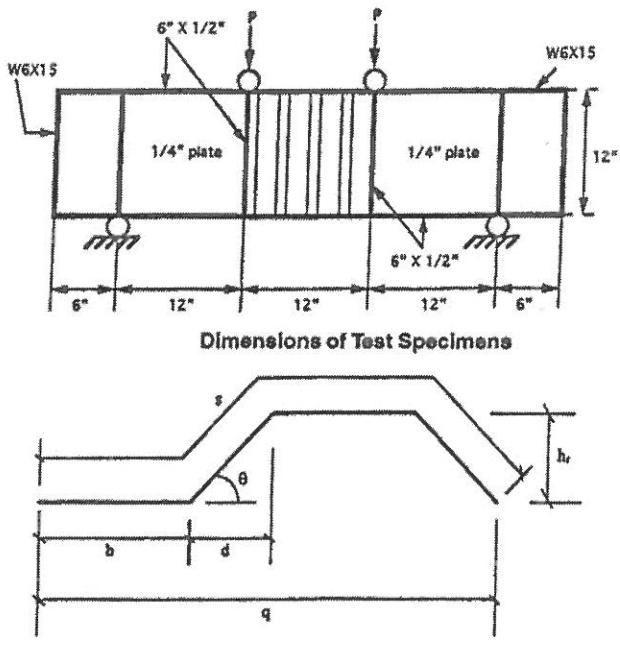
مطالعات آزمایشگاه در مجموع بر روی شش نمونه انجام شد که ابعاد آنها در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. همانطوریکه از شکل ۶-۶ ملاحظه می‌شود، تنها پانل وسط تیر ورق، به صورت موجدار ساخته شده و تحت اثر خمث خالص قرار گرفته است. پانل مرکزی از ورق به ضخامت ۶.۳ mm و دو پانل کناری نیز از ورق به ضخامت ۷.۶ mm ساخته شده است. ابعاد مقطع و نوع شکل موج در شکل

---

 تیروورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

۶-۲ و ابعاد تجاری پروفیلها در جدول ۹-۲ نشان داده شده‌اند. پانلهای مجاور تکیه‌گاه از ورقهای پهن 6.3mm ساخته شده‌اند و برای اطمینان از اینکه خرابی و شکست حتماً در پانل وسط اتفاق می‌افتد، دوپانل کناری به صورت ضربدری مهار شده‌اند.



شکل (۶-۲): شماتیک کلی آزمایشات انجام شده برای تعیین ظرفیت خمشی مقطع

در تمام نمونه‌ها بالهای تیروورق دارای عرض 15.5cm و ضخامت 12.7mm هستند. سخت کننده‌ها نیز دارای ابعاد 15 × 1.27cm سانتی‌متر هستند و سخت کننده‌های انتهایی از پروفیل W6 × 15 ساخته شده‌اند. متوسط تنش تسليم بدست آمده از بالهای نمونه‌های M09AR و M32AR حدود ۲۹۵ مگا پاسکال و متوسط تنش تسليم بدست آمده از جان نمونه‌ها ۲۹۰ مگاپاسکال می‌باشد. برای نمونه‌های با ضخامت بالاتر تنش تسليم ۲۹۳ مگا پاسکال برای نمونه‌های MxxRR، و تنش تسليم ۳۷۶ مگا پاسکال برای نمونه‌های MxxBR در نظر گرفته شده است و تنش تسليم متوسط برای مصالح جان برای نمونه‌های آزمایشی مورد نظر ۶۸۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

Panel Type (1)	<i>b</i> (mm) (2)	<i>d</i> (mm) (3)	<i>h<sub>r</sub></i> (mm) (4)	<i>θ</i> (degrees) (5)	<i>s</i> (mm) (6)	<i>q</i> (mm) (7)
UFS	19.8 (0.78)	11.9 (0.47)	14.2 (0.56)	50.0	76.2 (3.00)	63.5 (2.50)
UF1X	38.1 (1.50)	25.4 (1.00)	25.4 (1.00)	45.0	148.1 (5.83)	127.0 (5.00)
UFX-36	41.9 (1.65)	23.4 (0.92)	33.3 (1.31)	55.0	165.1 (6.50)	130.6 (5.14)
UF2X	49.8 (1.96)	26.4 (1.04)	50.8 (2.00)	62.5	214.1 (8.43)	152.4 (6.00)

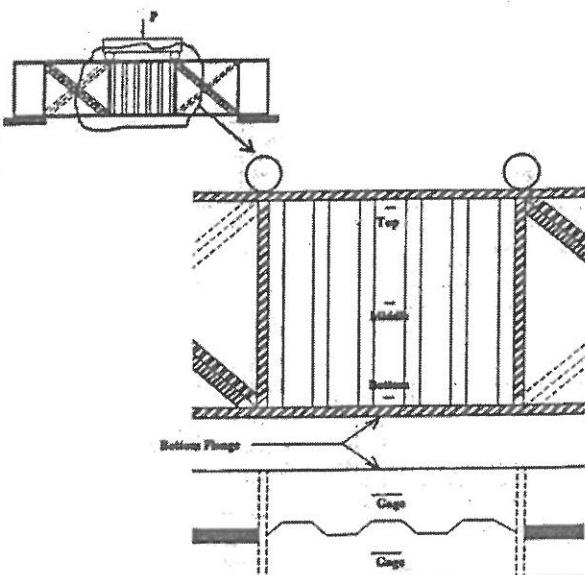
Note: Numbers in parentheses are in inches.

جدول (۷-۲): ابعاد موجهای ذوزنقه‌ای آزمایش شده

نمونه‌های آزمایشی تحت 178 ton قرار گرفتند، که به صورت تدریجی و با کنترل رایانه‌ای به نمونه‌ها وارد شده است. بارها به شکل دو بار خطی مساوی و در عرض بال بالایی و در بالای سخت‌کننده‌های میانی و در نقاط یک سوم از طول تیر و با استفاده از غلتکهایی همانند شکل (۷-۲) بر تیر وارد شده‌اند.

نمونه‌ها با روند بارگذاریهای ذیل تحت ازمایش قرار گرفته‌اند.

- از مقدار 2123 ton در دقیقه و افزایش بار تا مقدار 44.5 ton
- از مقدار 11.2 ton در دقیقه و افزایش بار تا مقدار 111.2 ton
- از مقدار 0.45 ton در دقیقه و افزایش بار تا رسیدن به گسیختگی و شکستنها



شکل (۷-۲): نحوه اعمال بار و محل کرنش‌سنجهای جان

---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

کرنش سنجهای خطی (تغییر مکان سنجها) در دو جهت پانل مورد آزمایش در موقعیت‌های نشان داده شده در شکل (۲-۲) نصب شده‌اند. این کرنش سنجها در مرکز پانل و به حد کافی به دور از اثرات موضعی سخت کننده‌ها نصب شده‌اند.

همانطوریکه در آنالیز کامپیوتری مورد تأیید قرار گرفته، این کرنش سنجها حدود یک اینچ از زیر بال بالایی و یک اینچ بالاتر از بال پایینی نصب شده‌اند. کرنش سنجهای بال پایینی به سطح پایینی بال و در فاصله  $8/3$  سانتی‌متری از لبه آزاد قرار گرفته‌اند. سیگنال‌ها توسط کرنش سنجها مشخص شده و توسط آمپلی فایر تقویت شده و نهایتاً توسط رایانه قرائت شده‌اند.

تنشهای خمی در جان (غیر از بالا و پایین جان و خیلی نزدیک بالا) تقریباً برابر صفر هستند.

**۲-۲-۲- نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی ظرفیت خمی تیرورقهای با جان ذوزنقه‌ای:**  
 شکست در تمامی نمونه‌ها ناگهانی بوده و علت آن گسیختگی (تسليم) بالهای فشاری و متعاقباً کمانش قائم جان بوده است. باید این نکته نیز ذکر شود که اگر بالهای فشاری تسليم نشوند، کمانش نیز رخ نمی‌دهد. زیرا جان موجدار همانند تکیه‌گاههای تقویت شده‌ای در مقابل کمانش الاستیک قائم بال فشاری مقاومت می‌کند. در شکل (۸-۲) می‌توان کمانش قائم بال به سمت جان را در تمام نمونه‌ها به جز نمونه یک مشاهده کرد. این نمونه به میزان بیشترین بار قابل اعمال یعنی 155.8 ton بارگذاری شده و چنین به نظر می‌رسد که بال باریک با افزایش جزئی بار اعمالی کمانش خواهد کرد. نوع بارهای گسیختگی ( $p_r$ ) و متعاقباً لنگرهای نهایی حاصله در جدول (۱۰-۲) آورده شده است.  
 صرف نظر از لنگر ناشی از مشارکت جان، ظرفیت لنگر تسليم بالا به تنها یک برابر با 80 kN·m و 231 kN·m می‌باشد و نسبتهای بین لنگر حاصل از آزمایشات و لنگر جاری شدن بال نیز در جدول (۱۰-۲) ارائه شده‌اند. با دقت در جدول (۱۰-۲) می‌توان ملاحظه کرد که سهم ظرفیت خمی جان قابل صرف نظر کردن است.

Test Results							
Specimen (1)	$P_r$ (kip) (2)	$M_{rot}$ (kip-in.) (3)	$M_{fr}$ (kip-in.) (4)	$P_r$ (kN) (5)	$M_{rot}$ (kN·m) (6)	$M_{fr}$ (kN·m) (7)	$M_{max}/M_{fr}$ (8)
M09AR	266.9	1,501	1,594	1,187.7	180.91	180.12	1.004
M16AR	285.1	1,711	1,594	1,268.7	193.34	180.12	1.073
M21AR	258.2	1,549	1,594	1,149.0	175.04	180.12	0.972
M32AR	258.3	1,550	1,594	1,149.4	175.15	180.12	0.972
[Average]	267.1	1,603	1,594	1,188.6	181.14	180.12	1.005
M21BR	350.7	2,104	2,044	1,560.6	237.75	230.97	1.029
M32BR	329.2	1,975	2,044	1,464.9	223.18	230.97	0.966
[Average]	340.0	2,040	2,044	1,512.8	230.52	230.97	0.998

جدول (۱۰-۲): نتایج آزمایش خمی نمونه‌های مورد بررسی

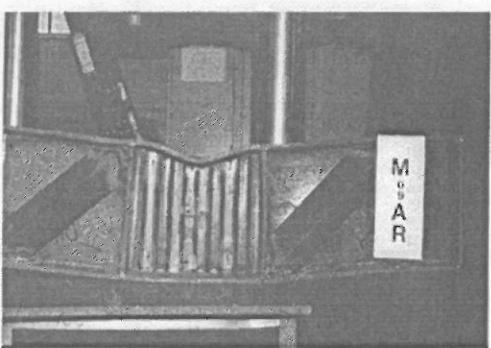


FIG. 6(a). Specimen M09AR after Failure

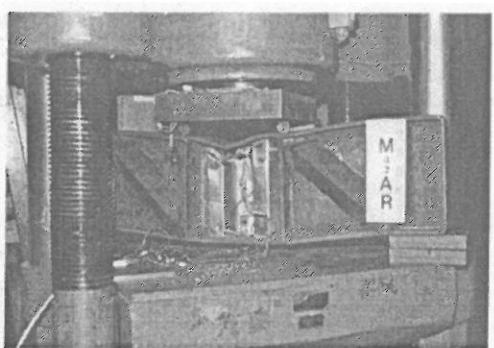


FIG. 6(d). Specimen M32AR after Failure

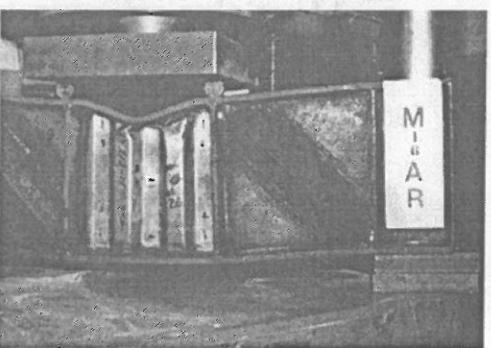


FIG. 6(b). Specimen M16AR after Failure

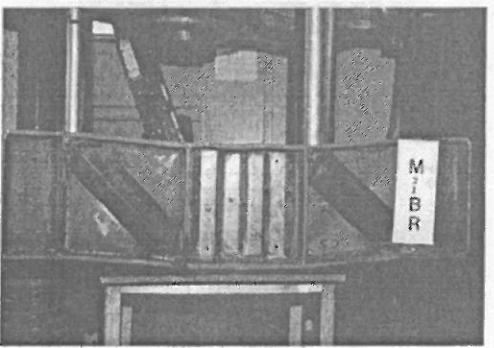


FIG. 6(e). Specimen M21BR after Failure

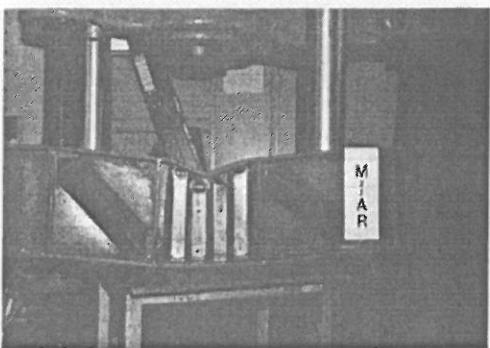


FIG. 6(c). Specimen M21AR after Failure

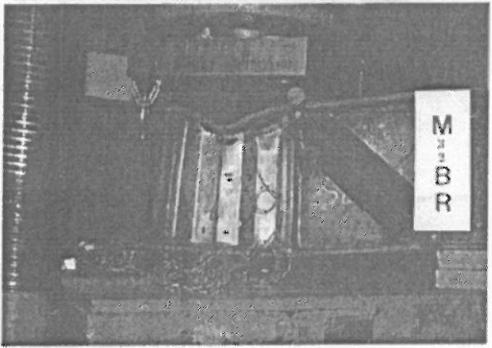


FIG. 6(f). Specimen M32BR after Failure

شکل(۲-۸): نحوه کمانش بال به سمت جان در خمین

همانگونه که قبلاً اشاره شد، در مطالعات فوق الذکر علاوه بر انجام آزمایشات از شبیه‌سازی رایانه‌ای نیز برای بررسی ظرفیت خمینی تیرورقهای استفاده شده است. برای اینکار یک مدل کامپیوترا مبنی بر روش‌های عددی ایجاد شد و در آن تیرورق موجدار تحت خمین خالص قرار گرفت.

در این مدل فرض شد که مصالح در ابتدا رفتار خطی دارند و تا رسیدن به تنش تسلیم  $\sigma_y$  به صورت خطی از قانون هوک پیروی می‌کنند، اما از آن به بعد منحنی تنش-کرنش باز هم به صورت خطی، ولی با مدول الاستیسیته کاهش یافته  $E_s = 0.01E_y$  به طور ثابت افزایش یافته تا به

تنش نهایی  $\sigma$  برسد. بعد از این مرحله آنالیز غیرخطی استاتیکی شروع شده و هم هندسه سازه و هم مصالح تحلیل غیرخطی می‌شوند. برای رسیدن به نتیجه بهتر و دقت کافی، افزایش بار ۱/۵ تا درصد بار گسیختگی در هر بار اعمال شده است.

برای بررسی صحت عملکرد مدل کامپیوترا، نمونه‌های ازمایشگاهی بوسیله مدل کامپیوترا مورد آنالیز قرار گرفت. گسیختگی ناشی از تحلیلهای کامپیوترا درکلیه نمونه‌ها با نتایج آزمایش مطابقت می‌کند. به این معنی که در مدل کامپیوترا نیز جاری شدن بالهای ناشی از کمانش قائم بال فشاری به سمت جان می‌باشد.

درجول (۱۱-۲) ظرفیت لنگر محاسبه شده از آنالیز کامپیوترا با مقدار متناظر آن که از آزمایشات بدست آمده مقایسه شده‌اند. همچنین مقدار  $M_{yf}$  (ممان تسلیم بال) نیز محاسبه و ارائه شده است.

نکته‌ای که می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد، این است که نتایج بین  $M_{FE}$  و  $M_{yf}$  و  $M_{test}$  (ممان المان محدود، ممان تسلیم، ممان ناشی از آزمایش) بسیار به هم نزدیکند.

Finite Element Analysis Results							
Specimen (1)	$M_{FE}$ (kip-in.) (2)	$M_{test}$ (kip-in.) (3)	$M_y$ (kip-in.) (4)	$M_{FE}$ (kN·m) (5)	$M_{test}$ (kN·m) (6)	$M_y$ (kN·m) (7)	$M_{test}/M_{FE}$ (8)
M09AR	1,671	1,601	1,594	188.82	180.91	180.12	0.958
M16AR	1,684	1,711	1,594	190.29	193.34	180.12	1.016
M21AR	1,645	1,549	1,594	185.89	175.04	180.12	0.942
M32AR	1,666	1,550	1,594	188.26	175.15	180.12	0.930
[Average]	1,667	1,603	1,594	188.37	181.14	180.12	0.962
M21BR	2,113	2,104	2,044	238.77	237.75	230.97	0.996
M32BR	2,066	1,975	2,044	233.46	233.18	230.97	0.956
[Average]	2,090	2,040	2,044	236.17	230.52	230.97	0.976

جدول (۱۱-۲): نتایج حاصل از تحلیل المان محدود

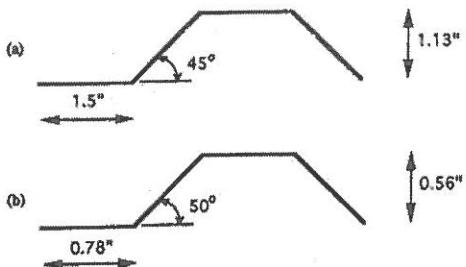
بنابراین مدل کامپیوترا نیز قادر به بیان و مقایسه نتایج آزمایش با درجه دقت بسیار خوبی است و همچنین مدل کامپیوترا تصویر بهتری از تنشهای داخل جان برای مطالعه ارائه می‌دهد. بنابراین از این مدل کامپیوترا می‌توان برای انجام مطالعات پارامتریک استفاده کرد که در تحقیق مورد بحث نیز برای همین منظور از مدل کامپیوترا استفاده شده است. نوع پروفیل موج، نسبت تنشهای تسلیم بال و جان، نسبت ضخامت جان و بال و نسبت ابعاد پانل از جمله مواردی هستند که در مطالعات پارامتری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ابعاد دو نوع موج ذوزنقهای مورد استفاده در شکل (۹-۲) نشان داده شدند.

---

 تیروورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

نمونه‌های ارائه شده در جدول (۱۲-۲) که پارامتری‌های فوق الذکر در آنها داده ارائه شده‌اند تحلیل شده و لنگر خمی حداکثر  $M_{f\phi}$  در جدول ۱۳-۲ نشان داده شده است.



Corrugation Profile : (a) Profile I; (b) Profile II

شکل (۲-۹): پارامترهای مورد استفاده در تحلیلهای کامپیووتری

در کلیه نمونه‌ها مصالح بال و جان از نوع الاستیک-پلاستیک دو خطی کامل فرض شده است. تنشهای پلاستیک بال  $\sigma_{pf}$  نیز در جدول (۱۳-۲) نشان داده شده‌اند. این تنش‌ها بر مبنای فرض  $\epsilon_p = 0.14$  به دست آمده‌اند. لازم به توضیح است که  $M_{FE}$  به خصوصیات مصالح جان، شکل موج و نسبت ابعاد پانلی بستگی ندارد و تنشهای ذکر شده در جدول (۱۳-۲) و لنگر نهایی قابل تحمل توسط تیر  $M_{fy}$ ، فقط بر اساس تسلیم بال و صرف نظر از سهم جان محاسبه شده است. در همین جدول، ظرفیت لنگر بال ( $M_{pf}$ ) بر اساس  $\sigma_{pf}$  نیز نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، مقادیر لنگرهای به دست آمده از آنالیز کامپیووتری، بین لنگرهای نهایی تسلیم و پلاستیک کامل قرار گرفته‌اند. در کلیه شش نمونه مورد نظر، گسیختگی در اثر جاری شدن بال به علت کمانش قائم بال فشاری به سمت جان است.

تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای

**Analytical Specimens**

Specimen (1)	$t_w$ mm (in.) (2)	$t_w^A$ mm (in.) (3)	$\sigma_{yf}$ MPa (ksi) (4)	$\sigma_{yw}$ MPa (ksi) (5)	$a$ mm (in.) (6)	$h$ mm (in.) (7)	Profile (8)
1	19.05 (0.75)	2.66 (0.1046)	248.04 (36.0)	248.04 (36.0)	304.8 (12.0)	304.8 (12.0)	I
2	19.05 (0.75)	2.66 (0.1046)	248.04 (36.0)	689.00 (100.0)	304.8 (12.0)	304.8 (12.0)	I
3	19.05 (0.75)	2.66 (0.1046)	248.04 (36.0)	248.04 (36.0)	1,244.6 (49.0)	304.8 (12.0)	I
4	7.94 (0.3125)	2.66 (0.1046)	248.04 (36.0)	248.04 (36.0)	304.8 (12.0)	304.8 (12.0)	I
5	7.94 (0.3125)	2.66 (0.1046)	248.04 (36.0)	248.04 (36.0)	304.8 (12.0)	304.8 (12.0)	II
6	19.05 (0.75)	2.66 (0.1046)	689.00 (100.0)	248.04 (36.0)	304.8 (12.0)	304.8 (12.0)	I

\*12 gauge.

جدول (۱۲-۲): مشخصات نمونه‌های تحلیل شده

**Moment Capacities**

Specimen (1)	$M_{FE}$ (kip-in.) (2)	$M_{yt}$ (kip-in.) (3)	$M_{FE}$ (kN·m) (4)	$M_y$ (kN·m) (5)	$M_{FE}/M_y$ (6)	$\sigma_{pt}$ (ksi) (7)	$M_{pt}$ (kip-in.) (8)	$\sigma_{pt}$ (MPa) (9)	$M_{pt}$ (kN·m) (10)	$M_{FE}/M_{pt}$ (11)
1	2,227.6	2,065.5	251.7	233.4	1.08	39.7	2,277.8	273.5	257.4	0.98
2	2,227.6	2,065.5	251.7	233.4	1.08	39.7	2,277.8	273.5	257.4	0.98
3	2,227.6	2,065.5	251.7	233.4	1.08	39.7	2,277.8	273.5	257.4	0.98
4	889.4	831.1	100.5	93.9	1.07	39.7	916.5	273.5	103.6	0.97
5	891.8	831.1	100.8	93.9	1.07	39.7	916.5	273.5	103.6	0.97
6	5,783.8	5,737.5	653.6	648.3	1.01	103.06	5,913.1	710.1	668.2	0.98

جدول (۱۳-۲): ظرفیت لنگر خمی خداکش نمونه‌ها

علاوه بر انجام آنالیزهای خمی، پنج عدد از نمونه‌های مورد نظر نیز برای مطالعه اثر نمودار تنش-کرنش مصالح در تعیین ظرفیت نهایی خمی مورد ازمایش قرار گرفته است. اندازه پانل  $1.9 \times 30\text{ cm}$  بوده و جان این نمونه‌ها از پروفیل موج دار شده ساخته شده و بالها در ابعاد سانتیمتر ساخته شده‌اند.

در حالت الاستیک - پلاستیک مدول مماسی  $E_t$  برابر  $0.01E$  در نظر گرفته شده است. از جدول (۱۴-۲) می‌توان نتیجه گرفت که گسیختگی یا تسليیم اولیه در کلیه نمونه‌ها در تنش  $2530$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع اتفاق می‌افتد.

**Stress-Strain Effect**

Case (1)	$\sigma_y$ MPa (ksi) (2)	$\sigma_{yw}$ MPa (ksi) (3)	$\sigma_{pt}$ MPa (ksi) (4)	$\sigma_{pw}$ MPa (ksi) (5)	$M_y$ kN·m (kip-in.) (6)	$M_{pt}$ kN·m (kip-in.) (7)	$M_{FE}$ kN·m (kip-in.) (8)	$M_{pw}/M_y$ (9)	$M_{pw}/M_{pt}$ (10)
1	248.04 (36.0)	248.04 (36.0)	369.58 (53.64)	369.58 (53.64)	233.4 (2,065.5)	347.8 (3,077.6)	314.6 (2,784.4)	1.35	0.91
2	248.04 (36.0)	248.04 (36.0)	369.58 (53.64)	273.53 (39.70)	233.4 (2,065.5)	347.8 (3,077.6)	314.6 (2,784.4)	1.35	0.91
3	248.04 (36.0)	248.04 (36.0)	273.53 (39.70)	369.58 (53.64)	233.4 (2,065.5)	257.4 (2,277.8)	251.7 (2,227.6)	1.08	0.98
4	248.04 (36.0)	248.04 (36.0)	273.53 (39.70)	273.53 (39.70)	233.4 (2,065.5)	257.4 (2,277.8)	251.7 (2,227.6)	1.08	0.98
5	248.04 (36.0)	248.04 (36.0)	248.04 (36.00)	248.04 (36.00)	233.4 (2,065.5)	233.4 (2,065.5)	231.8 (2,051.7)	0.99	0.99

جدول (۱۴-۲): اثرات تنش-کرنش بر میزان باربری خمی تیرورقهای

---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقهای
 

---

دو مقدار تنش پلاستیک  $\sigma$  که به ترتیب متناظر با کرنش پلاستیک  $0.062 \text{ } \mu$  و  $0.014 \text{ } \mu$  هستند، برای بال و جان مورد استفاده قرار گرفته است.

ظرفیت لنگرهای به دست آمده از آنالیزهای کامپیوتربی در جدول (۲-۱۴) ارائه شده است و همانطور که ملاحظه می‌گردد، ظرفیت نهایی خمشی تیروررق موجدار مستقل از رابطه تنش-کرنش مصالح جان می‌باشد. به عبارت دیگر ظرفیت لنگر با افزایش نسبت میان تنشهای پلاستیک و تسلیم بال افزایش می‌یابد.

در همین جدول، ظرفیت لنگرهای به دست آمده بر اساس مقاومت بال و با استفاده از تنش تسلیم  $M_{pf}$  و تنش پلاستیک  $M_{yf}$  نیز ارائه شده است و این لنگرها پوشش دهنده ظرفیت لنگرهای به دست آمده از روش کامپیوتربی هستند. زمانیکه مصالح الاستیک-پلاستیک کامل باشند، لنگرهای  $M_{pf}$  و  $M_{yf}$  برابر هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدت کوتاهی بعد از تسلیم اولیه، بال به صورت عمودی به سمت جان کمانش می‌کند.

به طور خلاصه ظرفیت لنگر یک تیروررق با جان موجدار برابر با ظرفیت لنگر بر اساس تسلیم بال و بدون درنظر گرفتن سهم جان در نظر گرفته می‌شود. این موضوع تا وقتی که رفتار مصالح الاستیک-پلاستیک کامل باشد، صحیح است. ولی زمانیکه مصالح دارای رفتار دو خطی الاستیک و پلاستیک کامل باشند (همانند حالت اول) ظرفیت لنگر براساس تنش بال به دست می‌آید که با افزایش جزئی تنش بال همراه است.

اگر چه اغلب فولادهای ساختمانی دارای رفتاری در حالت الاستیک - پلاستیک کامل هستند، برای طراحی، مطلب قابل توصیه آن است که ظرفیت لنگر نهایی بر اساس لنگر تسلیم بال  $M_{yf}$  به دست می‌آید.

**۲-۲-۳- جمع بندی مطالعات انجام شده برای تعیین ظرفیت خمشی تیرورقهای با جان موجدار**  
در پایان می‌توان نتایج تحقیقات مندرج در بند ۲-۲ بر روی خمش تیرورقهای با جان ذوزنقهای را به این صورت خلاصه کرد که شرکت جان در ظرفیت لنگر نهایی یک تیر با جان موجدار قابل صرفنظر بوده و ظرفیت لنگر نهایی بر اساس تنش تسلیم بال خواهد بود. تنش در جان در اثر خمش برابر صفر است مگر برای نواحی خیلی نزدیک به بالها (یا جائیکه جان مقید شده باشد). به عبارت دیگر، برش کاملاً توسط جان تحمل می‌شود و براساس مطالب ارائه شده تا کنون، واضح است که هیچ اندرکنشی بین خمش و برش در جان موجدار تیروررق وجود ندارد.

### ۳-۲- مطالعات انجام شده برای تعیین ظرفیت لهیدگی جان موجدار ذوزنقه‌ای:

در قسمتهای قبل توضیحاتی پیرامون مسئله خمث و برش در جان تیرورقهای با موج ذوزنقه‌ای ارائه شد و عمدتاً کارهای آقای دکتر القالی که ما بین سالهای ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۸ انجام شده است با جزییات بیشتری مورد بحث قرار گرفت. مسئله دیگر که در ارتباط با تیرورقهای فولادی به طور کلی همیشه مورد توجه بوده است، مقاومت این تیرها در مقابل اعمال بارهای نقطه‌ای در محل تکیه‌گاهها و در محل اعمال بارهای مرکزی بر تیر می‌باشد. در این رابطه معمولاً از ورقهای سخت‌کننده‌ای برای تقویت جان تیرورق استفاده می‌کنند تا در مقابل بارهای مرکزی اعمال شده بر بال مقاومت کند. اگر از ورقهای سخت‌کننده استفاده نشود، ممکن است که در زیر محل اعمال بار مرکزی، تنشهای زیادی به جان تیرورق اعمال شود و جان به صورت موضعی در محل مذکور کمانش کرده و یا جاری شود. به این نوع خرابی تیرورق اصطلاحاً لهیدگی جان اطلاق می‌شود و مقاومت تیرورق در مقابل این نوع بار را اصطلاحاً مقاومت لهیدگی جان تیرورق می‌نامند.

وقتی از جان موجدار برای تیرورقة استفاده می‌شود، طبعاً ضخامت جان مورد استفاده نسبت به جان تیرورق معمولی کاهش داده می‌شود تا با این کار طرح اقتصادی شود. اما از طرف دیگر، این نگرانی وجود دارد که با کاهش ضخامت جان، مقاومت در مقابل تنشهای لهیدگی ناشی از بارهای مرکزی نیز کاهش یابد. بنابراین مقاومت در برابر لهیدگی موضعی ناشی از اعمال بارهای مرکزی نیز یکی از دغدغه‌های اصلی در استفاده از تیرورقهای با جان موجدار می‌باشد. خوشبختانه تیرورقهای با جان موجدار، مقاومت قابل توجهی در مقابل بارهای لهیدگی نشان می‌دهند. این موضوع به دلیل افزایش سطح باربری جان این تیرورقهای بدلیل موجدار کردن آن است. اما اگر افزایش سطح باربر ایجاد شده نتواند جبران کاهش ضخامت تیرورق را نماید، در این صورت استفاده از سخت‌کننده در تیرورقهای با جان موجدار نیز الزامی است.

در رابطه با رفتار تیرورقهای موجدار در مقابل بارهای مرکزی جانبی، مطالعات گوناگونی انجام شده است. در سال ۱۹۷۴ کارلينگ در سوئد ۵۲ تست ازمایشگاهی را بر روی تیرورقهای موجدار تحت بارهای جانبی انجام داد. هدف اصلی از این تحقیق، پیشنهاد فرمولی برای برآورد ظرفیت لهیدگی تیرورقهای موجدار در مقابل بارهای مرکزی بود. بار مرکز اعمال شده، هم بر روی قسمت صاف موج ذوزنقه‌ای و هم بر روی قسمت مورب موج ذوزنقه‌ای اعمال گردید و بر اساس نتایج ازمایشات، فرمول تجربی برای محاسبه حداکثر بار لهیدگی پیشنهاد شد[6].

یک سری آزمایش مستقل نیز در سال ۱۹۸۳ در دانشگاه چالمرز توسط لیوا – آراونا در رابطه با مقاومت لهیدگی انجام شد. در این آزمایشات نیز سه تیرورق با جان موجدار که تحت سناریوهای مختلف بارگذاری شدند، مورد بررسی قرار گرفتند. نتیجه اصلی این آزمایشات بیانگر این بود که ضخامت جان، مهمترین پارامتر در برآورد ظرفیت لهیدگی جان موجدار در مقابل بارهای جانبی می‌باشد. در این آزمایشات همچنین مشخص شد که میزان طول بار واردہ تاثیر چندانی بر مقاومت نهایی تیرورق ندارد. اما تغییر موقعیت بار واردہ از محل قسمت صاف موج به قسمت مورب موج، می‌تواند تا ۱۰ درصد ظرفیت لهیدگی جان موجدار ذوزنقه‌ای را افزایش دهد. این نتیجه توسط لیوا و ادلوند در سال ۱۳۸۷ عنوان شد [7]. آنها روی هم رفته نتیجه گرفتند که مقاومت لهیدگی و مقاومت برشی تیرورقهای با جان موجدار نسبت به تیرورقهای معمولی حدوداً دو برابر است.

القالی و همکارانش نیز در سال ۱۹۹۷ ازمایشاتی را بر روی پنج نمونه تیرورق با جان موجدار ذوزنقه‌ای انجام دادند. انها همچنین از شبیه سازی کامپیوتری نیز برای مدلسازی جان تیرورقهای موجدار تحت بارهای متمرکز استفاده کردند. آنها از نمونه‌های آزمایش شده برای صحت سنجی مدل کامپیوتری خود استفاده کردند و سپس مطالعات پارامتریک را بر روی مدل‌های کامپیوتری انجام دادند. نهایتاً انها نتیجه گرفتند که جان موجدار به دو صورت تحت بارهای متمرکز نقطه‌ای می‌تواند آسیب ببیند. یا جان تیرورق له می‌شود و یا جان تیر ورق جاری می‌شود. انها برای هر یک از این حالات فرمولهایی پیشنهاد دادند و نتیجه گرفتند که هر کدام از این دو نوع سناریو خرابی که ظرفیت لهیدگی کمتری را برای جان موجدار ارائه دهد، باید به عنوان ظرفیت نهایی تیرورق تحت بارهای لهیدگی مورد استفاده قرار گیرد [8].

لهیدگی جان در اثر بارهای نقطه‌ای که در عرض کم و به صورت متمرکز بر تیر وارد می‌شود، به وقوع می‌بینند. برای جلوگیری از لهیدگی و یا کمانش جان، یا باید ضخامت بال و جان را افزایش داد و یا از سخت‌کننده‌های فشاری در جان تیر ورق استفاده کرد که در هر حال سازه از نظر وزن سنگین‌تر و از نظر اجرای سخت کننده با مشکلات بیشتری مواجه است. مطالعات نشان می‌دهند که موج دار کردن جان تیر ورق روشی است که می‌تواند برای مقابله با لهیدگی و کمانش جان تحت بارهای متمرکز و متحرک (نظیر بار چرخها و بارهای منتقل شده از تیرهای عرضی متکی بر تیرهای اصلی و...) مورد استفاده قرار گیرد. با این روش کمانش جان به طور کلی از بین می‌رود و نیازی به استفاده از سخت‌کننده‌ها (بجز در نواحی تکیه‌گاهی) نخواهد بود. علاوه بر این با موج دار کردن جان امکان استفاده از جان نازکتر برای تیر مقدور خواهد بود.

اما همانطور که اشاره شد، آقای القالی و همکارانش با انجام آزمایشات عملی و استفاده از روش مدلسازی کامپیوتری سعی در تبیین فرمولهای تئوری برای برآورد ظرفیت لهیدگی جان موجدار تیرورقها کردند. نتیجه این بررسی‌ها به طور خلاصه این بود که موقعیت بار، ضخامت جان و بال، عرض پهناهی که بار بر آن وارد می‌شود و میزان تنش جاری شدن جان فاکتورهای مؤثر در مقاومت تیرهای با جان موج دار در مقابل بارهای متمرکز هستند. آقایان لو-ادلوند نیز همانطور که اشاره شد، در سال ۱۹۹۶ و ۱۹۹۴ براساس آنالیزهای کامپیوتری، یک رابطه تجربی برای بار نهایی قابل تحمل در لهیدگی تیرورقهای با جان ذوزنقهای را ارائه کردند که در ادامه مطالعات این محققین مرور خواهد شد.

**۱-۳-۲- تحقیقات انجام شده توسط لو - ادلوند بر روی ظرفیت لهیدگی جان موجدار ذوزنقهای:**  
محققین مذکور در سال ۱۹۹۶ با بهره گیری از روش کامپیوتری به بررسی تأثیر پارامترهای ذیل بر ظرفیت لهیدگی تیر ورقهای فولادی با جان ذوزنقهای تحت بارهای جانبی پرداختند [۹].

- ۱- اثر عیوب اولیه ناشی از ساخت که به صورت کلی و یا موضعی در جان وجود دارد.
- ۲- اثر تغییر تنش جاری شدن مصالح در هنگام نورد سرد
- ۳- اثر محل اعمال بار
- ۴- اثر عرض توزیع بار
- ۵- اثر پارامترهای هندسی

نتایج حاصل از بررسیهای فوق الذکر به طور خلاصه به شرح ذیل است:

- عیوب اولیه ناشی از ساخت اگر در کل جان باشد ظرفیت باربری را زیاد تغییر نمی‌دهد. ولی اگر به صورت موضعی در زیر محل اعمال بار باشد، می‌تواند تا هفت درصد در کاهش بار نهایی مؤثر واقع شود. این مقدار متوسط، با توجه به درنظر گرفتن تغییر مکان اولیه معادل با نصف ضخامت جان و به صورت موضعی در زیر محل اعمال بار بدست آمده است.
- اثر افزایش تنش جاری شدن مصالح در اثر نورد سرد که به اثر گوشهای معروف است در مقاومت نهایی تیرورقهای با جان موج دار تأثیر چندانی ندارد، هرچند که بر روند مقاومتی مصالح جان مؤثر است.
- عرض توزیع بار از پارامترهای بسیار مؤثر بر ظرفیت نهایی تیر ورقها در زیر بار متمرکز است. اگر بار به صورت خطی با عرض پهناهی صفر وارد شود، ظرفیت باربری به مراتب پایین‌تری نسبت به

---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقهای
 

---

حالتی که عرض پهنهای اعمال بار افزایش می‌یابد دارد. مثلاً برای عرض  $C = 5 \text{ cm}$  و  $C = 11.52 \text{ cm}$  بار نهایی نسبت به عرض پهنهای صفر به ترتیب به مقدار ۲۰٪ و ۴۰٪ افزایش از خود نشان می‌دهد.

- مقاومت‌نهایی تیر ورق با افزایش زاویه موج ذوزنقهای افزایش می‌یابد. این روند تا  $\alpha = 75^\circ$  صادق است و از این مقدار به بعد تا  $\alpha = 90^\circ$  مقاومت‌نهایی تقریباً یکسان است.
- افزایش ضخامت بال نیز باعث افزایش ظرفیت لهیدگی به همان تناسب می‌شود.
- ابعاد پانل مورد آزمایش، مثل ارتفاع مقطع و طول تیر تأثیر چندانی بر مقاومت‌نهایی تیر ورق‌ها ندارند بجز در حالی که ارتفاع مقطع خیلی کم باشد.

با توجه به نتایج فوق الذکر، محققین مذکور پیشنهاد کردند که با استفاده از فرمول تجربی ذیل می‌توان بار نهایی لهیدگی را برای تیرهای با جان موج دار محاسبه کرد.

$$P_u = \gamma t_f t_w (\sigma_y^w)^{0.5} \quad (9-2)$$

رابطه فوق، پارامترهای ضخامت بال و جان و تنش جاری شدن جان را در ظرفیت‌نهایی تیرورق در مقابل بارهای متمرکز مؤثر می‌داند و تأثیر پارامترهای هندسی موج و عرض تأثیر بار را در ضریب  $\gamma$  لحاظ می‌کند. فرمول تجربی فوق مشابه رابطه‌ایست که توسط آقای برگفیلت برای تیرهای با جان مسطح پیشنهاد شده است و فقط ضریب  $\gamma$  موجود در آن فرق می‌کند.

بنابراین نهایتاً بار بحرانی برای جانهای موج دار ذوزنقهای از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_u = 15.6 \frac{c}{s} \left( 1 + \frac{c^*}{240} \right) t_f t_w \sigma_y^w \quad (10-2)$$

که در آن:  $\sigma_y^w$  تنش جاری شدن جان،  $c$  طول موج ذوزنقهای،  $s$  طول واقعی موج ذوزنقهای،  $c^*$  عرض توزیع بار متمرکز،  $t_w$  ضخامت جان است.

**۲-۳-۲- تحقیقات انجام شده توسط القالی بر روی ظرفیت لهیدگی جان موجدار ذوزنقهای:**  
 آقای القالی و همکارانش نیز در سال ۱۹۹۷ بررسی نسبتاً جامعی بر روی ظرفیت‌نهایی تیرورقهای با موج ذوزنقهای تحت بارهای متمرکز انجام دادند که در ادامه خلاصه‌ای از کارهای انجام شده توسط این محققین ارائه می‌گردد. ابتدا ۵ آزمایش در سوئد انجام گرفت و یک مدل کامپیوترا برای آنالیز گسیختگی نمونه‌های آزمایش شده در نظر گرفته شد. این مدل بعداً برای انجام مطالعات پارامتری

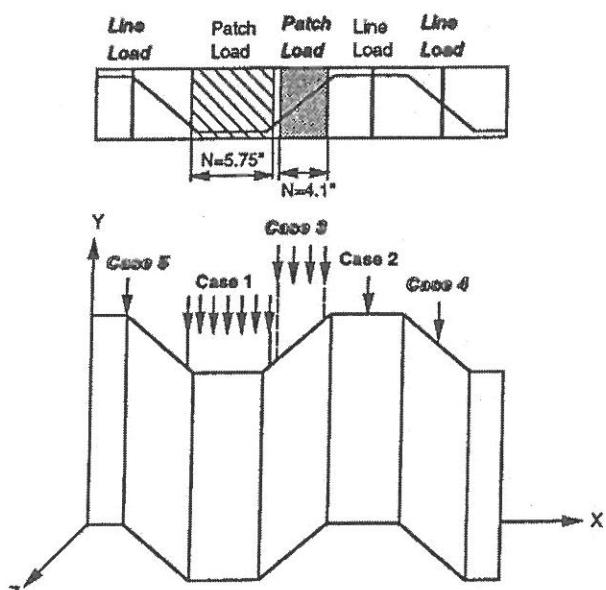
---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

مورد استفاده قرار گرفته است. آنالیز کامپیوتری که در این مطالعات استفاده شده، رفتار غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی را نیز در بر می‌گیرد.

طول دهانه نمونه‌ها که به صورت تیرساده (تکیه گاه ساده) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، برابر یک متر بوده است. مقطع طولی موج نمونه‌ها در شکل (۱۰-۲) نشان داده شده است. همچنین سه پارامتر پهنه‌ای بار، محل اعمال بار و ضخامت جان در جدول (۱۵-۲) ارائه شده است.



شکل (۱۰-۲): بارها در عرضی معادل پهنه‌ای بال، محدوده ایی به پهنه‌ای ۵ cm به صورت بارخطی و در سه موقعیت مختلف یعنی روی قسمت افقی، قسمت مایل و خط مشترک قسمت افقی و مایل جان اعمال شده‌اند



شکل (۱۱-۲): پروفیل تیرهای آزمایش شده در سوئد

Details of Specimens Tested In Sweden									
Beam (1)	$t_w$ (in.) (2)	$F_{yw}$ (ksi) (3)	$t_b$ (in.) (4)	$F_{yb}$ (ksi) (5)	$b_t$ (in.) (6)	$I$ (in.) (7)	$h$ (in.) (8)	$N$ (in.) (9)	Location (10)
Beam 1	0.0984	48.62	0.4724	69.00	9.84	39.37	39.37	0.00	Parallel
Beam 2	0.0984	48.62	0.4724	69.00	9.84	39.37	39.37	0.00	Inclined
Beam 3	0.0984	46.00	0.4724	69.00	9.84	39.37	59.06	0.00	Parallel
Beam 4	0.0984	46.00	0.4724	69.00	9.84	39.37	59.06	1.97	Parallel
Beam 5	0.0787	40.63	0.3937	69.00	9.84	39.37	78.74	0.00	Junction
Beam 6	0.0787	40.63	0.3937	69.00	9.84	39.37	78.74	1.97	Inclined

Note: 1 in. = 25.4 mm, 1 ksi = 6.89 MPa.

جدول (۱۵-۲): جزئیات نمونه‌های آزمایش شده در سوئد

در این مطالعات سه تیر با عمقهای متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است که ابعاد آنها در جدول (۱۵-۲) ارائه شده است. در همان جدول، تنش‌های تسلیم مصالح جان و بال ارائه شده است. از رابطه تنش-کرنش مرسوم در آنالیزهای کامپیوتری استفاده گردیده و محل معادل کرنش ۶۱٪ به عنوان محل پلاستیک در نظر گرفته شده است.

بارهای گسیختگی حاصل از تحلیل و آزمایش در جدول (۱۶-۲) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، متوسط نسبت بار گسیختگی حاصل از آنالیز کامپیوتری به بار گسیختگی حاصل از آزمایش برابر با ۱۰۸۵ می‌باشد.

علاوه، علت گسیختگی نمونه‌های آزمایشی، خمش بال و لهیدگی جان اعلام شده است که همان نوع گسیختگی حاصل از تحلیل می‌باشد.

**Comparison between Experimental and Analytical Results for Specimens Tested in Sweden**

Beam (1)	$P_u$ (kip) (2)	$P_f$ (kip) (3)	$P_f/P_u$ (4)
Beam 1	33.48	41.28	1.23
Beam 2	38.20	41.53	1.09
Beam 3	34.15	36.72	1.08
Beam 4	37.75	41.20	1.09
Beam 5	24.05	24.88	1.03
Beam 6	27.87	27.61	0.99

Note: 1 kip = 4.45 kN.

جدول (۱۶-۲): مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی

مطالعات پارامتریک برای بررسی اثرات ضخامت و تنش تسلیم بالها و جان، پهنا و موقعیت قرارگیری بار، نسبت ابعاد پانلی جان و مقطع طولی موج روی رفتار و مقاومت نهایی تیرورقهای با جان موج دار تحت اثر بارهای متتمرکز انجام شده و اثر تغییر این پارامترها برای سه موقعیت اعمال بار مورد توجه قرار گرفته است. این سه حالت عبارتند از:

- (a) بار روی قسمت افقی یا موازی با جان موج
- (b) بار روی قسمت مورب یا مایل موج
- (c) بار روی محل تلاقی قسمت صاف و مورب موج

سی و دو نمونه آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و پارامترهای متغیر در این آزمایشات عبارتند از موقعیت محل بار نسبت به طول پانل، مقطع طولی موج، تنشهای تسلیم و ضخامت‌های بال و جان و

---

 تیروورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

پهنای بار. تیر ورق اصلی به شکل مربع می‌باشد که فاصله بین وسط ضخامت‌های دو بال برابر فاصله سخت‌کننده‌های فشاری روی تکیه‌گاه بوده و این فاصله برابر با ۸۵ cm است. بالها و سخت‌کننده‌ها دارای پهنای ۲۰.۳ cm و ضخامت ۱.۲۷ cm می‌باشند. ضخامت ورق جان ۰.۲۶۶ cm و تنش تسلیم مصالح بال و جان برابر ۲۴۸ Mpa می‌باشد. از رابطه تنش-کرنش مرسوم با حد پلاستیک ۱.۰۴ استفاده شده است.

در ابتداء تأثیر موقعیت قرارگیری بار روی تیر ورق بررسی گشته است. یک بار متتمرکز با پهنای مساوی با طول قسمت مورب، و عرضی برابر پهنای بال اعمال گردیده است. این بار ابتدا در بالای موج مرکزی تیر ورق شماره یک و سپس در نزدیک تکیه‌گاه وارد شده است. بارگسیختگی برای این دو حالت برابر با ۱۵۴ kN و ۱۵۷ kN بدست آمده‌اند. این افزایش دو درصدی در ظرفیت باربری تیر ورق ناشی از تأثیر خمش صفحه‌ای می‌باشد. تأثیر هندسه و خصوصیات مصالح بال و جان، با آزمایش تیر ورقهای ۱ تا ۹ بررسی شده است. ابعاد تیر ورقها، تنشهای تسلیم مصالح متشكله بال و جان و بارها گسیختگی محاسبه شده و در جدول (۱۷-۲) آورده شده است. اثر پهنای (طول) بار متتمرکز با تغییر از ۱ تا ۳۳ برای تیر ورق ۱B و ۰ برای تیر ورق ۱C بررسی شده و نتایج آن نیز در جدول (۱۷-۲) آمده است.

TABLE 4. Load over Parallel Fold, Profile I

Girder (1)	$t_f$ (in.) (2)	$t_w$ (in.) (3)	$F_y$ (ksi) (4)	$F_{yw}$ (ksi) (5)	$N/b_h$ (6)	$P_f$ (kips) (7)	$a$ (in.) (8)	$P_u$ (kips) (9)	$P_w$ (kips) (10)	$P_u$ (kips) (11)	$P_f/P_u$ (12)
Girder 1	0.50	0.1046	36.0	36.0	1.00	34.59	4.53 <sup>a</sup>	20.73	11.18	31.91	1.08
Girder 2A	0.50	0.1046	36.0	36.0	1.00	35.30	4.53 <sup>a</sup>	20.73	11.18	31.91	1.11
Girder 2	0.50	0.1046	65.0	36.0	1.00	45.53	5.59	31.29	11.18	42.47	1.07
Girder 3	0.50	0.1046	100.0	36.0	1.00	47.03	6.59	38.81 <sup>b</sup>	11.18	49.99	0.94
Girder 4	0.50	0.1046	36.0	65.0	1.00	36.96	3.74 <sup>a</sup>	20.73	15.02	35.75	1.03
Girder 5	0.50	0.1046	36.0	100.0	1.00	40.56	3.29 <sup>a</sup>	20.73	18.63	39.36	1.03
Girder 6	0.75	0.1046	36.0	36.0	1.00	55.14	6.08	34.93	11.18	46.11	1.20
Girder 7	1.00	0.1046	36.0	36.0	1.00	63.67	7.62	46.57 <sup>b</sup>	11.18	57.75	1.10
Girder 8	0.50	0.0747	36.0	36.0	1.00	28.66	5.10	19.68	5.70	25.38	1.13
Girder 9	0.50	0.1345	36.0	36.0	1.00	36.59	4.16 <sup>a</sup>	20.73	18.48	39.21	0.93
Girder 1	0.50	0.1046	36.0	36.0	1.00	34.59	4.53 <sup>a</sup>	20.73	11.18	31.91	1.08
Girder 1B	0.50	0.1046	36.0	36.0	0.33	29.50	3.57 <sup>a</sup>	16.23	11.18	27.43	1.08
Girder 1C	0.50	0.1046	36.0	36.0	0.00	27.43	3.09 <sup>a</sup>	14.66	11.18	25.84	1.03

Note: 1 in. = 25.4 mm; 1 ksi = 6.89 MPa.

<sup>a</sup> $\sigma$  is less than  $\sigma_{min}$ , hence  $\sigma_{min}$  was used in calculating  $P_u$ .

<sup>b</sup>The web cripples before the flange mechanism is formed.

جدول (۱۷-۲): نتایج برای حالتی که بار روی قسمت موازی جان است

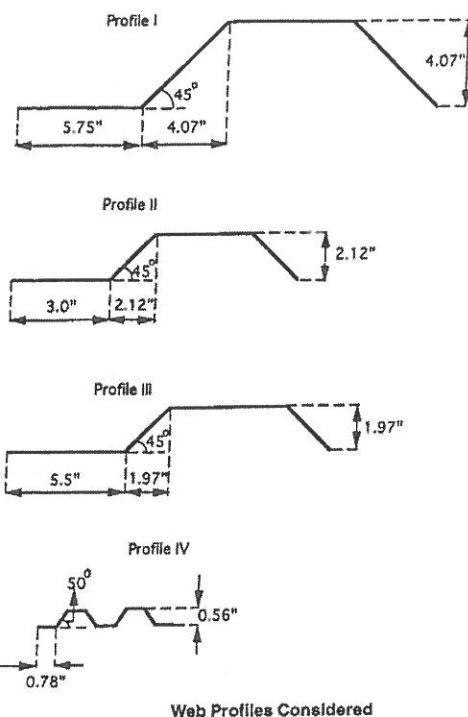
در این مطالعات سه نوع ابعاد مختلف برای موج ذوزنقه‌ای درنظر گرفته شده است که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. چهارده تیروورق با مقطع طولی II و سه تیروورق با مقطع طولی III و سه تیروورق با مقطع طولی IV مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. خصوصیات مصالح، ابعاد تیروورقهای پهنای بار اعمال شده و بارهای گسیختگی این تیر ورقها به ترتیب در جداول (۱۸-۱) و (۱۹-۱) ارائه شده است.

---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

در تمام این تیرورقهای شکل گسیختگی مشابه بوده و می‌توان خمش قائم و پیچش بال بارگذاری شده و خمش موضعی جان تحت اثر بار را مشاهده کرد.



شکل(۱۲-۲): ابعاد پروفیلهای به کار رفته

بال بالایی تیر ورق در سه نقطه که معرف سه مفصل پلاستیک می‌باشد، جاری شده است. این شکل گسیختگی، یعنی تشکیل مفاصل پلاستیک در بال و خمش موضعی جان یا لهیدگی جان، تحت اثر بار گسیختگی نوع اول نامیده شده است.

Load over Parallel Fold, Profile II											
Girder (1)	$t_f$ (in.) (2)	$t_w$ (in.) (3)	$F_y$ (ksi) (4)	$F_{yw}$ (ksi) (5)	$N/b_n$ (6)	$P_f$ (kip) (7)	$a$ (in.) (8)	$P_w$ (kips) (9)	$P_n$ (kips) (10)	$P_u$ (kips) (11)	$P_f/P_u$ (12)
Girder 11	0.75	0.1345	36.0	36.0	1.00	58.06	4.29	18.48	34.30	52.78	1.10
Girder 11A	0.75	0.1345	36.0	36.0	0.67	56.17	4.04	18.48	34.30	52.78	1.06
Girder 12	0.75	0.1345	100.0	36.0	1.00	67.01	6.65	18.48	57.17 <sup>b</sup>	75.65	0.89
Girder 13	0.75	0.1345	36.0	65.0	1.00	85.54	3.39	24.84	46.09	70.93	1.21
Girder 14	0.75	0.1345	36.0	100.0	1.00	112.65	2.88	30.81	57.17	87.98	1.28
Girder 15	0.75	0.1046	36.0	36.0	1.00	45.12	4.77	11.18	30.25 <sup>b</sup>	41.43	1.09
Girder 16	0.75	0.0747	36.0	36.0	1.00	29.76	5.50	3.70	25.56 <sup>b</sup>	31.26	0.95
Girder 17	0.50	0.0747	36.0	100.0	1.00	43.45	2.65	9.50	28.40	37.90	1.15
Girder 17A	0.50	0.0747	36.0	100.0	0.67	39.63	2.40 <sup>a</sup>	9.50	26.23	35.75	1.11
Girder 18	0.50	0.0747	36.0	65.0	1.00	38.51	3.11	7.66	22.90	30.56	1.26
Girder 19	0.50	0.0747	36.0	36.0	1.00	25.89	3.92	5.70	17.04 <sup>b</sup>	22.74	1.14
Girder 20	0.50	0.0747	36.0	100.0	0.00	35.50	1.90 <sup>a</sup>	9.50	21.09	30.59	1.16
Girder 21	0.50	0.0747	36.0	65.0	0.00	32.63	2.36 <sup>a</sup>	7.66	21.09	28.75	1.14
Girder 22	0.50	0.0747	36.0	36.0	0.00	23.67	3.17	5.70	17.04	22.74	1.04

Note: 1 in. = 25.4 mm, 1 ksi = 6.89 MPa.  
<sup>a</sup> $a$  is less than  $a_{min}$ , hence  $a_{min}$  was used in calculating  $P_w$ .  
<sup>b</sup>The web cripes before the flange mechanism is formed.

جدول(۱۸-۲): نتایج برای حالتی که بار روی قسمت موازی جان است

تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای

Load over Parallel Fold, Profile III

Girder (1)	$t_f$ (in.) (2)	$t_w$ (in.) (3)	$F_{yf}$ (ksi) (4)	$F_{yw}$ (ksi) (5)	$N/b_h$ (6)	$P_f$ (kips) (7)	$\alpha$ (in.) (8)	$P_{II}$ (kips) (9)	$P_w$ (kips) (10)	$P_u$ (kips) (11)	$P_f/P_u$ (12)
Girder 23	0.4724	0.0984	69.0	48.62	0.00	41.28	5.35	38.08	11.50	49.58	0.83
Girder 24	0.4724	0.0984	69.0	46.00	0.00	36.72	4.09	37.04	11.18	48.22	0.76
Girder 25	0.4724	0.0984	69.0	46.00	1.00	41.20	5.46	37.04	11.18	48.22	0.86

Note: 1 in. = 25.4 mm, 1 kip = 4.45 kN, 1 ksi = 6.89 MPa.

Load over Parallel Fold, Profile IV

Girder (1)	$t_f$ (in.) (2)	$t_w$ (in.) (3)	$F_{yf}$ (ksi) (4)	$F_{yw}$ (ksi) (5)	$N/b_h$ (6)	$P_f$ (kips) (7)	$\alpha$ (in.) (8)	$P_{II}$ (kips) (9)	$P_w$ (kips) (10)	$P_u$ (kips) (11)	$P_f/P_u$ (12)
Girder 26	0.50	0.1046	36.0	36.0	0.00	27.02	1.89	14.26	11.18*	25.44	1.06
Girder 27	0.75	0.1345	36.0	100.0	0.33	74.50	1.56	40.42	30.81*	71.23	1.05
Girder 28	0.50	0.1046	65.0	36.0	0.00	39.34	2.54	19.16	11.18*	30.34	1.30

Note: 1 in. = 25.4 mm; 1 kip = 4.45 kN; 1 ksi = 6.89 MPa.

\*The web yields after the flange mechanism is formed.

جدول (۱۹-۲): نتایج برای حالتی که بار روی قسمت موازی جان است

پارامترهایی که برای حالت اول بررسی شدند، برای این حالت نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این حالت ۲۹ تیر ورق مورد توجه قرار گرفت که هندسه و خصوصیات مصالح این تیرورقهای به همراه بارهای گسیختگی محاسبه شده برای مقاطع طولی I و II و III و IV در جدول (۲۰-۲) ارائه شده است.

سه نوع گسیختگی در این آزمایشات مشاهده شد. در اولین شکل گسیختگی، بالها تحت پیچش قرار نگرفتند، بلکه در جهت طولی تحت خمش دو محوری قرار گرفتند. بررسی نشان می‌دهد که در این حالت مفصل پلاستیکی تشکیل نشده و جانها تحت اثر تنشهای غشایی در جهت قائم، جاری شده و سپس تحت اثر بار له شده‌اند. در لحظه گسیختگی تنشهای غشایی جان به تنش تسلیم رسیده و جان، پس از تسلیم له شده است. در گسیختگی نوع III کمتر از سه مفصل پلاستیک در بال بالائی تشکیل شده است و در تنشهای جان نه مانند گسیختگی نوع اول خمش غالب بوده و نه مانند گسیختگی نوع دوم تنشهای غشایی حاکم بوده است.

Load over Inclined Fold, Profile I

Girder (1)	$t_f$ (in.) (2)	$t_w$ (in.) (3)	$F_{yf}$ (ksi) (4)	$F_{yw}$ (ksi) (5)	$N/b_h$ (6)	$P_f$ (kips) (7)	$P_y$ (kips) (8)	$\alpha$ (in.) (9)	$P_{II}$ (kips) (10)	$P_w$ (kips) (11)	$P_u$ (kips) (12)	$P_f/P_u$ (13)
Girder 31	0.50	0.1046	36.0	36.0	1.0	30.37	33.33	4.11	23.29	11.18	34.47	0.91
Girder 31A	0.50	0.1046	36.0	36.0	0.33	29.59	33.33	3.43	23.29	11.18	34.47	0.86
Girder 31B	0.50	0.1046	36.0	36.0	0.00	28.47	33.33	3.09	23.29	11.18	34.47	0.83
Girder 32	0.50	0.1046	65.0	36.0	1.0	32.43	37.34	5.17	31.29	11.18	42.47	0.87
Girder 33	0.50	0.1046	100.0	36.0	1.0	32.43	41.11	6.17	38.81	11.18	49.99	0.79
Girder 34	0.50	0.1046	36.0	65.0	1.0	49.88	54.77	3.31	31.29	15.02	46.31	1.08
Girder 35	0.50	0.1046	36.0	100.0	1.0	60.94	79.60	2.87	38.81	18.63	57.44	1.06
Girder 36	0.75	0.1046	36.0	36.0	1.0	45.17	39.16	5.66	34.93	11.18	46.11	1.15
Girder 37	1.00	0.1046	36.0	36.0	1.0	49.41	45.00	7.20	45.57	11.18	57.75	1.10
Girder 38	0.50	0.0747	36.0	36.0	1.0	24.12	23.80	4.68	19.68	5.70	25.38	1.01
Girder 39	0.50	0.1345	36.0	36.0	1.0	42.27	42.85	3.75	26.41	18.48	44.89	0.99

Note: 1 in. = 25.4 mm, 1 kip = 4.45 kN, 1 ksi = 6.89 MPa.

جدول (۲۰-۲): نتایج برای حالتی که بار روی قسمت مورب جان است

## تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای

Load over Inclined Fold, Profile II

Girder (1)	$t_e$ (in.) (2)	$t_w$ (in.) (3)	$F_{yf}$ (ksi) (4)	$F_{wf}$ (ksi) (5)	$N/b_n$ (6)	$h_e/b_e$ (7)	$P_f$ (kips) (8)	$P_y$ (kips) (9)	$a$ (in.) (10)	$P_n$ (kips) (11)	$P_w$ (kips) (12)	$P_o$ (kips) (13)	$P_f/P_v$ (14)
Girder 41	0.75	0.1345	36.0	36.0	1.00	0.35	56.79	53.08	4.07	34.30	18.48	52.78	1.08
Girder 41A	0.75	0.1345	36.0	36.0	0.00	0.35	52.81	53.08	3.54	34.30	18.48	52.78	1.00
Girder 41B	0.75	0.1345	36.0	36.0	1.00	0.42	52.20	46.60	3.76	31.31	18.48	49.79	1.12
Girder 41C	0.75	0.1345	36.0	36.0	1.00	0.60	45.21	36.32	3.24	26.27	18.48	44.75	1.24
Girder 41D	0.75	0.1345	36.0	36.0	1.00	0.78	41.19	36.32	2.91	23.10	18.48	41.57	1.13
Girder 42	0.75	0.1046	36.0	36.0	1.00	0.35	45.20	41.29	4.55	30.25	11.18	41.42	1.10
Girder 43	0.75	0.0747	36.0	36.0	1.00	0.35	32.63	29.49	5.28	25.56	5.70	31.26	1.11
Girder 44	0.75	0.1345	65.0	36.0	1.00	0.35	65.14	66.35	5.29	46.09	18.48	64.57	1.01
Girder 45	0.75	0.1345	100.0	36.0	1.00	0.35	74.86	78.80	6.43	57.17	18.48	75.65	0.99
Girder 46	0.75	0.1345	36.0	65.0	1.00	0.35	78.52	69.30	3.17	46.09	24.84	70.93	1.13
Girder 46A	0.75	0.1345	36.0	65.0	0.00	0.35	73.27	69.30	2.63	46.09	24.84	70.93	1.06
Girder 47	0.75	0.1345	36.0	100.0	1.00	0.35	101.66	104.63	2.66	57.16	30.81	87.98	1.16
Girder 48	0.50	0.1345	36.0	36.0	1.00	0.35	43.13	40.24	2.89	22.87	18.48	41.35	1.07
Girder 49	1.00	0.1345	36.0	36.0	1.00	0.35	71.27	65.95	5.25	45.73	18.48	64.22	1.11
Girder 49A	1.00	0.1345	36.0	36.0	0.00	0.35	65.96	65.95	4.72	45.73	18.48	64.22	1.03

Note: 1 in. = 25.4 mm, 1 kip = 4.45 kN, 1 ksi = 6.89 MPa.

Load over Inclined Fold, Profile III

Girder (1)	$t_e$ (in.) (2)	$t_w$ (in.) (3)	$F_{yf}$ (ksi) (4)	$F_{wf}$ (ksi) (5)	$N/b_n$ (6)	$P_f$ (kips) (7)	$P_y$ (kips) (8)	$a$ (in.) (9)	$P_n$ (kips) (10)	$P_w$ (kips) (11)	$P_o$ (kips) (12)	$P_f/P_n$ (13)
Girder 50	0.4724	0.0984	69.0	48.62	0.00	41.53	48.93	4.98	38.07	11.50	49.57	0.85
Girder 51	0.3937	0.0787	69.0	40.63	1.00	27.61	30.60	4.55	25.94	6.72	32.66	0.90

Note: 1 in. = 25.4 mm, 1 kip = 4.45 kN, 1 ksi = 6.89 MPa.

Load over Inclined Fold, Profile IV

Girder (1)	$t_e$ (in.) (2)	$t_w$ (in.) (3)	$F_{yf}$ (ksi) (4)	$F_{wf}$ (ksi) (5)	$N/b_n$ (6)	$P_f$ (kips) (7)	$P_y$ (kips) (8)	$a$ (in.) (9)	$P_n$ (kips) (10)	$P_w$ (kips) (11)	$P_o$ (kips) (12)	$P_f/P_n$ (13)
Girder 52	0.50	0.1046	36.0	36.0	0.00	28.64	27.91	2.01	14.26	11.18	25.44	1.13

Note: 1 in. = 25.4 mm, 1 kip = 4.45 kN, 1 ksi = 6.89 MPa.

## جداول (۲۱-۲)؛ نتایج برای حالتی که بار روی قسمت مورب جان است

در حالتی که بار بر روی قسمت شکسته خطوط مورب جان موجدار قرار دارد، ۹ تیر ورق با هندسه، خصوصیات مصالح و مقاطع طولی متفاوت با یک بار تکه‌ای در قسمت بالای خطوط شکسته بررسی شده‌اند. جزئیات این تیرورقهای همچنین بارهای گسیختگی محاسبه شده آنها در جدول (۲۱-۲) ارائه شده است.

در اشکال گسیختگی این تیرورقهای استثنای دو تای آنها که جانشان از مقطع طولی IV ساخته شده بود، مکانیزم فروریزی در بال تشکیل نگردیده است.

در مطالعه پارامتریک که در بخش قبل شرح داده شد، دو شکل گسیختگی مجزا مشاهده گردید. اول گسیختگی ناشی از تشکیل یک مکانیزم در بال بارگذاری شده و خمس موضعی یا لهیدگی جان و دوم گسیختگی که در آن مکانیزم تشکیل نمی‌گردد، بلکه گسیختگی به علت جاری شدن و لهیدگی جان است.

• گسیختگی در اثر لهیدگی جان:

بارنهایی برای این نوع گسیختگی شامل دو قسمت است. یک قسمت بیانگر نقش بال در تحمل نیروی متمرکز و یک قسمت مربوط به تحمل جان در مقابل نیروی متمرکز می‌باشد. با فرض مکانیزم سه لولایی برای فروپاشی بال می‌توان سهم بال را به روش زیر محاسبه کرد.

$$\sum M_A = 0 \rightarrow 2M_{pf} = \omega \frac{N}{2} \left( a - \frac{N}{4} \right) \quad (11-2)$$

لنگر پلاستیک مثبت در زیر بار مثبت تشکیل می‌گردد:

$$2M_{pf} = \omega \frac{P_f}{2} \left( a - \frac{N}{4} \right) \quad (12-2)$$

که در آن:

$$M_{pf} = b_f^2 f_{yf}^2 \omega \frac{t_f}{4}$$

$b_f$  پهناهی بال

$f_{yf}$  تنش تسلیم مصالح بال

$N$  پهنا (طول) بارتکه‌ای

$a$  برابر فاصله بین لولاهای پلاستیک در موقعیت ممانهای مثبت و منفی است

برای محاسبه  $a$  می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$a = \frac{f_{yf} b_f t_f^2}{(2f_{yw} t_w)^{0.5}} + \frac{N}{4}$$

که  $f_{yw}$  و  $t_w$  به ترتیب تنش تسلیم و ضخامت جان می‌باشد.

$t_w$  ضخامت بال می‌باشد.

سهم جان را نیز می‌توان از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$P_\omega = t_\omega^2 \sqrt{(E f_{yw})} \quad (13-2)$$

بنابراین، ظرفیت نهایی مقطع به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_U = P_w + P_f \quad (14-2)$$

• گسیختگی نوع دوم یا جاری شدن جان:

در این نوع گسیختگی، ظرفیت نهایی  $P_u$  را می‌توان بر اساس جاری شدن پهناه مؤثر جان محاسبه کرد. این پهناه مؤثر می‌تواند بر اساس فرمول ارائه شده قبلی که همبستگی خوبی با نتایج آنالیز کامپیوتری دارد، محاسبه شود:

$$P_u = P_y = (b + b_a)t_w + f_{yw} \quad (15-2)$$

$b$  در حالتی که بار روی قسمت مورب جان عمل کرده باشد برابر با طول قسمت مورب است و اگر بار بر روی قسمت موازی با جان موج عمل کرده باشد،  $b$  برابر با پهناهی قسمت موازی است و اگر بار در وسط این دو محل اعمال شده باشد،  $b$  برابر با جمع طول قسمت موازی بعلاوه تصویر قسمت مورب درجهت موازی با جان است.

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد هر دو نوع گسیختگی و در برخی موارد ترکیب این دو در بین نمونه‌ها کاملاً به چشم می‌خورد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که بارهای گسیختگی هم بر اساس فرض جاری شدن جان و هم براساس لهیدگی جان محاسبه شوند و کوچکترین دو مقدار فوق ملاک عمل قرار گیرد.

۲-۳-۳-۲- تاثیر وجود خمش یا برش صفحه‌ای بر روی مقاومت لهیدگی:

با حضور خمش یا برش صفحه‌ای، ظرفیت تیر ورق تحت اثر بارگذاری فشاری لبه‌ای کاهش خواهد یافت. برای بررسی و مطالعه مقدار این تاثیر، مدلسازی کامپیوتری برای تیرورقهایی که تحت اثر بارگذاری متمنکر، خمشی و برشی بودند، انجام گرفت. دو مقطع طولی موج ذوزنقهای و چند تیرورق ساده و دوگانه برای این بررسی مد نظر قرار گرفته‌اند. بارهای موضعی هم در بالای قسمت صاف و هم بالای قسمت مورب موج اعمال گردیده‌اند. نتایج حاصل از این مطالعات تحلیلی به شرح زیر است.

• اثر خمش صفحه‌ای:

در حالتی که تیر ورق با پروفیل موج نوع I (که قبلاً معرفی شد) ساخته شده بود، ضخامت جان ۲/۶۶ میلیمتر در نظر گرفته شد و بالهای دارای پهناهی ۲۳ میلیمتر و ضخامت ۱۲/۷ میلیمتر در نظر گرفته شدند.

---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

در حالتی که تیرورق با پروفیل موج نوع II ساخته شد، ضخامت جان ۳/۴۲ میلیمتر و مقطع عرضی بال با ابعاد ۱۹\*۱۵۲ میلیمتر ساخته شد.

بارمترکز (موقعی) روی قسمت صاف و یا مورب موج اعمال شد و همزمان خمش صفحه‌ای نیز بر بال اعمال گردید و تیر ورق با استفاده از مدل کامپیوتری تحلیل شد. پنج تیرورق به ترتیب مذکور مورد بررسی قرار گرفتند:

- تیرورق ساده که جان آن از پروفیل I است.
- تیرورق ساده که جان آن از پروفیل II است.
- تیرورق دوگانه که جان آن از پروفیل III است.

در این تیرورقها، بار روی قسمت صاف و در عرضی مساوی با پهنهای بال اعمال گردیده و پهنا بارمترکز (موقعی) مساوی پهنهای مورب بال در نظر گرفته شد. دو تیر ورق با قیمانده، یکی تیر ورق ساده که جان آن از پروفیل نوع I می‌باشد و دیگری تیر ورق دوگانه که جان آن از پروفیل نوع II می‌باشد.

بار مترکز روی قسمت مورب در عرضی مساوی پهنهای بال و در پهنهای (طولی) مساوی تصویر قسمت مورب روی قسمت صاف اعمال گردیده است. نتایج در شکل (۱۱-۲) رسم شده‌اند. در همان شکل، نمودار متناظر با دو معامله اندرکنشی پیشنهادی نیز رسم شده است.

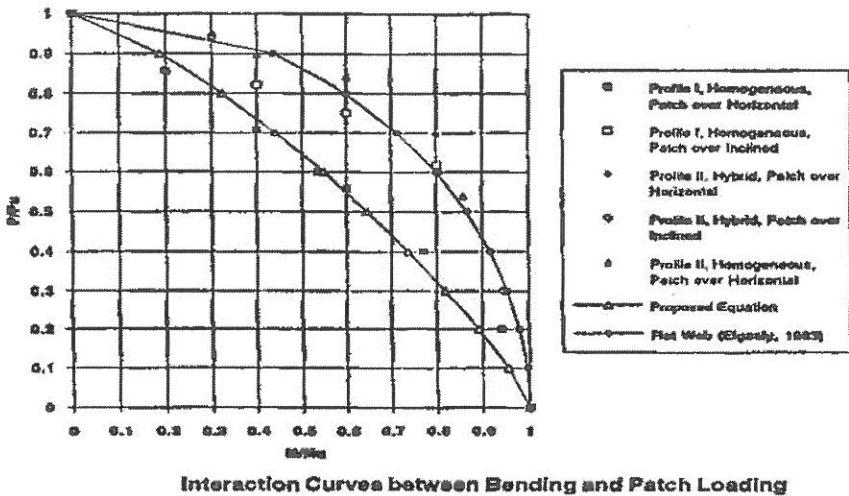
$$(P/P_U)^2 + (M/M_U)^2 = 1 \quad (16-2)$$

Load over Fold Line between Parallel and Inclined Folds

Girder (1)	$t_f$ (in.) (2)	$t_w$ (in.) (3)	$F_{yf}$ (ksi) (4)	$F_{yw}$ (ksi) (5)	$N/b_w + b$ (6)	Profile (7)	$P_r$ (kips) (8)	$P_y$ (kips) (9)	$a$ (in.) (10)	$P_{II}$ (kips) (11)	$P_w$ (kips) (12)	$P_o$ (kips) (13)	$P_r/P_y$ (14)
Girder 61	0.5000	0.1046	36.00	36.00	0.00	I	30.02	33.33	3.09	23.29	11.18	34.47	0.90
Girder 62	0.5000	0.1046	36.00	65.00	0.40	I	48.72	54.79	3.28	31.28	15.02	46.30	1.05
Girder 63	0.5000	0.0747	36.00	36.00	0.00	II	22.05	22.34	3.17	17.04	5.70	22.74	0.99
Girder 64	0.7500	0.1345	36.00	36.00	0.39	II	56.47	53.08	4.05	34.30	18.48	52.78	1.07
Girder 64A	0.7500	0.1345	36.00	36.00	1.00	II	63.05	67.61	4.82	34.30	18.48	52.78	1.20
Girder 65	0.5000	0.0747	36.00	100.00	0.39	II	42.62	46.20	2.40	28.40	9.50	37.90	1.12
Girder 66	0.3937	0.0787	69.00	40.63	0.00	III	24.88	34.94	4.06	25.94	6.72	32.66	0.76
Girder 67	0.5000	0.1046	36.00	36.00	0.00	IV	27.65	27.97	1.89	14.25	11.18	25.44	1.09
Girder 68	0.5000	0.1046	36.00	65.00	1.00	IV	39.53	38.89	1.72	19.16	15.02	34.18	1.16

Note: 1 in. = 25.4 mm. 1 kip = 4.45 kN. 1 ksi = 6.89 MPa.

جدول (۱۱-۲): نتایج برای حالتی که بار روی بین قسمت مورب و موازی جان است



شکل (۱۱-۲): منحنی اندرکنش خمش و بارهای لهیدگی

رابطه (۱۶-۲)، روشی برای به محاسبه اندرکنش بین خمش و بارگذاری متمرکز (موقعی) در تیورقهای با جان تخت می‌باشد. منحنی حاصل از رابطه پیشنهادی برای تیورقهای با جان موجدار، وقتی که بار بر روی قسمت مورب اعمال شده باشد، یک حد متوسط ارائه می‌دهد. از این رو برای حالتی که بار روی قسمت صاف موج اعمال شده باشد، نتیجه دست بالایی ارائه خواهد کرد.

وقتی که تیوررق با جان موجدار، در معرض خمش قرار می‌گیرد، فقط قسمتهایی از جان که خیلی به بال نزدیک می‌باشند تحت تنش قرار می‌گیرند. علاوه بر این مشخص شد که در قسمتهای موازی موج، تنش در نزدیکی بالها خیلی بزرگتر از قسمت مورب موج است. بنابراین، نتایج مورد بحث قرار گرفته قبلی، راجع به اندرکنش بین خمش صفحه‌ای و بارگذاری فشاری لبه‌ای در مقایسه با یافته‌های قبلی معقول می‌باشد. منحنی اندرکنش ارائه شده توسط رابطه (۱۶-۲) محافظه کارانه بوده و حد پایینی را برای نتایج به دست آمده از تحلیل کامپیوترا ارائه می‌دهد.

#### • اثر برش صفحه‌ای

پنج نمونه تیوررق مشابه با تیورقهایی که برای مطالعه اثر خمش صفحه‌ای استفاده شدند، برای مطالعه اثر برش صفحه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. به طور مشابه، بار موقعی به همراه برش یکنواخت بر این تیرها اعمال شد و تیورقهای با استفاده از روش کامپیوترا تحلیل شدند. نتایج آنالیزها

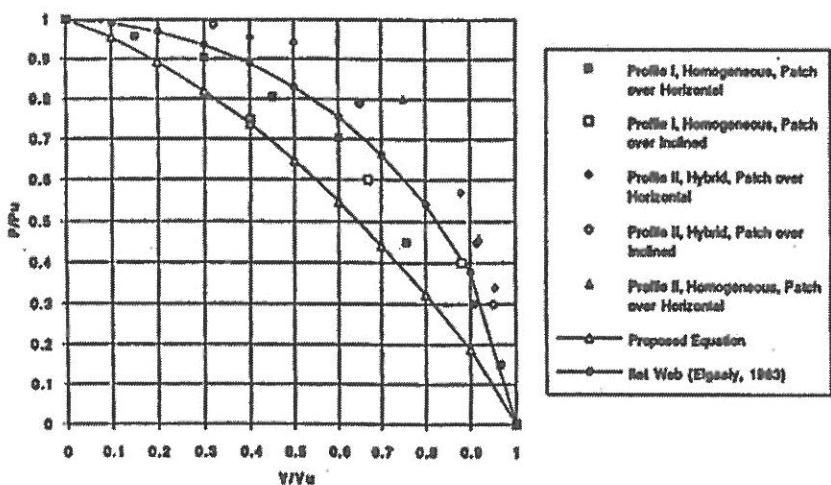
در شکل (۱۷-۲) رسم شده‌اند. در همان شکل نمودار متناظر و با دو معادله اندرکنش زیر رسم شده‌اند:

$$(P/P_U)^{1.8} + (V/V_U)^{1.8} = 1 \quad (17-2)$$

رابطه (۱۷-۲) یک توصیه (روش) برای در نظر گرفتن اندرکنش اثرات برش و بارگذاری متمرکز (موضعی) در تیورقهای دارای جان تخت می‌باشد. اما منحنی ارائه شده توسط رابطه (۱۸-۲) حد متوسطی از نتایج آمده از تحلیل کامپیوتربی برای تیورقهای با جان موجدار می‌باشد.

$$(P/P_U)^{1.25} + (V/V_U)^{1.25} = 1 \quad (18-2)$$

رابطه (۱۸-۳) محافظه کارانه بوده و حد پایینی را برای این نتایج ارائه می‌دهد. با این حال میتواند برای طراحی استفاده گردد.



Interaction Curves between Shear and Patch Loading

شکل (۱۲-۲): منحنی اندرکنش برش و بارهای لهیدگی

۴-۳-۴- جمع بندی تحقیقات بر روی مطالعات مربوط به لهیدگی جان:  
از یک مدل کامپیوتربی که قادر به توصیف رفتار و مقاومت نهایی تیورقهای دارای جان موجدار ذوزنقه‌ای می‌باشد، برای انجام مطالعات پارامتریک استفاده گردیده است. پارامترهای زیادی از جمله، ضخامت و تنש جاری شدن مصالح جان و بال، مقطع طولی موج و پهنهای بار موضعی مورد بررسی قرار گرفتند.

---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای
 

---

موقعیت متفاوتی برای بار در نظر گرفته شد که عبارت بودند از:

– بار بالای قسمت صاف موج

– بار بالای قسمت مایل

– بار بالای محل تقاطع قسمت مورب و صاف موج

تحت اثر بارهای متمرکز (موضعی) فشاری، تیرورق با جان چین خورده می‌تواند به علل زیر گسیخته گردید.

– تشکیل مکانیزم فروریزی در بال و به دنبال آن لهیلدگی جان

– تسليیم جان و به دنبال آن لهیلدگی و خمس قائم بال

روابطی برای محاسبه ظرفیت نهایی باربری برای تیرورق با جان موجدار تحت اثر بارگذاری متمرکز نقطه‌ای ارائه گردیده است. این معادلات نتایج بسیار خوبی ارائه می‌دهند و برای استفاده‌های طراحی توصیه می‌گردند. اثرات حضور (وقوع) خمس یا برش صفحه‌ای به همراه بار موضعی بررسی گشته و روابط اندرکنش محافظه کارانه‌ای برای لحاظ کردن این اثرات پیشنهاد شده است.

## References:

- [1] Elgaaly Hamilton M. Seshadri ,A.1996" shear strength of beams withs corrugated webs" *Journal of structural engineering* ,123(6) :772-782
- [2] J. He, Y. Liu, A. Chen, and T. Yoda, "Shear behavior of partially encased composite I-girder with corrugated steel web: Experimental study," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 77, pp. 193–209, Oct. 2012.
- [3] N. D. Nguyen, S.-R. Han, G.-S. Lee, and Y.-J. Kang, "Moment modification factor of I-girder with trapezoidal-web-corrugations considering concentrated load height effects," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, no. 11, pp. 1773–1787, Nov. 2011.
- [4] E. Y. Sayed-ahmed, "Design aspects of steel I-girders with corrugated steel webs," *Electronic Journal of civil engineering*, vol. 7, pp. 27–40, 2007.
- [5] Elgaaly ,M.Hamilton And Seshadri ,a.1997"bending strength of steel beams with corrugated webs" . *ASCE journal of structural engineering* ,123(6):783-793
- [6] Carling, O., 1974. Rana balken typgodkännande; Belastningsförsök på svetsade stålalkar med veckat liv. Stockholm: Ingenjörsbyrån AB.
- [7] Leiva-Aravena, L. and Edlund, B., 1987. Buckling of Trapezoidally orragated Webs. *Colloquium on Stability of Plate and Shell Structures*, ECCS, pp.107-16, Ghent University.
- [8] Elgaaly ,M.And Seshadri ,a.1997."Girder with corrugated webs under partial compersive edge loading" ,*journal of structural Engineering* ,123(6):783-791
- [9] Luo ,R., and Edlund ,B.1996 ."Ultimate strength of girders with corrugated webs under patch loading" . *thin walled structures* ,24 :135-156

## فصل سوم:

### تیرورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی

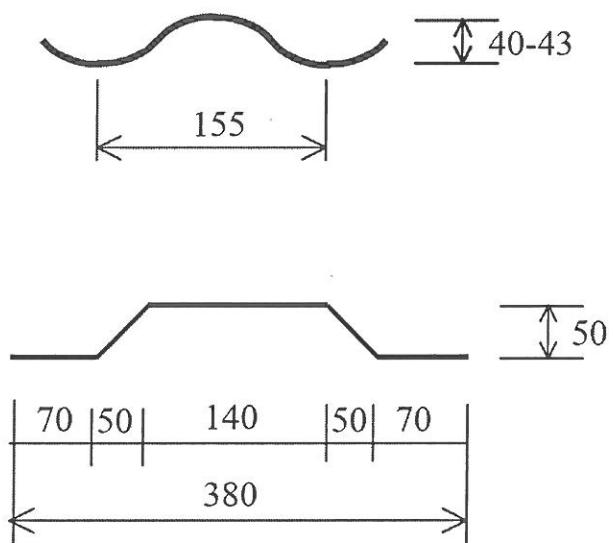
چکیده :

در این فصل تحقیقات محققین قبلی در خصوص تبیین رفتار سازه‌ای تیرورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی بررسی خواهد شد. تحقیقات بر روی موجهای سینوسی پس از موجهای ذوزنقه‌ای و در سالهای اخیر انجام شده است. موجهای سینوسی به دلیل دشواریهای تولید، اندکی با تاخیر مورد توجه قرار گرفتند. شاید مهمترین تفاوت رفتاری ورقهای سینوسی نسبت به ورقهای ذوزنقه‌ای در این است که کمانش موضعی جان تحت نیروهای برشی در جان سینوسی به ندرت اتفاق می‌افتد. به طوریکه می‌توان این نوع کمانش را در مورد تیرورقهای سینوسی نادیده گرفت. به طور کلی اگر چه مکانیسم کلی رفتار تیرورقهای با جان موجدار مشخص شده است، اما هنوز هم سازندگان معدودی که به تولید این تیرورقها می‌پردازنند، بر مبنای تحقیقات مخصوص به تولیدات خود، به طراحی این تیرورقها مبادرت می‌ورزند.

در این فصل سعی می‌شود تا عمدۀ تلاشهای تحقیقاتی قبلی که برای تبیین رفتار تیرهای سینوسی انجام شده است، دسته‌بندی شده و روابط پیشنهادی در این مطالعات ارائه گردد. این روابط در واقع پشتونه اصلی روند طراحی تیرهای سینوسی می‌باشد که در فصل بعد به آن پرداخته خواهد شد.

### ۱-۳- مقدمه

رفتار سازه‌ای تیرورقهای با جان موجدار سینوسی نیز تقریباً همانند تیرورقهای با جان موجدار ذوزنقه‌ای است. در مورد تیرورقهای با جان سینوسی تحقیقات مستقلی وجود دارد که عمدتاً توسط دکتر پاسترناک و به درخواست شرکت اتریشی زیمن انجام گرفته است. این شرکت از تولید کنندگان عمدۀ تیرورق با جان سینوسی در اروپا به شمار می‌رود [1]. گروه دیگر از تولید کنندگان تیرورقهای با جان موجدار گروه رنبالکن در سوئد هستند که به مدت ۴۰ سال است در ساخت این نوع تیرورقهای فعالیت دارند و تیرورقهای سقفی را تولید می‌کنند [2]. فرم‌های تولید شده موج سینوسی و ذوزنقه‌ای مذکور در شکل ۱-۳ نشان داده شده‌اند. ابعاد نشان داده شده در این شکل، در واقع ابعاد عملی هستند که همکنون نیز تولید می‌شوند. تیرورقهای با جان موجدار سینوسی که توسط شرکت زیمن تولید می‌شود، دارای ارتفاع ۳۳۳ میلیمتر تا ارتفاع ۱۵۰۰ میلیمتر می‌باشد. اما در مورد تیرورقهای با موج ذوزنقه‌ای که توسط شرکت سوئدی تولید می‌شود، ارتفاع جان موجدار تا ۳ متر هم می‌رسد.



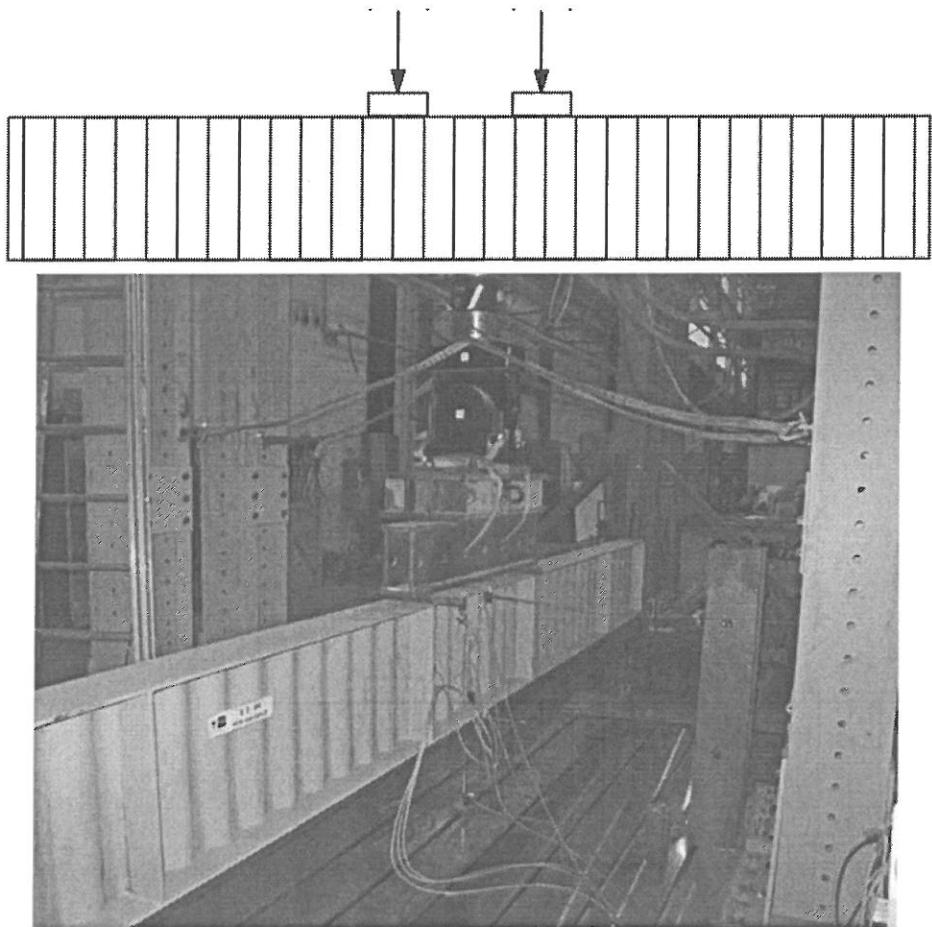
شکل ۱-۳: ابعاد واقعی تولید شده برای موجهای سینوسی و ذوزنقه‌ای که همکنون نیز در اروپا تولید می‌شوند.

در ادامه این فصل، تحقیقات انجام شده بر روی موجهای سینوسی با محوریت کارهای آقای دکتر پاسترناک که نسبتاً جامعتر از سایر محققین به تیرورقهای با جان سینوسی پرداخته‌اند، مختصراً مرور خواهد شد [3-10].

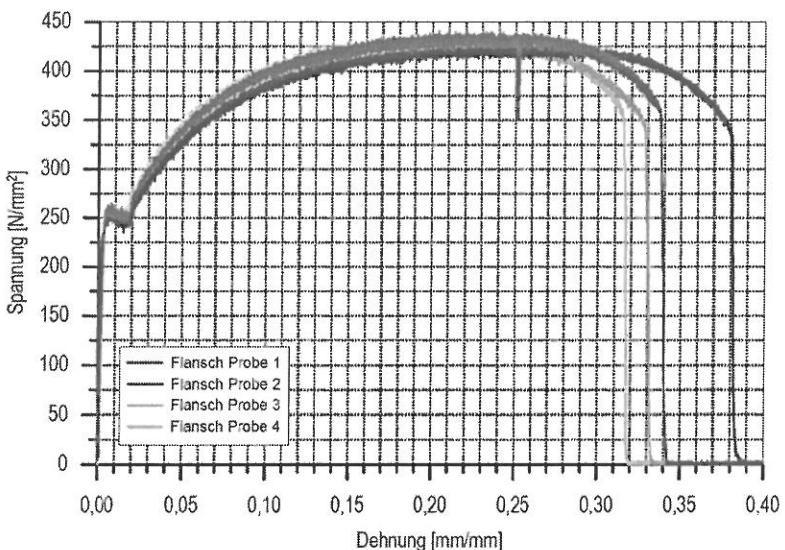
### ۲-۳- رفتار تیرورقهای با موج سینوسی در خمث:

دکتر پاسترناک و همکارانش (دکتر هانویر) [3]، تقریباً تمام وجوه عملکردی تیرورقهای با موج سینوسی را مورد ارزیابی قراردادند. در رابطه با ظرفیت خمثی تیرورقهای با جان سینوسی، تجهیزات آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۲-۳ توسط محققین مذکور برپا شد و نمونه‌هایی از تیرورقهای معمول با جان سینوسی مورد ارزیابی قرار گرفت.

نمودار رفتار تغییر مکان نیرو در این تیرورقهای در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، این نوع تیرورقهای تقریباً رفتار واضحی در خمث دارند. سه حالت ممکن است بوجود آید که این سه حالت همانند رفتار تیرورقهای با جان موجدار ذوزنقه‌ایست که قبلاً توسط پروفسور القالی در مورد تیرورقهای با جان موجدار ذوزنقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته بود.



شکل ۲-۳: جزییات آزمایش‌های صورت گرفته توسط دکتر پاسترناک و همکاران [4]



شکل ۳-۳: نمودار ظرفیت باربری تیرورقهای با موج سینوسی در مقابل تغییر مکان تیر

همانند پروفسور القالی (به فصل دوم مراجعه شود)، تیم آلمانی نیز نتیجه گرفتند که در حالت اعمال بارهای خمشی، کل خمش توسط بالها تحمل می‌شود و اصولاً موج سینوسی به دلیل عدم سختی محوری، مقاومتی در مقابل خمش ندارد. بنابراین بالها در خمش تقریباً تمام نیروهای فشاری و خمشی را تحمل می‌کند.

عموماً بال بالایی تیر، تحت فشار و بال پایینی تیر تحت کشش قرار دارد. بال پایین که تحت کشش قرار دارد، اصولاً تا حد نهایی خود که جاری شدن مصالح است، در مقابل بارهای واردہ ایستاگی می‌کند. اما بال بالایی که تحت فشار قرار دارد، اصولاً رفتار مختلفی را تجربه می‌کند.

### ۳-۲-۳- ظرفیت خمش نهایی تیر سینوسی:

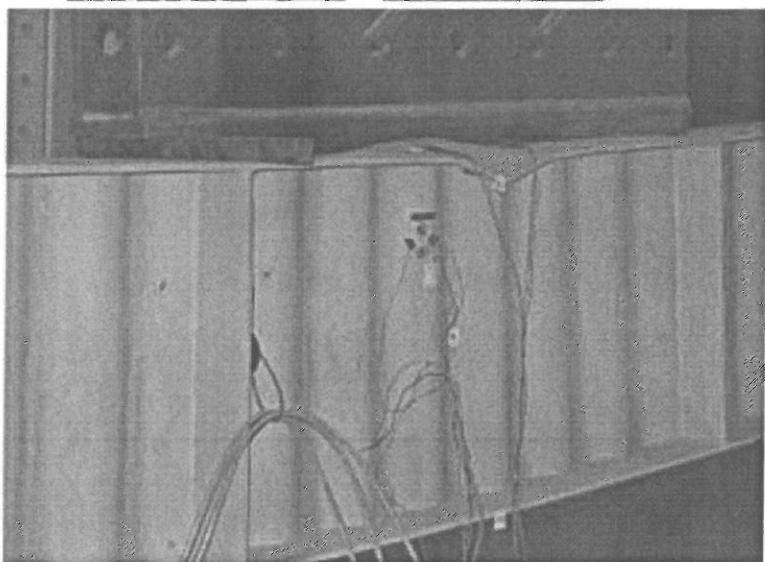
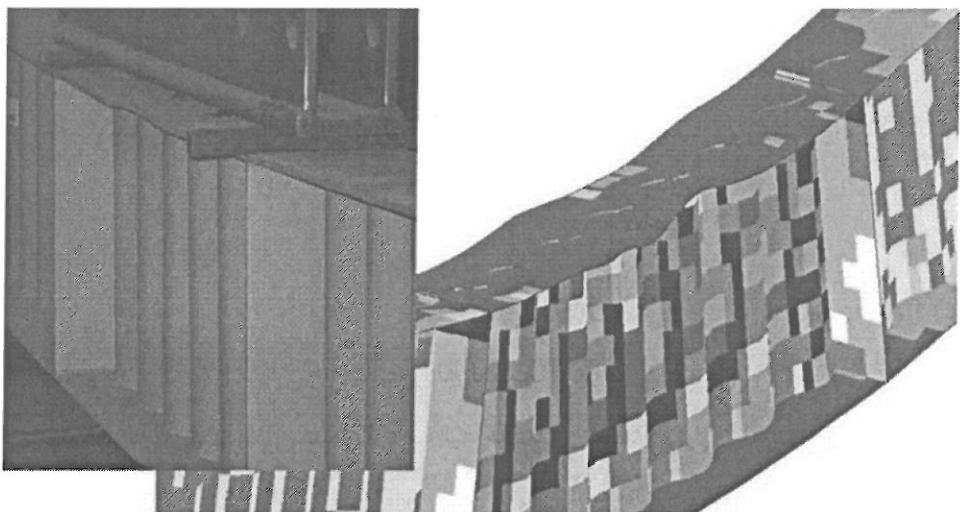
وقتی تیر با موج سینوسی تحت خمش قرار می‌گیرد، حالات مختلفی بسته به شرایط حاکم ممکن است رخ دهد. در حالت اول ممکن است که بال تحت فشار همانند بال تحت کشش تا حد نهایی خود باربری داشته باشد. به عبارت دیگر، بال تحت فشار در اثر نیروهای فشاری وارد شده، کمانش کلی و موضعی نمی‌کند. در این حالت می‌توان ظرفیت نهایی لنگر خمشی تیرورق را از رابطه زیر برآورد نمود.

$$M_T = (h_w + t_f) f_y t_f b_f \quad (1-3)$$

این ظرفیت باربری در واقع همان ظرفیت پلاستیک شدن مصالح بالهاست. به عبارت دیگر فرض شده است که هر دو بال کششی و فشاری تا حد جاری شدن مقاومت کرده‌اند. بنابراین لنگر محاسبه شده در رابطه ۱-۳ حداکثر لنگریست که یک تیرورق با جان موجدار می‌تواند تحمل کند.

#### ۲-۲-۳- ظرفیت خمش نهایی تیر تحت کمانش موضعی:

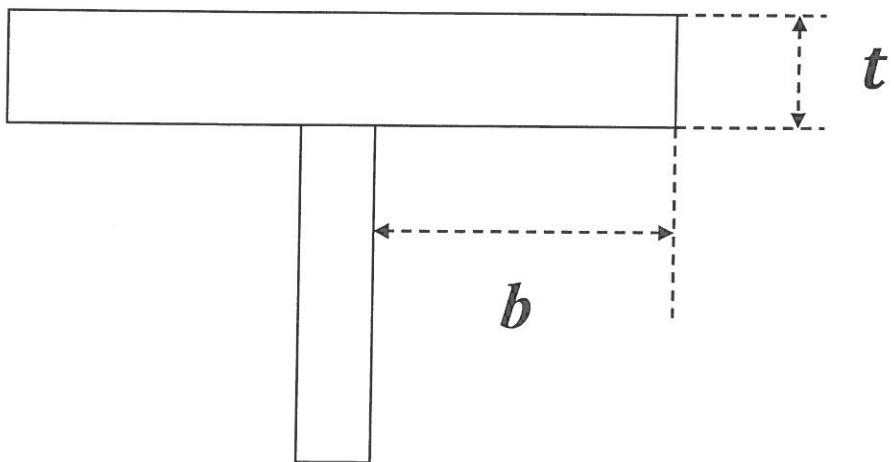
حالت دوم برای یک تیرورق با جان موجدار تحت بارهای خمشی این است که بال تحت فشار تیرورق ممکن است در اثر فشارهای واردہ کمانش کند. به عبارت دیگر ممکن است بال تحت فشار به صورت موضعی از تحمل فشارهای واردہ شانه خالی کرده و به سمت بالا یا پایین دچار اعواج گردد. نمونه‌ای از این نوع اعواج بال تحت فشار در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.



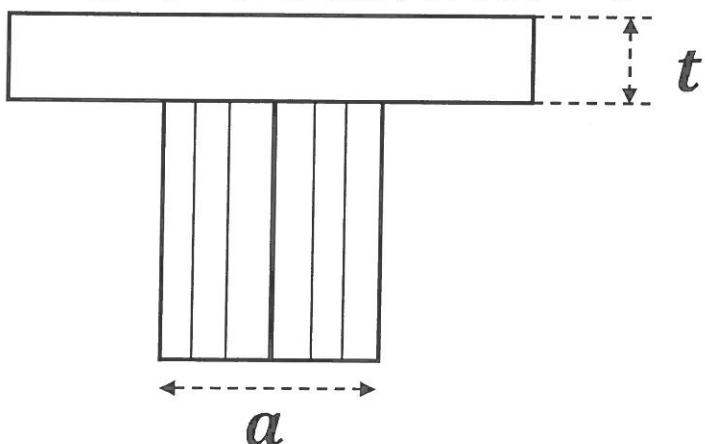
شکل ۴-۳: کمانش موضعی بال تحت فشار تیر در اثر بارهای وارد شده.

این نوع اعوجاج که به صورت بالا و پایین رفتن لبه آزاد بال تحت فشار ظاهر می‌شود، اصطلاحاً کمانش موضعی بال تحت فشار نامیده می‌شود. از این نظر رفتار تیرورقهای با جان موجدار همانند تیرورقهای معمولیست. زیرا دقیقاً همین نوع کمانش نیز در بالهای تحت فشار تیرورقهای با جان مسطح نیز بوقوع می‌پیوندد.

اگر ضخامت بال تحت فشار از حدی بیشتر باشد، دیگر دچار کمانش موضعی نخواهد شد و تا حد نهایی خود باربری خواهد کرد. بنابراین در تیرورقهای معمولی نسبت عرض به ضخامت حداقلی را مشخص می‌کنند که اگر در یک تیر مشخص این نسبت از مقدار حداقل آن بیشتر باشد، احتمال وقوع کمانش موضعی منتفی خواهد بود.



شکل ۳-۵: عرض ازad بال در تیرورقهای با جان مسطح معمولی.



شکل ۳-۶: عرض ازad بال در تیرورقهای با جان مسطح موجدار مشخص نیست.

در مورد تیرورقهای با جان موجدار نیز محققین اصولاً بدنیال مشخص کردن چنین مقدار حداقل برای نسبت عرض به ضخامت بال تحت فشار هستند تا کمانش موضعی بال تحت فشار را از قبل مشخص کرده و کنترل کنند. اما مسئله این است که در تیرورقهای با جان معمولی، مقدار عرض آزاد بال تحت فشار (b) مشخص است (شکل ۳-۵).

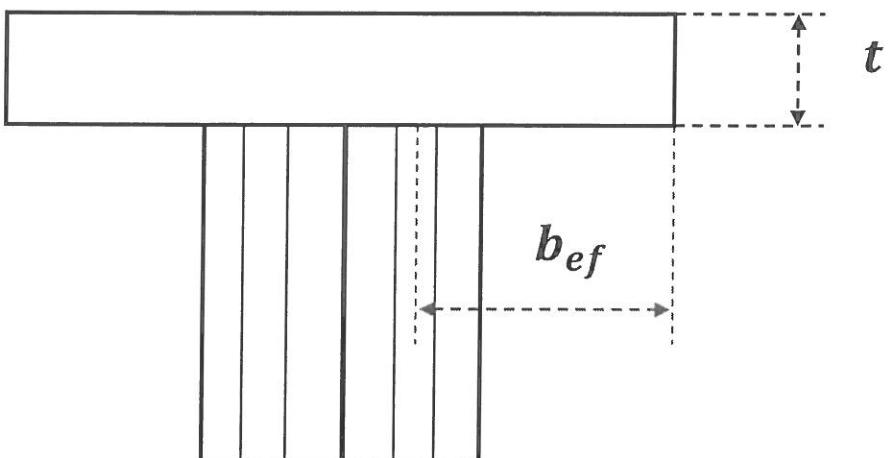
اما در تیرورقهای با جان موجدار این عرض آزاد بال به خوبی مشخص نیست و به دلیل موجدار بودن جان، مقدار عرض آزاد بال در طول تیر متغیر است (شکل ۳-۶).

بنابراین برخی از محققین مانند جانسون- کافولا اعلام کردند که تحت شرایط خاصی می‌توان مقدار متوسط بیرون زدگی بال را به عنوان عرض موثر بال در نظر گرفت و نسبت لاغری بال را از روی آن بدست آورد [1].

اما قواعد شرکت راه‌آهن برای طراحی موج ذوزنقه‌ای این است که برای محاسبه عرض موثر بال در موجهای ذوزنقه‌ای می‌توان نصف عرض بال را از مقدار ۳۰ میلیمتر کم کرد و به عنوان عرض موثر استفاده کرد. واقعیت اینست که این فرض خیلی خوشبینانه است و ممکن است منجر به خطأ شود. زیرا مقدار ۳۰ میلیمتر از مقدار نصف عمق جانهای موجدار موجود در بازار خیلی بیشتر است و اگر این مقدار مورد استفاده قرار گیرد، در واقع مثل اینست که فرض کنیم، کمانش موضعی در ناحیه خارج محوطه موج، در بال فشاری ایجاد خواهد شد.

شرکت زیمن، روش دیگری ارائه می‌دهد [1]. این شرکت برای محاسبه عرض موثر بال، نصف مقدار عرض بال را ملاک قرار داده و از ان مقدار ۱۱ میلیمتر کم می‌کند و نتیجه را به عنوان عرض آزاد بال تحت فشار لحاظ می‌کند. از آنجا که عمق جان در تولیدات شرکت زیمن اکثرا حدود ۴ سانتیمتر است، بنابراین مقدار ۱۱ میلیمتر برابر با یک چهارم عرض موج سینوسیست. بنابراین به نظر می‌رسد که شرکت زیمن اثر وجود موج را در کاهش عرض موثر بال به طور کامل نمی‌پذیرد، اما اثر ان را مانند تیرورق با جان مسطح نیز کاملاً نادیده نمی‌گیرد. به این ترتیب، حالت بینابینی را برای محاسبه طول موثر آزاد بال پیشنهاد می‌دهد (شکل ۳-۷).

با این توضیحات مشاهده می‌شود که محققین قبلی روش مبتنی بر آزمایشات خود و در حیطه‌ی ابعاد موجود را ابداع کرده و هر کدام به صلاح‌دید خود، مقداری را برای برآورد ظرفیت بال در مقابله کمانش موضعی پیشنهاد می‌دهند.

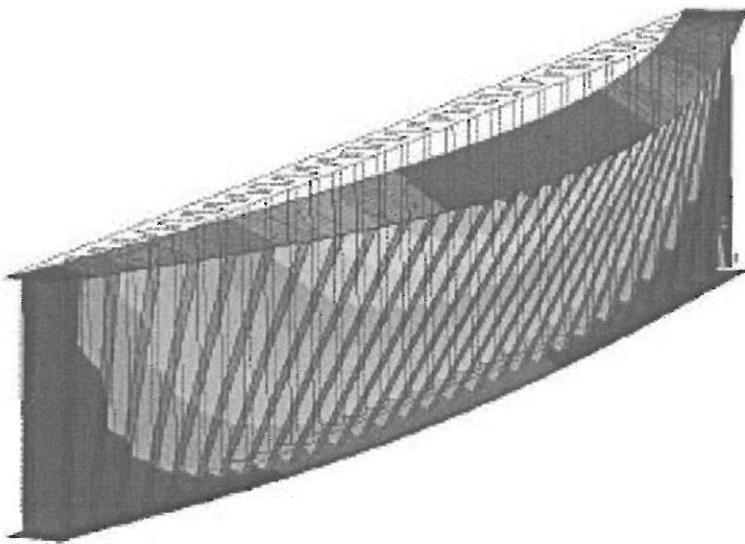


شکل ۳-۷: عرض ازاد بال طبق پیشنهاد شرکت زیمن به صورت نصف عرض موج

### ۳-۲-۳- ظرفیت خمش نهایی تیر تحت کمانش پیچشی - جانبی:

حالت سومی که ممکن است برای یک تیرورق تحت خمش رخ دهد، کمانش کلی بال تیرورق می‌باشد. در ابتدای بحث عنوان شد که اگر ضخامت و سختی بال زیاد باشد، تیر می‌تواند تا حد جاری شدن در مقابل تنشهای کششی و فشاری ناشی از خمش مقاومت کند (حالت اول). این بهترین حالت برای طراحان است و می‌تواند حداقل ظرفیت تیرورق را استفاده کنند. اما اگر ضخامت و سختی بال تحت فشار به اندازه کافی نباشد، در اثر اعمال بارهای وارد ممکن است کمانش موضعی و یا کلی کمانش کل یا موضعی جان باعث می‌شود که نتوان تیرورق را تا حد جاری شدن مصالح بال کند. کمانش کل یا موضعی جان باعث می‌شود که نتوان تیرورق را تا حد جاری شدن مصالح بال تحت فشار بارگذاری کرد. کمانش موضعی بال تحت فشار در قسمت قبل با آن تشریح شد (حالت دوم). در این قسمت کمانش کلی بال تحت فشار و اثر آن از نظر مقاومتی بر عملکرد تیرورق تشریح می‌گردد (حالت سوم).

کمانش کلی بال تحت فشار در واقع حرکت بال تحت فشار به سمت بیرون است. اگر تیری تحت خمش قرار گیرد، بال بالای آن تحت فشار و بال پایین آن معمولاً تحت کشش قرار می‌گیرد. بال تحت فشار همیشه در معرض خطر کمانش کلی است و اگر از کناره‌ها مهار نشده باشد (یا به عبارتی اگر حرکت بال بالایی تیر به صورت جانبی نگه داشته نشده باشد)، ممکن است بال تحت فشار به سمت بیرون کمانه کند. این نوع کمانش با پیچش قسمت بالای تیر نیز همراه است. به همین جهت، آن را کمانش پیچشی - جانبی می‌نامند. شکل ۳-۸ نوعی از کمانش پیچشی - جانبی را برای بال تحت فشار یک تیر ذوزنقه‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۸-۳: شمای کمانش پیچشی جانبی بال تحت فشار یک تیر با جان موجدار از نوع ذوزنقه‌ای

کمانش پیچشی – جانبی بال تحت فشار می‌تواند با تعییه مهار جانبی در فواصل مناسب برای بال بالایی تیر به کلی از بین برود. مهارهای جانبی برای نگه داشتن بال تحت فشار در جای خود، می‌تواند توسط سایر المانهای متصل به بال تامین شود. مثلاً در تیرورقهای سقف سازه‌های صنعتی مهار جانبی در واقع همان پرلین‌ها و لایپهای هستند که بر روی بال بالایی تیر پیچ می‌شوند. در سقف ساختمانها نیز بال تحت فشار معمولاً به دال بتنی بالای ان مهار شده است.

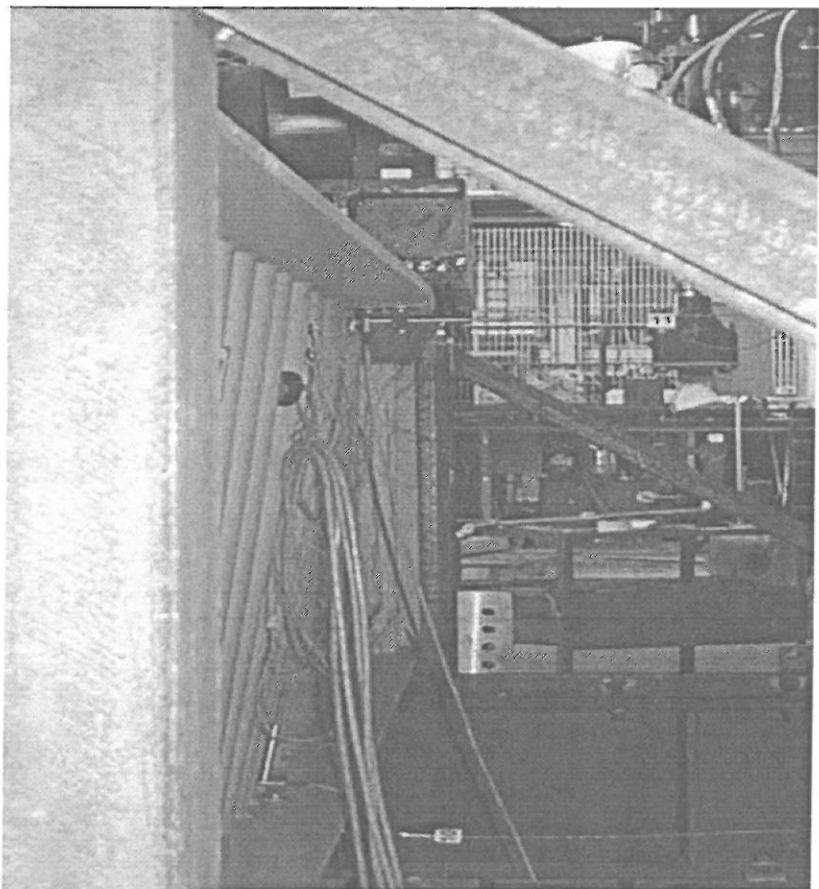
اما اگر تحت شرایطی امکان مهار جانبی بال تحت فشار فراهم نباشد و یا فاصله مهارهای جانبی از حد معینی بیشتر باشد، مجبور هستیم که مقدار بار را کاهش دهیم، تا از وقوع کمانش کلی جلوگیری کنیم.

حال سوال اینست که فواصل حداقل بین مهارها چقدر باید باشد تا کمانش کلی بال تحت فشار رخ ندهد. سوال دوم این است که اگر فاصله مهارها از حداقل لازم تجاوز نماید، انگاه تنش خمشی برای وقوع کمانش چقدر خواهد بود؟.

ایین نامه DIN 18800 المان دستوراتی را در زمینه کمانش جانبی بال تحت فشار ارائه می‌دهد. در این آییننامه یک ضریب لاغری برای بال تحت فشار تعریف می‌شود [11]. این ضریب لاغری از روی خصوصیات هندسی بال تحت فشار و فاصله‌ی مهارهای جانبی قابل محاسبه است. لاغری بال تحت فشار نباید از حد معینی کوچکتر باشد. این مقدار حداقل، طول مهاری حداقل برای مهارهای جانبی

را نیز مشخص می‌کند. اگر لاغری از حد تعیین شده تجاوز نماید، مقدار تنش مجاز را برای عدم وقوع کمانش پیچشی-جانبی می‌توان از روی مقدار لاغری بدست آورد.

دکتر پاستارناک و هانویر مطالعات زیادی را بر روی تیرورقهای با موج سینوسی انجام دادند. این مطالعات هم به صورت آزمایشگاهی و هم بصورت کامپیوتري انجام شد [2]. شکل ۹-۳ نمونه‌ای از تیرورق با جان موجدار را نشان می‌دهد که بدون مهار جانبی تحت خمش قرار گرفته و در اثر بارهای وارد کمانش پیچشی-جانبی کرده است. همانطور که قبل اشاره شد، بال بالایی (همان بال تحت فشار) تمایل دارد تا به سمت چپ یا راست خم شود و از زیر بار شانه خالی کند. در شکل ۱۰-۳ نیز اندیزهای کامپیوتري برای مدلسازی کمانش پیچشی-جانبی بال تحت فشار نمونه‌ها به طور شماتیک نشان داده شده است.

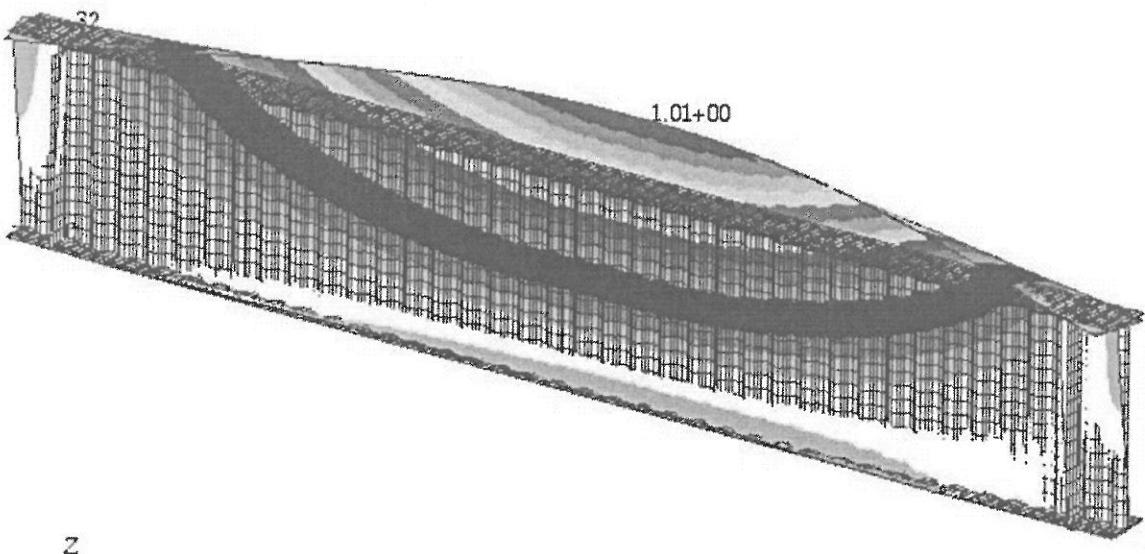


شکل ۹-۳: کمانش پیچشی-جانبی بال تحت فشار یک تیر با جان سینوسی

---

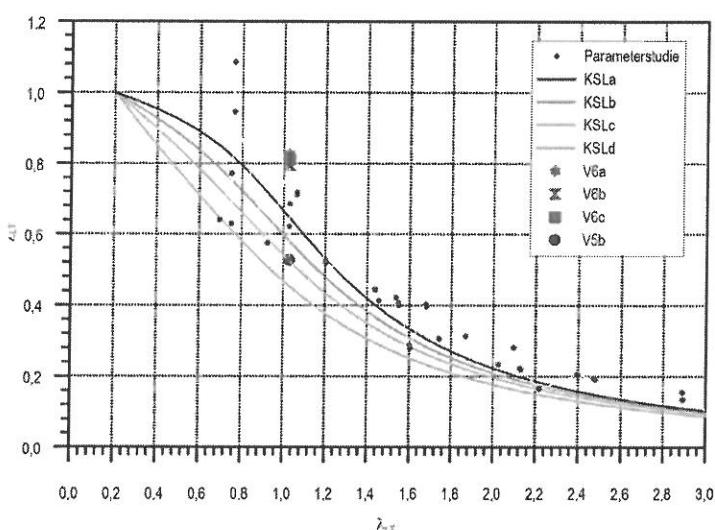
 تیرورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی
 

---



شکل ۱۰-۳: شکل حاصل از انتالیز کامپیوتربهای کمانش پیچشی-جانبی بال تحت فشار یک تیر با جان سینوسی

نتایج مطالعات پارامتریکی که دکتر پاستارناک و همکارانش انجام دادند، نشان داد که رابطه دستورالعملی آییننامه DIN18800 در رابطه با کمانش کلی بال تحت فشار می‌تواند حد پایین نیروهای کمانشی را بخوبی پوشش دهد. مقایسه بین نتایج حاصل از روابط پیشنهاد شده در آییننامه و مطالعات پارامتریک انجام شده برای بار بحرانی کمانش در شکل ۱۱-۳ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، همخوانی بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد.



شکل ۱۱-۳: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدلسازیهای کامپیوتربهای کمانش پیچشی-جانبی بال تحت فشار تیرهای با جان سینوسی

### ۴-۲-۳- ظرفیت نهایی تیرهای سینوسی تحت نیروهای برشی:

در رابطه با تحمل تیرورقهای با جان موجدار در مقابل نیروهای برشی، در فصل دوم برای تیرورقهای ذوزنقه‌ای تشریح شد که موجهای ذوزنقه‌ای به دو صورت ممکن است در مقابل تنشهای برشی مقاومت خود را از دست دهند. اول اینکه ممکن است در داخل قسمتهای مسطح جان موجدار کمانش موضعی رخ دهد و دوم اینکه ممکن است کمانش به صورت کلی و در طول چند موج اتفاق افتد. برخی محققین به اندرکنش این دو نوع کمانش نیز معتقد هستند و سعی کرده اند با ترکیب بار بحرانی این دو نوع کمانش درنهایت یک مقدار براب بحرانی کمانش در برش ارائه کنند.

مطالعات قبلی بر روی نمونه‌های مختلف تیرورقهای با جان ذوزنقه‌ای و سینوسی بسیار متنوع است. در جدول ۱-۳ نمونه‌ای از این مطالعات نشان داده شده است. در این جدول نتایج حدود ۷۳ تیرورق که تحت مطالعات آزمایشگاهی قرار گرفته اند، آورده شده است.

جدول ۱-۳: نتایج نمونه‌های آزمایشات انجام شده بر روی تیرورقهای با جان موجدار [2]

Test No	original ref <sup>9</sup>	$h_w$ mm	$t_w$ mm	$f_{yw}$ MPa	$\alpha$	$a_1$ mm	$a_2$ mm	$V_u$ kN	$\chi_u$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$V_u/V_{R1}$	$V_u/V_{R2}$	
0	L1A	5	994	1,94	292	45	140	48	280	0,860	0,931	0,558	1,370	0,860
1	L1B	5	994	2,59	335	45	140	48	502	1,007	0,747	0,556	1,442	1,007
2	L2A	5	1445	1,94	282	45	140	50	337	0,737	0,915	0,774	1,164	0,737
3	L2B	5	1445	2,54	317	45	140	50	564	0,839	0,741	0,768	1,197	0,839
4	L3A	5	2005	2,01	280	45	140	48	450	0,690	0,880	1,092	1,068	0,778
5	L3B	5	2005	2,53	300	45	140	48	775	0,881	0,724	1,067	1,244	0,962
6	B1	10	600	2,1	341	45	140	50	208	0,837	0,929	0,347	1,332	0,837
7	B2	10	600	2,62	315	45	140	50	273	0,954	0,716	0,315	1,340	0,954
8	B3	10	600	2,62	317	45	140	50	246	0,854	0,718	0,316	1,202	0,854
9	B4b	10	600	2,11	364	45	140	50	217	0,815	0,956	0,358	1,315	0,815
10	M101	10	600	0,99	189	45	70	15	53	0,817	0,734	0,750	1,160	0,817
11	M102	10	800	0,99	190	45	70	15	79	0,908	0,736	1,003	1,292	0,912
12	M103	10	1000	0,95	213	45	70	15	84	0,718	0,812	1,342	1,069	1,101
13	M104	10	1200	0,99	189	45	70	15	101	0,778	0,734	1,501	1,106	1,428
14	L1	11	1000	2,1	410	30	106	50	380	0,764	0,772	0,616	1,110	0,764
15	L1	11	1000	3	450	30	106	50	610	0,782	0,566	0,590	0,996	0,782
16	L2	11	1498	2	376	30	106	50	600	0,921	0,776	0,894	1,343	0,921
17	L2	11	1498	3	402	30	106	50	905	0,867	0,535	0,836	1,081	0,867
18	1	12	850	2	355	33	102	56	275	0,788	0,731	0,459	1,118	0,788
19	2	12	850	2	349	38	91	56	265	0,773	0,642	0,466	1,036	0,773

## تیرورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی

Test No	original ref <sup>9</sup>	<i>h<sub>w</sub></i>	<i>t<sub>w</sub></i>	<i>f<sub>yw</sub></i>	$\alpha$	<i>a<sub>I</sub></i>	<i>a<sub>3</sub></i>	<i>V<sub>u</sub></i>	$\chi_u$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$V_{u'}/V_{R1}$	$V_{u'}/V_{R2}$
		mm	mm	MPa		mm	mm	kN					
20	V1/1 13	298	2,05	298	45	144	102	68	0,646	0,917	0,099	1,021	0,646
21	V1/2 13	298	2,1	283	45	144	102	70	0,684	0,872	0,096	1,054	0,684
22	V1/3 13	298	2	298	45	144	102	81	0,789	0,940	0,100	1,262	0,789
23	V2/3 13	600	3	279	45	144	102	235	0,810	0,606	0,175	1,060	0,810
24	CW3 8	440	3,26	284	45	250	45	171	0,726	0,976	0,218	1,184	0,726
25	CW4 8	440	2,97	222	45	250	45	154	0,918	0,947	0,198	1,475	0,918
26	CW5 8	440	2,97	222	45	250	63	141	0,841	0,947	0,156	1,350	0,841
27	I/5 14	1270	2	331	62	171	24	260	0,535	1,223	1,483	0,987	0,963
28	II/11 14	1270	2	225	62	171	24	220	0,666	0,974	1,267	1,085	0,935
29	121216A 15	305	0,64	676	45	38	25	50	0,656	1,165	0,583	1,177	0,656
30	121221A 15	305	0,63	665	55	42	33	46	0,623	1,298	0,501	1,190	0,623
31	121221B 15	305	0,78	665	55	42	33	73	0,798	1,048	0,475	1,352	0,798
32	121232A 15	305	0,64	665	63	50	51	41	0,546	1,741	0,391	1,255	0,546
33	121232B 15	305	0,78	641	63	50	51	61	0,692	1,403	0,365	1,386	0,692
34	121809A 15	305	0,71	572	50	20	14	63	0,880	0,509	0,829	1,078	0,880
35	121809C 15	305	0,63	669	50	20	14	55	0,740	0,620	0,924	0,978	0,740
36	121832B 15	305	0,92	562	63	50	51	53	0,581	1,113	0,328	1,018	0,581
37	122409A 15	305	0,71	586	50	20	14	58	0,791	0,515	0,839	0,973	0,791
38	122409C 15	305	0,66	621	50	20	14	58	0,803	0,570	0,880	1,026	0,803
39	122421A 15	305	0,68	621	55	42	33	43	0,578	1,162	0,475	1,036	0,578
40	122421B 15	305	0,78	638	55	42	33	61	0,695	1,027	0,466	1,165	0,695
41	122432B 15	305	0,78	634	63	50	51	49	0,562	1,395	0,363	1,122	0,562
42	181209A 15	457	0,56	689	50	20	14	81	0,795	0,708	1,446	1,111	1,373
43	181209C 15	457	0,61	592	50	20	14	89	0,933	0,602	1,312	1,219	1,382
44	181216C 15	457	0,76	679	45	38	25	119	0,873	0,984	0,839	1,430	0,873
45	181221A 15	457	0,61	578	55	42	33	62	0,666	1,250	0,706	1,244	0,666
46	181221B 15	457	0,76	606	55	42	33	98	0,806	1,027	0,684	1,350	0,806
47	181232A 15	457	0,6	552	63	50	51	52	0,594	1,692	0,542	1,340	0,594
48	181232B 15	457	0,75	602	63	50	51	80	0,671	1,414	0,535	1,349	0,671
49	181809A 15	457	0,61	618	50	20	14	82	0,823	0,615	1,341	1,085	1,262
50	181809C 15	457	0,62	559	50	20	14	78	0,852	0,576	1,270	1,093	1,200
51	181816A 15	457	0,63	592	45	38	25	75	0,761	1,108	0,821	1,329	0,761
52	181816C 15	457	0,74	614	45	38	25	96	0,800	0,961	0,803	1,294	0,800
53	181821A 15	457	0,63	552	55	42	33	56	0,610	1,182	0,684	1,104	0,610

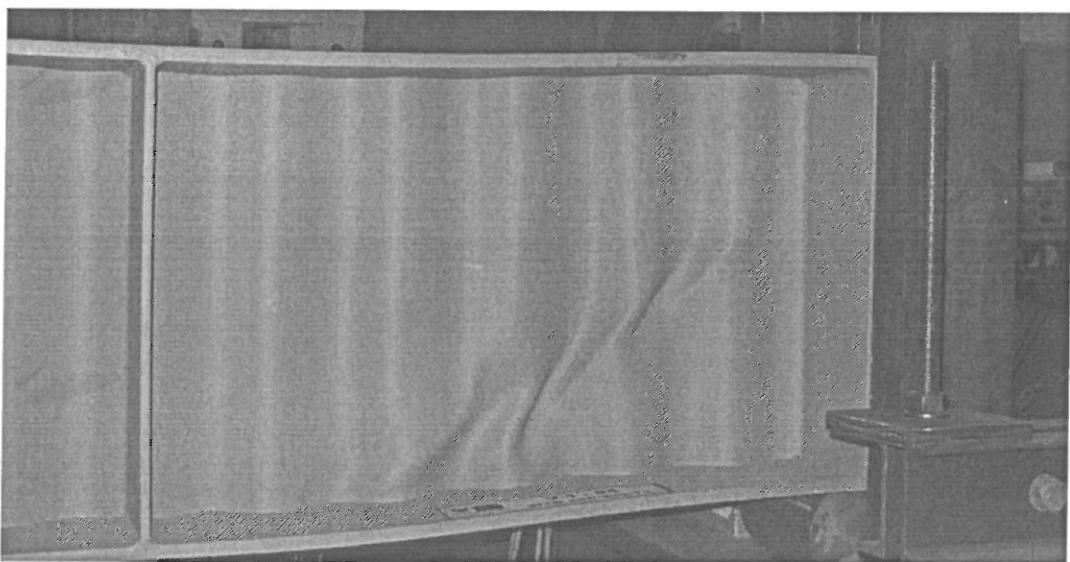
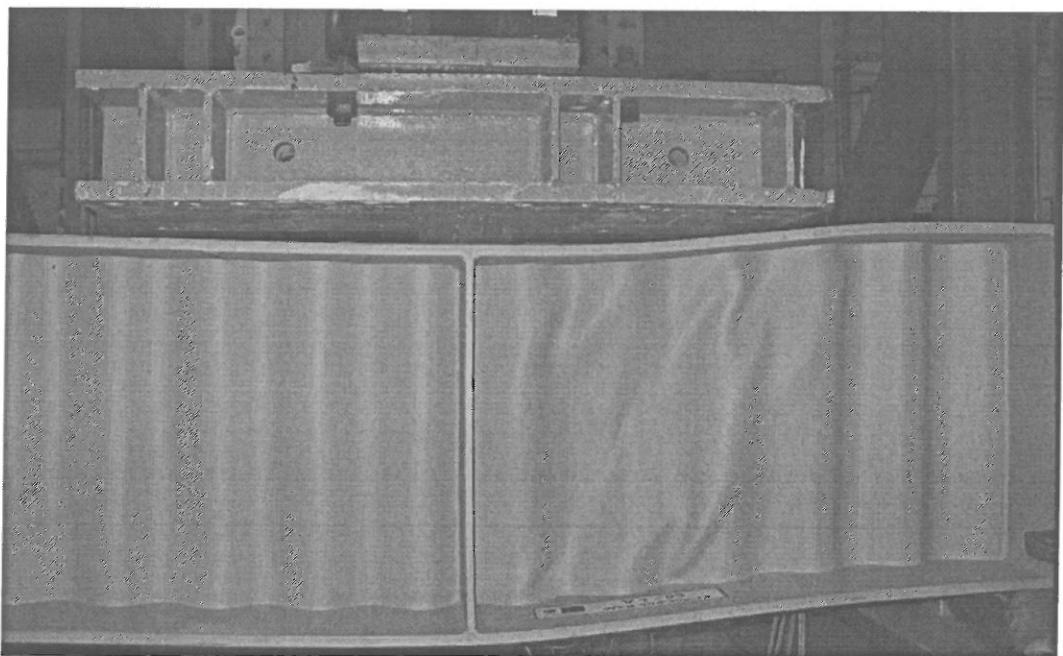
---

 تیرورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی
 

---

53	181821A	15	457	0,63	552	55	42	33	56	0,610	1,182	0,684	1,104	0,610
54	181821B	15	457	0,74	596	55	42	33	93	0,798	1,046	0,683	1,351	0,798
55	181832A	15	457	0,61	689	63	50	51	53	0,477	1,859	0,603	1,145	0,477
56	181832B	15	457	0,75	580	63	50	51	79	0,687	1,388	0,525	1,368	0,687
57	241209A	15	610	0,62	606	50	20	14	71	0,536	0,599	1,765	0,699	1,292
58	241209C	15	610	0,63	621	50	20	14	79	0,573	0,597	1,780	0,746	1,400
59	241216A	15	610	0,63	592	45	38	25	76	0,578	1,108	1,096	1,009	0,656
60	241216B	15	610	0,79	587	45	38	25	133	0,813	0,880	1,032	1,259	0,848
61	241221A	15	610	0,61	610	55	42	33	77	0,587	1,284	0,968	1,114	0,587
62	241221B	15	610	0,76	639	55	42	33	127	0,742	1,055	0,938	1,261	0,742
63	241232A	15	610	0,62	673	63	50	51	69	0,469	1,808	0,792	1,104	0,469
64	241232B	15	610	0,76	584	63	50	51	101	0,645	1,374	0,701	1,276	0,645
65	Gauche	16	460	2	254	30,5	0	126	139	1,029	1,494	0,121	2,142	1,029
66	Droit	16	550	2	254	30,5	0	126	109	0,675	1,494	0,145	1,405	0,675
67	Sin 1	17	1502	2,1	225	2w=155	40	370	0,902	0,433	1,108	1,046	1,038	
68	Sin 2	17	1501	2,1	225	2w=155	40	365	0,890	0,433	1,108	1,032	1,025	
69	Sin 3	17	1505	2,1	225	2w=155	40	353	0,859	0,433	1,108	0,996	0,989	

دکتر پاسترناک و همکارانش نیز آزمایش‌های بیشتری را بر روی تیرورقهای با جان سینوسی انجام دادند. چند نمونه از تیرورقهای مورد آزمایش توسط انها در شکل ۱۲-۳ نشان داده شده است. دکتر پاسترناک نتیجه‌گیری کرد که کمانش موضعی به آن صورتی که در موجهای ذوزنقه‌ای رخ می‌دهد، در جان موجدار رخ نمی‌دهد و جانهای سینوسی بیشتر دچار کمانش کلی می‌شوند. بنابراین کمانش موضعی برای تیرهای سینوسی قابل صرفنظر کردن است.



شکل ۱۲-۳: کمانش کلی در جان سینوسی تیروورق، زمانی که پانل تحت بار برشی خالص قرار می‌گیرد.

اگر چه مطالعات انجام شده نشان داد که احتمال وقوع کمانش کلی در جان تیروورق با موج سینوسی منتفی است، اما بر اساس مطالعات انجام شده، رابطه زیر برای تنشهای بحرانی کمانش موضعی ارائه شده است.

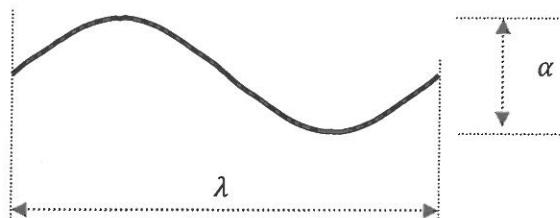
$$\tau_{cr,L} = \left( 5.34 + \frac{\alpha S}{2t_w h_w} \right) \frac{\pi^2 E}{12(1-v^2)} \left( \frac{2t_w}{S} \right)^2 \quad (1-3)$$

---

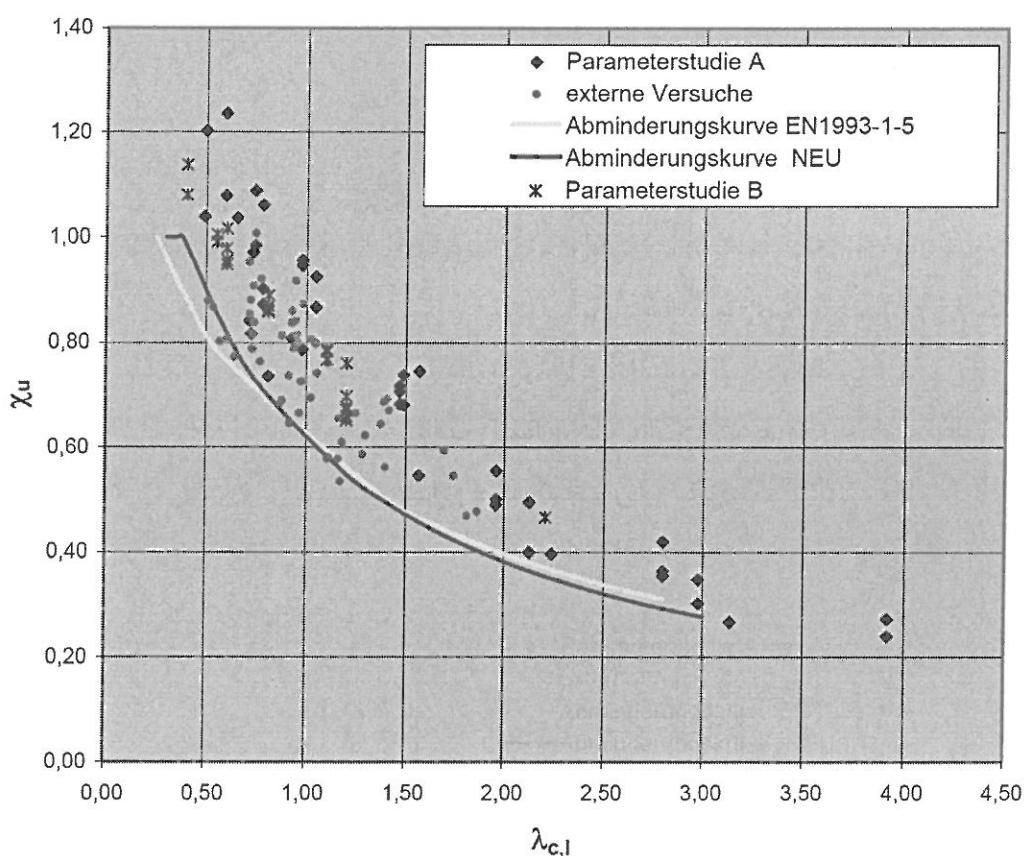
 تیروورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی
 

---

پارامترهای نشان داده در این فرمول در شکل زیر نشان داده شده‌اند.



باید توجه کرد که صحت عملکرد این فرمول، برای تیروورقهای با جان موجدار است که ابعاد آنها در محدوده مورد بررسی توسط گروه المانی قرار دارند. در صورتی که این روابط بخواهد مجدداً برای تیروورقهای سینوسی جدیدی مورد استفاده قرار گیرد، باید دوباره صحت سنجی قرار گیرد. به هر حال تنش بحرانی مذکور می‌تواند پس از اعمال ضرایب توصیه شده برای طراحی مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات دکتر پاسترناك برای صحت سنجی رابطه پیشنهادی در شکل ۱۳-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۳: مقایسه بار بحرانی کمانش موضعی با نتایج آزمایشگاهی

درمورد کمانش کلی تیروورقهای با جان موجدار، در مورد موجهای سینوسی، در فصل دوم برای موجهای ذوزنقه‌ای عنوان شد که می‌توان ورقهای موجدار شده را به صورت صفحات ارتوتروپیک فرض کرد. صفحات ارتوتروپیک دارای دو سختی متفاوت در راستای دو محور خود هستند و می‌توان تنش کمانشی بحرانی را برای این تیرها از روی روابط مربوط به این صفحات محاسبه نمود. با این توضیح، رابطه زیر را می‌توان برای محاسبه بار بحرانی کمانش کلی در تیروورقهای با جان موجدار مورد استفاده قرار داد.

$$\tau_{cr,G} = \frac{32.4}{t_w h_w^2} (D_x^{0.25} D_z^{0.75}) \quad (2-3)$$

این رابطه عیناً در مورد موجهای ذوزنقه‌ای نیز بکار گرفته شده بود و همکنون هم برای موجهای سینوسی استفاده از رابطه مذکور توسط محققین و بخصوص گروه محقق المانی توصیه شده است. در رابطه فوق  $D_x$  و  $D_z$  سختی خمشی صفحه در دو راستای عمود بر هم جان موجدار هستند که از روابط زیر قابل محاسبه اند:

$$D_x = \frac{E t_w^3}{12(1-v^2)} \left(\frac{\lambda}{S}\right) \quad (3-3)$$

$$D_z = \frac{EI_z}{\lambda} \quad (4-3)$$

برخی از محققان، رابطه مربوط به محاسبه  $D_x$  را بدون ضریب  $(v^2 - 1)$  ارائه کرده‌اند. اما دقیقتر اینست که این رابطه به طور کامل عنوان گردد.

با داشتن مقدار تنش بحرانی برش در حالت کمانش کلی جان، می‌توان به محاسبه ضریب لاغری پرداخت. این ضریب در واقع نسبت تنش بحرانی کمانش به تنش بحرانی جاری شدن می‌باشد و مقدار آن از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\lambda_i = \sqrt{\frac{f_y}{\sqrt{3} \tau_i}} \quad (5-3)$$

نهایتاً بار بحرانی نهایی برای کمانش در مقابل بارهای برشی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$V_R = \chi \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w h_w \quad (6-3)$$

در رابطه فوق فقط یک مجھول وجود دارد و ان هم ضریب کاهش تنش  $\chi$  میباشد که مقدار آن بر حسب ضریب لاغری محاسبه شده در رابطه ۵-۳ ارائه گردید. فرمول محاسبه ضریب کاهش تنش بر حسب ضریب لاغری توسط محققین مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برخی از مطالعات این محققین به طور خلاصه در زیر ارائه می شود.

#### • مدل لیوا [12]:

لیوا در حقیقت مدلی برای طراحی جان تیر تحت تنشهای برشی ارائه نکرد، تنها اشاره کرد که مقادیر حاصل از تنشهای کمانش کلی و موضعی نمیتوانند مستقیماً بکار روند و حتماً باید اnderکنش این دو نوع کمانش مد نظر قرار گیرد. او رابطه زیر را برای در نظر گرفتن اnderکنش تنشهای کمانشی پیشنهاد داد.

$$\frac{1}{\tau_{cr3}^n} = \frac{1}{\tau_{cr2}^n} + \frac{1}{\tau_{cr1}^n} \quad (7-3)$$

او مقدار  $n$  را نیز برابر با مقدار واحد پیشنهاد داد. اما فرمول را صورت کلی ارائه کرد.

#### • مدل ارائه شده توسط لیندنر [13]:

لیندنر بر اساس ازمایش‌های انجام شده خود قضاوت کرد که می‌توان از رابطه اnderکنشی ۷-۳ استفاده کرد. تنها نکته قابل توجه این است که او عنوان کرد که مقدار  $n$  باید برابر با ۲ قرار داده شود و همچنین لازم است مقدار کمانش کلی با ضریبی اصلاح گردد. بنابراین او پیشنهاد داد که مقدار ضریب کاهشی از رابطه زیر بدست آید:

$$\chi_i = \frac{0.588}{\lambda_i} \quad (8-3)$$

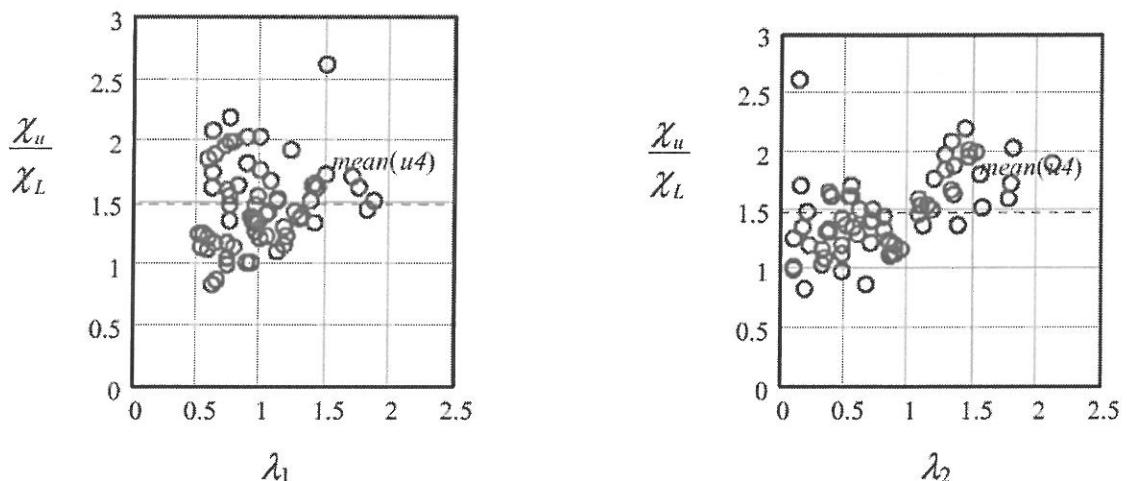
هم ضریب کاهشی کمانش موضعی و هم ضریب کاهشی کمانش کلی از رابطه فوق بدست می‌آید. با این تفاوت که  $\lambda_i$  برای هر یک از این دو مو کمانشی از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{f_y}{\sqrt{3}\tau_{cr,1}}} \quad (9-3)$$

و  $\lambda_2$  از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{2f_y}{\sqrt{3}\tau_{cr,2}}} \quad (10-3)$$

با قرار دادن مقادیر فوق در رابطه (۷-۳) و محاسبه ضرایب کاهش مربوطه، می‌توان نتایج کار لیندنر را با مقادیر ازمایشگاهی در اشکال زیر مقایسه کرد:



شکل ۱۴-۳: مقایسه مدل پیشنهادی لیندنر با نتایج ازمایشگاهی برای محاسبه ضریب کاهش تنش برشی [13]

#### • تحقیقات انجام شده توسط جانسون [14]:

جانسون فرض کرد که هم کمانش کلی و هم کمانش موضعی در جان تیورق رخ می‌دهد. در هر دو حالت مقدار ضریب کاهش از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\chi_1 = \frac{0.84}{\lambda_1} \quad (11-3)$$

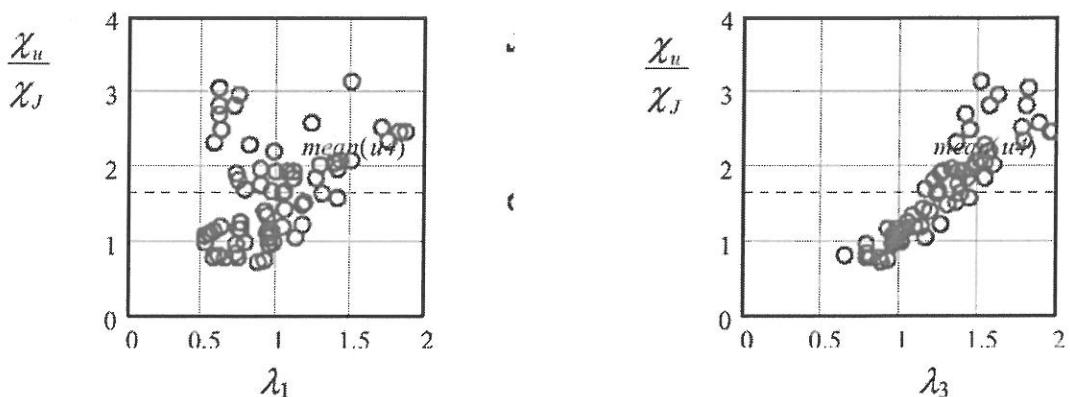
که  $\chi_1$  ضریب کاهش برای کمانش موضعی است و :

$$\chi_2 = \frac{0.61}{\lambda_2^2} \quad (12-3)$$

که  $\chi_2$  ضریب کاهش تنش برای کمانش کلی جان در برابر تنشهای برشی است. جانسون فرض کرد که باید اندرکنش این دو نوع کمانش را در برآورد تنش بحرانی لحاظ نمود. او رابطه زیر را برای ترکیب تنش بحرانی کمانش کلی و موضعی پیشنهاد کرد:

$$\frac{1}{\tau_{cr3}^n} = \frac{1}{\tau_{cr2}^n} + \frac{1}{\tau_{cr1}^n} \quad (13-3)$$

اگر کمترین مقدار محاسبه شده از روابط فوق برای تنش بحرانی کمانش تحت تنשها برشی را به عنوان مبنای کار جانسون قرار دهیم و این مقدار را با تنشهای برشی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه (که در جدول ۱-۳ ارائه شد) مقایسه کنیم، می‌بینیم که پیش‌بینهای جانسون تا حد قابل توجهی محافظه کارانه است (شکل ۱۵-۳).



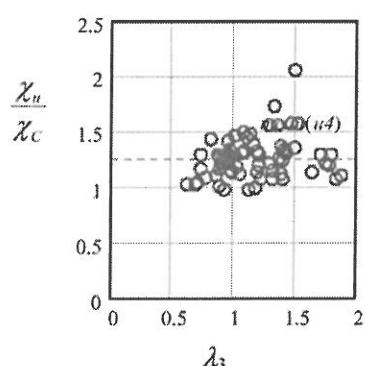
شکل ۱۵-۳: مقایسه مدل پیشنهادی جانسون با نتایج آزمایشگاهی برای محاسبه ضریب کاهش تنش برشی

#### • مدل ترکیبی

مدل ترکیبی عنوان می‌کند که کمانش موضعی و کلی را می‌توان محاسبه نمود و آنها را با رابطه اندرکنشی ارائه شده در رابطه ۷-۳ ترکیب کرد و تنش اندرکنشی نهایی، ملاک نهایی برای قضاوت قرار داد. به این ترتیب می‌توان تنش اندرکنشی را در رابطه ۵-۳ قرار داد و مقدار ضریب لاغری را محاسبه نمود و از روی این ضریب و با استفاده از رابطه زیر، تنها یک ضریب کاهشی برای تنش محاسبه نمود و معیار نهایی قرار داد.

$$\chi_c = \frac{1.2}{0.9 + \lambda_3} \leq 1 \quad (14-3)$$

نتایج این مقایسه در شکل زیر بین نتایج مذکور و نتایج حاصل از آزمایشگاه ارائه شده است.



شکل ۱۶-۳: مقایسه مدل ترکیبی با نتایج آزمایشگاهی برای محاسبه ضریب کاهش تنش برشی

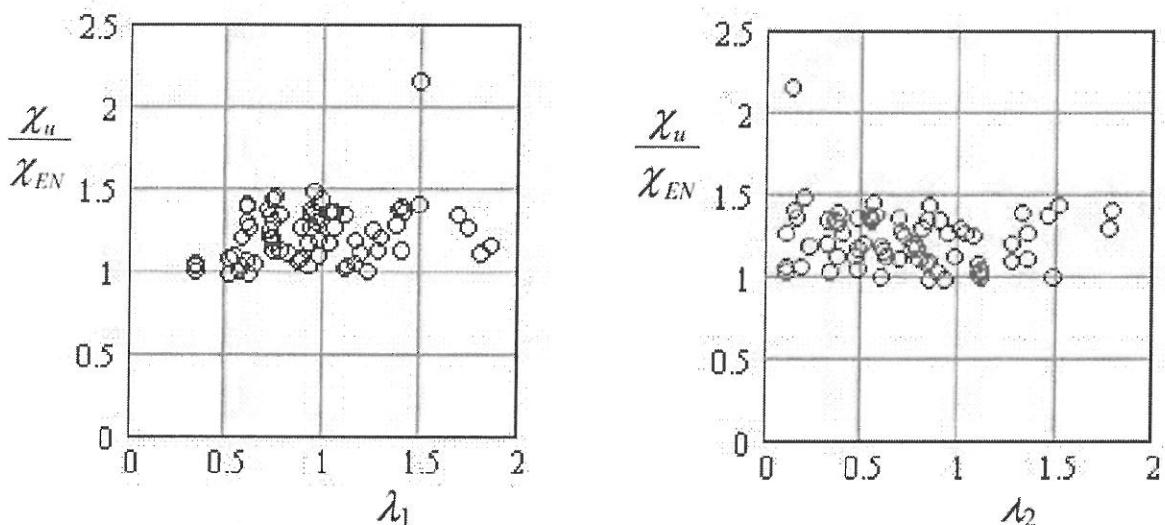
• مدل پیشنهادی توسط هوگلند [15]:

بر اساس این مدل، هر دو تنש موضعی و کلی کمانش برشی باید کنترل گردد. انگاه ضرایب کاهش برای بار بحرانی کمانش در حالت موضعی و کلی به ترتیب از ضرایب زیر قابل محاسبه است.

$$\chi_L = \frac{1.15}{0.9 + \lambda_1} \leq 1 \quad (15-3)$$

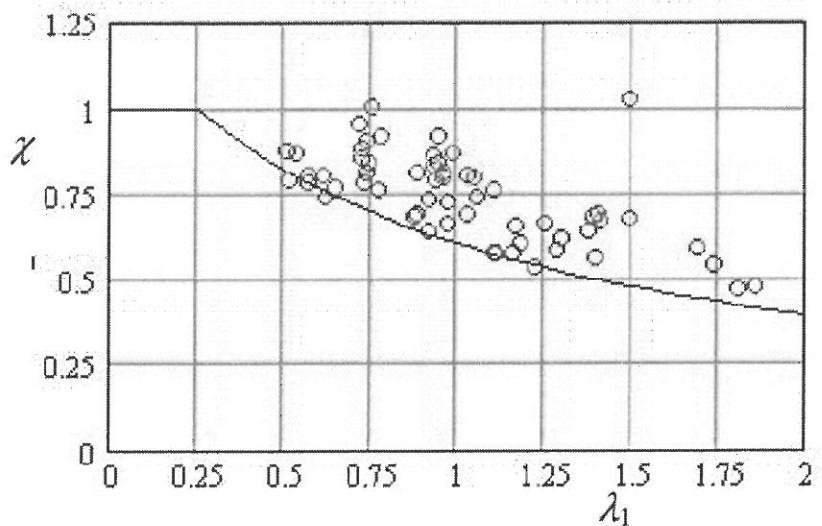
$$\chi_G = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_2^2} \leq 1 \quad (16-3)$$

اگر مینیمم مقادیر ارائه شده از روابط فوق را با نتایج ازمایشگاهی مقایسه کنیم، شاهد پیش‌بینی خوب این روش با نتایج ازمایشگاهی هستیم (شکل ۱۷-۳).

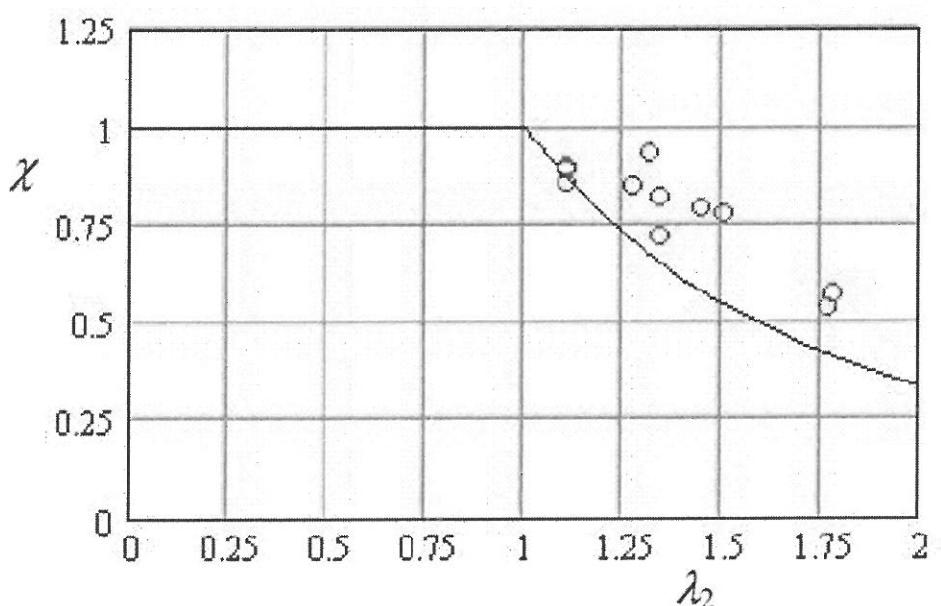


شکل ۱۷-۳: مقایسه مدل ترکیبی با نتایج ازمایشگاهی برای محاسبه ضریب کاهش تنش برشی

همچنین اشکال ۱۸-۳ و ۱۹-۳ برای مقایسه نمونه‌ای که کمانش کلی و یا موضعی در انها رخ داده به صورت جداگانه ترسیم شده است. بنابراین می‌توان دید که نسبت به داده‌های ازمایشگاهی موجود، روابط پیشنهادی مذکور مقادیر مناسبی را ارائه می‌دهند.



شکل ۱۸-۳: مقایسه مدل هوگلند با نتایج ۵۹ تست ازمایشگاهی برای محاسبه ضریب کاهش تنش برشی در جایی که کمانش موضعی رخ داده است.

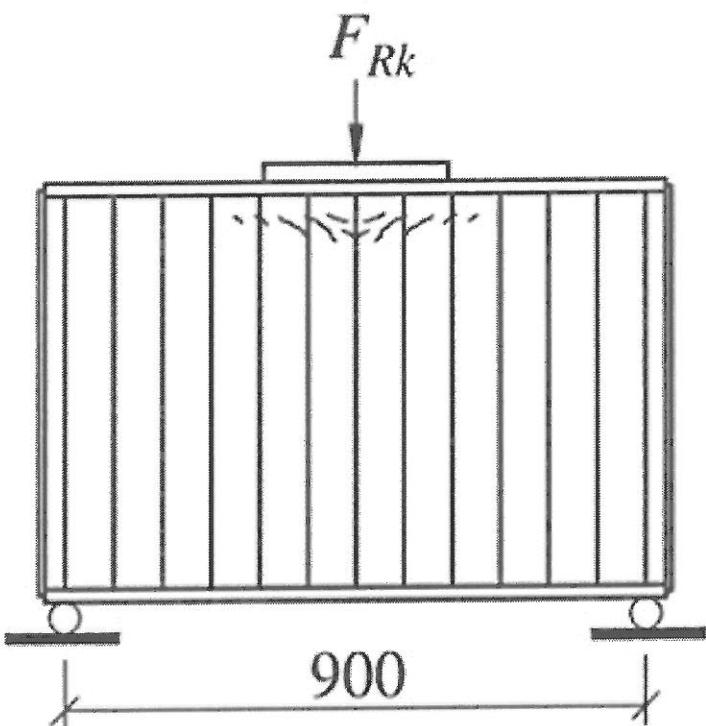


شکل ۱۹-۳: مقایسه مدل هوگلند با نتایج ۵۹ تست ازمایشگاهی برای محاسبه ضریب کاهش تنش برشی در جایی که کمانش کلی رخ داده است.

### ۵-۲-۳- ظرفیت لهیدگی نهایی تیرهای سینوسی تحت بارهای متمرکز

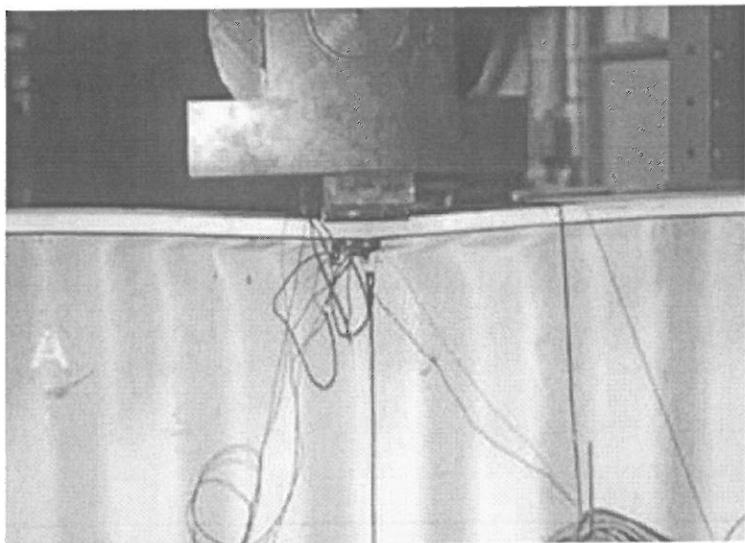
لهیدگی جان در واقع همان خراب موضعی جان در زیر بارهای متمرکز است که به بال تیرورق وارد می‌شوند. اگر عرض بار وارد ب تیر کم باشد، میزان تنش فشاری افزایش یافته و ممکن است که جان تیر در محل زیر بار له شود.

معمولًا تنش لهیدگی در تیرورقهای با جان موجدار، همانند تیرورقهای با جان مسطح می‌باشد. با این تفاوت که طول موج سینوسی بیشتر از جان موجدار است که طبعاً در شرایط مشابه تحمل لهیدگی تیرورق موجدار از تیر مسطح بسیار بهتر است.



شکل ۲۰-۳: شکل شماتیک انتقال تنش از محل اعمال بار، به جان تیر موج جدار در ناحیه زیر بار متمرکز

در مورد برآورده ظرفیت لهیدگی جان سینوسی تیرورق، تحقیقات مفصلی انجام شده است. در این رابطه عمدها دکتر پاسترناک کارهای جامعی را به انجام رسانده است. او در سال ۱۹۹۹ فرمولی را برای برآورده ظرفیت لهیدگی موجهای سینوسی ارائه کرد. اما در رابطه پیشنهادی او طول اعمال بار متمرکز لحاظ نشده بود و فقط برای بارهای با طول اعمال کم نتایج منطقی ارائه می‌کرد [7]. کوچتا در سال ۲۰۰۶ نشان داد که طول اعمال بار نیز باید در برآورده ظرفیت لهیدگی جانهای سینوسی لحاظ گردد [16].



شکل ۲۱-۳: نمونه‌ای از له شدن جان در زیر محل اعمال بار در ازمایشگاه

اما آقای دکتر پاسترناک نیز در پی مطالعات اخیر خود، فرمول تجربی خود را اصلاح کرد و رابطه زیر را برای برآورده تنشهای ناشی از بارهای متمرکز در جان تیرورق پیشنهاد داد [2].

$$F_{ult} = 10 \left( \frac{W_{el}}{I/t_w} \right) (\alpha) t_w f_y \quad (17-3)$$

این فرمول می‌تواند برای محدوده‌ی ابعادی که دکتر پاسترناک مطالعه کرد، مورد استناد و استفاده قرار گیرد. این محدوده ابعادی شامل موجهای سینوسی با ضخامت ۳ میلیمتر و با عرض اعمال بار کمتر از ۱۰ سانتیمتر می‌باشد.

در این رابطه داریم:

$W_{el}$  مدول موثر بال

$I$  ممان اینرسی موج کامل حول محور تقارن

$t_w$  ضخامت جان

$\alpha$  دامنه موج مورد استفاده

$f_y$  تنش جاری شدن مصالح جان می‌باشد.

## References:

- [1] Zeman & Co Gesellschaft mbH A-1120 Vienna, Austria, Schönbrunner Straße 213-215
- [2] Ranabalk. Produktbeskrivning och dimensioneringsregler (Specification and design rules for Rana girder), Ranaverken AB, 2000
- [3] Hannebauer, D. 2008. "Zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen." *Dissertation, BTU Cottbus.*
- [4] Pasternak, H., Branka, P., Zum Tragverhalten von Wellstegträgern, *Bauingenieur* 73 (1988) Nr. 10, pp 437-444
- [5] Pasternak, H. 1996. "Gutachterliche Stellungnahme zur Quer-kraftragfähigkeit von Wellstegträgern." *Braunschweig/ Cottbus.*
- [6] Pasternak, H.; Branka, P. 1998. "Zum Tragverhalten von Wellstegträgern" *Bauingenieur* 73: 437–444.
- [7] Pasternak, H.; Branka, P. 1999. "Tragverhalten von Wellsteg- trägern unter lokaler Last einleitung" *Bauingenieur* 74: 219–224.
- [8] Pasternak, H; Hannebauer, D. 2004. "Träger mit profilierten Stegen" *Stahlbau-Kalender 2004*. Berlin, Verlag Ernst & Sohn, 449–492.
- [9] Pasternak, H.; Robra, J.; Bachmann, V. 2008a. "Corrugated web beams with increased web thickness" in *Proceedings 5thEuropea Conference on Steel and Composite Structures*, Graz, Austria 2008, 1161–1166.
- [10] Pasternak, H. 2008b. "2nd expert opinion on the shear capacity of girders with sinusoidally corrugated web" *Braunschweig/ Cottbus 2008*
- [11] DAST Richtlinien 015, Träger mit schlanken Stege, Stahlbau-Verlag, Köln, 1990
- [12] Leiva, L., Shear buckling of trapezoidally corrugated girder webs. Report Part 1., Chalmers Univ. of Technology, *Div. of Steel and Timber Structures Publ. S 83:3*, Göteborg 1983
- [13] Lindner, J.; Grenzscherubtragfähigkeit von I-Trägern mit trapezförmig profilierten Steg, *Stahlbau* 57 (1988) Heft 12 pp 377-380.
- [14] Johnson, R., Cafolla, J., Corrugated webs in plate girders for bridges, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings* May 1997 pp 157-164
- [15] Höglund, T., Shear Buckling Resistance of Steel and Aluminium Plate Girders, *Thin-walled Structures* Vol. 29, Nos. 1-4, pp 13-30, 1997
- [16] Kuchta, K.R., 2006. Patch load carrying capacity of corrugated web. In ICMS- 006 - Progress in Steel, *Composite and Aluminium Structures*. London: Taylor & Francis Group.

## فصل چهارم:

### روش طراحی تیروورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی

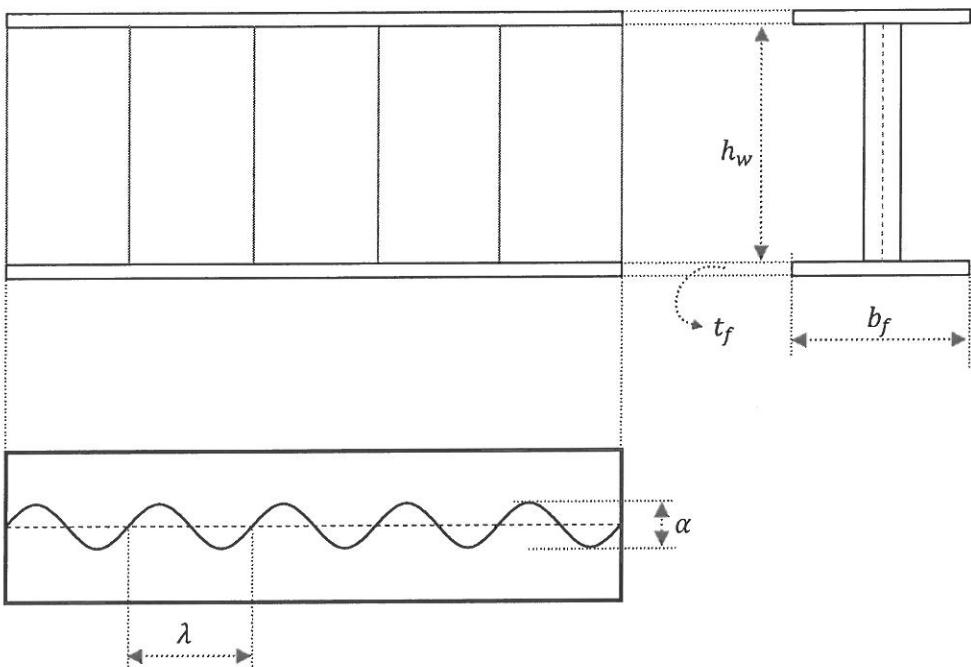
چکیده :

در فصل قبل مطالعات مهم موجود در رابطه با رفتارسازهای تیروورقهای با جان سینوسی تشریح گردید. در این فصل روابط مورد بحث قرار گرفته در فصل گذشته که برای طراحی تیروورقهای با جان سینوسی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ارائه می‌شود. در این فصل از توضیحات اضافی درخصوص پیشینه روابط پرهیز شده و تنها اصل روابط در قالب یک روند طراحی مشخص ارائه می‌گردد.

**- مقدمه**

مطالعات انجام شده بر روی تیروورقهای با جان سینوسی در فصل قبل مرور و بررسی شد. در این فصل به طور مختصر نتایج مطالعات قبلی در قالب یک دستورالعمل ساده برای تیروورقهای با جان موجدار ارائه خواهد شد. این دستورالعمل می‌تواند برای طراحانی که قصد استفاده از تیروورقهای با جان موجدار سینوسی را دارند، مورد استفاده قرار گیرد. تیروورقهای با جان موجدار که از این به بعد به اختصار به آن تیر سینوسی اطلاق می‌شود، می‌توانند جایگزین مناسبی برای تیروورقهای عادی با ارتفاع بیش از ۳۰ سانتیمتر باشد. همچنین در مواردی که از تیرهای مشبکی استفاده می‌شود که از دو نیم‌رخ فولادی در بالا و پایین تشکیل شده‌اند و بوسیله یکسری عضو خرپایی مورب به هم متصل می‌شوند نیز می‌توان از تیروورقهای سینوسی به عنوان جایگزین استفاده نمود. معمولاً استفاده از تیرهای سینوسی تا ارتفاع یک و نیم متر معمول بوده و اقتصادی خواهد بود.

ابعاد موج سینوسی و پارامترهای نامگذاری انها در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱-۴ : تعریف پارامترهای مورداستفاده در جان تیروورقهای با جان سینوسی

**۴-۱- محاسبه نحوه باربری و کنترل مقاومت تیرورقهای سینوسی برای مصارف مهندسی**  
 هر تیرورق از یک جان و دو بال تشکیل شده در نقاط اتصال به هم جوش می‌شود. برای یک طراحی ایمن، لازم است که تک‌تک اجزای تیرورق مقاومت لازم برای تحمل بارهای وارد را داشته باشند. در تیرورقهای با جان موجدار چه از نوع سینوسی و چه از نوع ذوزنقه‌ای مشاهده شد که اصولاً اندرکنش بال و جان در تحمل بارهای وارد بسیار اندک است و عملاً بال و جان هر یک بصورت جداگانه وظایف خود را انجام می‌دهند.

اصولاً تیر به عضوی اطلاق می‌شود که می‌تواند در مقابل بارهای جانبی مقاومت لازم را از خود نشان دهد. هر تیر می‌تواند انواع مختلفی از بارهای وارد اعم از بارهای گستردگی، بارهای مرکز و سایر ترکیبات بارگذاری را تجربه کند. در اثر اعمال بارهای مختلف، معمولاً در مقاطع مختلف تیر نیروهای داخلی بوجود می‌آید که این بارهای داخلی شامل لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری می‌باشد. نیروی محوری مختص ستونها و تیر-ستونهاست که در اینجا مورد بحث قرار نمی‌گیرد. بنابراین کلیه بارهای وارد بر تیرها، نهایتاً به دو صرت بر تیر اثر می‌گذارند:

- ۱- ایجاد نیروی داخلی از جنس نیروی برشی
- ۲- ایجاد نیروی داخلی از جنس لنگر خمشی

پس در یک جمع بندی، بارهای وارد بر تیر به نیروهای برشی و لنگر خمشی داخلی در تیر تبدیل می‌شوند و سپس این دو نیروی داخلی به صورتهای مختلفی باعث خرابی بال و یا جان تیرورق می‌شوند.

#### **۴-۲- اثرات ناشی از لنگر خمشی در تیرهای سینوسی:**

##### **۴-۲-۱- نیروی حداکثر بال تحت خمش:**

خمش در تیر سینوسی باعث می‌شود که یک بال تیر (ممکن است بال بالایی تیر) تحت فشار قرار گرفته و یک بال تیر (ممکن است بال پایینی) تحت نیروهای کششی قرار گیرد. اگر لنگر خمشی ناشی از بارها افزایش یابد، نیروی کشش و فشار بالهای نیز افزایش می‌یابد تا زمانی که این کشش و فشار به حد جاری شدن یا تسلیم مصالح فولادی بال منجر شود.

بنابراین ظرفیت نهایی تیرورق سینوسی زمانی حاصل می‌شود که بالهای تیرورق به حد نهایی تسلیم شدن برسند. در طرف مقابل اثرات لنگر خمشی بر جان تیرورق سینوسی قابل صرفنظر کردن

است. علی رغم اینکه در تیرهای معمولی با جان مسطح، جان تیر نیز تحت فشار قرار می‌گیرد و ممکن است تحت بارهای واردۀ خراب گردد، در تیرهای با جان موجدار، اصولاً جان تیر تحت لنگر خمی ناشی از بارهای واردۀ مقاومتی چندانی نمی‌کند. بنابراین در طراحی این تیرورقهای، وظیفه تحمل لنگر خمی واردۀ به عهده بال تیر سینوسی قرار دارد و از نقش جان صرفنظر می‌شود. با این توضیح، ظرفیت نهایی بال تیر تحت لنگر خمی واردۀ را می‌توان از رابطه زیر بدست اورد.

$$N_1 = f_y t_f b_f \quad (1-4)$$

البته رابطه فوق بدون اعمال هیچ گونه ضریب اطمینان بوده و طراح می‌تواند بر حسبنوع روش طراحی خود، ضریب اطمینان‌های لازم را لحاظ کند.

در رابطه فوق  $f_y$  بیانگر تنش جاری شدن فولاد بکاررفته در بال است.  $b_f$  عرض بال تیرورق،  $t_f$  ضخامت بال و  $N_1$  حداکثر نیروی فشاری قابل تحمل در بال تحت فشار تیرورق می‌باشد.

#### ۲-۲-۴- نیروی حداکثر بال تحت خمش با فرض وقوع کمانش موضعی بال:

اگر بال تحت فشار تیر سینوسی دارای ضخامت کافی نباشد، ممکن است بال به صورت موضعی کمانه کند و دیگر امکان باربری تا حد نهایی برای بال فراهم نباشد.

برای جلوگیری از این نوع خرابی که به کمانش موضعی بال تحت فشار موسوم است، لازم است که نسبت عرض آزاد بال به ضخامت آن از حد معینی کمتر باشد تا از کمانش موضعی بال تحت فشار جلوگیری شود. این مقدار حداقل در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$\left( \frac{\bar{b}_f}{t_f} \right)_{min} \leq 13.9 \sqrt{\frac{234}{f_y}} \quad (2-4)$$

$f_y$  تنش جاری شدن فولاد بال می‌باشد که در رابطه فوق باید بر حسب ( $N/mm^2$ ) بیان می‌شود.

$t_f$  ضخامت بال تحت فشار  $\bar{b}_f$  عرض موثر بال تحت فشار است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{b}_f = \frac{b_f}{2} - \frac{\alpha}{4} \quad (3-4)$$

که در رابطه فوق:

$b_f$  عرض بال تیر و  
 $\alpha$  دامنه موج سینوسی می‌باشد.

بنابرای اگر رابطه (۲-۴) صادق باشد (یعنی  $(\bar{b}_f/t_f)_{min} \leq 13.9 \sqrt{234/f_y}$ )، می‌توان بال تحت فشار را تا حد نهایی ظرفیت جاری شدن آن بارگذاری کرد و لازم نیست نگران کمانش موضعی بال تحت فشار بود.

اما اگر رابطه (۲-۴) صادق نباشد ( $(\bar{b}_f/t_f)_{min} \geq 13.9 \sqrt{234/f_y}$ ) به معنای لاغر بودن بال و امکان کمانش موضعی ان است و ناگزیر هستیم که نیروی مجاز قابل تحمل در بال را کاهش دهیم. اما در طراحی مرسوم است که به جای کاهش نیروی مجاز خمشی، سطح موثر بال تحت فشار با اعمال ضربی زیر کاهش داده می‌شود. بنابراین، مقدار نیروی برشی مجاز بال برابر است با :

$$N_2 = f_y t_f \left[ \rho b + \frac{\alpha}{2} (1 - \rho) \right] \quad (۴-۴)$$

تمام پارامترهای رابطه فوق به جز ضربی کاهشی  $\rho$  قبل تعريف شده است. مقدار پارامتر مذکور را می‌توان از روابط زیر محاسبه نمود.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\overline{\lambda}_\rho - 0.188}{\overline{\lambda}_\rho^2} \leq 1 && \text{for } \overline{\lambda}_\rho > 0.748 \\ \rho &= 1 && \text{for } \overline{\lambda}_\rho < 0.748 \end{aligned} \quad (۵-۴)$$

که در رابطه فوق  $\overline{\lambda}_\rho$  در واقع لاغری بال تحت فشار است و از رابطه زیر بدست می‌اید:

$$\overline{\lambda}_\rho = \frac{(\bar{b}_f/t_f)}{28.4 \sqrt{234/f_y} \sqrt{k_\sigma}} \quad (۶-۴)$$

ضربیست که بیانگر اثر نحوه توزیع لنگر خمشی در بال تحت فشار است و برای بارگذاریهای مختلف مقادیر متفاوتی دارد. مقدار این ضربی برای توزیع لنگر خمشی یکنواخت در تیر که بحرانی‌ترین شرایط اعمال بار را پدید می‌آورد برابر با  $43/43$  می‌باشد.

### ۴-۲-۳- نیروی حداکثر بال تحت خمش با فرض وقوع کمانش کلی بال:

بال تحت فشار ممکن است تا حد جاری شدن مصالح ان قابل بارگذاری باشد که این حالت در قسمت ۴-۲-۱ بحث شد. یا ممکن است که دچار کمانش موضعی شود که در این صورت باربری ان کاهش می‌یابد و شرایط مربوطه در بند ۴-۲-۲ بحث شد، حالت سوم اینست که بال تحت فشار دچار کمانش کلی شود که در این قسمت مورد بحث قرار می‌گیرد.

کمانش کلی بال تحت فشار به کمانش پیچشی- جانبی بال تحت فشار موسوم است. اگر بال تحت فشار در فواصل مناسبی مهار نشده باشد مقدار باربری ان کاهش می‌یابد. در این شرایط لازم است که مقدار باربری بال بر اساس میزان طول مهار آن کاهش یابد. به این معنی که اگر طول مهاری بال تحت فشار از مقدار مشخصی کمتر باشد ، کمانش پیچشی- جانبی اتفاق نخواهد افتاد و لازم نیست که کمانش پیچشی- جانبی را بررسی نمود. این مقدار حداقل برای طول مهاری برابر است با:

$$L_c \leq L_{cmax} = \frac{r_f \cdot \lambda_1 \bar{\lambda}_{c0}}{k_c} \quad (5-4)$$

مقدار  $k_c$  به نحوه توزیع لنگر خمشی در عضو بستگی دارد و مقدار ان در بحرانی‌ترین حالت برابر با مقدار واحد است. مقدار  $\bar{\lambda}_{c0}$  در حالت حداکثر برابر با  $5/0$  فرض می‌شود و مقدار  $r_f$  برابر با شعاع زیراسیون بال تحت فشار است. مقدار  $\lambda_1$  که در واقع لاغری پایه است ، از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{E/f_y} \quad (6-4)$$

مقدار مدول الاستیسته فولاد می‌باشد.

اگر مقدار طول مهار کافی نباشد و مقدار ان از حداکثر مجاز بیشتر باشد ( $L_c \geq L_{cmax}$ ) ، آنگاه لازم است که مقدار بار حداکثر قابل تحمل توسط بال تحت فشار کاهش یابد. این کاهش به طول مهار نشده و یا فاصله مهارها از یکدیگر بستگی دارد. هر چقدر مهارها از هم دورتر باشند، مقدار باربری تیر نیز کاهش می‌یابد. مقدار این کاهش از طریق روابط زیر قابل محاسبه است.

$$N_3 = r_f \cdot \lambda_1 \bar{\lambda}_{c0} \cdot \frac{f_y \cdot b_f t_f}{k_c \cdot L_c} \quad (7-4)$$

پارامترهای موجود در رابطه فوق همگی قبل تعریف شدند.

بنابراین می‌توان کمانش پیچشی- جانبی را مهار کرد، اگر طول مهاری را از مقدار حداکثر مجاز کمتر باشد. در غیر اینصورت باید حداکثر نیروی فشاری واردشده به بال تحت فشار را تا کاهش داد.

**۴-۲-۴- جمع‌بندی نحوه اعمال اثرات لنگر خمثی وارد شده به تیر سینوسی:**

با توضیحات ارائه شده در قسمتهای قبل واضح است که مقدار حداکثر نیروی فشاری بال تیرورق سینوسی را می‌توان برابر با کمترین مقدار  $N_3$  و  $N_2$  و  $N_1$  در نظر گرفت. با داشتن این نیروی فشاری می‌توان به راحتی مقدار حداکثر لنگر خمثی قابل تحمل توسط تیر سینوسی را از رابطه زیر بدست آورد:

$$M_{max(allow)} = (\min[N_1, N_2, N_3]) \times (h_w + t_f) \quad (8-4)$$

### ۴-۳-۳- اثرات ناشی از نیروی برشی در تیرهای سینوسی:

در فصل گذشته مطالعات انجام شده بر روی اثرات نیروی برشی مفصلًا مورد بحث قرار گرفت. در اکثر مطالعات مذکور طراحی تیرورقهای با جان موجدار در برابر نیروهای برشی بر مبنای آئیننامه‌های اروپایی و بخصوص آئیننامه *Din* آلمان پیشنهاد شده است. در روش توصیه شده توسط این آئیننامه‌ها، عنوان شده است که اولاً تنشهای برشی می‌توانند دو نوع کمانش کلی و موضعی بوجود آورند. ثانیاً لازم است که ظرفیت تیر تحت هر دو نوع کمانش مذکور کنترل گردد. لیکن همانطور که در فصول پیش بیان شد، در مورد تیرورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی تحقیقات آقای دکتر پاسترناک نشان داد که کنترل کمانش موضعی چندان پر اهمیت نیست و لازم نیست لحاظ گردد. در مورد جزئیات تحقیقات مذکور در فصل قبل توضیحاتی ارائه شد. در ادامه نحوه کنترل کمانش کلی و موضعی در جان تیر سینوسی تشریح می‌گردد.

### ۴-۳-۴- کنترل کمانش موضعی در جان سینوسی

نیروی برش نهایی قابل تحمل توسط جان سینوسی از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$V_1 = \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w h_w \quad (9-4)$$

اگر احتمال وقوع کمانش موضعی در جان سینوسی وجود داشته باشد، نیروی فوق الذکر باید کمتر در نظر گرفته شود تا از وقوع کمانش موضعی جلوگیری کند. بنابراین به منظور کاهش تنش فوق از یک ضریب  $\phi_L$  کاهش استفاده می‌شود:

$$V_1 = \phi_L \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w h_w \quad (10-4)$$

$\phi_L$  بستگی به تنش کمانشی و ابعاد هندسی و مقاومت مصالح جان داشته و به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi_L = \frac{1.15}{0.9 + \lambda_L} \leq 1 \quad (11-4)$$

واضح است که ضریب کاهشی فوق دارای مقداری کمتر از واحد می‌باشد. بنابراین اگر مقدار رابطه فوق از یک بزرگتر باشد، مقدار این ضریب برابر با واحد فرض می‌شود.

---

 روش طراحی تیورقهای با جان موجدار از نوع سینوسی
 

---

مقدار ضریب لاغری مندرج در رابطه فوق که بیانگر پتانسیل مقاومت جان در مقابل کمانش موضعی است،  $\lambda_L$ ، به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{f_y}{\sqrt{3}\tau_{cr,L}}} \quad (12-4)$$

مقدار  $\tau_{cr,L}$  در رابطه فوق نیز تنש بحرانی برای وقوع کمانش موضعی است که از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\tau_{cr,L} = \left( 5.34 + \frac{\alpha S}{2t_w h_w} \right) \frac{\pi^2 E}{12(1-v^2)} \left( \frac{2t_w}{S} \right)^2 \quad (13-4)$$

در رابطه فوق  $\alpha$  برابر با دامنه موج سینوسی و  $S$  برابر با طول واقعی موج سینوسی می‌باشد که طول واقعی موج سینوسی از رابطه زیر قابل استخراج است:

$$S = \int_0^\lambda \sqrt{1 + \left( \frac{\alpha \pi}{\lambda} \sin \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right)^2} \quad (14-4)$$

به این ترتیب تمام پارامترهای لازم برای محاسبه ضریب کاهش  $\phi_L$  را می‌توان از روابط بالا حساب کرد و با داشتن ضریب کاهش  $\phi_L$ ، می‌توان حداکثر نیروی برشی مجاز برای عدم وقوع کمانش موضعی در جان را از رابطه (۹-۴) محاسبه کرد.

#### ۲-۳-۴ - کنترل کمانش کلی جان سینوسی

در فصول قبل توضیح داده شد که برای تبیین رفتار کمانش کلی در جان تیوروق موج سینوسی، می‌توان از فرض رفتار ارتروتوپیک برای جان موجدار استفاده کرد. توضیحات مبسوطی در رابطه با بکارگیری این فرض و نحوه فرمول‌بندی آن برای موجهای ذوزنقه‌ای و سینوسی به ترتیب در فصول دوم و سوم ارائه شد. در اینجا از ذکر توضیحات اضافی صرفنظر شده و روند محاسبه ظرفیت برشی جان تیور سینوسی برای مقابله با کمانش کلی جان تشریح می‌گردد.

اگر کمانش کلی رخ ندهد، جان با حداکثر ظرفیت باربری خود نیروهای برشی را تا حد جاری شدن تحمل می‌کند. بنابراین بار نهایی برش برابر است با :

$$V_2 = \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w h_w \quad (15-4)$$

اما اگر کمانش کلی در جان سینوسی رخ دهد، نیروی فوق الذکر باید کمتر در نظر گرفته شود تا از وقوع کمانش کلی جلوگیری شود.

برای کاهش تنفس نهایی جهت جلوگیری از کمانش کلی از یک ضریب کاهش  $\phi_G$  استفاده می‌شود:

$$V_2 = \phi_G \frac{f_y}{\sqrt{3}} t_w h_w \quad (16-4)$$

$\phi_G$  بستگی به تنفس کمانشی و ابعاد هندسی و مقاومت مصالح جان داشته و به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi_G = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_G^2} \leq 1 \quad (17-4)$$

بنابراین واضح است که این ضریب کاهشی  $\phi_G$  دارای مقداری کمتر از واحد می‌باشد. اگر مقدار رابطه فوق از یک بزرگتر شود، مقدار این ضریب برابر با واحد فرض می‌شود. مقدار ضریب لاغری جان در مقابل کمانش کلی  $\lambda_G$  به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\lambda_G = \sqrt{\frac{f_y}{\sqrt{3} \tau_{cr,G}}} \quad (18-4)$$

مقدار  $\tau_{cr,G}$  در واقع تنفس بحرانی در کمانش کلی است که از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\tau_{cr,G} = \frac{32.4}{t_w h_w^2} (D_x^{0.25} D_z^{0.75}) \quad (19-4)$$

که در رابطه فوق  $D_x$  و  $D_z$  سختی خمشی صفحه جان سینوسی در امتداد دو محور عمود بر هم هستند و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$D_x = \frac{E t_w^3}{12(1-v^2)} \left(\frac{\lambda}{S}\right) \quad (20-4)$$

$$D_z = \frac{EI_z}{\lambda} \quad (21-4)$$

مقادیر پارامترهای بکار گرفته شده در رابطه بالا واضح بوده و  $I_z$  نیز در واقع بیانگر مقدار ممان اینرسی موج سینوسی حول محور تقارن می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_z = \int_0^\lambda \left[ \frac{1}{12} t_w^3 + \left( \frac{\alpha}{2} \sin \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right)^2 \right] dx$$

به این ترتیب تمام پارامترهای لازم برای محاسبه ضریب کاهش  $\phi_G$  را می‌توان از روابط بالا محاسبه کرد و با داشتن ضریب کاهش  $\phi_G$ ، می‌توان حداکثر نیروی برشی مجاز برای عدم وقوع کمانش کلی در جان<sub>2</sub> را از رابطه (۱۶-۴) محاسبه کرد.

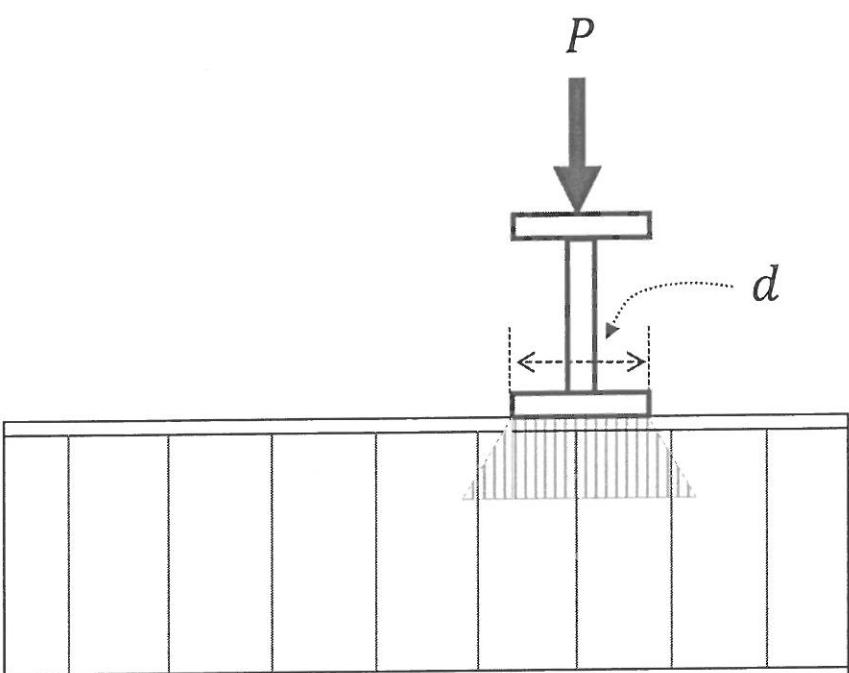
مقدار ظرفیت نهایی برش جان برابر با کمترین مقدار محاسبه شده برای ظرفیت برشی جان در کمانش کلی و کمانش موضعی می‌باشد:

$$V_{max(allow)} = (\min V_1, V_2) \times (h_w t_w) \quad (22-4)$$

#### ۴-۴- مقاومت لهیدگی جان در مقابل بارهای متتمرکز وارد شده به تیرسینوسی:

در فصول قبل به تفصیل بیان شد که ممکن است جان تیروورق سینوسی و یا ذوزنقه‌ای در مقابل بارهای وارد دچار لهیدگی شود. این نوع خرابی در محل تکیه‌گاههای تیر نیز شایع است. اگر از سخت‌کننده در زیر بار متتمرکز استفاده شود، لازم نیست که مقاومت لهیدگی جان کنترل گردد. اما اگر از سخت‌کننده‌ها استفاده نشود، لازم است که از مقاومت لهیدگی جان در مقابل بار متتمرکز وارده اطمینان حاصل کرد.

فرض کنیم بار متتمرکز  $P$  در عرض  $d$  مطابق با شکل ۲-۴ به تیر وارد می‌شود.



شکل ۲-۴ : توزیع بار متتمرکز و نحوه انتقال آن به جان موجدار سینوسی

جان تیر ممکن است در زیر محل اعمال تیر له شود. اگر رابطه زیر برقرار باشد، جان در مقابل لهیگی ایمن است:

$$f_{CRIP} = \frac{P}{t_s(d + 5t_f)} \leq f_y \quad (25-4)$$

$f_y$  در واقع تنش جاری شدن فولاد جان و  $d$  عرض اعمال بار مطابق با شکل (۲-۴) است. اگر رابطه ۲۵-۴ برقرار نباشد (یعنی  $f_{CRIP} \geq f_y$ )، در آن صورت یا باید ضخامت جان را افزایش داد و یا عرض اعمال بار را زیاد کرد. در غیر اینصورت باید بار مرکز واردہ را کمتر کرد و یا از سخت کننده در زیر محل اعمال بار استفاده کرد.

#### ۴-۵- جمع بندی:

در جمع بندی نهایی می‌توان چنین عنوان کرد که برای طراحی تیرورقهای با جان موجدار سینوسی، لازم است ابتدا طراح بارهای وارد بر تیر مورد نظر را محاسبه نموده و سپس لنگر خمشی و نیروی برشی داخلی حداکثر را در اثر بارهای واردہ محاسبه نماید.

با داشتن لنگر خمش حداکثر، می‌توان ماکزیمم نیروی فشاری در بال تحت فشار را محاسبه نمود. این مقدار باید از مقادیر محاسبه شده در رابطه (۸-۴) کوچکتر باشد.

همچنین با داشتن حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در تیر، می‌توان مقدار مذکور را با حداکثر نیروی برشی مجاز تیر که از رابطه (۲۲-۴) بدست می‌آید مقایسه نمود. نیروی برشی داخلی تیر که حاصل نیروهای واردہ است، باید از مقدار نیروی برشی مجاز تیر سینوسی کمتر باشد.

علاوه بر کنترل نیروی برشی و لنگر خمشی که در قسمت بالا توضیح داده شد، تغییر مکان تیر نیز باید کنترل گردد. تغییر مکان تیرهای با موج سینوسی با تغییر مکان تیرهای معمولی متفاوت است و مقدار تغییر مکان برشی نیز علاوه بر تغییر مکانهای ناشی از خمش باید در محاسبه تغییر شکل نهایی تیر لحاظ گردد. سپس تغییر مکان محاسبه شده برای تیر باید با مقدار مجاز تغییر مکان مقایسه گردد. مقدار مجاز تغییر مکان تیر بستگی به نوع سازه مورد استفاده دارد. برای برخی از سازه‌ها نظیر تیرهای معمولی مورد استفاده در ساختمانها تغییر مکان مجاز به مقدار ۱/۲۴۰ دهانه تیر محدود می‌شود. در مورد برخی دیگر از تیرهای مورد استفاده در سازه‌های صنعتی و ...، بسته به نوع کاربرد تیرورق، مقدار مجاز تغییر مکان متفاوت است.