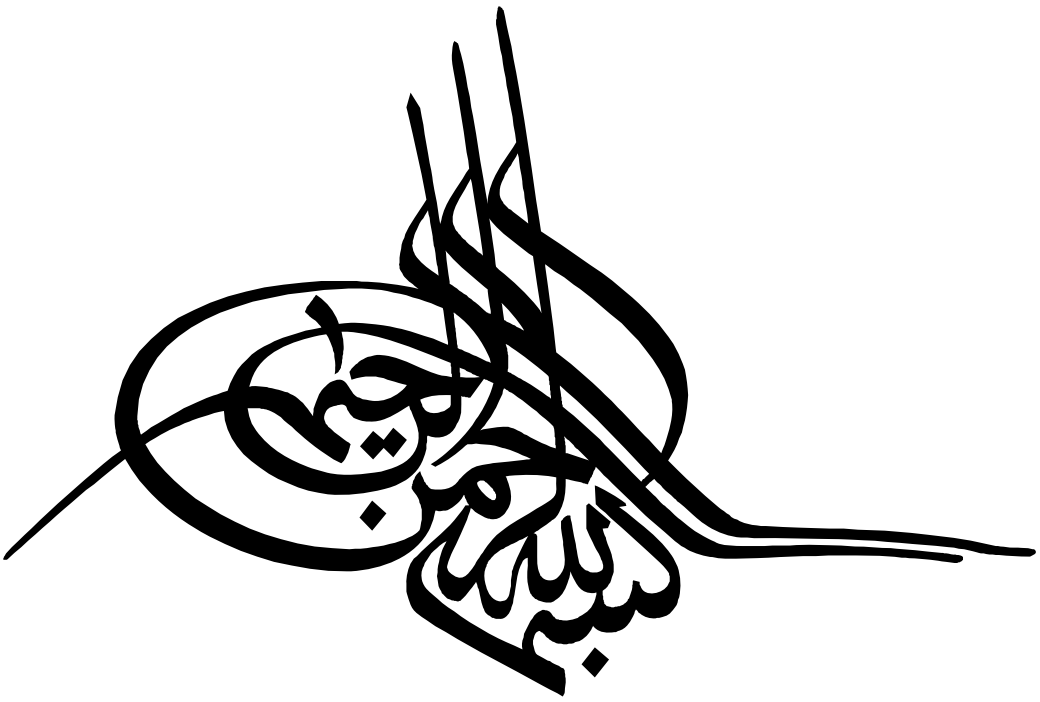

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد
(گرایش سازه)

عنوان :

تحلیل عددی کمانش تیر ورق‌های جدار نازک بامقاطع سرد نوردیده حاوی جان موجدار تحت خمش وبرش

Numerical buckling analysis of thin-walled cold-form girder section with corrugated webs under bending and shear loading

توسط:
شهرام ابراهیمی

استاتید راهنما:
دکتر محمدزمان کبیر
دکتر ابوالقاسم کرامتی

بهار ۸۷

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

تاریخ: ۸۸/۲/۲۷
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: شهرام ابراهیمی | دانشجوی آزاد ● | بورسیه ○ | معادل ○

شماره دانشجوئی:۸۴۱۲۴۰۶۴ | دانشکده: مهندسی عمران و محیط‌زیست | رشته تحصیلی: سازه | گروه: سازه

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: محمد زمان کبیر | درجه و رتبه: دانشیار گروه سازه

نام و نام خانوادگی: ابوالقاسم کرامتی | درجه و رتبه: استادیار گروه سازه

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: | درجه و رتبه:

نام و نام خانوادگی: | درجه و رتبه:

عنوان پایان‌نامه به فارسی : تحلیل عددی کمانش تیر ورق‌های جدار نازک با مقاطع سرد نوردیده تحت خمش و برش

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی: Numerical buckling analysis of thin-walled cold-form girder section with corrugated webs under bending and shear loading

نوع پروژه: کارشناسی○ | ارشد● | دکترا ○ | سال تحصیلی: ۸۷-۸۵

کاربردی ● | بنیادی ○ | توسعه‌ای ○ | نظری ○

تاریخ شروع :۸۵/۶/۶ | تاریخ خاتمه :۸۷/۳/۶ | تعداد واحد :۶ | سازمان تأمین کننده اعتبار :

واژه‌های کلیدی به فارسی: جان‌های موج‌دار ـ اجزای محدود ـ بارهای خمشی ـ بارهای برشی ـ تیر ورق

واژه‌های کلیدی به انگلیسی : Corrugated web-Finite Element-Flexural Bending – Shear Loading - Girder

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات ۱۰۴	تصویر● جدول● نمودار ● نقشه ○ واژه‌نامه ○		تعداد مراجع ۱۷	تعداد صفحات ضمائم
زبان متن	فارسی ●	انگلیسی ○	چکیده	فارسی ●	انگلیسی ●
یادداشت					

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

۱ : ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت PDF همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه
۲ : ارائه به کتابخانه دانشکده (شامل دو جلد پایان نامه به همراه نسخه الکترونیکی فرم در لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی)

بسمه تعالی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران) **دانشکده مهندسی عمران**

توجه: این قسمت در زمان تصویب پروژه تکمیل شده و در صفحه اول کلیه نسخ پایان‌نامه گنجانده می‌شود.

عنوان، اهداف و روش تحقیق این پروژه کارشناسی ارشد مطابق با مشخصات زیر در تاریخ ۸۵/۶/۶ شورای تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسید.

عنوان پروژه:

تحلیل عددی کمانش تیر ورق های جدار نازک با مقاطع سرد نوردیده حاوی جان موجدار تحت خمش و برش

اهداف و روش تحقیق:

استفاده از جان های موجدار به منظور افزایش سختی خارج از صفحه و مقاومت کمانش تیر ورق های با مقاطع سرد نوردیده می باشد.این روش امکان استفاده از صفحات جدار نازک بدون استفاده از تقویت کننده ها را در تیر ورق های با ارتفاع قابل ملاحظه بمنظور استفاده در دهانه های بزرگ در سازه ها و پل ها فراهم می نماید.در این تحقیق به صورت عددی و با استفاده از المان محدود ، این تیرها تحت بارهای خمشی و برشی مورد ارزیابی قرار می گیرند.تاثیر پارامترهای هندسی مانند دامنه موج، ضخامت جان، زاویه موج،عرض قسمت مسطح موج،طول موج و... در پتانسیل بار پذیری و ظرفیت کمانشی تیر مورد بررسی قرار می گیرند . با توجه به تولید مقاطع سرد نوردیده درکشور ضرورت چنین تحقیقات می‌تواند مفید واقع شده و به تدوین دستورالعمل ضوابط فنی ساخت کمک بنماید.

نام و امضای دانشجو نام و امضای استاد راهنما نام و امضای استاد راهنما امضای مدیر تحصیلات تکمیلی دانشکده

شهرام ابراهیمی **دکتر محمدزمان کبیر** **دکتر ابوالقاسم کرامتی**

توجه: این قسمت در زمان ارائه پروژه تکمیل شده و همراه با قسمت فوق در صفحه اول پایان‌نامه گنجانده می‌شود.

اینجانبان دکتر محمدزمان کبیر و دکتر ابوالقاسم کرامتی استاد راهنمای پروژه گواهی می‌نماییم که کلیه قسمتهای مندرج در این پایان‌نامه توسط دانشجو، آقای شهرام ابراهیمی به انجام رسیده و محتوای آن مطابق با عنوان، اهداف و روش تحقیق فوق می‌باشد.

دکتر محمدزمان کبیر: **دکتر ابوالقاسم کرامتی:**

تاریخ: **تاریخ:**

اعضاء هیات داوران پس از بررسی کامل کار انجام شده از نظر کیفی، نوآوری، احاطه به موضوع و نحوه ارائه، رای نهایی خود را بدین صورت اعلام می‌نمایند:

نام استاد راهنما: **دکتر کبیر** نام استاد راهنما: **دکتر کرامتی** نام داور: **دکتر دیلمی** نام داور: **دکتر میر قادری**

امضاء: امضاء: امضاء: امضاء:

توجه: اعضاء محترم هیات داوران می‌توانند نظرات تکمیلی خود را در پشت همین برگه مرقوم فرمایند.

ضروری است کلیه مطالب و اسامی تایپ شوند.

سپاس خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت.

شایسته است که از زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده اساتید گرانقدر و بزرگوارم جناب آقای دکترکبیر وجناب آقای دکترکرامتی تشکر و قدردانی نمایم که با صبر و دلسوزی فراوان مرا درطول دوران تحصیل دانشگاهی و تهیه این پایان‌نامه یاری نمودند و از درگاه حق برای آنها سلامتی و بهروزی آرزومندم .

تقدیم به

پدر و مادرم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

چکیده پایان نامه ارائه شده توسط **شهرام ابراهیمی** به شماره دانشجویی **۸۴۱۲۴۰۶۴** برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان:

تحلیل عددی کمانش تیر ورق‌های سرد نوردیده حاوی جان موجدار تحت خمش و برش

استاتید راهنما: **دکتر محمدزمان کبیر، دکتر ابوالقاسم کرامتی** تاریخ: **۱۳۸۷/۲/۹**

تأثیر جان موجدار روی مقاومت خمشی و برشی تیرورق‌های ساخته شده از جان موجدار در این پایان‌نامه موردبررسی قرار می‌گیرد. ورق‌های موجدار ذوزنقه‌ای یکی از قدیمی‌ترین انواع فولادهای سرد نورد شده می‌باشد. استفاده از ورق‌های موجدار جهت افزایش سختی خارج از صفحه و مقاومت کمانشی بدون نیاز به سخت‌کننده‌های عرضی، از سالها پیش ابتدا در صنعت هواپیماسازی سپس در مهندسی عمران در ساخت پلها و ساختمان‌ها مورد توجه بوده است. استفاده از جان موجدار امکان کاربرد ورق‌های نازک بدون نیاز به سخت‌کننده‌ها را فراهم کرده و می‌تواند ضخامت جان را کاهش داده و در کاهش وزن و هزینه‌ها کمک نماید. آنالیز غیرخطی اجزای محدود که هم هندسه و هم مصالح غیرخطی را در آنالیز در نظر می‌گیرد استفاده شده است. اثر پارامترهایی همچون نسبت ابعاد مقطع، ضخامت جان و تنش تسلیم جان، ترکیب موج جان و اثر رابطه تنش کرنش مصالح بال روی مقاومت کمانشی تیرورق‌های با جان موجدار تحت خمش بررسی و مورد مطالعه قرار گرفته است و نتیجه نهایی از این بررسی‌ها کمانش ناگهانی بال فشاری به سمت جان در اثر جاری شدن بال فشاری و عدم مشارکت جان در تحمل تنش‌های عمودی ناشی از خمش می‌باشد. به طور مشابه اثر پارامترهای هندسی موج‌های ذوزنقه‌ای (زاویه موج، عمق موج و عرض قسمت مسطح و افقی موج)، ضخامت جان، ارتفاع مقطع و پارامترهای هندسی موج‌های سینوسی (دامنه موج و طول موج) روی مکانیسم شکست و ظرفیت باربری برشی تیرهای با جان موجدار بررسی و بیان شده است. نتیجه نهایی از این بررسی‌ها این بوده که این تیرها تحت برش در اثر کمانش (کلی یا محلی) باربری خود را از دست داده‌اند. چنانچه موج‌های جان از هم باز باشد کمانش محلی و در صورت متراکم بودن کمانش کلی رخ خواهد داد. همچنین بار نهایی برشی را می‌توان با تقریب خوبی با استفاده از فرض تئوری صفحات ایزوتروپیک برای کمانش محلی و فرض رفتار ارتوتروپیک برای کمانش کلی بدست آورد.

کلمات کلیدی:

جان‌های موجدار، اجزای محدود، بارهای خمشی، بارهای برشی، تیر ورق

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول ۱

مقدمه ۱

فصل دوم ۵

بار کمانش تیرورق‌های با جان موجدار ۵

۲-۱ بررسی رفتار درون صفحه‌ای ورقهای موجدار ذوزنقه‌ای ۶

۲-۱-۱- تعیین ضرایب سختی درون صفحه‌ای معادل برای ورق موجدار ذوزنقه‌ای ۷

الف ـ تعیین ضریب B_x ۷

ب ـ تعیین ضریب B_y ۱۱

پ ـ تعیین ضریب B_{xy} ۱۲

ت ـ محاسبهٔ B_ν ۱۳

۲-۲- رفتار و طراحی برشی تیرهای با جان موجدار ۱۴

۲-۲-۱ تنش حد جاری شدن ۱۴

۲-۲-۲- رفتار و مقاومت کمانشی جان موجدار فولادی ۱۵

الف ـ محاسبهٔ ظرفیت کمانشی موضعی ۱۶

ب ـ محاسبهٔ ظرفیت کمانش کلی ۱۷

پ ـ محاسبه ظرفیت کمانش منطقه‌ای یا اندرکنشی ۲۰

۲-۳- تعیین بار کمانشی فشاری تیر با جان موجدار سینوسی تحت فشار یکنواخت q روی بال[۱۵] ۲۱

۲-۳-۱- تعیین محل منحنی تار خنثی روی صفحه عمود بر راستای اعمال بار ۲۳

۲-۳-۲- تعیین انرژی کرنشی ذخیره شده در المان ناشی از خمش ۲۴

۲-۳-۳- تعیین کار انجام شده توسط بار خارجی ۲۵

۲-۳-۴- تعیین بار کمانشی ۲۵

فصل سوم ۲۹

مطالعات پیشینیان و ارائه آزمایشات و کارهای انجام شده قبلی ۲۹

۳-۱- خمش ۲۹

عنوان **صفحه**

۳-۱-۱- مقدمه ۲۹
۳-۱-۲- مطالعات آزمایشگاهی (همیلتون و القالی ۱۹۹۳ [۸]) ۳۰
۳-۱-۳- بارهای آزمایش [۸]..... ۳۲
۳-۱-۴- وسایل مورداستفاده [۸]..... ۳۳
۳-۱-۵- نتایج آزمایش [۸]..... ۳۳
۳-۲- برش ۳۶
۳-۲-۱- مقدمه ۳۶
- افزایش حد جاری شدن و مقاومت در اثر نورد سرد [۱۶]..... ۳۷
۳-۲-۲- مطالعات آزمایشگاهی [۱] ۳۹
۳-۲-۳- نتایج آزمایش‌ها ۴۳
فصل چهارم ۴۹
مدلسازی المان محدود و بررسی صحت نتایج تحلیل عددی ۴۹
با مطالعات آزمایشگاهی ۴۹
ـ مقدمه ۴۹
۴-۱- انتخاب المان و آنالیز کمانش غیرخطی ۵۰
۴-۲- خمش ۵۱
۴-۲-۱- مدل المان محدود و بارگذاری ۵۱
۴-۲-۲- نتایج آنالیز و مقایسه آنها با نتایج آزمایش و ارتباط و همبستگی میان مدل و آزمایش ۵۴
۴-۳- برش ۵۷
۴-۳-۱- هندسه مدل و بارگذاری آن ۵۷
۴-۳-۲- مقایسه نتایج حاصل از المان محدود با نتایج آزمایشگاهی..... ۵۸
فصل پنجم ۶۷
مطالعات پارامتریک در خمش ۶۷
۵-۱- مقدمه ۶۷
ـ مشخصات مصالح ۶۷

عنوان **صفحه**

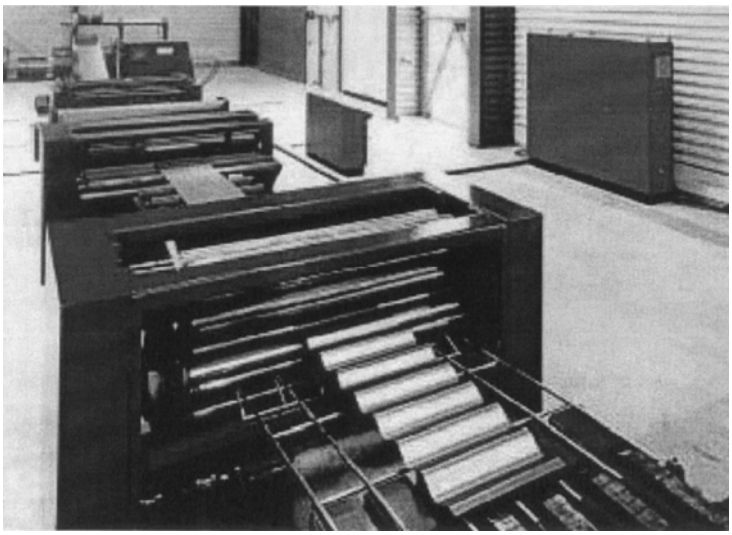
۵-۲- نمونه‌های تحلیلی و نتایج آنها ۶۸
۵-۳- اثر رابطه تنش و کرنش ۷۱
۵-۴- نتیجه‌گیری ۷۴
فصل ششم ۷۷
مطالعات پارامتریک در برش ۷۷
۶-۱- مقدمه ۷۷
۶-۲- مطالعات پارامتریک در برش برای موج‌های ذوزنقه‌ای ۷۸
۶-۲-۱- اثر افزایش دامنه موج «h_r» ۷۹
۶-۲-۲- اثر افزایش زاویه موج «θ» ۸۲
۶-۲-۳- اثر افزایش پارامتر عرض قسمت مسطح موج ذوزنقه‌ای «b» ۸۴
۶-۲-۴- اثر افزایش ضخامت جان «t_w» ۸۸
۶-۲-۵- اثر افزایش ارتفاع مقطع «H» ۹۰
۶-۳- مطالعات پارامتریک در برش برای تیرهای با جان موجدار سینوسی ۹۱
۶-۳-۱- اثر دامنه موج بر ظرفیت برشی تیرهای با جان موجدار سینوسی ۹۲
۶-۳-۲- اثرات افزایش پارامتر طول موج سینوسی q ۹۴
۶-۴- مقایسه بار کمانش تیرورق‌های با جان موجدار ذوزنقه‌ای و سینوسی ۹۸
فصل هفتم ۹۹
نتیجه‌گیری ۹۹
- خمش ۹۹
- برش ۱۰۰
- پیشنهادات ۱۰۲
مراجع ۱۰۳

فصل اول

مقدمه

جان تیر ورق‌های معمولی با جان مسطح، تحت اثر بارهای وارده می‌تواند در معرض کمانش قرار گیرد. برای جلوگیری از کمانش جان یا باید ضخامت جان را زیاد کرد و یا از سخت‌های عرضی و طولی استفاده نمود.

یک روش اقتصادی برای جلوگیری از کمانش جان، موجدار کردن آن می‌باشد. این روش با افزایش سختی خارج از صفحه جان باعث حذف سخت‌کننده‌های عرضی شده و امکان استفاده از جان نازکتر را نیز فراهم می‌کند. ایده استفاده از تیرهای فولادی با جان موجدار، اولین‌بار در ساختمان‌های صنعتی با ضخامت جان حدود ۲ تا ۵ میلیمتر مطرح شد [۶]. با این کار نسبت ارتفاع به ضخامت جان می‌تواند تا مقدار قابل توجهی افزایش یابد. تا جایی که استفاده از این نوع تیرها در پل‌ها تا نسبت ارتفاع به ضخامت ۴۰۰ هم به کار گرفته شده است. روش تولید این تیرها در حال حاضر شامل تهیه موج جان و ورقهای بال به صورت جداگانه (شکل ۱-۱) و اتصال آنها به هم به وسیله جوش زیر پودری می‌باشد. دامنه کاربرد این تیرها بسیار وسیع است و از دهانه ساده در ساختمانهای یک طبقه تا تیرهای باربر در ساختمانهای چند طبقه کاربرد وسیعی دارند. سختی جان این تیرها باعث شده است تا از آنها به عنوان تیرهای جرثقیل و همچنین تیرهای جعبه‌ای پلها استفاده شود.



شکل ۱-۱ خط تولید جان با موج ذوزنقه‌ای

تیر ورق‌های فلزی متشکل از جان موجدار و بال‌های فلزی اغلب در ساختمان‌ها و تیر ورق‌های مرکب که جان موجدار فلزی با بال‌های پیش‌تنیده بتنی در آنها استفاده شده بیشتر در پل‌ها مورداستفاده قرار گرفته‌اند. [۲] از جمله فوائد کاربرد جانهای موجدار در تیرهای مرکب عبارتند از:

- کاهش وزن بار مرده جان فولادی در مقایسه با جان بتنی و در نتیجه آن کاهش نیروهای زلزله و کاهش هزینه‌های ساخت تیر
- جان موجدار فولادی مقاومت کمانشی برشی بیشتری نسبت به جان مسطح فولادی دارد.
- ساخت و اجرای آسانتر جان موجدار فولادی نسبت به جان بتنی
- در تیرهای مرکب به دلیل پیش تنیده بودن بالها، جان تحت تنش‌های محوری قرار می‌گیرد اما جانهای موجدار بعلت عدم سختی محوری و امکان وقوع تغییرشکل در راستای محور جان تحت تأثیر تنش‌های محوری ایجاد شده قرار نمی‌گیرند، این ویژگی به خاصیت آکاردئونی جان معروف است.

در یک جمع‌بندی کلی خلاصه مطالعات انجام شده توسط محققین قبل در مورد ویژگی‌های جان‌های موجدار در موارد زیر خلاصه می‌شود.

- کاهش ضخامت جان و حذف سخت‌کننده‌های عرضی که در نتیجه مصالح کمتری برای ساخت استفاده

می‌شود. [۱]

- کاهش ضخامت جان و همچنین حذف سخت‌کننده‌ها و هزینه‌های مربوط به جوشکاری آنها باعث کاهش وزن و در نتیجه اقتصادی‌تر شدن تیرهای با جان موجدار می‌گردد. خصوصاً در تیرهای بتنی، به دلیل جایگزینی جان بتنی با یک ورق فولادی سبک کاهش قابل توجهی در وزن تیر حاصل می‌شود.

- موجدار کردن جان تیر باعث کاهش سختی محوری آن می‌گردد. درنتیجه نیروهای محوری ناشی از خمش، تغییرات دما، خزش و جمع‌شدگی در جان تیر کاهش می‌یابد و حساسیت درمقابل کمانش در جان کاهش می‌یابد و اثرات ناشی از خطاهای ساخت در افزایش تنش‌های محوری کم‌رنگ‌تر می‌گردد. همچنین در تیر ورق‌های فلزی با جان موجدار بایستی ضخامت بال را افزایش داد. چون کمانش موضعی بال فشاری در عرضی بیشتر از نصف بال (نصف بال فشاری + نصف دامنه موج = عرض ورق فشاری تقویت‌نشده) اتفاق می‌افتد و همچنین جان تیر درمقابل تنش‌های خمشی مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد. [۳]

- درخصوص تیرهای قوطی شکل که جان آنها از ورق‌های فلزی موجدار ساخته شده است، مقاومت درمقابل تنش‌های برشی ناشی از اثرات پیچشی بارهای خارجی افزایش می‌یابد. [۴]

- اصلی‌ترین نقص تیر ورق‌های با جان موجدار افزایش هزینه‌های مربوط به ساخت ورق‌های موجدار می‌باشد.

ویژگی‌های مذکور در بالا باعث شده تا نحوه عملکرد این تیرها موردتوجه محققان بسیاری قرار گیرد. گروه‌های بسیاری به تحلیل و بررسی کمانش و ظرفیت باربری این نوع تیرها پرداخته‌اند.

این تحقیقات اولین بار در فرانسه توسط تیم تحقیقاتی BTP آغاز گردید. در سال ۱۹۸۵، Bergfelt در سوئیس [۵] و در سال ۱۹۸۷، Lieva-Aravena [۶] برپایه آزمایشات عملی به بررسی رفتار تیر ورق‌های با جان موجدار در برابر نیروهای متمرکز پرداختند. در سال ۱۹۹۲، اسمیت در دانشگاه Main چهار نوع آزمایش روی دو نمونه تیر با جان موجدار برای بررسی مقاومت برشی این پانل‌ها انجام داد.

در سال ۱۹۹۴ و ۱۹۹۶، Lou و Edlund [۷] براساس آنالیز اجزای محدود به بررسی تأثیر پارامترهایی از جمله عیوب ناشی از ساخت، اثر محل اعمال بار، اثر عرض توزیع بار، اثر پارامترهای هندسی، اثر تغییر تنش جاری شدن مصالح هنگام نورد سرد پرداخته و برای بارهایی قابل تحمل در لهیدگی تیر ورق‌های با جان ذوزنقه‌ای روابطی ارائه کردند. اما گزارش نسبتاً جامع از ظرفیت باربری این تیرها توسط القالی [۸] [۱] در سال ۱۹۹۶ منتشر شد که مبنای اصلی مطالب بررسی شده در این پایان‌نامه می‌باشد.

در فصل دوم رفتار درون صفحه‌ای ورق‌های موجدار ذوزنقه‌ای بررسی شده و در ادامه رفتار و طراحی برشی تیرهای با جان موجدار ذوزنقه‌ای جمع‌بندی و بیان شده است. در انتها نیز بار کمانشی تحلیلی جان یک

نمونه تیر با جان موجدار سینوسی که تحت بار یکنواخت q قرار دارد بررسی و تعیین خواهد شد.

در فصل سوم به مطالعه آزمایشات و بررسی‌های پیشینیان و ادبیات موضوع پرداخته شده است. این فصل شامل دو بخش می‌باشد. بخش اول شامل مشخصات و نتایج نمونه‌های آزمایش شده توسط القالی و همیلتون در زمینه خمش می‌باشد. در بخش دوم به بررسی برش در جان تیر ورق‌های موجدار با پروفیل موج ذوزنقه‌ای پرداخته شده است. در این بخش آزمایشات انجام شده توسط القالی و همکاران در دانشگاه Main شرح داده شده و نتایج آن‌ها ارائه شده است.

در فصل چهارم مدل المان محدود تیر با جان موجدار تحت خمش و برش بیان شده و شرایط مرزی مدل، خواص مصالح و بارگذاری آن شرح داده شده و تحلیل کمانش غیرخطی شده‌اند. نتایج حاصل از المان محدود با آزمایشات مقایسه شده و صحت عملکرد مدل بررسی شده است.

در فصل پنجم به بررسی اثر پارامترهای هندسی از جمله: نوع پروفیل چین، نسبت ابعاد پانل $\left(\frac{a}{H}\right)$ نسبت ضخامت جان به بال، اثر رابطه تنش ـ کرنش در عملکرد تیرهای با جان موجدار ذوزنقه‌ای تحت خمش پرداخته شده است و عدم مشارکت جان این تیرها در تحمل نیروهای خمشی اثبات گردیده است.

در فصل ششم به بررسی مطالعات پارامتریک تیرهای با جان موجدار تحت برش پرداخته شده است و شامل دو بخش تیرهای با جان موجدار ذوزنقه‌ای و سینوسی است. در بخش اول اثر پارامترهای هندسی نظیر عمق موج، عرض قسمت مسطح، زاویه موج، ارتفاع تیر و ضخامت جان بر روی ظرفیت باربری تیر موردمطالعه قرار گرفته و در ادامه آن اثر دامنه و طول موج سینوسی بر روی ظرفیت باربری تیر ورق‌های با جان موجدار سینوسی بررسی شده است.

فصل هفتم شامل فصل نتیجه‌گیری و پیشنهادات بوده و نتایج حاصل از آنالیز المان محدود که در بخش‌های قبلی به دست آمده‌اند به صورت کلی در این فصل جمع‌بندی شده‌اند و در ادامه پیشنهاداتی در جهت مطالعات بیشتر در زمینه تیرهای با جان موجدار فولادی ارائه شده است.

فصل دوم

بار کمانش تیرورق‌های با جان موجدار

با توجه به اینکه در تیرورق‌های ساخته شده از جان موجدار برش کاملاً توسط جان تحمل می‌شود. برای اختصار فقط کمانش برشی را در ورقها مطرح کرده و در انتها به بررسی بار کمانش فشاری جان موجدار سینوسی خواهیم پرداخت.

در یک ماده ایزوتروپیک خواص ماده از نظر هندسی و مادی در همه جهات یکسان می‌باشد. اما در یک ماده غیرایزوتروپیک خواص ماده وابسته به جهت می‌باشد. در حالت خاص اگر خواص ماده فقط در دو جهت عمود بر هم با یکدیگر متفاوت باشد ماده اورتوتروپیک نامیده می‌شود.

در دسته‌ای از مسائل مانند ورقهای موج‌دار، دالهای بتن آرمه، ورقهای سخت شده و ...، با اینکه معمولاً مصالح و اجزای تشکیل‌دهنده آنها از همگنی و یکنواختی برخوردارند، ولی خواص هندسی متفاوت در دو جهت عمود بر هم، رفتار ورق‌ها را از حالت ایزوتروپ خارج می‌سازد. با لحاظ مقداری تقریب، با بکارگیری تئوری ورقهای ارتوتروپیک، می‌توان مسائلی از این دست را حل نمود.

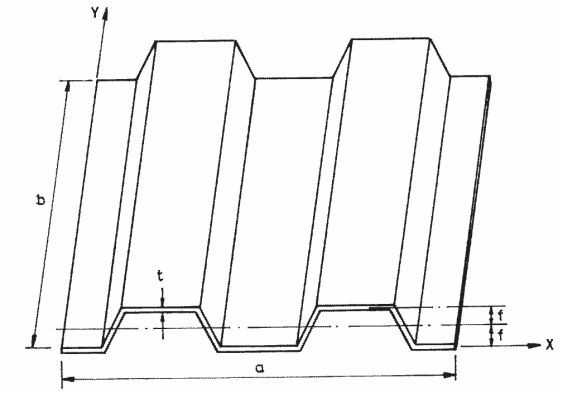
از دید سازه‌ای و برای تعیین مقاومت و سختی ورقهای موج‌دار در حالات مختلف رفتاری، شامل رفتار درون صفحه‌ای و رفتار برون صفحه‌ای، باید از فرمول‌بندی جدیدی نسبت به ورقهای تخت استفاده نمود. این فرمول‌بندی از فرمول‌بندی حالت ایزوتروپیک، کلی‌تر و پیچیده‌تر بوده و در مبحثی تحت عنوان، تحلیل ورقهای اورتروپیک مطرح می‌گردد.

در این روش، یک ورق صاف با خواص مادی اورتوتروپیک جایگزین یک ورق غیرصاف سخت شـده و دارای ماهیت سه بعدی با خواص مادی ایزوتروپیک، می‌شود.

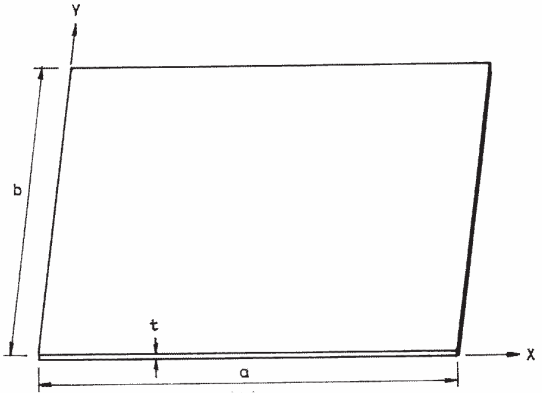
۲-۱ بررسی رفتار درون صفحه‌ای ورقهای موج‌دار ذوزنقه‌ای

برای انجام مدل‌سـازی و نیـز بررسـی رفتـار درون صـفحه‌ای ورقهـای مـوج‌دار مـی‌تـوان از روش ورقهـای اورتوتروپیک معادل استفاده کرد.

برای این منظور باید سختی‌های معادل درون صفحه‌ای برای ورق موج‌دار بدست آورده شـود. سـپس یـک ورق اورتوتروپیک با سختی‌های درون صفحه‌ای تعیین شده، به جای یک ورق موج‌دار، مدل‌سازی و تحلیل گردد. در این روش مطابق اشکال ۲-۱و ۲-۲ ابعاد کلی و ضخامت ورق اورتوتروپیک با ورق موج‌دار مساوی می‌باشند، ولی به علت موج‌دار بودن ورق، سختی‌هـای معـادل بدسـت آمـده در جهـات x و y بـا یکـدیگر متفاوت خواهند بود.



شکل ۲-۱ ورق با موج ذوزنقه‌ای با ضخامت t [۹]



شکل ۲-۲ ورق اورتوتروپیک معادل با ضخامت t [۹]

رابطهٔ تنش و کرنش برای یک ورق اورتوتروپیک را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix}=\frac{1}{1-\nu_x\nu_y}\begin{bmatrix}E_x & E_x\upsilon_y & 0\\ E_y\upsilon_x & E_y & 0\\ 0 & 0 & (1-\nu_x\nu_y)E_{xy}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_{xy}\end{Bmatrix} \qquad (۱-۲)$$

براساس اصل تقابل ماکسول ماتریس سختی متقارن می‌باشد. در نتیجه:

$$E_\nu=\nu_x E_y=\nu_y E_x \qquad (۲-۲)$$

با توجه به رابطه ۲-۱ ترکشن‌ها یا بردارهای تنش را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{Bmatrix}N_x\\ N_y\\ N_{xy}\end{Bmatrix}=\frac{1}{1-\nu_x\nu_y}\begin{bmatrix}E_x t & E_\nu t & 0\\ E_\nu t & E_y t & 0\\ 0 & 0 & (1-\nu_x\nu_y)E_{xy}t\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_{xy}\end{Bmatrix} \qquad (۳-۲)$$

$$\begin{Bmatrix}N_x\\ N_y\\ N_{xy}\end{Bmatrix}=\frac{1}{1-\nu_x\nu_y}\begin{bmatrix}B_x & B_\nu & 0\\ B_\nu & B_y & 0\\ 0 & 0 & (1-\nu_x\nu_y)B_{xy}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_{xy}\end{Bmatrix} \qquad (۴-۲)$$

B_x، B_y و B_{xy} ضرایب سختی درون صفحه‌ای ورق اورتوتروپیک در نظر گرفته می‌شوند. در صورتیکه این ضرایب برای یک ورق موج‌دار تعیین شود و در رابطهٔ ۲-۳ جایگزین گردد، آنگاه می‌توان مشخصات ورق اورتوتروپیک معادل را به دست آورد.

۲-۱-۱- تعیین ضرایب سختی درون صفحه‌ای معادل برای ورق موج‌دار ذوزنقه‌ای [۹]

الف ـ تعیین ضریب B_x

براساس رابطه ۲-۳ می‌توان نوشت:

$$N_x = \frac{t}{1-\nu_x \nu_y}\left(E_x \varepsilon_x + E_\nu \varepsilon_y\right) \qquad (۵-۲)$$

$$N_y = \frac{t}{1-\nu_x \nu_y}\left(E_\nu \varepsilon_x + E_y \varepsilon_y\right) \qquad (۶-۲)$$

با فرض کرنش ثابت ε_x و $N_y = ۰$ و رابطهٔ ۲-۲، رابطهٔ ۲-۶ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_\nu \varepsilon_x + E_y \varepsilon_y = ۰ \qquad (۷-۲)$$

$$\nu_x E_y \varepsilon_x + E_y \varepsilon_y = ۰ \qquad (۸-۲)$$

بنابراین ν_x از رابطهٔ ۲-۸ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\nu_x = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \qquad (۹-۲)$$

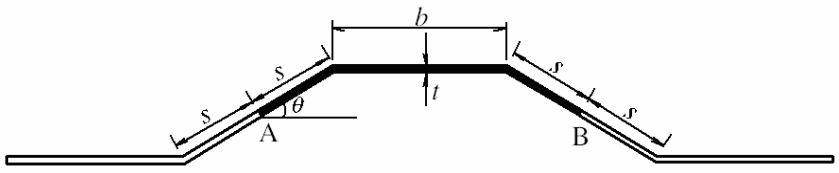
با بکارگیری روابط ۲-۵ و ۲-۸ داریم:

$$N_x = \frac{t}{1-\nu_x \nu_y}\left[E_x \varepsilon_x + \nu_y E_x \left(-\nu_x \varepsilon_x\right)\right] = tE_x \varepsilon_x \qquad (۱۰-۲)$$

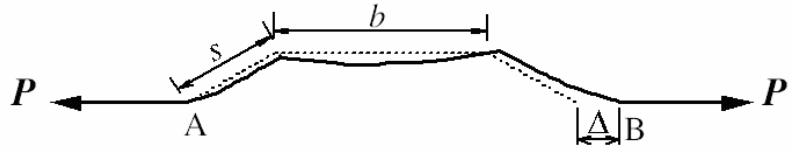
بنابراین درنهایت، با فرض کرنش ثابت ε_x و $N_y = ۰$، به رابطهٔ زیر می‌رسیم.

$$N_x = B_x \varepsilon_x \qquad (۱۱-۲)$$

اگر رابطهٔ میان ε_x و N_x را در یک ورق موج‌دار (شکل ۲-۳) بدست آوریم، ضریب B_x معادل بدست می‌آید. در شکل ۲-۴، روش بکار گرفته شده برای بدست آوردن این رابطه نشان داده شده است.

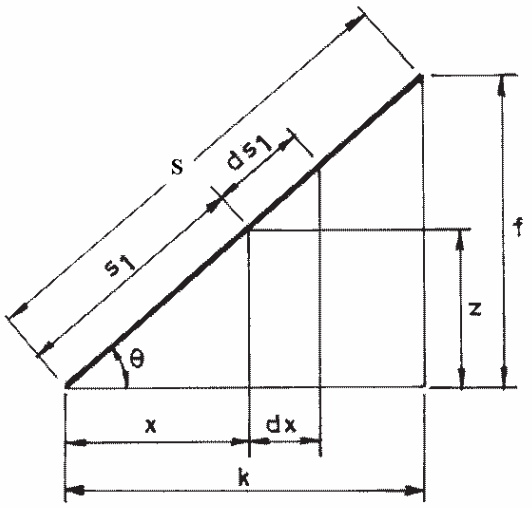


شکل ۲-۳ مشخصات یک نیم موج از ورق موج‌دار [۲]



شکل ۲-۴ تغییرشکل یک نیم موج در اثر نیروی درون صفحه‌ای P [۲]

برای این منظور، اگر یک نیم‌موج ورق موج‌دار را در نظر بگیریم (شکل ۲-۵)، انرژی کرنشی حاصل از نیروی درون صفحه‌ای P، به صورت انرژی خمشی و محوری در اجزای مورب و افقی این نیم‌موج ذخیره می‌شود و از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:



شکل ۲-۵ مشخصات یک نیم موج از ورق موج‌دار [۹]

$$U = \frac{1}{2}\int_0^b \frac{M_f^2}{EI}dx + 2\times\frac{1}{2}\int_0^s \frac{M_s^2}{EI}ds_1 + \frac{1}{2}\int_0^b \frac{P_f^2}{AE}dx + 2\times\frac{1}{2}\int_0^s \frac{P_s^2}{AE}ds_1 \qquad (۱۲-۲)$$

نیروی درون صفحه‌ای P، در عرض واحد ورق برابر با N_x خواهد بود.

در رابطهٔ فوق اگر، $f = s\times\sin\theta$

M_f، لنگر حاصل از نیروی درون صفحه‌ای در قسمت صاف ورق، برابر: $N_x f$

M_s: لنگر حاصل از نیروی درون صفحه‌ای در قسمت مورب ورق، برابر: $N_x \sin\theta\times s_1$

P_f: نیروی محوری حاصل از نیروی درون صفحه‌ای در قسمت صاف ورق برابر N_x

P_s: نیروی محوری حاصل از نیروی درون صفحه‌ای در قسمت مورب ورق برابر: $N_x\cos\theta$

بنابراین داریم:

$$U = \frac{1}{2}\int_0^b \frac{N_x^2 f^2}{EI}dx + 2\times\frac{1}{2}\int_0^s \frac{N_x^2\sin^2\theta\times s_1^2}{EI}ds_1 + \frac{1}{2}\int_0^b \frac{N_x^2}{AE}dx + 2\times\frac{1}{2}\int_0^s \frac{N_x^2\cos^2\theta}{AE}ds_1 \qquad (۱۳-۲)$$

با بکارگیری تئوری دوم کاستیگلیانو، جابجایی افقی نیم موج، u_x، (Δ در شکل ۲-۴)، برابر است با:

$$u_x = \frac{\partial U}{\partial N_x} \qquad (۱۴-۲)$$

$$u_x = \frac{N_x b s^2\sin^2\theta}{EI} + \frac{2N_x s^2\sin^2\theta}{3EI} + \frac{N_x b}{AE} + \frac{2N_x s\cos^2\theta}{AE} \qquad (۱۵-۲)$$

اگر $I = \frac{t^3}{12}$ و A=t (با فرض طول واحد ورق)، داریم:

$$u_x = N_x\left[\frac{12s^2\left(b+2s/3\right)\sin^2\theta}{E_s t^3} + \frac{b+2s\cos^2\theta}{E_s t}\right] \qquad (۱۶-۲)$$