

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

بررسی صلبیت پیچشی اتصالات در سازه‌های فولادی رایج در ایران

نگارنده:

محمدامین صالحی

استاد راهنما:

دکتر وحید رضا کلات جاری

استاد مشاور:

دکتر مهدی گردویی

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۶۲۹۰
تاریخ: ۹۴/۱/۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم / آقای محمدامین صالحی


با شماره دانشجویی: ۹۲۳۷۴۹۴ رشته: عمران گرایش: سازه

تحت عنوان: بررسی صلیبیت پیچشی اتصالات در سازه‌های فولادی راجع در ایران
که در تاریخ ۱۳۹۶/۶/۲۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با امتیاز <u>۸۸</u> درجه عالی)
<input type="checkbox"/> عملی	<input checked="" type="checkbox"/> نظری

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر وحیدرضا کلاتجاری	دانشیار	
۲- استاد مشاور	دکتر مهدی گردویی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محسن کرامتی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر جلیل شفائی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر فرنوش باسلیقه	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: 

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم نامه

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان، آرام‌بخش آلام زمینی-

ام است.

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم

؛

به سبزترین نگاه زندگی‌ام، چشمان سبز مادرم

؛

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی‌کران
مهربانی‌تان را سپاس نتوانم بگویم.

؛

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشت‌م در رضای شما

؛

گران‌سنگ‌تر از این ارزان‌داشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم غبار
خستگی‌تان را بزدايد.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تشکر و قدردانی

ضمن سپاس خداوند، که هر آنچه داریم از فضل بی‌کران اوست و هر آنچه نداریم از حکمت بی‌پایان اوست. در ابتدا لازم می‌دانم از اساتید محترم آقایان دکتر وحید رضا کلات جاری و دکتر مهدی گردویی که بارانمایی‌های مدبرانه خود نظارت و سرپرستی این پایان‌نامه را بر عهده داشتند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از تمامی اساتیدی که در این مدت افتخار شاگردی ایشان را داشتم، کمال قدردانی خود را بیان می‌کنم.

تعهدنامه

اینجناب محمدامین صالحی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی صلبیت پیچشی اتصالات در سازه های فولادی رایج در ایران تحت راهنمایی دکتر وحید رضا کلات جاری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

اتصالات جزو مهم‌ترین اجزا در سازه‌های فولادی هستند که به لحاظ رفتار خمشی بسته به صلبیت اتصال، به محدوده‌های: مفصلی، نیمه گیردار و گیردار دسته‌بندی می‌شوند. علاوه بر لنگرهای خمشی، گاهی اعضاء تحت لنگرهای پیچشی نیز قرار می‌گیرند. درزمینه‌ی میزان تحمل لنگرهای پیچشی و تأثیر جزئیات اتصال بر روی زاویه پیچش، تنش‌های برشی و تنش‌های خمشی در مقاطع اعضاء مطالعات زیادی انجام نشده و معمولاً مطالعات بر روی مدل‌های ریاضی ایده‌آل صورت پذیرفته است. در این پژوهش، اتصال مفصل خمشی نبشی فوقانی و تحتانی (نبشی نشیمن) و اتصال مفصل خمشی نبشی جان مورد بررسی عددی توسط نرم‌افزار Abaqus قرار گرفته و میزان تحمل لنگر پیچشی در محل تکیه‌گاه و زاویه پیچش و تنش‌های قائم و برشی در طول عضو مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس تحقیق انجام‌شده جداولی تنظیم و بسته به نوع و اندازه‌ی اتصالات، میزان صلبیت پیچشی تعیین و نتایج با مدل تحلیلی اتصال گیردار پیچشی و اتصال مفصل پیچشی مقایسه شده است. همچنین با استفاده از این نتایج ضرایبی تعیین شده است تا جامعه مهندسی بتواند طراحی پیچشی اتصالات واقعی را توسط روابط ساده و بدون نیاز به حل معادلات دیفرانسیل انجام و نتایج دقیق را به دست آورد. در این پژوهش نشان داده شده است که اتصال نبشی فوقانی و تحتانی با درصد اختلاف قابل قبول مانند مدل ریاضی اتصال گیردار پیچشی و اتصال نبشی جان با درصد اختلاف قابل قبول رفتاری مشابه اتصال مفصل تئوری دارد.

واژگان کلیدی: پیچش، نبشی جان، نبشی فوقانی و تحتانی، تابیدگی، اتصال مفصل پیچشی، اتصال

گیردار پیچشی، روش اجزای محدود، نرم‌افزار Abaqus

لیست مقالات

صالحی، امین. وحیدرضا کلات جاری و مهدی گردویی " بررسی رفتار پیچشی اتصال مفصلی خمشی تیر به ستون توسط نبشی جان ". چهارمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران ۷ و ۸ بهمن‌ماه سال ۱۳۹۵.

صالحی، امین. وحیدرضا کلات جاری و مهدی گردویی " بررسی رفتار پیچشی اتصال تیر به ستون توسط نبشی فوقانی و تحتانی و مقایسه آن با نتایج مدل ریاضی اتصال گیردار پیچشی ". چهارمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران ۷ و ۸ بهمن‌ماه سال ۱۳۹۵.

فهرست عنوان‌ها

فصل ۱ کلیات ۱

- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ مروری بر تحقیقات انجام شده ۳
- ۱-۲-۱ تئوری پیچش ۳
- ۲-۲-۱ تیرهای فولادی I شکل تحت لنگر پیچشی ۳
- ۳-۲-۱ روش‌های طراحی الاستیک تیرهای فولادی تحت ترکیب لنگر خمشی و پیچشی ۵
- ۳-۱ ضرورت انجام تحقیق ۸
- ۴-۱ محتوای پایان‌نامه ۸

فصل ۲ تئوری پیچش ۱۱

- ۱-۲ مقدمه ۱۲
- ۲-۲ پیچش ۱۲
- ۱-۲-۲ پیچش مقاطع مدور ۱۲
- ۲-۲-۲ پیچش مقاطع جدار نازک بسته ۱۴
- ۳-۲ پیچش آزاد مقاطع جدار نازک بسته چند سلول ۱۷
- ۴-۲ پیچش مقاطع غیرمدور بسته ۱۷
- ۵-۲ پیچش آزاد اعضای جدار نازک باز ۲۱
- ۶-۲ پیچش مقید اعضای جدار نازک باز ۲۲
- ۷-۲ اعمال شرایط مرزی و تعیین ضرایب مجهول معادله ۲۷
- ۱-۷-۲ تیر با تکیه‌گاه ساده و لنگر پیچشی متمرکز ۲۷

- ۳۲..... تیر با تکیه‌گاه ساده و لنگر پیچشی گسترده
- ۳۳..... تیر با تکیه‌گاه گیردار و لنگر پیچشی متمرکز
- ۳۵..... تیر با تکیه‌گاه گیردار و لنگر پیچشی گسترده
- ۳۷..... راه‌حل ساده برای تعیین تنش‌های ناشی از پیچش

فصل ۳ مدل‌سازی اجزای محدود ۴۱

- ۴۲..... ۱-۳ مقدمه
- ۴۲..... ۲-۳ روش المان محدود
- ۴۳..... ۳-۳ آشنایی با نرم‌افزار آباکوس
- ۴۴..... ۱-۳-۳ اصول آباکوس
- ۴۵..... ۲-۳-۳ معرفی حلگر استاندارد نرم‌افزار آباکوس
- ۴۶..... ۴-۳ مدل‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق
- ۴۶..... ۱-۴-۳ ایجاد مدل هندسی
- ۵۰..... ۲-۴-۳ تعیین خصوصیات تیر و نبشی اتصال
- ۵۱..... ۳-۴-۳ مونتاژ
- ۵۴..... ۴-۴-۳ تعیین تعداد مراحل و نوع حل مسئله
- ۵۵..... ۵-۴-۳ تعیین نوع تماس سطوح اجزا باهم
- ۵۸..... ۶-۴-۳ شرایط مرزی و بارگذاری
- ۶۲..... ۷-۴-۳ شبکه‌بندی
- ۶۶..... ۸-۴-۳ صحت سنجی و آنالیز استقلال نتایج از شبکه‌بندی

فصل ۴ بررسی رفتار مدل‌ها و نتایج ۷۱

- ۷۲..... ۱-۴ مقدمه

۲-۴ روش پژوهش ۷۲

۳-۴ اتصال نبشی جان ۷۶

۱-۳-۴ بار متمرکز ۷۶

۲-۳-۴ بار گسترده ۸۲

۴-۴ اتصال نبشی نشیمن (نبشی فوقانی تحتانی) ۸۸

۱-۴-۴ بار متمرکز ۸۸

۲-۴-۴ بار گسترده ۹۴

۵-۴ بررسی نتایج ۱۰۰

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۰۵

۱-۵ مقدمه ۱۰۶

۲-۵ نتایج ۱۰۶

۳-۵ پیشنهادات ۱۲۴

منبع ها ۱۲۵

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ آزمایش خمش و پیچش همراه با تابیدگی ۷
- شکل ۲-۱ تیرهای فلنجی توخالی کانالی شکل ۸
- شکل ۱-۲ توزیع تنش برشی ناشی از لنگر پیچشی [۲] ۱۳
- شکل ۲-۲ تنش برشی در مقاطع جدار ناز بسته [۲] ۱۴
- شکل ۳-۲ محاسبه نیروی برشی در مقاطع جدار نازک [۱] ۱۵
- شکل ۴-۲ محاسبه پیچش مقاطع غیرمدور [۱۲] ۱۸
- شکل ۵-۲ مقاطع جدار نازک باز [۱۲] ۲۱
- شکل ۶-۲ تیر فولادی تحت لنگر پیچشی [۱۲] ۲۴
- شکل ۷-۲ تغییر شکل بال تحت لنگر پیچشی [۲] ۲۴
- شکل ۸-۲ پیچش سن و نانت و پیچش تابیدگی [۱۳] ۲۵
- شکل ۹-۲ تیر با تکیه‌گاه مفصل پیچشی [۱۴] ۲۸
- شکل ۱۰-۲ نمودار لنگرهای پیچشی و تابیدگی [۲] ۳۰
- شکل ۱۱-۲ جریان برشی ناشی از پیچش سنونانت و تابیدگی [۲] ۳۱
- شکل ۱۲-۲ تیر با تکیه‌گاه مفصل پیچشی تحت بار گسترده [۱۴] ۳۲
- شکل ۱۳-۲ تیر با تکیه‌گاه گیردار پیچشی [۱۴] ۳۳
- شکل ۱۴-۲ تیر با تکیه‌گاه گیردار پیچشی تحت بار گسترده [۱۴] ۳۶
- شکل ۱۵-۲ تبدیل لنگر پیچشی به دو زوج نیرو [۲] ۳۸
- شکل ۱۶-۲ نمونه‌ای از جداول تعیین β [۱۳] ۴۰
- شکل ۱-۳ جزئیات اتصال نبشی جان [۱۷] ۴۷
- شکل ۲-۳ جزئیات اتصال نبشی نشیمن [۱۷] ۴۹

- شکل ۳-۳ جزئیات مونتاژ مدل نبشی جان ۵۳
- شکل ۴-۳ جزئیات مونتاژ مدل نبشی نشیمن ۵۳
- شکل ۵-۳ تعریف شرایط تماس اتصال ۵۶
- شکل ۶-۳ استفاده از قید جفت کردن گره‌ها برای اعمال لنگر پیچشی متمرکز ۵۷
- شکل ۷-۳ استفاده از قید جفت کردن گره‌ها برای اعمال لنگر پیچشی گسترده ۵۸
- شکل ۸-۳ نحوی اعمال شرایط مرزی مدل ۶۰
- شکل ۹-۳ محل اعمال لنگرهای پیچشی متمرکز ۶۱
- شکل ۱۰-۳ المان‌های مکعب خطی، مکعب درجه دوم و چهاروجهی اصلاح شده ۶۳
- شکل ۱۱-۳ جهت‌های پیش فرض ماده برای المان‌های پیوسته ۶۵
- شکل ۱۲-۳ المان C3D8R ۶۶
- شکل ۱۳-۳ نمودار حساسیت تحلیل نسبت به مشبندی طولی ۶۷
- شکل ۱۴-۳ نمودار حساسیت تحلیل نسبت به مشبندی عرضی ۶۸
- شکل ۱۵-۳ مشبندی مدل ۶۹
- شکل ۱۶-۴ روندنمای کلی فصل چهارم ۷۳
- شکل ۲-۴ تعیین مسیر در تیر به منظور استخراج نتایج ۷۵
- شکل ۳-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر ۷۷
- شکل ۴-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر ۷۷
- شکل ۵-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر ۷۸
- شکل ۶-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر ۷۸
- شکل ۷-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر ۷۸

- ۷۹.....
- شکل ۸-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر ۷۹... ۷۹
- شکل ۹-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر ۸۰.....
- شکل ۱۰-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر ۸۰.....
- شکل ۱۱-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر ۸۱.....
- شکل ۱۲-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر ۸۱.....
- شکل ۱۳-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - گسترده- بررسی وسط تیر ۸۳.....
- شکل ۱۴-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر ۸۳....
- شکل ۱۵-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر ۸۴....
- شکل ۱۶-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر ۸۴....
- شکل ۱۷-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۱ طول تیر ۸۵....
- شکل ۱۸-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - گسترده- بررسی وسط تیر ۸۵.....
- شکل ۱۹-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر ۸۶.....
- شکل ۲۰-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر ۸۶.....
- شکل ۲۱-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر ۸۷.....
- شکل ۲۲-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۱ طول تیر ۸۷.....
- شکل ۲۳-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر وسط تیر ۸۹.....

- شکل ۴-۲۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۴ طول تیر ۸۹
- شکل ۴-۲۵ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۳ طول تیر ۹۰
- شکل ۴-۲۶ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۲ طول تیر ۹۰
- شکل ۴-۲۷ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۱ طول تیر ۹۱
- شکل ۴-۲۸ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر وسط تیر ۹۱
- شکل ۴-۲۹ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۴ طول تیر ۹۲
- شکل ۴-۳۰ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۳ طول تیر ۹۲
- شکل ۴-۳۱ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۲ طول تیر ۹۳
- شکل ۴-۳۲ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۱ طول تیر ۹۳
- شکل ۴-۳۳ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - گسترده- بررسی وسط تیر ۹۵
- شکل ۴-۳۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر ۹۵
- شکل ۴-۳۵ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر ۹۶
- شکل ۴-۳۶ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر ۹۶

- تیر ۹۶.....
- شکل ۳۷-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۱ طول
- تیر ۹۷.....
- شکل ۳۸-۴ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی وسط تیر ۹۷.
- شکل ۳۹-۴ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۴ طول
- تیر ۹۸.....
- شکل ۴۰-۴ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۳ طول
- تیر ۹۸.....
- شکل ۴۱-۴ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۲ طول
- تیر ۹۹.....
- شکل ۴۲-۴ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۱ طول
- تیر ۹۹.....
- شکل ۴۳-۴ بررسی تغییرات درصد اختلاف نسبی ۱۰۰.....
- شکل ۴۴-۴ بررسی تغییرات متناوب زاویه پیچش ۱۰۱.....
- شکل ۴۵-۴ حالت‌هایی که پیچش نبشی جان از پیچش مفصل بیشتر است ۱۰۲.....
- شکل ۴۶-۴ تعریف مسیر در بال‌های تیر به منظور اندازه‌گیری جابجایی افقی ۱۰۳.....
- شکل ۴۷-۴ نمودار جابجایی افقی تیر در $z=0$ ۱۰۳.....
- شکل ۶-۵ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی ۱۱۶.....
- شکل ۷-۵ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی ۱۱۷.....
- شکل ۸-۵ مقایسه نبشی فوقانی و تحتانی و گیردار پیچشی ۱۱۸.....
- شکل ۹-۵ مقایسه نبشی فوقانی و تحتانی و گیردار پیچشی ۱۱۹.....
- شکل ۱۰-۵ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی گسترده ۱۲۰.....

شکل ۵-۱۱ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی گسترده ۱۲۱

شکل ۵-۱۲ مقایسه نبشی فوقانی و تحتانی و گیردار پیچشی گسترده ۱۲۲

شکل ۵-۱۳ مقایسه نبشی فوقانی و تحتانی و گیردار پیچشی گسترده ۱۲۳

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ ضرایب صلبیت پیچشی..... ۲۲
- جدول ۱-۳ مشخصات اتصال نبشی جان [۲]..... ۴۸
- جدول ۲-۳ مشخصات اتصال نبشی نشیمن [۲]..... ۴۹
- جدول ۳-۳ مشخصات المان مدل سازی..... ۵۰
- جدول ۴-۳ خواص فیزیکی اجزا مدل سازی..... ۵۱
- جدول ۵-۳ مقادیر لنگر پیچشی مدل‌های مختلف..... ۶۱
- جدول ۶-۳ شرایط مرزی تئوری..... ۶۷
- جدول ۱-۴ نامگذاری علامتهای اختصاری نرم‌افزار..... ۷۴
- جدول ۲-۴ نامگذاری محورهای اصلی..... ۷۴
- جدول ۳-۴ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر..... ۷۷
- جدول ۴-۴ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر..... ۷۷
- جدول ۵-۴ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر..... ۷۸
- جدول ۶-۴ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر..... ۷۸
- جدول ۷-۴ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر..... ۷۹
- جدول ۸-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر..... ۷۹
- جدول ۹-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر..... ۸۰
- جدول ۱۰-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر..... ۸۰
- جدول ۱۱-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر..... ۸۱
- جدول ۱۲-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر..... ۸۱
- جدول ۱۳-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی وسط تیر..... ۸۳

- جدول ۴-۱۴ مقایسه نبشی جان و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر ۸۳
- جدول ۴-۱۵ مقایسه نبشی جان و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر ۸۴
- جدول ۴-۱۶ مقایسه نبشی جان و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر ۸۴
- جدول ۴-۱۷ مقایسه نبشی جان و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۱ طول تیر ۸۵
- جدول ۴-۱۸ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی وسط تیر ۸۵
- جدول ۴-۱۹ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر ۸۶
- جدول ۴-۲۰ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر ۸۶
- جدول ۴-۲۱ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر ۸۷
- جدول ۴-۲۲ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۱ طول تیر ۸۷
- جدول ۴-۲۳ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر..... ۸۹
- جدول ۴-۲۴ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر ۸۹
- جدول ۴-۲۵ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر ۹۰
- جدول ۴-۲۶ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر ۹۰
- جدول ۴-۲۷ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر ۹۱
- جدول ۴-۲۸ مقایسه نبشی نشیمن و مفصل پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر ۹۱
- جدول ۴-۲۹ مقایسه نبشی نشیمن و مفصل پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر ۹۲

- جدول ۴-۳۰ مقایسه نبشی نشیمن و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر ۹۲
- جدول ۴-۳۱ مقایسه نبشی نشیمن و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر ۹۳
- جدول ۴-۳۲ مقایسه نبشی نشیمن و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر ۹۳
- جدول ۴-۳۳ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - بارگذاری گسترده - بررسی وسط تیر .. ۹۵
- جدول ۴-۳۴ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - بارگذاری گسترده - بررسی ۰/۴ طول تیر ۹۵
- جدول ۴-۳۵ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - بارگذاری گسترده - بررسی ۰/۳ طول تیر ۹۶
- جدول ۴-۳۶ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - بارگذاری گسترده - بررسی ۰/۲ طول تیر ۹۶
- جدول ۴-۳۷ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - بارگذاری گسترده - بررسی ۰/۱ طول تیر ۹۷
- جدول ۴-۳۸ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال مفصل پیچشی - بارگذاری گسترده - بررسی وسط تیر .. ۹۷
- جدول ۴-۳۹ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال مفصل پیچشی - بارگذاری گسترده - بررسی ۰/۴ طول تیر ۹۸
- جدول ۴-۴۰ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال مفصل پیچشی - بارگذاری گسترده - بررسی ۰/۳ طول تیر ۹۸
- جدول ۴-۴۱ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال مفصل پیچشی - بارگذاری گسترده - بررسی ۰/۲ طول تیر ۹۹
- جدول ۴-۴۲ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال مفصل پیچشی - بارگذاری گسترده - بررسی ۰/۱ طول تیر ۹۹
- جدول ۵-۱ مقایسه بیشترین و کمترین درصد اختلاف اتصالات تئوری و واقعی در بارگذاری متمرکز ۱۰۶

- جدول ۲-۵ مقایسه بیشترین و کمترین درصد اختلاف اتصالات تئوری و واقعی در بارگذاری گسترده..... ۱۰۷
- جدول ۳-۵ مقادیر β در محل اعمال لنگر پیچشی (تیر تحت لنگر پیچشی متمرکز - اتصال نبشی نشیمن)..... ۱۱۰
- جدول ۴-۵ مقادیر β در محل تکیه‌گاه (تیر تحت لنگر پیچشی متمرکز - اتصال نبشی نشیمن)..... ۱۱۱
- جدول ۵-۵ مقادیر β در محل $z=aL$ (تیر تحت لنگر پیچشی گسترده‌ی یکنواخت - اتصال نبشی نشیمن)..... ۱۱۲
- جدول ۶-۵ مقادیر β در محل تکیه‌گاه (تیر تحت لنگر پیچشی گسترده‌ی یکنواخت - اتصال نبشی نشیمن)..... ۱۱۳
- جدول ۷-۵ مقادیر β در محل اعمال لنگر پیچشی (تیر تحت لنگر پیچشی متمرکز - اتصال نبشی جان)..... ۱۱۴
- جدول ۸-۵ مقادیر β در محل تکیه‌گاه (تیر تحت لنگر پیچشی گسترده‌ی یکنواخت - اتصال نبشی جان)..... ۱۱۵

فصل ۱ کلیات

تیرهای I شکل فولادی به دلیل بازده مناسب خمشی حول محور قوی و مقاومت فشاری مناسب به طور گسترده به عنوان یکی از اجزاء سازنده سازه‌های ساختمانی بکار می‌روند. در برخی موارد این تیرها تحت اثر بارگذاری‌های با برون‌محوری قرار می‌گیرند به نحوی که سبب ایجاد پیچش و یا ترکیب پیچش و خمش می‌شود. مانند همه مقاطع جدار نازک باز، تیرهای I شکل نیز در برابر لنگرهای پیچشی و همچنین ترکیب لنگرهای پیچشی و خمشی ضعیف عمل می‌کنند و به طور قابل ملاحظه‌ای از ظرفیت باربری آن‌ها کاسته می‌شود. روش‌های متعددی برای طراحی تحت پیچش و ترکیب آن با خمش بیان شده ولی هیچ صحبتی راجع به صلبیت پیچشی تکیه‌گاه‌های واقعی و چگونگی تحلیل تیرهای تحت پیچش مطرح نشده است [۱].

در سازه‌های فولادی طراحی صحیح اتصالات مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کنند. به بیان بهتر هر چه اتصالات تیر به ستون دقیق‌تر طراحی شوند عملکرد سازه مطلوب‌تر خواهد بود. طراحی صحیح اتصال نیازمند درک صحیح رفتار آن است. اکثراً اتصالات از نظر خمشی به صورت گیردار یا مفصلی دسته‌بندی می‌شوند و گاهی آن‌ها حالتی بینابین دارند که نیمه‌گیردار نامیده می‌شوند. به لحاظ تئوری بسته به نوع اتصال، محدوده‌ی تحمل لنگرهای خمشی از صفر تا صد درصد در نظر گرفته می‌شوند. از نظر پیچشی اتصالات را می‌توان به دو دسته‌ی عمده‌ی مفصل پیچشی و گیردار پیچشی تقسیم‌بندی کرد. در زمینه‌ی میزان تحمل لنگرهای خمشی و تأثیر جزئیات اتصال بر روی تنش‌های برشی و تنش‌های خمشی در مقاطع اعضاء مطالعات زیادی انجام شده است، اما از نظر تحمل لنگرهای پیچشی و همچنین ترکیب لنگرهای خمشی و پیچشی و تأثیر نوع اتصال بر ظرفیت باربری آن‌ها بررسی‌های زیادی انجام نگرفته است.

همان‌گونه که ذکر گردید مسئله لنگر پیچشی در اتصالات گیردار و نیمه‌گیردار و مفصلی در ناحیه

اتصال تیر به ستون، بسیار قابل توجه است و یکی از مهم‌ترین زوایای پنهان اتصالات را شامل می‌شود که تاکنون در آیین‌نامه‌ها و ضوابط طراحی توجه درخوری بدان نگردیده است.

پیچش معمولاً به دلیل بارگذاری خارج از محور تیر در طول و در محل اتصال رخ می‌دهد. بررسی صلبیت پیچشی در مقطع اتصال تیر به ستون در اتصالات رایج گیردار، نیمه گیردار و مفصلی بدین دلیل حائز اهمیت است که برش به وجود آمده در اثر این پیچش، موجب ایجاد تنش‌های برشی و همچنین تنش‌های قائم ناشی از تابیدگی در طول تیر، با تنش‌های قائم خمشی ترکیب و عدم توجه به این عوامل باعث طراحی غیر ایمن خواهد شد.

۲-۱ مروری بر تحقیقات انجام شده

تحقیقات صورت پذیرفته در زمینه‌ی پیچش را به سه دسته می‌توان تقسیم کرد:

۱-۲-۱ تئوری پیچش

تئوری پیچش اولین بار توسط سن‌ونانت^۱ در سال ۱۸۵۳ توسعه پیدا کرد، تنش‌های ناشی از پیچش به دو مکانیسم متفاوت که بنام پیچش سن‌ونان و پیچش تابیدگی شناخته می‌شود، دسته‌بندی شد. به‌طور کلی، هنگامی که گشتاور پیچشی بر روی یک عضو اعمال می‌شود مقطع آن دچار تابیدگی می‌شود به جز مقاطع دایره‌ای (توپر و لوله) که تابیدگی قابل توجهی ندارند [۲].

۱-۲-۲ تیرهای فولادی I شکل تحت لنگر پیچشی

چندین محقق به بررسی رفتار تیرهای فولادی I شکل تحت لنگر پیچشی پرداخته‌اند. بولتون^۲ در سال ۱۹۶۲ تیرهای I شکل را تحت لنگر پیچشی آزمایش کرد و مشاهده کرد که تیرها، لنگری بیشتر از ظرفیت تئوری کامل پلاستیک مقطع را تحمل می‌کنند [۳]. فارول^۳ و گالامبوس^۴ در سال ۱۹۶۹، پنج

^۱ Saint-Venant

^۲ Boulton

^۳ Farwell

^۴ Galambos

نمونه تیر I شکل را تحت لنگر پیچشی خالص مورد آزمایش قرار دادند و مشاهده کردند برای اینکه مقطع توان بربری خود را از دست بدهد باید لنگر پیچشی بیشتری نسبت به ظرفیت پیچشی تئوری مقطع به آن اعمال نمود [۴].

پی^۱ و تراهير^۲ در سال ۱۹۹۳، مطالعاتی با استفاده از روش المان محدود بر روی رفتار تیرهای I شکل فولادی که تحت لنگر پیچشی غیریکنواخت قرار می‌گرفتند، انجام دادند. مدل‌های آن‌ها نشان داد که شکست عضو که به همراه ترک برداشتن بال‌هاست در چرخش و تابیدگی‌های بزرگ‌تر از اطلاعاتی که از مکانیسم پلاستیک به دست می‌آید اتفاق می‌افتد. بخشی از افزایش مقاومت پیچشی ناشی از اثرات کرنش سختی^۳ است اما عمدتاً به دلیل نیروهای کششی در بال‌هاست که به واسطه زاویه پیچشی بزرگ ایجاد می‌شوند. در چرخش‌های بزرگ، نیروهای کششی در بال‌ها دارای یک مؤلفه محوری در راستای طولی تیر است که در مقابل اعمال لنگر مقاومت می‌کند. این پدیده به‌عنوان اثر حلزونی^۴ و یا اثر واگنر^۵ شناخته می‌شود [۵].

پی و تراهير در سال ۱۹۹۴ یک روش برای تجزیه و تحلیل تخریب پلاستیک عضو تحت پیچش معرفی کردند. در این روش عامل بار تخریب پلاستیک به‌طور جداگانه برای هر دو حالت پیچش سن و نان و پیچش تابیدگی تعیین شد. در واقع فاکتور بار تخریب پلاستیک از جمع فاکتور پیچش سن و نان و پیچش تابیدگی تقریب زده شد [۶].

معادله مورد استفاده برای تعیین فاکتور واقعی بار تخریب پلاستیک، تقریبی بوده و اندرکنش بین پیچش خالص و تابیدگی را در نظر نمی‌گیرد. هر چند پی و تراهير ادعا می‌کنند که هرگونه خطای ناشی

^۱ Pi

^۲ Trahair

^۳ Strain hardening

^۴ Helix

^۵ Wagner

از نادیده گرفتن این اثر متقابل در مقابل نادیده گرفتن محافظه کارانه‌ی اثرات کرنش سختی و تنش واگنر جبران می‌شود. آن‌ها ادعا می‌کنند که مقایسه با نتایج تجربی موجود نشان می‌دهد که این روش به‌طور محافظه کارانه‌ای مقاومت پیچشی اعضای I شکل را پیش‌بینی می‌کند.

۱-۲-۳ روش‌های طراحی الاستیک تیرهای فولادی تحت ترکیب لنگر خمشی و پیچشی

شاید رایج‌ترین روش برای بررسی ترکیب خمش و پیچش استفاده از اصل جمع آثار قواست. شرکت فولاد بیتلهم^۱ در سال ۱۹۶۳ راهنمای طراحی تیرهای تحت اثر متقابل خمش و پیچش را منتشر کرد. در این روش تنش پیچشی، تنش برشی و تنش خمشی صفحه‌ای به‌صورت مستقل محاسبه می‌شوند و سپس می‌توانند برای تعیین تنش قائم و برشی در هر نقطه باهم ترکیب شوند [۷]. هینز^۲ و سیبورگ^۳ در سال ۱۹۶۳ پیشنهاد کردند که بیشترین تنش حاصل از ترکیب تنش‌ها در عضو را با تنش تسلیم ماده برابر قرار داده و طراحی را انجام دهند. آن‌ها این روش را بانام روش طراحی اولین تسلیم^۴ معرفی کردند.

در سال ۱۹۸۲ نمودارهایی مشابه این روش برای تسهیل روند طراحی به این روش توسط جانسون^۵ منتشر شد.

چو^۶ و جانسون در سال ۱۹۷۴، پایداری تیرهای مهاربندی نشده‌ی تحت ترکیب خمش و پیچش را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند در مواردی که جابجایی جانبی و چرخش مهار نشده است، در نقطه اعمال بار، تنش ناشی از تابیدگی افزایش می‌یابد تا تیر به مقاومت کمانشی خود برسد. برای این موارد آن‌ها پیشنهاد کردند تنش قائم ناشی از تابیدگی و تنش قائم خمشی حول محور ضعیف با یک ضریب

^۱ Bethlehem

^۲ Heins

^۳ Seaburg

^۴ First yield design

^۵ Johnston

^۶ Chu

تشدیدکننده و طبق اصل جمع آثار قوا باهم ترکیب شوند [۸].

لین در سال ۱۹۷۷ برای بهبود دقت توزیع تنش برشی با استفاده از زاویه پیچش روشی پیشنهاد کرد. در این روش فرض شده است توزیع تنش به صورت توابع هذلولوی گسترش می‌یابد. این توابع به جز طول و جنس تیر، به نوع و محل اعمال بار و شرایط تکیه‌گاهی بستگی دارند. مقادیر این توابع هذلولوی برای حالت‌های معمول محاسبه شده و به عنوان ضریب کاهش β به صورت جداولی تنظیم شده است. با استفاده از ضریب β می‌توان تنش قائم ناشی از تابیدگی را محاسبه نمود [۹].

راهنماهای طراحی که توسط هینز و سیبورگ (۱۹۶۳)، لین (۱۹۷۳) و جانسون (۱۹۸۲) منتشر شدند، تکیه‌گاه پیچشی را یا به صورت تکیه‌گاه مفصلی و یا تکیه‌گاه گیردار پیچشی فرض کردند، اگرچه مقاومت پیچشی اتصالات سازه‌های معمولی ممکن است بین این دو مقدار حدی قرار گیرند، بنابراین کاربردی بودن این راهنماها به وضعیت‌های خاص محدود می‌شوند. همچنین روش طراحی الاستیک اثر متقابل بین تنش‌های قائم و برشی در نظر نمی‌گیرد. این روش همچنین در محاسبه امکان کمانش جانبی در اعضای لاغر ناتوان است و از طرف دیگر این روش طراحی بسیار محافظ کارانه است چون تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین تسلیم اولین نقطه و استفاده از ظرفیت کامل پلاستیکی مقطع را در نظر نمی‌گیرد.

در ادامه تحقیقات صورت پذیرفته، در سال ۲۰۰۸ استابروکس^۱ و گروندین^۲ با مطالعه بر روی رفتار تیرهای I شکل و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی با روش کندی^۳ و درایور^۴ که در سال ۱۹۸۹، به این نتیجه رسیدند که این روش برای طراحی حد نهایی غیر محافظه کارانه است، آن‌ها روش پی و تراهیر

^۱ Bruce G. Estabrooks

^۲ Gilbert Y. Grondin

^۳ Kennedy

^۴ Driver

را جهت طراحی به روش حد نهایی مناسب اعلام کردند [۱].

الکساندر توسین^۱ و میلان پروکیک^۲ در سال ۲۰۱۵ مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی مقاطع I شکل رایج در کشور روسیه انجام دادند. آن‌ها تیرهای I شکل را تحت بار ترکیبی خمشی و پیچشی بارگذاری کردند تا مقطع ظرفیت باربری خود را از دست دهد. بررسی نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که تیر تحت خمش و پیچش ظرفیت باربری قابل توجهی در مقایسه با مرحله‌ی الاستیک دارا است. آن‌ها همچنین بیان کردند بر اساس نتایج تصاویر، تغییر شکل‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، تطابق خوبی با محاسبات داشته است. همچنین ادعا کردند که ظرفیت باربری نهایی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها ۱۲٪ بیشتر از محاسبات است و نیز تفاوت زاویه پیچش بیشتر از ۲۰٪ نمی‌باشد [۱۰].



شکل ۱-۱ آزمایش خمش و پیچش همراه با تابیدگی

اهانگ زیان وان^۳ و مهندران^۴ نیز در سال ۲۰۱۵ به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار تیرهای ناودانی شکل^۵ تحت ترکیب بار خمش و پیچش پرداختند. آن‌ها به بررسی پارامتریک محل و میزان خروج از مرکزی بار و دهانه تیر پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش خروج از مرکزیت بار، میزان باربری خمشی به‌شدت کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد قرارگیری خروج از مرکزیت در سمت راست مرکز

^۱ Alexander R. Tusnin

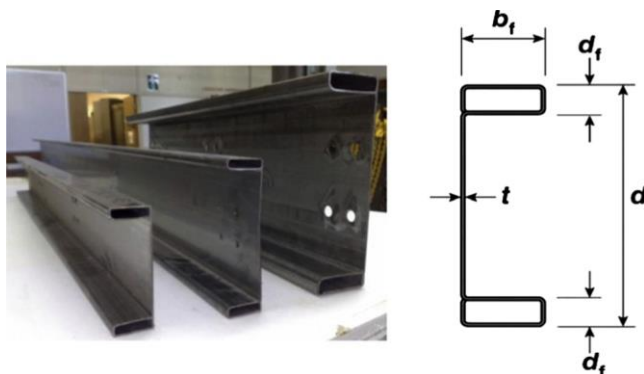
^۲ Milan Prokic

^۳ Hong-Xia Wan

^۴ Mahendran

^۵ Hollow flange channel beam

برش نسبت به قرارگیری در سمت چپ آن باعث می‌شود عملکرد باربری تیر بیشتر کاهش می‌یابد و نیز تأثیر خروج از مرکزیت با کاهش دهانه تیر افزایش می‌یابد [۱۱].



شکل ۱-۲ تیرهای فلنجی توخالی کانالی شکل

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق

در بحث پیش از این در تمام تحقیقات انجام شده و فارغ از دیدگاه‌های مختلفی که در روش‌های طراحی مانند الاستیک یا پلاستیک وجود دارد، توجه اصلی به تیر مورد بررسی بوده است. به عبارت دیگر در این تحقیقات اثر پارامترهای مختلف مانند جنس، نوع و شکل مقطع، طول دهانه، نوع و محل بارگذاری و... مورد بررسی قرار گرفته اما توجه در خوری به اتصالات صورت نپذیرفته است و تمامی اتصالات را به صورت ایده آل مفصل یا گیردار پیشی فرض کرده‌اند در حالی که روشن است در موارد عملی اتصالات واقعی ممکن است که حالتی مابین اتصالات ایده آل باشد. بنابراین در این پژوهش سعی بر آن بوده است که با تمرکز بر اتصالات واقعی، اختلاف آن‌ها را با فرضیات اتصالات تئوریک را تعیین کنیم.

۱-۴ محتوای پایان‌نامه

در فصل اول مقدمه‌ای از پیش و طراحی اعضای پیشی، مروری بر تحقیقات گذشته و ضرورت‌های بررسی بیشتر اتصالات از نظر پیشی مطرح شد.

در فصل دوم به بررسی پیشی، روابط و معادلات حاکم بر آن و همچنین اتصالات پیشی تئوری و شرایط مرزی هر کدام و تأثیر این شرایط مرزی بر معادلات پیشی پرداخته شده است.

در فصل سوم مختصری در باب آشنایی با نرم افزار و نحوی مدل سازی عددی توسط نرم افزار و راستی آزمایی با استفاده از نتایج معادلات حاکم سخن به میان آمده است.

در فصل چهارم نتایج مدل سازی در قالب نمودارها و جداول متفاوت بیان شده و تأثیر حالت های مختلف بر تنش های قائم و برشی و زاویه پیچش تیر که تحت بارگذاری های متفاوتی قرار گرفته اند، بررسی شده است.

در فصل پنجم به تحلیل نتایج و کنکاش عملکردهای متفاوت تیرها با اتصالات مختلف پرداخته و ضریب هایی برای تبدیل روابط اتصالات تئوری به اتصالات واقعی در قالب جداولی تنظیم و در انتها پیشنهادهایی جهت ادامه تحقیقات ارائه شده است.

فصل ۲ تئوری پیچش

۱-۲ مقدمه

در طراحی اعضای یک سازه در برخی موارد با عضوهایی مواجه هستیم که تحت لنگر پیچشی قرار دارند. متداولترین کاربرد اعضای تحت پیچش در محورهای انتقال است که توان را از یک محل به محل دیگری منتقل می‌کنند. به‌عنوان مثال انتقال توان از یک توربین به مولد الکتریکی و یا از یک موتور به ماشین ابزار توسط محورهای انتقال تحت لنگر پیچشی انجام می‌گیرد. در این نوع سازه‌ها معمولاً اعضای تحت لنگر پیچشی دارای مقاطعی مدور به‌صورت توپر و یا توخالی طراحی می‌شوند.

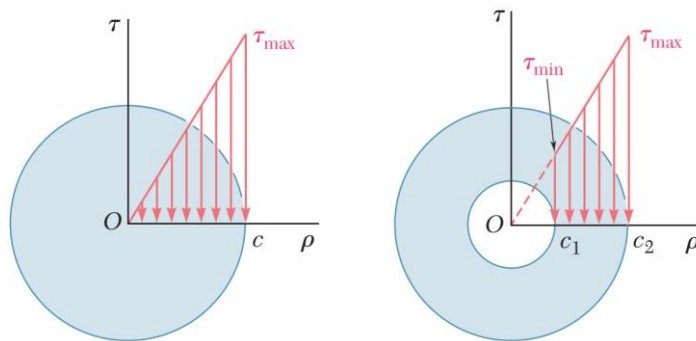
در مورد سازه‌هایی نظیر ساختمان‌های معمولی و یا پل‌ها، لنگرهای پیچشی معمولاً به‌صورت مستقیم به اعضای سازه وارد نمی‌شود و معمولاً در اثر بارهای خروج از مرکز، در اعضای این‌گونه سازه‌ها پدید می‌آیند. هرچند لنگر پیچشی در بسیاری از موارد تنها بار وارده بر اعضای ساختمان‌های معمولی و پل‌ها نیستند، ولی چنانچه تنش‌های حاصل از آن به‌طور مناسب شناسایی و کنترل نشوند ممکن است باعث بروز خرابی در این‌گونه سازه‌ها شوند.

۲-۲ پیچش

۱-۲-۲ پیچش مقاطع مدور

اگرچه تجزیه و تحلیل پیچش در مقاطع غیرمدور به‌آسانی امکان‌پذیر نیست لیکن بررسی پیچش مقاطع مدور (توپر و یا توخالی) به سهولت میسر است. هنگامی که عضوی با مقطع مدور تحت لنگر پیچشی قرار می‌گیرد نتایج تجربی و نظری نشان داده است که مقاطع عمود بر محور عضو پس از اعمال پیچش صفحه و عمود باقی می‌مانند. به‌عبارت‌دیگر در اثر لنگر پیچشی تمام مقاطع مسطح و اعوجاج نیافته باقی خواهند

ماند و هرچند هر یک از مقاطع عضو با اندازه‌های متفاوت می‌چرخند ولی هر مقطع به صورت صفحه صلب دوران می‌کند. بنابراین در مقاطع مدور که تحت لنگر پیچشی قرار می‌گیرند تنها تنش‌های برشی توسعه می‌یابند. از طرف دیگر در اعضای با مقاطع مدور، کرنش برشی از محور مرکزی میله به صورت خطی تغییر می‌کند. چنانچه رابطه بین کرنش برشی و تنش برشی در محدوده الاستیک خطی قرار داشته باشد، توزیع تنش برشی حاصل از لنگر پیچشی در مقطع دایره‌ای شکل مطابق شکل ۱-۲ خواهد بود.



شکل ۱-۲ توزیع تنش برشی ناشی از لنگر پیچشی [۲]

از روابط تعادل و موارد فوق به آسانی می‌توان تنش برشی در نقطه‌ای مانند A به فاصله r از مرکز میله را توسط رابطه زیر به دست آورد:

$$f_v = \frac{Tr}{J} \quad \text{رابطه ۱-۲}$$

در رابطه فوق :

f_v : تنش برشی در نقطه‌ای به فاصله r از مرکز مقطع مدور،

T : لنگر پیچشی اعمالی به مقطع،

J : ممان اینرسی مقطع مدور می‌باشد.

ممان اینرسی قطبی J برای مقطع توپر مدور با شعاع c برابر $J = \frac{\pi c^4}{2}$ و برای مقطع توخالی با شعاع‌های

$$c_1, c_2 \text{ برابر } J = \frac{\pi(c_2^4 - c_1^4)}{2} \text{ می‌باشد.}$$

φ زاویه‌ی پیچش نسبی دو مقطع به فاصله‌ی L از یکدیگر در یک مقطع مدور تحت لنگر پیچشی

برحسب رادیان را می‌توان از رابطه زیر تعیین کرد:

$$\varphi = \frac{TL}{GJ}$$

رابطه ۲-۲

در رابطه ۲-۲، G مدول الاستیسیته برشی است.

۲-۲-۲ پیچش مقاطع جدار نازک بسته

تحلیل پیچش در اعضای با مقطع غیرمدور نیاز به روش‌های ریاضی پیشرفته دارد. لیکن توزیع تنش و تغییر

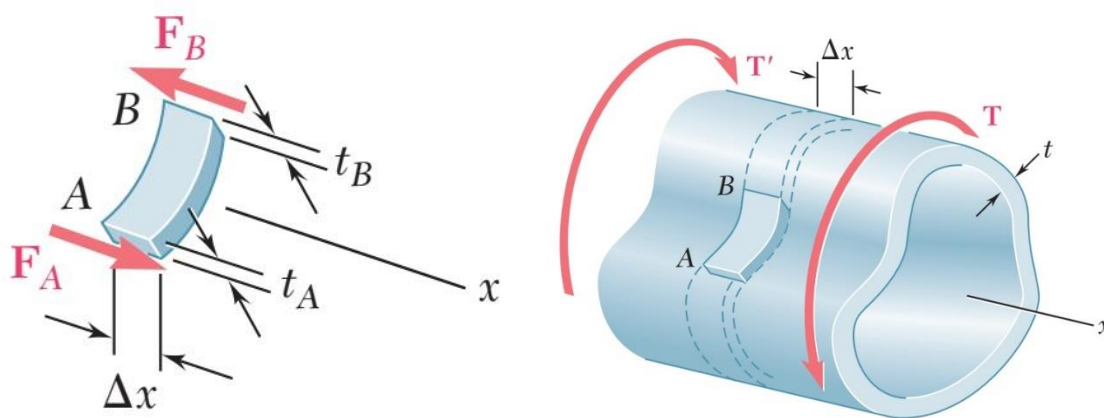
زاویه در اعضای با مقطع غیرمدور بسته با جداره‌ی نازک را می‌توان به‌آسانی و با تقریب خوبی به دست آورد.

در شکل ۲-۲ یک عضو توخالی با مقطع جدار نازک بسته که تحت لنگر پیچشی T قرار دارد نشان داده شده

است. ضخامت جداره t می‌تواند در مقطع عرضی تغییر کند و اندازه t در مقایسه با سایر ابعاد عضو کوچک

است. چنانچه قسمت $ABCD$ از جداره را که محدود به دو صفحه‌ی عرضی به فاصله Δx و دو صفحه‌ی

طولی عمود بر جداره است از عضو موردنظر جدا کنیم نیروهای اعمالی بر این قسمت مطابق شکل ۲-۲



شکل ۲-۲ تنش برشی در مقاطع جدار نازک بسته [۲]

خواهد بود.

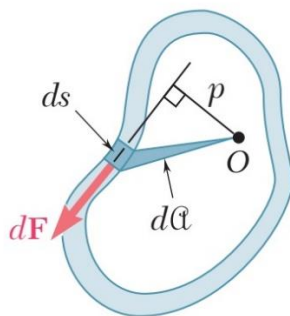
اگر تنش برشی در سطح AB,CD را به ترتیب τ_1, τ_2 فرض کنیم از تعادل در جهت محور X خواهیم داشت،

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_1 = F_2 \Rightarrow \tau_1 t_1 \Delta x = \tau_2 t_2 \Delta x \quad \text{رابطه ۳-۲}$$

چون دو مقطع AB و CD دلخواه است بنابراین با توجه به رابطه ۳-۲ می توان همواره حاصل ضرب تنش برشی در ضخامت در مقاطع طولی را که با q ، جریان برش نامیده می شود در نظر گرفت بنابراین:

$$q = \tau_1 t_1 = \tau_2 t_2 = \tau t = cte \quad \text{رابطه ۴-۲}$$

از طرفی تنش برشی در یک نقطه و مقاطع عمود بر هم با یکدیگر برابر و یا به هم نزدیک و یا از هم دور می شوند. بنابراین حاصل ضرب تنش در ضخامت (جریان برش) در مقاطع عرضی نیز ثابت است. برای به دست آوردن رابطه ای بین لنگر پیچشی و تنش برشی حاصل از آن در مقاطع جدار نازک بسته می توان از شکل ۳-۲ کمک گرفت.



شکل ۳-۲ محاسبه نیروی برشی در مقاطع جدار نازک [۱]

اگر تنش برشی در فاصله ی ds از جداره و با ضخامت t برابر τ فرض شود آنگاه نیروی برشی در مقطع برابر خواهد بود با:

$$dF = \tau t ds \quad \text{رابطه ۵-۲}$$

مجموع لنگر نیروهای dF حول هر نقطه‌ی دلخواه مانند O در شکل ۳-۲ برابر لنگر پیچشی اعمالی به عضو T است، بنابراین می‌توان نوشت:

$$T = \oint r dF = \oint r \tau t ds \quad \text{رابطه ۶-۲}$$

چون $q = \tau t$ مقداری ثابت است می‌تواند از انتگرال خارج و $r ds$ نیز دو برابر مساحت مثلث رنگی در شکل ۳-۲ می‌باشد. اگر مساحت مثلث رنگی dA فرض شود آنگاه رابطه‌ی رابطه ۶-۲ به صورت زیر درخواهد آمد:

$$T = q \oint r ds = q \oint 2 dA = 2qA \quad \text{رابطه ۷-۲}$$

از طرفی $q = \tau$ است و در نتیجه برشی T در مقاطع جدار نازک بسته از رابطه رابطه ۸-۲ تعیین خواهد شد.

$$\tau = \frac{T}{2At} \quad \text{رابطه ۸-۲}$$

در رابطه‌ی فوق t ضخامت جداره‌ی موردنظر که در آن تنش برشی محاسبه می‌شود و A مساحت کل مقطع و محدود به خط مرکزی جداره نازک است. توجه داشته باشید که چون ضخامت جداره خیلی کوچک است تنش برشی در محدوده ضخامت ثابت در نظر گرفته شده است.

با استفاده از اصل بقای انرژی می‌توان نشان داد که ϕ زاویه پیچش نسبی یک عضو جدار نازک بسته به طول L و با مدول الاستیسیته برشی G از رابطه رابطه ۹-۲ به دست می‌آید،

$$\varphi = \frac{TL}{4A^2G} \oint \frac{ds}{t}$$

رابطه ۹-۲

در رابطه‌ی فوق انتگرالی روی خط مرکزی جداره بسته محاسبه می‌شود.

۳-۲ پیچش آزاد مقاطع جدار نازک بسته چند سلول

برای محاسبه تنش‌های برشی در مقاطع جداره نازک بسته چند سلولی، این مقاطع بایستی علاوه بر

ارضای تعادل نیروها زاویه پیچش واحد طول $\theta = \frac{d\varphi}{dx}$ برای هر یک از سلول‌ها مساوی باشد.

برای محاسبه‌ی زاویه پیچش هر قسمت می‌توان از رابطه رابطه ۹-۲ و با جایگزینی $T = 2qA$ استفاده

کرد. در این صورت θ زاویه پیچش واحد طول برای سلول i ام توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta = \frac{\varphi}{L} = \frac{\int \frac{qds}{t}}{2GA}$$

رابطه ۱۰-۲

۴-۲ پیچش مقاطع غیرمدور بسته

هرگاه یک عضو با مقطع غیرمدور تحت تأثیر لنگر پیچشی قرار گیرد، صفحات عمود بر محور عضو پس

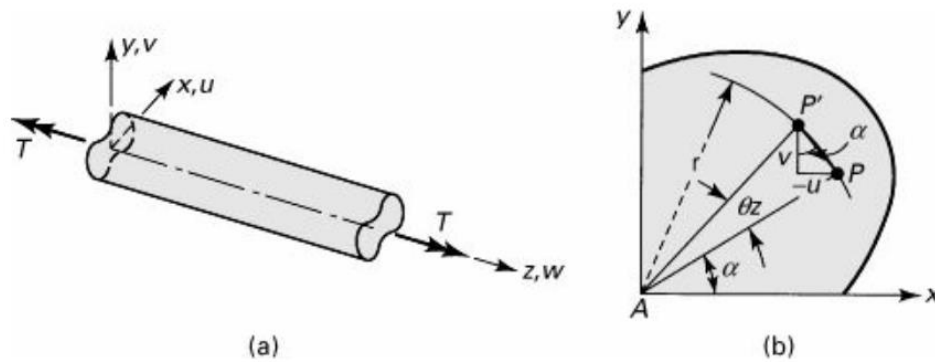
از اعمال پیچش مسطح باقی نمی‌مانند و دچار اعوجاج می‌شوند. برای این‌گونه اعضاء تعیین توزیع کرنش

برشی و در نتیجه تنش برشی به‌آسانی امکان‌پذیر نیست. در این بخش به‌اختصار پیچش اعضای منشوری با

مقطع غیر دایره‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. پیچش آزاد اعضای با مقطع غیرمدور اولین بار توسط سنت

ونانت تحلیل شد. در شکل ۴-۲ یک عضو منشوری که دارای مقطع غیرمدور است و در راستای z به آن

لنگر پیچشی T اعمال می‌شود نشان داده شده است.



شکل ۴-۲ محاسبه پیچش مقاطع غیرمدور [۱۲]

پس از اعمال لنگر پیچشی، نقطه P به P' منتقل شده و سطح مقطع به اندازه‌ی زاویه φ_1 دوران می‌نماید. اگر عضو دارای مقطع یکنواخت و تغییرات φ_1 نیز خطی در نظر گرفته شود در این صورت φ زاویه پیچش بر واحد طول عضو برابر $\varphi_1 = z\varphi$ خواهد بود. بر اساس حل سنت ونانت میدان u, v در شکل ۴-۲ به شرح زیر تعیین می‌شود:

$$u = -\varphi zy \quad v = \varphi zx \quad \text{رابطه ۱۱-۲}$$

میدان جابجایی w در جهت z را می‌توان بر اساس زاویه پیچش بر واحد طول φ و تابع تابیدگی (اعوجاج) $\bar{w} = \bar{w}(w, y)$ به صورت زیر تعریف کرد:

$$w = \varphi \bar{w}(w, y) = \varphi \bar{w} \quad \text{رابطه ۱۲-۲}$$

در رابطه ۱۲-۲ با توجه به یکنواخت بودن مقطع در طول عضو تمایزی بین مقاطع مختلف در نظر گرفته نشده و میدان جابجایی w مستقل از z بیان شده است. کرنش‌های برشی γ_{yz}, γ_{xz} با توجه به روابط معمول در علم مکانیک جامدات بر حسب تابع اعوجاج \bar{w} به صورت زیر تعیین می‌شوند،

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \varphi \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - y \right) \quad \text{رابطه ۱۳-۲}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial y}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \varphi \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - x \right) \quad \text{رابطه ۱۴-۲}$$

چنانچه پیچش آزاد موردنظر باشد در این صورت تنش‌های $\tau_{xy}, \sigma_z, \sigma_y, \sigma_x$ برابر صفر بوده و تنش‌های برشی τ_{yz}, τ_{xz} توسط روابط رابطه ۱۳-۲ و رابطه ۱۴-۲ محاسبه می‌شوند،

$$\tau_{xz} = G\varphi \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - y \right) \quad \text{رابطه ۱۵-۲}$$

$$\tau_{yz} = G\varphi \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - x \right) \quad \text{رابطه ۱۶-۲}$$

یکی از معادلات تعادل برای یک جز کوچک که تحت تنش‌های قائم و برشی قرار دارد به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad \text{رابطه ۱۷-۲}$$

با جایگزینی رابطه ۱۵-۲ در رابطه ۱۷-۲ معادله لاپلاس رابطه ۱۸-۲ حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} = 0 \quad \text{رابطه ۱۸-۲}$$

شایان ذکر است سایر معادلات تعادل خودبه‌خود ارضا می‌شوند. برای تعیین معادلات همساز می‌توان از معادلات رابطه ۱۶-۲ به ترتیب نسبت به x, y مشتق گرفته و حاصل را از همدیگر کم کرد. در این صورت:

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial x} = -2G\varphi \quad \text{رابطه ۱۹-۲}$$

تابع تنش $\Psi = \Psi(x, y)$ را به گونه‌ای در نظر می‌گیریم که بتوان مؤلفه‌های تنش را به شرح زیر از آن استخراج نمود:

$$\tau_{xz} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad \tau_{yz} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad \text{رابطه ۲-۲۰}$$

با جایگزینی روابط رابطه ۲-۲۰ در معادله همسازي رابطه ۲-۱۹ معادله پواسون رابطه ۲-۲۱ به شرح زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -2G\phi \quad \text{رابطه ۲-۲۱}$$

معادله‌ی رابطه ۲-۲۱ شباهت زیادی به معادله یک غشاء بادکرده دارد که به کمک آن می‌توان توزیع تنش برش در یک مقطع غیرمدور را با توجه به روش تشابه‌غشایی که به روش تشابه پیرانتل نیز موسوم است، تعیین کرد. به تابع Ψ تابع تنش پیرانتل نیز گفته می‌شود.

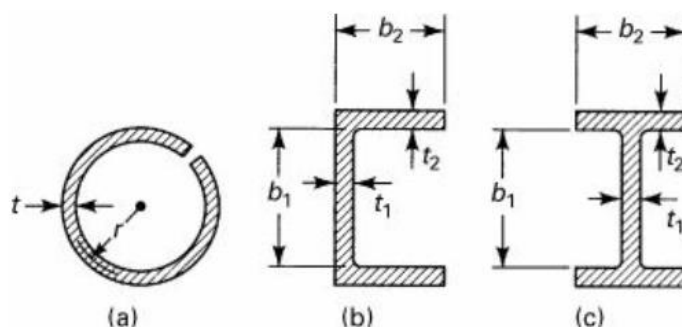
در علم مکانیک جامدات یا اعمال شرایط مرزی نشان می‌دهند که تابع Ψ بایستی روی محیط مقطع ثابت باشد $\Psi = C$ و لنگر پیچشی T نیز توسط رابطه زیر به تابع Ψ مربوط می‌شود:

$$T = 2 \int \Psi dA \quad \text{رابطه ۲-۲۲}$$

به کمک روابط رابطه ۲-۲۰ و رابطه ۲-۲۲ و حل معادله پواسون رابطه ۲-۲۱ می‌توان پیچش در مقاطع غیرمدور را تحلیل کرد.

۵-۲ پیچش آزاد اعضای جدار نازک باز^۱

عمده‌ی نیمرخ‌هایی که در سازه‌های فولادی به کار می‌روند دارای مقاطع جدار نازک باز هستند که اغلب از مربع مستطیل‌هایی با نسبت زیاد طول به ضخامت تشکیل می‌شوند. نیمرخ‌های I، ناودانی، سپری و نبشی را که در شکل ۵-۲ دیده می‌شود، می‌توان در زمره مقاطع جدار نازک باز محسوب کرد.



شکل ۵-۲ مقاطع جدار نازک باز [۱۲]

چنانچه عضوی با مقطع جدار نازک باز تحت لنگر پیچشی خالص قرار گیرد و هیچ قیدی در عضو مانع تابیدگی یا اعوجاج مقاطع آن نگردد (پیچش آزاد) در هر نقطه از مقطع عضو فقط تنش‌های برشی توسعه می‌یابند. تنش‌های برشی حاصل از پیچش آزاد را تنش‌های برشی سنت و نانت نیز می‌گویند. تعیین تنش‌های برش در این حالت در صورتی که تنش‌ها در محدوده الاستیک قرار داشته باشد و زاویه پیچش نیز کوچک باشد به آسانی امکان‌پذیر است.

J صلبیت معادل پیچشی مقاطع جدار نازک باز تحت پیچش آزاد را می‌توان با تقریب خوبی مجموع صلبیت پیچشی هر یک از مستطیل‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن در نظر گرفت. بنابراین:

^۱ Free torsion of open sections

$$J = \sum_{i=1}^N \beta_i b_i t_i^3$$

چون معمولاً نسبت $\frac{b_i}{t_i} > 10$ است ضرایب β_i از جدول ۵ - ۱ را می‌توان برابر $\frac{1}{3}$ در نظر گرفت.

جدول ۱-۲ ضرایب صلبیت پیچشی

∞	10	6	3	2	1.5	1	$\frac{a}{b}$
0.333	0.312	0.229	0.267	0.246	0.231	0.208	α
0.333	0.312	0.299	0.263	0.229	0.196	0.141	β

به‌عنوان مثال برای یک مقطع I شکل با عرض بال b_f ، ارتفاع جان h و ضخامت جان t_w صلبیت پیچشی

J برابر است با:

$$J = \frac{1}{3} (2b_f t_f^3 + h t_w^3) \quad \text{رابطه ۲-۲۴}$$

صلبیت پیچشی J در جدول پروفیل‌های ساختمان‌های فولادی برای اغلب نیمرخ‌های نورد شده موجود

است. حداکثر تنش برشی f_{vmax} در وسط ضلع بزرگتر بال‌ها و یا جان رخ می‌دهد و مقدار آن برابر است با:

$$f_{vmax} = \frac{Tt}{\frac{1}{3} (2b_f t_f^3 + h t_w^3)} \quad \text{رابطه ۲-۲۵}$$

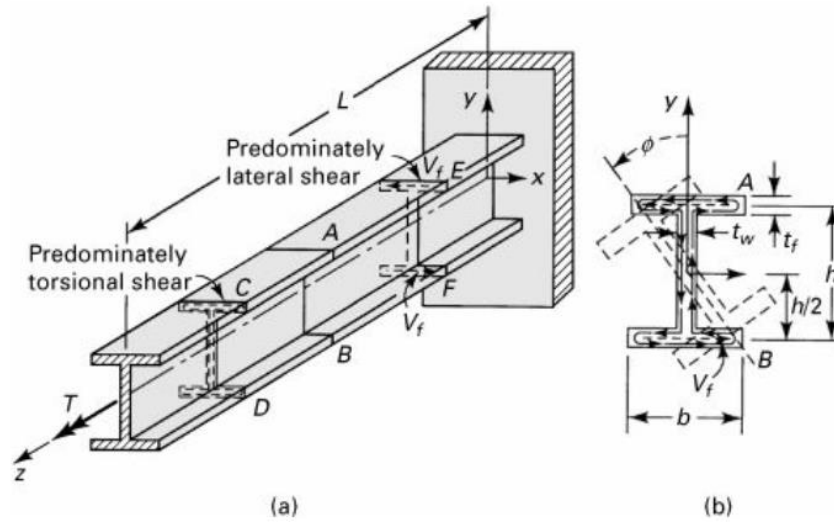
t در رابطه ۲-۲۵ ضخامت بال و یا جان برحسب مورد است.

۶-۲ پیچش مقید اعضای جدار نازک باز

در اغلب سازه‌های فولادی اعضایی که تحت لنگر پیچشی واقع می‌شوند در مقابل پدیده‌ی تابیدگی یا اعوجاج آزاد نیستند. به عبارت دیگر پیچش مقید اعضای جدار نازک باز از مباحث اساسی مطرح در طراحی سازه‌های فولادی است. همان‌گونه که در بخش قبلی بیان شد تجزیه و تحلیل پیچش آزاد اعضای جدار نازک باز نظیر مقاطع I، ناودانی، سپری و نبشی به سادگی و با استفاده از تجزیه مقطع به چندین مستطیل و با توجه به توزیع گشتاور پیچشی کل بین این مقاطع مختلف و ارضا، شرط همسازی امکان‌پذیر است. در این بخش پیچش اعضایی را بررسی می‌کنیم که شرایط فیزیکی و مرزی آن‌ها به گونه‌ای است که شرایط مطلوب برای حرکت آزادانه در راستای محور عضو را تأمین نمی‌کند. این‌گونه اعضاء تحت پیچش مقید شده هستند و برای تحلیل پیچش در آن‌ها نیاز به توسعه روابط جدیدی خواهد بود.

قید در مقابل تابع تابیدگی w باعث ایجاد تنش‌های عمودی در راستای طولی عضو می‌شود و این تنش‌ها تابع مختصات نقطه مورد مطالعه است. با مقید نمودن عضو در مقابل تابیدگی نه تنها تابع تابیدگی w بر حسب z تغییر می‌کند، بلکه زاویه پیچش بر واحد طول ϕ نیز تابعی از z خواهد بود. اثر قید تابیدگی در اعضایی با مقاطع توپر نظیر بیضی یا مستطیل ناچیز بوده و روابط مربوط به پیچش آزاد با تقریب خوبی برای آن‌ها قابل استفاده است.

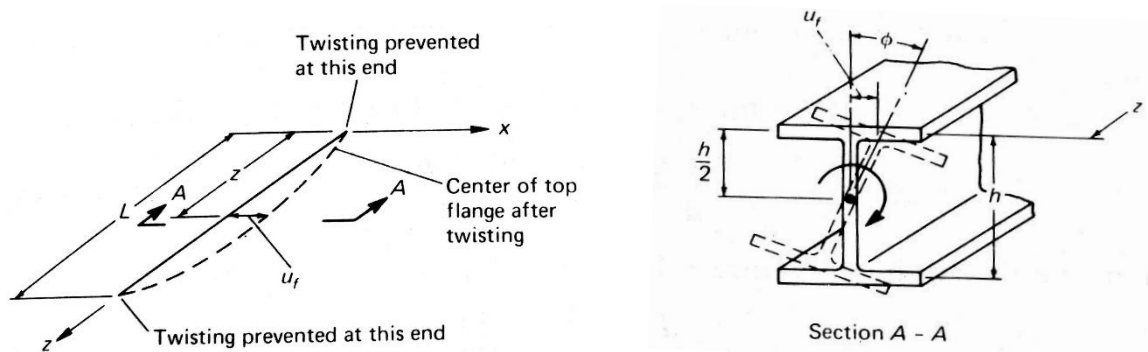
اثر قیود محوری در پیچش مقاطع جدار نازک باز مثل نیمرخ‌های ساختمان‌های فولادی فراوان بوده و لازم است به نحو مناسبی در محاسبات منظور گردد. به عبارت دیگر هرگاه یک عضو مقید که مقطع آن از نیمرخ‌های معمول فولادی است تحت یک بار خارج از مرکز که تولید لنگر پیچشی می‌کند قرار گیرد ممکن است مقدار تنش‌های عمودی که در آن ایجاد می‌شود از مرتبه‌ی تنش‌های عمودی ناشی از لنگرهای خمشی باشد.



شکل ۶-۲ تیر فولادی تحت لنگر پیچشی [۱۲]

شکل ۶-۲ یک عضو با مقطع I را که تحت لنگر پیچشی T در انتهای آزاد است را نشان می‌دهد. این عضو در مقابل جابجایی در راستای z و در تکیه‌گاه کاملاً مفید شده به گونه‌ای که سطح مقطع آن در انتها پس از اعمال لنگر پیچشی T به شکل اولیه خود صفحه باقی می‌ماند.

شکل ۷-۲ تغییر شکل بال‌ها را پس از اعمال لنگر پیچش T نشان می‌دهد که هر دو بال فوقانی و تحتانی مقطع به شکل خمیده درمی‌آیند. تغییر شکل بال‌ها نشان‌دهنده توسعه‌ی نیروی برشی و لنگر خمشی در آن‌ها می‌باشد. مقطع دوران یافته‌ای از تیر در فاصله z از تکیه‌گاه قرار گرفته که به صورت صلب



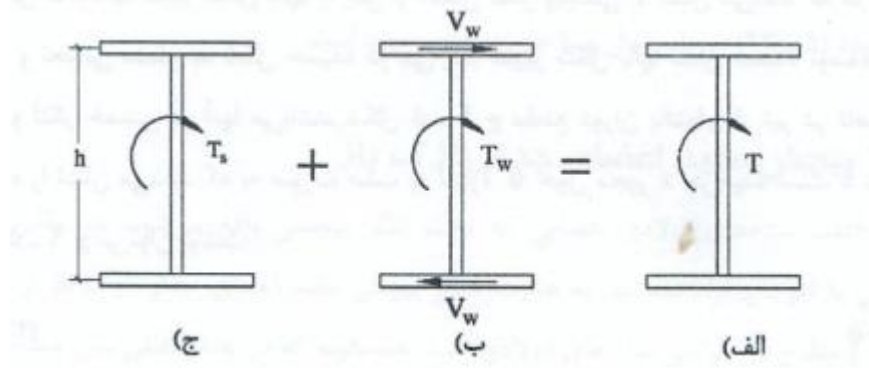
شکل ۷-۲ تغییر شکل بال تحت لنگر پیچشی [۲]

به اندازه‌ی φ حول محور Z چرخیده است.

با توجه به شکل ۷-۲ می‌توان نوشت:

$$u = \frac{h}{2}\varphi \quad \text{رابطه ۲-۲۶}$$

بنابراین با توجه به تغییر شکل خمشی بال‌ها درصدی از لنگر پیچشی صرف تابیدگی (اعوجاج) مقطع و بقیه صرف چرخش خالص مقطع می‌گردد. به عبارتی می‌توان لنگر پیچشی T را به دو قسمت T_s ، T_w که مؤلفه T_w توسط خمش بال‌ها و مؤلفه T_s توسط پیچش بال‌ها و جان تیر تحمل می‌گردد تجزیه نمود، شکل ۸-۲.



شکل ۸-۲ پیچش سن ونانت و پیچش تابیدگی [۱۳]

$$T = T_w + T_s \quad \text{رابطه ۲-۲۷}$$

لنگر اعوجاجی T_w می‌توان مطابق شکل ۸-۲ به صورت زیر نوشت:

$$T_w = V_w h \quad \text{رابطه ۲-۲۸}$$

در رابطه ۲-۲۸، h فاصله مرکز تا مرکز بال‌ها و V_w نیروی برشی توسعه‌یافته در بال مقطع I شکل است.

رابطه‌ی بین نیروی برشی V_w و تغییر مکان جانبی u توسط رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

رابطه ۲-۲۹

$$T_w = -EI_f \frac{d^3 \varphi}{dz^3}$$

در رابطه فوق I_f ممان اینرسی بال حول محور y است. لنگر پیچشی T_s زاویه پیچش φ را ایجاد می‌کند که رابطه‌ی زیر بین آن‌ها برقرار است:

رابطه ۲-۳۰

$$T_s = GJ \frac{d\varphi}{dz}$$

که در آن GJ صلبیت پیچشی معادل بوده و J برای مقطع I شکل توسط رابطه ۲-۲۴ تعیین می‌شود. بنابراین رابطه ۲-۲۷ را می‌توان به کمک روابط رابطه ۲-۲۸ الی رابطه ۲-۳۰ به صورت زیر بازنویسی کرد:

رابطه ۲-۳۱

$$T = GJ \frac{d\varphi}{dz} - EI_f \frac{h^2}{2} \frac{d^3 \varphi}{dz^3}$$

کمیت هندسی $I_f \frac{h^2}{2}$ را که دارای بعد L^2 است با C_w نمایش داده و به آن ضریب تابیدگی (اعوجاج) می‌گویند، بنابراین رابطه ۲-۳۱ حاکم بر پیچش مقطع I شکل به صورت زیر نوشته خواهد:

رابطه ۲-۳۲

$$\frac{d^3 \varphi}{dz^3} - \frac{GJ}{EC_w} \frac{d\varphi}{dz} = \frac{T(z)}{EC_w}$$

با قرار دادن $a^2 = \frac{EC_w}{GJ}$ معادله دیفرانسیل رابطه ۲-۳۲ به صورت زیر درخواهد آمد:

رابطه ۲-۳۳

$$\frac{d^3 \varphi}{dz^3} - \frac{1}{a^2} \frac{d\varphi}{dz} = \frac{T(z)}{EC_w}$$

جواب عمومی معادله دیفرانسیل فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

رابطه ۲-۳۴

$$\varphi_h = Ae^{mz}$$

با جایگزینی در رابطه ۲-۳۴ و با فرض صفر بودن طرف راست، معادله مشخصه زیر حاصل می‌شود:

$$m\left(m^2 - \frac{1}{a^2}\right) = 0 \Rightarrow m = 0, \quad m = \pm \frac{1}{a} \quad \text{رابطه ۲-۳۵}$$

با استفاده از توابع هذلولی می توان جواب عمومی معادله دیفرانسیل را به صورت زیر نوشت:

$$\varphi_h = A \sinh \frac{z}{a} + B \cosh \frac{z}{a} + c \quad \text{رابطه ۲-۳۶}$$

جواب کلی معادله دیفرانسیل رابطه ۲-۳۳ شامل جواب عمومی φ_h و جواب خصوصی φ_p چنین است:

$$\varphi = A \sinh \frac{z}{a} + B \cosh \frac{z}{a} + C + \varphi_p \quad \text{رابطه ۲-۳۷}$$

جواب خصوصی φ_p بایستی به تنهایی معادله دیفرانسیل مربوطه را ارضاء کرده و بسته به نوع بارگذاری

پیچشی عضو به صورت توابع چند جمله ای در نظر گرفته می شود. در اغلب بارگذاری های معمول، حداکثر

مرتبه تابع φ_p درجه دوم است [۱۳].

۲-۷ اعمال شرایط مرزی و تعیین ضرایب مجهول معادله

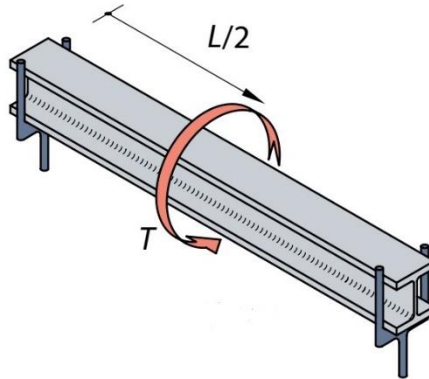
در این پژوهش به بررسی چهار حالت مختلف مرزی که شامل دو حالت مختلف تکیه گاهی و دو حالت

بارگذاری است، می پردازیم

۲-۷-۱ تیر با تکیه گاه ساده و لنگر پیچشی متمرکز

در این شرط مرزی با توجه به شکل ۲-۹ تکیه گاهها به صورت مفصل پیچشی در نظر گرفته شده و لنگر

پیچشی متمرکز T در وسط تیر اعمال شده است.



شکل ۹-۲ تیر با تکیه‌گاه مفصل پیچشی [۱۴]

با توجه به ثابت بودن لنگر پیچشی اعمالی T در فاصله $0 < z < \frac{L}{2}$ ، جواب خصوصی معادله دیفرانسیل رابطه ۳۳-۲ را دو جمله‌ای درجه اول در نظر می‌گیریم:

$$\varphi_p = A_1 + A_2 z \quad \text{رابطه ۳۸-۲}$$

با جایگزینی φ_p و با قرار دادن $T(z) = \frac{T}{2}$ در معادله دیفرانسیل رابطه ۳۸-۲ برای فاصله $0 < z < \frac{L}{2}$ خواهیم داشت:

$$-\frac{1}{a^2} A_2 = -\frac{1}{EC_w} \frac{T}{2} \Rightarrow A_2 = \frac{a^2 T}{2EC_w} = \frac{T}{2GJ} \quad \text{رابطه ۳۹-۲}$$

ثابت A_1 را می‌توان با ثابت C در رابطه ۳۷-۲ ترکیب نموده در این صورت:

$$\varphi = A \sinh \frac{z}{a} + B \cosh \frac{z}{a} + C + \frac{1}{2GJ} z \quad \text{رابطه ۴۰-۲}$$

در تکیه‌گاه پیچشی ساده زاویه دوران φ و لنگر خمشی بال M_f صفر است. لنگر خمشی بال را می‌توان بر حسب صلبیت خمشی بال EI_f و مشتق ثانی جابجایی آن u به صورت زیر بیان کرد.

$$M_f = -EI_f u'' \quad \text{رابطه ۴۱-۲}$$

با جایگزینی u از رابطه ۲-۲۶ شرایط مرزی در $z = 0, L$ به صورت زیر نوشته می شود:

$$M_f = -EI_f \frac{h}{2} \varphi'' = 0 \Rightarrow \varphi'' = 0, \varphi = 0 \quad \text{رابطه ۲-۴۲}$$

چون معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار پیچشی تیر در فاصله $0 < z < \frac{L}{2}$ تعریف شده است، استفاده از شرط $z = L$ برای آن صادق نیست. بنابراین با توجه به تقارن تیر از شرط صفر بودن شیب بال در $z = \frac{L}{2}$ استفاده کرده و به عبارتی مقدار φ' در وسط دهانه صفر است، در این صورت:

$$\varphi(0) = \varphi''(0) = \varphi'\left(\frac{L}{2}\right) = 0 \quad \text{رابطه ۲-۴۳}$$

با اعمال شرایط مرزی فوق ضرایب ثابت برابر خواهند بود با:

$$A = -\frac{Ta}{2GJ \cosh \frac{L}{2a}}, \quad B = C = 0 \quad \text{رابطه ۲-۴۴}$$

بنابراین عبارت φ به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\varphi = -\frac{Ta}{2GJ} \left(\frac{z}{a} - \frac{\sinh \frac{z}{a}}{\cosh \frac{L}{2a}} \right) \quad \text{رابطه ۲-۴۵}$$

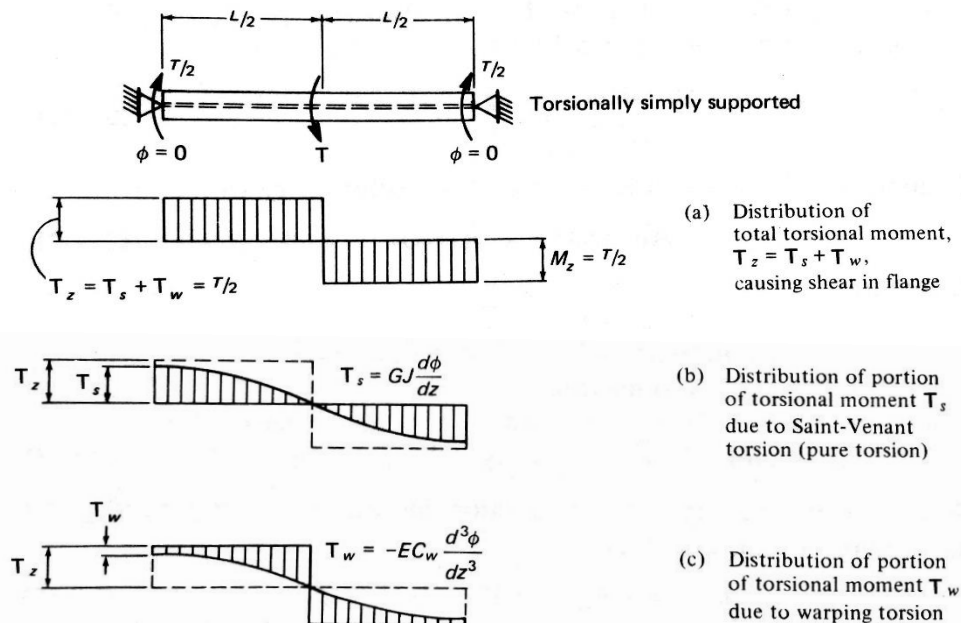
همچنین لنگر پیچشی سنت و نانت T_s از رابطه ۲-۳۰ به دست می آید و برابر است با:

$$T_s = GJ \frac{d\varphi}{dz} = \frac{T}{2} \left(1 - \frac{\cosh \frac{z}{a}}{\cosh \frac{L}{2a}} \right) \quad \text{رابطه ۲-۴۶}$$

و نیز لنگر پیچشی T_w با استفاده از روابط رابطه ۲-۲۸ و رابطه ۲-۲۹ و جایگزینی $u = \frac{h}{2} \varphi$ برابر است با:

$$T_w = -EI_f \frac{h^2}{2} \frac{d^3 \varphi}{dz^3} = \frac{T}{2} \frac{\cosh \frac{z}{a}}{\cosh \frac{L}{2a}} \quad \text{رابطه ۲-۴۷}$$

نمودار لنگرهای پیچشی و تابیدگی در شکل ۱۰-۲ رسم شده است.



شکل ۱۰-۲ نمودار لنگرهای پیچشی و تابیدگی [۲]

برای به دست آوردن نیروی برشی V_w در بال با استفاده از رابطه ۲۹-۲ چنین عمل می‌کنیم:

$$V_w = -EI_f \frac{h d^3 \varphi}{2 dz^3} = \frac{T}{2h} \frac{\cosh \frac{z}{a}}{\cosh \frac{L}{2a}} \quad \text{رابطه ۴۸-۲}$$

و سپس لنگر خمشی در بال برابر است با:

$$M_f = -EI_f \frac{d^2 u}{dz^2} = -EI_f \frac{h d^2 \varphi}{2 dz^2} = \frac{Ta}{2h} \frac{\sinh \frac{z}{a}}{\cosh \frac{L}{2a}} \quad \text{رابطه ۴۹-۲}$$

برای تعیین حداکثر تنش‌های برشی ناشی از پیچشی T_s می‌توان نوشت:

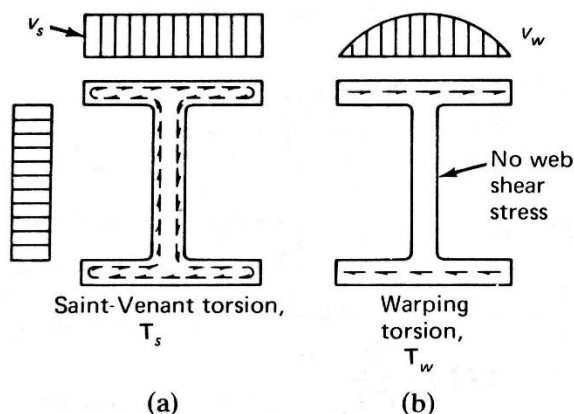
$$f_{vs} = \frac{T_s t}{J} = Gt \frac{d\varphi}{dz} = \frac{Tt}{2J} \left(1 - \frac{\cosh \frac{z}{a}}{\cosh \frac{L}{2a}} \right) \quad \text{رابطه ۵۰-۲}$$

در عبارت فوق برحسب مورد ضخامت t_f و یا ضخامت جان t_w خواهد بود، شکل ۱۱-۲ بال‌های مقطع

تحت تأثیر نیروی برشی V_w قرار دارند. نیروی برشی V_w هیچ‌گونه تنش برشی در جان ایجاد نمی‌کند و توزیع تنش برشی در بال‌ها به صورت سهمی است شکل ۱۱-۲ و حداکثر مقدار آن در وسط هر بال برابر است با:

$$f_{vw}(max) = \frac{3T}{4A_f h} \frac{\cosh \frac{Z}{a}}{\cosh \frac{L}{2a}} \quad \text{رابطه ۵۱-۲}$$

که در آن A_f مساحت بال است.



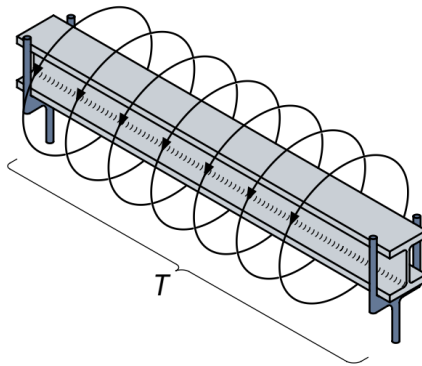
شکل ۱۱-۲ جریان برشی ناشی از پیچش سنونانت و تابیدگی [۲]

تنش‌های عمودی ناشی از لنگر خمشی M_f به صورت کششی و فشاری در بال‌ها توسعه می‌یابد و حداکثر آن در لبه‌های آزاد بال رخ داده و مقدار آن در وسط بال‌ها صفر است. حداکثر تنش‌های فشاری یا کششی f_{bw} ، از تقسیم M_f بر اساس مقطع بال $S_f = \frac{t_f b_f^2}{6}$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f_{bw} = \frac{3T a}{t_f b_f^2 h} \frac{\sinh \frac{Z}{a}}{\cosh \frac{L}{2a}} \quad \text{رابطه ۵۲-۲}$$

۲-۷-۲ تیر با تکیه‌گاه ساده و لنگر پیچشی گسترده

در این شرط مرزی با توجه به شکل ۱۲-۲ تکیه‌گاه‌ها به صورت مفصل پیچشی در نظر گرفته شده و لنگر پیچشی گسترده‌ی T در کل طول تیر اعمال شده است.



شکل ۱۲-۲ تیر با تکیه‌گاه مفصل پیچشی تحت بار گسترده [۱۴]

در این حالت نیز به‌مانند بارگذاری لنگر پیچشی متمرکز با اعمال شرایط مرزی ضرایب مجهول تعیین شده و نهایتاً به روابط زیر می‌رسیم.

$$\varphi = \left[\frac{Ta^2}{GJL} \left\{ \frac{xL - x^2}{2a^2} + \cosh\left(\frac{x}{a}\right) - \left[\tanh\left(\frac{L}{2a}\right) \cdot \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \right] \right\} - 1 \right] \quad \text{رابطه ۵۳-۲}$$

$$\varphi' = \left[\frac{Ta}{GJL} \left\{ \frac{L}{2a} - \frac{x}{a} + \sinh\left(\frac{x}{a}\right) - \left[\tanh\left(\frac{L}{2a}\right) \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \right] \right\} \right] \quad \text{رابطه ۵۴-۲}$$

$$\varphi'' = \left[\frac{T}{GJL} \left\{ -1 + \cosh\left(\frac{x}{a}\right) - \left[\tanh\left(\frac{L}{2a}\right) \cdot \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \right] \right\} \right] \quad \text{رابطه ۵۵-۲}$$

$$\varphi''' = \left[\frac{T}{GJLa} \left\{ \sinh\left(\frac{x}{a}\right) - \left[\tanh\left(\frac{L}{2a}\right) \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \right] \right\} \right] \quad \text{رابطه ۵۶-۲}$$

که با استفاده از روابط رابطه ۴۶-۲، رابطه ۴۷-۲ و رابطه ۴۹-۲ به مانند حالت قبلی لنگرهای سنت و نانت

و تابیدگی و همچنین لنگر خمشی بال به دست می‌آید.

$$T_s = \left[\frac{Ta}{L} \right] \left\{ \frac{L}{2a} - \frac{x}{a} + \sinh\left(\frac{x}{a}\right) - \left[\tanh\left(\frac{L}{2a}\right) \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \right] \right\} \quad \text{رابطه ۵۷-۲}$$

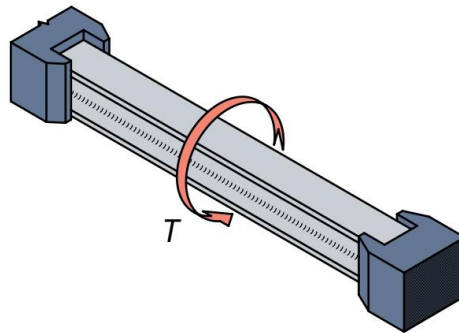
$$T_w = \left[\frac{T}{L} \right] \left\{ \sinh\left(\frac{x}{a}\right) - \left[\tanh\left(\frac{L}{2a}\right) \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \right] \right\} \quad \text{رابطه ۵۸-۲}$$

$$M_f = \left[\frac{TEI_f h}{2GJL} \right] \left\{ -1 + \cosh\left(\frac{x}{a}\right) - \left[\tanh\left(\frac{L}{2a}\right) \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \right] \right\} \quad \text{رابطه ۵۹-۲}$$

۳-۷-۲ تیر با تکیه‌گاه گیردار و لنگر پیچشی متمرکز

در این شرط مرزی با توجه به شکل ۱۳-۲ تکیه‌گاه‌ها به صورت گیردار پیچشی در نظر گرفته شده و لنگر

پیچشی متمرکز T در کل طول تیر اعمال شده است.



شکل ۱۳-۲ تیر با تکیه‌گاه گیردار پیچشی [۱۴]

در این حالت نیز به‌مانند بارگذاری لنگر پیچشی متمرکز با اعمال شرایط مرزی ضرایب مجهول تعیین

شده و نهایتاً به روابط زیر می‌رسیم [۱۵].

$$\varphi = \left[\frac{Ta}{GJ} \right] \frac{\{(K_1 - K_3 + K_4) \left[\cosh\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] - \sinh\left(\frac{x}{a}\right) + \frac{x}{a}\}}{(K_1 + 1)} \quad \text{رابطه ۶۰-۲}$$

$$\varphi' = \left[\frac{T}{GJ} \right] \frac{\{[(K_1 - K_3 + K_4) \cdot \sinh\left(\frac{x}{a}\right)] - \cosh\left(\frac{x}{a}\right) + 1\}}{(K_1 + 1)} \quad \text{رابطه ۶۱-۲}$$

$$\varphi'' = \left[\frac{T}{GJa} \right] \frac{\{[(K_1 - K_3 + K_4) \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right)] - \sinh\left(\frac{x}{a}\right)\}}{(K_1 + 1)} \quad \text{رابطه ۶۲-۲}$$

$$\varphi''' = \left[\frac{T}{GJa^2} \right] \frac{\{[(K_1 - K_3 + K_4) \cdot \sinh\left(\frac{x}{a}\right)] - \cosh\left(\frac{x}{a}\right)\}}{(K_1 + 1)} \quad \text{رابطه ۶۳-۲}$$

که با استفاده از روابط رابطه ۴۶-۲، رابطه ۴۷-۲ و رابطه ۴۹-۲ بهمانند حالت قبلی لنگرهای سنت ونانت

و تابیدگی و همچنین لنگر خمشی بال به دست می‌آید.

$$T_s = [T] \frac{\{[(K_1 - K_3 + K_4) \cdot \sinh\left(\frac{x}{a}\right)] - \cosh\left(\frac{x}{a}\right) + 1\}}{(K_1 + 1)} \quad \text{رابطه ۶۴-۲}$$

$$T_w = \left[\frac{T}{a} \right] \frac{\{[(K_1 - K_3 + K_4) \cdot \sinh\left(\frac{x}{a}\right)] - \cosh\left(\frac{x}{a}\right)\}}{(K_1 + 1)} \quad \text{رابطه ۶۵-۲}$$

$$M_f = \left[\frac{T}{h} \right] \frac{\{[(K_1 - K_3 + K_4) \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right)] - \sinh\left(\frac{x}{a}\right)\}}{(K_1 + 1)} \quad \text{رابطه ۶۶-۲}$$

در این روابط مقادیر K_1 ، K_2 ، K_3 ، K_4 بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$K_1 = \frac{\left\{ \frac{[1 - \cosh(\frac{\alpha L}{a})]}{\tanh(\frac{L}{a})} + \frac{[\cosh(\frac{\alpha L}{a}) - 1]}{\sinh(\frac{L}{a})} + \sinh(\frac{\alpha L}{a}) - \frac{\alpha L}{a} \right\}}{\left\{ \frac{[\cosh(\frac{L}{a}) + \cosh(\frac{\alpha L}{a}) \cosh(\frac{L}{a}) - \cosh(\frac{\alpha L}{a}) - 1]}{\sinh(\frac{L}{a})} + (\alpha - 1) \frac{L}{a} - \sinh(\frac{\alpha L}{a}) \right\}}$$

رابطه ۶۷-۲

$$K_2 = \frac{[\cosh(\frac{\alpha L}{a}) - 1]}{[K_1 \sinh(\frac{L}{a})]} + \frac{[\cosh(\frac{\alpha L}{a}) - \cosh(\frac{L}{a}) + (\frac{L}{a}) \sinh(\frac{L}{a})]}{\sinh(\frac{L}{a})}$$

رابطه ۶۸-۲

$$K_3 = \frac{1}{\sinh(\frac{L}{a})} + \sinh(\frac{\alpha L}{a}) - \frac{\cosh(\frac{\alpha L}{a})}{\tanh(\frac{L}{a})}$$

رابطه ۶۹-۲

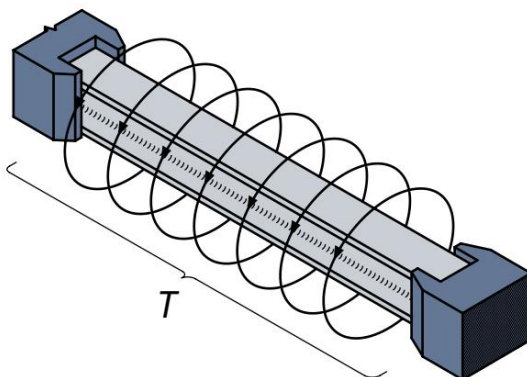
$$K_4 = \sinh(\frac{\alpha L}{a}) - \frac{\cosh(\frac{\alpha L}{a})}{\tanh(\frac{L}{a})} + \frac{1}{\tanh(\frac{L}{a})}$$

رابطه ۷۰-۲

۴-۷-۲ تیر با تکیه‌گاه گیردار و لنگر پیچشی گسترده

در این شرط مرزی با توجه به شکل ۱۴-۲ تکیه‌گاه‌ها به صورت گیردار پیچشی در نظر گرفته شده و

لنگر پیچشی گسترده T در کل طول تیر اعمال شده است.



شکل ۱۴-۲ تیر با تکیه‌گاه گیردار پیچشی تحت بار گسترده [۱۴]

در این حالت نیز به مانند بارگذاری لنگر پیچشی متمرکز با اعمال شرایط مرزی ضرایب مجهول تعیین شده و نهایتاً به روابط زیر می‌رسیم.

$$\varphi = \left[\frac{Ta}{2GJ} \right] \left\{ \frac{[1 + \cosh(\frac{L}{a})][\cosh(\frac{x}{a}) - 1]}{\sinh(\frac{L}{a})} + \left(\left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot \frac{x}{a} \right) - \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \right\} \quad \text{رابطه ۷۱-۲}$$

$$\varphi' = \left[\frac{T}{2GJ} \right] \left\{ \frac{[1 + \cosh(\frac{L}{a})][\sinh(\frac{x}{a})]}{\sinh(\frac{L}{a})} + 1 - \frac{2x}{L} - \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \right\} \quad \text{رابطه ۷۲-۲}$$

$$\varphi'' = \left[\frac{T}{2GJa} \right] \left\{ \frac{[1 + \cosh(\frac{L}{a})][\cosh(\frac{x}{a})]}{\sinh(\frac{L}{a})} - \frac{2a}{L} - \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \right\} \quad \text{رابطه ۷۳-۲}$$

$$\varphi''' = \left[\frac{T}{2GJa^2} \right] \left\{ \frac{[1 + \cosh(\frac{L}{a})][\sinh(\frac{x}{a})]}{\sinh(\frac{L}{a})} - \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \right\} \quad \text{رابطه ۷۴-۲}$$

که با استفاده از روابط رابطه ۴۶-۲، رابطه ۴۷-۲ و رابطه ۴۹-۲ به مانند حالت قبلی لنگرهای سنت و نانت

و تابیدگی و همچنین لنگر خمشی بال به دست می آید.

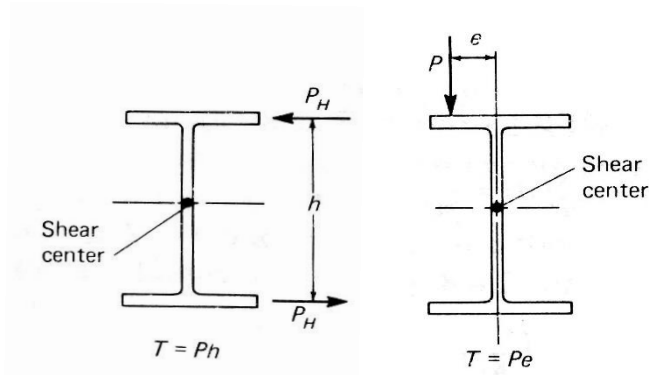
$$T_s = \left[\frac{T}{2} \right] \left\{ \frac{[1 + \cosh(\frac{L}{a})][\sinh(\frac{x}{a})]}{\sinh(\frac{L}{a})} + 1 - \frac{2x}{L} - \cosh(\frac{x}{a}) \right\} \quad \text{رابطه ۷۵-۲}$$

$$T_w = \left[\frac{T}{2a} \right] \left\{ \frac{[1 + \cosh(\frac{L}{a})][\sinh(\frac{x}{a})]}{\sinh(\frac{L}{a})} - \cosh(\frac{x}{a}) \right\} \quad \text{رابطه ۷۶-۲}$$

$$M_f = \left[\frac{T}{2h} \right] \left\{ \frac{[1 + \cosh(\frac{L}{a})][\cosh(\frac{x}{a})]}{\sinh(\frac{L}{a})} - \frac{2a}{L} - \sinh(\frac{x}{a}) \right\} \quad \text{رابطه ۷۷-۲}$$

۸-۲ راه حل ساده برای تعیین تنش‌های ناشی از پیچش

همان گونه که ملاحظه کردید پس از تعیین تابع زاویه‌ی پیچش φ می توان تنش‌های برشی و عمودی ناشی از لنگرهای پیچشی سنت و نانت و تابیدگی را به صورت دقیق در هر نقطه‌ای از تیر تحت لنگر پیچشی محاسبه کرد. هر چند محاسبه تنش‌ها توسط زاویه‌ی پیچش برای شرایط مختلف بارگذاری و مرزی ممکن است لیکن در مسائل عملی انجام آن وقت گیر و مورد علاقه‌ی طراحان نیست. در این بخش روشی مبتنی بر خمشی بال ارائه خواهد شد که علاوه بر سادگی از دقت کافی نیز برخوردار است. معمولاً در تیرهای تحت لنگر پیچشی تنش‌های عمودی ناشی از لنگر تابیدگی T_w تعیین کننده است.



شکل ۱۵-۲ تبدیل لنگر پیچشی به دو زوج نیرو [۲]

اگر لنگر پیچشی اعمالی به تیر را به زوج نیرو در باله‌ای مقطع I شکل تبدیل کنیم در این صورت هر یک از بال‌ها تحت تأثیر نیرویی قرار خواهد گرفت که خمشی حول محور قوی بال ایجاد می‌کند. شکل ۱۵-۲ مقطع تیری را نشان می‌دهد که بال‌های آن تحت تأثیر نیروی متمرکز $P_H = \frac{T}{h}$ ناشی از لنگر پیچشی متمرکز T در وسط دهانه و یا نیروهای گسترده با شدت m/h در طول دهانه ناشی از لنگر پیچش گسترده m قرار دارد. h فاصله‌ی مراکز بال‌ها است.

زاویه پیچش φ و تنش‌های عمودی حداکثر برای این دو وضعیت بارگذاری به‌طور دقیق تعیین شد. حداکثر لنگر خمشی تقریبی در بال تیر ناشی از بار متمرکز T/h شکل ۱۵-۲ برابر است با:

$$\bar{M}_f = \frac{TL}{4h} \quad \text{رابطه ۷۸-۲}$$

حداکثر تنش عمودی تقریبی ناشی از لنگر خمشی تقریبی M_f در بال چنین است:

$$\bar{f}_{bw(max)} = \frac{TL}{4hS_f} = \frac{3TL}{2b_f^2 t_f h} \quad \text{رابطه ۷۹-۲}$$

و همچنین حداکثر تنش عمودی دقیق ناشی از لنگر خمشی M_f در بال چنین است:

$$f_{bw(max)} = \frac{3Ta \frac{L}{2a}}{b_f^2 t_f h} \quad \text{رابطه ۸۰-۲}$$

با مقایسه رابطه تقریبی رابطه ۷۹-۲ با رابطه دقیق رابطه ۸۰-۲ که برای تعیین تنش حداکثر عمودی f_{bw} استخراج گردید می‌توان نوشت:

$$f_{bw(max)} = \beta_1 \bar{f}_{bw(max)} \quad \text{رابطه ۸۱-۲}$$

که β_1 برای تیر دو سر ساده تحت لنگر پیچشی متمرکز T در وسط دهانه برابر است با:

$$\beta_1 = \frac{2a}{L} \tanh \frac{L}{2a} \quad \text{رابطه ۸۲-۲}$$

در حالت لنگر پیچشی گسترده یکنواخت، پس از تبدیل آن به بار گسترده یکنواخت m/h و اعمال آن به بال تیر می‌توان حداکثر لنگر خمشی تقریبی در بال را به شرح زیر تعیین کرد:

$$\bar{M}_f = \frac{mL^2}{8h} \quad \text{رابطه ۸۳-۲}$$

برای محاسبه‌ی حداکثر تنش عمودی تقریبی در بال می‌توان نوشت:

$$\bar{f}_{bw(max)} = \frac{mL^2}{8hS_f} = \frac{3mL^2}{4hb_f^2 t_f} \quad \text{رابطه ۸۴-۲}$$

و همچنین برای محاسبه‌ی حداکثر تنش عمودی دقیق در بال می‌توان نوشت:

$$\bar{f}_{bw(max)} = \frac{6ma^2}{GJhb_f^2 t_f} \left(\tanh \frac{L}{2a} \sinh \frac{L}{2a} - \cosh \frac{L}{2a} + 1 \right) \quad \text{رابطه ۸۵-۲}$$

با مقایسه رابطه ۸۴-۲ با رابطه ۸۵-۲، رابطه‌ی بین تنش حداکثر تقریبی و دقیق به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f_{bw(max)} = \beta_2 \bar{f}_{bw(max)} \quad \text{رابطه ۸۶-۲}$$

ضریب تصحیح β_2 برای تبدیل تنش قائم حداکثر تقریبی به دقیق در حالت پیچش گسترده یکنواخت

برابر است با:

$$\beta_2 = \frac{8a^2h}{G_J L^2} \left(\tanh \frac{L}{2a} \sinh \frac{L}{2a} - \cosh \frac{L}{2a} + 1 \right) \quad \text{رابطه ۲-۸۷}$$

به طور خلاصه برای تعیین حداکثر تنش قائم ناشی از تابیدگی به روش ساده باید مراحل زیر را انجام

داد.

- ۱- لنگر پیچشی اعمالی به مقطع را به زوج نیرو در بال‌های تیر تبدیل می‌کنیم.
- ۲- لنگر خمشی تقریبی حداکثر در بال تیر را با توجه به بارگذاری و شرایط مرزی آن تعیین می‌کنیم.
- ۳- f_{bw} تنش عمودی تقریبی ناشی از لنگر خمشی تقریبی در بال را محاسبه می‌کنیم.
- ۴- تنش عمودی تقریبی f_{bw} را در ضریب تصحیح β ضرب نموده تا تنش دقیق عمودی ناشی از تابیدگی به دست آید.

λL	$a = 0.5$		$a = 0.4$		$a = 0.3$		$a = 0.2$	
	$\beta_1 = \beta_2$	β_1	β_2	β_1	β_2	β_1	β_2	
0.5	0.99	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00	0.99	
1.0	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	0.98	
2.0	0.92	0.93	0.92	0.94	0.92	0.96	0.92	
3.0	0.85	0.86	0.84	0.88	0.84	0.91	0.85	
4.0	0.76	0.78	0.75	0.81	0.75	0.86	0.77	
5.0	0.68	0.70	0.67	0.74	0.67	0.80	0.69	
6.0	0.60	0.63	0.59	0.67	0.60	0.75	0.62	
8.0	0.48	0.51	0.47	0.56	0.49	0.65	0.52	
10.0	0.39	0.42	0.39	0.47	0.41	0.56	0.44	

شکل ۲-۱۶ نمونه‌ای از جداول تعیین β [۱۳]

فصل ۳ مدل سازی اجزای محدود

۱-۳ مقدمه

به‌طور کلی برای حل مسائل فیزیکی سه روش موجود است:

۱- روش تجربی

۲- روش تحلیل دقیق

۳- روش عددی

روش تجربی یا آزمایشگاهی با توجه به اینکه مبتنی و برگرفته از خود واقعیت می‌باشد، روشی مناسب محسوب می‌گردد. روش حل دقیق همان‌طور که از نام آن پیداست به محاسبه دقیق پارامتری معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسأله می‌پردازد. روش عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل انتگرال‌هاست. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی است که با روش‌های عددی قابل حل باشد. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی، مسأله مهم این است که به معادله‌ی ساده‌ای برسیم که از نظر عددی پایدار باشد به سخن دیگر خطا در داده‌های اولیه و در حین حل، آن قدر نباشد که به نتایج نامفهومی منتهی شود. روش‌هایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد. روش اجزای محدود^۱ از زیرمجموعه‌های این روش است. روش حل عددی یکی از پرکاربردترین روش‌های مورداستفاده در حل مسائل مهندسی است.

۲-۳ روش المان محدود

^۱ Finite element method (FEM)

در سال‌های اخیر روش اجزای محدود به یک ابزار بسیار قدرتمند برای شبیه‌سازی فرایندهای مختلف تولید تبدیل گردیده است. هنگام تدوین و توسعه یک فرایند جدید، شبیه‌سازی صحیح فرایند و آزمایش پارامترهای مختلف آن در ابتدای امر بسیار مؤثر بوده و بدین ترتیب طراحی ساختار صحیح و انتخاب پارامترهای صحیح فرایند قبل از آزمایش عملی ممکن خواهد بود. در نتیجه زمان صرف شده و تعداد آزمایش و خطا کاهش یافته و منجر به کاهش هزینه‌های تولید خواهد گردید. از جمله می‌توان به نرم‌افزارهای LS-DYNA3D، ANSYS و ABAQUS اشاره کرد. به علت قابلیت‌های بالای نرم‌افزار آباکوس نسبت به سایر نرم‌افزارهای اجزای محدود، در این پژوهش از حلگر استاندارد^۱ نرم‌افزار آباکوس ۱۴-۶ برای انجام شبیه‌سازی استفاده شده است.

۳-۳ آشنایی با نرم‌افزار آباکوس

یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارها در زمینه‌ی انجام آنالیزهای اجزای محدود، نرم‌افزار آباکوس است که بر پایه روش اجزای محدود بنا نهاده شده است. این نرم‌افزار در سال ۱۹۷۸ توسط دیوید هیبت^۲، کارلسون^۳ و وسورنسون^۴ ایجاد شد؛ در ابتدا برای کاربرد در انرژی هسته‌ای و مهندسی حفاری طراحی شده بود چرا که مهندسين در این شاخه‌ها به ابزاری برای مطالعه مسائل پیچیده و غیرخطی نیاز داشتند. از آنجاکه این نرم‌افزار بر اساس مسائل غیرخطی بنا گذاری شده توانایی بالایی جهت شبیه‌سازی جهان واقعی دارد. این نرم‌افزار به کاربر توانایی مدل کردن پیچیده‌ترین پدیده‌ها را با در نظر گرفتن اثرات بسیار ظریف می‌دهد.

^۱ Standard solver

^۲ David Hibbitt

^۳ Karlsson

^۴ Sorensen

بدین ترتیب با توسعه دامنه وسیع صنایع این نرم‌افزار به‌عنوان نرم‌افزار منتخب در میان سایر نرم‌افزارها جایگاه ویژه‌ای یافت.

نظر به اینکه آباکوس یک ابزار مدل‌سازی عمومی و گسترده می‌باشد، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل‌های مکانیک جامدات و سازه (تنش - تغییر مکان) نمی‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مسائل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزاء الکتریکی، آکوستیک، مکانیک خاک و پیرو الکتریک را مورد مطالعه قرارداد.

استفاده از نرم‌افزار آباکوس با وجود اینکه مجموعه قابلیت‌های بسیار گسترده‌ای را در اختیار کاربر قرار می‌دهد، کار نسبتاً ساده‌ای می‌باشد. پیچیده‌ترین مسائل را می‌توان به‌آسانی مدل کرد. به‌عنوان مثال مسائل شامل بیش از یک جزء را می‌توان با ایجاد مدل هندسی هر جزء و سپس نسبت دادن رفتار ماده مربوطه به هر جزء و سپس مونتاژ اجزای مختلف مدل کرد. در اغلب مدل‌سازی‌ها، حتی مدل‌های با درجه غیرخطی بالا، کاربر می‌بایست تنها داده‌های مهندسی نظیر هندسه مسأله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط مرزی و بارگذاری آن مسأله را تعیین کند. در یک تحلیل غیرخطی، آباکوس به‌طور خودکار میزان نمو بار و تفرانس‌های همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آنها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می‌کند در نتیجه کاربر بندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مسأله را تعیین کند.

۳-۳-۱ اصول آباکوس

به‌طور کلی هر تحلیل اجزای محدود شامل سه مرحله است:

- پیش‌پردازش

- حل مسئله

- پس پردازش

در همه نرم افزارهای اجزای محدود این سه مرحله اصلی انجام می شود و تنها تفاوت آن ها در نحوه انجام آن است.

نرم افزار آباکوس شامل ۴ محصول است:

۱- Abaqus/Standard اصلی ترین محصول این نرم افزار می باشد که قابلیت تحلیل های خطی و غیرخطی استاتیکی، حرارتی و... است.

۲- Abaqus/explicit محصولی از این نرم افزار با قابلیت انجام تحلیل های خاص دینامیکی خطی و غیرخطی مانند تحلیل های انفجار و ضربه بوده و همچنین برای مسائل غیرخطی پیشرفته شامل تغییر شرایط تماس در مسائل شکل دهی بسیار مناسب می باشد.

۳- Abaqus/CFD یک نرم افزار تحلیل دینامیکی سیالات است.

۴- Abaqus/CAE کامل ترین محصول این نرم افزار می باشد که دارای محیطی گرافیکی است و به کاربر امکان تولید مدل ها را به صورت سریع و ساده و همچنین وارد کردن هندسه مدل از یک نرم افزار مدل ساز دیگر را می دهد.

۳-۲- معرفی حلگر استاندارد نرم افزار آباکوس

این نرم افزار یک کد حلگر عمومی و چندمنظوره است که قابلیت حل بازه وسیعی از مسائل را دارد. کد

ABAQUS/Standard با روش حل ضمنی^۱ مبتنی بر حل هم‌زمان معادلات در هر نمو حل^۲، دستگاه معادلات را تشکیل داده و سعی در همگرا نمودن پاسخ در آن نمو می‌کند. پاسخ در هر نمو بر اساس روش ماتریسی به دست می‌آید و بسته به تعداد درجات آزادی، تعداد میان‌یابی موردنیاز و رفتارهای غیرخطی، حجم محاسباتی آن تعیین می‌گردد. به‌واسطه روش ماتریسی - و درعین حال دقیق -، دقت محاسبات در این حلگر، کاملاً وابسته به منابع سخت‌افزاری، نظیر سرعت پردازنده، مقدار حافظه در دسترس، سرعت و میزان فضای خالی موجود بر روی دیسک و ... است. بنابراین در عمل بیشینه‌ی حجم محاسبات قابل انجام توسط نرم‌افزار به‌واسطه‌ی امکانات سخت‌افزاری سیستم محدود می‌شود نه زمان موردنیاز برای حل مسأله، در نتیجه‌ی این وابستگی، در صورت سنگینی محاسبات در اثر بروز سختی در روند تحلیل، محاسبات نرم‌افزاری اصطلاحاً از سخت‌افزار پیشی می‌گیرد. بدین ترتیب پتانسیل بروز خطا و پاسخ‌های غیردقیق، زیاد می‌گردد [۱۶].

۳-۴ مدل‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق

در این پژوهش نرم‌افزار ABAQUS/Standard 6.14.4 جهت انجام شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۴-۱ ایجاد مدل هندسی

در این پژوهش هدف مدل کردن و بررسی تیر تحت اثر پیچش خاص و بررسی اثر دو نوع اتصال ۱-

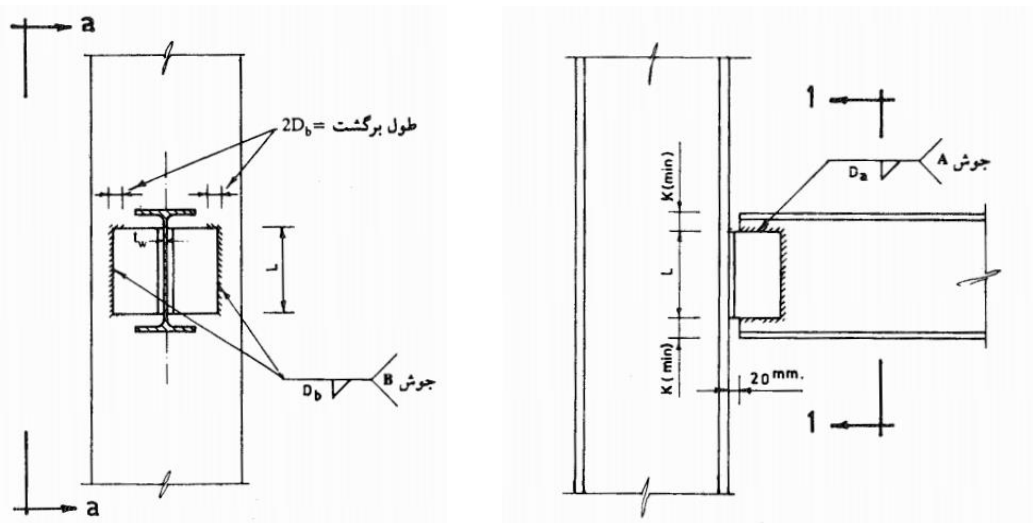
^۱ Implicit

^۲ Solution increment

نبشی جان و ۲- نبشی فوقانی تحتانی (نشیمن) بر عملکرد پیچشی تیر می‌باشد بنابراین به معرفی مختصر این دو نوع اتصال و تعیین ابعاد هندسه‌ی مدل با استفاده از جزئیات هندسی این اتصالات می‌پردازیم.

۳-۴-۱- اتصال ساده‌ی تیرهای تک با نبشی‌های جان

در شکل ۳-۱ جزئیات تیپ اتصال ساده‌ی تیر تک به ستون توسط نبشی جان نشان داده شده است. می‌دانیم با افزایش طول دهانه واکنش نظیر مقاومت خمشی کاهش و با کاهش طول دهانه، واکنش نظیر مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. لذا لازم است تعادلی بین واکنش‌های ایجاد گردد، بنابراین برحسب نیروی



شکل ۳-۱ جزئیات اتصال نبشی جان [۱۷]

برشی نظیر مقاومت خمشی دهانه‌ی ساده (با $\frac{L}{h} \geq 15$)، طول نبشی (b)، اندازه‌ی ساق جوش (D) و شماره‌ی شماره‌ی نبشی برای نیمرخ‌های IPE تعیین و در جدول ۳-۱ ارائه شده است. در طراحی این اتصال فرض شده که نبشی به حد جاری شدن در خمش خواهد رسید. نحوه توزیع عکس‌العمل تکیه‌گاهی بر روی نبشی با این فرض به‌دست آمده که طولی از انتهای تیر در انتقال بار شرکت می‌کند که جان تیر در آن طول دچار

لهیدگی نشود.

جدول ۱-۳ مشخصات اتصال نبشی جان [۱۷]

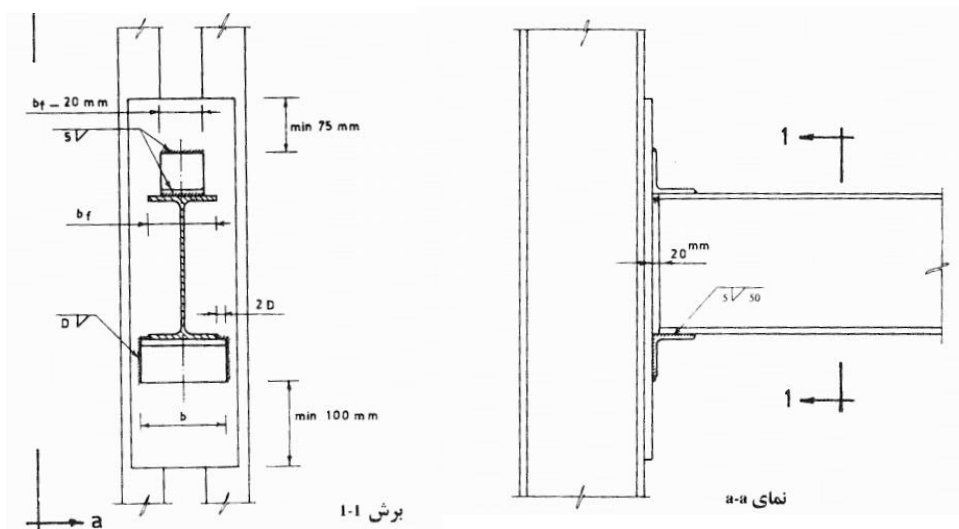
شماره‌ی نیمرخ	شماره نبشی	واکنش تکیه‌گاهی نظیر ظرفیت خمشی تیر (ton)	طول نبشی (L)(mm)	عرض پلیت (mm)	ارتفاع پلیت (mm)
IPE 100	50×50×5	1.313	75	140.0	150
IPE 120	50×50×5	1.696	85	140.0	150
IPE 140	60×60×6	2.12	105	160.0	150
IPE 160	60×60×6	2.616	120	160.0	150
IPE 180	80×80×8	3.115	130	200.0	150
IPE 200	80×80×8	3.72	150	200.0	150
IPE 220	80×80×8	4.4	160	200.0	150
IPE 240	100×100×10	5.18	170	240.0	150
IPE 270	100×100×10	6.1	180	240.0	150
IPE 300	100×100×10	7.13	190	240.0	150

۳-۴-۱-۲ اتصال ساده‌ی تیرهای تک با نبشی نشیمن تقویت نشده

در شکل ۲-۳ جزئیات تیپ اتصال ساده‌ی تیر تک به ستون توسط نبشی نشیمن نشان داده شده است.

برحسب نیروی برشی نظیر مقاومت خمشی دهانه‌ی ساده (با $\frac{L}{h} \geq 15$)، طول نبشی (b)، اندازه‌ی ساق

جوش (D) و شماره‌ی نبشی برای نیمرخ‌های IPE در جدول ۲-۳ ارائه شده است.



شکل ۲-۳ جزئیات اتصال نبشی نشیمن [۱۷]

جدول ۲-۳ مشخصات اتصال نبشی نشیمن [۱۷]

شماره نیمرخ	شماره نبشی	واکنش تکیه گاهی نظیر ظرفیت خمشی تیر (ton)	طول نبشی پایین (b) (mm)	طول نبشی بالا (mm)
IPE 100	80×80×8	1.31	100	35
IPE 120	80×80×8	1.7	100	44
IPE 140	100×100×10	2.12	100	53
IPE 160	100×100×10	2.62	100	62
IPE 180	100×100×10	3.11	120	71
IPE 200	100×100×10	3.72	140	80
IPE 220	100×100×10	4.4	160	90
IPE 240	120×120×12	5.18	160	100
IPE 270	120×120×12	6.1	180	115
IPE 300	120×120×12	7.13	220	130

در طراحی این اتصال فرض شده که نبشی به حد جاری شدن در خمش خواهد رسید. نحوه توزیع

عکس‌العمل تکیه‌گاهی بر روی نبشی با این فرض به‌دست‌آمده که طولی از انتهای تیر در انتقال بار شرکت می‌کند که جان تیر در آن طول دچار لهیدگی نشود. در این مدل‌سازی تیر و نبشی‌های اتصال از نوع شکل‌پذیر سه‌بعدی^۱ و صفحات اتصال از نوع صلب‌تحلیلی^۲ انتخاب شد (جدول ۳-۳).

جدول ۳-۳ مشخصات المان مدل‌سازی

توضیحات	المان مورد استفاده در نرم‌افزار
جان و بال تیر	3D/Deformable/Solid/Homogeneous
نبشی‌های اتصال	3D/Deformable/Solid/Homogeneous
ورق اتصال تیر به ستون	3D/Discrete rigid/Shell/Homogeneous

۳-۴-۲ تعیین خصوصیات تیر و نبشی اتصال

خصوصیات فیزیکی در واحد خواص^۳ تعریف شد. این خصوصیات شامل ضریب پواسون، مدول الاستیک

^۱ 3D Deformable

^۲ Analytical Rigid

^۳ Property

و چگالی می‌باشد. تیر و نبشی‌های استفاده شده در مدل‌سازی هموزن، همسانگرد و تمامی اجزای به صورت کاملاً الاستیک از جنس فولاد ST-37، با خواص ذکر شده در جدول ۳-۴ در نظر گرفته شد.

جدول ۳-۴ خواص فیزیکی اجزا مدل‌سازی

ضریب پواسون	تنش تسلیم (kg/cm ²)	مدول الاستیسته (kg/cm ²)	چگالی (kg/m ³)	جنس
0.3	2400	2.1×10 ⁶	7800	فولاد (ST37)

۳-۴-۳ مونتاژ

تمامی قطعات ایجاد شده در مدل هندسی در مختصات موضعی خودشان قرار می‌گیرند. برای تعیین درجات آزادی و متعاقب آن تعریف شرایط مرزی، بارگذاری و... لازم است تمامی اجزای هندسی مدل در سیستم مختصات اصلی ترسیم قرار گیرند و موقعیت و جهت‌گیری آن نسبت به دستگاه مختصات اصلی تعیین شود. بنابراین لازم است تیر، نبشی‌ها و صفحات ساخته شده پس از مشخص شدن خصوصیات مکانیکی، در واحد مونتاژ^۱ قطعه‌ها فراخوانی شوند و در محل مناسب نسبت به سایر قطعه‌ها مستقر می‌شوند تا نمونه^۲ مورد نظر ساخته شود. از نظر نحوه‌ی تولید نمونه‌ها در نرم‌افزار دو نوع نمونه ایجاد می‌شود:

۱- نمونه‌ی وابسته به عضو^۳

نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض نمونه‌ها را با این شیوه ایجاد می‌کند. نمونه‌های وابسته به‌طور خلاصه، نمایشی کامل از عضو در سیستم مختصات اصلی می‌باشد. در این حالت، مش بر روی هر عضو به صورت جداگانه - و نه بر روی نمونه- تعریف شده و نهایتاً بر روی مدل مونتاژی منتقل می‌گردد. انجام اکثر تغییرات

^۱ Assembly

^۲ Instance

^۳ Dependent

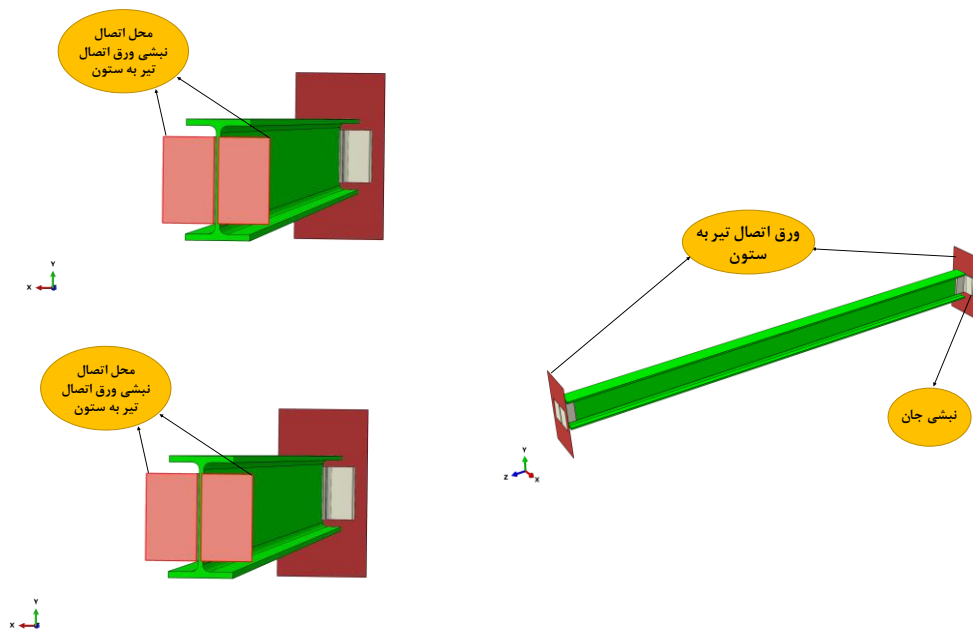
و اصلاحات بر روی نمونه‌های وابسته غیرممکن است و هرگونه تغییری تنها بر روی عضو اصلی انجام پذیر است. اما فرآیندهایی که موجب تغییر در مدل نمی‌شوند مانند تعریف مجموعه‌ها یا تعریف سطوح، بر روی این نمونه‌ها قابل انجام هستند. مش‌بندی نمونه‌های وابسته دقیقاً از مش‌بندی عضو نشأت می‌گیرد و هیچ یک از اجزای مش‌بندی، نظیر نوع المان، تراکم مش‌بندی و ... بر روی نمونه‌های وابسته قابل تغییر نیست. مهم‌ترین مزیت تولید نمونه‌ها به صورت وابسته نسبت به نوع مستقل آن این است که در این حالت، منابع سخت‌افزاری کمتر درگیر می‌شوند و در مدل‌هایی که از یک عضو بیش از یک نمونه تولید می‌گردد، با تعیین مش‌بندی در یک مرحله، می‌توان آن را بر روی تمام نمونه‌های تولیدشده از آن عضو منتقل کرد.

۲- نمونه‌ی مستقل از عضو^۱

برخلاف آنچه در نمونه‌های وابسته رخ می‌دهد، در نمونه‌های مستقل، یک کپی اولیه از عضو است و می‌توان به صورت مستقل از عضو اصلاحاتی را بر روی نمونه انجام داد. همچنین در این نمونه‌ها مش‌بندی تنها بر روی نمونه انجام می‌گیرد. مزیت این نمونه‌ها آن است می‌توان روند مش‌بندی را تنها در یک مرحله انجام داد. اما باید دقت کرد که در مرزهای المان‌های مجاور، که فصل مشترک باهم دارند ممکن است دقت مش‌بندی از آنچه در نظر است پایین‌تر بیاید.

بنا بر توضیحات ذکرشده نمونه‌های در واحد مونتاژ به صورت مستقل ساخته شد. چگونگی استقرار قطعات در مدل‌های اتصال نبشی جان بر اساس جزئیات شکل ۳-۱ تعیین می‌شود. اجزای مجموعه تیر و اتصال نبشی جان بعد از مونتاژ به صورت شکل ۳-۳ می‌باشد.

^۱ Independent

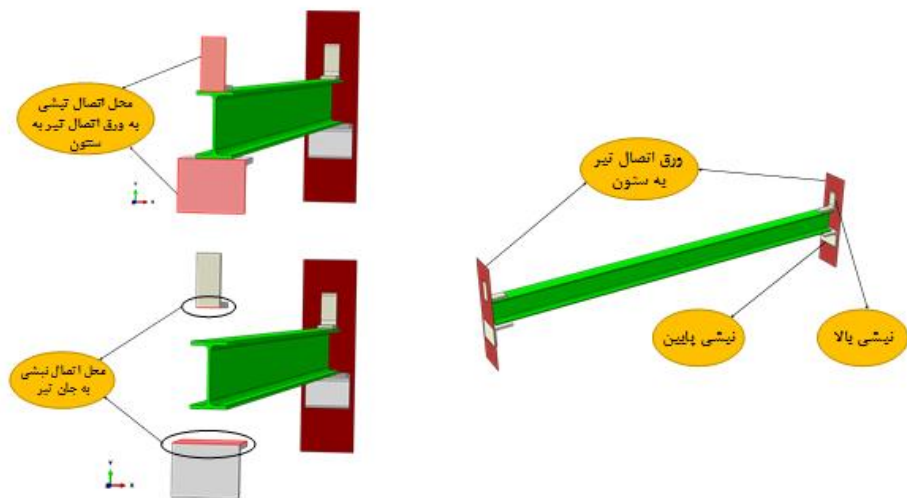


شکل ۳-۳ جزئیات مونتاژ مدل نبشی جان

همچنین چگونگی استقرار قطعات در مدل‌های اتصال نبشی فوقانی تحتانی بر اساس جزئیات و شکل

۲-۳ تعیین می‌شود. اجزای مجموعه تیر و اتصال نبشی فوقانی تحتانی بعد از مونتاژ به صورت شکل ۴-۳

می‌باشد.



شکل ۴-۳ جزئیات مونتاژ مدل نبشی نشیمن

۳-۴-۴ تعیین تعداد مراحل و نوع حل مسئله

نرم افزار ABAQUS توانایی انجام آنالیزهای گوناگونی دارد که می توان آن را در دودسته آنالیزهای دینامیکی و استاتیکی طبقه بندی نمود. در آنالیزهای استاتیکی، پاسخ طولانی مدت سازه به بارهای اعمالی مورد توجه است، در حالی که در آنالیزهای دینامیکی پاسخ سازه تحت تأثیر زمان خواهد بود، بارگذاری ناگهانی بر روی یک عضو در حین انفجار، یا پاسخ یک سازه به زمین لرزه را می توان به عنوان مثال هایی از دسته دوم ذکر کرد. در آنالیزهای دینامیکی به واسطه ظهور شتاب و مؤلفه ی زمان در مسأله، اثرات اینرسی و تکانه هم مهم بوده و بایستی مورد توجه واقع شود. نکته قابل توجه در مورد مسائل دینامیکی این است که گاهی عامل زمان مستقیماً بر روی شدت بارگذاری اعمال نمی شود و تأثیر خود را در سایر پارامترهای تعریف مسأله می گذارد، مانند تغییر محل بارگذاری در حین حل مسأله، این گونه مسائل نیز دینامیکی در نظر گرفته می شود.

کلیه آنالیزهای قابل انجام توسط نرم افزار به دو دسته کلی تقسیم می گردد، دسته اول آنالیزهای عمومی^۱ که برای حل مسائل خطی و غیر خطی مورد استفاده قرار می گیرند و دسته دوم آنالیزهای انتشار خطی^۲ که تنها حل مسائل خطی را مدنظر قرار می دهد و معمولاً از ترفندها و روش های منحصر به فردی جهت به دست آوردن نتایج بهره می برند.

در این پژوهش با توجه به اعمال لنگر پیچشی ثابت در طول زمان و عدم جابه جایی لنگر اعمالی در طول زمان و تغییر شکل های محدود تیر و همچنین بررسی عملکرد اتصال تیر در ناحیه الاستیک از گزینه

^۱ General

^۲ Linear Perturbation

حل استاندارد استاتیکی^۱ برای تحلیل استفاده شد. انجام فرایند شبیه‌سازی در یک گام^۲ تنظیم گردید. برای کاهش زمان محاسبات، در استفاده از حلگر استاندارد، زمان تحلیل به میزان ۱ ثانیه و مقدار اولیه^۳ برابر ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین سایز نمو^۴ حداقل برابر 10^{-9} ثانیه و حداکثر سایز نمو برابر ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شد.

۳-۴-۵ تعیین نوع تماس سطوح اجزا باهم

شرایط تماسی بین سطوح مختلف مسئله را می‌توان در واحد برهم‌کنش^۵ تعریف کرد که در این واحد ابتدا مشخصات فیزیکی تماس و سپس نوع تماس تعیین می‌شود با این کار می‌توان قیدهایی را روی درجات آزادی تحلیل تعریف کرد؛ این در حالی است که قیدهای تعریف شده در بخش مونتاژ فقط موقعیت قرارگیری اولیه قطعات را تعریف می‌کند. مشخصات تماس بکار رفته در این پژوهش شامل دو نوع می‌باشد:

۱- به هم بستن گره‌ها؟ با استفاده از این قید می‌توان دو سطح با مش‌بندی متفاوت را به یکدیگر متصل کرد، در این نوع قید یکی از سطوح باید به‌عنوان سطح اصلی^۷ و سطح دیگر به‌عنوان سطح پیرو^۸ تعریف می‌شود، جابه‌جایی‌های سطح پیرو همواره از سطح اصلی تبعیت می‌کند.

^۱ Static General

^۲ Step

^۳ Initial Size

^۴ Increment Size

^۵ Interaction

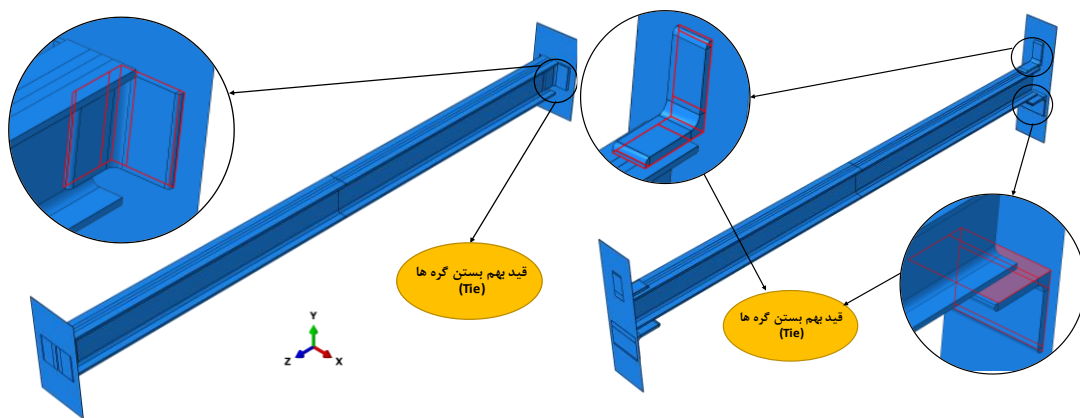
^۶ Tie

^۷ Master Surface

^۸ Slave Surface

۲- جفت کردن گرہا^۱: با استفاده از این قید می‌توان حرکت یک سطح را به حرکت یک یا چند نقطه مقید کرد، این قید شامل دو نوع حرکتی^۲ یا پیوسته^۴ می‌باشد.

در مدل‌سازی اتصال نبشی جان ابتدا مطابق شکل ۳-۵ و براساس ابعاد جوش هریک از اتصالات از یک طرف گرہهای نبشی در محل جوش را به صفحه اتصال و از طرف دیگر به جان تیر می‌بندیم مشابه همین کار را در اتصال طرف دیگر تیر نیز انجام می‌دهیم، همچنین در مدل‌سازی اتصال نبشی فوقانی تحتانی (نبشی نشیمن) مطابق شکل ۳-۵ و براساس ابعاد جوش هریک از اتصالات گرہهای نبشی‌های فوقانی و تحتانی را از یک طرف صفحه اتصال و از طرف دیگر به بال فوقانی و تحتانی تیر می‌بندیم مشابه همین کار را در اتصال طرف دیگر تیر نیز انجام می‌دهیم.



شکل ۳-۵ تعریف شرایط تماس اتصال

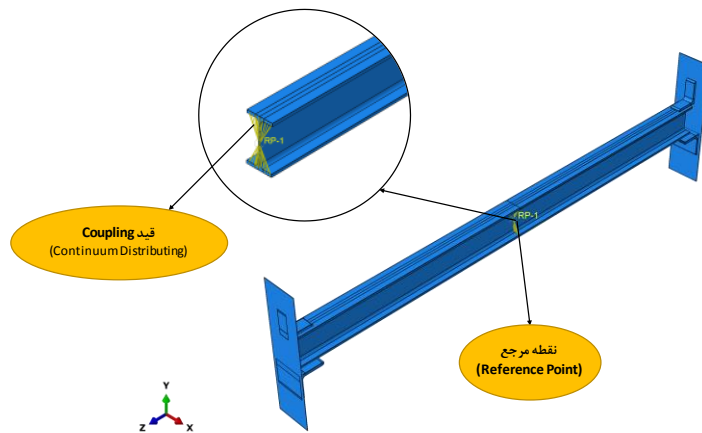
^۱ Coupling

^۲ Kinematic

^۳ هنگامی استفاده می‌شود که هدف جفت کردن گروهی از نقاط را با یک جسم صلب - که با یک نقطه مرجع تعریف می‌شوند- باشد.

^۴ Distributing

همچنین با ایجاد برش در مدل‌های مختلف تیر و در فواصلی با نسبت‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ در تیر مقاطعی تعریف شد سپس در مرکز مقاطع ایجاد شده در تیر نقاط مرجعی^۱ تعریف کردیم. آنگاه با استفاده از قید جفت کردن گره‌ها، نقطه‌ی مرجع تعریف‌شده را به تمامی نقاط گرهی مقطع در محل برش‌های ایجادشده، (همان‌طور که در شکل ۳-۶ مشخص شده است) با استفاده از حالت توزیع سازه‌ای^۲ مقید شد، در این حالت نرم‌افزار نیرو و یا لنگر وارده را به صورت خودکار و وزنی به نقاط گرهی مقطع تخصیص می‌دهد. در مرحله‌ی بعدی تمامی درجات آزادی چرخشی به غیر از چرخش حول محور طولی تیر را بسته شد.



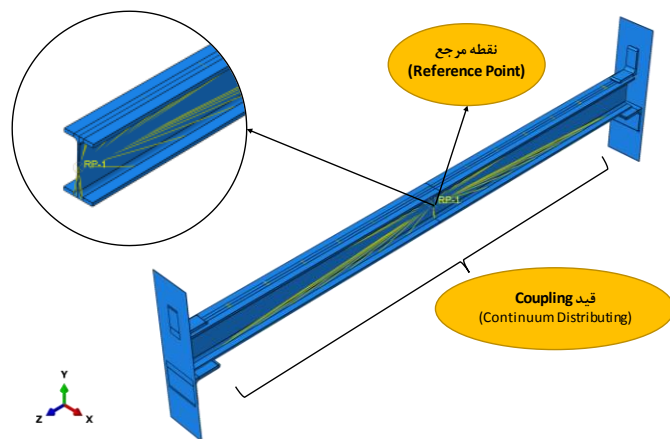
شکل ۳-۶ استفاده از قید جفت کردن گره‌ها برای اعمال لنگر پیچشی متمرکز

در مدل‌هایی که لنگر گسترده به تیر اعمال می‌شد نیز، با تعریف یک مقطع در میانه راستای طولی تیر و یک نقطه مرجع در وسط جان تیر و با استفاده از قید جفت کردن گره‌ها، نقطه‌ی مرجع تعریف‌شده را به تمامی نقاط گرهی در قسمت مشخص شده در شکل ۳-۷ در بال بالا و پایین تیر با استفاده از حالت توزیع گسترده^۳ مقید گردید، در این حالت نرم‌افزار

^۱ Reference Point

^۲ Structural Distributing

^۳ Continuum Distributing



شکل ۳-۷ استفاده از قید جفت کردن گره‌ها برای اعمال لنگر پیچشی گسترده

نیرو و یا لنگر وارده را به صورت خودکار و گسترده به نقاط گرهی موردنظر تخصیص می‌دهد.

۳-۴-۶ شرایط مرزی و بارگذاری

اعمال شرایط مرزی و همچنین بارگذاری بر مسأله امری اجتناب‌ناپذیر است و اصولاً تحلیل یک مسأله بدون بار معنایی ندارد. در نقطه مقابل، علی‌رغم تمام ساده‌سازی‌هایی که می‌تواند در یک تحلیل اجزا محدود بکار رود، تا حد امکان سعی بر این است که در خصوص بار و شرایط مرزی ساده‌سازی صورت نگیرد تا نتایج دچار انحراف نشود و تا حد امکان به شرایط واقعی نزدیک باشد. از این رو اعمال بار به شکل صحیح به مجموعه موردنظر حائز اهمیت بالایی است بارگذاری سبب تحریک مدل، بروز تغییر در آن و متعاقب آن ظهور و محاسبه تغییرها می‌گردد. حالات بارگذاری عمدتاً عبارت‌اند از:

۱- نیروی متمرکز^۱ (نقطه‌ای)

^۱ Concentrated Force

۲- نیروی فشاری^۱ بر روی سطوح

۳- لنگر^۲ متمرکز و گسترده

۴- بارهای حرارتی

شرط مرزی به‌طور کلی به وضعیت‌های مشخص و از پیش تعریف‌شده در مدل گفته می‌شود که از ابتدا تا انتهای حل ثابت باقی بمانند به‌عنوان مثال برای ثابت نگه‌داشتن بخش‌های مقید مدل و یا برای تغییر معینی در درجات آزادی، از شرط مرزی بهره می‌گیرند. شرایط مرزی عمدتاً عبارتند از:

۱- تکیه‌گاه‌های سازه و نقاط تماس با زمین

۲- شرایط تقارن

۳- درجات آزادی قابل‌چشم‌پوشی (نظیر درجه آزادی دوران عمود بر سطح پوسته یا ورق)

۴- قیود اتصال‌دهنده که جهت تعریف یک رابطه مشخص بین نقاط مختلف سازه بکار می‌روند.

نکته حائز اهمیت است که باید مورد توجه قرار گیرد این است که نوع بارگذاری و شرط مرزی ارتباط مستقیم با نوع آنالیز دارد. به‌عنوان مثال شرط مرزی نمی‌تواند تعیین سرعت یا تغییر مکان در بخش‌های خاصی از مدل باشد. در مدل‌های مونتازی که از بارگذاری و شرایط مرزی زیادی استفاده می‌گردد، باید مراقب کرد تا محل اعمال بارگذاری و شرایط مرزی یکی نشود. این رخداد سبب بروز خطا در حین حل خواهد شد.

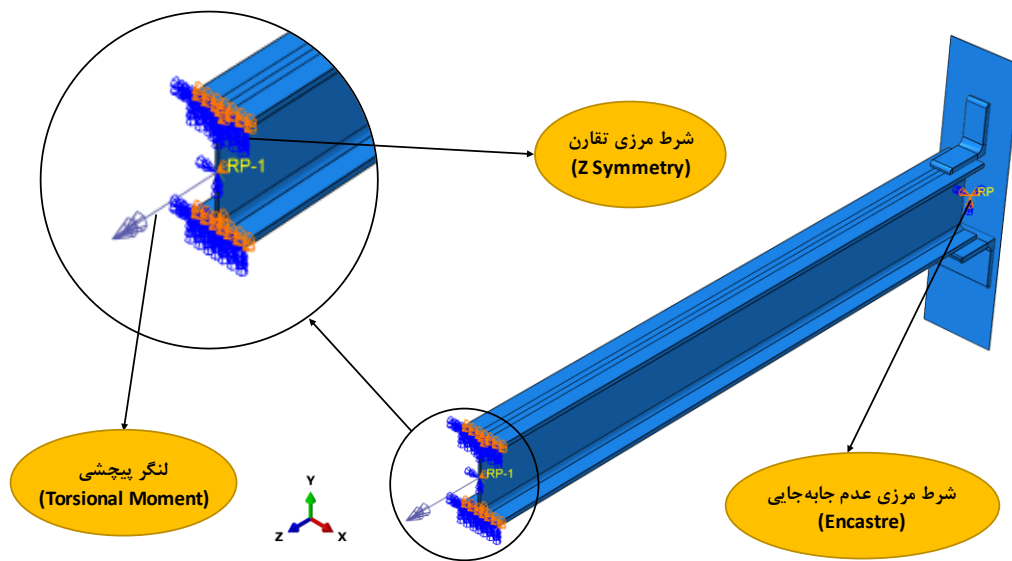
۳-۴-۱ شرایط مرزی

نوع اول شرایط مرزی مربوط به تقارن در راستای طولی تیر است که در مدل‌هایی که دارای هردو شرط

^۱ Pressure Load

^۲ Moment

تقارن در بارگذاری و تقارن هندسی بودن، با استفاده از این شرط مرزی نصف مدل شبیه‌سازی و تحلیل شد. نوع دوم شرایط مرزی مربوط عدم جابه‌جایی صفحات پیچش است که برای این کار تمامی درجات آزادی نقطه مرجع این صفحات را می‌بندیم (شکل ۸-۳).



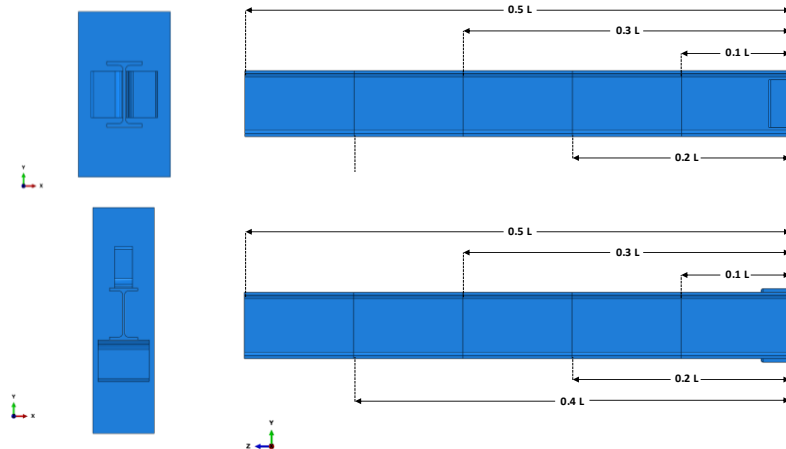
شکل ۸-۳ نحوی اعمال شرایط مرزی مدل

۳-۴-۶-۲ بارگذاری

در این پژوهش برای هر یک از اتصالات به‌طور جداگانه دو نوع بارگذاری اعمال گردید، در نوع اول لنگرهای پیچشی متمرکز در فواصل معین به نقاط مرجع تعریف شده اعمال شد، مقدار و محل اثر لنگرهای پیچشی، در مدل‌سازی‌های مختلف در جدول ۳-۵ و شکل ۳-۹ ارائه گردیده است. در نوع دوم بارگذاری یک لنگر پیچشی گسترده با استفاده از قید جفت کردن نقطه مرجع با گره‌های بال فوقانی و تحتانی اعمال شد، مقادیر این لنگرها پیچشی در جدول ۳-۵ ارائه گردیده است.

جدول ۳-۵ مقادیر لنگر پیچشی مدل‌های مختلف

شماره‌ی نیمرخ	شماره نبشی	طول تیر L (mm)	لنگر پیچشی کل T (kg.cm)	تنش مجاز برشی	تنش مجاز خمشی	مساحت سطح مقطع بال (cm ²)
IPE 100	50×50×5	1654	2800	960	1440	3.135
IPE 120	50×50×5	1976	3744	960	1440	4.032
IPE 140	60×60×6	2310	4929	960	1440	5.037
IPE 160	60×60×6	2636	6841	960	1440	6.068
IPE 180	80×80×8	2974	8550	960	1440	7.28
IP E 200	80×80×8	3304	11832	960	1440	8.5
IPE 220	80×80×8	3628	14541	960	1440	10.12
IPE 240	100×100×10	3964	19612	960	1440	11.76
IPE 270	100×100×10	4456	22784	960	1440	13.77
IPE 300	100×100×10	4950	26678	960	1440	16.05



شکل ۳-۹ محل اعمال لنگرهای پیچشی متمرکز

۳-۴-۷ شبکه‌بندی

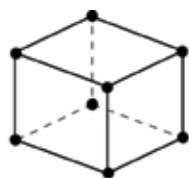
شبکه‌بندی یکی از تأثیرگذارترین قسمت‌های مدل‌سازی و تحلیل عددی می‌باشد و در این بین انتخاب المان مناسب برای مدل هدف را می‌توان مهم‌ترین پارامتر در شبکه‌بندی مدل دانست. اکنون به بیان مختصری از خصوصیات المان‌های نرم‌افزار پرداخته می‌شود. نرم‌افزار ABAQUS شامل بازه وسیعی از المان‌ها می‌باشد که این مجموعه وسیع ابزاری‌های قدرتمندی را برای حل مسائل گوناگون در اختیار کاربران قرار می‌دهد. المان‌ها خصوصیتی دارند که توسط آن‌ها شناخته شده و به کمک آن، می‌توان رفتارشان را در مسائل گوناگون پیش‌بینی نمود که این خصوصیات را می‌توان در پنج گروه زیر خلاصه نمود، نام هر المان تعیین‌کننده پنج پارامتر ذیل است:

۱- خانواده: شکل ۳-۱۰ خانواده‌های المان‌هایی را نشان می‌دهد که بیشترین کاربرد را در آنالیز تنش دارد.

۲- درجات آزادی: درجات آزادی متغیرهای اساسی قابل محاسبه در حین آنالیز هستند. در آنالیزهای تنش-تغییر مکان درجات آزادی حرکتی المان‌ها شامل ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی بر روی هر گره از المان است؛ بنابراین درجات آزادی حرکتی در مدل‌های سه‌بعدی، شش و در مدل‌های دوبعدی، سه تعریف می‌شود.

۳- تعداد گره‌ها: تغییر مکان‌ها، دوران و سایر درجات آزادی تنها بر روی گره‌ها محاسبه می‌گردند و در سایر نواحی المان، تغییر مکان‌ها با میان‌یابی از تغییر مکان گره‌ها به دست می‌آیند. معمولاً نوع و مرتبه‌ی عملیات میان‌یابی به تعداد گره‌های قرارگرفته در المان بستگی دارد و تعداد گره‌های هر المان نیز خود متأثر از مرتبه هندسی، شکل المان و فضای مدل‌سازی می‌باشد. در المان‌هایی از مرتبه هندسی بالا، تعداد گره‌های بیشتری استفاده می‌شود. المان‌هایی که تنها گره‌هایی در

گوشه‌های خود دارند، مانند المان ۸ گره‌ای مکعبی در هر جهت از میان‌یابی خطی (درجه اول) استفاده می‌نمایند. این المان‌ها از نظر هندسی، خطی یا درجه اول نامیده می‌شود. المان‌هایی با گره‌هایی در وسط اضلاع، مانند المان ۲۰ گره‌ای مکعبی شکل ۳-۱۰ المان‌های مکعب خطی، مکعب درجه دوم و چهاروجهی از میان‌یابی درجه دوم استفاده کرده و معمولاً المان‌های درجه دوم و یا المان‌های هندسی درجه دو خوانده می‌شوند. المان‌های چهاروجهی و یا مثلثی اصلاح شده با گره‌هایی در وسط اضلاع، مانند المان ۱۰ گره‌ای چهاروجهی شکل ۳-۱۰ المان‌های مکعب خطی، مکعب درجه دوم و چهاروجهی، که از میان‌یابی اصلاح‌شده درجه دوم استفاده نموده و المان اصلاح‌شده و یا المان نوع دوم اصلاح‌شده خوانده می‌شوند.



المان خطی



المان درجه دو



المان نوع دوم اصلاح شده

شکل ۳-۱۰ المان‌های مکعب خطی، مکعب درجه دوم و چهاروجهی اصلاح‌شده

۴- فرمول‌بندی: فرمول‌بندی المان‌ها به تئوری ریاضی تعیین رفتار المان بکار رفته برمی‌گردد.

فرمول‌بندی‌های اصلی دو نوع‌اند:

- فرمول‌بندی لاگرانژی: در این فرمول‌بندی جنس و خواص (هندسه و مرتبه) المان در

سرتاسر آن و در حین آنالیز باهم مرتبط بوده و ماده نمی‌تواند از مرزهای آن خارج گردد یا

از مرز المان‌های مختلف عبور کند.

- فرمول‌بندی اولری: در این فرمول‌بندی المان‌ها در فضا ثابت بوده و ماده در آن‌ها جریان

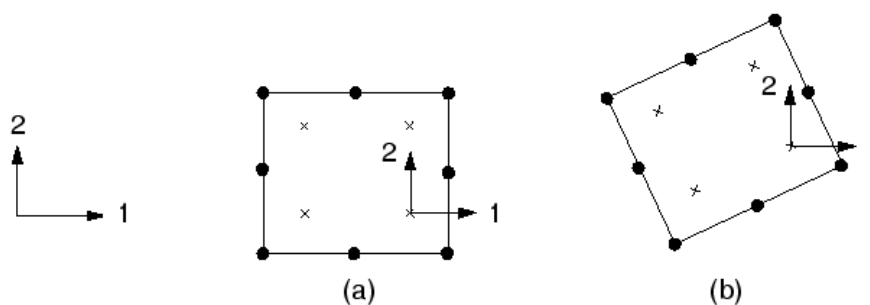
می‌یابد.

۵- ایجاد پیوستگی: نرم‌افزار ABAQUS از روش‌های عددی برای ایجاد پیوستگی و انتگرال‌گیری از مقادیر مختلف در هر المان استفاده می‌نماید. نرم‌افزار به کمک روش مربع‌سازی گوسی برای بیشتر انواع المان‌ها، پاسخ مدل را در هر نقطه المان ارزیابی می‌نماید. بنابر تعداد نقاط انتگرال‌گیری در المان، از دو روش جهت برقراری ارتباط بین متغیرهای گره‌ای و میان‌یابی بر روی نقاط انتگرال‌گیری استفاده می‌شود. در حالت اول نرم‌افزار ABAQUS از تمام موقعیت‌های موجود در المان جهت قرار دادن نقاط انتگرال‌گیری و برقرار نمودن ارتباط منطقی بین داده‌های گره‌ها استفاده می‌کند، به این نوع انتگرال‌گیری کامل گفته می‌شود. در حالت دوم، با تغییر محل قرارگیری نقاط انتگرال‌گیری، به محل‌های بهینه در داخل المان، تعداد نقاط انتگرال‌گیری در هر جهت اصلی نسبت به انتگرال‌گیری کامل یک عدد کمتر است. به این روش، روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته عنوان می‌گردد. نرم‌افزار حرف R را در انتهای نام المان‌هایی که از انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (کاهش‌یافته) بهره می‌گیرند، قرار می‌دهد تا آن‌ها را از نوع کامل متمایز کند.

در این پژوهش با توجه به هندسه‌ی مدل و نیاز به بررسی و تحقیق بر روی تنش و تغییر مکان‌ها، از بین خانواده‌های مختلف المان‌ها، از المان سالیید بهره برده شد. این المان‌ها می‌تواند به‌سادگی با استفاده از بلوک‌های کوچکی از مواد، هر عضوی را مدل کنند و با چیدن آن‌ها در کنار یکدیگر هندسه تقریبی جسم ایجاد شود. این المان‌ها به‌واسطه نحوه پراکندگی گره‌ها و موقعیت نقاط انتگرال‌گیری، می‌توانند امکان دستیابی به بهترین پاسخ را فراهم آورد، اما به‌واسطه حجم زیاد محاسبات نیاز نرم‌افزار را به منابع سخت‌افزاری به‌سرعت افزایش می‌دهند اما در مدل‌سازی‌های این پژوهش با توجه به بررسی‌های اولیه انجام‌شده و در اختیار داشتن منابع سخت‌افزاری مناسب، این مورد خللی در انجام محاسبات ایجاد نکرد. نام

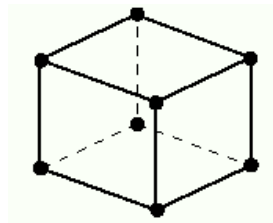
المان‌های سالیید در نرم‌افزار با حرف C آغاز می‌شوند و کاراکتر دوم، فضای تعریف المان را تعیین می‌کند. بدین معنی که 3D به‌منزله سه‌بعدی و 2D به‌منزله فضای دوبعدی بودن مدل است. مجموعه المان‌های سه‌بعدی سالیید شامل المان‌های شش‌وجهی (Hexahedral) گوه‌ای (Wedge) و چهاروجهی (Tetrahedral) بوده و در هر یک از گره‌های خود شش درجه آزادی دارند.

در مسائل تنش تغییر مکان، المان‌های سالیید در هر گره، دارای درجات آزادی انتقالی و دورانی هستند. به‌صورت پیش‌فرض متغیرهای خروجی المان مانند تنش و کرنش مبتنی بر سیستم مختصات اصلی است. بنابراین مؤلفه تنش در نقطه انتگرال‌گیری داده شده در شکل ۱۱-۳ جهت‌های پیش‌فرض ماده برای المان‌های پیوسته در جهت ۱ عمل می‌نماید، حتی اگر المان‌ها دوران زیادی هم داشته باشند، مطابق قسمت b شکل ۱۱-۳ نرم‌افزار به‌صورت پیش‌فرض برای تعریف متغیرهای المان از سیستم مختصات اصلی استفاده می‌کند. نرم‌افزار اجازه می‌دهد تا برای متغیرهای المان، سیستم مختصات موضعی نیز تعریف شود. این سیستم‌های مختصات با جابجایی‌های وسیع دورانی المان حرکت می‌کند.



شکل ۱۱-۳ جهت‌های پیش‌فرض ماده برای المان‌های پیوسته

با توجه به مطالب بیان شده و در این پژوهش با توجه در دسترسی به پردازنده‌های قوی و عدم محدودیت در این زمینه از المان C3D8R که در شکل ۱۲-۳ مشخص شده است بهره برده شد.



8-node brick, C3D8R

شکل ۳-۱۲ المان C3D8R

۳-۴-۸ صحت سنجی و آنالیز استقلال نتایج از شبکه‌بندی

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در تحلیل المان محدود، اندازه المان‌ها است. کاهش اندازه المان‌ها تا مقداری مشخص، دقت و زمان محاسبات را افزایش می‌دهد و استفاده از المان‌های بزرگ دقت حل را کاهش می‌دهد.

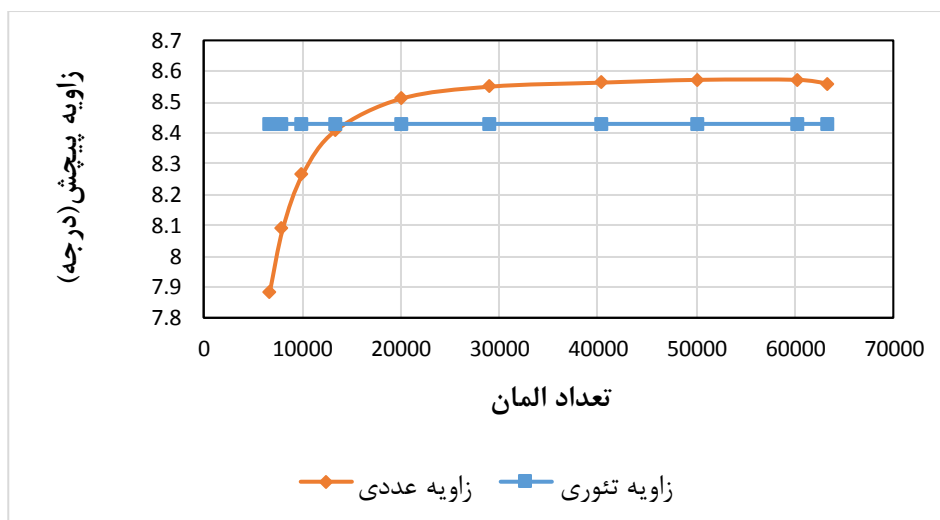
در این پژوهش به منظور بررسی صحت نتایج مدل عددی و میزان حساسیت جواب‌ها به نوع و تعداد المان‌ها صحت سنجی و آنالیز مش‌بندی انجام گرفت. با توجه به مشخصات هندسی مدل و اختلاف زیاد ابعاد تیر در دو راستای طولی و عرضی، بررسی‌ها در دو جهت مستقل از هم انجام شد. بدین منظور با استفاده از شرایط مرزی تئوری جدول ۳-۶ تکیه‌گاه‌های گیردار پیچشی و مفصل پیچشی مدل‌سازی شد و مقادیر تنش قائم در بال و میزان پیچش مقطع با نتایج به‌دست آمده از روابط دقیق تئوری پیچش - که در فصل دوم مورد بحث قرار گرفت - مقایسه شد و طی یک فرآیند دومارحله‌ای میزان مش‌بندی مناسب در هر دو راستا تعیین شد که به بیان جزئیات آن می‌پردازیم.

جدول ۳-۶ شرایط مرزی تئوری

مدل	تکیه‌گاه	وسط دهانه
تیر دو سر مفصل	$\varphi = 0, \varphi'' = 0$	$\varphi' = 0$
تیر دوسرگیردار	$\varphi = 0, \varphi' = 0$	

ابتدا مدل تیر با تکیه‌گاه گیردار را مورد مطالعه قرار داده شد که در مرحله نخست ابعاد مش‌بندی در مقطع برابر ۴ میلی‌متر فرض شد و ابعاد مش در راستای طولی تیر برابر ۴، ۸، ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر لحاظ شد که نتایج به صورت نمودار شکل ۳-۳ است.

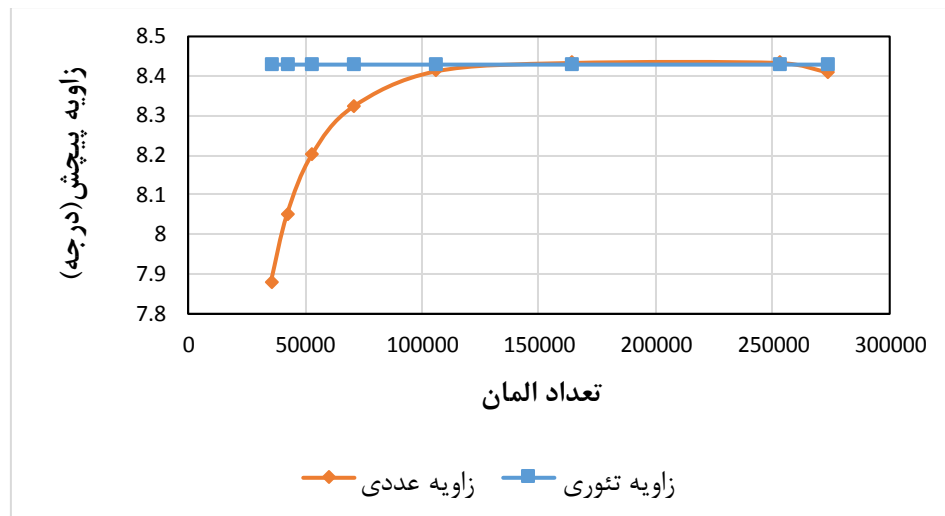
در مرحله دوم اندازه‌ی مش در قسمت مقطع برابر ۲ میلی‌متر فرض شد و ابعاد مش در راستای طولی تیر برابر ۴، ۸، ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر لحاظ شد که نتایج به صورت نمودار شکل ۳-۱۳ است.



شکل ۳-۱۳ نمودار حساسیت تحلیل نسبت به مش‌بندی طولی

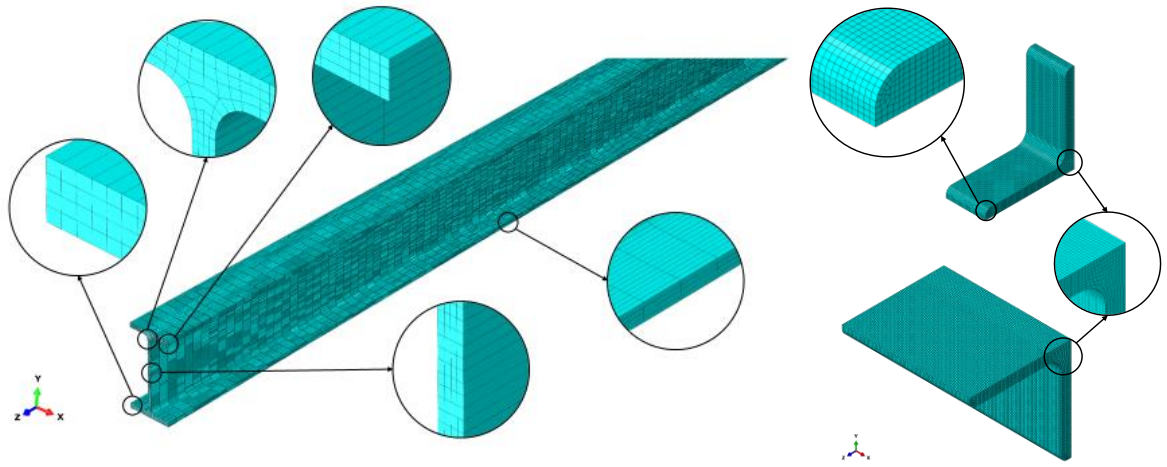
در مورد تکیه‌گاه مفصل پیچشی هم به‌مانند تکیه‌گاه گیردار پیچشی در مرحله نخست اندازه مش

در مقطع برابر ۴ میلی‌متر فرض شد و ابعاد مش در راستای طولی تیر برابر ۴، ۸، ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر لحاظ شد و سپس در مرحله دوم، مش در قسمت مقطع برابر ۲ میلی‌متر فرض شد و ابعاد مش در راستای طولی تیر برابر ۴، ۸، ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر قرار گرفت که نتایج مشابهی به دست آمد.



شکل ۳-۱۴ نمودار حساسیت تحلیل نسبت به مش بندی عرضی

با توجه به نتایج به دست آمده اولاً صحت مدل سازی انجام شده با مدل های تئوری با درصد قابل قبولی تایید شد و ثانیاً با توجه به نتایج به دست آمده در راستای عرضی از مش بندی با ابعاد ۲ میلی متر و در راستای طولی از مش با ابعاد ۲۰ میلی متر استفاده شد (شکل ۳-۱۵).



شکل ۳-۱۵ مشی بندی مدل

فصل ۴ بررسی رفتار مدل‌ها و نتایج

۴-۱ مقدمه

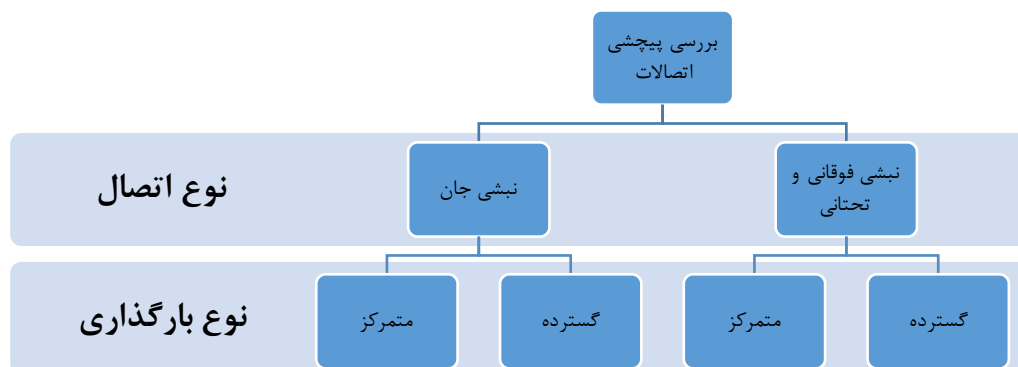
نیمرخ‌های فولادی از قبیل I شکل، ناودانی‌ها و مقاطع بال‌پهن از لحاظ مقاومت خمشی و فشاری دارای مزایای قابل توجهی می‌باشند، در مقابل می‌توان گفت این مقاطع از منظر پیچشی مقاومت خوبی ندارند و اگر به علتی تحت پیچش قرار گیرند، تغییر شکل‌ها و تنش‌های قابل توجه و ناپایداری‌های ناخواسته‌ای ممکن است در آن‌ها به وجود آید.

در این بین مطالعاتی در جهت بررسی و تحلیل این مقاطع انجام شده است اما در تمامی این پژوهش‌ها تمرکز بر روی مقطع بوده و نحوی اتصال این مقاطع و تأثیر آن بر عملکرد پیچشی مقطع مغفول مانده است. در این پژوهش سعی بر این بوده تا زوایای پنهان تأثیر اتصالات رایج در ایران بر روی میزان پیچش، درصد گیردار اتصال، تنش‌های ایجاد شده در تیر و اتصالات آن مورد بررسی قرار گیرد. در این فصل به بررسی نتایج حاصل از مقایسه مدل‌های ریاضی مقاطع جدار نازک با مدل‌های عددی، که توسط نرم‌افزار Abaqus 6.14.4 مدل‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفت، می‌پردازیم.

۴-۲ روش پژوهش

در این پژوهش به منظور بررسی پیچشی اتصالات خمشی و تأثیر آن بر عملکرد مقاطع I شکل، با تغییر در نوع و اندازه اتصال و تغییر در مشخصات هندسی مقطع و تغییر در مشخصات هندی مقطع و همچنین تغییر در محل، نوع و اندازه‌ی لنگرهای پیچشی ۲۴۰ مدل‌سازی مجزا، تعریف و تحلیل شد که می‌توان

حالت‌های مختلف بررسی شده را در روندنمای^۱ شکل ۴-۱ مشاهده کرد.



شکل ۴-۱ روندنمای کلی فصل چهارم

با توجه به فرض عدم ایجاد اعوجاج^۲ در مقطع - به‌ویژه در جان تیر - در حل تئوری مسأله، میزان پیچش جان ، به‌عنوان معیار سنجش پیچش مقطع، در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که پس از تحلیل مدل‌ها و بررسی‌های انجام‌شده در حالت‌های مختلف از نظر ابعاد، نوع اتصال و بارگذاری، می‌توان بیان داشت که فرض عدم اعوجاج مقطع که در حل تئوری مسأله در نظر گرفته‌شده بود با درصد بسیار بالایی قابل قبول است.

در نرم‌افزار آباکوس جهت محورها اصلی مطابق جدول ۴-۱ نام‌گذاری می‌شود و همچنین در جدول ۴-۲ علامت‌های اختصاری تنش‌ها، جابه‌جایی‌ها و چرخش‌ها مشخص شده است.

^۱ Flowchart

^۲ Distorsion

جدول ۱-۴ نام‌گذاری علامت‌های اختصاری نرم‌افزار

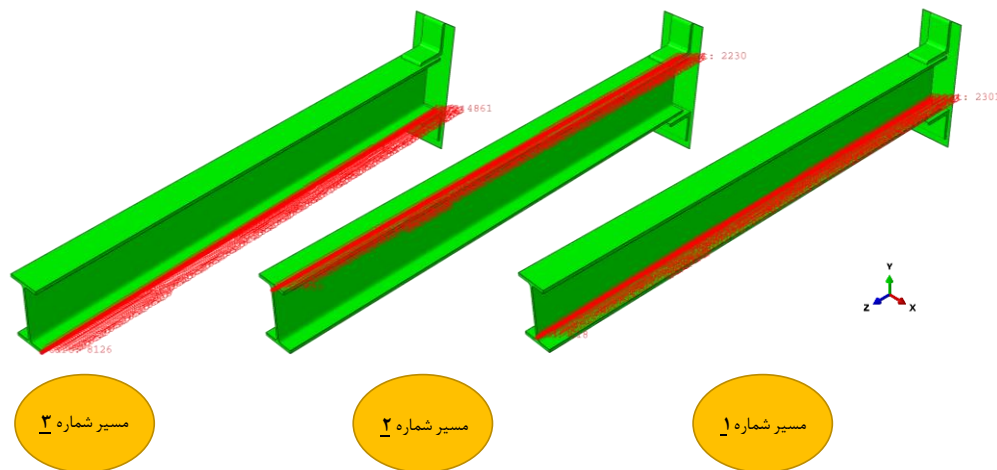
نام‌گذاری نرم‌افزار	درجات آزادی	نام‌گذاری نرم‌افزار	تنش‌ها
U1	جابه‌جایی گره‌ای در جهت X	S11	تنش قائم در جهت X
U2	جابه‌جایی گره‌ای در جهت Y	S22	تنش قائم در جهت Y
U3	جابه‌جایی گره‌ای در جهت Z	S33	تنش قائم در جهت Z
UR1	چرخش حول محور X	S12	تنش برشی در صفحه X در جهت Y
UR2	چرخش حول محور Y	S23	تنش برشی در صفحه Y در جهت Z
UR3	چرخش حول محور Z	S13	تنش برشی در صفحه X در جهت Z

جدول ۲-۴ نام‌گذاری محورهای اصلی

نام‌گذاری نرم‌افزار	جهت‌های اصلی
1-axis	محور X
2-axis	محور Y
3-axis	محور Z

به‌منظور محاسبه میزان پیچشِ مقطع و بررسی تنش‌های قائم، دو مسیر^۱ در بالا و پایین جانِ تیر و همچنین مسیر سومی در وسط بال در طول تیر مطابق شکل ۲-۴ تعریف و شماره‌گذاری شد.

^۱ Path



شکل ۲-۴ تعیین مسیر در تیر به منظور استخراج نتایج

در ادامه میزان جابه‌جایی نقاط گره‌ای در راستای عرضی (u_1) برای مسیرهای شماره ۱ و ۲ به‌عنوان خروجی نرم‌افزار تعیین و استخراج شد سپس با استفاده از رابطه‌ی ساده‌ی محاسبه‌ی شیب خط که به‌صورت رابطه ۱-۴ بیان می‌شود، شیب یا میزان چرخش مقطع در طول تیر محاسبه شد.

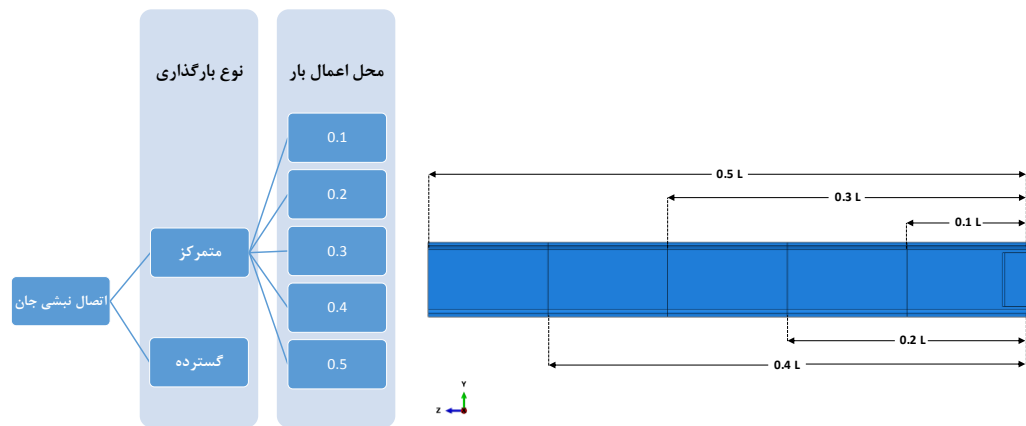
$$\text{رابطه ۱-۴} \quad \text{چرخش مقطع} = \frac{\text{مسیر بالا } u_1 - \text{مسیر پایین } u_1}{\text{اختلاف ارتفاع مسیرها}}$$

به دلیل آنکه در مقاطع I شکلی که تحت پیچش توأم سن ونانت و تابیدگی قرار می‌گیرند بیشترین میزان تنش قائم در هر مقطع، در بال ایجاد می‌شود و از طرفی با بررسی‌های انجام شده، تنش قائم در گره میانی بال را می‌توان به‌عنوان میانگین تنش در بال در نظر گرفت لذا با استفاده از تعیین تنش قائم در مسیر شماره‌ی ۳ (شکل ۲-۴) می‌توان مقدار حداکثر تنش قائم را در طول تیر مشخص نمود.

نتایج تحلیل‌های تئوری مسأله بر اساس مطالب فصل دوم در چهار حالت مختلف با استفاده از شرایط مرزی تعیین و محاسبه شد، سپس این نتایج با نتایج مدل‌سازی انجام شده با شرایط مرزی واقعی که از نرم‌افزار استخراج شد مقایسه گردید و ماحصل آن در قالب جداول و نمودارهای ذیل ارائه می‌شود.

۳-۴ اتصال نبشی جان

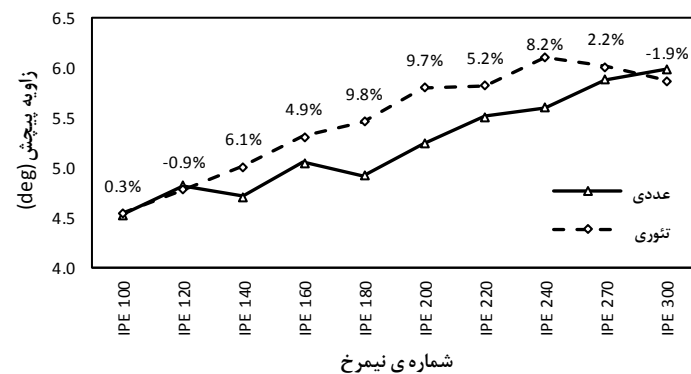
۱-۳-۴ بار متمرکز



در این حالت، بارگذاری متمرکز در ۵ مقطع مشخص شده در تمامی ۱۰ اتصال نبشی جان که مشخصات آن‌ها در جدول ۱-۳-۳ تعیین گردید، انجام شد و نتایج آن با اتصال گیردار پیچشی و اتصال مفصل پیچشی در قالب نمودار و جداول ذیل مقایسه شد. یادآوری می‌کنم میزان پیچش تیر و تنش قائم در محل اعمال بار اندازه‌گیری و با پیچش و تنش قائم دو اتصال تئوری در همین محل مقایسه شده است.

جدول ۳-۴ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر

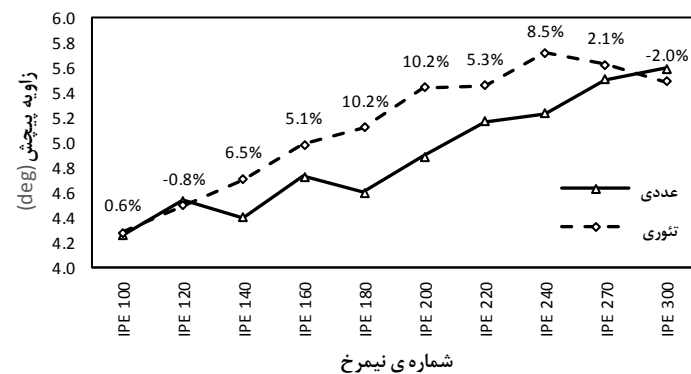
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)		تنش قائم(kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبی	نسبی
IPE 100	50×50×5	4.53	4.55	0.3%	1350.4	1414.4	4.5%
IPE 120	50×50×5	4.82	4.78	-0.9%	1323.5	1383.4	4.3%
IPE 140	60×60×6	4.71	5.01	6.1%	1293.7	1368.3	5.5%
IPE 160	60×60×6	5.05	5.31	4.9%	1326.6	1420.0	6.6%
IPE 180	80×80×8	4.92	5.46	9.8%	1295.1	1402.3	7.6%
IPE 200	80×80×8	5.24	5.80	9.7%	1361.9	1486.8	8.4%
IPE 220	80×80×8	5.52	5.82	5.2%	1356.0	1463.8	7.4%
IPE 240	100×100×10	5.60	6.10	8.2%	1420.0	1540.0	7.8%
IPE 270	100×100×10	5.88	6.01	2.2%	1388.5	1469.1	5.5%
IPE 300	100×100×10	5.98	5.87	-1.9%	1348.0	1404.5	4.0%



شکل ۳-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر

جدول ۴-۴ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر

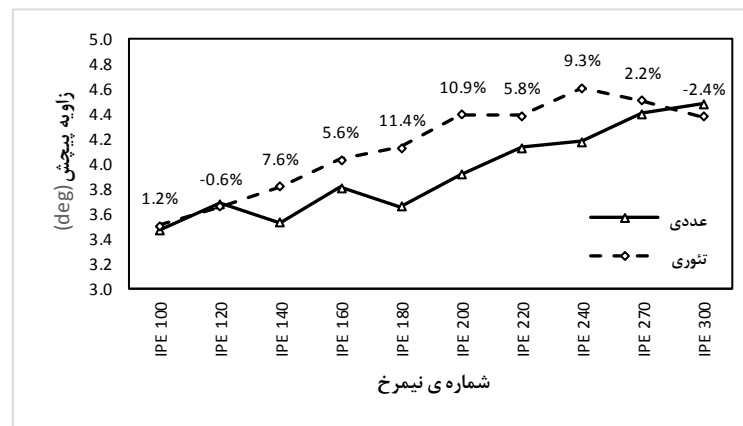
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)		تنش قائم(kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبی	نسبی
IPE 100	50×50×5	4.26	4.28	0.6%	1338.5	1408.7	5.0%
IPE 120	50×50×5	4.53	4.50	-0.8%	1312.4	1375.4	4.6%
IPE 140	60×60×6	4.40	4.71	6.5%	1276.3	1358.4	6.0%
IPE 160	60×60×6	4.73	4.98	5.1%	1310.7	1409.2	7.0%
IPE 180	80×80×8	4.60	5.12	10.2%	1275.3	1389.8	8.2%
IPE 200	80×80×8	4.89	5.44	10.2%	1341.4	1474.2	9.0%
IPE 220	80×80×8	5.16	5.45	5.3%	1339.4	1449.5	7.6%
IPE 240	100×100×10	5.23	5.72	8.5%	1399.4	1525.4	8.3%
IPE 270	100×100×10	5.50	5.62	2.1%	1369.8	1451.8	5.6%
IPE 300	100×100×10	5.60	5.48	-2.0%	1328.8	1385.4	4.1%



شکل ۴-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر

جدول ۴-۵ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر

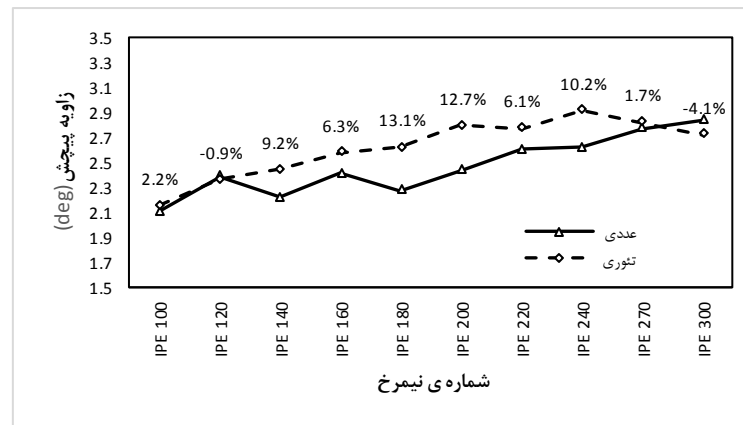
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)		تنش قائم(kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبی	نسبی
IPE 100	50×50×5	3.47	3.51	1296.3	1382.5	1.2%	6.2%
IPE 120	50×50×5	3.68	3.66	1268.5	1341.0	-0.6%	5.4%
IPE 140	60×60×6	3.53	3.81	1215.0	1317.7	7.6%	7.8%
IPE 160	60×60×6	3.81	4.03	1254.7	1365.1	5.6%	8.1%
IPE 180	80×80×8	3.66	4.13	1205.1	1340.8	11.4%	10.1%
IPE 200	80×80×8	3.91	4.39	1274.4	1424.0	10.9%	10.5%
IPE 220	80×80×8	4.13	4.39	1275.2	1394.0	5.8%	8.5%
IPE 240	100×100×10	4.18	4.61	1325.7	1468.5	9.3%	9.7%
IPE 270	100×100×10	4.40	4.50	1300.6	1387.0	2.2%	6.2%
IPE 300	100×100×10	4.48	4.38	1259.4	1316.1	-2.4%	4.3%



شکل ۴-۵ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر

جدول ۴-۶ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر

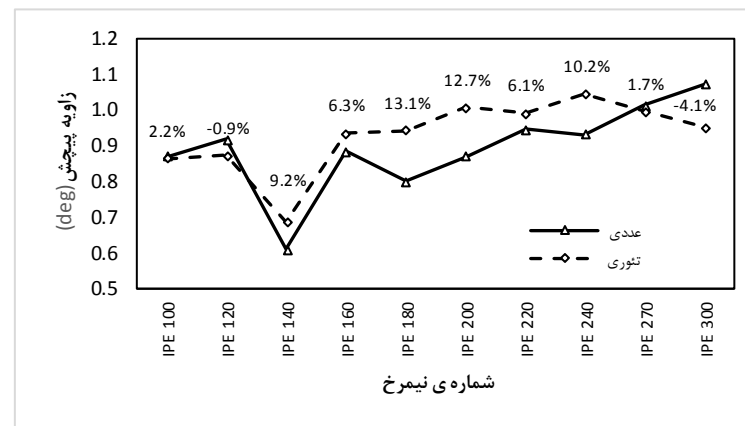
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)		تنش قائم(kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبی	نسبی
IPE 100	50×50×5	2.11	2.16	1007.5	1130.9	10.9%	10.9%
IPE 120	50×50×5	2.38	2.36	1151.5	1235.7	-0.9%	6.8%
IPE 140	60×60×6	2.22	2.44	1069.1	1201.1	9.2%	11.0%
IPE 160	60×60×6	2.41	2.57	1112.8	1240.8	6.3%	10.3%
IPE 180	80×80×8	2.28	2.62	1046.9	1208.8	13.1%	13.4%
IPE 200	80×80×8	2.44	2.79	1110.2	1286.9	12.7%	13.7%
IPE 220	80×80×8	2.60	2.77	1123.2	1249.1	6.1%	10.1%
IPE 240	100×100×10	2.62	2.91	1157.7	1318.5	10.2%	12.2%
IPE 270	100×100×10	2.77	2.82	1137.2	1227.4	1.7%	7.3%
IPE 300	100×100×10	2.84	2.72	1099.4	1152.5	-4.1%	4.6%



شکل ۴-۶ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر

جدول ۴-۷ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر

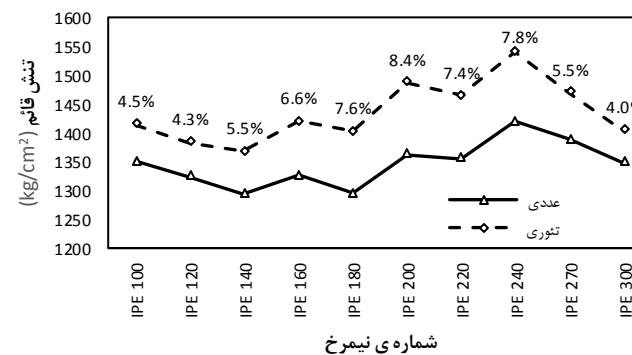
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)			تنش قائم(kg/cm ²)		درصد اختلاف نسبی
		تئوری	عددی	درصد اختلاف نسبی	تئوری	عددی	
IPE 100	50×50×5	0.87	0.87	-0.6%	848.6	994.7	14.7%
IPE 120	50×50×5	0.92	0.87	-5.0%	826.1	923.4	10.5%
IPE 140	60×60×6	0.61	0.69	11.0%	459.2	638.3	28.1%
IPE 160	60×60×6	0.89	0.94	5.4%	771.1	904.6	14.8%
IPE 180	80×80×8	0.80	0.94	15.2%	694.1	868.9	20.1%
IPE 200	80×80×8	0.87	1.01	13.7%	749.6	929.0	19.3%
IPE 220	80×80×8	0.95	0.99	4.7%	763.3	888.8	14.1%
IPE 240	100×100×10	0.93	1.05	10.8%	769.3	941.3	18.3%
IPE 270	100×100×10	1.01	1.00	-1.6%	757.8	855.9	11.5%
IPE 300	100×100×10	1.07	0.95	-12.6%	735.7	790.5	6.9%



شکل ۴-۷ مقایسه زاویه پیچش نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر

جدول ۴-۸ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر

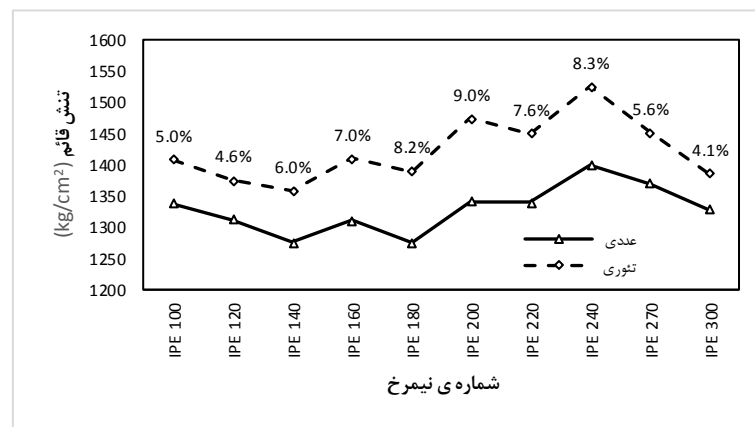
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)			تنش قائم(kg/cm ²)		درصد اختلاف نسبی
		تئوری	عددی	درصد اختلاف نسبی	تئوری	عددی	
IPE 100	50×50×5	4.53	2.70	-67.6%	1350.4	1287.2	-4.9%
IPE 120	50×50×5	4.82	2.67	-80.7%	1323.5	1221.4	-8.4%
IPE 140	60×60×6	4.71	2.67	-76.0%	1293.7	1179.6	-9.7%
IPE 160	60×60×6	5.05	2.80	-80.5%	1326.6	1216.6	-9.0%
IPE 180	80×80×8	4.92	2.78	-77.0%	1295.1	1178.2	-9.9%
IPE 200	80×80×8	5.24	2.99	-75.4%	1361.9	1256.6	-8.4%
IPE 220	80×80×8	5.52	2.89	-90.7%	1356.0	1212.0	-11.9%
IPE 240	100×100×10	5.60	3.06	-83.2%	1420.0	1281.4	-10.8%
IPE 270	100×100×10	5.88	2.84	-107.3%	1388.5	1179.1	-17.8%
IPE 300	100×100×10	5.98	2.65	-125.5%	1348.0	1096.9	-22.9%



شکل ۴-۸ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر

جدول ۹-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر

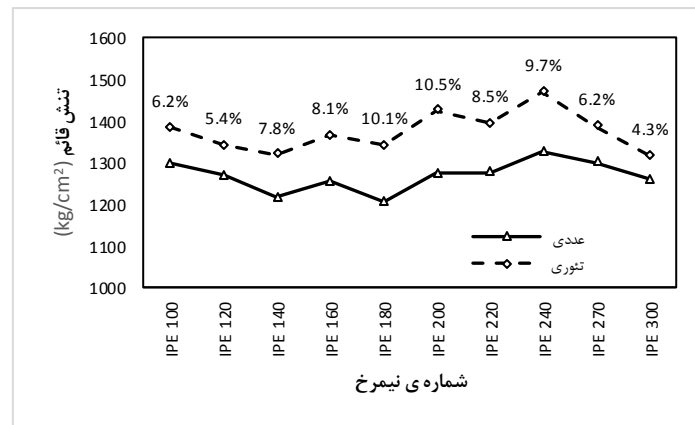
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)		تنش قائم (kg/cm ²)			
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	درصد اختلاف نسبی	
IPE 100	50×50×5	4.26	2.45	-73.6%	1338.5	1242.7	-7.7%
IPE 120	50×50×5	4.53	2.41	-87.8%	1312.4	1172.7	-11.9%
IPE 140	60×60×6	4.40	2.41	-82.5%	1276.3	1128.5	-13.1%
IPE 160	60×60×6	4.73	2.52	-87.4%	1310.7	1162.8	-12.7%
IPE 180	80×80×8	4.60	2.50	-83.6%	1275.3	1123.2	-13.5%
IPE 200	80×80×8	4.89	2.69	-81.7%	1341.4	1198.8	-11.9%
IPE 220	80×80×8	5.16	2.60	-98.6%	1339.4	1153.4	-16.1%
IPE 240	100×100×10	5.23	2.75	-90.2%	1399.4	1220.0	-14.7%
IPE 270	100×100×10	5.50	2.55	-116.1%	1369.8	1118.1	-22.5%
IPE 300	100×100×10	5.60	2.38	-135.3%	1328.8	1037.2	-28.1%



شکل ۹-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر

جدول ۱۰-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر

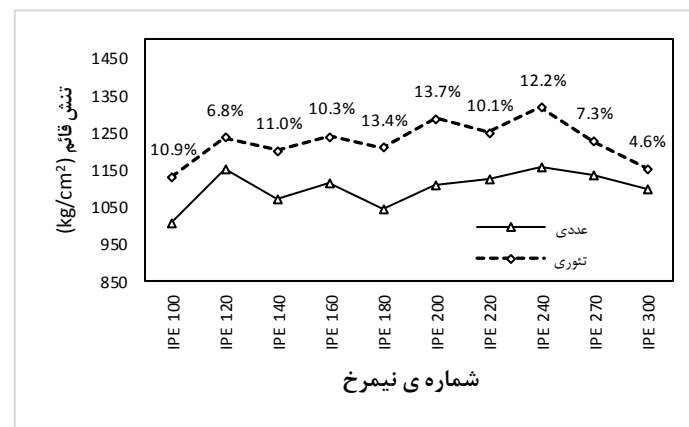
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)		تنش قائم (kg/cm ²)			
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	درصد اختلاف نسبی	
IPE 100	50×50×5	3.47	1.77	-95.8%	1296.3	1093.4	-18.6%
IPE 120	50×50×5	3.68	1.72	-113.4%	1268.5	1014.7	-25.0%
IPE 140	60×60×6	3.53	1.68	-109.4%	1215.0	908.1	-33.8%
IPE 160	60×60×6	3.81	1.79	-113.0%	1254.7	992.2	-26.5%
IPE 180	80×80×8	3.66	1.77	-107.2%	1205.1	951.2	-26.7%
IPE 200	80×80×8	3.91	1.90	-106.0%	1274.4	1017.5	-25.2%
IPE 220	80×80×8	4.13	1.83	-126.0%	1275.2	971.4	-31.3%
IPE 240	100×100×10	4.18	1.94	-115.7%	1325.7	1029.3	-28.8%
IPE 270	100×100×10	4.40	1.78	-147.5%	1300.6	931.7	-39.6%
IPE 300	100×100×10	4.48	1.65	-170.7%	1259.4	857.2	-46.9%



شکل ۱۰-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر

جدول ۴-۱۱ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر

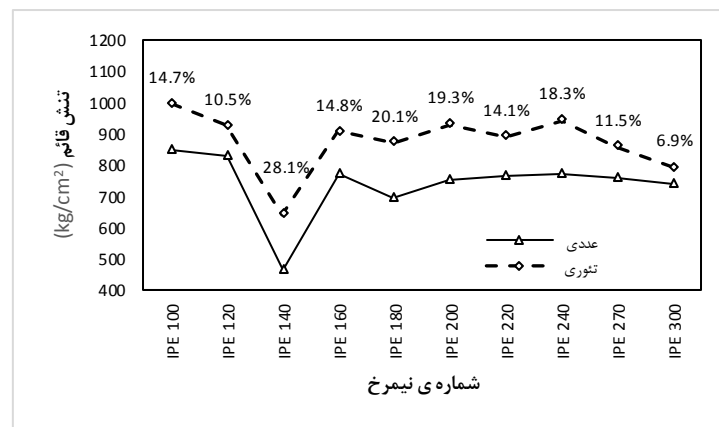
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)			
		تثوری عددی	تثوری عددی	درصد اختلاف			
				نسبی	نسبی		
IPE 100	50×50×5	2.11	0.89	-137.1%	1007.5	799.0	-26.1%
IPE 120	50×50×5	2.38	0.85	-180.4%	1151.5	720.6	-59.8%
IPE 140	60×60×6	2.22	0.83	-165.4%	1069.1	673.3	-58.8%
IPE 160	60×60×6	2.41	0.87	-177.5%	1112.8	688.4	-61.6%
IPE 180	80×80×8	3.66	0.85	-329.5%	1205.1	651.7	-84.9%
IPE 200	80×80×8	2.44	0.92	-165.4%	1110.2	699.7	-58.7%
IPE 220	80×80×8	2.60	0.88	-196.8%	1123.2	659.5	-70.3%
IPE 240	100×100×10	2.62	0.93	-181.2%	1157.7	700.9	-65.2%
IPE 270	100×100×10	2.77	0.85	-228.0%	1137.2	621.7	-82.9%
IPE 300	100×100×10	2.84	0.78	-263.5%	1099.4	564.2	-94.9%



شکل ۴-۱۱ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر

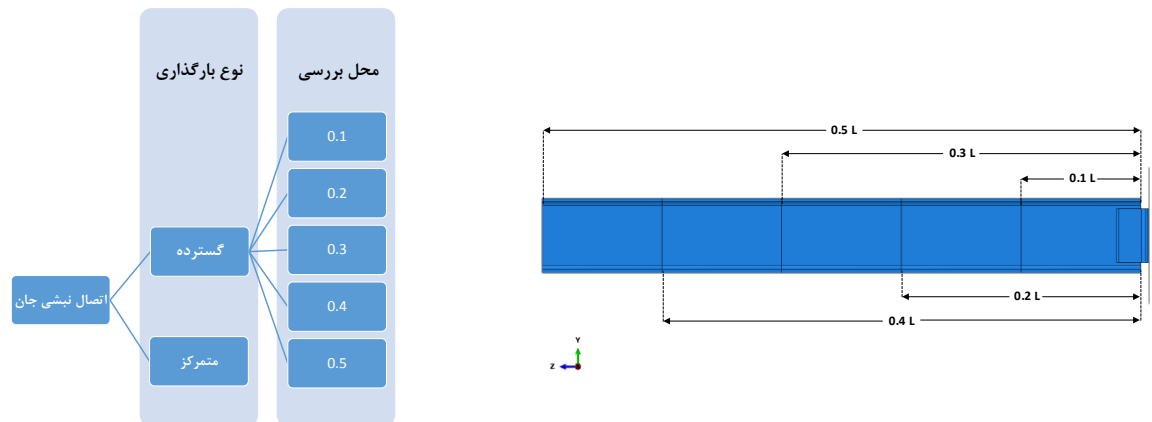
جدول ۴-۱۲ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر

شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)			
		تثوری عددی	تثوری عددی	درصد اختلاف			
				نسبی	نسبی		
IPE 100	50×50×5	0.87	0.19	-360.1%	848.6	347.6	-144.1%
IPE 120	50×50×5	0.92	0.18	-420.1%	826.1	301.0	-174.5%
IPE 140	60×60×6	0.61	0.17	-258.7%	459.2	274.0	-67.6%
IPE 160	60×60×6	0.89	0.18	-401.2%	771.1	278.3	-177.1%
IPE 180	80×80×8	0.80	0.17	-367.1%	694.1	258.8	-168.1%
IPE 200	80×80×8	0.87	0.19	-369.6%	749.6	279.4	-168.3%
IPE 220	80×80×8	0.95	0.18	-439.8%	763.3	258.7	-195.0%
IPE 240	100×100×10	0.93	0.19	-400.6%	769.3	276.1	-178.7%
IPE 270	100×100×10	1.01	0.17	-508.7%	757.8	238.1	-218.3%
IPE 300	100×100×10	1.07	0.15	-606.2%	735.7	212.1	-246.9%



شکل ۴-۱۲ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر

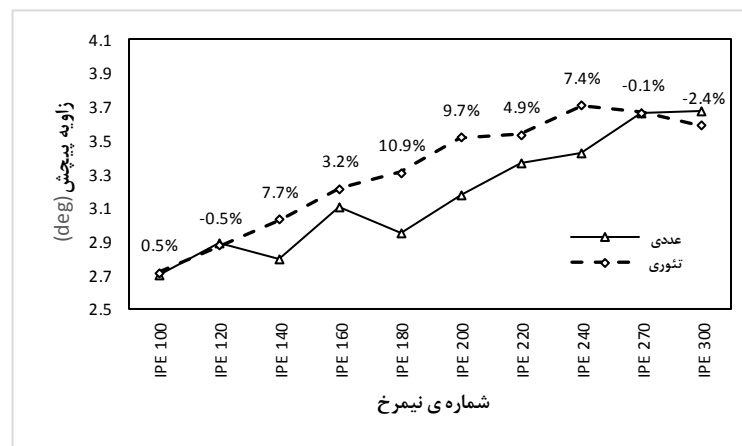
۲-۳-۴ بار گسترده



در این حالت بارگذاری گسترده در طول تیر و در تمامی ۱۰ اتصال نبشی جان که مشخصات آنها در جدول ۱-۳ تعیین گردید انجام شد و نتایج آن با اتصال گیردار پیچشی و اتصال مفصل پیچشی در قالب نمودار و جداول ذیل مقایسه شد. یادآوری می‌کنم میزان پیچش تیر و تنش قائم در محل‌های مشخص شده اندازه‌گیری و با پیچش و تنش قائم دو اتصال تئوری در همین محل مقایسه شده است.

جدول ۱۳-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی وسط تیر

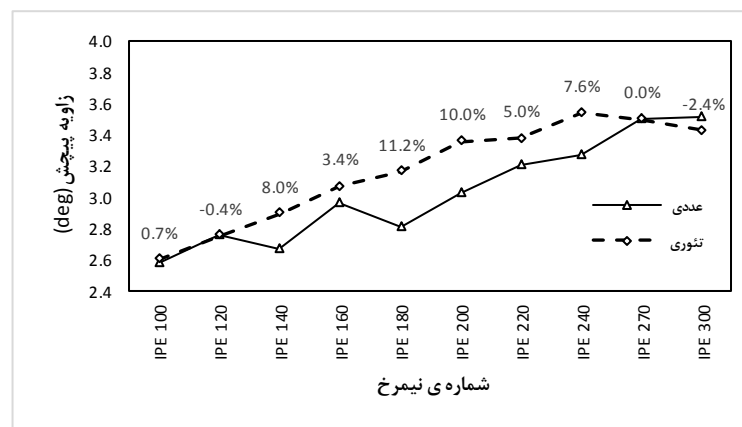
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیش (deg)		تنش قائم (kg/cm^2)				
		تئوری عددی	تئوری عددی	درصد اختلاف نسبی		نسبت تئوری عددی	نسبت تئوری عددی	
				تئوری عددی	تئوری عددی			
IPE 100	50x50x5	2.70	2.72	0.5%	408.4	425.4	0.96	4.0%
IPE 120	50x50x5	2.89	2.88	-0.5%	424.6	446.8	0.95	5.0%
IPE 140	60x60x6	2.80	3.03	7.7%	423.1	462.1	0.92	8.5%
IPE 160	60x60x6	3.11	3.21	3.2%	454.8	485.3	0.94	6.3%
IPE 180	80x80x8	2.95	3.31	10.9%	442.0	493.5	0.90	10.4%
IPE 200	80x80x8	3.18	3.52	9.7%	468.1	518.7	0.90	9.7%
IPE 220	80x80x8	3.36	3.54	4.9%	480.6	526.0	0.91	8.6%
IPE 240	100x100x10	3.43	3.71	7.4%	493.3	549.7	0.90	10.3%
IPE 270	100x100x10	3.67	3.67	-0.1%	515.7	549.4	0.94	6.1%
IPE 300	100x100x10	3.68	3.59	-2.4%	512.6	541.5	0.95	5.3%



شکل ۱۳-۴ مقایسه زاویه پیش نبشی جان و مفصل پیچشی- گسترده- بررسی وسط تیر

جدول ۱۴-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر

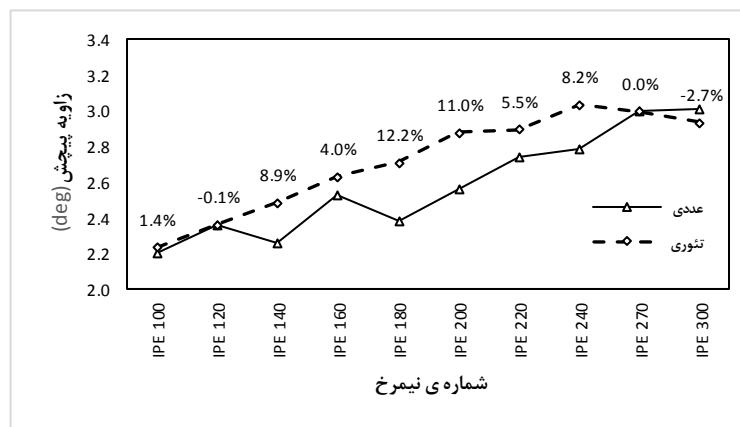
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیش (deg)		تنش قائم (kg/cm^2)				
		تئوری عددی	تئوری عددی	درصد اختلاف نسبی		نسبت تئوری عددی	نسبت تئوری عددی	
				تئوری عددی	تئوری عددی			
IPE 100	50x50x5	2.58	2.60	0.7%	396.3	416.7	0.95	4.9%
IPE 120	50x50x5	2.76	2.75	-0.4%	412.4	436.6	0.94	5.5%
IPE 140	60x60x6	2.66	2.89	8.0%	408.0	450.7	0.91	9.5%
IPE 160	60x60x6	2.96	3.07	3.4%	439.8	473.1	0.93	7.0%
IPE 180	80x80x8	2.81	3.16	11.2%	424.9	480.5	0.88	11.6%
IPE 200	80x80x8	3.02	3.36	10.0%	450.4	505.2	0.89	10.9%
IPE 220	80x80x8	3.20	3.38	5.0%	464.6	511.8	0.91	9.2%
IPE 240	100x100x10	3.27	3.54	7.6%	476.2	534.9	0.89	11.0%
IPE 270	100x100x10	3.50	3.50	0.0%	499.6	533.6	0.94	6.4%
IPE 300	100x100x10	3.51	3.42	-2.4%	496.7	525.4	0.95	5.5%



شکل ۱۴-۴ مقایسه زاویه پیش نبشی جان و مفصل پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر

جدول ۴-۱۵ مقایسه نبشی جان و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر

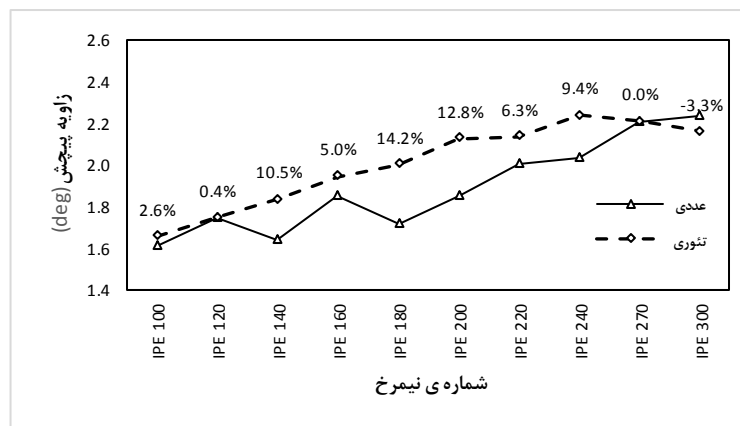
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیش(deg)		تنش قائم(kg/cm ²)				
		تثوری	عددی	درصد اختلاف		نسبت	تثوری	عددی
				نسبی	نسبی			
IPE 100	50×50×5	2.20	2.24	1.4%	355.6	387.5	0.92	8.2%
IPE 120	50×50×5	2.37	2.36	-0.1%	372.1	402.7	0.92	7.6%
IPE 140	60×60×6	2.27	2.49	8.9%	358.8	413.5	0.87	13.2%
IPE 160	60×60×6	2.53	2.64	4.0%	391.2	433.5	0.90	9.8%
IPE 180	80×80×8	2.38	2.71	12.2%	369.7	438.7	0.84	15.7%
IPE 200	80×80×8	2.57	2.88	11.0%	392.9	461.7	0.85	14.9%
IPE 220	80×80×8	2.74	2.90	5.5%	413.2	466.1	0.89	11.3%
IPE 240	100×100×10	2.79	3.04	8.2%	421.4	487.6	0.86	13.6%
IPE 270	100×100×10	3.00	3.00	0.0%	448.1	483.7	0.93	7.4%
IPE 300	100×100×10	3.01	2.94	-2.7%	446.5	474.4	0.94	5.9%



شکل ۴-۱۵ مقایسه زاویه پیش نبشی جان و مفصل پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر

جدول ۴-۱۶ مقایسه نبشی جان و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر

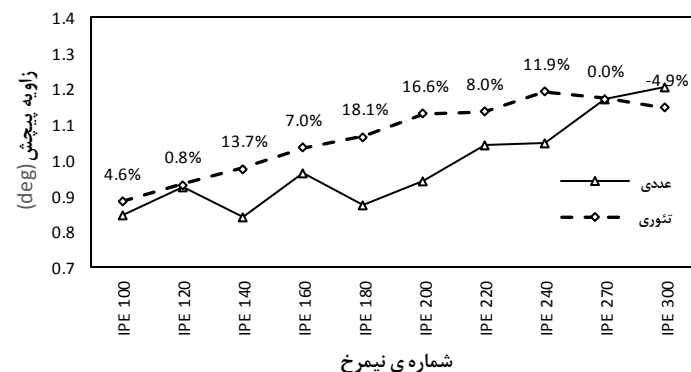
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیش(deg)		تنش قائم(kg/cm ²)				
		تثوری	عددی	درصد اختلاف		نسبت	تثوری	عددی
				نسبی	نسبی			
IPE 100	50×50×5	1.61	1.65	2.6%	271.2	326.8	0.83	17.0%
IPE 120	50×50×5	1.74	1.75	0.4%	291.5	334.9	0.87	12.9%
IPE 140	60×60×6	1.64	1.83	10.5%	262.8	340.9	0.77	22.9%
IPE 160	60×60×6	1.84	1.94	5.0%	296.6	356.6	0.83	16.8%
IPE 180	80×80×8	1.72	2.00	14.2%	263.7	358.7	0.74	26.5%
IPE 200	80×80×8	1.85	2.12	12.8%	282.2	378.2	0.75	25.4%
IPE 220	80×80×8	2.00	2.13	6.3%	314.9	379.5	0.83	17.0%
IPE 240	100×100×10	2.03	2.24	9.4%	315.5	397.5	0.79	20.6%
IPE 270	100×100×10	2.21	2.21	0.0%	351.2	390.7	0.90	10.1%
IPE 300	100×100×10	2.23	2.16	-3.3%	353.5	380.9	0.93	7.2%



شکل ۴-۱۶ مقایسه زاویه پیش نبشی جان و مفصل پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر

جدول ۱۷-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۱ طول تیر

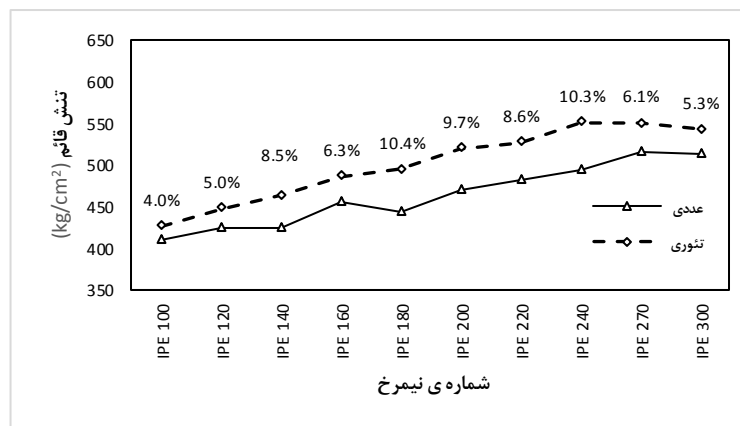
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)				
		نسبت	درصد اختلاف نسبی	تئوری عددی	تئوری عددی	نسبت	درصد اختلاف نسبی	
IPE 100	50×50×5	0.85	0.89	4.6%	105.6	212.0	0.50	50.2%
IPE 120	50×50×5	0.93	0.93	0.8%	139.7	212.9	0.66	34.4%
IPE 140	60×60×6	0.84	0.98	13.7%	90.0	214.0	0.42	57.9%
IPE 160	60×60×6	0.96	1.04	7.0%	126.6	223.2	0.57	43.2%
IPE 180	80×80×8	0.87	1.07	18.1%	77.1	222.6	0.35	65.4%
IPE 200	80×80×8	0.94	1.13	16.6%	85.6	235.3	0.36	63.6%
IPE 220	80×80×8	1.05	1.14	8.0%	140.4	234.2	0.60	40.1%
IPE 240	100×100×10	1.05	1.19	11.9%	124.5	245.8	0.51	49.3%
IPE 270	100×100×10	1.17	1.17	0.0%	181.7	238.4	0.76	23.8%
IPE 300	100×100×10	1.20	1.15	-4.9%	194.7	230.4	0.85	15.5%



شکل ۱۷-۴ مقایسه زاویه پیش نبشی جان و مفصل پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۱ طول تیر

جدول ۱۸-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی وسط تیر

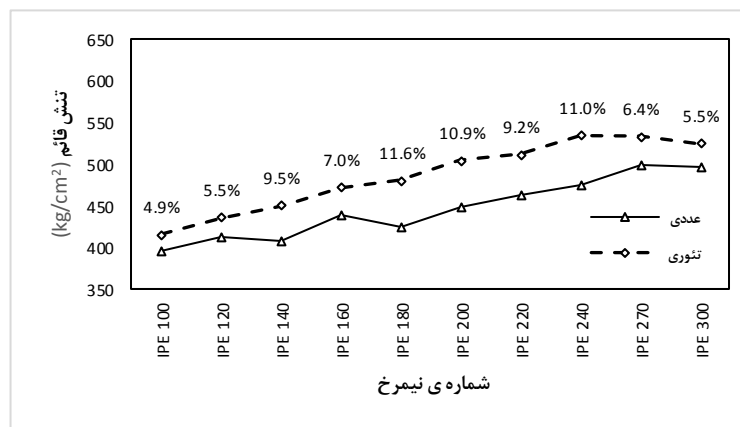
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)			
		نسبت	درصد اختلاف نسبی	تئوری عددی	تئوری عددی	نسبت	درصد اختلاف نسبی
IPE 100	50×50×5	2.70	1.35	-100.1%	408.4	331.5	-23.2%
IPE 120	50×50×5	2.89	1.33	-116.8%	424.6	328.4	-29.3%
IPE 140	60×60×6	2.80	1.34	-109.1%	423.1	325.5	-30.0%
IPE 160	60×60×6	3.11	1.40	-122.3%	0.0	337.9	100.0%
IPE 180	80×80×8	2.95	1.39	-112.2%	442.0	332.7	-32.8%
IPE 200	80×80×8	3.18	1.49	-112.8%	468.1	353.1	-32.6%
IPE 220	80×80×8	3.36	1.45	-132.6%	480.6	346.2	-38.8%
IPE 240	100×100×10	3.43	1.53	-124.5%	493.3	364.7	-35.3%
IPE 270	100×100×10	3.67	1.42	-158.6%	515.7	344.0	-49.9%
IPE 300	100×100×10	3.68	1.33	-177.0%	512.6	325.1	-57.7%



شکل ۱۸-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی- گسترده- بررسی وسط تیر

جدول ۱۹-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر

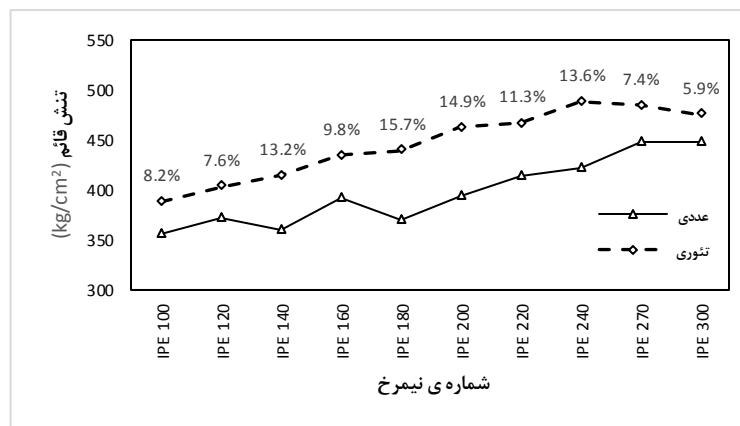
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)		تنش قائم(kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبی	نسبی
IPE 100	50×50×5	2.58	1.26	-105.0%	396.3	305.3	-29.8%
IPE 120	50×50×5	2.76	1.24	-122.6%	412.4	300.4	-37.3%
IPE 140	60×60×6	2.66	1.24	-114.4%	408.0	296.4	-37.6%
IPE 160	60×60×6	2.96	1.30	-128.2%	0.0	307.3	100.0%
IPE 180	80×80×8	2.81	1.29	-117.6%	424.9	301.8	-40.8%
IPE 200	80×80×8	3.02	1.38	-118.2%	450.4	320.5	-40.5%
IPE 220	80×80×8	3.20	1.34	-139.1%	464.6	313.4	-48.3%
IPE 240	100×100×10	3.27	1.42	-130.5%	476.2	330.3	-44.2%
IPE 270	100×100×10	3.50	1.31	-166.3%	499.6	310.2	-61.0%
IPE 300	100×100×10	3.51	1.23	-185.6%	496.7	292.3	-69.9%



شکل ۱۹-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر

جدول ۲۰-۴ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر

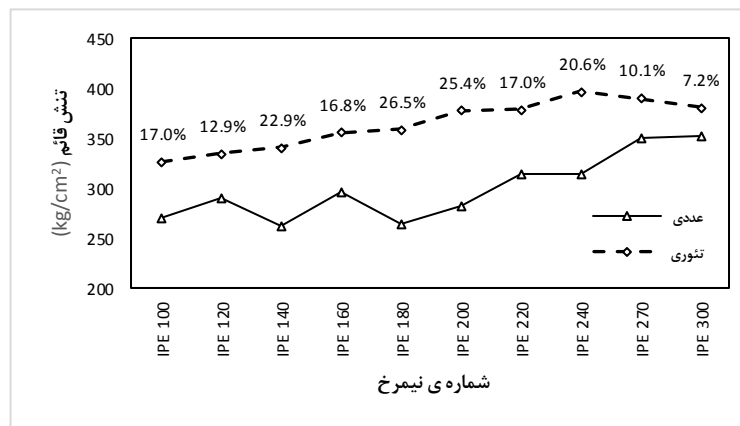
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)		تنش قائم(kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبی	نسبی
IPE 100	50×50×5	2.20	0.99	-122.7%	355.6	216.9	-64.0%
IPE 120	50×50×5	2.37	0.97	-143.4%	372.1	207.6	-79.2%
IPE 140	60×60×6	2.27	0.97	-133.4%	358.8	201.5	-78.1%
IPE 160	60×60×6	2.53	1.01	-149.4%	0.0	208.0	100.0%
IPE 180	80×80×8	2.38	1.01	-136.7%	369.7	202.0	-83.0%
IPE 200	80×80×8	2.57	1.08	-137.4%	392.9	215.2	-82.6%
IPE 220	80×80×8	2.74	1.04	-162.2%	413.2	208.1	-98.6%
IPE 240	100×100×10	2.79	1.11	-152.3%	421.4	219.9	-91.6%
IPE 270	100×100×10	3.00	1.02	-193.7%	448.1	203.0	-120.7%
IPE 300	100×100×10	3.01	0.95	-216.2%	446.5	189.1	-136.1%



شکل ۲۰-۴ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر

جدول ۴-۲۱ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر

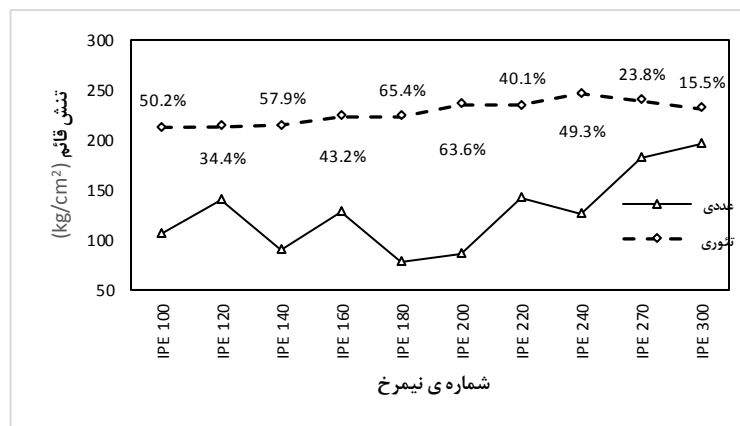
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)		تنش قائم(kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبی	نسبی
IPE 100	50×50×5	1.61	0.60	-167.3%	271.2	33.2	-717.2%
IPE 120	50×50×5	1.74	0.59	-196.1%	291.5	22.4	-1201.7%
IPE 140	60×60×6	1.64	0.58	-180.8%	262.8	16.1	-1529.5%
IPE 160	60×60×6	1.84	0.61	-202.6%	0.0	15.2	100.0%
IPE 180	80×80×8	1.72	0.60	-184.6%	263.7	11.0	-2302.0%
IPE 200	80×80×8	1.85	0.65	-185.6%	282.2	12.9	-2090.9%
IPE 220	80×80×8	2.00	0.62	-220.1%	314.9	8.6	-3552.2%
IPE 240	100×100×10	2.03	0.66	-206.7%	315.5	10.0	-3047.2%
IPE 270	100×100×10	2.21	0.61	-262.8%	351.2	3.4	-10136.8%
IPE 300	100×100×10	2.23	0.57	-293.7%	353.5	-0.3	106090.0%



شکل ۴-۲۱ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر

جدول ۴-۲۲ مقایسه نبشی جان و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۱ طول تیر

شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش(deg)		تنش قائم(kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبی	نسبی
IPE 100	50×50×5	0.85	0.20	-314.4%	105.6	-314.4	133.6%
IPE 120	50×50×5	0.93	0.20	-370.4%	139.7	-311.1	144.9%
IPE 140	60×60×6	0.84	0.19	-334.7%	90.0	-307.7	129.3%
IPE 160	60×60×6	0.96	0.20	-376.2%	0.0	-319.3	100.0%
IPE 180	80×80×8	0.87	0.20	-337.7%	77.1	-313.9	124.5%
IPE 200	80×80×8	0.94	0.21	-340.0%	85.6	-333.3	125.7%
IPE 220	80×80×8	1.05	0.21	-407.8%	140.4	-326.3	143.0%
IPE 240	100×100×10	1.05	0.22	-381.3%	124.5	-343.8	136.2%
IPE 270	100×100×10	1.17	0.20	-489.0%	181.7	-323.5	156.2%
IPE 300	100×100×10	1.20	0.18	-551.4%	194.7	-305.1	163.8%

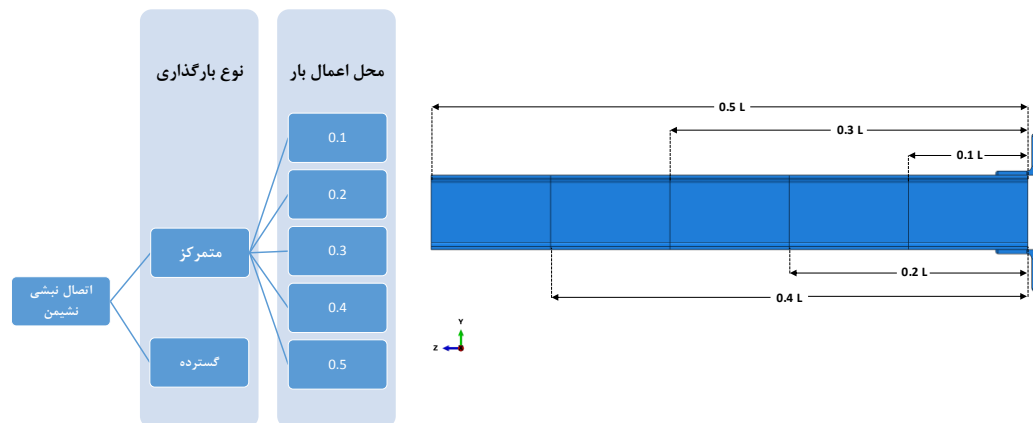


شکل ۴-۲۲ مقایسه تنش قائم نبشی جان و مفصل پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۱ طول تیر

۴-۴ اتصال نبشی نشیمن (نبشی فوقانی تحتانی)

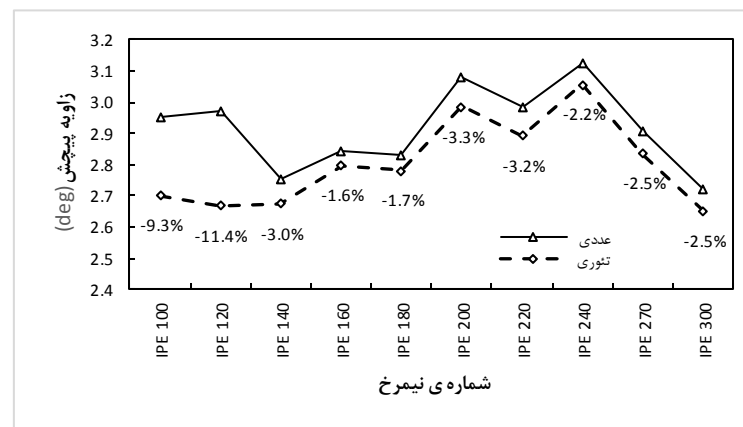
۱-۴-۴ بار متمرکز

در این حالت بارگذاری متمرکز در ۵ مقطع مشخص شده در تمامی ۱۰ اتصال نبشی جان که مشخصات آن‌ها در جدول ۲-۳ تعیین گردید، انجام شد و نتایج آن با اتصال گیردار پیچشی و اتصال مفصل پیچشی در قالب نمودار و جداول ذیل مقایسه شد. یادآوری می‌کنم میزان پیچش تیر و تنش قائم در محل اعمال بار اندازه‌گیری و با پیچش و تنش قائم دو اتصال تئوری در همین محل مقایسه شده است.



جدول ۲۳-۴ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر

شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm^2)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبی	نسبی
IPE 100	80×80×8	2.95	2.70	1184.8	1287.2	-9.3%	8.0%
IPE 120	80×80×8	2.97	2.67	1086.4	1221.4	-11.4%	11.1%
IPE 140	100×100×10	2.75	2.67	1080.6	1179.6	-3.0%	8.4%
IPE 160	100×100×10	2.84	2.80	1111.8	1216.6	-1.6%	8.6%
IPE 180	100×100×10	2.83	2.78	1087.2	1178.2	-1.7%	7.7%
IPE 200	100×100×10	3.08	2.99	1176.0	1256.6	-3.3%	6.4%
IPE 220	100×100×10	2.98	2.89	1136.1	1212.0	-3.2%	6.3%
IPE 240	120×120×12	3.12	3.06	1207.7	1281.4	-2.2%	5.8%
IPE 270	120×120×12	2.91	2.84	1122.6	1179.1	-2.5%	4.8%
IPE 300	120×120×12	2.72	2.65	1047.8	1096.9	-2.5%	4.5%



شکل ۲۳-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر وسط تیر

جدول ۲۴-۴ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر

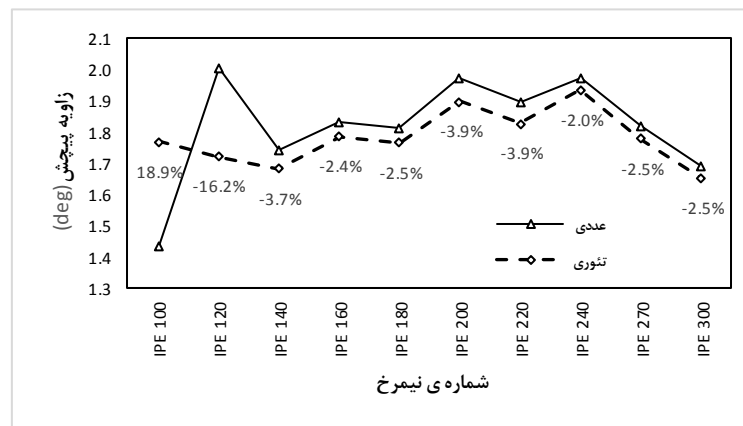
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm^2)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبی	نسبی
IPE 100	80×80×8	2.40	2.45	1134.6	1242.7	1.9%	8.7%
IPE 120	80×80×8	2.71	2.41	1039.0	1172.7	-12.5%	11.4%
IPE 140	100×100×10	2.49	2.41	1028.5	1128.5	-3.1%	8.9%
IPE 160	100×100×10	2.57	2.52	1060.1	1162.8	-1.8%	8.8%
IPE 180	100×100×10	2.55	2.50	1033.8	1123.2	-1.8%	8.0%
IPE 200	100×100×10	2.78	2.69	1118.7	1198.8	-3.3%	6.7%
IPE 220	100×100×10	2.69	2.60	1079.4	1153.4	-3.4%	6.4%
IPE 240	120×120×12	2.81	2.75	1146.9	1220.0	-2.2%	6.0%
IPE 270	120×120×12	2.61	2.55	1062.5	1118.1	-2.5%	5.0%
IPE 300	120×120×12	2.44	2.38	988.8	1037.2	-2.5%	4.7%



شکل ۲۴-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۴ طول تیر

جدول ۴-۲۵ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر

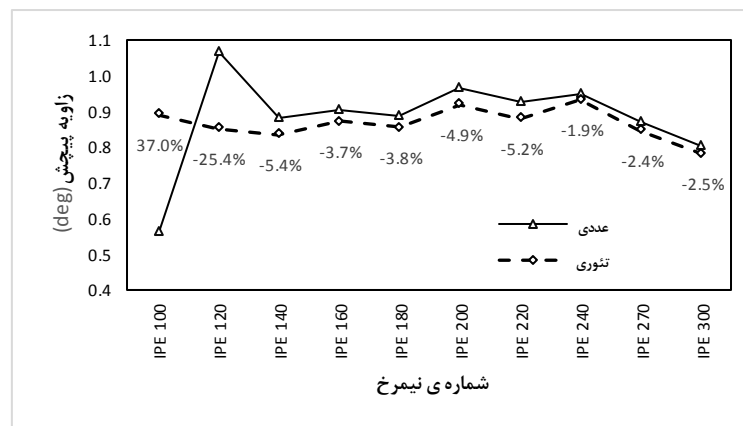
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	درصد اختلاف نسبی	
						نسبی	نسبی
IPE 100	80×80×8	1.44	1.77	18.9%	975.3	1093.4	10.8%
IPE 120	80×80×8	2.00	1.72	-16.2%	888.7	1014.7	12.4%
IPE 140	100×100×10	1.75	1.68	-3.7%	816.0	908.1	10.1%
IPE 160	100×100×10	1.83	1.79	-2.4%	896.8	992.2	9.6%
IPE 180	100×100×10	1.81	1.77	-2.5%	869.2	951.2	8.6%
IPE 200	100×100×10	1.97	1.90	-3.9%	942.3	1017.5	7.4%
IPE 220	100×100×10	1.90	1.83	-3.9%	902.7	971.4	7.1%
IPE 240	120×120×12	1.98	1.94	-2.0%	958.4	1029.3	6.9%
IPE 270	120×120×12	1.82	1.78	-2.5%	879.2	931.7	5.6%
IPE 300	120×120×12	1.70	1.65	-2.5%	811.8	857.2	5.3%



شکل ۴-۲۵ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر ۰/۳ طول تیر

جدول ۴-۲۶ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر

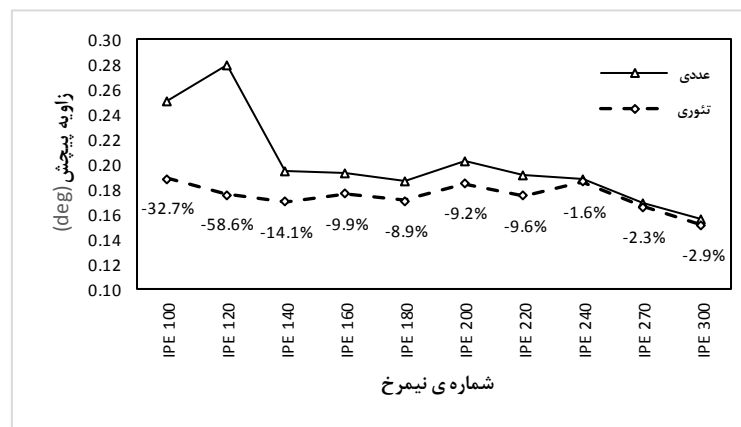
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	درصد اختلاف نسبی	
						نسبی	نسبی
IPE 100	80×80×8	0.56	0.89	37.0%	678.4	799.0	15.1%
IPE 120	80×80×8	1.07	0.85	-25.4%	616.7	720.6	14.4%
IPE 140	100×100×10	0.88	0.83	-5.4%	578.7	673.3	14.0%
IPE 160	100×100×10	0.90	0.87	-3.7%	604.9	688.4	12.1%
IPE 180	100×100×10	0.88	0.85	-3.8%	582.4	651.7	10.6%
IPE 200	100×100×10	0.96	0.92	-4.9%	633.7	699.7	9.4%
IPE 220	100×100×10	0.92	0.88	-5.2%	603.3	659.5	8.5%
IPE 240	120×120×12	0.95	0.93	-1.9%	638.2	700.9	9.0%
IPE 270	120×120×12	0.87	0.85	-2.4%	576.9	621.7	7.2%
IPE 300	120×120×12	0.80	0.78	-2.5%	527.4	564.2	6.5%



شکل ۴-۲۶ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر ۰/۲ طول تیر

جدول ۴-۲۷ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر

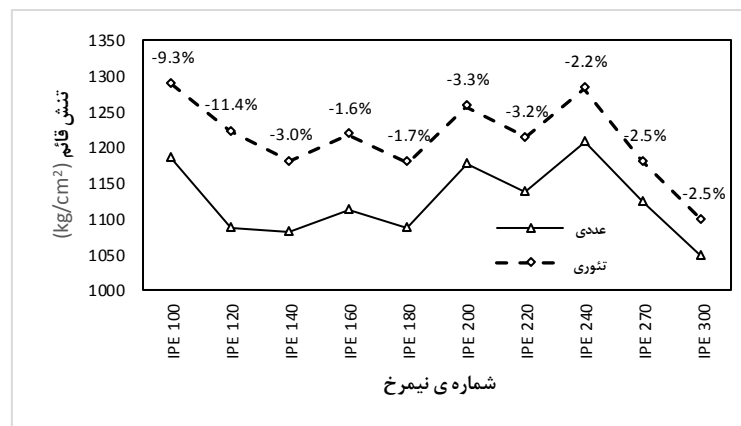
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	درصد اختلاف نسبی	
						تئوری	عددی
IPE 100	80×80×8	0.25	0.19	347.6	269.1	22.6%	-32.7%
IPE 120	80×80×8	0.28	0.18	301.0	250.6	16.7%	-58.6%
IPE 140	100×100×10	0.19	0.17	274.0	210.8	23.1%	-14.1%
IPE 160	100×100×10	0.19	0.18	278.3	223.5	19.7%	-9.9%
IPE 180	100×100×10	0.19	0.17	258.8	214.6	17.1%	-8.9%
IPE 200	100×100×10	0.20	0.19	279.4	237.5	15.0%	-9.2%
IPE 220	100×100×10	0.19	0.18	258.7	225.0	13.0%	-9.6%
IPE 240	120×120×12	0.19	0.19	276.1	234.2	15.2%	-1.6%
IPE 270	120×120×12	0.17	0.17	238.1	210.6	11.6%	-2.3%
IPE 300	120×120×12	0.16	0.15	212.1	192.6	9.2%	-2.9%



شکل ۴-۲۷ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر ۰/۱ طول تیر

جدول ۴-۲۸ مقایسه نبشی نشیمن و مفصل پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی وسط تیر

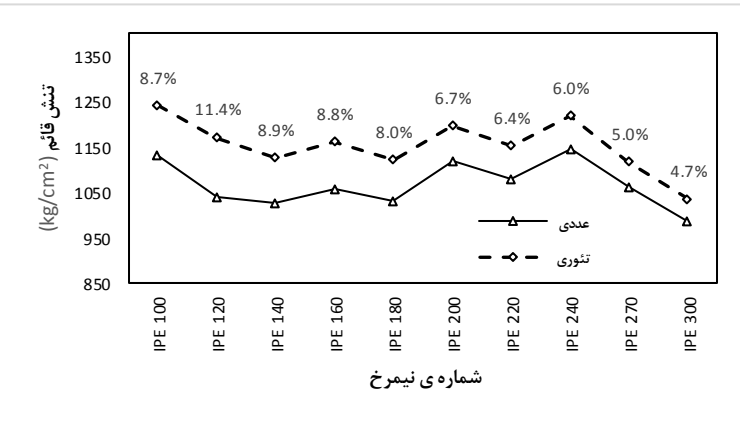
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)		درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	درصد اختلاف نسبی	
						تئوری	عددی
IPE 100	80×80×8	2.95	4.55	1414.4	1184.8	16.2%	-9.3%
IPE 120	80×80×8	2.97	4.78	1383.4	1086.4	21.5%	-11.4%
IPE 140	100×100×10	2.75	5.01	1368.3	1080.6	21.0%	-3.0%
IPE 160	100×100×10	2.84	5.31	1420.0	1111.8	21.7%	-1.6%
IPE 180	100×100×10	2.83	5.46	1402.3	1087.2	22.5%	-1.7%
IPE 200	100×100×10	3.08	5.80	1486.8	1176.0	20.9%	-3.3%
IPE 220	100×100×10	2.98	5.82	1463.8	1136.1	22.4%	-3.2%
IPE 240	120×120×12	3.12	6.10	1540.0	1207.7	21.6%	-2.2%
IPE 270	120×120×12	2.91	6.01	1469.1	1122.6	23.6%	-2.5%
IPE 300	120×120×12	2.72	5.87	1404.5	1047.8	25.4%	-2.5%



شکل ۴-۲۸ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر وسط تیر

جدول ۴-۲۹ مقایسه نبشی نشیمن و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۴ طول تیر

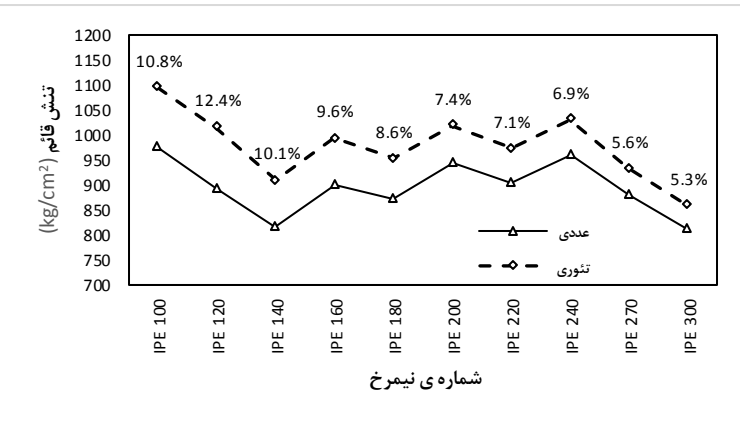
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)		درصد اختلاف نسبی	درصد اختلاف نسبی
		تئوری	عددی	تئوری	عددی		
IPE 100	80×80×8	2.40	4.28	1134.6	1408.7	19.5%	43.9%
IPE 120	80×80×8	2.71	4.50	1039.0	1375.4	24.5%	39.7%
IPE 140	100×100×10	2.49	4.71	1028.5	1358.4	24.3%	47.1%
IPE 160	100×100×10	2.57	4.98	1060.1	1409.2	24.8%	48.5%
IPE 180	100×100×10	2.55	5.12	1033.8	1389.8	25.6%	50.2%
IPE 200	100×100×10	2.78	5.44	1118.7	1474.2	24.1%	48.9%
IPE 220	100×100×10	2.69	5.45	1079.4	1449.5	25.5%	50.7%
IPE 240	120×120×12	2.81	5.72	1146.9	1525.4	24.8%	50.9%
IPE 270	120×120×12	2.61	5.62	1062.5	1451.8	26.8%	53.6%
IPE 300	120×120×12	2.44	5.48	988.8	1385.4	28.6%	55.6%



شکل ۴-۲۹ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۴ طول تیر

جدول ۴-۳۰ مقایسه نبشی نشیمن و مفصل پیچشی - محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۳ طول تیر

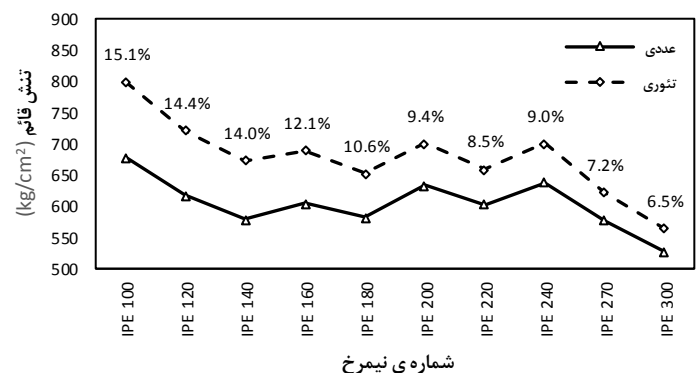
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)		درصد اختلاف نسبی	درصد اختلاف نسبی
		تئوری	عددی	تئوری	عددی		
IPE 100	80×80×8	1.44	3.51	975.3	1382.5	29.5%	59.1%
IPE 120	80×80×8	2.00	3.66	888.7	1341.0	33.7%	45.3%
IPE 140	100×100×10	1.75	3.81	816.0	1317.7	38.1%	54.2%
IPE 160	100×100×10	1.83	4.03	896.8	1365.1	34.3%	54.6%
IPE 180	100×100×10	1.81	4.13	869.2	1340.8	35.2%	56.1%
IPE 200	100×100×10	1.97	4.39	942.3	1424.0	33.8%	55.1%
IPE 220	100×100×10	1.90	4.39	902.7	1394.0	35.2%	56.7%
IPE 240	120×120×12	1.98	4.61	958.4	1468.5	34.7%	57.1%
IPE 270	120×120×12	1.82	4.50	879.2	1387.0	36.6%	59.5%
IPE 300	120×120×12	1.70	4.38	811.8	1316.1	38.3%	61.2%



شکل ۴-۳۰ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی - محل اعمال لنگر ۰/۳ طول تیر

جدول ۴-۳۱ مقایسه نبشی نشیمن و مفصل پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۲ طول تیر

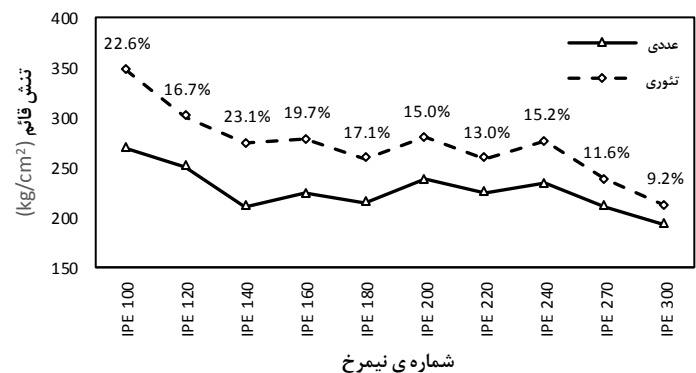
تنش قائم (kg/cm ²)		زاویه پیچش (deg)		نسبت		0.2	
تثوری	عددی	نسب	تثوری	عددی	شماره نبشی	شماره ی نیمرخ	درصد اختلاف نسبی
1130.9	678.4	74.0%	2.16	0.56	80×80×8	IPE 100	40.0%
1235.7	616.7	54.9%	2.36	1.07	80×80×8	IPE 120	50.1%
1201.1	578.7	64.0%	2.44	0.88	100×100×10	IPE 140	51.8%
1240.8	604.9	65.0%	2.57	0.90	100×100×10	IPE 160	51.3%
1340.8	582.4	78.6%	4.13	0.88	100×100×10	IPE 180	56.6%
1286.9	633.7	65.5%	2.79	0.96	100×100×10	IPE 200	50.8%
1249.1	603.3	66.7%	2.77	0.92	100×100×10	IPE 220	51.7%
1318.5	638.2	67.5%	2.91	0.95	120×120×12	IPE 240	51.6%
1227.4	576.9	69.3%	2.82	0.87	120×120×12	IPE 270	53.0%
1152.5	527.4	70.6%	2.72	0.80	120×120×12	IPE 300	54.2%



شکل ۴-۳۱ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر ۰/۲ طول تیر

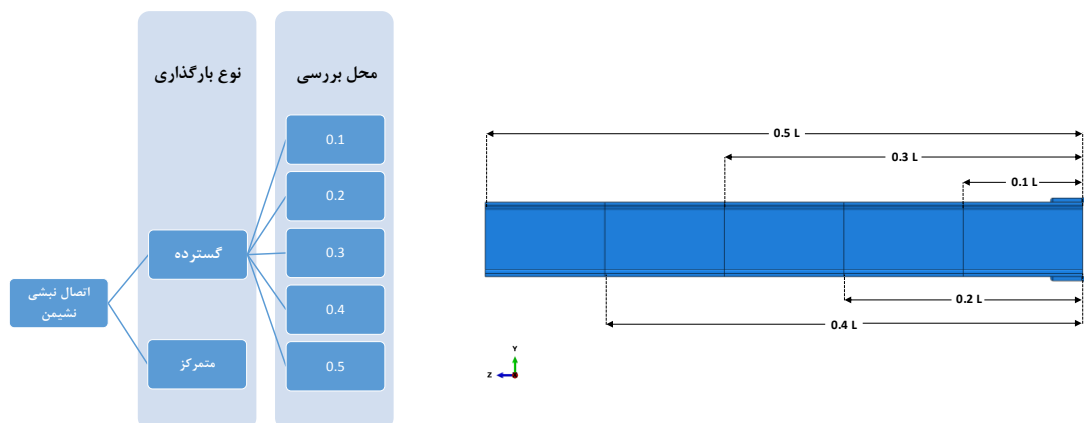
جدول ۴-۳۲ مقایسه نبشی نشیمن و مفصل پیچشی- محل اعمال لنگر پیچشی ۰/۱ طول تیر

تنش قائم (kg/cm ²)		زاویه پیچش (deg)		نسبت		0.1	
تثوری	عددی	نسب	تثوری	عددی	شماره نبشی	شماره ی نیمرخ	درصد اختلاف نسبی
994.7	269.1	71.0%	0.87	0.25	80×80×8	IPE 100	73.0%
923.4	250.6	68.0%	0.87	0.28	80×80×8	IPE 120	72.9%
638.3	210.8	71.7%	0.69	0.19	100×100×10	IPE 140	67.0%
904.6	223.5	79.3%	0.94	0.19	100×100×10	IPE 160	75.3%
868.9	214.6	80.2%	0.94	0.19	100×100×10	IPE 180	75.3%
929.0	237.5	80.0%	1.01	0.20	100×100×10	IPE 200	74.4%
888.8	225.0	80.6%	0.99	0.19	100×100×10	IPE 220	74.7%
941.3	234.2	81.9%	1.05	0.19	120×120×12	IPE 240	75.1%
855.9	210.6	82.9%	1.00	0.17	120×120×12	IPE 270	75.4%
790.5	192.6	83.6%	0.95	0.16	120×120×12	IPE 300	75.6%



شکل ۴-۳۲ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- محل اعمال لنگر ۰/۱ طول تیر

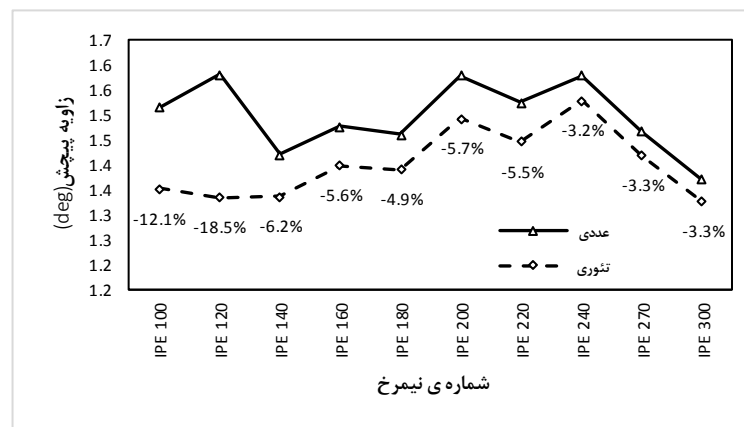
۲-۴-۴ بار گسترده



در این حالت، بارگذاری گسترده در طول تیر و در تمامی ۱۰ اتصال نبشی جان که مشخصات آنها در جدول ۲-۳ تعیین گردید، انجام شد و نتایج آن با اتصال گیردار پیچشی و اتصال مفصل پیچشی در قالب نمودار و جداول ذیل مقایسه شد. یادآوری می‌کنم میزان پیچش تیر و تنش قائم در محل‌های مشخص شده اندازه‌گیری و با پیچش و تنش قائم دو اتصال تئوری در همین محل مقایسه شده است.

جدول ۳۳-۴ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی وسط تیر

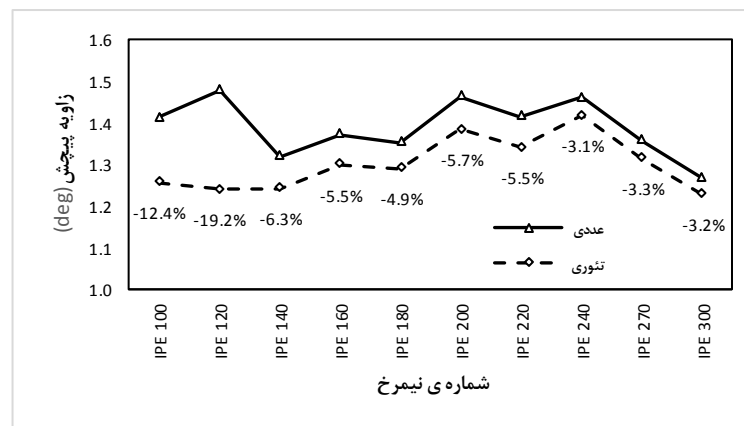
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)				درصد اختلاف نسبی
		تئوری	عددی	درصد اختلاف نسبی		نسبت تئوری	نسبت عددی	
				تئوری	عددی			
IPE 100	80×80×8	1.52	1.35	-12.1%	284.0	331.5	0.86	14.3%
IPE 120	80×80×8	1.58	1.33	-18.5%	276.2	328.4	0.84	15.9%
IPE 140	100×100×10	1.42	1.34	-6.2%	290.7	325.5	0.89	10.7%
IPE 160	100×100×10	1.48	1.40	-5.6%	312.2	337.9	0.92	7.6%
IPE 180	100×100×10	1.46	1.39	-4.9%	308.2	332.7	0.93	7.4%
IPE 200	100×100×10	1.58	1.49	-5.7%	330.1	353.1	0.93	6.5%
IPE 220	100×100×10	1.52	1.45	-5.5%	323.0	346.2	0.93	6.7%
IPE 240	120×120×12	1.58	1.53	-3.2%	339.5	364.7	0.93	6.9%
IPE 270	120×120×12	1.47	1.42	-3.3%	323.4	344.0	0.94	6.0%
IPE 300	120×120×12	1.37	1.33	-3.3%	305.8	325.1	0.94	5.9%



شکل ۳۳-۴ مقایسه زاویه پیش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی وسط تیر

جدول ۳۴-۴ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر

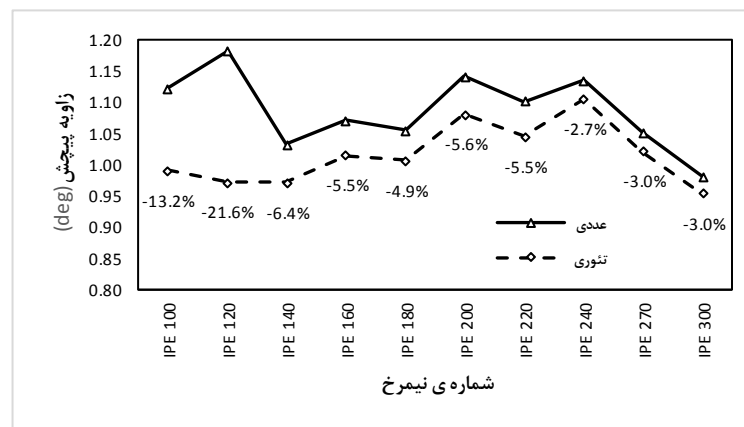
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)				درصد اختلاف نسبی
		تئوری	عددی	درصد اختلاف نسبی		نسبت تئوری	نسبت عددی	
				تئوری	عددی			
IPE 100	80×80×8	1.41	1.26	-12.4%	258.0	305.3	0.85	15.5%
IPE 120	80×80×8	1.48	1.24	-19.2%	250.3	300.4	0.83	16.7%
IPE 140	100×100×10	1.32	1.24	-6.3%	261.8	296.4	0.88	11.7%
IPE 160	100×100×10	1.37	1.30	-5.5%	281.8	307.3	0.92	8.3%
IPE 180	100×100×10	1.35	1.29	-4.9%	277.6	301.8	0.92	8.0%
IPE 200	100×100×10	1.46	1.38	-5.7%	297.7	320.5	0.93	7.1%
IPE 220	100×100×10	1.41	1.34	-5.5%	290.9	313.4	0.93	7.2%
IPE 240	120×120×12	1.46	1.42	-3.1%	305.5	330.3	0.93	7.5%
IPE 270	120×120×12	1.36	1.31	-3.3%	290.0	310.2	0.93	6.5%
IPE 300	120×120×12	1.27	1.23	-3.2%	273.6	292.3	0.94	6.4%



شکل ۳۴-۴ مقایسه زاویه پیش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر

جدول ۳۵-۴ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر

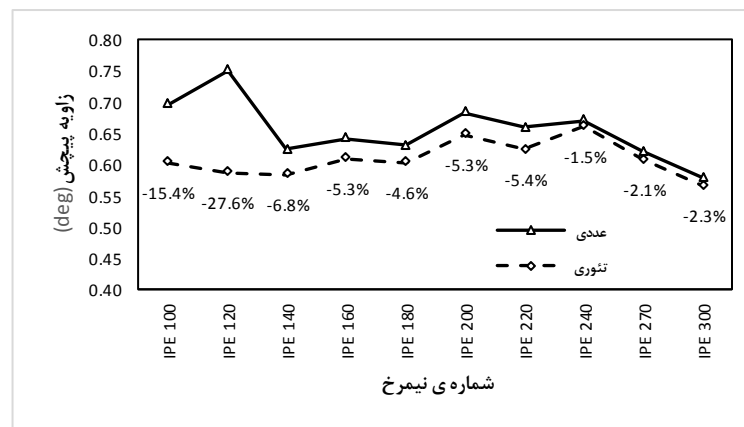
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)				
		تئوری	عددی	درصد اختلاف		نسبت تئوری	نسبت عددی	درصد اختلاف نسبی
				نسبی	نسبی			
IPE 100	80×80×8	1.12	0.99	-13.2%	171.0	216.9	0.79	21.2%
IPE 120	80×80×8	1.18	0.97	-21.6%	165.2	207.6	0.80	20.4%
IPE 140	100×100×10	1.03	0.97	-6.4%	167.9	201.5	0.83	16.7%
IPE 160	100×100×10	1.07	1.01	-5.5%	183.2	208.0	0.88	11.9%
IPE 180	100×100×10	1.06	1.01	-4.9%	179.1	202.0	0.89	11.3%
IPE 200	100×100×10	1.14	1.08	-5.6%	193.2	215.2	0.90	10.3%
IPE 220	100×100×10	1.10	1.04	-5.5%	187.8	208.1	0.90	9.7%
IPE 240	120×120×12	1.13	1.11	-2.7%	196.2	219.9	0.89	10.8%
IPE 270	120×120×12	1.05	1.02	-3.0%	184.2	203.0	0.91	9.3%
IPE 300	120×120×12	0.98	0.95	-3.0%	172.2	189.1	0.91	9.0%



شکل ۳۵-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر

جدول ۳۶-۴ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر

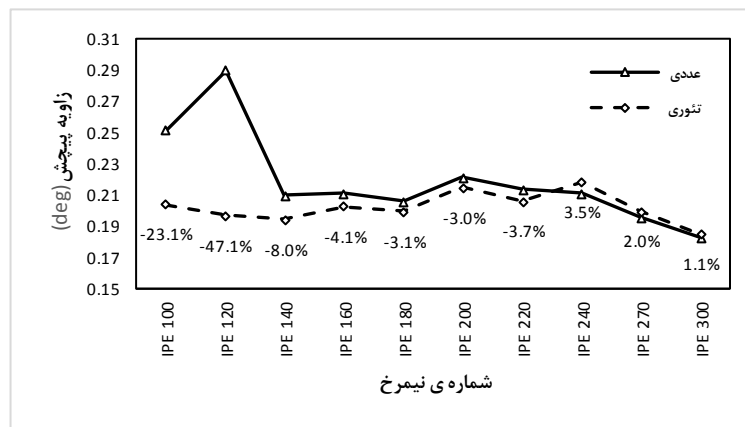
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)				
		تئوری	عددی	درصد اختلاف		نسبت تئوری	نسبت عددی	درصد اختلاف نسبی
				نسبی	نسبی			
IPE 100	80×80×8	0.70	0.60	-15.4%	-8.3	33.2	-0.25	124.9%
IPE 120	80×80×8	0.75	0.59	-27.6%	-4.2	22.4	-0.19	118.6%
IPE 140	100×100×10	0.62	0.58	-6.8%	-14.3	16.1	-0.89	189.0%
IPE 160	100×100×10	0.64	0.61	-5.3%	-7.0	15.2	-0.46	146.3%
IPE 180	100×100×10	0.63	0.60	-4.6%	-8.7	11.0	-0.79	179.2%
IPE 200	100×100×10	0.68	0.65	-5.3%	-6.7	12.9	-0.52	151.8%
IPE 220	100×100×10	0.66	0.62	-5.4%	-7.0	8.6	-0.81	181.3%
IPE 240	120×120×12	0.67	0.66	-1.5%	-10.9	10.0	-1.08	208.3%
IPE 270	120×120×12	0.62	0.61	-2.1%	-12.3	3.4	-3.59	459.0%
IPE 300	120×120×12	0.58	0.57	-2.3%	-13.4	-0.3	40.24	-3924.3%



شکل ۳۶-۴ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر

جدول ۴-۳۷ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۸ طول تیر

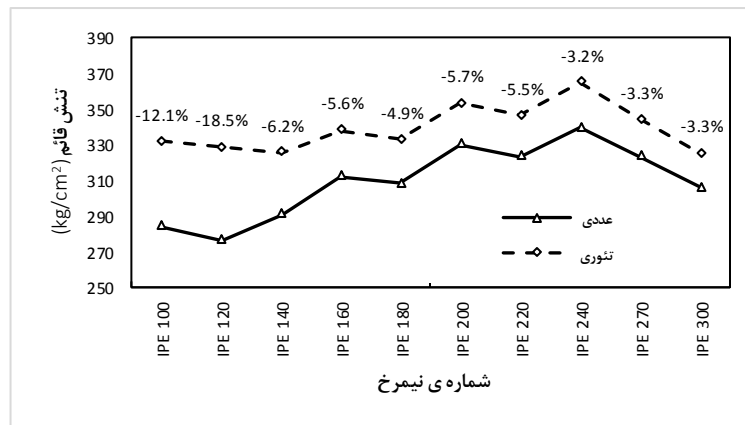
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)			درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبت	نسبی	نسبی
IPE 100	80×80×8	0.25	0.20	-340.0	-314.4	1.08	-8.2%	-23.1%
IPE 120	80×80×8	0.29	0.20	-305.5	-311.1	0.98	1.8%	-47.1%
IPE 140	100×100×10	0.21	0.19	-328.7	-307.7	1.07	-6.8%	-8.0%
IPE 160	100×100×10	0.21	0.20	-333.4	-319.3	1.04	-4.4%	-4.1%
IPE 180	100×100×10	0.21	0.20	-325.3	-313.9	1.04	-3.6%	-3.1%
IPE 200	100×100×10	0.22	0.21	-345.8	-333.3	1.04	-3.7%	-3.0%
IPE 220	100×100×10	0.21	0.21	-332.0	-326.3	1.02	-1.8%	-3.7%
IPE 240	120×120×12	0.21	0.22	-357.5	-343.8	1.04	-4.0%	3.5%
IPE 270	120×120×12	0.20	0.20	-331.9	-323.5	1.03	-2.6%	2.0%
IPE 300	120×120×12	0.18	0.18	-310.0	-305.1	1.02	-1.6%	1.1%



شکل ۴-۳۷ مقایسه زاویه پیچش نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۸ طول تیر

جدول ۴-۳۸ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی وسط تیر

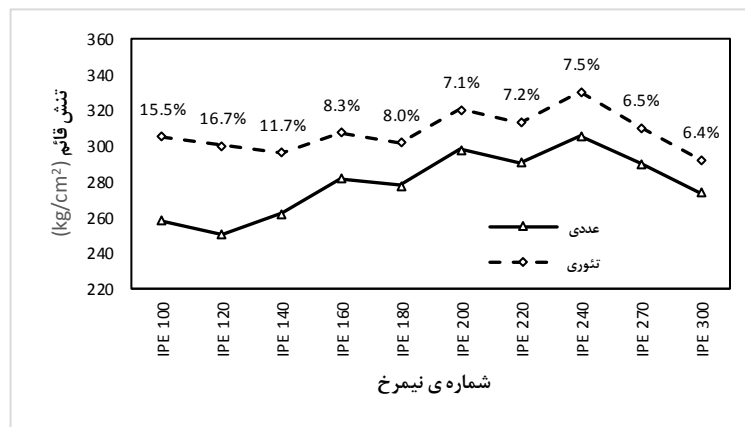
شماره ی نیمرخ	نسبت	زاویه پیچش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)			درصد اختلاف	
		تئوری	عددی	تئوری	عددی	نسبت	نسبی	نسبی
IPE 100	80×80×8	1.52	2.72	284.0	425.4	33.2%	-12.1%	-12.1%
IPE 120	80×80×8	1.58	2.88	276.2	446.8	38.2%	-18.5%	-18.5%
IPE 140	100×100×10	1.42	3.03	290.7	462.1	37.1%	-6.2%	-6.2%
IPE 160	100×100×10	1.48	3.21	312.2	485.3	35.7%	-5.6%	-5.6%
IPE 180	100×100×10	1.46	3.31	308.2	493.5	37.5%	-4.9%	-4.9%
IPE 200	100×100×10	1.58	3.52	330.1	518.7	36.4%	-5.7%	-5.7%
IPE 220	100×100×10	1.52	3.54	323.0	526.0	38.6%	-5.5%	-5.5%
IPE 240	120×120×12	1.58	3.71	339.5	549.7	38.2%	-3.2%	-3.2%
IPE 270	120×120×12	1.47	3.67	323.4	549.4	41.1%	-3.3%	-3.3%
IPE 300	120×120×12	1.37	3.59	305.8	541.5	43.5%	-3.3%	-3.3%



شکل ۴-۳۸ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی وسط تیر

جدول ۴-۳۹ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر

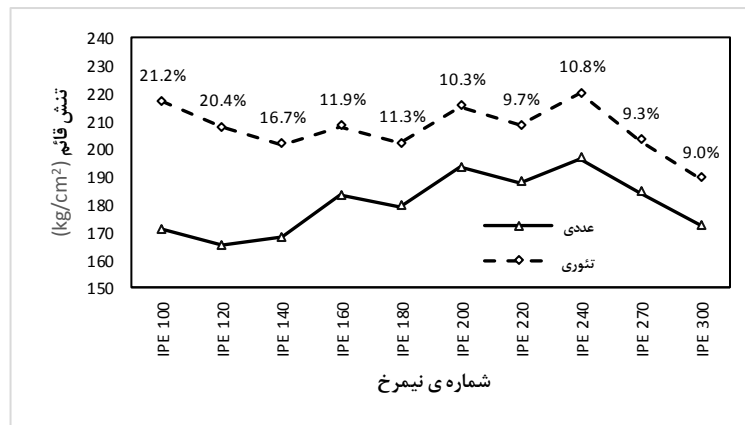
تنش قائم (kg/cm ²)		زاویه پیش (deg)		نسبت		0.4	
درصد اختلاف نسبی		درصد اختلاف نسبی		تئوری عددی		شماره ی نبی شماره ی نیمرخ	
IPE 100	258.0	416.7	38.1%	1.41	2.60	45.6%	80×80×8
IPE 120	250.3	436.6	42.7%	1.48	2.75	46.3%	80×80×8
IPE 140	261.8	450.7	41.9%	1.32	2.89	54.4%	100×100×10
IPE 160	281.8	473.1	40.4%	1.37	3.07	55.3%	100×100×10
IPE 180	277.6	480.5	42.2%	1.35	3.16	57.2%	100×100×10
IPE 200	297.7	505.2	41.1%	1.46	3.36	56.4%	100×100×10
IPE 220	290.9	511.8	43.2%	1.41	3.38	58.1%	100×100×10
IPE 240	305.5	534.9	42.9%	1.46	3.54	58.7%	120×120×12
IPE 270	290.0	533.6	45.6%	1.36	3.50	61.2%	120×120×12
IPE 300	273.6	525.4	47.9%	1.27	3.42	63.0%	120×120×12



شکل ۴-۳۹ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۴ طول تیر

جدول ۴-۴۰ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر

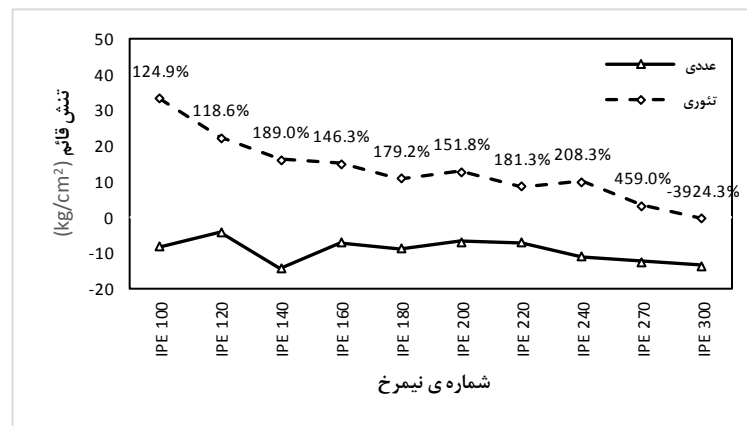
تنش قائم (kg/cm ²)		زاویه پیش (deg)		نسبت		0.3	
درصد اختلاف نسبی		درصد اختلاف نسبی		تئوری عددی		شماره ی نبی شماره ی نیمرخ	
IPE 100	171.0	387.5	55.9%	1.12	2.24	49.9%	80×80×8
IPE 120	165.2	402.7	59.0%	1.18	2.36	50.0%	80×80×8
IPE 140	167.9	413.5	59.4%	1.03	2.49	58.4%	100×100×10
IPE 160	183.2	433.5	57.7%	1.07	2.64	59.4%	100×100×10
IPE 180	179.1	438.7	59.2%	1.06	2.71	61.1%	100×100×10
IPE 200	193.2	461.7	58.2%	1.14	2.88	60.4%	100×100×10
IPE 220	187.8	466.1	59.7%	1.10	2.90	62.0%	100×100×10
IPE 240	196.2	487.6	59.8%	1.13	3.04	62.6%	120×120×12
IPE 270	184.2	483.7	61.9%	1.05	3.00	64.9%	120×120×12
IPE 300	172.2	474.4	63.7%	0.98	2.94	66.6%	120×120×12



شکل ۴-۴۰ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۳ طول تیر

جدول ۴-۴۱ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر

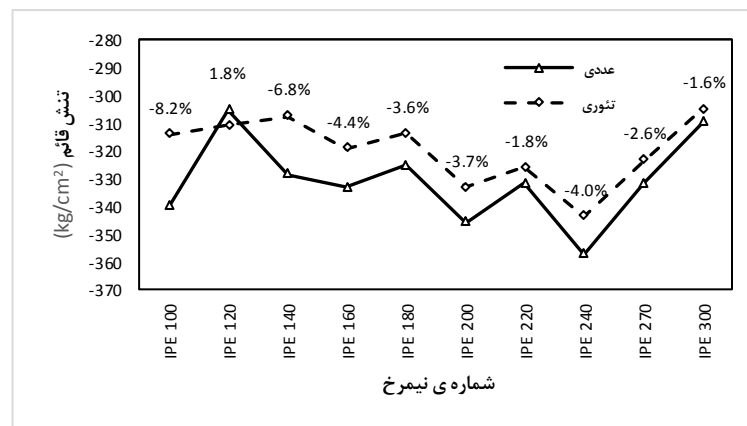
0.2		نسبت		زاویه پیش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)	
شماره ی نیمرخ	شماره نبشی	عددی	تئوری	درصد اختلاف		تئوری عددی	نسبی
				نسبی	نسبی		
IPE 100	80×80×8	0.70	1.65	57.9%		-8.3	326.8
IPE 120	80×80×8	0.75	1.75	57.0%		-4.2	334.9
IPE 140	100×100×10	0.62	1.83	66.0%		-14.3	340.9
IPE 160	100×100×10	0.64	1.94	66.9%		-7.0	356.6
IPE 180	100×100×10	0.63	2.00	68.5%		-8.7	358.7
IPE 200	100×100×10	0.68	2.12	67.9%		-6.7	378.2
IPE 220	100×100×10	0.66	2.13	69.1%		-7.0	379.5
IPE 240	120×120×12	0.67	2.24	70.0%		-10.9	397.5
IPE 270	120×120×12	0.62	2.21	71.9%		-12.3	390.7
IPE 300	120×120×12	0.58	2.16	73.2%		-13.4	380.9



شکل ۴-۴۱ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۲ طول تیر

جدول ۴-۴۲ مقایسه نبشی نشیمن و اتصال مفصل پیچشی- بارگذاری گسترده- بررسی ۰/۱ طول تیر

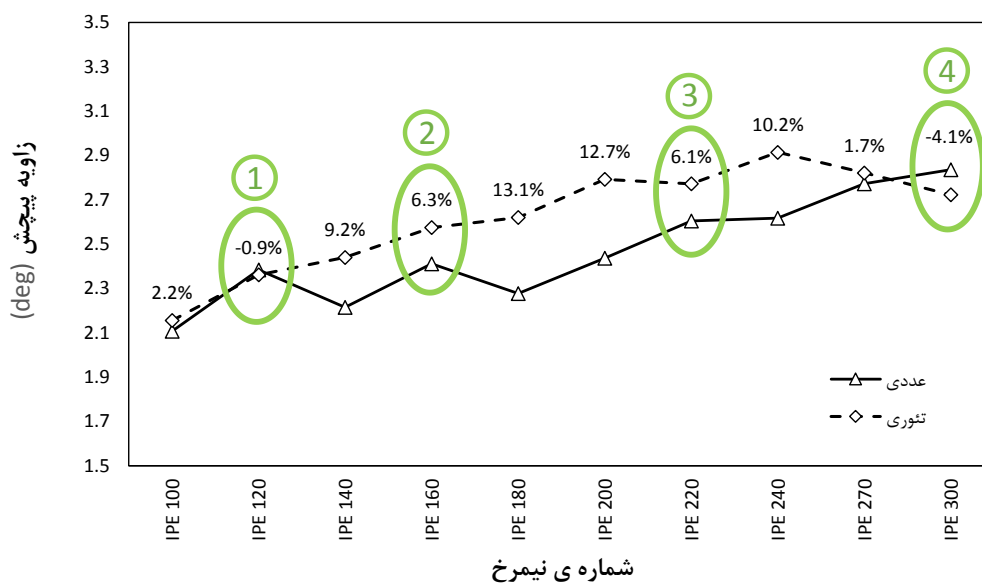
0.1		نسبت		زاویه پیش (deg)		تنش قائم (kg/cm ²)	
شماره ی نیمرخ	شماره نبشی	عددی	تئوری	درصد اختلاف		تئوری عددی	نسبی
				نسبی	نسبی		
IPE 100	80×80×8	0.25	0.89	71.7%		-340.0	212.0
IPE 120	80×80×8	0.29	0.93	69.0%		-305.5	212.9
IPE 140	100×100×10	0.21	0.98	78.6%		-328.7	214.0
IPE 160	100×100×10	0.21	1.04	79.7%		-333.4	223.2
IPE 180	100×100×10	0.21	1.07	80.7%		-325.3	222.6
IPE 200	100×100×10	0.22	1.13	80.5%		-345.8	235.3
IPE 220	100×100×10	0.21	1.14	81.2%		-332.0	234.2
IPE 240	120×120×12	0.21	1.19	82.3%		-357.5	245.8
IPE 270	120×120×12	0.20	1.17	83.4%		-331.9	238.4
IPE 300	120×120×12	0.18	1.15	84.1%		-310.0	230.4



شکل ۴-۴۲ مقایسه تنش قائم نبشی نشیمن و اتصال گیردار پیچشی- گسترده- بررسی ۰/۱ طول تیر

۴-۵ بررسی نتایج

۱- تغییرات متناوب در اختلاف نسبی زاویه پیچش در نیمرخ‌های مختلف سبب شد بررسی‌های دقیق‌تری به منظور درک بهتر این رفتار، بر روی نمودار تغییرات زاویه پیچش، در دو حالت اتصال مفصل پیچشی و اتصال نبشی جان (نمودار شکل ۴-۶) انجام شود (شکل ۴-۴۳).



شکل ۴-۴۳ بررسی تغییرات درصد اختلاف نسبی

در شکل ۴-۴۳ چهار نیمرخ‌ی که درصد اختلاف نسبی آن‌ها کاهش یافته بود، شماره‌گذاری و مشخص گردید، همچنین این اتصالات بر روی جدول ۳-۱ که مشخصات اتصال نبشی جان را ارائه کرده است، با شماره‌گذاری مشابه مشخص گردید (شکل ۴-۴۴).

شماره ی نیمرخ	شماره نبشی	واکنش تکیه گاهی نظیر ظرفیت خمشی تیر (ton)	طول نبشی (mm) (L)	عرض پلیت (mm)	ارتفاع پلیت (mm)
IPE 100	50×50×5	1.313	75	140.0	150
① → IPE 120	50×50×5	1.696	85	140.0	150
IPE 140	60×60×6	2.12	105	160.0	150
② → IPE 160	60×60×6	2.616	120	160.0	150
IPE 180	80×80×8	3.115	130	200.0	150
IPE 200	80×80×8	3.72	150	200.0	150
③ → IPE 220	80×80×8	4.4	160	200.0	150
IPE 240	100×100×10	5.18	170	240.0	150
IPE 270	100×100×10	6.1	180	240.0	150
④ → IPE 300	100×100×10	7.13	190	240.0	150

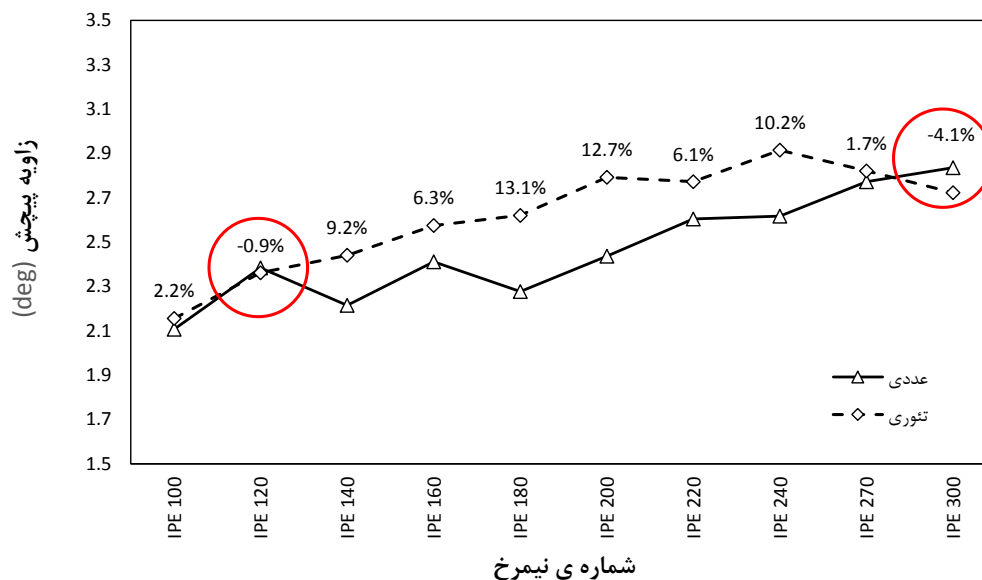
شکل ۴-۴ بررسی تغییرات متناوب زاویه پیچش

با توجه به شکل‌های شکل ۴-۳ و شکل ۴-۴ اختلاف نسبی در نیمرخ‌هایی که ضعیف‌ترین اتصال را داشته‌اند، کاهش پیدا کرده است به‌عنوان مثال در نیمرخ IPE120 که در شکل‌های شکل ۴-۳ و شکل ۴-۴ با شماره‌ی یک مشخص شده است، با تغییر نیمرخ از IPE100 به IPE120 شماره نبشی اتصال تغییر نمی‌کند، بنابراین مقاومت پیچشی اتصال کاهش می‌یابد. به‌طور مشابه در IPE160 در حالی نیمرخ که نسبت به IPE140 افزایش یافته است اما شماره نبشی اتصال ثابت است. این روند در IPE220 و IPE300 که به ترتیب با شماره‌های ۳ و ۴ بر روی شکل‌های شکل ۴-۳ و شکل ۴-۴ مشخص شده‌اند، تکرار می‌شوند.

۲- با توجه به شرایط مرزی تئوری، پیش‌بینی اولیه‌ی بر این اساس بود که زاویه پیچش اتصال نبشی جان باید مقداری بین زاویه پیچش دو اتصال تئوری مفصل پیچشی و گیردار پیچشی باشد اما در مواردی این پیش‌بینی نقض شد که به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

به عنوان مثال در نمودار شکل ۴-۶ در موارد مشخص شده میزان پیچش نبشی جان از اتصال

مفصل تئوری بیشتر است (شکل ۴-۴۵).



شکل ۴-۴۵ حالت‌هایی که پیچش نبشی جان از پیچش مفصل بیشتر است

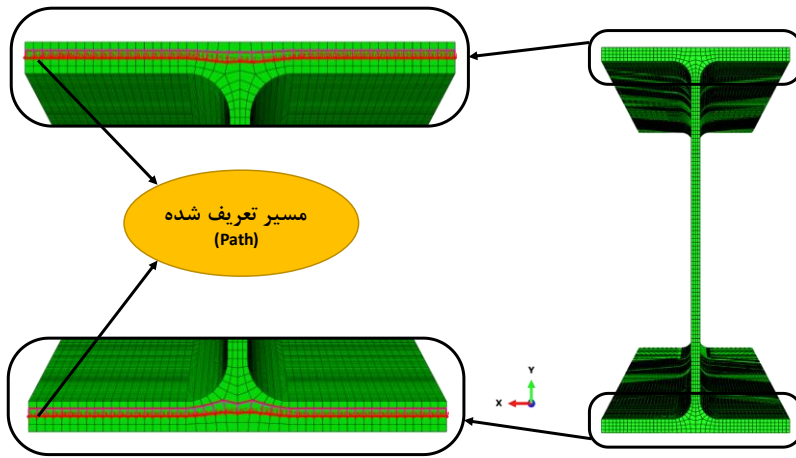
این شرایط بدین معنی است که میزان پیچش تیر در بازه‌ی اتصال مفصل پیچشی و تیر طره

قرار گرفته است، بنابراین به بررسی شرایط مرزی در اتصال پرداخته شد.

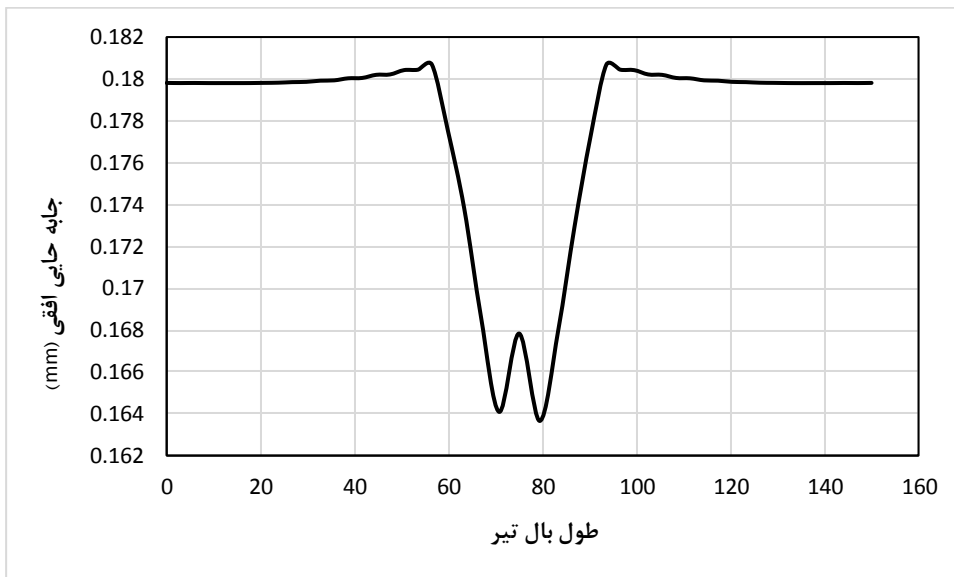
به عنوان مثال به بررسی IPE300 - که با شماره ۴ در شکل ۴-۴۳ مشخص گردیده است - پرداخته

شد، با تعریف دو مسیر در بال بالا و پایین تیر در $z=0$ (شکل ۴-۴۶) میزان جابجایی افقی تیر در

این مقطع برداشت و نمودار آن رسم گردید (شکل ۴-۴۷).



شکل ۴-۴۶ تعریف مسیر در بال‌های تیر به منظور اندازه‌گیری جابجایی افقی



شکل ۴-۴۷ نمودار جابجایی افقی تیر در $z=0$

پیش‌بینی اولیه بر این اساس بود که مقدار جابجایی عرضی در مقطع $z=0$ برابر صفر باشد اما

این مقدار حدوداً برابر با ۰.۵٪ حداکثر جابجایی افقی تیر شد، بنابراین فرض صفر بودن جابجایی افقی

تیر در $z=0$ اشتباه است.

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها

۱-۵ مقدمه

در این فصل به بررسی نتایج عملکرد، تحلیل و بیان این نتایج می‌پردازیم. با استفاده از نتایج فصل چهارم جداول کاربردی تهیه و تنظیم شد که با استفاده از نتایج فرمول‌های تئوری که در فصل دوم به صورت کامل بیان شد، بتوان تنش‌ها و زاویه‌ای دقیق اتصالات واقعی نظیر نبشی جان و نبشی نشیمن را تعیین نمود.

۲-۵ نتایج

۱- با توجه به جدول ۱-۵ عملکرد نبشی فوقانی و تحتانی در مقایسه با اتصال گیردار پیچشی، حداقل ۲٪ و حداکثر ۵۹٪ در زاویه پیچش و در تنش قائم نیز حداقل ۴٪ و حداکثر ۲۳٪ اختلاف را نشان می‌دهد، این در حالی است که مقایسه عملکرد نبشی فوقانی و تحتانی با اتصال مفصل پیچشی، حداقل ۳۵٪ و حداکثر ۸۴٪ در زاویه پیچش و در تنش قائم نیز حداقل ۱۶٪ و حداکثر ۷۶٪ اختلاف را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۵ مقایسه بیشترین و کمترین درصد اختلاف اتصالات تئوری و واقعی در بارگذاری متمرکز

تنش قائم			زاویه پیچش			مقایسه
درصد اختلاف	محل اعمال بار	شماره ی نیمرخ	درصد اختلاف	محل اعمال بار	شماره ی نیمرخ	
کمترین	0%	IPE 100	0.5	4%	IPE 300	نبشی جان و مفصل پیچشی
بیشترین	15%	IPE 180	0.1	28%	IPE 140	
کمترین	-68%	IPE 100	0.5	-5%	IPE 100	نبشی جان و گیردار پیچشی
بیشترین	-606%	IPE 300	0.1	-247%	IPE 300	
کمترین	-2%	IPE 160	0.5	4%	IPE 300	نبشی نشیمن و گیردار پیچشی
بیشترین	-59%	IPE 120	0.1	23%	IPE 140	
کمترین	35%	IPE 100	0.5	16%	IPE 100	نبشی نشیمن و مفصل پیچشی
بیشترین	84%	IPE 300	0.1	76%	IPE 300	

۲- کمترین و بیشترین درصد اختلاف در عملکرد اتصالات واقعی در مقایسه با اتصالات تئوری تحت بارگذاری گسترده در جدول ۲-۵ ارائه شده است. عملکرد نبشی فوقانی و تحتانی در مقایسه با اتصال گیردار پیچشی، حداقل ۳٪ و حداکثر ۴۷٪ در زاویه پیچش و در تنش قائم نیز حداقل ۶٪ و حداکثر ۲۱٪ اختلاف را نشان می‌دهد، این در حالی است که مقایسه عملکرد نبشی فوقانی و تحتانی با اتصال مفصل پیچشی، حداقل ۳۳٪ و حداکثر ۸۴٪ در زاویه پیچش و در تنش قائم نیز حداقل ۴۴٪ و حداکثر ۲۶۰٪ اختلاف را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵ مقایسه بیشترین و کمترین درصد اختلاف اتصالات تئوری و واقعی در بارگذاری گسترده

مقایسه	زاویه پیچش		تنش قائم	
	درصد اختلاف	محل بررسی	درصد اختلاف	محل بررسی
نبشی جان و مفصل پیچشی	کمترین	1%	4%	0.5
	بیشترین	18%	65%	0.1
نبشی جان و گیردار پیچشی	کمترین	-100%	-23%	0.5
	بیشترین	-551%	164%	0.1
نبشی نشیمن و گیردار پیچشی	کمترین	-3%	6%	0.5
	بیشترین	-47%	21%	0.3
نبشی نشیمن و مفصل پیچشی	کمترین	33%	44%	0.5
	بیشترین	84%	260%	0.1

۳- نتایج عملکرد نبشی جان در مقایسه با اتصال مفصل پیچشی تحت بارگذاری متمرکز، حداقل ۰٪ و حداکثر ۱۵٪ در زاویه پیچش و در تنش قائم نیز حداقل ۴٪ و حداکثر ۲۸٪ اختلاف را نشان می‌دهد، این در حالی است که مقایسه عملکرد نبشی جان با اتصال گیردار پیچشی، حداقل ۶۸٪ و حداکثر ۶۰۶٪ در زاویه پیچش و در تنش قائم نیز حداقل ۵٪ و حداکثر ۲۴۷٪ اختلاف را نشان می‌دهد.

۴- نتایج عملکرد نبشی جان در مقایسه با اتصال گیردار پیچشی تحت بارگذاری گسترده، حداقل ۱۰۰٪ و حداکثر ۵۵۱٪ در زاویه پیچش و در تنش قائم نیز حداقل ۲۳٪ و حداکثر ۱۶۴٪ اختلاف را نشان می‌دهد، این در حالی است که مقایسه عملکرد نبشی جان با اتصال مفصل پیچشی، حداقل

۱٪ و حداکثر ۱۸٪ در زاویه پیچش و در تنش قائم نیز حداقل ۴٪ و حداکثر ۶۵٪ اختلاف را نشان می‌دهد.

۵- بنابر موارد فوق می‌توان بیان داشت که عملکرد اتصال فوقانی و تحتانی (نبشی نشیمن) با اختلاف بیان شده نزدیک به اتصال گیردار پیچشی است و اتصال نبشی جان با در نظر گرفتن درصد اختلاف، رفتاری عملکردی نزدیک به اتصال مفصل پیچشی داشته است.

۶- با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت در مواردی که زاویه پیچش تیر با اتصال نبشی جان بیشتر از زاویه پیچش با اتصال مفصل پیچشی شده است، اتصال نبشی جان توانایی مهار جابجایی افقی تیر در مقطع $z=0$ را ندارد و اتصال از نظر مقاومت پیچشی عملکرد مناسبی از خود نشان نمی‌دهد.

۷- در مقایسه اتصال نبشی جان با مفصل پیچشی، مطابق نمودارهای شکل‌های ۴-۸ الی ۴-۱۲ که تنش قائم تحت بارگذاری متمرکز و نمودارهای شکل‌های ۴-۲۶ تا ۴-۳۰ که تنش قائم تحت بارگذاری گسترده را نشان می‌دهند، می‌توان به دو نکته اشاره کرد، اولاً بارگذاری گسترده نسبت به مورد مشابه خود تحت بارگذاری متمرکز (هم در زاویه پیچش و هم در تنش قائم) درصد اختلاف بیشتری را از خود نشان می‌دهد، دوماً در هر دو حالت بارگذاری، هرچه محل بارگذاری (و یا محل بررسی آن) از ۰/۱ طول تیر به سمت ۰/۵ طول تیر میل می‌کند درصد اختلاف نسبی (هم در زاویه پیچش و هم در تنش قائم) کاهش می‌یابد.

۸- مشابه بند ۷ در مقایسه نبشی فوقانی تحتانی با اتصال گیردار پیچشی مطابق نمودارهای شکل‌های ۴-۲۳ الی ۴-۲۸ که تنش قائم تحت بارگذاری متمرکز و نمودارهای شکل‌های ۴-۳۶ تا ۴-۴۲ که تنش قائم تحت بارگذاری گسترده را نشان می‌دهند، می‌توان به دو نکته اشاره کرد، اولاً بارگذاری گسترده نسبت به مورد مشابه خود تحت بارگذاری متمرکز (هم در زاویه پیچش و هم در تنش

قائم) درصد اختلاف بیشتری را از خود نشان می‌دهد، دوما در هردو حالت بارگذاری، هرچه محل بارگذاری (و یا محل بررسی آن) از ۰/۱ طول تیر به سمت ۰/۵ طول تیر میل می‌کند درصد اختلاف نسبی (هم در زاویه پیچش و هم در تنش قائم) کاهش می‌یابد.

۹- در این پژوهش نشان داده شد که در اتصالات نبشی فوقانی و تحتانی رایج خمشی در تمامی

مدل‌های بررسی شده، اتصال صلبیت لازم برای ایجاد یک اتصال گیردار پیچشی را دارند که می‌توان با استفاده از نتایج بیان شده در این پژوهش درصد گیرداری اتصال را تعیین و در هنگام طراحی پیچشی اتصال از آن استفاده کرد.

۱۰- در این پژوهش نشان داده شد که اتصالات رایج خمشی در برخی از موارد صلبیت لازم برای ایجاد یک مفصل پیچشی را ندارند و باید اتصالات طراحی شده برای خمش، مجدداً مورد بررسی پیچشی قرار گرفته و در مواردی که صلبیت پیچشی کم باشد با استفاده از نبشی‌های قوی‌تر یا استفاده از سخت‌کننده‌ها صلبیت پیچشی این اتصالات را افزایش داد.

در انتها با استفاده از عملکرد اتصالات واقعی نبشی جان و نبشی فوقانی تحتانی (نبشی نشیمن) جداولی تهیه شد که مهندسین عزیز بتوانند با مراجعه به این جداول ضرایب تصحیح تنش قائم در حالات مختلف بارگذاری را استخراج نموده و تنش‌های به دست آمده از روابطی که بر پایه شرایط مرزی تئوری به دست آمده را تصحیح نموده و تنش‌های و زاویه پیچش واقعی تیر را به دست آورند.



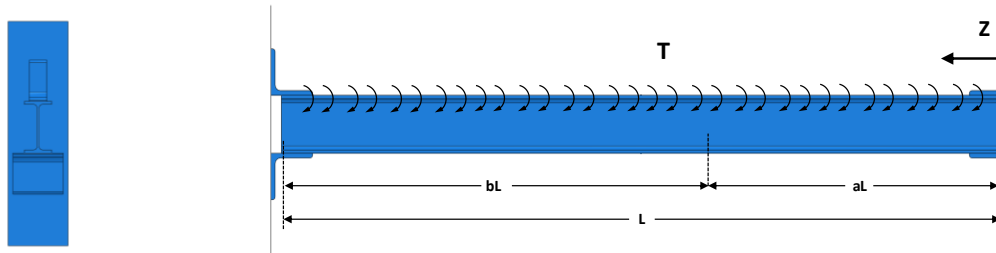
جدول ۳-۵ مقادیر β در محل اعمال لنگر پیچشی (تیر تحت لنگر پیچشی متمرکز - اتصال نبشی نشیمن)

شماره شماره نیمرخ	واکنش تکیه‌گاهی نظیر ظرفیت خمشی تیر (ton)	شماره نبشی	طول نبشی پایین (mm)	طول نبشی بالا (mm)	a=0.5	a=0.4	a=0.3	a=0.2	a=0.1
IPE 100	1.31	80×80×8	100	35	0.92	0.91	0.89	0.85	0.77
IPE 120	1.7	80×80×8	100	44	0.89	0.89	0.88	0.86	0.83
IPE 140	2.12	100×100×10	100	53	0.92	0.91	0.90	0.86	0.77
IPE 160	2.62	100×100×10	100	62	0.91	0.91	0.90	0.88	0.80
IPE 180	3.11	100×100×10	120	71	0.92	0.92	0.91	0.89	0.83
IPE 200	3.72	100×100×10	140	80	0.94	0.93	0.93	0.91	0.85
IPE 220	4.4	100×100×10	160	90	0.94	0.94	0.93	0.91	0.87
IPE 240	5.18	120×120×12	160	100	0.94	0.94	0.93	0.91	0.85
IPE 270	6.1	120×120×12	180	115	0.95	0.95	0.94	0.93	0.88
IPE 300	7.13	120×120×12	220	130	0.96	0.95	0.95	0.93	0.91



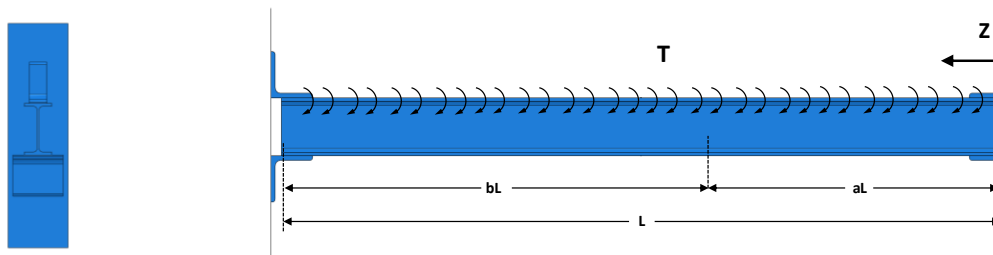
جدول ۴-۵ مقادیر β در محل تکیه‌گاه (تیر تحت لنگر پیچشی متمرکز - اتصال نبشی نشیمن)

شماره‌ی نیمرخ	واکنش تکیه‌گاهی نظیر ظرفیت خمشی تیر (ton)	شماره نبشی	طول نبشی پایین (mm)	طول نبشی بالا (mm)	a=0.5	a=0.4	a=0.3	a=0.2	a=0.1
IPE 100	1.31	80×80×8	100	35	0.73	0.73	0.72	0.67	0.51
IPE 120	1.7	80×80×8	100	44	0.68	0.68	0.67	0.64	0.51
IPE 140	2.12	100×100×10	100	53	0.64	0.63	0.63	0.58	0.50
IPE 160	2.62	100×100×10	100	62	0.71	0.71	0.69	0.66	0.53
IPE 180	3.11	100×100×10	120	71	0.74	0.74	0.73	0.70	0.59
IPE 200	3.72	100×100×10	140	80	0.77	0.76	0.75	0.72	0.62
IPE 220	4.4	100×100×10	160	90	0.78	0.78	0.77	0.75	0.65
IPE 240	5.18	120×120×12	160	100	0.78	0.78	0.77	0.74	0.63
IPE 270	6.1	120×120×12	180	115	0.81	0.81	0.80	0.77	0.67
IPE 300	7.13	120×120×12	220	130	0.84	0.84	0.83	0.80	0.72



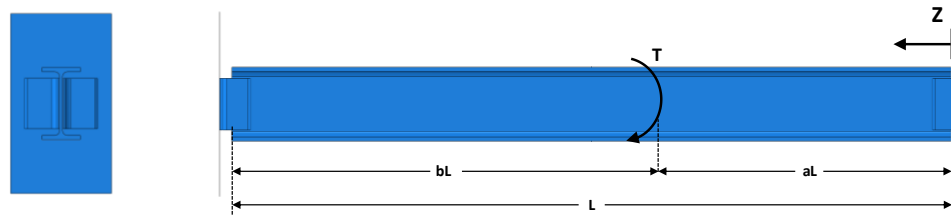
جدول ۵-۵ مقادیر β در محل $z=aL$ (تیر تحت لنگر پیچشی گسترده ی یکنواخت - اتصال نبشی نشیمن)

شماره ی نیمرخ	واکنش تکیه گاهی نظیر ظرفیت خمشی تیر (ton)	شماره نبشی	طول نبشی پایین (mm)	طول نبشی بالا (mm)	β				
					a=0.5	a=0.4	a=0.3	a=0.2	a=0.1
IPE 100	1.31	80×80×8	100	35	0.86	0.85	0.79	-0.25	1.08
IPE 120	1.7	80×80×8	100	44	0.84	0.83	0.80	-0.19	0.98
IPE 140	2.12	100×100×10	100	53	0.89	0.88	0.83	-0.89	1.07
IPE 160	2.62	100×100×10	100	62	0.92	0.92	0.88	-0.46	1.04
IPE 180	3.11	100×100×10	120	71	0.93	0.92	0.89	-0.79	1.04
IPE 200	3.72	100×100×10	140	80	0.93	0.93	0.90	-0.52	1.04
IPE 220	4.4	100×100×10	160	90	0.93	0.93	0.90	-0.81	1.02
IPE 240	5.18	120×120×12	160	100	0.93	0.93	0.89	-1.08	1.04
IPE 270	6.1	120×120×12	180	115	0.94	0.93	0.91	-3.59	1.03



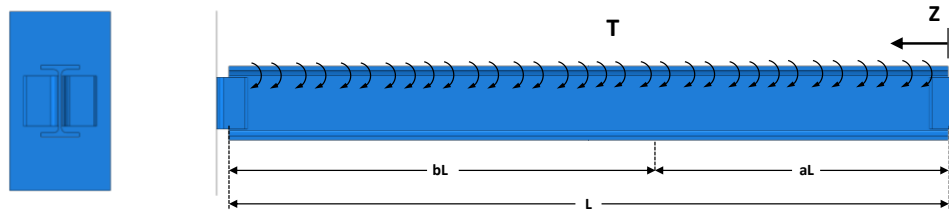
جدول ۶-۵ مقادیر β در محل تکیه‌گاه (تیر تحت لنگر پیچشی گسترده‌ی یکنواخت - اتصال نبشی نشیمن)

شماره‌ی نیمرخ	واکنش تکیه‌گاهی نظیر ظرفیت خمشی تیر (ton)	شماره نبشی	طول نبشی پایین (mm)	طول نبشی بالا (mm)	$z=0$
IPE 100	1.31	80×80×8	100	35	0.71
IPE 120	1.7	80×80×8	100	44	0.67
IPE 140	2.12	100×100×10	100	53	0.77
IPE 160	2.62	100×100×10	100	62	0.77
IPE 180	3.11	100×100×10	120	71	0.80
IPE 200	3.72	100×100×10	140	80	0.81
IPE 220	4.4	100×100×10	160	90	0.82
IPE 240	5.18	120×120×12	160	100	0.82
IPE 270	6.1	120×120×12	180	115	0.82
IPE 300	7.13	120×120×12	220	130	0.84



جدول ۷-۵ مقادیر β در محل اعمال لنگر پیچشی (تیر تحت لنگر پیچشی متمرکز - اتصال نبشی جان)

شماره‌ی نیمرخ	واکنش تکیه‌گاهی نظیر ظرفیت خمشی تیر (ton)	شماره نبشی	طول نبشی (mm)	β				
				a=0.5	a=0.4	a=0.3	a=0.2	a=0.1
IPE 100	1.31	50×50×5	75	0.95	0.95	0.94	0.89	0.85
IPE 120	1.7	50×50×5	85	0.96	0.95	0.95	0.93	0.89
IPE 140	2.12	60×60×6	105	0.95	0.94	0.92	0.89	0.72
IPE 160	2.62	60×60×6	120	0.93	0.93	0.92	0.90	0.85
IPE 180	3.11	80×80×8	130	0.92	0.92	0.90	0.87	0.80
IPE 200	3.72	80×80×8	150	0.92	0.91	0.89	0.86	0.81
IPE 220	4.4	80×80×8	160	0.93	0.92	0.91	0.90	0.86
IPE 240	5.18	100×100×10	170	0.92	0.92	0.90	0.88	0.82
IPE 270	6.1	100×100×10	180	0.95	0.94	0.94	0.93	0.89
IPE 300	7.13	100×100×10	190	0.96	0.96	0.96	0.95	0.93

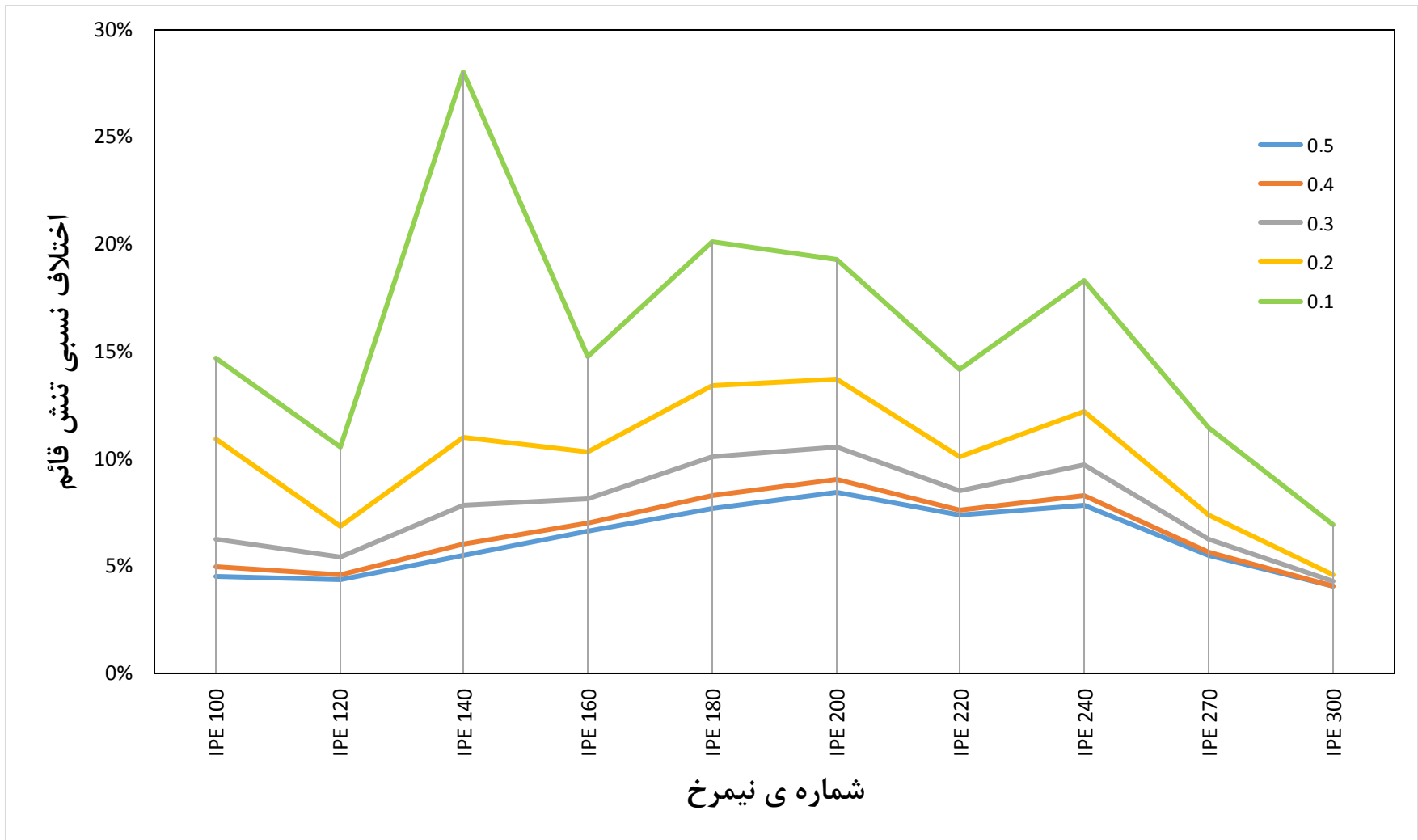


جدول ۸-۵ مقادیر β در محل تکیه‌گاه (تیر تحت لنگر پیچشی گسترده‌ی یکنواخت - اتصال نبشی جان)

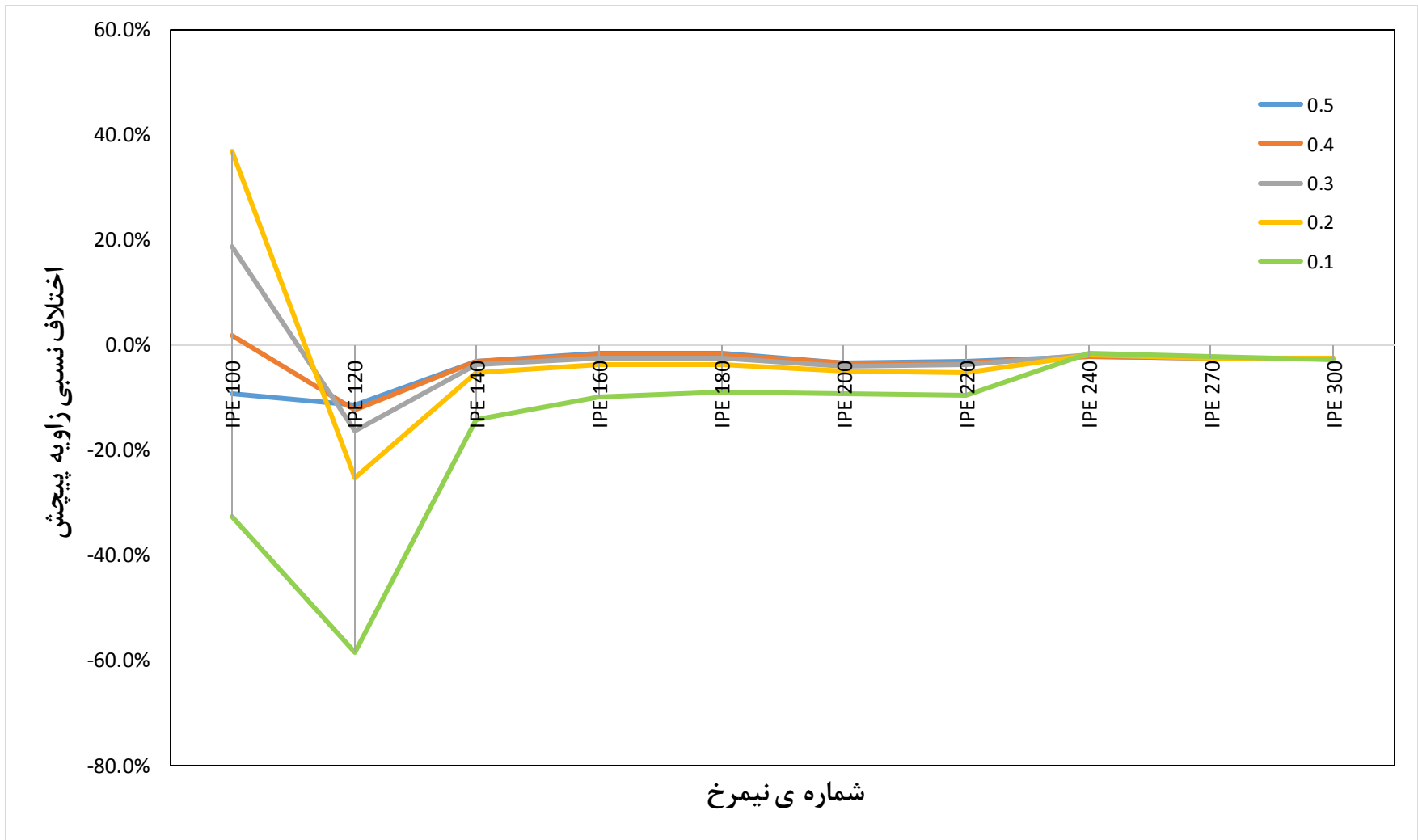
شماره‌ی نیمرخ	واکنش تکیه‌گاهی نظیر ظرفیت خمشی تیر (ton)	شماره‌ی نبشی	طول نبشی (mm)	a=0.5	a=0.4	a=0.3	a=0.2	a=0.1
IPE 100	1.31	50×50×5	75	0.96	0.95	0.92	0.83	0.50
IPE 120	1.7	50×50×5	85	0.95	0.94	0.92	0.87	0.66
IPE 140	2.12	60×60×6	105	0.92	0.91	0.87	0.77	0.42
IPE 160	2.62	60×60×6	120	0.94	0.93	0.90	0.83	0.57
IPE 180	3.11	80×80×8	130	0.90	0.88	0.84	0.74	0.35
IPE 200	3.72	80×80×8	150	0.90	0.89	0.85	0.75	0.36
IPE 220	4.4	80×80×8	160	0.91	0.91	0.89	0.83	0.60
IPE 240	5.18	100×100×10	170	0.90	0.89	0.86	0.79	0.51
IPE 270	6.1	100×100×10	180	0.94	0.94	0.93	0.90	0.76
IPE 300	7.13	100×100×10	190	0.95	0.95	0.94	0.93	0.85



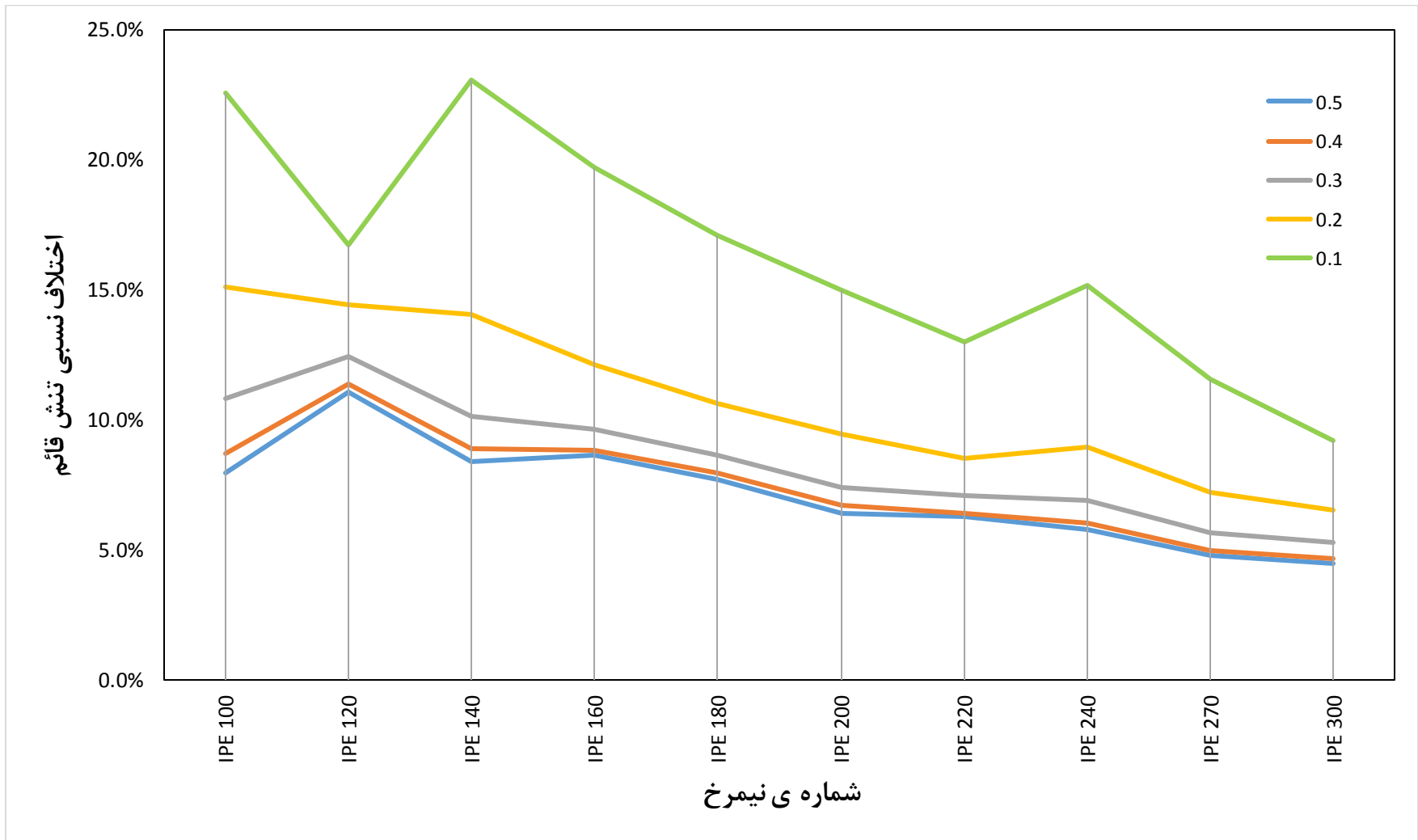
شکل ۵-۱ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی



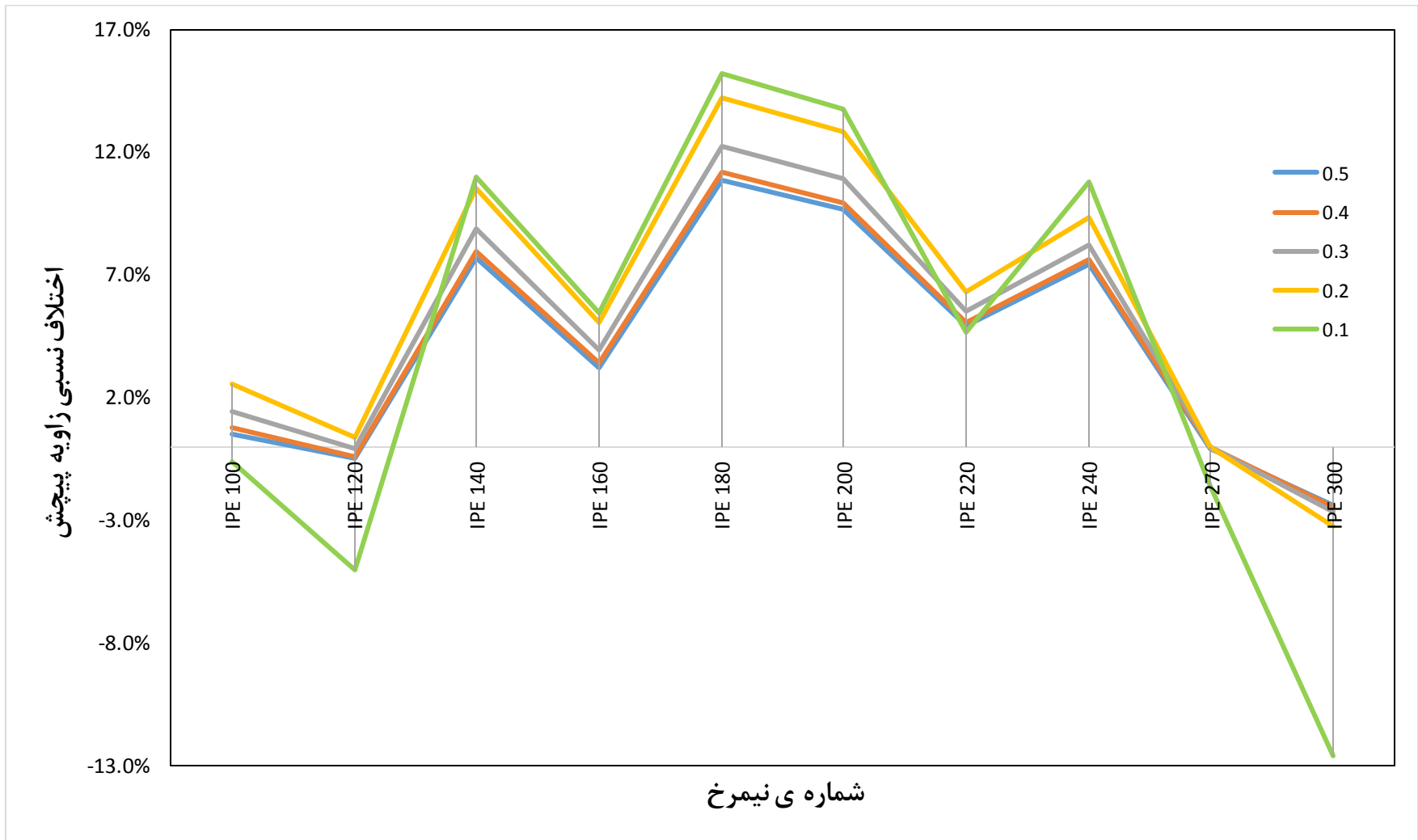
شکل ۲-۵ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی



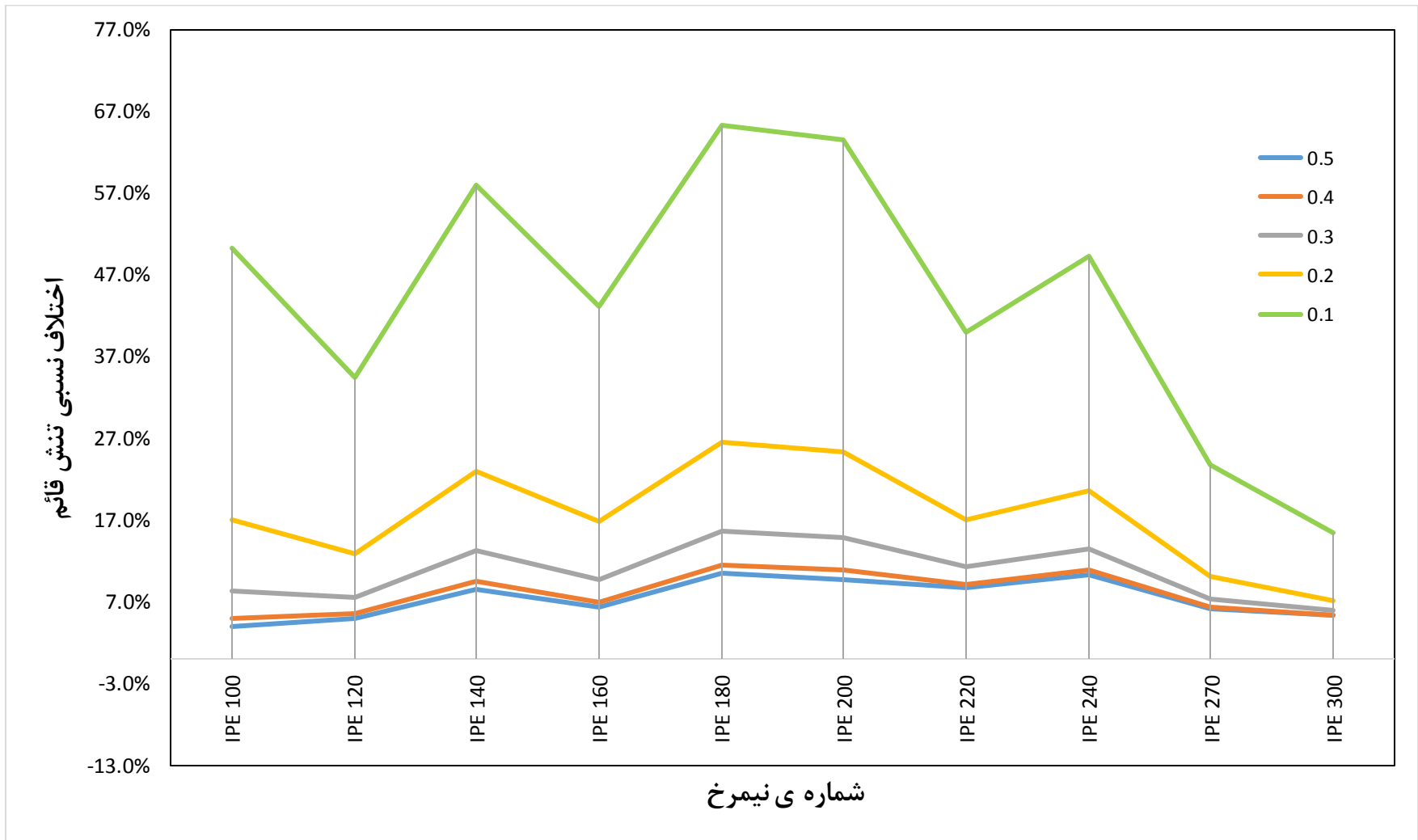
شکل ۳-۵ مقایسه نبشی فوقانی و تحتانی و گیردار پیچشی



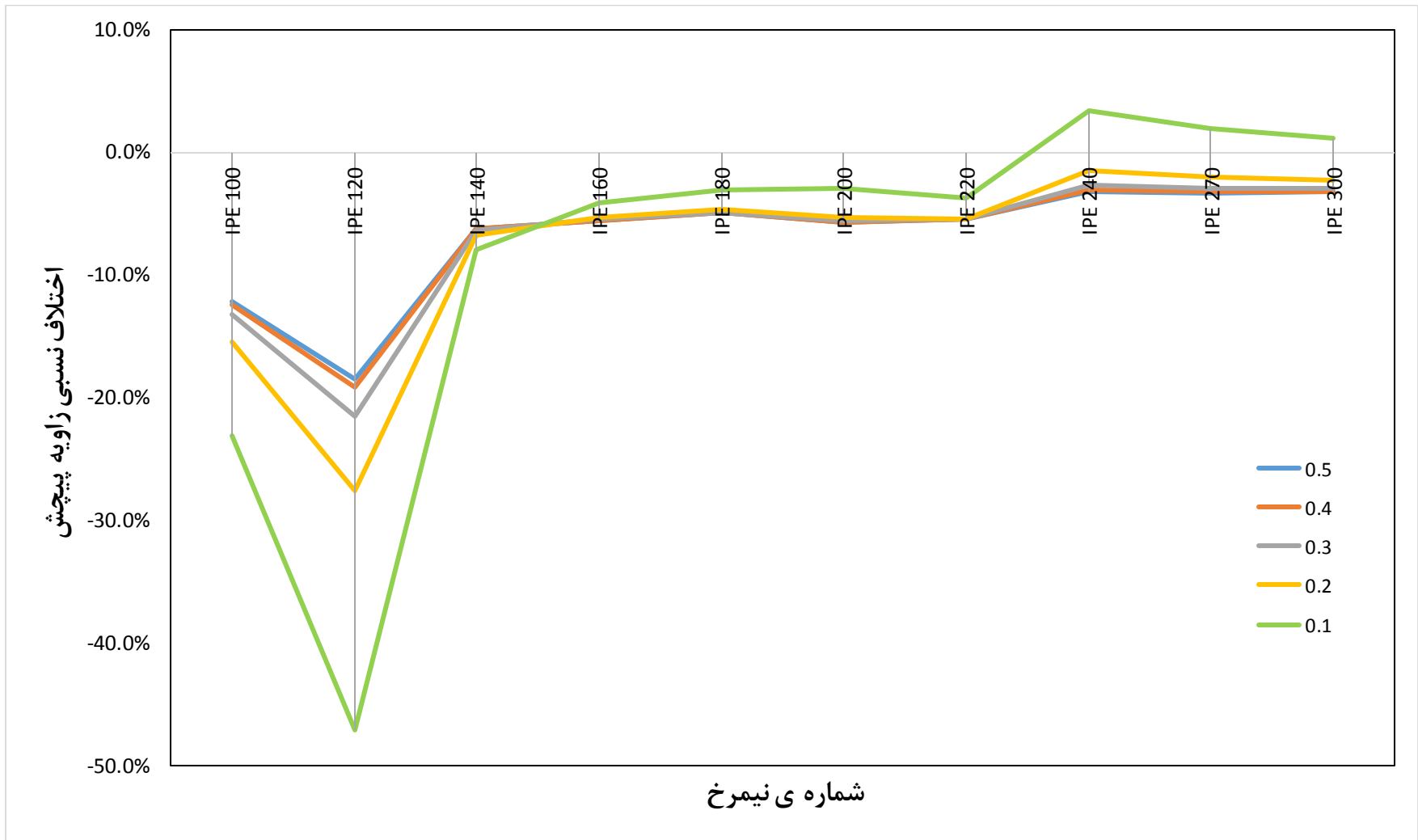
شکل ۴-۵ مقایسه نبشی فوقانی و تحتانی و گیردار پیچشی



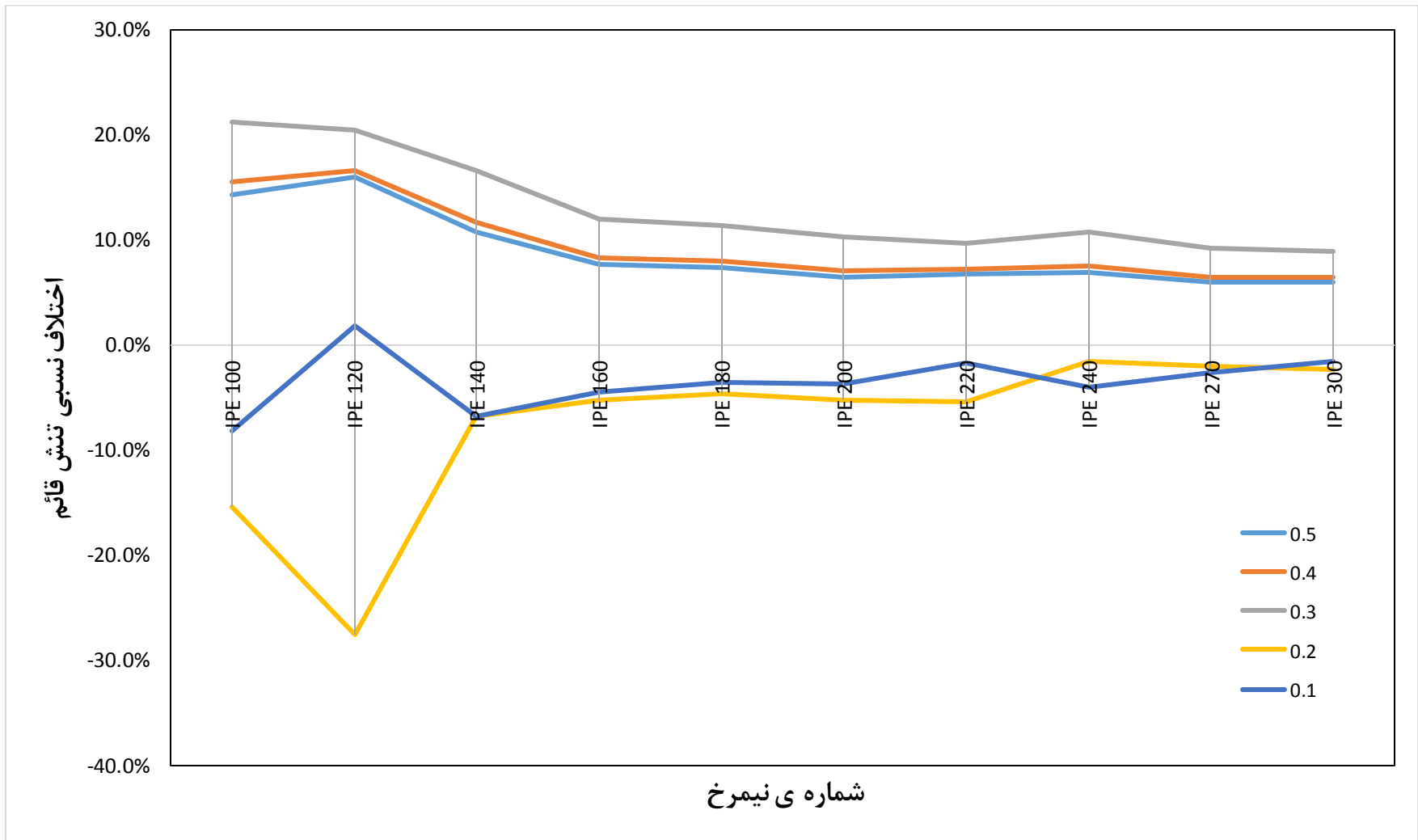
شکل ۵-۵ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی گسترده



شکل ۵-۶ مقایسه نبشی جان و مفصل پیچشی گسترده



شکل ۵-۷ مقایسه نبشی فوقانی و تحتانی و گیردار پیچشی گسترده



شکل ۸-۵ مقایسه نبشی فوقانی و تحتانی و گیردار پیچشی گسترده

۳-۵ پیشنهادات

- ۱- بررسی مقاومت پیچشی اتصالات خمشی طراحی شده و بازطراحی و تقویت اتصالاتی که توانایی مهار عرضی تیر در مقطع $z=0$ را ندارند.
- ۲- بررسی دیگر اتصالات رایج از نظر پیچشی و تعیین ضرایبی برای تخمین عملکرد آنها در مقایسه با اتصالات ایده آل
- ۳- در این پژوهش اثر و عملکرد یک تیر و اتصال آن بررسی شد، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی اثر ستون و به‌صورت کلی اثر یک قاب بررسی و مدل‌سازی شود.

- [1] Estabrooks, B. G., & Grondin, G. Y. (2008) “**Combined bending and torsion of steel I-shaped beams**”.
- [2] Salmon, C. G., & Johnson, J. E. (2009). “**Steel structures: design and behavior: emphasizing load and resistance factor design**” Prentice Hall.
- [3] Boulton, N. S. (1962) “Plastic twisting and bending of an I-beam in which the warp is restricted” **International Journal of Mechanical Sciences.**, 4(6), 491-502.
- [4] Farwell, C. R., & Galambos, T. V. (1969) “Nonuniform Torsion of Steel Beams in inelastic Range” **Journal of the Structural Division.**
- [5] Pi, Y. L., & Trahair, N. S. (1994) “ Inelastic bending and torsion of steel I-beams” **Journal of Structural Engineering.**, 120(12), 3397-3417.
- [6] Y. Pi, and N. Trahair. (1993) “Inelastic bending and torsion of steel I-beams,” **NASA STI/Recon Technical Report N**, vol. 95,
- [7] Heins, C. P., & Seaburg, P. A. (1963) “ Torsion analysis of rolled steel sections ”. **Bethlehem Steel Corp.**
- [8] Chu, K. H., & Johnson, R. B. (1974) “ Torsion in beams with open sections” **Journal of the Structural Division**, vol 100, PP 10666,.
- [9] Lin, P. H. (1977). “Simplified design for torsional loading of rolled steel members” **Engineering Journal**, vol 14(3).
- [10] Tusnin, A. R., & Prokic, M. (2015) “Selection of Parameters for I-beam Experimental Model Subjected to Bending and Torsion” **Procedia Engineering**, 111, 789-796.

- [11] Wan, H. X., & Mahendran, M. (2015) "Bending and torsion of hollow flange channel beams" **Engineering Structures**, 84, 300-312.
- [12] Ugural, A. C., & Fenster, S. K. (2011) "**Advanced mechanics of materials and applied elasticity**", Pearson Education.
- [۱۳] میرقادری، رسول. ازهری، محبتی. (۱۳۹۲). **طراحی سازه های فولادی**. جلد دوم. چاپ سوم. ارکان دانش. تهران.
- [14] Hughes, A. F., Iles, D. C., & Malik, A. S. (2011) "Design of steel beams in torsion" **Steel Construction Institute**, Sliwood Park, Ascot, Publication Number SCIP, 385.
- [15] A. F. I. Hughes, D. C; Malik, A. S.(2011), "**Design of steel beams in torsion**" SCI, Silwood Park, Ascot,
- [16] ABAQUS, V. (2014) "**6.14 Documentation**" Dassault Systemes Simulia Corporation.
- [۱۷] دفتر تدوین و تروج مقررات ملی ساختمان. (۱۳۸۳). **راهنمای اتصالات در ساختمان های فولادی**. چاپ هفتم. نشر و توسعه ایران. تهران.

Abstract

Joints are of the most important components in steel structures that are classified in terms of bending behavior, depending on bonding rigidity, into ranges: articulated, semi-clamping, and clamping. In addition to bending moments, members are sometimes placed under torsional moment. Not many studies have been conducted regarding the tolerance of torsional moments and the effect of attachment details on the torsion angles, shear stresses and bending stresses in the members' sections, and studies have usually been conducted on ideal mathematical models. In this study, simple shear connections and seated beam connections were numerically examined by Abaqus software, and the torsional moment tolerance in the rebound and the torsional angle and vertical and shear stresses along the member were studied. Based on the research, some tables were designed and, depending on the type and size of the joints, the torsional rigidity was determined and the results were compared with the analytical model of torsional fixed supports and torsional simply supports. Moreover, using these results, some coefficients were set so that the engineering community can execute the torsional design of the real joints by simple relationships without the need to solve differential equations and obtain accurate results. In this study, it was shown that the seated beam connections with acceptable difference percentages, such as the math model of torsional fixed supports, and the simple shear connections with an acceptable behavioral difference are similar to those of the theoretical torsional simply supports.

Keywords: Torsion, simple shear connections, seated beam connections, warping, torsional simply supports, torsional fixed supports, finite element method, Abaqus



Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

**Investigation on Torsional Rigidity of Common Connections in Iranian
Steel Structures**

by:

Mohammad Amin Salehi

Supervisor:

Dr. Vahid Reza Kalatjari

Consulting advisor:

Dr. Mahdi Gerdooei

September 2017