

ارزیابی تاثیر درصد صلبیت اتصال بر توزیع برش قائم مقطع تیر در اتصالات تیرهای I شکل فولادی با توجه به طول دهانه تیر

غلامرضا عبدالله زاده^{۱*}، مرتضی نقی پور^۲، احسان شعبانزاده^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

این مقاله به برآورد تاثیر درصد صلبیت اتصالات در تیرهای I شکل فولادی با طول دهانه‌های مختلف بر روی توزیع نیرو و تنش برشی قائم در بال و جان تیر در مقطع اتصال در مقایسه با فرضیات کلاسیک توزیع تنش می‌پردازد. از طرفی با توجه به اینکه طبق مطالعات بسیار اندک انجام شده در گذشته، تصور بر اینست پارامترهایی مانند تقید تغییرشکل‌های جانبی ناشی از اثر پواسون، تقید تابیدگی مقطع اتصال و تقید بین اتصال بال و جان تیر در ناحیه اتصال عمده دلایل پیدایش توزیع تنش و نیروی پیش بینی نشده در اتصالات هستند، سهم هریک از این پارامترها بررسی شده است. در این راستا ۷۲ مدل تیر با اتصالات با درصد صلبیتهای متفاوت تحت بار متمرکز در وسط دهانه جهت انجام مطالعه پارامتریک در نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS Workbench ساخته و بر روی همه آنها تحلیل استاتیکی خطی انجام شد. پارامترهای متغیر در این مدلها عبارتند از درصد صلبیت اتصال در قالب تغییر ضخامت ورقهای انتهایی (از ۷ تا ۳۰ میلیمتر)، طول دهانه تیر، وجود و یا عدم وجود تقید بین بال و جان تیر در ناحیه اتصال و وجود یا عدم وجود اثرات کرنشهای جانبی. در همه مدلها مقدار تنش برشی در ارتفاع مقطع و نیز سهم اختصاص یافته از نیرو به بالها و جان در محل اتصال بدست آمد. مطالعات انجام شده در درجه اول نشان دادند که در اثر شرایط مرزی حاکم توزیع تنش برشی قائم در مقطع اتصال در اتصالات با درجات صلبیت متفاوت، بسیار با آنچه که در روابط کلاسیک ثنوری تیرها ذکر شده فاصله دارد و عملاً روابط آیین‌نامه‌های کنونی که فقط جان را در تمامی طول تیر مسول تحمل برش قائم و بالها را مسول تحمل لنگر میدانند، با آنچه در واقعیت رخ میدهد فاصله دارند. همچنین مطالعات نشان دادند که سهم بالها و جان تیر در مقطع اتصال از نیروی برش قائم مقطع شدیداً متأثر از درصد صلبیت اتصال و طول دهانه تیر است. از طرفی نتایج بیانگر این واقعیت بودند که از بین پارامترهای موردنظر، تقید بوجود آمده بین بال و جان تیر در تمامی مدلها عمده‌ترین پارامتر در فاصله گرفتن نتایج کلاسیک از واقعیت توزیع تنش و نیرو در مقطع اتصال تیرهای I شکل هستند و از بین بردن این تقید در اجرا میتواند بعنوان ایده‌ای در بهبود عملکرد اتصالات مدنظر قرار گیرد.

کلمات کلیدی: فرضیات کلاسیک توزیع تنش، توزیع واقعی تنش، درصد صلبیت اتصال، تقید تابیدگی، تقید تغییرشکل جانبی، تقید بال بر جان

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2018.111196.1418		دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi:	10.22065/JSCE.2018.111196.1418	۱۳۹۶/۱۰/۰۹	۱۳۹۶/۱۲/۱۹	۱۳۹۷/۰۱/۲۹	۱۳۹۷/۰۱/۲۹	۱۳۹۸/۰۹/۰۱
		*نویسنده مسئول:				غلامرضا عبدالله زاده
		پست الکترونیکی:				abdollahzadeh@nit.ac.ir

Evaluation of the Connection Rigidity on the Vertical Shear Distribution at Beam Section in Steel I Shaped Beams According to the Beam Span Length

Gholamreza Abdollahzadeh^{1*}, Morteza Naghipor², Ehsan Shabanzadeh³

1- Associate professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Ph.D. Student in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

This paper evaluates the effect of I-shaped beams connection rigidity with different span length on vertical force and shear stress distribution in beam flanges and web at connection section in comparison with classical theory of stress distribution. On the other side, according to very little studies done in the past it is assumed that parameters such as restrain of lateral deformation, restrain of connection section warping and restrain between beam flange and web at connection region are the main reasons of unpredictable shear force and stress distribution at the connection section and the contribution of each of these parameters has been investigated. Accordingly, 72 models with different connection rigidity under concentrated static load in mid span have been made for doing parametric study in ANSYS Workbench finite element software. The linear static analysis was done on all constructed models. Variable parameters in these research for parametric study include of connection rigidity in the case of change in the end plate thickness (from 7 to 30 mm), beam span length, restraint or no restraint between beam web and flange and the presence or absence of Poisson's effects. In all models the amount of shear stress in section height over the section vertical axis in connection region and also the devoted contribution from force which goes to flanges and web under the concentrated load on mid span have been calculated. Performed studies have shown that that vertical shear stress distribution in beam to column connection section with moment connection differs a lot from what is stated in mechanics of materials equations. Practically the available equations in regulations which state that web receives the entire vertical shear and ignore the contribution of flanges are not reliable. Studies also showed that the contribution of the flanges and web at connecting section from vertical shear force strongly affected by the connection rigidity and the beam span length. On the other side, the results express this fact that among desired parameters the existence of restraint between flanges and web in all models is the most important parameter in the differences between the classical and real results and elimination of this parameter in structures can be considered as an idea to improve the performance of the modern connections.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.111196.1418

*Corresponding author: Gholamreza Abdollahzadeh
Email address: abdollahzadeh@nit.ac.ir

ARTICLE INFO

Received: 30/12/2017

Revised: 10/03/2018

Accepted: 18/04/2018

Keywords:

*Classical theory of stress distribution,
Real stress distribution,
Restrain of lateral deformation,
Restrain of connection section warping,
Restrain between beam flange and web at connection region.*

۱- مقدمه

اتصال مستقیم تیر به ستون با جوش نفوذی حتی در اتصالات مدرن امروزی (مثلا اتصال استخوانی) بسیار رایج است. اعضای سازه‌ای با ابعاد مختلف ترکیبی از المانهایی هستند که بطور مستقیم به یکدیگر جوش شده‌اند. این اتصالات خمشی در فرم متداول آنها نیازمند توجه بسیار زیادی در پروسه ساخت هستند چراکه می‌توانند منشا بسیاری از خرابیهای سازه‌ای باشند. تا جاییکه این پیچیدگی رفتار منجر به منسوخ شدن این نوع اتصالات علیرغم سادگی اجرای آنها شده‌است [۱].

اتصالات خمشی بفرم اتصال جوش شده بال تیر به ستون و اتصال پیچی یا جوشی جان تیر به ستون مابین سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۴ (قبل از زلزله نورث‌ریچ) بسیار متداول بود. در این نوع اتصال بالهای تیر به ستون با جوش نفوذی کامل و جان تیر نیز با یا بدون ورق برشی توسط جوش یا پیچ به ستون متصل می‌شدند [۲]. اما شکستهای گسترده بسیار زیادی در ناحیه جوش نفوذی بال تیر به ستون در این نوع از اتصالات خمشی در طی زلزله نورث‌ریچ (۱۹۹۴) و زلزله کوبه (۱۹۹۵) مشاهده گردید [۳].

متعاقبا بمنظور اصلاح رفتار لرزه‌ای اتصالات فولادی پیش از زلزله نورث‌ریچ شیوه‌های جدیدی در اجرای اتصالات مطرح گردید. از بین این شیوه‌ها و اتصالات مدرن میتوان به اتصال تیر با جان شکافدار [۴]، تغییر در هندسه حفره دسترسی جوش [۵] و [۶]، تقویت تیر در مقطع اتصال با استفاده از ورقهای کناری [۷] و [۸]، استفاده از سخت‌کننده‌های T شکل [۹]، [۱۰] و [۱۱]، استفاده از ورقهای پشت‌بند قائم و مایل [۱۲] و [۱۳] و یا روشهای تضعیف مقطع تیر در فاصله‌ای مناسب از مقطع اتصال تیر به ستون [۱۴]، [۱۵] و [۱۶] مانند برش بال تیر [۱۷]، کاهش سطح جان تیر [۱۸] و [۱۹]، کاهش همزمان بال و جان تیر [۲۰] جز این دسته از روشها هستند. بعبارتی همه این اتصالات خواسته‌اند بنحوی از تسلیم و تردشکنی جوش اتصال تیر به ستون با دور کردن مفصل پلاستیک از این مقطع جلوگیری کنند. اما آنچه مسلم است مساله ناشناخته‌ای در ناحیه اتصالات صلب تیر به ستون وجود دارد که در عمل با روابط مقاومت مصالح در تضاد است [۲۱]. آنچه از مطالعات پس از زلزله نورث‌ریچ در خصوص توزیع تنش ناحیه اتصالات نتیجه شد این بود که تئوری بنیادین تیرها که مبنای طراحی اعضای سازه‌ای در آیین‌نامه‌های معتبر دنیا حتی در حال حاضر نیز میباشد برای پیش‌بینی و تعیین توزیع تنش در اتصالات خمشی بسیار ناتوان اند [۲۲] و [۲۳]. آنچه مسلم است روشهای حل مربوط به روابط مقاومت مصالح و آیین‌نامه‌های کنونی که به طراحی مسائل عملی منتج میشود بعد از معرفی توابع تنش ایری مطرح گردید [۲۴]، اما کاستیهای قابل توجهی در مورد ارتباط این توابع با مسائل عملی وجود دارد. متاسفانه هنوز مسائل مربوط به تنش براساس روابط کلاسیک و قدیمی ایری بیان و بررسی میشوند که دربردارنده نواقص بسیار قابل توجهی در این مقوله هستند. این کاستیها بی‌تردید زمینه ساز پیش‌بینی‌های نادرست مشخصا در مورد رفتار اتصالات جوشی و در نتیجه شکستهای گسترده این نوع اتصالات در مواقع بحرانی است.

نقص عمده موجود در فرمولاسیون توابع تنش ایری در آنست که این روابط فقط دربردارنده شرایط مرزی نیرویی بوده و این درحالیست که اکثر مسائل عملی دارای شرایط مرزی ترکیب شده نیرویی و تغییرمکانی بخصوص در حالت تکیه‌گاهی و بخصوص تکیه‌گاه خمشی جوشی هستند و شیوه‌های متداول موجود در روابط بنیادین آیین‌نامه‌ها نمیتوانند درک درستی از توزیع تنش در محدوده چنین مرزهای مقید شده‌ای حتی در مقادیر کم بار خارجی ارائه دهند [۱]. این روابط تقریبی فقط در برخی موارد درست هستند اما در بسیاری از موارد منجر به پاسخهای نادرستی میشوند. میتوان گفت که دلیل اصلی پیدایش این برآوردهای نادرست در تابع تنش ایری اینست که در این روش اثر هر نوع شرایط تکیه‌گاهی بسادگی با نیرویی معادل که در تکیه‌گاه بوجود می‌آید قابل جایگزینی است اما در بسیاری از مسائل اجرایی در الاستیسیته که ترکیبی از شرایط مرزی نیرویی و تغییرمکانی هستند این شیوه در ارائه یک راه‌حل درست و دقیق در مقطع قید اتصال ناتوان است و آنرا به یک ناحیه بحرانی از دیدگاه توزیع تنش تبدیل میکند [۲۱]. چنین دیدگاهی در توابع ایری منجر به این نتیجه میشود که با استفاده از تئوری کلاسیک در مقاطع I شکل که تحت نیرویهای برشی قائم ناشی از بارگذاری عرضی هستند، عمده نیروی برشی به جان مقطع بدلیل عرض کم آن میرسد و سهم بالها از برش بدلیل عرض زیاد این اجزا بسیار ناچیز است، اما در واقعیت در بسیاری از موارد و بخصوص در تیرهای با بال‌های چاق مشاهده میگردد که بالها سهم قابل توجهی از برش قائم را در محدوده اتصال خمشی برخلاف فرضیات کلاسیک بخود اختصاص میدهند و میانه جان مقطع از برش خالی میشود. هرچه از مقطع اتصال دور میشویم علیرغم ثابت بودن مقدار برش مقطع (در حالت تیر با بار متمرکز) برعکس ناحیه اتصال، برش در بالها بسیار ناچیز میشود و این درحالیست که در میانه جان

حداکثر تنش برشی قائم دقیقاً مطابق با توزیع سهمی گون تنش برشی در روابط کلاسیک مشاهده میگردد [۲۵]. بی تردید این رویکرد بدلیل عدم نگرش درست در روابط مقاومت مصالح و آیین نامه های طراحی میتواند زمینه ساز بروز شکستهای جدی در اتصالات جوشی باشد. این تحقیق علاوه بر بررسی و تعیین عوامل موثر بر تناقضات در نهایت بدنبال اصلاح این حالت با تغییر جزئی در هندسه مقطع تیر در ناحیه اتصال با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Ansys Workbench میباشد. عبارتی هدف اینست که بتوان با رویکردی نسبتاً ساده، مساله توزیع تنش در بال و جان تیر در مقطع اتصال خمشی را تا حد ممکن به فرضیات کلاسیک نزدیک نمود.

۲- معرفی فنی موضوع

تحلیل تنش در یک جسم الاستیک در واقع یک مساله سه بعدی است. اما در مورد مسایل تنش صفحه ای و کرنش صفحه ای این مساله سه بعدی میتواند به سادگی به دوبعدی تبدیل شود [۲۶]. یک روش موثر و متداول در حل بسیاری از مسائل دوبعدی استفاده از تابع تنش ایری است [۲۷]. روشی که در سال ۱۸۶۲ توسط ایری مطرح گردید و تا به امروز بعنوان رابطه بنیادین در مقاومت مصالح در مقوله بررسی تنش کاربرد دارد. در این روش تنشها با استفاده از توابع تنش ایری نوشته شده و تشکیل یک معادله دیفرانسیل میدهند و از حل آن توزیع تنش در مقطع بدست می آید. اجزای تابع تنش ایری بفرم زیر نوشته میشود [۲۸]:

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \quad (3)$$

روابط ۱ تا ۳ تضمین میکنند که رابطه تعادل برقرار باشد. با ترکیب این روابط با روابط اساسی تنش-کرنش رابطه کاربردی زیر در حالت تنش صفحه ای حاصل میشود.

$$\left(\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} \right) = 0 \quad (4)$$

مساله تعیین توزیع تنش در مقطع در یک جسم الاستیک تنها به رسیدن به یک راه حل برای معادله دیفرانسیل رابطه ۴ محدود میشود که بررسیها نشان داده اند که پاسخ حاصله اقناع کننده همه شرایط مرزی مطرح شده نیستند. دلایل عمده پیدایش تناقض مابین روابط توزیع تنش ایری و حالات واقعی عبارتند از:

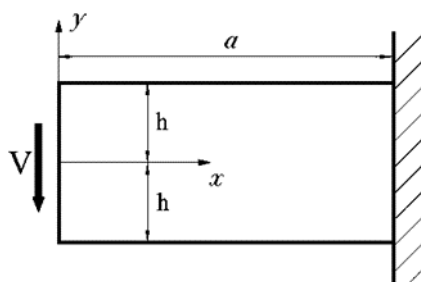
- ۱- فقدان وابستگی روابط مطرح شده با ثابتهای الاستیک مصالح از جمله مدول الاستیسیته و ضریب پواسون. این در حالیست که توزیع تنش در ناحیه اتصالات خمشی تا حد بسیار زیادی متاثر از پارامترهای مذکور است. این واقعیت در بخشهای بعدی بررسی خواهد شد.
 - ۲- همانگونه که قبلاً هم ذکر گردید توابع تنش ایری براحتی اثرات شرایط مرزی را با نیروهای معادل جایگزین میکنند که این شیوه سرمنشا بسیاری از برآوردهای نادرست در بحث توزیع تنش و نیروی برشی بویژه در اتصالات خمشی است. مثالی از این نواقص و برآوردهای نادرست در بررسی توزیع تنش تیر کنسولی تحت بار متمرکز انتهایی قابل مشاهده است.
- شکل ۱ نشان دهنده یک تیر کنسولی با مقطع مستطیلی تحت بار متمرکز انتهایی V در انتها ($x = 0$) می باشد. این تیر دارای تکیه گاه گیردار در انتهای دیگر ($x = a$) است. شرایط مرزی برای این مساله بفرم زیر نوشته می شود:

$$\sigma_{xx} = 0; x = 0 \quad (5)$$

$$\sigma_{yy} = 0; y = \pm h \quad (6)$$

$$\sigma_{xy} = 0; y = \pm h \quad (7)$$

$$\int_{-h}^{+h} \sigma_{xy} dy = V; x = 0 \quad (8)$$



شکل ۱: تیر کنسولی با بار متمرکز انتهایی

با استفاده از اصول تابع تنش ایری و روابط مربوطه، شکل اولیه این توابع بفرم زیر نوشته میشود:

$$\phi = Axy^3 \quad (9)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 6Axy \quad (10)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} = -3Ay^2 \quad (11)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0 \quad (12)$$

از روابط فوق مشهود است که شرایط مرزی ۵ و ۶ اقلان شده اما رابطه ۷ ارضا نمیگردد. از فرم رابطه ۱۱ مشهود است که یک جمله اضافی $-3Ah^2$ در هر دو لبه $y = \pm h$ بوجود می آید. این جمله اضافی را میتوان با اضافه نمودن جمله Bxy در تابع تنش ایری جبران نمود.

$$\phi = Axy^3 + Bxy \quad (13)$$

در اینصورت رابطه ۱۱ بفرم ۱۴ اصلاح میگردد:

$$\sigma_{xy} = -3Ay^2 - B \quad (14)$$

شرایط مرزی رابطه ۸ درصورت تعریف ضریب B بفرم ۱۵ میتواند اقلان گردد:

$$B = -3Ah^2 \quad (15)$$

بنابراین میتوان نوشت:

$$\sigma_{xy} = 3A(h^2 - y^2) \quad (16)$$

بنابراین ضریب A با جایگذاری رابطه ۱۶ در شرایط مرزی ۸ منجر به نتیجه زیر می شود:

$$A = \frac{V}{4h^3} \quad (17)$$

بنابراین تابع تنش ایری در نهایت برای این مساله بفرم زیر در می آید:

$$\varnothing = \frac{V(xy^3 - 3h^2xy)}{4h^3} \quad (18)$$

بنابراین اجزای تابع تنش را میتوان بفرم زیر نوشت:

$$\sigma_{xx} = \frac{3Vxy}{2h^3} \quad (19)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{3V(h^2 - y^2)}{4h^3} \quad (20)$$

$$\sigma_{yy} = 0 \quad (21)$$

طبق فرضیات تابع تنش ابری از لحاظ اقناع شرایط مرزی و توابع تنش ابری روابط ۱۹ تا ۲۱ برای کل طول تیر و حتی در محل تکیه‌گاه صادق و ثابت است و حالت دیگری ندارد. در واقع روابط ۱۹ و ۲۰ همان روابط ۲۲ و ۲۳ هستند که در مکانیک جامدات بعنوان روابط بنیادین توزیع تنش بیان شده‌اند و تنها به مشخصات مقطع و نیروی موجود در مقطع وابسته‌اند [۲۹].

$$\sigma_{xx} = \frac{My}{I} \quad (22) \quad \text{برای توزیع تنش ناشی از خمش}$$

$$\sigma_{xy} = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \quad (23) \quad \text{برای توزیع تنش ناشی از برش}$$

در حقیقت تمرکز این تحقیق بر روی صحت رابطه ۲۳ و عوامل تاثیر گذار بر آن در اتصالات خمشی فولادی است. در این رابطه، نیروی برشی کل موجود در مقطع، I ممان اینرسی کل مقطع حول محور خنثی، Q ممان استاتیکی سطح واقع در بالا یا پایین تراز مورد نظر و t پهنای مقطع است. حال با توجه به توزیع سهمی وار تنش برشی که از رابطه ۲۳ نتیجه میشود حداکثر تنش برشی قاعدتا در مقاطع I شکل در محور خنثی رخ می‌دهد، لیکن مقدار تنش برشی در جان تیر تقریباً ثابت می‌باشد. از طرف دیگر به خاطر پهنای زیاد بالها می‌بایست تنشهای برشی موجود در آنها بسیار کوچک باشد. به همین دلیل طبق تئوری کلاسیک توزیع تنش در تیرهای I شکل (حتی در مقطع اتصال) تنش برشی قائم کل مقطع را در آیین‌نامه‌های معتبر از تقسیم نیروی برشی کل بر سطح مقطع جان بدست می‌آورند، بنابراین براساس فرضیات کلاسیک مقدار تقریبی حداکثر تنش برشی در تیرهای I شکل که فقط سهم جان میباشد برابر است با [۳۰]:

$$\tau_{APPROX} = \frac{V}{A} \quad (24)$$

اما مطالعات بیانگر تفاوت قابل توجه توزیع نیرو و تنش برشی قائم در تیرها با نتایج فرضیات کلاسیک است. دلیل عمده این تفاوت به فرضیات اساسی تئوری تیرها بازمیگردد که بعنوان فرضیات ساده‌کننده، اگرچه استخراج روابط و حل مسائل عملی را ساده میکند، اما بعضاً موجب پیش‌بینی‌های نادرست میگردد. اولین تئوری در زمینه تئوری مقدماتی تیرها مبتنی بر فرض اویلر-برنولی می‌باشد که همان فرض مسطح ماندن صفحات عمود بر محور طولی تیر قبل و پس از خمش است. در این فرض کلیه مقاطع طولی تیر پس از اعمال خمش نیز به صورت صفحه باقی مانده و فقط به مقدار کمی دوران میکنند. در نتیجه طبق این فرض، کرنش در ارتفاع مقطع به صورت خطی تغییر میکند و اعوجاجی در مقطع رخ نمیدهد. فرض صفحه ماندن سطح مقطع تیر بعد از خمش یکی از مهمترین فرضیاتی است که در مکانیک جامدات تغییر شکل پذیر معرفی شده است. اما آنچه در خمش خالص مقاطع غیردایروی مشاهده میگردد، تغییر کرنش غیر صفحه-ای در ارتفاع مقطع است که از آن با عنوان تابیدگی نام برده میشود. با فرض اساسی تیرها تابیدگی بوجود آمده آنقدر کوچک فرض میشود که قابل صرفنظر کردن است اما واقعیت بخصوص در حالت تابیدگی مقید شده به گونه دیگری است. طبیعتاً فرضیات اساسی از جمله صرفنظر از این تابیدگی در مقوله خمش و برش بدلیل ارتباط نزدیک روابط هریک، مشترک خواهد بود [۲۵].

بررسی‌ها نشان داده‌اند دریک تیر با هر سطح مقطعی در مجاورت مرزهای مقید بعلت تقید کامل یا جزئی تغییر شکلهای حجمی ناشی از اثرات پواسون و تقید تابیدگی در مقطع اتصال که در فرض اساسی تیرها اصولاً از آن صرفنظر میشود، توزیع تنش و نیرو تفاوت بسیار قابل توجهی با نتایج فرضیات کلاسیک خواهد داشت. سیستم تعادل استاتیکی نیرویی ناشی از شرایط مرزی تغییرمکانی میتواند در یک عضو با دو مکانیزم بوجود آید. اولی بصورت اثر خودکرنشی است که بعلت تقید تغییرشکلهای خود عضو بوجود می‌آید. بعنوان مثال در یک انتهای تیر، تقید اثرات پواسون و تغییرشکلهای برشی در تکیه‌گاه موجب پیدایش انرژی کرنشی الاستیک اضافی بعلت اثرات

خودکرنشی در سطح مقطع تیر در محل تکیه گاه میگردد. مکانیزم دوم عبارتست از جابجاییهای اضافی که بوسیله تغییرشکلهای عضو مجاور به مقطع اتصال تحمیل میگردد. بعنوان مثال در یک اتصال خمشی تیر به ستون جابجاییهای اضافی از ستون به تیر تحمیل شده که بعلت تغییرشکلهای ناشی از پیچش و برش بدنه ستون در ناحیه اتصال می باشد و یا جابجاییهای اعمال شده به بال تیر ناشی از خمش موضعی بال ستون موجب بازتوزیع تنش در مقطع تیر در مرز تکیه گاه میگردد [۲۵].

در مطالعه‌ای که بر روی یک تیر کنسولی با مقطع مستطیلی تحت بار متمرکز انتهایی انجام شد، مشاهده گردید که توزیع تنش برشی در مرز تکیه گاه توزیع سهموی نداشته و این بازتوزیع تنش ناشی از اثرات خودکرنشی تحمیل شده توسط قیدهای جابجایی مقطع تیر در تکیه گاه میباشد. مشخصا در مقاطع مستطیلی اثر مربوط به تقید انتهایی مقطع تیر و اثرات خودکرنشی اعمال شده توسط قیدهای محدود کننده جابجایی به دو دسته تقسیم میشوند [۲۵]:

۱- تقید کرنشهای جانبی و تغییرشکلهای حجمی در مقطع تیر در ناحیه مرز تکیه گاه که خود بدلیل اثرات پواسون بوجود می آید.

۲- تقید تابیدگیهای مقطع تیر در ناحیه مرز تکیه گاه بعلت وجود تکیه گاه گیردار که خود بدلیل تغییرشکلهای برشی بوجود آمده است. عبارتی این تابیدگیها نه تنها بر اساس فرضیات اساسی خمش قابل صرف نظر کردن نیستند بلکه در این شرایط مرزی اثرات قابل توجهی دارند.

عبارتی در یک تکیه گاه گیردار قیدهای مقید کننده اثرات پواسون و اثرات تابیدگی موجب پیدایش انرژی کرنشی الاستیک اضافی در سطح مقطع تیر در نزدیکی مقطع تکیه گاه میگردد. کرنش برشی ناشی از تقید اثرات پواسون موجب پیدایش تنش برشی τ^{SP} و کرنش برشی ناشی از تقید اثرات تابیدگی موجب پیدایش تنش برشی τ^{SI} میگردد [۲۵].

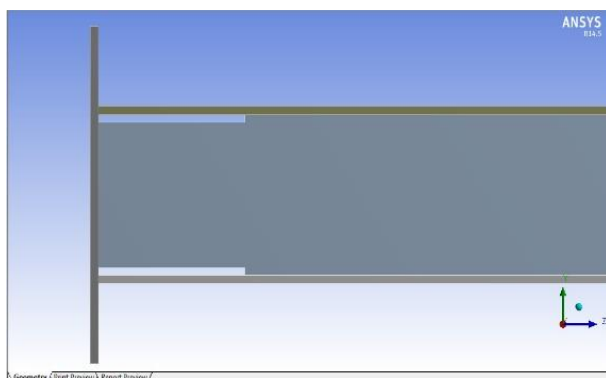
در تیرهای I شکل مساله اساسا متفاوت است چراکه توزیع تنش در ناحیه اتصال بدلیل اندرکنش بال و جان در ناحیه اتصال و قیدی که برای هم فراهم میکنند بسیار پیچیده تر میشود. چراکه فرض بر اینست که بدلیل اتصال بالهای تیر به جان، بالها تابیدگی قائم در جان را که توسط تقید اثرات پواسون در نزدیکی تکیه گاه بوجود می آید را بسیار مقیدتر مینمایند و در نتیجه لنگرهای متمرکزی در مرکز بالهای بالایی و پایینی در نزدیکی تکیه گاه بوجود می آید که این لنگرهای موضعی در بالها موجب پیدایش تنشهای برشی قائم اضافی میگردد. عبارتی مجموع تقیدهای ذکر شده بوجود آمده موجب بازتوزیع قابل توجه برش در مقطع اتصال میگردد که مساله توزیع تنش برشی را در این ناحیه بسیار بحرانی مینماید. در مقاطع I شکل که ضخامت بال و جان نسبت به بعد دیگر هریک کوچک است و از طرفی مساله تقید بال برای جان و بازتوزیع تنش ناشی از آن نیز مطرح میگردد، باید سهم هریک از پارامترهای تاثیرگذار بر نحوه توزیع تنش بررسی شود تا بتوان بنحوی با آن مقابله نمود و شکستهای ناشی از توزیع تنش پیش بینی نشده را حذف کرد. از طرفی برای یک عضو الاستیک اصل جمع آثار قوا برای توزیع تنش و نیرو در محدوده تکیه گاه با توجه به مقادیر توزیع تنش و نیروی واقعی، توزیع تنش و نیروی ناشی از تئوری کلاسیک، توزیع تنش و نیروی ناشی از تقید اثرات پواسون، توزیع تنش و نیروی ناشی از تقید تابیدگی و توزیع تنش و نیروی ناشی از تقید بال برای جان در محل تکیه گاه صادق است. با این فرض اساسی میتوان با کمک نرم افزار اجزای محدود سهم هریک از پارامترهای مذکور موثر بر توزیع تنش و نیرو را در مقطع اتصال محاسبه نمود.

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Ansys Workbench توزیع واقعی نیرو و تنش برشی قائم، مقدار تاثیر تقید ناشی از اثرات پواسون بر توزیع نیرو و تنش با صفر در نظر گرفتن مقدار ضریب پواسون در مدلها و مقدار تاثیر تقید بال برای جان بر توزیع نیرو و تنش با جداسازی بال و جان در ناحیه اتصال با شکاف بدست آمد. توزیع نیرو و تنش کلاسیک نیز با روابط مقاومت مصالح در هر مدل محاسبه گردید. با داشتن مقادیر فوق مقدار تنش ناشی از تقید تابیدگی نیز در مدلها با استفاده از اصل جمع آثار قوا حاصل شد.

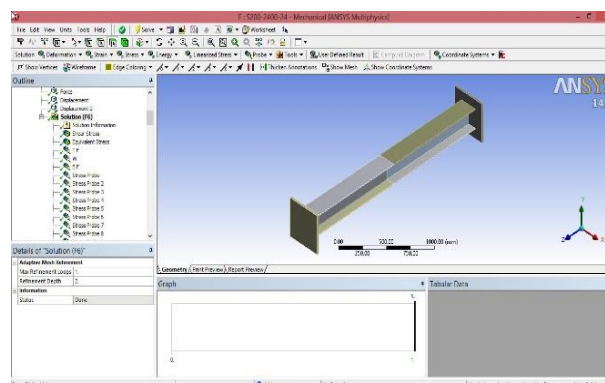
۳- مدلسازی اجزای محدود

در این مقاله از نرم افزار اجزای محدود Ansys Workbench جهت ساخت مدلها استفاده شد. باتوجه به اینکه هدف شناخت توزیع تنش در مقطع اتصالات در محدوده الاستیک می باشد، رفتار فولاد بر مبنای تئوری درجه یک خطی (رفتار خطی مصالح) مدل شده است و

رفتار فولاد در مدلها بصورت خطی و دارای مدول الاستیسیته $2.1 \times 10^5 \text{ Mpa}$ و ضریب پواسون ۰٫۳ و در مدلهای بدون تقید اثر پواسون این ضریب برابر ۰ است. از طرفی در همه مدلهای ساخته شده بار به مقدار ثابت و بصورت متمرکز استاتیکی و مستقل از زمان برابر با ۱۰۰۰۰ نیوتن بر روی بال بالایی و در مرکز تیر اعمال گردیده است که این خود موجب میشود در تمامی مدلها طبق روابط تعادل استاتیکی مقدار نیروی برشی مقطع اتصال یکسان باشد و تفاوت توزیع نیرو و تنش در بال و جان مقطع اتصال با توجه به یکسان بودن برش مقطع بخوبی قابل ارزیابی باشد. بار اعمالی تنها در یک گام به مدلها اعمال شد و در همه مدلها هدف اصلی استخراج میزان نیروی برشی قائم در بال بالا و پایین و جان و نحوه توزیع تنش برشی قائم در مقطع اتصال بر روی محور تقارن قائم تیر است. باتوجه به هدف انجام مطالعه پارامتریک در تحقیق، پارامترهای متغیر در مدلها عبارتند از درصد صلبیت اتصال که با مدلسازی ورقهایی فولادی به ضخامتهای ۷، ۱۱، ۱۵، ۱۹، ۲۴ و ۳۰ میلیمتر در مدلها حاصل گردید. در بخشهای بعدی درصد صلبیت حاصل از هر یک از ضخامتها ذکر خواهد شد. طول دهانه تیر به میزان ۲۴۰۰، ۳۶۰۰، ۴۸۰۰ و ۶۰۰۰ میلیمتر مدل شد، که تصور بر اینست میتوانند پارامترهای تاثیرگذاری بر نیرو و تنش برشی ناحیه اتصال باشند. از طرفی در ۲۴ مدل اصلی (۴ طول دهانه تیر هر یک با ۶ ضخامت ورق انتهایی) که در آنها طول دهانه تیر و درصد صلبیت اتصال متغیر است، ۲۴ مدل مشابه اما با ضریب پواسون برابر صفر بمنظور برآورد اثر تقید ناشی از کرنشهای جانبی و ۲۴ مدل مشابه دیگر با شکافهایی با هندسه مشخص بمنظور برآورد اثر تقید بال بر جان (مجموعاً ۷۲ مدل) ساخته شد. در مدلهایی که در آنها هدف تعیین میزان تاثیر تقید بال بر جان در محدوده اتصال است شکافهایی به عرض ۱۰ میلیمتر و طول ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلیمتر بترتیب در تیرهای با طول دهانه ۲۴۰۰، ۳۶۰۰، ۴۸۰۰ و ۶۰۰۰ میلیمتر در هندسه نرم افزار مدل گردید. این طول شکافها بعنوان بهینه طول تاثیرگذار بر حذف تقید بال بر جان تیر در محدوده اتصال با مدلسازی هر یک از طول دهانهها با شکافهایی با طول موردنظر، در تحقیقی مجزا انتخاب شدند. از طرفی شرایط مرزی تکیه گاهی بصورت اتصال کامل مقطع انتهایی تیر به ورقهای با ضخامتهای مذکور حاصل گردید. هندسه کلی مدلهای ساخته شده در نرم افزار Ansys Workbench و نیز هندسه کلی شکاف مدل شده در نرم افزار بترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آمده است.



شکل ۳: نحوه مدلسازی شکاف بین بال و جان در نرم افزار



شکل ۲: فرم کلی مدلهای ساخته شده در نرم افزار

با توجه به انجام صرفاً تحلیل استاتیکی در نرم افزار و عدم انجام تحلیل کمانشی هیچیک از مدلها دارای قید جانبی نیستند. چراکه اصولاً بدلیل تنظیمات نرم افزاری در تحلیل استاتیکی در آنها کمانشی رخ نمیدهد. در راستای رسیدن به بهترین اندازه مش بندی در مدلها که دارای حداقل زمان تحلیل کامپیوتری و حداکثر همگرایی در تحلیل باشند، ۵ مدل در ابتدا با اندازه‌های مختلف المان بندی و تحلیل شد و با نتایج حاصل از روابط کلاسیک (در فاصله دور از تکیه گاه گیردار) مقایسه گردید، ملاحظه شد که المانهایی با اندازه ۵ میلیمتر دارای حالت بهینه پاسخ براساس ملاکهای ذکر شده هستند و در تمام مدلها این اندازه المان برای مش بندی انتخاب شد. در همه مدلها در ارتفاع مقطع و در طول تیر سنسورهایی مجازی برای تعیین مقدار تنش برشی قائم در ضخامت بال و در ارتفاع جان قرار داده شد. از طرفی

با استفاده از قابلیت Ansys Workbench که توانایی تعیین نیروهای عکس العمل شرایط مرزی در محل تکیه‌گاه را دارد، این مقدار برای تعیین نیروی برش قائم در بال بالایی و پایینی و جان مقطع در محل اتصال گیردار محاسبه شد. همانگونه که ذکر گردید در راستای انجام مطالعه پارامتریک حاضر ۷۲ مدل که در آنها پارامترهایی مانند طول دهانه تیر و درصد صلیبیت اتصال متغیر است، ساخته شد که مشخصات هر یک از مدلها در جدول ۱ آمده است. بمنظور دسته بندی بهتر مدلهای ساخته شده، ۷۲ مدل ذکر شده به ۴ گروه با ۱۸ مدل تقسیم شدند. در هر گروه طول دهانه تیر ثابت اما ضخامت ورق انتهایی و عبارتی درصد صلیبیت اتصال متغیر است. هر کدام از گروهها در سه حالت دارای ضریب پواسون برابر ۰٫۳، (حالت واقعی)، با ضریب پواسون برابر ۰ (حالت بدون تاثیر تقید کرنشهای جانبی) و حالت دارای شکاف بین بال و جان (حالت بدون تاثیر تقید بال بر جان در ناحیه اتصال) مدل شدند. نام هر یک از مدلها بفرم Ba-b-c-d آمده است که در این نام گذاری a و b و c و d بترتیب طول دهانه تیر به میلیمتر، ضخامت ورق انتهایی به میلیمتر، طول شکاف و ضریب پواسون مدل می‌باشند. لازم بذکر است که ضخامت بال و جان کلیه مدلها برابر ۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شد.

جدول ۱: نام ۸۴ مدل ساخته شده

مدلهای گروه G1	مدلهای گروه G2	مدلهای گروه G3	مدلهای گروه G4
B2400-7-0-0.3	B3600-7-0-0.3	B4800-7-0-0.3	B6000-7-0-0.3
B2400-11-0-0.3	B3600-11-0-0.3	B4800-11-0-0.3	B6000-11-0-0.3
B2400-15-0-0.3	B3600-15-0-0.3	B4800-15-0-0.3	B6000-15-0-0.3
B2400-19-0-0.3	B3600-19-0-0.3	B4800-19-0-0.3	B6000-19-0-0.3
B2400-24-0-0.3	B3600-24-0-0.3	B4800-24-0-0.3	B6000-24-0-0.3
B2400-30-0-0.3	B3600-30-0-0.3	B4800-30-0-0.3	B6000-30-0-0.3
B2400-7-0-0	B3600-7-0-0	B4800-7-0-0	B6000-7-0-0
B2400-11-0-0	B3600-11-0-0	B4800-11-0-0	B6000-11-0-0
B2400-15-0-0	B3600-15-0-0	B4800-15-0-0	B6000-15-0-0
B2400-19-0-0	B3600-19-0-0	B4800-19-0-0	B6000-19-0-0
B2400-24-0-0	B3600-24-0-0	B4800-24-0-0	B6000-24-0-0
B2400-30-0-0	B3600-30-0-0	B4800-30-0-0	B6000-30-0-0
B2400-7-150-0.3	B3600-7-200-0.3	B4800-7-250-0.3	B6000-7-300-0.3
B2400-11-150-0.3	B3600-11-200-0.3	B4800-11-250-0.3	B6000-11-300-0.3
B2400-15-150-0.3	B3600-15-200-0.3	B4800-15-250-0.3	B6000-15-300-0.3
B2400-19-150-0.3	B3600-19-200-0.3	B4800-19-250-0.3	B6000-19-300-0.3
B2400-24-150-0.3	B3600-24-200-0.3	B4800-24-250-0.3	B6000-24-300-0.3
B2400-30-150-0.3	B3600-30-200-0.3	B4800-30-250-0.3	B6000-30-300-0.3

۴- اعتبارسنجی مدلهای اجزای محدود ساخته شده

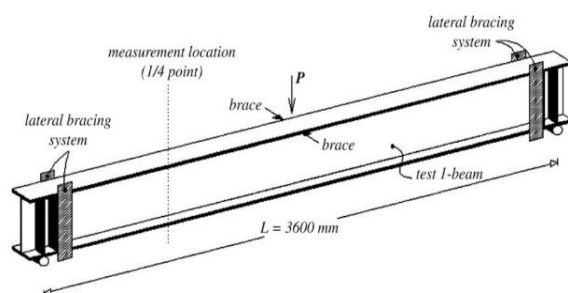
با توجه به عدم وجود مطالعات آزمایشگاهی در خصوص تعیین توزیع نیرو و تنش برشی در منابع معتبر در مقطع اتصال تیر به تکیه‌گاه بویژه در اتصالات خمشی، صحت مدلسازی در این تحقیق در نرم‌افزار Ansys Workbench به دو روش انجام شد. اول اعتبارسنجی با تستهای آزمایشگاهی زیرکیان و اعتبارسنجی با نتایج حاصل از تئوری کلاسیک تیرها در نمونه‌های با اتصال مفصلی. البته ذکر این نکته ضروریست که احتمالاً دلیل عدم وجود نتایج دقیق آزمایشگاهی در مقوله توزیع نیرو و تنش برشی، پیچیده بودن تعیین تنش برشی در مقطع اتصال مستقیم تیر به ستون در مصالح جوش باشد.

۴-۱- اعتبارسنجی با تستهای آزمایشگاهی زیرکیان [۳۱]

یکی از معتبرترین مطالعات آزمایشگاهی فول مقیاس که در مورد کمانش پیچشی جانبی اعوجاجی موجود است توسط زیرکیان انجام شده است و طبق مطالعات نگارنده از لحاظ اعتبار مرجع بسیاری از مطالعات مرتبط است. با توجه به اینکه در بسیاری از تحقیقات

اثبات شده است که نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از دقت بسیار بالایی برخوردار است و از طرفی بعلت عدم وجود مطالعات آزمایشگاهی در خصوص نحوه توزیع نیرو و تنش برشی در مقطع اتصال، در این تحقیق جزئیات مدلسازی نمونه‌ها، مشخصات مصالح، محل تکیه‌گاهها، محل و نحوه قرارگیری قیدهای جانبی، روند اعمال بار و محل استقرار تغییرمکان‌سنجها دقیقا از متن تحقیق استخراج شده و در نرم‌افزار Ansys Workbench بمنظور اعتبارسنجی مدلها وارد شده است. نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق زیرکیان شامل ۴ تیر (۲ تیر لانه‌زنبوری و ۲ تیر جان پیوسته) بود. نمونه‌های آزمایشگاهی دارای تکیه‌گاههای ساده در دو انتها و داری تکیه‌گاه جانبی موثر در وسط طول دهانه جهت جلوگیری از پیچش در مجاور بال فوقانی بودند. مشخصات نمونه‌ها بصورت شماتیک در شکل ۴ آورده شده است. هدف از این مطالعه آزمایشگاهی بررسی مد کمانش پیچشی جانبی اعوجاجی مهار شده در نمونه‌های مورد نظر بود. بدین منظور زیرکیان در نقطه $1/4$ طول دهانه تیر سه تغییرمکان‌سنج در سطح بال فوقانی، نقطه میانی ارتفاع و سطح بال پایینی قرار داد و با اعمال نیرو، تغییرمکانهای جانبی متناظر را بدست آورد.

نتیجه مطالعه او در تستهای آزمایشگاهی، مشاهده موج کمانشی سینوسی بود که از تغییرمکانهای متناظر مشاهده شد. در راستای اعتبارسنجی مدل‌های ساخته شده در این تحقیق از نظر مطابقت با نتایج تستهای آزمایشگاهی، باتوجه به اینکه مدل‌های موردنظر این تحقیق که در بخشهای بعدی خواهند آمد لانه‌زنبوری نیستند، دو مدل جان پیوسته تست زیرکیان عینا در نرم‌افزار Ansys Workbench ساخته شد، که مشخصات مقطع تیرها در جدول ۲ آمده است. در این جدول L, t, s, b, h بترتیب ارتفاع کلی مقطع، عرض بال‌های تیر، ضخامت جان تیر، ضخامت بال تیر و طول دهانه تیر هستند. فرم کلی مدل ساخته شده برای نمونه P180 در شکل ۵ آمده است. سپس بر روی هر یک از دو مدل پس از انجام تحلیل کمانشی خطی، با تعریف نقص اولیه براساس جزئیات ذکر شده در تحقیق زیرکیان، تحلیل کمانش غیرخطی انجام شد. بارنهایی اعمال شده از نتایج تستهای زیرکیان در هر مدل مشابه استخراج شد و در ۱۵ زیرگام در تحلیل کمانش غیرخطی ذکر شده به مدل‌های نرم‌افزار Ansys Workbench اعمال گردید.



شکل ۴: فرم کلی نمونه‌های ساخته شده در تستهای آزمایشگاهی زیرکیان

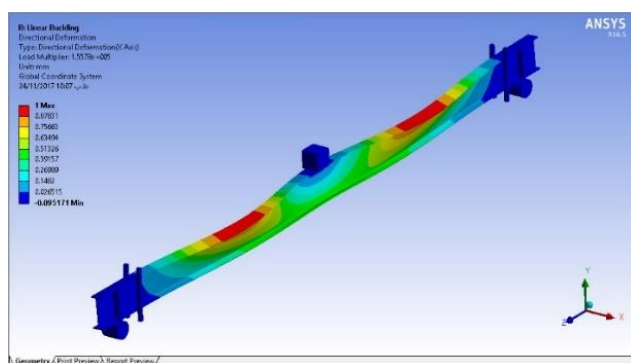
با قرار دادن تغییرمکان‌سنجهای مجازی در ۳ نقطه ارتفاع تیر شامل سطح بال فوقانی، نقطه میانی ارتفاع و سطح بال تحتانی مدلها در $1/4$ طول دهانه تیر و با توجه به قرار دان قید موثر جانبی در وسط دهانه، مقادیر تغییرمکانهای جانبی متناظر با نیرو بدست آمد.

جدول ۲: مشخصات مقطع تیر در مطالعه زیرکیان

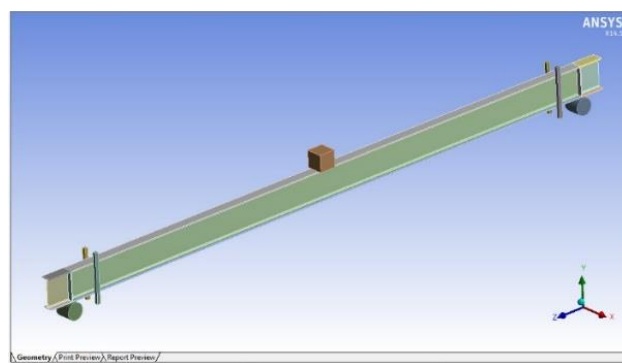
Model	h (mm)	b (mm)	s (mm)	t (mm)	L (mm)
P180	180	64	4.4	6.3	3600
P210	210	73	4.7	6.9	3600

فرم تغییر شکل جانبی سینوسی بویژه در بال بالا که در نتایج مطالعات زیرکیان نیز حاصل شد هم در تحلیل کمانشی خطی و هم در تحلیل کمانشی غیرخطی قابل ملاحظه است. نمونه‌ای از این تغییر شکل جانبی سینوسی که از نتایج نمونه P210 استخراج شده است و در شکل ۶ آمده است.

با استخراج تغییر مکانهای جانبی از نرم افزار که در ۱/۴ دهانه و در سطح بال فوقانی، نقطه میانی ارتفاع و سطح بال پایینی قرار داده شده بود، نتایج مورد نظر بدست آمد. شکل ۷ نشان دهنده نتایج مربوط به مدل P210 در تحقیق زیرکیان است که از تستهای آزمایشگاهی انجام شده بدست آمد. در این نمودار ۷، T . 8 و T . 9 بترتیب تغییر مکانهای جانبی بال فوقانی، نقطه میانی ارتفاع و بال پایینی در ۱/۴ طول دهانه است. براساس مدل‌های ساخته شده جهت اعتبار سنجی این تحقیق، شکل ۸ مربوط به نتایج اعتبار سنجی تحقیق حاضر براساس مدل مشابه ساخته شده در نرم افزار Ansys Workbench است. بررسی نتایج بدست آمده از نرم افزار که مربوط به پاسخ حالت غیرخطی رفتار مصالح است هم در بال بالا، هم در میانه ارتفاع و هم در بال تحتانی مطابقت بسیار قابل قبولی نسبت به نتایج تستهای آزمایشگاهی زیرکیان نشان میدهد. این مطابقت نتایج در مدل P180 نیز بسیار قابل توجه است و میتواند تاییدی بر صحت مدل‌سازی‌های بعدی باشد. اختلافات بسیار جزئی که از مقایسه دو نمودار مشاهده میشود بی‌تردید مربوط به مسائلی از جمله میزان دقیق نقص اولیه در اجرا، شرایط آزمایشگاهی، نقصهای موجود در دستگاههای اعمال نیرو، اندازه گیری نیرو و تغییر مکان و ... می‌باشد.



شکل ۶: تغییر شکل سینوسی مشاهده شده در مدل P180

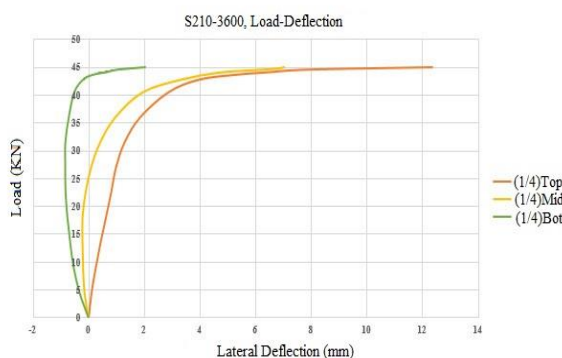


شکل ۵: فرم کلی مدل‌های ساخته شده در نرم افزار جهت اعتبار سنجی

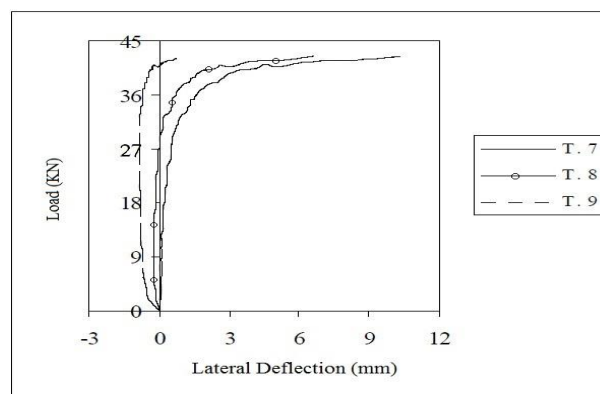
۴-۲- اعتبار سنجی با روابط کلاسیک

علاوه بر اعتبار سنجی براساس تستهای آزمایشگاهی زیرکیان که در بخش ۴-۱ مطرح شد، تصور بر اینست که با روابط کلاسیک موجود در مقاومت مصالح نیز بتوان اعتبار و دقت مدل‌های تحقیق را برآورد نمود. بمنظور بررسی صحت مدل‌های ساخته شده در ابتدا ۴ تیر به طولهای ۲۴۰۰، ۳۶۰۰، ۴۸۰۰ و ۶۰۰۰ میلی‌متر که بر روی دو تکیه‌گاه مفصلی قرار دارند و همه آنها تحت بار متمرکز ۱۰۰۰۰ نیوتن قرار گرفته بودند در نرم افزار Ansys Workbench ساخته شدند و بر روی همه آنها تحلیل استاتیکی خطی انجام شد. همه این تیرها دارای ارتفاع ۲۲۰ میلی‌متر و ضخامت بال و جان ۱۰ میلی‌متر از جنس فولاد بودند. برای هر ۴ مدل ساخته شده مقدار تنش برشی بر روی تار خنثی و در فاصله ۱۰۰ میلی‌متری تکیه‌گاه، هم با استفاده از رابطه ۲۳ و هم با استفاده از تحلیل نرم‌افزاری بدست آمد. بعنوان مثال برای مدل تیر بطول ۲۴۰۰ میلی‌متر و با ارتفاع مقطع برابر ۲۲۰ میلی‌متر مقادیر پارامترهای مربوط به رابطه ۲۳ این مقاله بشرح ذیل بدست می‌آید.

$$V = 5000N, Q = 260000mm^3, I = 50800000mm^4, t = 10mm$$



شکل ۸: نمودار بار-تغییر مکان مدل P180 در نرم افزار جهت اعتبارسنجی



شکل ۷: نمودار بار-تغییر مکان مدل P180 در تست آزمایشگاهی زیرکیان

با استفاده از رابطه ۲۳ مقدار تنش برشی قائم بر روی تارخنتی و با ۴ رقم اعشار برابر 2.5590MPa خواهد شد. با استفاده از نرم افزار Ansys Workbench این مقدار در فاصله ۴۰۰ میلیمتری تکیه گاه و با ۴ رقم اعشار برابر 2.5588MPa میشود که بیانگر دقت قابل قبول مدلسازی میباشد.

۵- ارائه نتایج

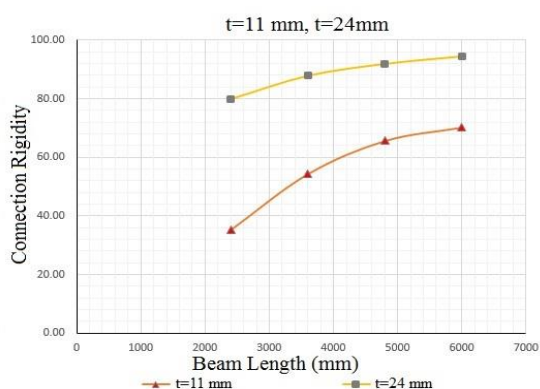
۵-۱- درصد صلبیت اتصالات با توجه به طول دهانه و ضخامت ورق انتهایی

همانگونه که در بخش ۳ اشاره شد یکی از پارامترهای مورد نظر درصد صلبیت اتصال می باشد. از اینرو در دو انتهای کلیه مدلها ورقهایی با ضخامت از ۷ تا ۳۰ میلیمتر بمنظور ایجاد درصد صلبیتهای متفاوت قرار داده شدند. پس از آنالیز کلیه مدلها در حالت واقعی (با ضریب پواسون برابر ۰٫۳ و بدون شکاف بین بال و جان در ناحیه اتصال) مقادیر لنگر عکس العمل انتهایی محاسبه شد و با استفاده از آنها درصد صلبیت ۲۴ مدل واقعی بشرح جدول ۳ حاصل گردید. تغییر درصد صلبیت اتصال با تغییر ضخامت ورق در قالب نمودار بعنوان مثال برای تیر با دهانه ۴۸۰۰ میلیمتر در شکل ۹ نیز آمده است. البته توجه به این نکته نیز ضروری است که در کلیه طول دهانهها تغییرات اولیه ضخامت ورق تاثیر بیشتری نسبت به ضخامتهای بالاتر ورق در افزایش صلبیت اتصال دارد.

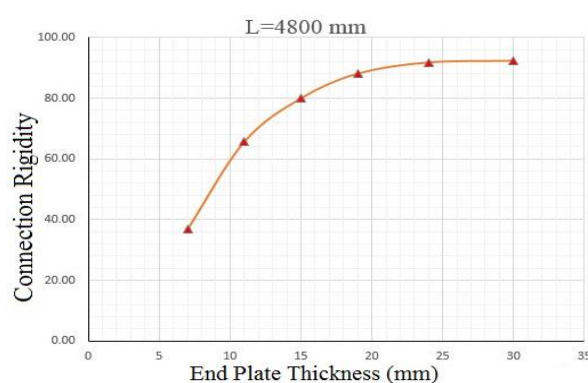
از طرفی میبایست به این مساله نیز توجه نمود که همانگونه که از جدول ۳ مشهود است ضخامتهای برابر ورق انتهایی در تیرهای با طول دهانه بیشتر تولید درصد صلبیت اتصال بالاتری مینماید. این نکته در شکل ۱۰ نیز بعنوان مثال برای ورقهای انتهایی با ضخامتهای ۱۱ و ۲۴ میلیمتر برای طول دهانههای مورد نظر تحقیق آورده شده است.

جدول ۳: تغییر درصد صلبیت اتصالات در هر گروه با تغییر ضخامت ورقهای انتهایی

ضخامت ورق انتهایی طول دهانه تیر	۷	۱۱	۱۵	۱۹	۲۴	۳۰
۲۴۰۰	۱۲٫۶۹	۳۵٫۱۵	۵۸٫۰۹	۷۱٫۱۸	۷۹٫۹۲	۸۴٫۳۴
۳۶۰۰	۲۹٫۳۴	۵۴٫۳۰	۷۲٫۲۴	۸۲٫۲۸	۸۷٫۸۱	۸۹٫۷۳
۴۸۰۰	۳۶٫۷۵	۶۳٫۳۴	۸۰٫۰۰	۸۸٫۱۷	۹۱٫۸۶	۹۲٫۴۲
۶۰۰۰	۴۳٫۱۱	۷۰٫۲۶	۸۵٫۴۴	۹۲٫۰۶	۹۴٫۴۲	۹۵٫۶۵



شکل ۱۰: تاثیر طول دهانه تیر بر درصد صلبیت اتصال با توجه به ضخامت یکسان ورق انتهایی



شکل ۹: تاثیر ضخامت ورق انتهایی بر درصد صلبیت اتصال در نمونه‌های گروه G3

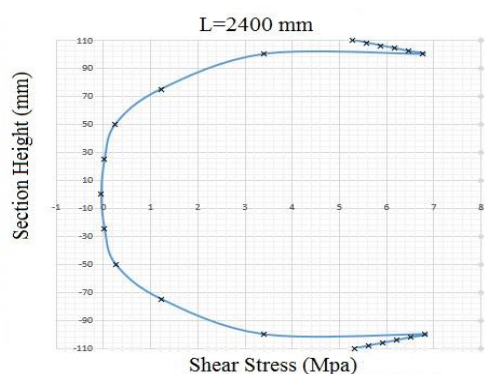
۵-۲- بررسی تنش برشی قائم مقطع اتصال در حالت واقعی و کلاسیک در ارتفاع مقطع

بررسیها در کلیه زیرگروهها در حالت واقعی نشان میدهد که توزیع تنش برشی مقطع اتصال خمشی تفاوت قابل توجهی با فرضیات کلاسیک توزیع تنش برشی دارد. نمونه‌ای از این اختلاف بعنوان مثال برای مدل B2400-70-0-0.3 در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه گردیده است. نمودار مربوط به حالت واقعی توزیع تنش از نتایج تحلیل نرم‌افزاری و نتایج مربوط به حالت کلاسیک از روابط تئوری کلاسیک تیرها (رابطه ۲۳) بدست آمد. همانگونه که از شکل ۱۲ نتیجه میشود تنش برشی در دورترین تارها بسیار زیاد است و این درحالیست که میانه جان از تنش برشی قائم خالی میشود. در صورتی که فرضیات کلاسیک نتیجه‌ای دقیقا متضاد این مشاهده را دارند که در شکل ۱۱ آمده است.

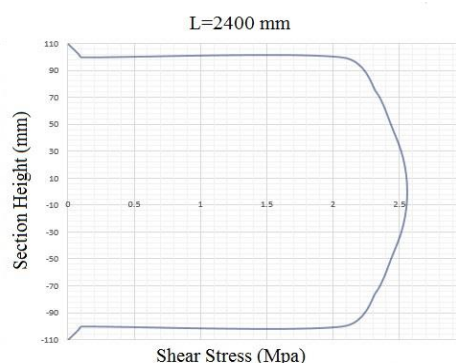
۵-۳- بررسی نیروی برشی قائم مقطع اتصال در حالت واقعی و کلاسیک در بال و جان تیر

با توجه به اینکه بار متمرکز اعمال شده در وسط دهانه در همه مدلها یکسان است، مقدار عکس‌العمل برشی تکیه‌گاهها فارغ از مقادیر متفاوت طول دهانه تیر میبایست در همه مدلها یکسان باشد. عبارتی با توجه به اینکه مقدار بار متمرکز وسط دهانه در همه مدلها برابر ۱۰۰۰۰ نیوتن است قاعدتا مقدار عکس‌العمل برشی دو تکیه‌گاه میبایست در همه مدلها برابر ۵۰۰۰ نیوتن باشد. از طرفی اصل تعادل ایجاب میکند که در مقطع اتصال مجموع نیروی برشی اختصاص یافته به بالها و جان در کلیه مدلها و با هر طول دهانه و درصد صلبیت اتصال برابر ۵۰۰۰ نیوتن باشد.

در جدول ۴ مقدار نیروی اختصاص یافته به بالها و جان در مدلها در حالت واقعی براساس نتایج آنالیز اجزای محدود آمده است. آنچه مشهود است مجموع نیروی برشی قائم اختصاص یافته به اجزای مقطع تیر در کلیه مدلها برابر ۵۰۰۰ نیوتن است. اما براساس روابط تئوری کلاسیک تیرها با انتگرالگیری از رابطه ۲۳ بر روی سطح مقطع اجزا در کلیه مدلها به هریک از بالها ۱۰۵ نیوتن و به جان تیر قاعدتا ۴۷۹۰ نیوتن نیروی برشی قائم باید اختصاص یابد. اما آنچه از آنالیز اجزا محدود حاصل میشود تفاوت قابل توجهی با مقادیر مذکور دارد. با توجه به جدول ۴ در کلیه مدلها نیروی برشی قائم بسیار قابل توجهی به بالها اختصاص میابد که برخلاف روابط مقاومت مصالح است. بررسی نتایج ذکر شده نشان میدهد که در تمامی زیرگروهها درصد صلبیت اتصال تاثیر قابل ملاحظه‌ای در نیروی برشی اختصاص یافته به هریک از اجزای مقطع تیر دارد.



شکل ۱۲: توزیع واقعی تنش برشی مقطع اتصال در مدل B2400-70-0-0.3



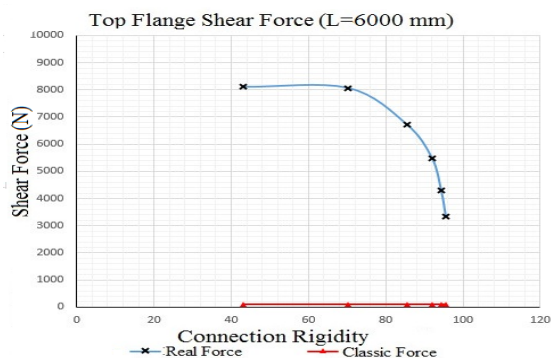
شکل ۱۱: توزیع کلاسیک تنش برشی با توجه به برش ثابت مقطع تیر در همه مدلها

در زیر گروه با کمترین طول دهانه (۲۴۰۰ میلیمتر) در گروه G1 نیروی برشی اختصاص یافته به بالها از مقدار نسبتاً قابل توجهی در کمترین درصد صلبیت آغاز شده و با افزایش درصد صلبیت (تا حدود ۵۸ درصد) سیر افزایشی دارد و از آن پس مجدداً کاهش می‌یابد. در زیر گروههای با طول ۳۶۰۰ میلیمتر در گروه G2 و ۴۸۰۰ میلیمتر در گروه G3 نیز وضعیت به همین منوال است، یعنی نیروی برشی قائم بال تا درصد صلبیت حدود ۵۵ تا ۶۰ درصد سیر افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد. در مورد زیر گروههای با طول دهانه ۶۰۰۰ میلیمتر نیز آنچه مشاهده میشود مشابه زیر گروههای قبلی است. اما در مورد نیروی برشی سهم بالها نکته قابل توجه دیگر اینست که با افزایش طول دهانه تیر علیرغم ثابت بودن برش کل مقطع، برش اختصاص یافته به بالها در ضخامتهای ورق انتهایی برابر به میزان بسیار زیادی افزایش می‌یابد تا جاییکه مثلاً در مدل B3600-30-0-0.3 سهم برش اختصاص یافته به هر یک از بالها حدود سه برابر سهم برش اختصاص یافته به جان است. تغییر نیروی برشی قائم بالها در حالت واقعی با توجه به درصد صلبیت اتصال در مقایسه با نتایج کلاسیک بعنوان مثال برای گروههای G1 و G4 در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.

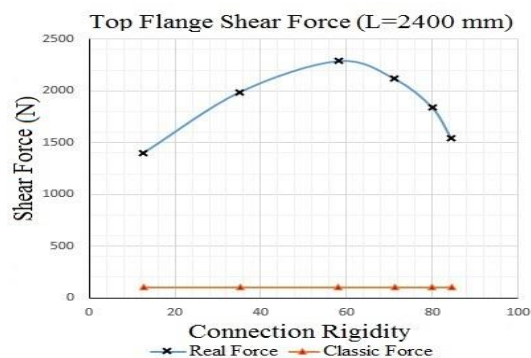
آنچه مسلم است با توجه به اصل تعادل مجموع نیروی برشی قائم مقطع در کلیه اجزا میبایست برابر برش اعمال شده به مقطع باشد که البته برقرار بودن این اصل در کلیه مدلها مشهود است. در مورد اولین زیر گروه در حالت واقعی که مربوط به نمونه‌های با طول دهانه ۲۴۰۰ میلیمتر است، طبیعتاً براساس تغییر نیروی برشی بالها که در ابتدا روند افزایشی و سپس کاهشی دارد، در جان وضعیت بمنظور ارضای شرایط تعادل میبایست برعکس باشد که در جدول ۴ قابل مشاهده است. اما در نمونه‌های با طول دهانه بیشتر (طولهای ۳۶۰۰، ۴۸۰۰ و ۶۰۰۰ میلیمتر) همانگونه که ذکر شد نیروی برشی بالها بسیار زیاد و قابل توجه است، تا جاییکه در اکثر مدلها جمع نیروی برشی دوبال به تنهایی از نیروی برشی کل مقطع بیشتر است، در نتیجه نیروی برشی جان دچار تغییر جهت میشود تا شرط تعادل ارضا گردد، عبارتی در تیرهای با طول دهانه زیاد که در آنها نیروی برشی قائم بالها بسیار زیاد است در جان تیر در مقطع اتصال نیروی برشی قائم در خلاف جهت نیروی برشی بالها بوجود می‌آید که این مقدار با افزایش طول دهانه تیر بسیار زیاد میشود. تغییر نیروی برشی قائم جان در حالت واقعی با توجه به درصد صلبیت اتصال در مقایسه به نتایج کلاسیک بعنوان مثال برای گروههای G2 و G3 در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است.

جدول ۴: مقدار نیروی اختصاص یافته به بالها و جان در کلیه مدلها در حالت واقعی براساس نتایج آنالیز اجزای محدود

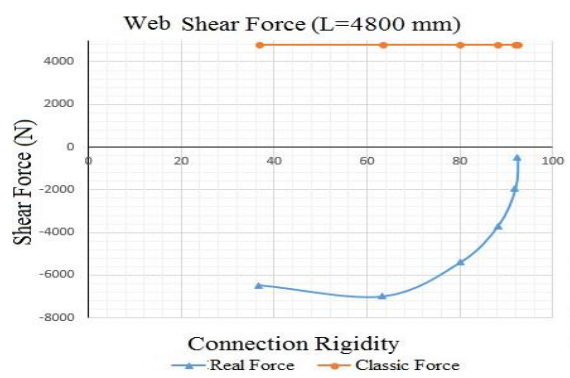
نام مدل	نیروی بال بالا (N)	نیروی جان (N)	نیروی بال پایین (N)	نام مدل	نیروی بال بالا (N)	نیروی جان (N)	نیروی بال پایین (N)
B2400-7-0-0.3	1397.5	2199.1	1403.4	B4800-7-0-0.3	5730.5	-6469.5	5739
B2400-11-0-0.3	1986.6	1016.8	1996.6	B4800-11-0-0.3	5991.5	-6993.1	6001.7
B2400-15-0-0.3	2288	410.9	2301	B4800-15-0-0.3	5195	-5399.7	5204.8
B2400-19-0-0.3	2115.2	756.51	2128.3	B4800-19-0-0.3	4338.1	-3684.9	4346.9
B2400-24-0-0.3	1837.3	1313.1	1849.5	B4800-24-0-0.3	3472.8	-1953.1	3480.3
B2400-30-0-0.3	1540.5	1908.4	1551.1	B4800-30-0-0.3	2736.5	-479.16	2742.6
B3600-7-0-0.3	3677.4	-2363.5	3686.1	B6000-7-0-0.3	8107.2	-11223	8115.5
B3600-11-0-0.3	4061.3	-3133.7	4072.4	B6000-11-0-0.3	8069	-11147	8078.4
B3600-15-0-0.3	3701.5	-2414.2	3712.7	B6000-15-0-0.3	6734.9	-8478.4	6743.6
B3600-19-0-0.3	3201.9	-1414.2	3212.3	B6000-19-0-0.3	5486.1	-5979.8	5493.7
B3600-24-0-0.3	2641.8	-292.77	2651	B6000-24-0-0.3	4303.1	-3612.4	4309.4
B3600-30-0-0.3	2134.3	723.77	2141.9	B6000-30-0-0.3	3334.6	-1674.3	3339.7



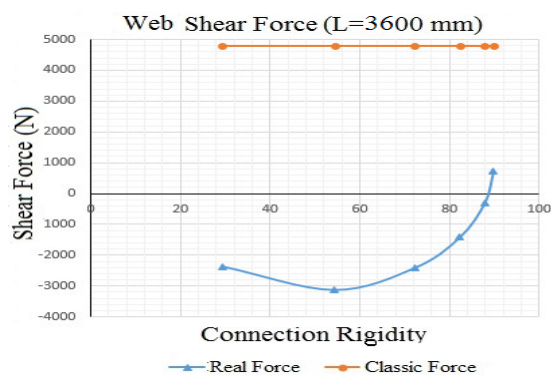
شکل ۱۴: توزیع واقعی و کلاسیک نیروی برشی در بال بالا (پایین) مدل‌های گروه G4 با توجه به درصد صلبیت



شکل ۱۳: توزیع واقعی و کلاسیک نیروی برشی در بال بالا (پایین) مدل‌های گروه G1 با توجه به درصد صلبیت



شکل ۱۶: توزیع واقعی و کلاسیک نیروی برشی در جان (پایین) مدل‌های گروه G3 با توجه به درصد صلبیت

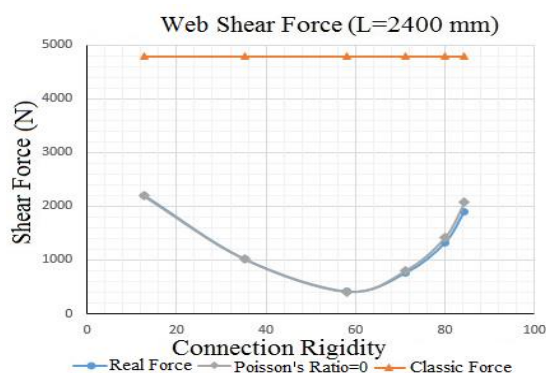


شکل ۱۵: توزیع واقعی و کلاسیک نیروی برشی در جان (پایین) مدل‌های گروه G2 با توجه به درصد صلبیت

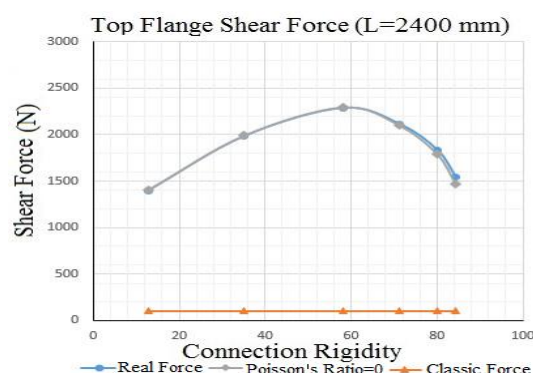
۴-۵- بررسی تاثیر تقید کرنشهای جانبی بر توزیع نیرو و تنش برشی قائم مقطع اتصال در بال و جان تیر

همانگونه که در بخش ۲ ذکر گردید تقید کرنشهای جانبی در مقطع تیر در ناحیه مرز تکیه‌گاه که خود بدلیل اثرات پواسون بوجود می‌آیند موجب پیچیدگی توزیع نیرو و تنش در سطح مقطع اتصال تیر به تکیه‌گاه خواهد شد.

با بررسی تقید اثرات پواسون در زیرگروهها در تمامی گروهها نتیجه این است که این اثر در مقاطع I شکل فولادی قابل توجه نیست و حذف این تقید وضعیت مثبتی در نزدیک کردن توزیع نیرو و تنش واقعی به توزیع کلاسیک در بال و جان تیر بوجود نخواهد آورد. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ توزیع نیروی بال و جان مقطع اتصال با توجه به حذف تقید اثرات پواسون به عنوان مثال در گروه G1 در حالت‌های واقعی، کلاسیک و حالت حذف شده تقید اثرات پواسون آمده است. آنچه از شکلها استنباط میشود اینست که حذف تقید اثرات پواسون تاثیر بسیار ناچیزی در نزدیک شدن نیروی ناشی از نتایج واقعی (حاصل از تحلیل المان محدود) به نتایج تئوری کلاسیک تیرها دارد و البته این نتیجه‌ای است که در تمامی گروهها مشاهده میگردد. لازم به توضیح اینکه حذف تقید اثرات پواسون در تحلیل اجزای محدود در نرم افزار Ansys Workbench با صفر در نظر گرفتن مقدار ضریب پواسون قابل دستیابی است.



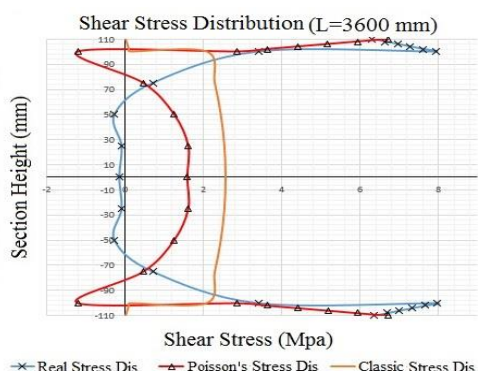
شکل ۱۸: توزیع نیروی برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر پواسون، در جان مدل‌های گروه G1 با توجه به درصد صلبیت



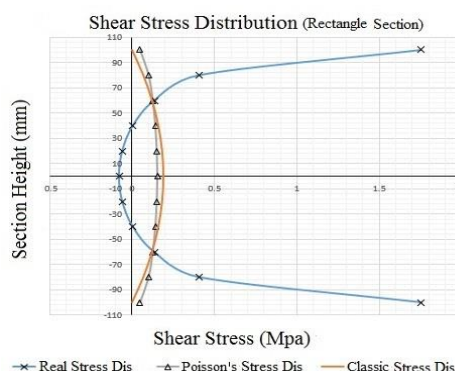
شکل ۱۷: توزیع نیروی برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر پواسون، در بال مدل‌های گروه G1 با توجه به درصد صلبیت

در مورد توزیع تنش نیز وضعیت همانند توزیع نیرو است. البته این نتیجه از نتایج مربوط به تیرهای I شکل بدست آمده و در مقاطع مستطیلی با تکیه‌گاههای گیردار وضعیت به گونه دیگری است. در مدل‌های دیگری که توسط نگارنده در تحقیقی مجزا براساس مقاطع مستطیلی ساخته شد، حذف تقید اثر پواسون تاثیر بسیار قابل توجهی در توزیع نیرو و تنش برشی قائم در مقطع تکیه‌گاه مقاطع مستطیلی دارد. در شکل ۱۹ توزیع تنش در ارتفاع مقطع اتصال در تیر دوسرگیردار با مقطع مستطیلی در سه حالت واقعی، کلاسیک و حذف تقید اثر پواسون ارائه گردیده است. آنچه از شکل ۱۹ استنباط میگردد اینست که با حذف اثرات پواسون در قالب صفر در نظر گرفتن ضریب پواسون مصالح تیر در نرم افزار، توزیع تنش در مقطع اتصال تا حد بسیار قابل توجهی به نتایج کلاسیک نزدیک میگردد. بعبارتی بر خلاف توزیع تنش واقعی در ارتفاع مقطع مستطیلی در محل تکیه‌گاه گیردار، در مقطع اتصال که دارای تنشهای برشی قابل توجه در دورترین تارها و تنش برشی بسیار کم در محل تار خنثی است، با حذف تقید اثرات پواسون همانند حالت کلاسیک، تنش برشی دورترین تارها به میزان قابل توجهی کاهش یافته و به تنش برشی جان اضافه میگردد. شاید اختلاف ناچیزی که پس از حذف اثرات تقید پواسون مابین حالت واقعی و کلاسیک کماکان وجود دارد مربوط به اثرات تقید تابیدگی مقطع اتصال باشد، چراکه در این حالت اصولاً تاثیر تقید بال بر جان معنا ندارد.

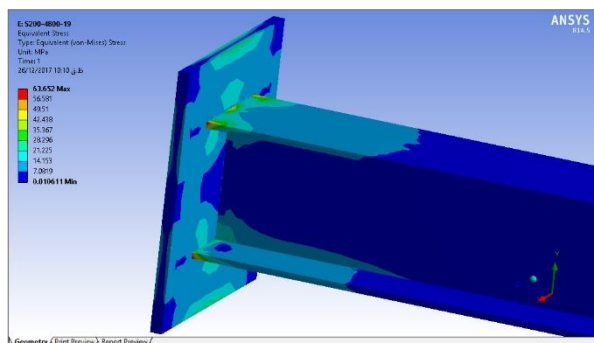
اما در مقاطع I شکل همانند بحث توزیع نیرو و وضعیت به گونه دیگری است. همانگونه که در شکل ۲۰ مشاهده میشود، در چنین مقطعی که بعنوان نمونه در مدل B3600-7-0-0.3 در گروه G2 ارائه گردیده است، پس از حذف تقید اثر پواسون نیز تنش برشی در تارهای مجاور اتصال بال به جان و البته در خود بال نسبتاً زیاد بوده و فقط در تارهای میانی تیر این توزیع تنش از نتایج واقعی فاصله میگیرد و به نتایج کلاسیک تاحدودی نزدیک میشود. در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ که بترتیب بیانگر توزیع تنش فن میسر در نمونه‌های B3600-24-0-0.3 و B3600-24-0-0 هستند دقیقاً همین نتیجه که حذف اثر پواسون اثری بر توزیع تنش ناحیه تکیه‌گاه مقاطع I شکل ندارد تایید میشود، چراکه عملاً هیچ تفاوت خاصی در دو شکل از لحاظ مقدار و شکل ظاهری مشاهده نمی‌شود. شاید بتوان از این شکل‌ها که در تمامی مدل‌ها و گروه‌های دیگر از لحاظ مفهوم و نتیجه مشابه است، استنباط نمود که تقید اثرات پواسون در بال‌ها و در تارهای فوقانی جان در محل اتصال بال به جان بی‌تاثیر و در تارهای میانی تیر حداکثر تاثیر نسبی را دارد.



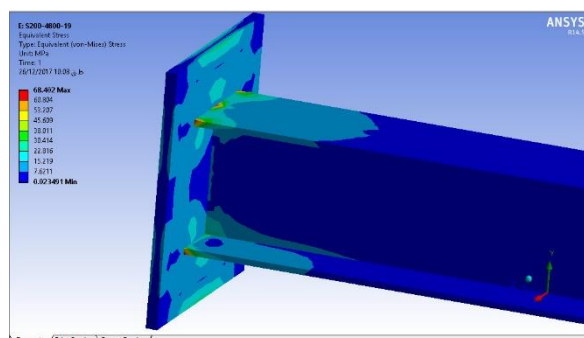
شکل ۲۰: توزیع تنش برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر پواسون، در مدل B3600-7-0-0.3



شکل ۱۹: توزیع تنش برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر پواسون، در مقطع مستطیلی



شکل ۲۲: توزیع تنش فن میسر در حالات واقعی در مدل B3600-24-0-0



شکل ۲۱: توزیع تنش فن میسر در حالات واقعی در مدل B3600-24-0-0.3

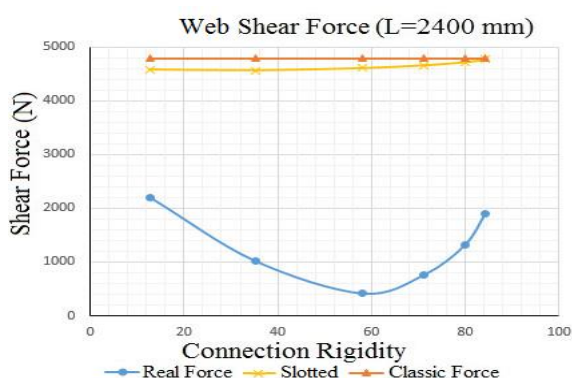
۵-۵- بررسی تاثیر تقید بال بر جان بر توزیع نیرو و تنش برشی قائم مقطع اتصال در بال و جان تیر

همانگونه که در بخش ۲ ذکر شد اثر تقید بال بر جان میتواند بر توزیع تنش و نیروی اجزای مقطع تیرهای I شکل موثر باشد. در این تحقیق تصور بر اینست که بررسی این تاثیر در قالب حذف این تقید قابل ارزیابی است. مطابق آنچه در بخش ۳ ذکر شد جهت حذف اثر تقید بال بر جان در تمامی مدل‌ها شکافهایی با عرض ۱۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بترتیب در تیرهای با طول دهانه ۲۴۰۰، ۳۶۰۰، ۴۸۰۰ و ۶۰۰۰ میلی‌متر در هندسه نرم‌افزار مدل گردید. این طول شکافها بعنوان بهینه طول تاثیرگذار بر حذف تقید بال بر جان تیر در محدوده اتصال با مدلسازی هریک از طول دهانه‌ها در تحقیقی مجزا، انتخاب شدند. در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ تغییر نیروی

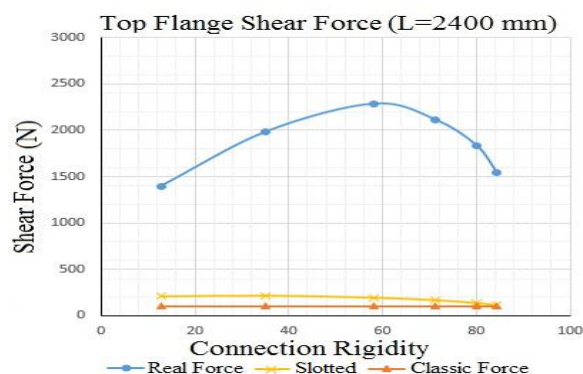
بال بالایی و جان با توجه به درصد صلبیت اتصال به عنوان مثال در گروه G1 که مربوط به نمونه‌های با طول ۲۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد در حالت‌های واقعی، کلاسیک و حالت حذف شده اثر تقید بال بر جان آمده است.

آنچه از شکل‌های ۲۳ و ۲۴ نتیجه می‌شود اینست که اثر تقید بال بر جان موثرترین عامل در دور شدن قابل توجه توزیع واقعی نیرو در اجزای مقطع تیر I شکل از نتایج تئوری کلاسیک تیرهاست. از این شکل‌ها مشهود است حذف اثر تقید بال بر جان در مجاورت ناحیه اتصال، توزیع نیرو را در تمامی درجات صلبیت به میزان قابل توجهی به توزیع واقعی نیرو نزدیک نموده‌است. تاجاییکه در درجات صلبیت بالا نتایج را به نتایج کلاسیک تا حد زیادی منطبق مینماید. از طرفی نتیجه مهم دیگری که از این شکل‌ها گرفته می‌شود اینست که با حذف اثر تقید بال بر جان تقریباً اثر درصد صلبیت اتصال بر توزیع نیروی برشی قائم نیز می‌گردد و در جان و بال در تمامی درجات صلبیت، نیروی بال‌ها و جان عدد نسبتاً ثابتی خواهند بود که همان نتیجه حاصل از تئوری کلاسیک تیرهاست. با بررسی نتایج توزیع نیروی برشی قائم در اجزای اتصال در گروه‌های G2، G3 و G4 نیز نتیجه می‌شود که با حذف اثر تقید بال بر جان نیروی موجود در جان و بال تیر در مقطع اتصال تا حد چشمگیری، در قالب کاهش بسیار زیاد نیروی بال‌ها و افزایش نیروی جان به فرضیات کلاسیک نزدیک شده‌است.

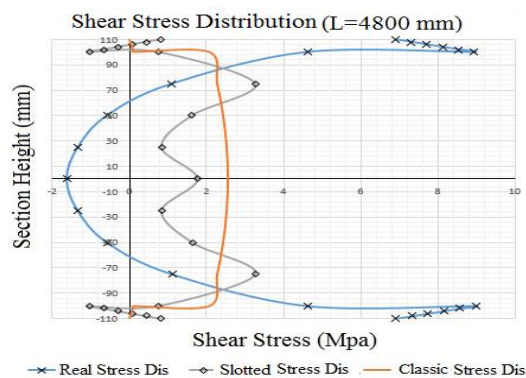
در مورد توزیع تنش برشی در ارتفاع مقطع نیز وضعیت به همین گونه است و با حذف اثر تقید بال بر جان توزیع تنش برشی قائم به میزان بسیار قابل ملاحظه‌ای به توزیع کلاسیک نزدیک می‌شود. این مهم در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ بعنوان مثال برای مدل‌های B3600-15-200-0.3 و B4800-11-250-0.3 ارائه گردیده‌است. از شکل‌ها مشهود است که با حذف تقید بال بر جان تنش برشی قائم موجود در بال‌ها به میزان بسیار زیادی کاهش یافته و از طرف دیگر در تمامی ارتفاع جان به مقدار تنش برشی جان تیر افزوده می‌شود و توزیع تنش بال و جان تا حد بسیار قابل ملاحظه‌ای در کلیه گروه‌ها با حذف اثر تقید بال بر جان به فرضیات کلاسیک نزدیک می‌شود. لازم به توضیح است که تاثیر قابل توجه حذف اثر تقید بال بر جان بر بهبود تنش حالت واقعی تا حد زیادی مستقل از درصد صلبیت است و در تمامی درجات صلبیت این اثر مثبت در قالب اعمال شکاف ملاحظه می‌شود. شکل‌های ۲۷ و ۲۸ که بترتیب بیانگر توزیع تنش فن‌میسز در بعنوان مثال در نمونه‌های B3600-24-0-0.3 (بدون شکاف) و B3600-24-200-0.3 (شکافدار) هستند دقیقاً همین نتیجه که حذف اثر تقید بال بر جان بر توزیع تنش ناحیه تکیه‌گاه مقاطع I شکل تاثیر بسیار مثبتی دارد تایید می‌شود، چراکه همانگونه که از شکل ۲۸ مشهود است وجود شکاف موجب کاهش قابل توجه تمرکز تنش در اتصال بال تیر به تکیه‌گاه در مقطع اتصال شده‌است. این نتیجه از مقایسه بقیه زیرگروه‌ها نیز مشهود است.



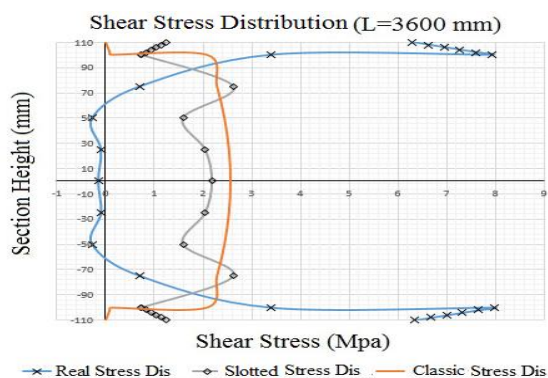
شکل ۲۴: توزیع نیروی برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر تقید بال بر جان، در جان مدل‌های گروه G1 با توجه به درصد صلبیت



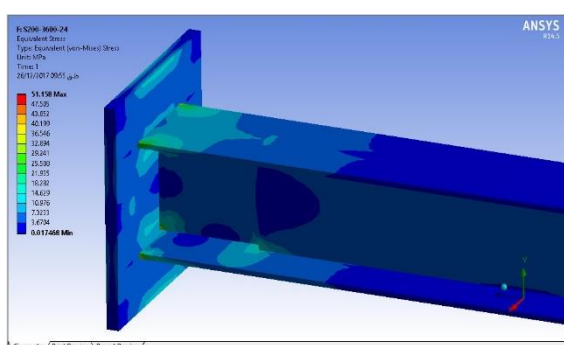
شکل ۲۳: توزیع نیروی برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر تقید بال بر جان، در بال مدل‌های گروه G1 با توجه به درصد صلبیت



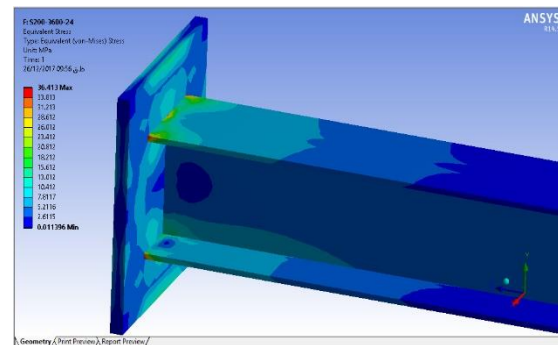
شکل ۲۶: توزیع تنش برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر تقید بال بر جان، در مدل B4800-11-250-0.3



شکل ۲۵: توزیع تنش برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر تقید بال بر جان، در مدل B3600-15-200-0.3



شکل ۲۸: توزیع تنش فن میسر در حالات واقعی در مدل شکافدار B3600-24-200-0.3



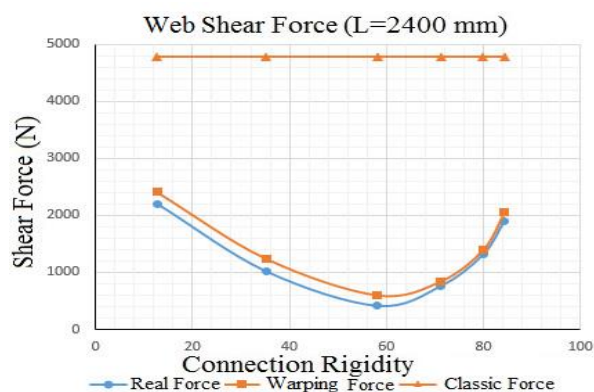
شکل ۲۷: توزیع تنش فن میسر در حالات واقعی در مدل بدون شکاف B3600-24-0-0.3

با توجه با تاثیر قابل ملاحظه حذف اثر تقید بال بر جان در نزدیک شدن توزیع نیروی واقعی به کلاسیک، شاید بتوان از ایده ایجاد شکاف در محل اتصال بال به جان در مجاورت اتصال جهت بهبود رفتار اتصالات در مواقع بحرانی که در اثر ناشناخته بودن توزیع تنش در اتصالات نتیجه میشود استفاده کرد. عبارتی با ایجاد شکاف روابط آیین‌نامه‌ها را تا حد قابل توجهی میتوان به واقعیت منطبق نمود.

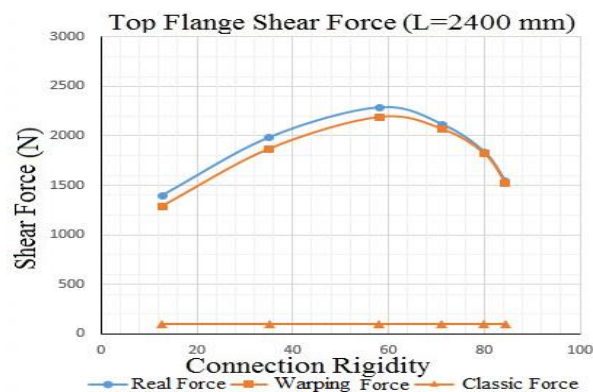
۵-۶- بررسی تاثیر تقید تابیدگی بر توزیع نیرو و تنش برشی قائم مقطع اتصال در بال و جان تیر

همانگونه که در بخش ۲ ذکر گردید تقید تابیدگی‌ها در تکیه‌گاه موجب پیچیدگی توزیع نیرو و تنش در مقطع اتصال خواهد شد. اما با بررسی اثرات تقید تابیدگی در زیرگروهها در تمامی گروهها نتیجه این است که حذف این اثر در مقاطع I شکل فولادی وضعیت مثبتی در نزدیک کردن توزیع نیرو و تنش واقعی به کلاسیک در بال و جان بوجود خواهد آورد. بررسی میزان تاثیر تقید تابیدگی در تحقیق حاضر با استفاده از مفهوم اصل جمع آثار قوا برای نیروهای اجزای مقطع و توزیع تنش در ارتفاع مقطع بدست آمد. عبارتی با توجه به مشخص بودن مقادیر نیروها و تنشهای واقعی، حذف اثر تقید بال بر جان و حذف تقید اثر پواسون از نتایج تحلیل اجزای محدود از طرفی و نتایج مربوط به مقادیر نیروها و تنشهای کلاسیک از رابطه تئوری کلاسیک تیرها از طرف دیگر با اصل جمع آثار قوا میزان تاثیر پارامتر تقید تابیدگی در مقطع اتصال هم برای نیرو و هم برای توزیع تنش در ارتفاع مقطع اتصال بدست آمد. در شکلهای ۲۹ و ۳۰ توزیع نیروی بال و جان مقطع اتصال با توجه به حذف تاثیر تقید تابیدگی به عنوان مثال در گروه G1 در حالتها واقعی، کلاسیک و حالت حذف شده تقید تابیدگی آمده است. آنچه از شکلهای ۲۹ و ۳۰ استنباط میشود اینست که حذف اثر تقید تابیدگی در مقاطع I شکل تاثیر بسیار ناچیزی در درجات صلبیت پایین تر در نزدیک شدن نیروی ناشی از نتایج واقعی (حاصل از تحلیل المان محدود) به نتایج تئوری کلاسیک تیرها دارد و در

درجات صلبیت بالاتر حذف این تقید بر توزیع نیرو تقریباً بی‌تاثیر می‌شود. با بررسی نتایج توزیع نیرو برشی قائم در اجزای اتصال در گروه‌های G2، G3 و G4 نیز نتیجه مشابهی حاصل می‌گردد. عبارتی در تیرهای با طول دهانه بیشتر نیز حذف تقید تابیدگی تاثیر قابل توجهی بر توزیع نیرو در مقطع اتصال در راستای نزدیک شدن به نتایج کلاسیک ندارد.



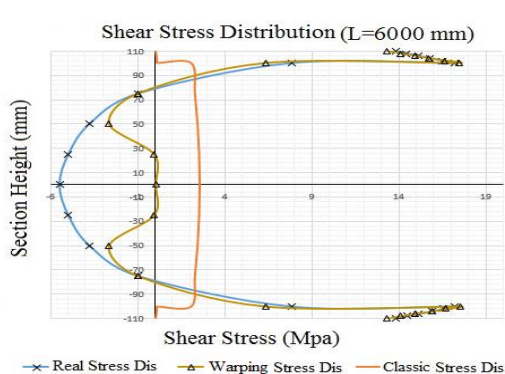
شکل ۳۰: توزیع نیروی برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر تابیدگی، در جان مدل‌های گروه G1 با توجه به درصد صلبیت



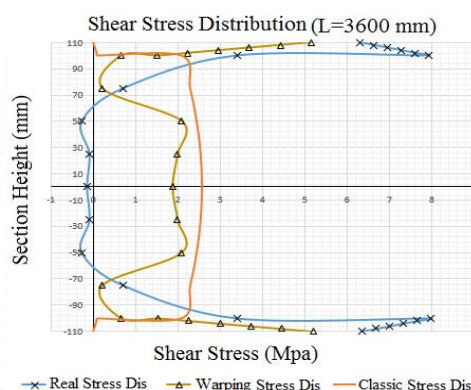
شکل ۲۹: توزیع نیروی برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر تابیدگی، در بال مدل‌های گروه G1 با توجه به درصد صلبیت

در مورد تنشها از اصل جمع آثار قوا توزیع تنش ناشی از تقید تابیدگی در ارتفاع مقطع اتصال بدست آمد که نمونه‌هایی از آن در شکل‌های ۳۱ و ۳۲ برای مدل‌های B3600-19-0-0.3 و B6000-30-0-0.3 ارائه گردیده است.

آنچه از شکل‌های ۳۱ و ۳۲ مشاهده می‌شود اینست که همانند اثرات پواسون پس از حذف تقید تابیدگی نیز تنش برشی در تارهای مجاور اتصال بال به جان و البته در خود بال نسبتاً زیاد بوده و فقط در تارهای میانی تیر این توزیع تنش از نتایج واقعی فاصله می‌گیرد و به نتایج کلاسیک نزدیک می‌شود. شاید بتوان از این شکل‌ها که در تمامی مدل‌ها و گروه‌های دیگر از لحاظ مفهوم و نتیجه مشابه است، استنباط نمود که تقید تابیدگی در تیرهای I شکل در بال‌ها و در تارهای فوقانی جان در محل اتصال بال به جان بی‌تاثیر و در تارهای میانی تیر محدودی موثر است. البته با توجه به تاثیر قابل توجه حذف تقید بال بر جان در نزدیک شدن نتایج واقعی به روابط کلاسیک، تاثیر ناچیز حذف تقید تابیدگی و البته حذف تاثیر تقید کرنشهای جانبی قابل پیش بینی است. عبارتی با توجه به اینکه از بخش ۵-۵ دریافت شد که حذف تاثیر تقید بال بر جان تا حد زیادی نتایج مربوط به توزیع نیروی برشی و تنش برشی قائم را به فرضیات کلاسیک تیرها نزدیک مینماید، عملاً این بدان مفهوم است که سهم خاصی برای تقید اثرات پواسون و تقید تابیدگی در بیشتر نمودن این نزدیکی باقی نمی‌ماند و نقش عمده را در این خصوص تقید بال بر جان ایفا می‌کند، عبارتی از حذف تقید اثرات پواسون و حذف تقید تابیدگی در مقاطع I شکل برخلاف مقاطع مستطیلی نمیتوان انتظار ویژه‌ای در بهبود وضعیت توزیع تنش و نیروی برشی قائم مقطع اتصال داشت.



شکل ۲۲: توزیع تنش برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر تابیدگی، در مدل B6000-30-0-0.3



شکل ۳۱: توزیع تنش برشی در حالات واقعی، کلاسیک و حذف شده اثر تابیدگی، در مدل B3600-19-0-0.3

۶- نتیجه گیری

این مقاله به برآورد تاثیر درصد صلبیت اتصالات در تیرهای I شکل فولادی با طول دهانه‌های مختلف بر روی توزیع نیرو و تنش برشی قائم در بال و جان تیر در مقطع اتصال در قالب انجام تحلیل استاتیکی خطی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Ansys Workbench در مقایسه با فرضیات کلاسیک توزیع تنش و نیرو می‌پردازد. از طرفی با توجه به اینکه تصور بر اینست که پارامترهایی مانند تقید تغییرشکل‌های جانبی ناشی از اثر پواسون، تقید تابیدگی مقطع اتصال و تقید بین اتصال بال و جان تیر در ناحیه اتصال عمده دلایل پیدایش توزیع تنش و نیروی پیش بینی نشده در اتصالات هستند، در این مقاله به بررسی سهم هریک از این پارامترها پرداخته شده است. کلیه مدلها بدون دارا بودن استعداد کمناشی و نیز بدون مدلسازی نقص اولیه و تحت بار متمرکز ۱۰۰۰۰ نیوتن وارد بر وسط دهانه تیر بودند. بدین منظور ۷۲ مدل اجزا محدود با اتصالات با درصد صلبیتهای متفاوت جهت انجام مطالعه پارامتریک در ۴ گروه کلی و در هر گروه با ۳ زیرگروه با ۶ مدل که در آنها پارامترهایی مانند درصد صلبیت، طول دهانه تیر، وجود و یا عدم وجود تقید بین بال و جان تیر در ناحیه اتصال در قالب جداسازی بال و جان با شکاف و وجود یا عدم وجود اثرات کرنشهای جانبی پارامترهای مورد مطالعه بودند، ساخته شده است. میزان تاثیر تقید تابیدگی مقطع اتصال با مشخص بودن مابقی پارامترهای تاثیرگذار موردنظر از اصل جمع آثار قوا بدست آمد. پس از تحلیل کلیه مدلها پارامترهایی مانند درصد صلبیت اتصالات، تنش برشی در ارتفاع مقطع بر روی محور تقارن قائم مقطع در محل اتصال و نیز سهم اختصاص یافته از نیرو به بالها و جان در اثر اعمال بار متمرکز به وسط دهانه در حالات واقعی، حذف تقید اثرات پواسون، حذف تقید بال بر جان و حذف تقید تابیدگی بدست آمد و با نتایج کلاسیک مقایسه شد.

بطور خلاصه نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک نشان دادند که :

- در کلیه گروهها تغییرات اولیه ضخامت ورق تاثیر بیشتری نسبت به ضخامت‌های بالاتر ورق در افزایش درصد صلبیت اتصال دارد.
- در مدل‌های ساخته شده در گروهها، ضخامت‌های برابر ورق انتهایی در تیرهای با طول دهانه بیشتر تولید درصد صلبیت اتصال بالاتری مینماید.
- در مدل‌های واقعی مشاهده شد که توزیع تنش برشی مقطع اتصال خمشی تفاوت قابل توجهی با فرضیات کلاسیک توزیع تنش برشی مندرج در روابط مقاومت مصالح دارد. در این مدلها مشاهده شد که تنش برشی در دورترین تارها بسیار زیاد است و این درحالیست که میانه جان از تنش برشی قائم خالی میشود. در صورتی که فرضیات کلاسیک نتیجه‌ای دقیقا متضاد این مشاهده را دارند. از طرفی نتایج مطالعات در همه مدل‌های واقعی بیانگر این نتیجه هستند که با فاصله گرفتن از مقطع اتصال توزیع تنش واقعی به نتایج فرضیات کلاسیک بسیار نزدیک میشود.

- در مورد نیروها نیز در کلیه مدل‌های واقعی مشاهده شده است که نیروی برشی قائم بسیار قابل توجهی به بالها اختصاص میابد که براساس روابط مقاومت مصالح بسیار دور از انتظار است.
- در تمامی زیرگروهها درصد صلبیت اتصال تاثیر بسیار قابل ملاحظه‌ای در نیروی برشی اختصاص یافته به هریک از اجزای مقطع تیر اعم از بال و جان دارد. عبارتی تغییر در درصد صلبیت اتصال موجب افزایش و یا کاهش نیروی اختصاص یافته به هریک از اجزای مقطع اتصال میگردد.
- از مقایسه مدلها میتوان فهمید که علیرغم ثابت بودن نیروی برشی کل مقطع اتصال براساس اصل تعادل استاتیکی، با افزایش طول دهانه تیر، برش اختصاص یافته به بالها در ضخامتهای ورق انتهایی برابر به میزان بسیار زیادی افزایش می‌یابد تا جاییکه در برخی مدلها سهم برش اختصاص یافته به هر یک از بالها بدلیل افزایش طول دهانه تیر تا سه برابر سهم برش اختصاص یافته به جان افزایش یافته است.
- در همه مدلها نیروی برش اختصاص یافته به هر دو بال تقریباً یکسان است.
- در برخی مدلها مشاهده شده است که جمع نیروی برشی دو بال به تنهایی از نیروی برشی کل مقطع بیشتر است در این حالت نیروی برشی جان دچار تغییر جهت میشود تا شرط تعادل ارضا گردد که این مساله در تیرهای با طول دهانه زیاد مشهودتر است. عبارتی در تیرهای با طول دهانه زیاد که در آنها نیروی برشی قائم بالها بسیار زیاد است، در جان تیر در مقطع اتصال نیروی برشی قائم در خلاف جهت نیروی برشی بالها بوجود می‌آید که این مقدار با افزایش طول دهانه تیر بسیار بیشتر میشود.
- در تمامی مدلها حذف اثرات پواسون تاثیر بسیار ناچیزی در نزدیک شدن نیروی ناشی از نتایج واقعی (حاصل از تحلیل المان محدود) به نتایج تئوری کلاسیک تیرها دارد.
- در تمامی مدلها وجود اثر تقید بال بر جان موثرترین عامل در دور شدن قابل توجه توزیع واقعی نیرو در اجزای مقطع تیر I شکل از نتایج تئوری کلاسیک تیرهاست. چراکه حذف اثر تقید بال بر جان در مجاورت ناحیه اتصال، توزیع نیرو را در تمامی درجات صلبیت به میزان قابل توجهی به توزیع واقعی نیرو نزدیک نموده است. تاجاییکه در مورد توزیع نیرو در درجات صلبیت بالا نتایج به مقادیر کلاسیک تا حد زیادی منطبق شده است.
- نتیجه بسیار مهم دیگری که از حذف اثر تقید بال بر جان در کلیه مدلها در مجاورت ناحیه اتصال گرفته میشود اینست که با حذف اثر تقید بال بر جان تقریباً اثر درصد صلبیت اتصال بر توزیع نیروی برشی قائم نیز حذف میگردد و در جان و بال در تمامی درجات صلبیت، نیروی بالها و جان عدد نسبتاً ثابتی خواهند بود که همان نتیجه حاصل از تئوری کلاسیک تیرهاست که نیروی برشی اجزای مقطع را مستقل از درصد صلبیت اتصال میداند.
- در تمامی گروهها حذف اثر تقید تابیدگی در مقاطع I شکل که از اصل جمع آثار قوا بدست آمده است تاثیر بسیار ناچیزی در درجات صلبیت پایین تر در نزدیک شدن نیروی ناشی از نتایج واقعی (حاصل از تحلیل المان محدود) به نتایج تئوری کلاسیک تیرها دارد و در درجات صلبیت بالاتر حذف این تقید بر توزیع نیرو تقریباً بی‌تاثیر میشود.
- بر خلاف مقاطع مستطیلی تیرها با تکیه‌گاه گیردار در تیرهای I شکل پس از حذف تقید اثر پواسون نیز تنش برشی در تارهای مجاور اتصال بال به جان و البته در خود بال نسبتاً زیاد بوده و فقط در تارهای میانی تیر این توزیع تنش از نتایج واقعی فاصله میگیرد و به نتایج تئوری کلاسیک تا حدودی نزدیک میشود. از نتایج مدلها استنباط میشود که تقید اثرات پواسون در بالها و در تارهای فوقانی جان در محل اتصال بال به جان بی‌تاثیر و در تارهای میانی تیر حداکثر تاثیر نسبی را دارد.
- همانند بحث نیروها مشاهده شد که با حذف تقید بال بر جان تنش برشی قائم موجود در بالها به میزان بسیار زیادی کاهش یافته و از طرف دیگر در تمامی ارتفاع جان به مقدار تنش برشی جان تیر افزوده میشود و توزیع تنش بال و جان تا حد بسیار قابل ملاحظه‌ای در کلیه گروهها با حذف اثر تقید بال بر جان به فرضیات کلاسیک نزدیک میگردد. از طرفی مشاهده شد که تاثیر قابل توجه حذف

اثر تقید بال بر جان بر بهبود تنش حالت واقعی تا حد زیادی مستقل از درصد صلبیت بوده و در تمامی درجات صلبیت این اثر مثبت ملاحظه میشود.

- در تمامی مدلها مشاهده شد که با حذف اثر تقید تابیدگی نیز تنش برشی قائم در تارهای مجاور اتصال بال به جان و البته در خود بال نسبتا زیاد بوده و فقط در تارهای میانی تیر این توزیع تنش از نتایج واقعی فاصله میگیرد و به نتایج کلاسیک نزدیک میشود.

مراجع

- [1] Muhammad Ziaur Rahman, Tousif Ahmed & Raihan Md. Intiaz. (2013). Investigation of Stresses in a Beam with Fixed Connection using Finite Difference Technique. Global Journal of Researches in Engineering. Mechanical and Mechanics Engineering. Volume 13 Issue 2 Version 1.0.
- [2] Carlos M. Ramirez, Dimitrios G. Lignos, Eduardo Miranda, Dimitrios Kolios. (2012). Fragility functions for pre-Northridge welded steel moment-resisting beam-to-column connections. Journal of Engineering Structures 45 574–584.
- [3] Mohamad A. Morshedi, Kiarash M. Dolatshahi, Shervin Maleki. (2017). Double reduced beam section connection. Journal of Constructional Steel Research 138 283–297.
- [4] M. Gh.Vetr, M. Miri, F. Ghaffari. (2012). Seismic Behavior of the Slotted Web (SW) Connection on the Iranian I-Shape Profiles Through Experimental Studies. The Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal.
- [5] J.M. Ricles, C. Mao, L.W. Lu, J.W. Fisher. (2002). Inelastic cyclic testing of welded unreinforced moment connections, J. Struct. Eng. 128 (4) 429–440.
- [6] C. Mao, J. Ricles, L.W. Lu, J. Fisher. (2001). Effect of local details on ductility of welded moment connections, J. Struct. Eng. 127 (9) 1036–1044.
- [7] C.C. Chou, K.C. Tsai, Y.Y. Wang, C.K. Jao. (2010). Seismic rehabilitation performance of steel side plate moment connections, Earth q. Eng. Struct. Dyn. 39 (1) 23–44.
- [8] M. Shiravand, A. Deylami. (2010). Application of full depth side plate to moment connection of I-beam to double-I column, Adv. Struct. Eng. 13 (6) 1047–1062.
- [9] C.H. Kang, K.J. Shin, Y.S. Oh, T.S. Moon. (2001). Hysteresis behavior of CFT column to H-beam connections with external T-stiffeners and penetrated elements, Eng. Struct. 23 (9) 1194–1201.
- [10] M. Ghobadi, M. Ghassemieh, A.Mazroi, A. Abolmaali. (2009). Seismic performance of ductile welded connections using T-stiffener, J. Constr. Steel Res. 65 (4) 766–775.
- [11] C.H. Kang, Y.J.d Kim, K.J. Shin, Y.S. Oh. (2013). Experimental investigation of composite moment connections with external stiffeners, Adv. Struct. Eng. 16 (10) 1683.
- [12] C.C. Chen, C.A. Lu, C.C. Lin. (2005). Parametric study and design of rib-reinforced steel moment connections, Eng. Struct. 27 (5) 699–708.
- [13] R. Goswami, C. Murty. (2009). Externally reinforced welded I-beam-to-box-column seismic connection, J. Eng. Mech. 136 (1) 23–30.
- [14] M. Nikoukalam, K.M. Dolatshahi. (2015). Development of structural shear fuse in moment resisting frames, J. Constr. Steel Res. 114 349–361.
- [15] M. Valente, C.A. Castiglioni, A. Kanyilmaz. (2017). Numerical investigations of repairable dissipative bolted fuses for earthquake resistant composite steel frames, Eng. Struct. 131 275–292.
- [16] M. Valente, C.A. Castiglioni, A. Kanyilmaz. (2017). Welded fuses for dissipative beam-to column connections of composite steel frames: numerical analyses, J. Constr. Steel Res. 128 498–511.
- [17] N.R. Iwankiw, C.J. Carter. (1996). The dog bone: a new idea to chew on, Mod. Steel Constr. 36 (4) 18–23.
- [18] S.S. Kumar, D.P. Rao. (2006). RHS beam-to-column connection with web opening- experimental study and finite element modelling, J. Constr. Steel Res. 62 (8) 739–746.
- [19] S. Wilkinson, G. Hurdman, A. Crowther. (2006). A moment resisting connection for earthquake resistant structures, J. Constr. Steel Res. 62 (3) 295–302.
- [20] S. Maleki, M. Tabbakhha. (2012). Numerical study of slotted-web-reduced-flange moment connection, J. Constr. Steel Res. 69 (1) 1–7.
- [21] S.R. Ahmed, M.R. Khan, K.M.S. Islam, Md.W. Uddin. (1998). Investigation of stresses at the fixed end of deep cantilever beams. Computers and Structures 69 329±338.
- [22] FEMA. (2000). Recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings: FEMA 350. Richmond (CA): SAC Joint Venture.

- [23] Miller DK. (1998). Lessons learned from the Northridge earthquake. *Engineering Structures*; 20(4_6):249_60.
- [24] Horgan CO, Knowles JK. (1983). Recent development concerning S-Venant's principle. *Adv Appl Mech*; 23:179-269.
- [25] Kyoung-Hyeog LEE, Subhash C GOEL and Bozidar STOJADINOVIC (2000). BOUNDARY EFFECTS IN STEEL MOMENT CONNECTIONS. *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
- [26] Uddin MW. (1966). Finite difference solution of two-dimensional elastic problems with mixed boundary conditions. M.Sc. thesis. Carleton University, Canada.
- [27] Timoshenko SP, Goodier JN. (1979). *Theory of elasticity*, 3rd ed., New York: McGraw-Hill.
- [28] Piaras Kelly. (2013). *Solid Mechanics, Engineering Solid Mechanics*. Publisher: The University of Auckland.
- [29] Ferdinand Beer and E. Russell Johnston, Jr. and John De Wolf. (2014). *Mechanics of Materials*. 7Edition.
- [30] AISC. American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for structural steel buildings*.
- [31] Zirakian, Tadeh. (2008). Lateral-distortional buckling of I-beams and the extrapolation techniques. *Journal of Constructional Steel Research* 64 1-11