



http://journaliss.ir

توسعه روش مؤلفه‌های جهت محاسبه سختی اولیه اتصالات صفحه انتهایی اصطکاکی

علی صادقی^۱، محمدرضا سهرابی^{۲*}، سید مرتضی کاظمی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد کاشمر، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشمر، ایران

*Zahedan, صندوق پستی ۹۸۷-۹۸۱۵۵، Sohrabi@hamoon.usb.ac.ir

چکیده

یکی از روش‌های کاربردی و مفید که در آیین‌نامه Eurocode 3 برای بررسی رفتار خمشی اتصالات به صورت تحلیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش مؤلفه‌ای است. بر اساس این روش منحنی‌های لنگر-دوران اتصالات بر پایه دو پارامتر مقاومت خمشی و سختی اولیه به صورت دوخطی تخمین زده می‌شوند. بنابراین یکی از مهم‌ترین پارامترها جهت ارزیابی منحنی لنگر-دوران با استفاده از روش مؤلفه‌ای، یافتن دقیق سختی اولیه اتصال ($S_{j,ini}$) است. موضوعی که در آیین‌نامه Eurocode 3 به آن اشاره نشده و باعث می‌شود نتایج به دست آمده دقت کافی را نداشته باشد، بحث پیش‌تندگی پیچ‌ها است. هدف اصلی این پژوهش اضافه کردن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها در روش مؤلفه‌ای است. به این منظور باید سختی المان‌های فنری مدل‌کننده بال ستون در خمش، ورق انتهایی در خمش و پیچ‌ها در کشش، که جهت پیش‌بینی سختی دورانی اتصالات با ورق انتهایی با پیچ‌های پیش‌تند شده لازم هستند، مورد بررسی قرار گیرند. بر این اساس ابتدا روابط جهت در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها در روش مؤلفه‌ای ارائه می‌گردد، سپس چندین اتصال صفحه انتهایی که توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته در دو حالت بدون در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها و با در نظر گرفتن این اثر، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا درستی روابط ارائه شده راستی‌آزمایی گردد. نتایج بیانگر آن است که روش ارائه شده جهت در نظر گرفتن پیش‌تندگی پیچ‌ها روش مناسب و کارایی است و باعث می‌شود که دقت روش مؤلفه‌ای توسعه یافته نسبت به روش مؤلفه‌ای مرسوم دقیق‌تر باشد، به طوری که که اختلاف سختی دورانی مدل آزمایشگاهی با روش مؤلفه‌ای بدون در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها ۱۳/۸۱- درصد و با در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها به ۲/۴۱- درصد کاهش یافت.

واژگان کلیدی

روش مؤلفه‌ای، سختی دورانی اتصال، پیش‌تندگی پیچ‌ها، اتصال صفحه انتهایی، مدل آزمایشگاهی

Development of a component method for calculating the initial stiffness of friction end-plate connections

A. Sadeghi, M.R. Sohrabi, S.M. Kazemi

Abstract

One of the practical and useful methods that is used in Eurocode 3 to analyze the bending behavior of connections is the component method. Based on this method, the moment-rotation curves of joints are estimated bilinearly based on the two parameters of bending strength and initial stiffness. Therefore, one of the most important parameters to evaluate the moment-rotation curve using the component method is to find the exact initial stiffness of the connection ($S_{j,ini}$). An issue that is not mentioned in the Eurocode 3 and causes the obtained results to be insufficiently accurate is the issue of pre-tensioning bolts. The main goal of this research is to add the effect of prestressing bolts to the component method. For this purpose, the stiffness of the spring elements modeling the column flange in bending, the end plate in bending, and the bolt in tension, which are necessary to predict the rotational stiffness of connections with the end plate with prestressed bolts, should be investigated. For this purpose, first, relationships are presented to consider the effect of prestressing bolts in the component method. Then, several end plate connections that have been investigated by the researchers are evaluated in two cases without considering the effect of pre-tensioning of the bolts and considering this effect in order to verify the correctness of the presented relationships. The results show that the presented method for considering the prestressing of bolts is a suitable and efficient method, which makes the accuracy of the developed component method more accurate than the conventional component method. So that the rotational stiffness difference of the laboratory model with the component method without considering the effect of pre-tensioning of the bolts was reduced to -13.81% and by considering the effect of pre-tensioning of the bolts to -2.41%.

Keywords

Component Method, Rotational Stiffness of Connection, Prestressing of Bolts, End-Plate Connection, Laboratory Model

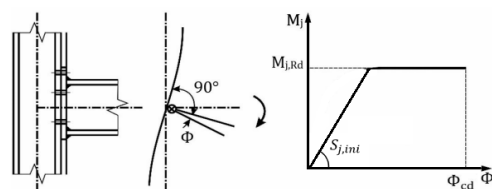


در دهه‌های گذشته، محققان تلاش بسیاری جهت پیش‌بینی منحنی لنگر-دوران اتصالات به کمک یک رابطه ریاضی یا یک مدل تحلیلی داشته‌اند. سرانجام، در طی سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۸۳ روشی به نام روش مؤلفه‌ای^۱ توسط **زوئیت مایر**^۲ ارائه گردید. این روش در آیین‌نامه Eurocode 3 آمده است و به کمک آن می‌توان نمودارهای لنگر-دوران اتصالات مختلفی را بر اساس روابط و ضوابط موجود در این آیین‌نامه محاسبه کرد. روش مؤلفه‌ای یک روش مکانیکی-تحلیلی است که امکان توصیف رفتار مکانیکی اتصالات را فراهم می‌کند. این روش شامل تقسیم چشمه اتصال به یک سری فنر (مؤلفه) است که هر یک از این فنرها در برابر کشش، فشار و برش دارای مقاومت خمشی و سختی مخصوص به خود هستند [۳]. برای به‌کارگیری روش مؤلفه‌ای باید رفتار مکانیکی هر یک از اجزا مشخص شود. مقاومت کل اتصال از مقاومت‌های مؤلفه‌های آن به‌دست می‌آید. Eurocode 3 بخش ۸-۱، ۲۰ مؤلفه را برای طراحی اتصالات بر روی قاب‌های فولادی در نظر می‌گیرد.

در شکل (۲)، می‌توان مؤلفه‌های اتصال صفحه‌انتهایی پیچی را شناسایی کرد، که اتصال توسط این مؤلفه‌ها به سه ناحیه کشش، فشار و خمش تقسیم می‌شود (جدول (۱)).

روش مؤلفه‌ای توسط پژوهشگران جهت بررسی رفتار خمشی اتصالات مختلف در شرایط و بارگذاری‌های متفاوت استفاده شده است. **فائلا**^۳ و **همکاران** [۴] در سال ۱۹۹۸ به ارزیابی رفتار اتصالات پیچی با در نظرگیری اثر پیش‌تندگی به کمک روش آزمایشگاهی پرداختند. **سیلوا**^۴ و **همکاران** [۵] در سال ۲۰۰۴ به ارزیابی رفتار اتصال صفحه‌انتهایی تحت اثر توام خمش و نیروی محوری به کمک روش مؤلفه‌ای پرداختند. **بايو**^۵ و **همکاران** [۶] در سال ۲۰۰۶ یک مدل کارآمد برگرفته از روش مؤلفه‌ای را برای اتصالات نیمه‌گیردار در قاب‌های مرکب ارائه کردند. در سال ۲۰۰۸ **گنگ شی**^۶ و **همکاران** [۷] به توسعه یک مدل عددی المان محدود با توانایی شبیه‌سازی و تحلیل رفتار مکانیکی انواع مختلف اتصالات صفحه‌انتهایی تیر-ستون که در آن همه پیچ‌ها پیش‌تند شده‌اند، پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود برای شبیه‌سازی رابطه بین صفحه‌انتهایی و بال ستون و همچنین نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها از نرم‌افزار ANSYS استفاده کردند. سپس مدل اجزای محدود را با نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روش عددی می‌تواند رفتار کلی و جزئی انواع اتصالات و اجزای اتصال صفحه‌انتهایی با

در سال‌های اخیر، ساختمان‌های صنعتی و مسکونی با ساختار فولادی رشد زیادی داشته است. سازه‌های فولادی از چند المان سازه‌ای تشکیل می‌شوند و هدف از به‌کارگیری آن‌ها انتقال نیروهای خارجی اعمال‌شده به سازه بر روی پی سازه است. فولاد دارای خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ارزشمندی جهت کاربرد در قاب‌های ساختمانی است؛ از جمله این مزایا می‌توان به رابطه مناسب بین مقاومت و وزن سازه، سازگاری با اشکال مختلف معماری، تنوع گسترده پروفیل‌ها در بازار و کنترل حداکثری فرآیند تولید در کارخانه‌ها که منجر به استفاده از فولاد در سازه‌ها می‌شود، اشاره کرد. در قاب‌های فولادی اتصال بین اجزای سازه‌ای، بحرانی‌ترین بخش سازه را تشکیل می‌دهد که احتمال خرابی و ناامنی سازه در این بخش نسبت به بخش‌های دیگر بیش‌تر است؛ بنابراین طراحی مناسب اتصالات برای انتقال نیرو بین اجزای امری ضروری است [۱]. در تحلیل‌های مرسوم، اتصال تیر-ستون قاب‌های فولادی به صورت اتصالات مفصلی یا صلب در نظر گرفته شده است. اتصالات مفصلی به اتصالاتی گفته می‌شود که سختی دورانی آن‌ها در حالت ایده‌آل صفر است؛ یعنی چرخش نسبی در انتهای تیر، آزاد است. اتصالات صلب بیانگر اتصالی است که سختی دورانی آن‌ها بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی بین اجزای اتصال چرخشی وجود ندارد. این تئوری‌ها یک شکل ایده‌آل است که رفتار واقعی اتصالات را منعکس نمی‌کند. اتصالات واقعی همیشه دارای درجه خاصی از سختی چرخشی و مقاومت خمشی هستند که رفتاری بین دو تئوری ذکر شده دارند و اتصالات نیمه‌صلب نامیده می‌شوند [۲]. برای تجزیه و تحلیل ساختاری اتصال می‌توان خطوط میانی که قطعات را به یکدیگر متصل می‌کند با یک فنر پیچشی مدل کرد. سه خاصیت اساسی که بایستی در نظر گرفته شود عبارتند از مقاومت خمشی ($M_{I,Rd}$)، سختی آغازین ($S_{j,ini}$) و حداکثر دوران قابل تحمل (ϕ_{cd}) که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار لنگر-دوران اتصال

¹ Component Method

² Zoetemeijer

³ Faella

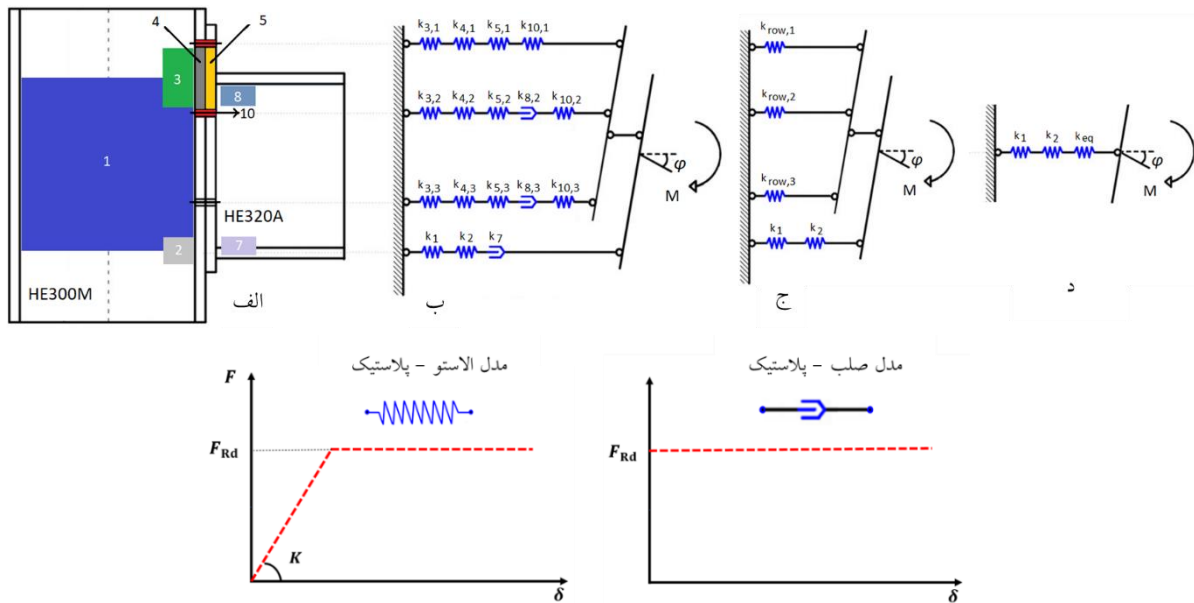
⁴ Da Silva

⁵ Bayo

⁶ GangShi

موجود در آیین‌نامه اروپا را برای چهار ردیف پیچ توسعه دادند و توانستند اتصال صفحه انتهایی چهارپیچی را به کمک روش مؤلفه‌ای مورد بررسی قرار دهند.

پیچ‌های پیش‌تنیده شده از جمله، وضعیت تماس بین صفحه انتهایی و بال ستون، رفتار صفحه انتهایی، ناحیه پانل و پیچ و مهره و تأثیر نیروی پیش‌تندگی پیچ را با دقت خوبی شبیه‌سازی و تحلیل کند. دمونکائو^۱ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۰ روابط



شکل ۲- مؤلفه‌های اتصال صفحه انتهایی پیچی

(الف) مؤلفه‌های اتصال پیچی صفحه انتهایی (ب) مدل فنری برای اتصال صفحه انتهایی پیچی (ج) (د) فنرهای معادل

[۱۰] در زمینه اتصالات اصطکاکی با استفاده از آج‌زدن ورق‌ها به منظور افزایش ظرفیت اتصال کار کردند. با به‌کارگیری اتصالات اصطکاکی با پیچ‌های پرمقاومت، روند جدیدی از این نوع اتصالات پیچی برای ارائه ایجاد شد. در این پژوهش ۱۸ نمونه شامل چهار نمونه اتصال پیچی پرمقاومت معمولی و ۱۴ نمونه اتصال پیچی پرمقاومت آج‌دار مورد آزمایش قرار گرفت. مد اصلی خرابی اتصالات پیچی پرمقاومت معمولی، خرابی برشی پیچ‌ها و مد خرابی اتصالات پیچ‌های پرمقاومت آج‌دار، جابه‌جایی ورق‌ها و هرز شدن پیچ‌ها بود. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری اتصالات پیچی پرمقاومت آج‌دار رفتار خیلی بهتری دارد. علاوه بر این نیروی پیش‌تندگی و اندازه آج‌ها تأثیر به‌سزایی در چگونگی رفتار این اتصالات دارد.

یانگ^۴ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی سازه‌های فولادی دارای میل‌گردهای تقویتی به کمک روش مؤلفه‌ای پرداختند. در سال ۲۰۱۷ کاظمی و همکاران [۱۲] با مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS به ارزیابی اتصال فولادی پیش‌ساخته مدولار جدید پرداختند. آن‌ها تأثیر سه پارامتر ضخامت ورق

جدول ۱- ناحیه و مؤلفه‌های اتصال صفحه انتهایی

مؤلفه‌ها	ناحیه
۱- جان ستون در برش	ناحیه برشی
۲- جان ستون در فشار	ناحیه فشاری
۷- بال و جان تیر در فشار	
۳- جان ستون در کشش	ناحیه کششی
۴- بال ستون در خمش	
۵- صفحه انتهایی در خمش	
۸- جان تیر در کشش	
۱۰- پیچ‌ها در کشش	

کیم^۲ و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۶ بر روی خصوصیات کششی اتصالات اصطکاکی با استفاده از پیچ‌های پرمقاومت بر اساس زوال نیروی پیش‌تندگی در اثر آسیب‌دیدگی سریپیچ‌ها تحقیقاتی را انجام دادند. در سال ۲۰۱۶ ژانسون‌گو^۳ و همکاران

^۴ Yang

^۱ Demonceau

^۲ Kim

^۳ Xiaonong Guo

اتصال، استفاده از سخت‌کننده با ابعاد مختلف و استفاده از زائده هرمی شکل را برای ارزیابی منحنی بار-تغییر مکان تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از مدل نرم افزاری اتصال را با یک مدل آزمایشگاهی مقایسه کردند. **بایو و همکاران [۱۳]** در سال ۲۰۱۷ با تغییرات در پارامتر عمق تیر در اتصالات دوبعدی نتایجی را با روش مؤلفه‌ای ارائه دادند. **گودرزی و همکاران [۱۴]** در سال ۲۰۱۷ به مطالعه عددی رفتار خمشی اتصالات صفحه‌انتهایی هم‌تراز، تحت تأثیر توأم گشتاور خمشی و نیروی محوری پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود دو نوع اتصال را طراحی کردند؛ اتصال اول دارای ورق ضخیم و دیگری دارای ورق نازک بود. همان‌طور که انتظار می‌رفت، اتصال صفحه‌انتهایی نازک انعطاف‌پذیری بسیار بالاتری نسبت به اتصال صفحه‌انتهایی ضخیم داشت. همچنین در هر دو اتصال، حداکثر ظرفیت گشتاور تحت نیروی محوری فشاری تقریباً برابر با ۳۰ درصد تنش تسلیم مقطع تیر بود. **کاظمی و همکاران [۱۵]** در سال ۲۰۱۹ به مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی رفتار اتصال با مقاطع مختلف برای تیرها پرداختند. آن‌ها در پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۱ روابط ریاضی را برای طراحی اجزای اتصال ارائه کردند [۱۶]. **ی-فان لیو^۱ و همکاران [۱۷]** در سال ۲۰۲۱ تأثیر پیش‌تندگی پیچ‌ها در ظرفیت باربری اتصالات پیچی را بررسی کردند؛ آن‌ها در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که پیش‌تندگی در مودهای گسیختگی تأثیر بسیار کمی دارد و می‌توان از اثر آن صرف‌نظر کرد. در سال ۲۰۲۳ روش مؤلفه‌ای پیشرفته توسط نویسندگان ارائه شد [۱۸]؛ در این پژوهش بخش پلاستیک نمودار لنگر-دوران فراتر از دستورالعمل آیین‌نامه Eurocode 3 توسعه یافت و سپس برای دو اتصال مستقیم جوشی تیر به ستون و صفحه‌انتهایی اجرا شده و با نمودار لنگر دوران محاسبه‌شده از روش آزمایشگاهی و روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS راستی‌آزمایی گردید.

بر پایه روش مؤلفه‌ای موجود در آیین‌نامه Eurocode 3 منحنی‌های لنگر-دوران اتصالات بر اساس دو پارامتر مقاومت خمشی و سختی آغازین اتصال به‌صورت دوخطی تخمین زده می‌شوند (شکل (۱)). بنابراین یکی از مهم‌ترین پارامترها جهت ارزیابی منحنی‌های لنگر-دوران با استفاده از روش مؤلفه‌ای، یافتن دقیق شیب اولیه نمودار یا همان سختی آغازین ($S_{j,ini}$) است. پس از بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در روش مؤلفه‌ای مشخص شده است در هیچ یک از تحقیقات اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها که می‌تواند تأثیر به‌سزایی در رفتار اتصال داشته باشد، مورد بررسی قرار نگرفته است. به همین دلیل ابتدا در این

پژوهش نحوه استخراج روابط پیش‌تندگی پیچ‌ها در اتصالات صفحه‌انتهایی بیان می‌شود و جهت راستی‌آزمایی روش ارائه‌شده چندین اتصال صفحه‌انتهایی که توسط محققین مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است در دو حالت بدون در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها و با در نظر گرفتن این اثر مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲- روش‌شناسی

در این پژوهش اتصال صفحه‌انتهایی پیچی مورد مطالعه قرار می‌گیرد؛ این اتصال به‌طور گسترده در قاب‌های فولادی استفاده می‌شود و در آیین‌نامه مبحث دهم ایران این اتصال، جزء اتصالات ازپیش‌تأیید شده قرار دارد. اتصال مورد بررسی فاقد سخت‌کننده است [۱۹].

بر اساس آیین‌نامه Eurocode 3 مقاومت خمشی اتصال صفحه‌انتهایی پیچی طبق رابطه زیر به‌دست می‌آید [۳]:

$$M_{j,Rd} = \sum_r F_{tr,Rd} \cdot h_r \quad (1)$$

که $F_{tr,Rd}$ مقاومت کششی ردیف پیچ r ام است و h_r فاصله ردیف پیچ r از مرکز بال فشاری تیر فرض می‌شود. مقاومت کششی مؤثر یک ردیف پیچ را می‌توان از رابطه زیر تعیین کرد:

$$F_{tr,Rd} = \min(F_{t,wc,Rd}, F_{t,fc,Rd}, F_{t,ep,Rd}, F_{t,wb,Rd}) \quad (2)$$

که $(F_{t,wc,Rd}, F_{t,fc,Rd}, F_{t,ep,Rd}, F_{t,wb,Rd})$ به‌ترتیب مقادیر طراحی مؤلفه‌های جان تیر در کشش، صفحه‌انتهایی در خمش، بال ستون در خمش و جان ستون در کشش هستند. مقاومت کششی مؤثر ردیف‌های پیچ باید به‌گونه‌ای که از مقاومت برشی چشمه اتصال ستون و مقاومت فشاری اتصال تجاوز نکند، کاهش یابد. علاوه بر این، ردیف‌های متوالی پیچ می‌توانند به‌صورت گروهی عمل کنند؛ بنابراین باید مقاومت طراحی پیچ‌ها به‌صورت گروهی جهت یافتن مقاومت کششی مؤثر مورد مطالعه قرار گیرد [۳].

در خصوص ارزیابی سختی اولیه گره از روش پیشنهادشده در Eurocode 3 استفاده می‌شود. سختی اولیه گره با ترکیب سختی کششی مؤلفه‌های منفرد به‌دست می‌آید. در مرحله نخست شکل‌پذیری کششی ($\frac{1}{k_{eff,r}}$) برای هر ردیف پیچ به‌صورت مجموع شکل‌پذیری‌های تمامی مؤلفه‌های درگیر در آن ردیف پیچ محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{k_{eff,r}} = \frac{1}{k_{cwt,i}} + \frac{1}{k_{cfb,i}} + \frac{1}{k_{ep,i}} + \frac{1}{k_{b,i}} \quad (3)$$

^۱ Yi-Fan Lyu



بارگذاری ثقلی سنگین و تنش‌های مکرر هستند، بسیار رایج است اما در طرح لرزه‌ای نباید از این مدل اتصال در طراحی سازه استفاده کرد [۱۹]. در این نوع اتصالات هیچ نیروی پیش‌تندگی در پیچ ایجاد نمی‌شود و برای اجرای این اتصالات، فقط سفت‌کردن پیچ به وسیله کارگر کافی است.

اتصال اصطکاکی: در این اتصالات علاوه بر مهره باید از واشر نیز برای بستن پیچ‌ها درون سوراخ استفاده نمود. استفاده از واشر فنری در اتصال اصطکاکی مجاز نیست [۲۰]. اتصالات اصطکاکی به مقاومت در برابر لغزش بین دو سطح برای انتقال بارها در یک سازه متکی هستند. بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان به دلیل این که این اتصالات امکان حرکت و انعطاف‌پذیری را فراهم می‌کند، باید از این اتصالات در طراحی‌های مقاوم در برابر لرزه استفاده کرد. در این نوع اتصال، علاوه بر سفت‌کردن نخستین پیچ، باید به مقداری که در طراحی مشخص شده است، نیروی پیش‌تندگی نیز در پیچ ایجاد شود. با اعمال نیروی پیش‌تندگی، پیچ تحت کشش قرار گرفته و با اعمال بار، بین صفحات اتصال اصطکاکی به وجود می‌آید که باعث عدم لغی و کارکرد کامل اتصال می‌شود [۱۹].

۴- پیش‌بینی سختی دورانی اتصالات پیچی با در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ

پیش‌تندگی پیچ‌ها نقش مهمی در ارزیابی سختی دورانی اتصالات پیچی دارد و منجر به افزایش سختی دورانی نسبت به حالتی است که پیش‌تندگی پیچ‌ها در نظر گرفته نمی‌شود [۲۱]. اثر سخت‌کنندگی پیش‌تندگی پیچ به دو پدیده مرتبط است. از یک طرف، پیش‌تندگی پیچ منجر به کاهش در سختی محوری سیستم کلی متشکل از پیچ و ورق‌های متصل شده می‌شود؛ از طرف دیگر، پیش‌تندگی رفتار کلی سپری را با تأثیر بر دهانه بال و شرایط قیدی آن اصلاح می‌نماید. در خصوص اولین اثر نیاز به در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ مورد تأکید قرار گرفته است [۲۱]. اثر دوم به نسبت بین سختی خمشی ورق‌های متصل شده و سختی محوری پیچ بستگی دارد که می‌تواند با استفاده از پارامتر β به صورت رابطه زیر در نظر گرفته شود [۲۲]:

$$\beta = \frac{t_f}{d_b \sqrt{\alpha}} \quad (9)$$

که (t_f) ضخامت بال، (d_b) قطر پیچ و $\alpha = m_c / d_b$ است. پارامتر (m_c) یک فاصله قراردادی بین محور پیچ و جان سپری برای در نظر گرفتن مشارکت ریشه جان به بال در تغییر شکل خمشی بال است (شکل (۳)).

سختی کلی معادل (k_{eq}) ردیف‌های کششی پیچ با فرض دوران صلب جان تیر حول مرکز فشار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,r} h_i}{z_{eq}} \quad (4)$$

در این قسمت، بازوی اهرم (z_{eq}) برابر است با:

$$z_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,r} h_i^2}{\sum_{i=1}^{n_b} k_{eff,r} h_i} \quad (5)$$

در پایان، سختی دورانی آغازین اتصال می‌تواند با ترکیب مناسب سختی مؤلفه‌های مستقل ردیف‌های پیچ (یعنی جان ستون در برش و در فشار) با سختی کلی ردیف‌های کششی پیچ معادل (k_{eq}) بر اساس رابطه زیر محاسبه شود:

$$S_{j,ini} = \frac{E z_{eq}^2}{\frac{1}{k_{cws}} + \frac{1}{k_{cwc}} + \frac{1}{k_{eq}}} \quad (6)$$

سختی دورانی اتصال به صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود:

$$S_j = \frac{E z_{eq}^2}{\mu \left(\sum_i \frac{1}{k_i} \right)} \quad (7)$$

که (k_i) ضریب سختی برای مؤلفه i است، (z_{eq}) بازوی لنگرگیری و (μ) نسبت سختی $\frac{S_{j,ini}}{S_j}$ است که بر اساس رابطه زیر تعیین می‌گردد [۳].

$$\text{if } M_{j,Ed} \leq \frac{2}{3} M_{j,Rd} \quad \mu = 1 \quad (8)$$

$$\text{if } \frac{2}{3} M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd} \quad \mu = \left(\frac{1.5 M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^\Psi$$

در این رابطه، $(M_{j,Ed})$ لنگر خمشی داخلی اعمالی است که می‌تواند کم‌تر از لنگر الاستیک $(\frac{2}{3} M_{j,Rd})$ یا در میان لنگر الاستیک و لنگر مقاوم طراحی $(M_{j,Rd})$ قرار گیرد. (Ψ) به نوع اتصال وابسته بوده که برای اتصال صفحه انتهایی برابر $2/7$ است [۳].

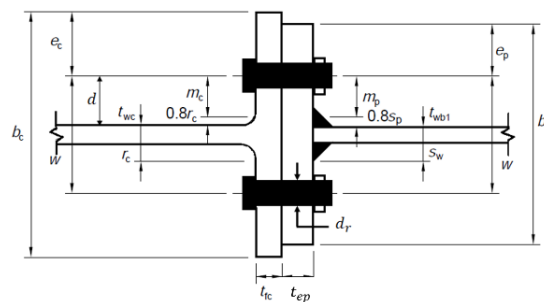
۳- انواع عملکرد اتصالات پیچی

اتصالات پیچی به طور کلی به دو دسته اتصالات اتکایی و اصطکاکی تقسیم‌بندی می‌شوند؛ این اتصالات دو نوع متمایز از اتصالات سازه‌ای با ویژگی‌های خاص هستند که در ادامه توضیح مختصری راجع به هر کدام ارائه می‌شود [۲۰].

اتصال اتکایی: در عملکرد اتصال اتکایی، پیچ‌ها داخل سوراخ‌های صفحات اتصال جای‌گذاری شده و سپس توسط مهره بسته می‌شوند. اتصالات اتکایی به دلیل سختی و مقاومت در برابر سایش بالا برای افزایش استحکام و دوام اتصالات استفاده می‌شوند. زمانی که بار خارجی به پیچ اعمال می‌شود، لغزش بین قطعات اتصال رخ می‌دهد که باعث ایجاد یک نیروی فشاری به لبه‌های اتصال شده که این نیرو تبدیل به نیروی برشی در پیچ می‌گردد. استفاده از این اتصالات در سازه‌هایی که تحت

بر اساس Eurocode 3 (CEN, 2005) این فاصله به صورت زیر تعریف می شود [۲۳]:

$$m_c = d - 0.8r_c \quad (10)$$



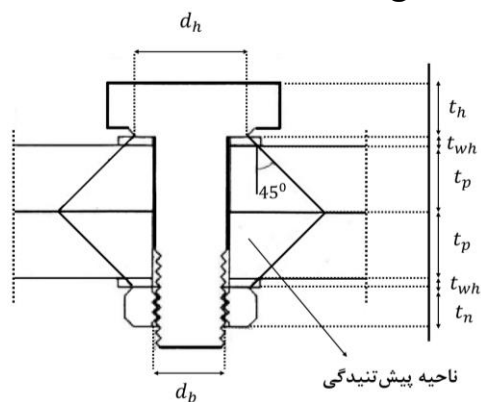
شکل ۳- تعریف پارامترهای اتصال m_c و d_r و r_c

در خصوص اولین اثر، سختی محوری سیستم پیچ-ورق به کاهش فشار ورق های متصل شده که مشارکت (k_p) را نتیجه می دهد و به سختی محوری خود پیچ (k_b) مرتبط است. اثر تقلیل فشار با فرض توزیع 45° نیروی سرپیچ در ضخامت و اثر ورق در نظر گرفته می شود (شکل (۴)). محاسبه این اثر دربرگیرنده مقادیر قطر ناحیه تماسی بین واشرها و سرپیچ (یا مهره پیچ) و ضخامت واشرها (t_{wh}) است. در خصوص سری پیچ های تجاری، روابط متوسط زیر می تواند استخراج گردد [۲۲]:

$$\frac{d_h}{d_b} = 1.6 \quad \frac{t_{wh}}{d_b} = 0.15 \quad (11)$$

$$\frac{d_r}{d_b} = \sqrt{0.78} \quad \frac{t_h + t_n}{d_b} = 0.70$$

که (d_r) قطر مربوط به مساحت ناحیه مقاوم (A_b), (t_h) ضخامت سرپیچ و (t_n) ضخامت مهره است.



شکل ۴- توزیع نیروی پیچ از میان ورق های متصل شده

همان طور که پیش تر گفته شد پیش تنیدگی پیچ بدین دلیل که به طور قابل توجهی بر سختی دورانی اتصالات با ورق انتهای پیچی تأثیرگذار است، نقش بسیار مهمی دارد. بنابراین باید سختی المان های فنری مدل کننده بال ستون در خمش، ورق انتهای در خمش و پیچ ها در کشش، که جهت پیش بینی سختی دورانی

اتصالات با ورق انتهای با پیچ های پیش تنیده شده لازم هستند، مورد بررسی قرار گیرند. به طور خاص همان طور که بیان شد دو اثر برای پیش بارگذاری پیچ باید در نظر گرفته شود. اثر اول شامل افزایش سختی محوری سیستم متشکل از پیچ و ورق های متصل شده به صورت کلی است، که می تواند با رابطه زیر در نظر گرفته شود [۲۲].

$$k_{bP} = k_b + k_p \quad (12)$$

که (k_{bP}) سختی محوری سیستم پیچ منفرد-ورق، (k_b) سختی محوری پیچ تک و (k_p) مشارکت ناشی از پیش تنیدگی ورق های متصل شده به دلیل سفت شدگی است که می تواند با رابطه خطی زیر به صورت تقریبی ارزیابی شود (پیوست آ) [۲۳]:

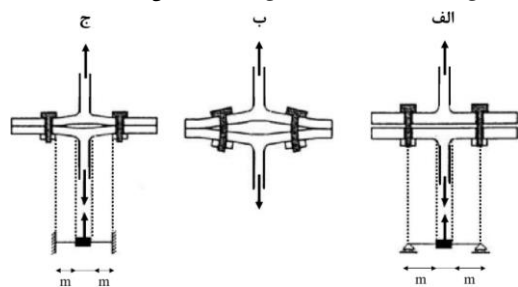
$$\frac{k_p}{k_b} \approx 4.10 + 3.25 \frac{t_p}{d_b} \quad (13)$$

که (t_p) مقدار میانگین ضخامت ورق های متصل شده (یعنی بال ستون و ورق انتهای) است.

همان طور که ذکر شد پیش بارگذاری پیچ بر سختی محوری سپری که بر تغییر شکل پذیری خمشی بال ها از طریق موقعیت و سختی نیروی قید ناشی از پیچ ها مبتنی است، تأثیر می گذارد. این دو اثر را می توان مستقیماً به پارامتر β در معادله (۹) که نسبت بین سختی خمشی بال ها و سختی محوری پیچ را به حساب می آورد مربوط کرد [۴].

در خصوص سپری های دارای بال های بسیار ضخیم، پیچ ها قادر نیستند از جدایی بال های متصل شده جلوگیری کنند، بنابراین محاسبه نیروی قید پیچ را می توان با مدل سازی به صورت تکیه گاه های ساده واقع بر محور پیچ محاسبه کرد (شکل (۵-الف)) [۲۳].

در خصوص ورق های خیلی نازک، پیش بارگذاری پیچ از جدایی بال های سپری در خط لبه سرپیچ جلوگیری می کند. بنابراین در چنین حالتی، رفتار ورق می تواند به وسیله الگوی نشان داده شده در شکل (۵-ب) ارائه شود. در موارد بینابینی، با افزایش نسبت ضخامت ورق به پیچ موقعیت نیروهای اهرمی از محور پیچ دور می شود و نیروی قید پیچ ها در این حالت وابسته به سختی های محوری و خمشی است (شکل (۵-ب)) [۲۳].



شکل ۵- الگوهای رفتاری سپری معادل

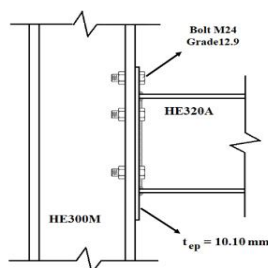
HE300M با شش پیچ M24 با سطح مقطع ۳۵۳ میلی‌متر مربع و طول ۵۳ میلی‌متر ساخته شده از رده فولاد S690 12-9 با تنش نهایی ۱۴۱۲/۸ مگاپاسکال وصل شده است. شکل (۶) نمایی از هندسه این اتصال را نشان می‌دهد. در جدول (۲) مشخصات مصالح فولاد مصرفی اتصال صفحه انتهایی ارائه شده توسط کوئیلو و بیجلارد آورده شده است [۲۸].

روابط هشت مؤلفه (جان ستون در برش، جان ستون در فشار، جان ستون در کشش، بال ستون در خمش، صفحه انتهایی در خمش، جان تیر در کشش، بال و جان تیر در فشار و پیچ‌ها در کشش) جهت محاسبه سختی اولیه اتصال صفحه انتهایی یک طرفه کوئیلو و بیجلارد در جدول (۳) ارائه شده است. از هشت مؤلفه معرفی شده جهت محاسبه سختی اولیه اتصال، تغییر شکل دو مؤلفه جان تیر در کشش و بال و جان تیر در فشار در مقایسه با سختی سایر اجزا ناچیز است. بنابراین طبق آیین‌نامه اروپا سختی این مؤلفه‌ها در محاسبات بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شوند [۳]. با مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده در جدول (۳) برای سختی مؤلفه‌های اتصال، مشخص است که مقدار سختی بال ستون در خمش نسبت به سختی مؤلفه‌های دیگر اتصال بیش‌تر است. علت این موضوع بزرگی ضخامت بال ستون (۳۹ میلی‌متر) نسبت به ضخامت دیگر اجزای اتصال از جمله ضخامت صفحه انتهایی (۱۰/۱۰ میلی‌متر) است که با تأثیر توان سوم در روابط آمده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح فولاد مصرفی مدل ارائه شده توسط

کوئیلو و بیجلارد [۲۸]

مؤلفه	مدول یانگ (MPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)
تیر	۲۰۵۹۰۰	۰/۳	۳۵۵	۷۴۹
ستون	۲۰۵۹۰۰	۰/۳	۳۵۵	۷۴۹
ورق	۲۰۵۹۰۰	۰/۳	۳۵۵	۷۴۹
پیچ‌ها	۲۰۵۹۰۰	۰/۳	۶۹۰	۱۴۱۲/۸



شکل ۶- نمایی از اتصال صفحه انتهایی ارائه شده توسط کوئیلو و بیجلارد [۲۸]

واضح است که رفتار واقعی سیستم پیچ-ورق بین دو حالت حدی نشان داده شده در شکل‌های (۵-الف) و (۵-ج) قرار دارد. اثر دوم مربوط به اثر پیش‌تیدگی پیچ بر نیروی قیدی اعمال شده توسط پیچ‌ها است. بر اساس تحلیل‌ها و اطلاعات آزمایشگاهی، این اثر می‌تواند به وسیله ضریب ψ بسته به نسبت بین سختی خمشی بال‌ها و سختی محوری پیچ در نظر گرفته شود. بنابراین در خصوص پیچ‌های پیش‌بارگذاری شده سختی المان فتری مدل‌کننده بال ستون در خمش باید بر اساس رابطه زیر محاسبه شود [۲۳]:

$$K_{cfb} = \psi_{cf} E \frac{0.9 b_{eff,cf} t_{fc}^3}{m_c^3} \quad (14)$$

که (ψ_{cf}) به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\psi_{cf} = 0.57 \left(\frac{t_{fc}}{d_b \sqrt{m_c/d_b}} \right)^{-1.28} \quad (15)$$

به‌طور مشابه سختی المان فتری مدل‌کننده ورق انتهایی در خمش می‌تواند به‌صورت زیر محاسبه گردد [۲۳]:

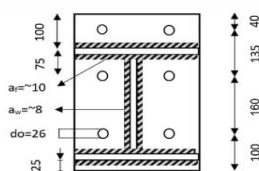
$$K_{epb} = \psi_{ep} E \frac{0.9 b_{eff,ep} t_{ep}^3}{m_{ep}^3} \quad (16)$$

که (ψ_{ep}) با رابطه زیر به‌دست می‌آید:

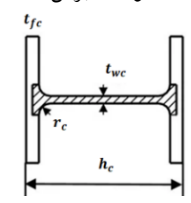
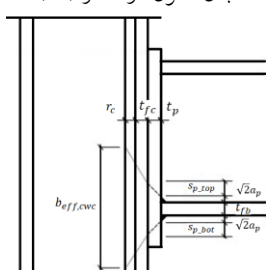
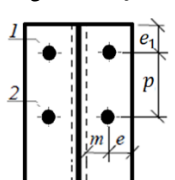
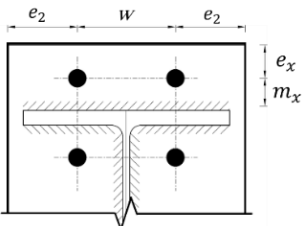
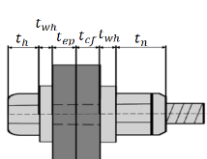
$$\psi_{ep} = 0.57 \left(\frac{t_{ep}}{d_b \sqrt{m_{ep}/d_b}} \right)^{-1.28} \quad (17)$$

۵- امکان‌سنجی و راستی‌آزمایی روش پیشنهادی

جهت بررسی و اطمینان روابط ارائه شده در بخش ۴، به‌منظور راستی‌آزمایی اثر پیش‌تیدگی پیچ‌ها در روش مؤلفه‌ای، نتایج آزمایشگاهی اتصالات با پیچ‌های پیش‌تیده شده برخی از محققین انتخاب شده‌اند [۲۴-۲۸]. در این بخش به‌عنوان نمونه جهت صحت‌سنجی روش پیشنهادی، مدل آزمایشگاهی اتصال صفحه انتهایی کوئیلو^۱ و بیجلارد^۲ در سال ۲۰۰۷ مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. اتصال به این شرح است که دورتادور یک تیر HE320A به ورق انتهایی به ضخامت ۱۰/۱۰ میلی‌متر با قاعده جوش ۸ میلی‌متر متصل شده است، ورق نیز به بال ستون



¹ Coelho
² Bijlaard

مؤلفه	سختی مؤلفه‌های اتصال بدون در نظر گرفتن	سختی مؤلفه‌های اتصال با در نظر گرفتن
پیش‌تیندگی پیچ‌ها	$k_1 = 0.38 \frac{EA_{vc}}{\beta Z} = 11.68E$	$k_1 = 0.38 \frac{EA_{vc}}{\beta Z} = 11.68E$
جان ستون در برش (C1)	$A_{vc} = t_{wc}(h_c - 2t_{fc}) + t_{fc}(t_{wc} + 2r_c) + (2r_c)^2 - \pi r_c^2 = 905.28(mm^2)$ $t_{wc} = 21(mm)$ $t_{fc} = 39(mm)$ $h_c = 340(mm)$ $r_c = 27(mm)$	
جان ستون در فشار (C2)	$k_2 = E \frac{0.7b_{eff,cwc}t_{wc}}{d_c} = 22.10E$	$k_2 = E \frac{0.7b_{eff,cwc}t_{wc}}{d_c} = 22.10E$
جان ستون در کشش (C3)	$b_{eff,cwc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_f + 5(t_{fc} + s) + s_p = 393.98(mm)$ $s = r_c = 27(mm)$ (for rolled I and H column sections) $d_c = h_c - 2t_{fc} = 262(mm)$ $s_p = 2t_{ep} = 20.2(mm)$ $a_f = 10(mm)$	
جان ستون در کشش (C3)	$k_{3,1} = E \frac{0.7b_{eff,cwt,1}t_{wc}}{d_c} = 6.03E$	$k_{3,1} = E \frac{0.7b_{eff,cwt,1}t_{wc}}{d_c} = 6.03E$
جان ستون در کشش (C3)	$k_{3,2} = E \frac{0.7b_{eff,cwt,2}t_{wc}}{d_c} = 8.28E$	$k_{3,2} = E \frac{0.7b_{eff,cwt,2}t_{wc}}{d_c} = 8.28E$
جان ستون در کشش (C3)	$b_{eff,cwt,1} = \min(2\pi m, 4m + 1.25e, \pi m + p, 2m + 0.625e + 0.5p, \pi m + 2e_1, 2m + 0.625e + e_1, 2e_1 + p, e_1 + 0.5p) = 107.5(mm)$ $b_{eff,cwt,2} = \min(2\pi m, 4m + 1.25e, 2p, p) = 147.5(mm)$	
جان ستون در کشش (C3)	$k_{4,1} = \psi_{cf} E \frac{0.9b_{eff,cfb,1}t_{fc}^3}{m_c^3} = 32.28E$	$k_{4,1} = E \frac{0.9b_{eff,cfb,1}t_{fc}^3}{m_c^3} = 72.69E$
جان ستون در کشش (C3)	$k_{4,2} = \psi_{cf} E \frac{0.9b_{eff,cfb,2}t_{fc}^3}{m_c^3} = 44.29E$	$k_{4,2} = E \frac{0.9b_{eff,cfb,2}t_{fc}^3}{m_c^3} = 99.74E$
جان ستون در کشش (C3)	$\psi_{cf} = 0.57 \left(\frac{t_{fc}}{d_b \sqrt{\frac{m_c}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 0.444$	$m = \frac{w}{2} - \frac{t_{wc}}{2} - 0.8r_c$ $b_{eff,cfb,1} = b_{eff,cwt,1}$ $b_{eff,cfb,2} = b_{eff,cwt,2}$
جان ستون در کشش (C3)	$k_{5,1} = \psi_{ep} E \frac{0.9b_{eff,ep,1}t_{ep}^3}{m_x^3} = 3.12E$	$k_{5,1} = E \frac{0.9b_{eff,ep,1}t_{ep}^3}{m_x^3} = 0.99E$
جان ستون در کشش (C3)	$k_{5,2} = \psi_{ep} E \frac{0.9b_{eff,ep,2}t_{ep}^3}{m_p^3} = 4.86E$	$k_{5,2} = E \frac{0.9b_{eff,ep,2}t_{ep}^3}{m_p^3} = 1.54E$
جان ستون در کشش (C3)	$\psi_{ep} = 0.57 \left(\frac{t_{ep}}{d_b \sqrt{\frac{m_{ep}}{d_b}}} \right)^{-1.28} = 3.15$	$m_x = 60 - 0.8a_f = 52(mm)$ $m_p = \frac{w - t_{wb}}{2} - 0.8\sqrt{2}a_w = 61.45(mm)$
جان ستون در کشش (C3)	$b_{b_{eff,ep,1}} = \min(2\pi m, \pi m_x + w, \pi m_x + 2e, 4m_x + 1.25e_x, e + 4m_x + 0.625e_x, 0.5b_p + 0.5e + 2m_x + 0.625e_x)$	
جان ستون در کشش (C3)	$b_{b_{eff,ep,2}} = \min(2\pi m, \alpha m, \pi m + p, 0.5p + \alpha m - 2m - 0.625e)$	جان تیر در کشش (C7)
جان ستون در کشش (C3)	$k_p \approx 4.10 + 3.25 \frac{t_p}{d_b} = 5.47$	بال و جان تیر در فشار (C8)
جان ستون در کشش (C3)	$k_b \rightarrow k_p = 5.47k_b$	پیچ‌ها در کشش (C10)
جان ستون در کشش (C3)	$k_{10} = k_{bp} = k_b + k_p = 6.47k_b = 54.41E$	
جان ستون در کشش (C3)	$t_p = 0.5(t_{ep} + t_{fc})$	
جان ستون در کشش (C3)	$k_{10} = k_b = E \frac{1.6A_b}{L_b} = 8.41E$	
جان ستون در کشش (C3)	$L_b = t_{ep} + t_{cf} + 2t_{wh} + 0.5(t_n + t_n)$	

۱-۵- بررسی نتایج راستی آزمایی

مقادیر سختی دورانی پیش‌بینی شده با روابط پیشنهادی بخش ۴ در روش مؤلفه‌ای با و بدون در نظر گرفتن اثرات پیش‌تندگی پیچ‌ها در جدول (۴) و نمودار میله‌ای شکل (۷) آمده و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. تحلیل به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که پیش‌بینی سختی دورانی با به حساب آوردن پیش‌تندگی پیچ در مقایسه با حالتی که در آن از پیش‌تندگی پیچ صرف‌نظر شود، دقیق‌تر است. به‌طوری‌که اختلاف سختی آغازین مدل آزمایشگاهی جی پاکر^۱ و همکاران [۲۴] در سال ۱۹۹۷ با روش مؤلفه‌ای بدون در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها و با

در نظر گرفتن این اثر به‌ترتیب $30/92$ - و $9/67$ درصد به‌دست آمده، این اختلاف برای مدل آزمایشگاهی کالیونوف^۲ و همکاران [۲۷] در سال ۱۹۹۱ به‌ترتیب $13/81$ - و $2/41$ - درصد محاسبه شد. همچنین مقدار متوسط درصد خطای سختی دورانی برای ۱۲ مدل آزمایشگاهی بررسی شده در جدول (۴) از 26 - درصد برای حالت بدون در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها به 10 - درصد برای حالت با در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها کاهش یافت.

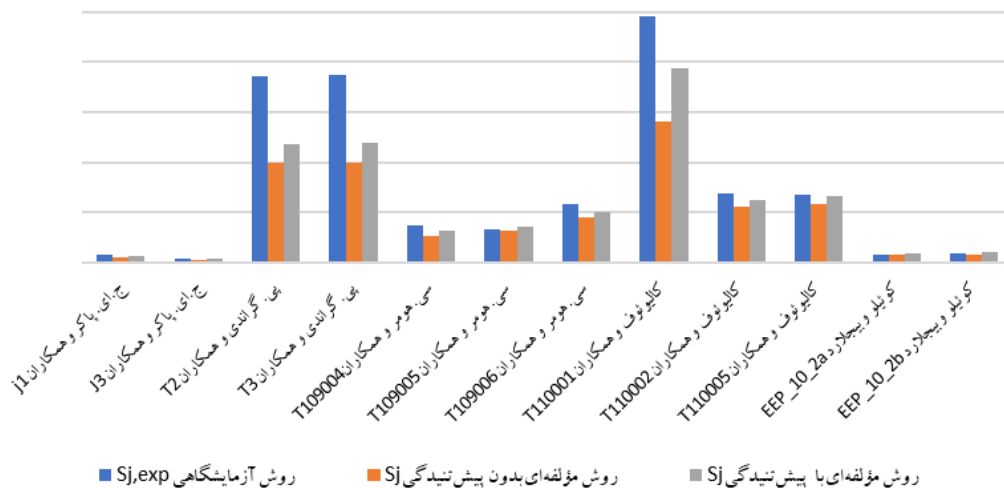
جدول ۴- مقایسه سختی به‌دست‌آمده بر حسب (kN-m/rad) از روش آزمایشگاهی با روش مؤلفه‌ای با و بدون در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها

مؤلف	کد مدل	روش آزمایشگاهی	روش مؤلفه‌ای			
			بدون در نظر گرفتن پیش‌تندگی پیچ‌ها	با در نظر گرفتن پیش‌تندگی پیچ‌ها	درصد خطا	
		$S_{j,exp}$	S_j	$S_j/S_{j,exp}$	$S_j/S_{j,exp}$	درصد خطا
جی پاکر و همکاران (۱۹۹۷)	J۱	۱۵۶۰۵	۱۱۹۳۷	۰/۷۶	۲۳/۵	-۱۸/۰۷
	J۳	۷۶۳۸	۵۲۷۶	۰/۶۹	۳۰/۹۲	۹/۶۷
بی گراندی و همکاران (۱۹۸۰)	T۲	۳۷۱۱۰۲	۱۹۸۱۹۶	۰/۵۳	۴۶/۵۹	-۳۶/۵۶
	T۳	۳۷۵۰۰۰	۱۹۸۲۲۹	۰/۵۲	۴۷/۱۴	-۳۶/۲۰
سی هومر و همکاران (۱۹۸۷)	T۱۰۹۰۰۴	۷۴۱۳۵	۵۳۱۸۱	۰/۷۲	۲۸/۲۶	-۱۵/۳۴
	T۱۰۹۰۰۵	۶۷۹۱۵	۶۳۵۱۰	۰/۹۳	۶/۴۹	۷/۳۹
	T۱۰۹۰۰۶	۱۱۵۷۰۴	۸۹۲۲۴	۰/۷۷	۲۹/۶۵	-۱۶/۷۳
کالیونوف و همکاران (۱۹۹۱)	T۱۱۰۰۰۱	۴۹۰۳۸۵	۲۸۲۲۴۴	۰/۵۸	۴۲/۴۴	-۲۰/۸۱
	T۱۱۰۰۰۲	۱۳۷۹۳۷	۱۱۱۴۷۰	۰/۸۱	۱۹/۱۹	-۹/۶۴
	T۱۱۰۰۰۵	۱۳۵۱۴۹	۱۱۶۴۸۹	۰/۸۶	۱۳/۸۱	-۲/۴۱
کوتیلو و بیجلارد (۲۰۰۷)	EEP_۱۰_۲a	۱۷۲۰۰	۱۵۳۵۴	۰/۸۹	۱۰/۷	۶
	EEP_۱۰_۲b	۱۹۹۰۰	۱۷۴۵۳	۰/۸۷	۱۲/۳۸	۸/۱۸
	مقدار متوسط			۰/۷۴	۲۶/	-/۱۰
	انحراف معیار			۰/۱۳		۰/۱۶

² Kalyonov

¹ Packer





شکل ۷- نتایج سختی آغازین به‌دست‌آمده از روش آزمایشگاهی با روش مؤلفه‌ای با در نظر گرفتن پیش‌تیندگی پیچ و بدون آن

۶- نتیجه‌گیری

پیش‌تیندگی پیچ‌ها ۱۳/۸۱- درصد و با در نظر گرفتن این اثر به ۲/۴۱- درصد کاهش یافت.

طراحی مناسب و بدون ایراد اتصالات سازه‌های فولادی که بحرانی‌ترین بخش یک قاب فولادی را تشکیل می‌دهد، امری ضروری است. سختی چرخشی اتصالات پیچ و مهره‌ای را می‌توان با استفاده از روش مؤلفه‌ای ارائه‌شده در آیین نامه Eurocode 3 بخش ۸-۱ به‌درستی پیش‌بینی کرد.

نتایج تجربی ارائه‌شده در تحقیقات گذشته تأیید کرده است که پیش‌تیندگی پیچ به‌طور قابل‌توجهی بر سختی چرخشی اتصال تأثیر می‌گذارد، اما در آیین نامه Eurocode 3 از اثر پیش‌تیندگی پیچ‌ها در محاسبه سختی دورانی صرف‌نظر شده است، سختی محوری پیچ‌های مهره‌ای محکم‌شده را می‌توان با فرض گسترش ۴۵ درجه که از لبه سرپیچ شروع می‌شود، به دقت پیش‌بینی کرد. از همین روش می‌توان برای پیش‌بینی سختی اتصالات پیش‌تینده استفاده کرد، مشروط بر این که از یک ضریب کالیبره‌شده مناسب که نشان‌دهنده تأثیر پیش‌بارگذاری پیچ است استفاده شود. در این پژوهش سختی چرخشی اتصال صفحه انتهایی با در نظر گرفتن اثر پیش‌تیندگی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

به این منظور، مقادیر سختی مدل آزمایشگاهی اتصال ورق انتهایی چندین پژوهش با مقادیر سختی به‌دست‌آمده از روش مؤلفه‌ای بدون در نظر گرفتن اثر پیش‌تیندگی پیچ‌ها و با در نظر گرفتن این اثر راستی‌آزمایی گردید. صحت‌سنجی انجام‌شده با روش مؤلفه‌ای تطابق خوبی با مدل‌های آزمایشگاهی داشت. مقایسه با تعداد زیادی از نتایج تجربی جمع‌آوری‌شده از تحقیقات گذشته، قابلیت اطمینان روش اتخاذشده را تأیید کرده است. نتایج بیانگر آن است که در مقایسه سختی دورانی مدل آزمایشگاهی با روش مؤلفه‌ای اختلاف سختی دورانی بدون در نظر گرفتن اثر

- flush end-plate moment connections", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 170(3), pp. 199-210.
- [15] Kazemi, S.M., Sohrabi, M.R., and Haji kazemi, H. (2019), "The effect of beam section property on the behavior of modular prefabricated steel moment connection", Steel and Composite Structures, Vol. 32, pp. 769-778.
- [16] Kazemi, S.M., Sohrabi, M.R., and Haji kazemi, H. (2021), "Design equations for prefabricated steel moment connections", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 80, pp. 313-321.
- [17] Lyu, Y.F., Li, G.Q., Wang, Y.B., Li, H., and Wang, Y.Z. (2021), "Effect of bolt pre-tension on the bearing behavior of high strength steel connections", Engineering Structures, 241, 112491.
- [18] صادقی، ع، سهرابی، م، و کاظمی، س.م. (۲۰۲۳)، "بررسی رفتار اتصالات خمشی فولادی به روش مؤلفه‌ای پیشرفته"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، ۱۷(۳۹).
- [19] مقررات ملی ساختمان ایران (۱۴۰۱)، مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، ایران.
- [20] ازهری، م، و میرقادری، س.ر. (۱۳۸۷)، "طراحی سازه های فولادی"، جلد سوم، انتشارات ارکان دانش، چاپ ششم.
- [21] Bursi, O. (1990), "Behaviour of high strength bolts in bolted beam-to-column connections", In Proc. Of Applied Stress Analysis Conference, Nottingham.
- [22] Jaspart, J.P., and Maquoi, R. (1995), "Effect of bolt preloading on joint behaviour", In First European Conference on Steel Structures.
- [23] Falcón, G.A.S., and Montrull, P.M. (2014), "Optimum Dimensioning of semi-rigid connections of Steel frame - "Auxiliary Frame Model", XXXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, pp. 1-22.
- [24] Packer, J.A., and LJ, M. (1977), "A limit state design method for the tension region of bolted beam-column connections".
- [25] Grundy, P., Thomas, I.R., and Bennetts, I.D. (1980), "Beam-to-column moment connections", Journal of the Structural Division, 106(1), pp. 313-330.
- [26] Hummer, C., and Tschemmernegg, T. (1988), "A non-linear joint model for the design of structural steel frames", Costruzioni Metalliche, 1.
- [27] Kalyonov, V., Karmalin, V., Pavlov, A., and Streletskij, N. (1991), "Guide to Design of Bolted Connections Subjected to Shear", Moscow.
- [28] Coelho, A.M.G., and Bijlaard, F.S. (2007), "Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections", Journal of Constructional Steel Research, 63(9), pp. 1228-1240.
- [1] ازهری، م، و میرقادری، ر. (۱۳۹۳)، "طراحی سازه های فولادی - طراحی اتصالات به روش حالت حدی و مقاومت مجاز"، (ص ۸-۱۸) اصفهان، ایران: انتشارات ارکان دانش.
- [2] Piluso, V., Faella, C., and Rizzano, G. (2000), "Structural Semi-Rigid Connections: Theory, Design and Software", CRC Press, Boca Raton.
- [3] CEN, E. (2005). 3: Design of steel structures, Part 1.8: Design of joints. Brussels: European Committee for Standardization.
- [4] Faella, C., Piluso, V., and Rizzano, G. (1998), "Experimental analysis of bolted connections: snug versus preloaded bolts", Journal of Structural Engineering, 124(7), pp. 765-774.
- [5] Da Silva, L.S., de Lima, L.R., da Svellasco, P.C., and de Andrade, S.A. (2004), "Behaviour of flush end-plate beam-to-column joints under bending and axial force", Steel and Composite Structures, 4(2), pp. 77-94.
- [6] Bayo, E., Cabrero, J.M., and Gil, B. (2006), "An effective component-based method to model semi-rigid connections for the global analysis of steel and composite structures", Engineering Structures, 28(1), pp. 97-108.
- [7] Shi, G., Shi, Y., Wang, Y., and Bradford, M.A. (2008), "Numerical simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details", Engineering Structures, 30(10), pp. 2677-2686.
- [8] Demonceau, J.F., Weynand, K., Jaspart, J.P., and Müller, C. (2010), "Application of Eurocode 3 to steel connections with four bolts per horizontal row", In Proceedings of the SDSS' Rio Conference (pp. 199-206). Rio de Janeiro.
- [9] Kim, I.T., Lee, J.M., Huh, J., and Ahn, J.H. (2016), "Tensile behaviors of friction bolt connection with bolt head corrosion damage: Experimental research B", Engineering Failure Analysis, 59, pp. 526-543.
- [10] Guo, X., Zhang, Y., Xiong, Z., and Xiang, Y. (2016), "Load-bearing capacity of occlusive high-strength bolt connections", Journal of Constructional Steel Research, 127, pp. 1-14.
- [11] Yang, H., Liu, W., and Ren, X. (2016), "A component method for moment-resistant glulam beam-column connections with glued-in steel rods", Engineering Structures, 115, pp. 42-54.
- [12] Kazemi, M., Sohrabi, M., and Haji Kazemi, H. (2017), "Study of BSB connections behavior under cyclic loads", Journal of Structure and Steel, 10 (20), pp. 31-44.
- [13] Bayo, E., Loureiro, A., Lopez, M., and da Silva, L.S. (2017), "General component based cruciform finite elements to model 2D steel joints with beams of equal and different depths", Engineering Structures, 152, pp. 698-708.
- [14] Goudarzi, A., Ghassemieh, M., Fanaie, N., Laefer, D.F., and Baei, M. (2017), "Axial load effects on

پیوست آ

تغییر شکل ناشی از تقلیل فشار با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\frac{1}{k_p} = 2 \int_0^{t_p+t_{wh}} \frac{1}{EA(z)} dz \quad (1-آ)$$

با بیان مساحت ناحیه پیش‌تنیده ورق $A(z)$ به صورت تابعی از قطر پیچ (d_b) از طریق روابط (۱۱)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_p} &= \frac{2}{E\pi} \int_0^{t_p+t_{wh}} \frac{1}{z^2 + 1.6zd_b + 0.39d_b^2} dz \\ &= \frac{2}{E\pi d_b} \left(1.47 + \ln \frac{t_p/d_b + 0.45}{t_p/d_b + 1.45} \right) \end{aligned} \quad (2-آ)$$

که منجر به نسبت سختی ورق به پیچ به صورت زیر می‌شود:

$$\frac{k_p}{k_b} = \frac{k_p}{A_b/l_b} = \frac{2}{0.78} \frac{2 t_p/d_b + 0.65}{1.47 + \ln \frac{t_p/d_b + 0.45}{t_p/d_b + 1.45}} \quad (3-آ)$$

که طول قراردادی پیچ به صورت تابعی از (d_b) و (t_p) به کمک معادله (۱۱) و معادله زیر بیان شده است.

$$L_b = t_{ep} + t_{cf} + 2t_{wh} + \frac{t_h + t_n}{2} \quad (4-آ)$$

که (t_{wh}) ، (t_h) و (t_n) به ترتیب ضخامت واشرها، سر پیچ و مهره هستند. به علاوه، (t_{ep}) و (t_{cf}) به ترتیب ضخامت‌های صفحه انتهایی و بال ستون هستند.

رابطه (۳-آ) می‌تواند با رابطه خطی زیر به صورت تقریبی بیان

شود:

$$\frac{k_p}{k_b} \approx 4.10 + 3.25 \frac{t_p}{d_b} \quad (5-آ)$$