

# بررسی قابلیت اعتمادپذیری احتمالاتی اتصالات پای ستون‌ها در سازه‌های فولادی

محسن گرامی (دانشیار)

محمدهادی تقدیسی\* (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

عباس سیوندی پور (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۴ (ص. ۲۷-۳۵)  
دوره‌ی ۲ - شماره‌ی ۲/۳۱

مسائل مربوط به سازه، عدم قطعیت‌های فراوانی دارند. بعضی از این ابهامات قابل شناسایی و برخی دیگر به علت ناشناخته‌بودن در نظر گرفته نمی‌شوند. یکی از عدم قطعیت‌ها، اتصالات پای ستون در سازه‌هاست. در سازه‌ها اتصال پای ستون با فرض ایده‌آل کاملاً مفصلی و یا کاملاً گیردار تحلیل و طراحی می‌شوند، در نتیجه انتظار می‌رود نتایج به دست آمده در طراحی اعضا ستون‌ها و تیرها محافظه‌کارانه باشد. در این مطالعه با توجه به حساسیت ذکر شده، تأثیر سختی دورانی و مقاومت اتصال پای ستون با توجه به عدم قطعیت‌های موجود مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته این نتیجه حاصل شد که رفتار و تغییر پارامترهای توصیف کننده‌ی اتصال پای ستون بسیار وابسته به سختی دورانی و لنگر تسلیم اتصال است. در این مطالعه همچنین با استفاده از عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده و روابط احتمالاتی میانگین سختی دورانی و دوران اتصال پای ستون با درصد اطمینان مشخص برآورد شده است.

واژگان کلیدی: اتصال پای ستون، عدم قطعیت‌ها، سختی دورانی، قابلیت اعتمادپذیری.

mgerami@semnan.ac.ir  
hadi.taghdisi@gmail.com  
abbas.sivandi@gmail.com

## ۱. مقدمه

تعیین ویژگی‌های آماری کمیت‌های دارای عدم قطعیت وجود داشته باشد، تحلیل احتمالاتی مناسب‌ترین انتخاب است. به عنوان نمونه می‌توان اتصال پای ستون در سازه‌های فولادی را به عنوان یکی از مسائلی که با عدم قطعیت‌های فراوانی مواجه است را نام برد، وجود عدم قطعیت‌های مختلف در این اتصال علاوه بر تأثیر آن در طراحی اتصال، نقشی مهم در رفتار و ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها خواهند داشت.<sup>[۱]</sup> به جهت موجود بودن موارد مختلف از جمله: بتن، میل‌مهار، صفحه‌ستون، ستون و غیره، این نوع اتصال در سازه‌ها به نسبت دیگر اتصالات موجود متمایز شده است. در این نقاط همه‌ی بارهای وارده بر سازه، پس از جمع‌شدن در کف‌ها، تیرها و ستون‌ها، از طریق ورق کف ستون به فونداسیون منتقل می‌شوند.<sup>[۲]</sup> به دلیل چنین حساسیتی و همچنین با توجه به اهمیت زیاد ستون در سازه‌ی فولادی لازم است دقت بسیاری در طرح و اجرای اتصال پای ستون‌ها به عمل آید. هرچند در دو دهه‌ی اخیر مطالعات ارزشمندی در زمینه‌ی طراحی اتصالات پای ستون صورت پذیرفته است، با این حال این اتصال در هر شرایطی با توجه به وجود مؤلفه‌های مختلف، رفتاری متفاوت دارد. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده از این دو نوع مطالعه (آزمایشگاهی و تحلیلی) تفاوت دارند.<sup>[۳]</sup> حتی آیین‌نامه‌های معتبر دنیا،<sup>[۴]</sup> در زمینه‌ی طراحی لرزه‌ی این اتصال به صورت کیفی به بیان چند دیدگاه بسنده کرده و رابطه‌ی قطعی ارائه نکرده‌اند.

سازه‌ی که با استفاده از روش‌های معین طرح شده است، نسبت به سازه‌ی که در شرایط مشابه و به کمک روش‌های احتمالاتی با احتساب عدم قطعیت‌ها طراحی شده است، درصد احتمال خرابی بیشتری دارد. در بررسی رفتار سازه‌ها حذف کامل عدم قطعیت‌ها به علت ماهیت طبیعی و تصادفی بودن پارامترهای مرتبط در طراحی غیرممکن خواهد بود. عدم قطعیت در سازه مانند: ویژگی‌های مواد، هندسه، بارگذاری و الگوهای تحلیلی سبب اختلاف نتیجه‌ها نسبت به مقادیر واقعی می‌شود. یک راهکار، انجام تحلیل احتمالاتی و شبیه‌سازی سازه در اثر این عدم قطعیت‌هاست. به دلیل وجود عدم قطعیت‌های فراوان در سازه‌ها بررسی قابلیت اطمینان، کاربرد گسترده‌ی در فرآیندهای تحلیل و طراحی دارد. بررسی قابلیت اطمینان سازه‌ها اثر متغیرهای تصادفی موجود در بارها (استاتیکی و دینامیکی)، ویژگی‌های مواد، هندسه‌ی سازه، ابعاد و اندازه‌های مقطع و الگوی تحلیل و طراحی را به طور دقیق‌تر مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در سال‌های اخیر، مطالعه‌ی سازه‌ها در فضای عدم قطعیت ناشی از تصادفی بودن مواد، بارگذاری، هندسه و... مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. اگر عدم قطعیت ناشی از داده‌ها مبهم یا ناکافی باشد، آنگاه تحلیل به صورت قطعی استفاده خواهد شد. در مقابل، اگر امکان

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۸/۲۴، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۹.

وجود مؤلفه‌های مختلف در اتصال پای ستون مانند: بتن، صفحه‌ستون، میل‌مهار، جوش و غیره باعث شده است که رفتار این نوع اتصال با توجه به نیروی محوری و لنگر خمشی اعمالی به آن نیز متفاوت باشد. از طرفی دیگر آیین‌نامه‌های معتبر فعلی به صورت کیفی به نحوه طراحی لرزه‌ی این اتصال می‌پردازند، لذا با توجه به این ماهیت خاص در این نوع اتصال انتظار می‌رود که دیگر ویژگی‌های توصیف‌کننده مانند لنگر تسلیم اتصال، سختی دورانی اتصال و دوران نیز متغیر باشند. [۸-۶] بنابراین در سازه‌ها اتصال پای ستون با فرض ایده‌آل کاملاً مفصلی و یا کاملاً گیردار تحلیل و طراحی می‌شوند. با این فرضیات انتظار می‌رود که نتایج به دست آمده مانند ابعاد ستون‌ها و تیرها واقعی نباشد. به علت اینکه اتصال عملاً هیچ‌گاه رفتاری کاملاً مفصلی و یا کاملاً صلب از خود نشان نمی‌دهد و عملکردی بین این دو دارد، ممکن است اتصال مذکور در زلزله رفتاری از خود نشان دهد که پیش‌بینی نشده است. چالشی که همیشه مهندسان با آن درگیر بوده‌اند، مقدار سختی دورانی اتصال پای ستون مخصوصاً در حالت طراحی سازه است. امروزه بیشتر پژوهشگران اذعان دارند که فرض اتصال پای ستون به صورت ایده‌آل، مفصلی کامل و یا گیردار کامل صحیح نیست و این اتصال در واقع رفتاری مابین این دو حالت از خود نشان می‌دهد. [۸،۶] در طراحی سازه رفتار اتصال پای ستون کاملاً گیردار در نظر گرفته می‌شود، در حالی که حتی در صورتی که اتصال کاملاً صلب باشد، در عمل رفتاری شبه صلب خواهد داشت. لذا طراحی در این حالت ممکن است باعث بروز نتایج متفاوتی با رفتار واقعی داشته باشد. با توجه به اهمیت این موضوع، در این مطالعه به بررسی مقدار عددی سختی دورانی و مقدار دوران اتصال پای ستون پرداخته شده و با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در اتصال به بررسی کیفی و کمی سختی دورانی اتصال پرداخته شده است. همچنین با توجه به عدم قطعیت‌های بررسی شده، براساس قضیه حد مرکزی و نظریه‌ی برآوردیابی، فاصله‌های اطمینانی برای این پارامترها به دست آورده می‌شود. به کمک این فاصله‌های اطمینانی نیازی نیست که اتصال پای ستون کاملاً صلب و یا کاملاً مفصلی در نظر گرفته شود و با توجه به درصد اطمینان ارائه شده می‌توان مقدار سختی دورانی اتصال پای ستون را در هنگام طراحی برآورد کرد و با اطمینان بیشتری نسبت به نتایج طراحی، از سازه‌ی طراحی شده اطمینان حاصل کرد.

## ۲. ویژگی‌های کلیدی اتصال پای ستون

اتصال پای ستون به عنوان یکی از مهم‌ترین اتصالات در هر سازه‌ی، پارامترهای مهمی در تعیین ویژگی‌ها و خصوصیات کلیدی آن دارد. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌ها می‌توان از لنگر تسلیم و سختی دورانی اتصال نام برد.

### ۱.۲. لنگر تسلیم اتصال

در تعیین مقاومت تسلیم اتصال پای ستون راهنمای شماره‌ی یک AISC، [۸] از متداول‌ترین روش‌ها در تعیین لنگر مقاوم تسلیم است. مطابق با این آیین‌نامه، لنگر متناظر با کمینه‌ی ظرفیت صفحه‌ستون و میل‌مهار برابر با مقاومت تسلیم و یا لنگر طراحی است. در این آیین‌نامه دو روش RSB<sup>۱</sup> و TSB<sup>۲</sup> معرفی شده است. هر چند در پژوهشی در سال ۱۹۸۲ نشان داده شد که روش RSB نسبت به روش TSB به رفتار اتصال پای ستون نزدیک است، [۹] اما مطابق آزمایش‌های صورت‌گرفته‌ی دیگری در سال ۲۰۱۰ این نتیجه حاصل شد که هر دو روش محافظه‌کارانه و نزدیک به هم است (در صورتی که از مقاومت نهایی مؤلفه در تحلیل استفاده شود، روش RSB نسبت به روش TSB به رفتار اتصال پای ستون نزدیک می‌شود). [۳] با این

حال در پژوهش‌های دیگری در سال‌های ۲۰۱۲، [۱۰] و همچنین ۲۰۱۰، [۳] نتایج به دست آمده از این دو روش را قابل قبول دانسته‌اند.

## ۲.۲. سختی دورانی اتصال

پژوهش‌های بسیاری برای بررسی رفتاری و تعیین سختی دورانی و منحنی لنگر-انحنای اتصال پای ستون صورت پذیرفته است. [۱۷-۱۰] روش ارائه شده در پژوهشی در سال ۱۹۹۶، [۱۵] دارای یک سری پیچیدگی‌ها مانند: تشخیص نوع توزیع تنش مناسب در زیر صفحه‌ستون، سعی و خطای پیچیده و طولانی، و ارزیابی روش ارائه شده با تعداد کمی از مقادیر آزمایشگاهی بوده است. همچنین پژوهشگران دیگری در پژوهش‌های خود، اتصال پای ستون را بررسی کرده‌اند. [۱۸] این روش دو نقص عمده دارد: الف) کمبود تعداد آزمایش‌ها در مقیاس واقعی در ارزیابی روش ارائه شده، و ب) ارائه‌ی روش در مورد اتصالات خاص به طوری که تغییر در نوع اتصال باعث تغییر مقادیر عددی فرمول ارائه شده می‌شود. [۱۸،۱۶]

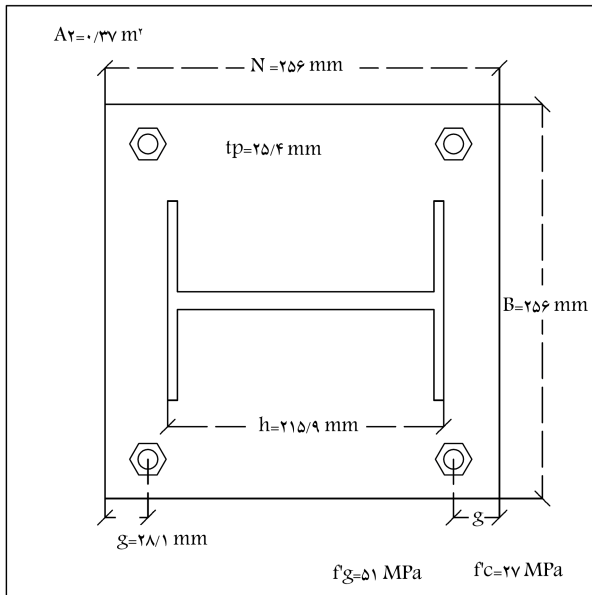
در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۲، نیز به ارائه‌ی روش جدیدی در تعیین مقدار سختی دورانی اتصال پرداخته شده است که نسبت به دو روش قبل کمبودها را جبران کرده است. اما یکی از نقایص مهم این روش عدم دقت مطلوب روش پیشنهادی در شرایط خروج از مرکزیت پایین است. و نیز در روش مذکور مهم‌ترین پارامتر لحاظ شده لنگر تسلیم اتصال است. [۱۰] هرچند لنگر تسلیم باید از طریق انجام آزمایش به دست آید، اما نتایج این پژوهشگران نشان می‌دهد در صورتی که از روش راهنمای طراحی شماره‌ی یک AISC فیشر و کلوپیر (۲۰۰۶) [۸] در تعیین لنگر تسلیم استفاده شود، به ویژه هنگامی که نیروی محوری صفر باشد، جواب‌ها به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است.

## ۳. عدم قطعیت‌های لحاظ شده

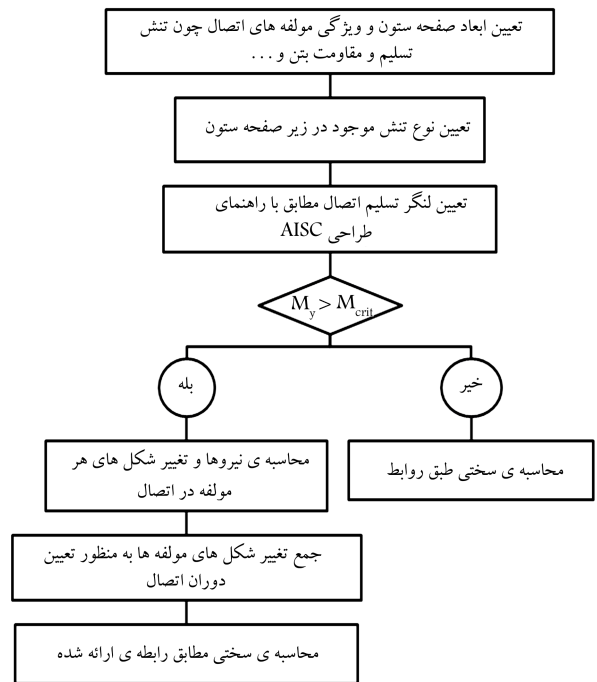
در زمینه‌ی بررسی عدم قطعیت‌ها در اتصال پای ستون می‌توان به مطالعه‌ی سال ۲۰۱۰ اشاره کرد، که در آن به ارزیابی تحلیل و طراحی احتمالاتی اتصالات صفحه‌ستون با استفاده از نرم‌افزار CalREL (۱۹۸۶) [۷] در سطوح مختلف خطر لرزه‌ی پرداخته شده و براساس بررسی‌های انجام شده مشخص شده است که محتمل‌ترین مودهای شکست در اتصال پایه‌ی ستون، تسلیم صفحه‌ستون در سمت فشاری (شکل پذیرا)، شکست فشاری بتن (شکست ترد)، و شکست برشی ناشی از لغزش صفحه‌ستون، و شکست لاگ‌های برشی (شکست ترد) است. [۶]

در این پژوهش، برآورد فاصله‌ی اطمینان موردنظر در عدم قطعیت‌های مختلفی از جمله: ابعاد، موقعیت و تعداد میل‌مهار و ابعاد صفحه‌ستون وجود دارد. همچنین روابط مورد استفاده در تعیین مقادیر سختی دورانی روابط ارائه شده توسط کنویند و همکاران (۲۰۱۲) [۱۰] است، و در تعیین لنگر تسلیم اتصال از روش TSB ارائه شده در راهنمای طراحی شماره‌ی یک AISC (فیشر و کلوپیر، ۲۰۰۶) [۸] استفاده شده است. در استفاده از روش TSB و RSB براساس نتایج آزمایشگاهی گومزو و همکاران (۲۰۱۰) [۳] تفاوتی وجود ندارد و مقادیر به دست آمده از هر دو روش مشابه است، و استفاده از هر دو روش مجاز است. لذا در این مطالعه از روش TSB ارائه شده توسط کنویند و همکاران (۲۰۱۲) [۱۰] استفاده و الگوریتم روش مذکور در شکل ۱ نشان داده شده است.

براساس روش کنویند و همکاران (۲۰۱۲)، [۱۰] دوران اتصال پای ستون حاصل جمع تغییرشکل‌های مؤلفه‌های اتصال است که این مؤلفه‌ها شامل تغییرشکل میل‌مهارها



شکل ۲. مقادیر آزمایش یک گومز و همکاران (۲۰۱۰). [۳]



شکل ۱. الگوریتم روش مورد استفاده در این مطالعه.

#### ۴. عدم قطعیت های میل مهار

با توجه به مشخصات آزمایش یک و همچنین عدم قطعیت های معرفی شده، سختی دورانی و دوران محاسبه و در هر مورد که عدم قطعیت باعث تغییر دیگر عدم قطعیت ها شده است، بررسی و اگر در اتصال پای ستون تغییر مؤلفه یی باعث تغییر عامل کنترل کننده ی اتصال شده است، ارزیابی شده است.

#### ۱.۴. طول میل مهار

سالمون و همکاران (۱۹۵۷)<sup>[۲۰]</sup>، طول بهینه ی میل مهار را ۸ الی ۲۴ برابر قطر میل مهار دانسته اند. امروزه در روش نوین طراحی و اجرا، طول میل مهار کوتاه تر شده است و در انتهای آن یک واشر نصب می شود.<sup>[۱۰،۸]</sup>

طول میل مهار در آزمایش یک (گومز و همکاران، ۲۰۱۰)<sup>[۲]</sup> ۶۵۰ میلی متر است، که برخلاف نظر سالمون و همکاران (۱۹۵۷)<sup>[۲۰]</sup> و با توجه به اینکه قطر میل مهار ۱۹ میلی تر است، طول میل مهار ۳۴ برابر قطر آن است.

در این بخش طول میل مهار ۱۰ الی ۳۴ برابر قطر میل مهار تغییر داده شده و تغییرات سختی دورانی و دوران در هر مرحله مشاهده شده است. با توجه به روابط موجود در راهنمای طراحی شماره ی یک AISC (فیشر و کلویبر، ۲۰۰۶)<sup>[۸]</sup>، تغییر طول میل مهار در تغییر عامل کنترل کننده ی اتصال نقشی ندارد و لذا لنگر تسلیم در هر مرحله ثابت می ماند. در شکل ۳، نمودار تغییرات سختی دورانی و دوران بر حسب افزایش طول میل مهار نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۳، افزایش طول میل مهارها منجر به کاهش سختی دورانی اتصال پای ستون می شود، که روند این تغییرات نسبتاً خطی است. در مقابل همان طور که انتظار می رود، با کاهش سختی باید دوران اتصال افزایش یابد و روند افزایش این پارامتر کاملاً خطی است. به عنوان مثال با کاهش ۷۰٪ طول میل مهار سختی دورانی و دوران اتصال پای ستون به ترتیب ۶۳٪ افزایش و ۳۹٪ کاهش می یابد.

می توان نتیجه گیری کرد که افزایش طول میل مهار به تنهایی در اتصال پای

در سمت کششی ( $\Delta_{rod}$ )، تغییر شکل صفحه ستون در سمت کششی ( $\Delta_{plate}^{tension}$ )، تغییر شکل صفحه ستون در سمت فشاری ( $\Delta_{plate}^{compression}$ ) و بالاخره تغییر شکل بتن در سمت فشاری ( $\Delta_{concrete}$ ) است. دوران اتصال در رابطه ی ۱ نشان داده شده است. به منظور تعیین سختی دورانی اتصال پای ستون و به کمک تعیین لنگر تسلیم اتصال به دست آمده حاصل از روش راهنمای طراحی شماره ی یک AISC (فیشر و کلویبر، ۲۰۰۶)<sup>[۸]</sup> و با استفاده از رابطه ی ۲، سختی دورانی اتصال پای ستون قابل محاسبه خواهد بود:

$$\theta_y = (\Delta_{rod} + \Delta_{plate}^{compression} + \Delta_{plate}^{tension} + \Delta_{concrete}) / (N - g) \quad (1)$$

$$\beta_y^{method} = M_y / \theta_y \quad (2)$$

در برآورد فاصله ی اطمینانی، در ابتدا آزمایش در مقیاس دو - سوم واقعی که توسط گومز و همکاران (۲۰۱۰)<sup>[۲]</sup> انجام شده است، به عنوان مبنای محاسبات قرار گرفته است. لذا در هر مرحله به طور جداگانه یک پارامتر تغییر داده شده است، در حالی دیگر پارامترها ثابت فرض شده اند. سپس با استفاده از روش کنویند و همکاران (۲۰۱۲)<sup>[۱۰]</sup>، به بررسی تغییرات دوران و سختی دوران پرداخته شده و هماهنگ با آن تغییرات سایر پارامترها نیز در تحلیل در نظر گرفته شده است. به طور مثال تغییر در ضخامت صفحه ستون باعث تغییر در مقدار لنگر تسلیم، طول تنش در زیر صفحه ستون و مقدار نیروی موجود در میل مهار می شود. در شکل ۲، مقادیر ورودی آزمایش ۱ گومز و همکاران (۲۰۱۰)<sup>[۲]</sup>، نشان داده شده است.

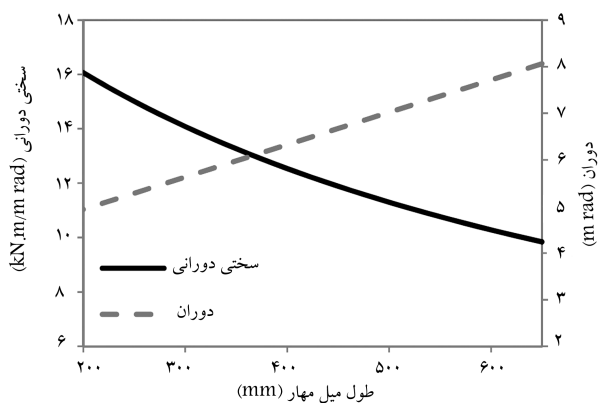
در شکل ۲،  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن،  $f'_g$  مقاومت فشاری ملات زیر صفحه ستون،  $A_T$  مساحت مؤثر بتن،  $N$  طول صفحه ستون در جهت خمش (موازی با جان ستون)،  $B$  عرض صفحه ستون (عمود بر خمش)،  $t_p$  ضخامت صفحه ستون،  $h$  عمق ستون (فاصله ی بیرونی دو بال ستون) و  $g$  برابر فاصله ی مرکز میل مهار تا لبه ی صفحه ستون است. لنگر تسلیم و سختی دورانی مدل های مورد نظر با استفاده از نرم افزار MATLAB<sup>[۱۹]</sup> انجام شده است.

### ۳.۴. موقعیت مکانی میل مهار

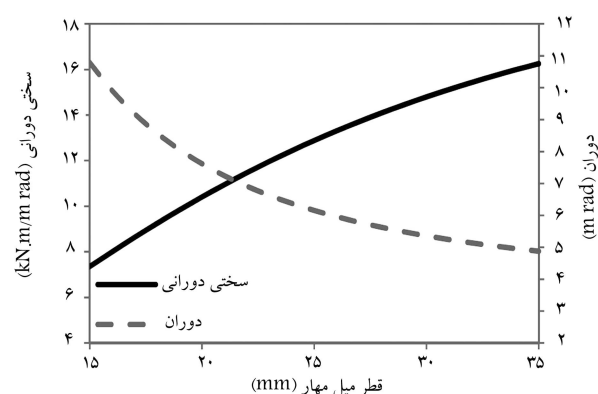
موقعیت میل مهار در تعیین نوع رفتاری اتصال پای ستون همیشه نقشی کلیدی ایفا کرده است. دوماس و همکاران (۲۰۰۶)<sup>[۱۶]</sup> در تعیین رابطه‌ی برای اتصال پای ستون با توجه به موقعیت میل مهارها دو نوع متفاوت از اتصال پای ستون را معرفی می‌کند که در شکل ۵ نشان داده شده است. در اتصال نوع یک فرض شده است که اتصال، رفتاری مفصلی از خود نشان دهد و نوع دوم با توجه به ابعاد صفحه ستون، میل مهار و موقعیت آن‌ها می‌تواند رفتاری کاملاً مفصلی و یا کاملاً صلب از خود نشان دهد. تغییر موقعیت میل مهار یکی از پارامترهای مهم در تعیین لنگر تسلیم اتصال پای ستون است، لذا تغییر در مقدار این پارامتر منجر به تغییر لنگر تسلیم اتصال پای ستون خواهد شد.

در تعیین مقادیر سختی دورانی و دوران اتصال ستون دو پارامتر قبلی اتصال یعنی قطر میل مهار (۱۹ میلی‌متر) و طول میل مهار (۶۵۰ میلی‌متر) در حالت اول خود باقی مانده‌اند. در تعیین موقعیت مکانی میل مهارها فرض شده است که میل مهارها موازی هم و در جهت خمش به سمت بال ستون حرکت می‌کنند. در شکل‌های ۶ الی ۸ تغییرات خصوصیات سازه نسبت به موقعیت میل مهارها نشان داده شده است.

هنگامی که فاصله‌ی مرکز میل مهار به لبه‌ی صفحه ستون نزدیک می‌شود، از طول تنش در زیر صفحه ستون کاسته می‌شود. جایی که اتصال پای ستون تحت خروج از مرکزیت بالا باشد و میل مهارها به لبه‌ی صفحه ستون نزدیک شوند، در سمت کششی صفحه ستون و نزدیک به میل مهارها مابین سطح بتن و صفحه ستون جدایی ایجاد می‌شود. لذا هرچه فاصله‌ی مرکز میل مهار تا لبه‌ی صفحه ستون کمتر شود، از طول تنش در زیر صفحه ستون کاسته می‌شود. هنگامی که فاصله‌ی مرکز میل مهارها از لبه‌ی صفحه ستون دور می‌شود، نقش سخت‌کنندگی جان ستون از میزان خیز



شکل ۳. تغییرات سختی دورانی و دوران همراه با تغییر طول میل مهار.



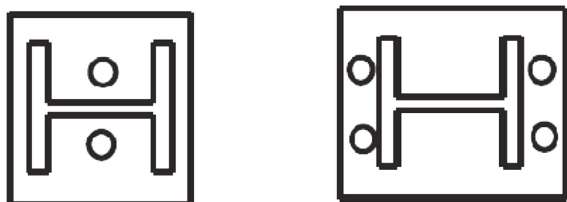
شکل ۴. نمودار تغییرات قطر میل مهارها همراه با تغییرات سختی دورانی و دوران اتصال.

ستون، در طراحی بهینه‌ی سازه تأثیری ندارد و در صورت افزایش طول میل مهار دوران افزایش می‌یابد و در نتیجه منجر به افزایش تغییرمکان طبقه‌های ابتدایی سازه می‌شود.

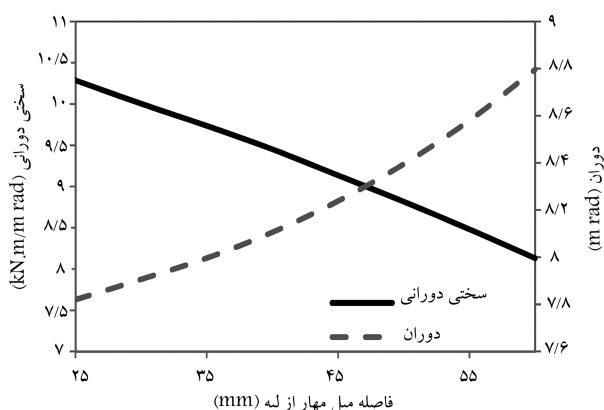
### ۲.۴. قطر میل مهار

در این قسمت قطر میل مهار در آزمایش شماره‌ی یک گومز و همکاران (۲۰۱۰)<sup>[۳]</sup> که ۱۹ میلی‌متر است، به تنهایی در اتصال تغییر داده شده است، در حالی که طول میل مهار که در قسمت قبلی به آن پرداخته شده است، به حالت اول بازگردانده شده است (۶۵۰ میلی‌متر). قطر میل مهار همانند طول میل مهار نقشی در تعیین‌کننده بودن عامل کنترل‌کننده‌ی اتصال پای ستون نخواهد داشت، چرا که با افزایش قطر میل مهار به ظرفیت میل مهارها اضافه شده است و صفحه به دلیل ثابت بودن ضخامت عامل کنترل‌کننده خواهد بود و لذا در لنگر تسلیم اتصال با افزایش و یا کاهش این پارامتر (قطر میل مهار) تغییری حاصل نخواهد شد. در شکل ۴، تغییرات سختی دورانی و دوران اتصال نسبت به قطر میل مهارها نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش قطر میل مهار باعث افزایش سختی دورانی اتصال می‌شود و همان‌طور که انتظار می‌رود دوران اتصال کاهش می‌یابد، که روند تغییرات هر دو خطی نیست. به طور مثال با افزایش ۲/۳ برابری قطر میل مهار سختی دورانی اتصال پای ستون ۲/۲۱ برابر و دوران ۰/۵۵ کاهش می‌یابد.



شکل ۵. دو نوع رفتار متفاوت از اتصال پای ستون.



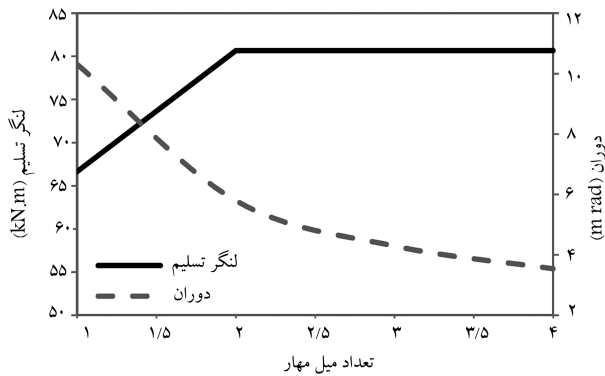
شکل ۶. روند تغییرات سختی دورانی و دوران اتصال پای ستون نسبت به موقعیت میل مهار.

سختی دورانی و لنگر تسلیم اتصال پرداخته شده است.

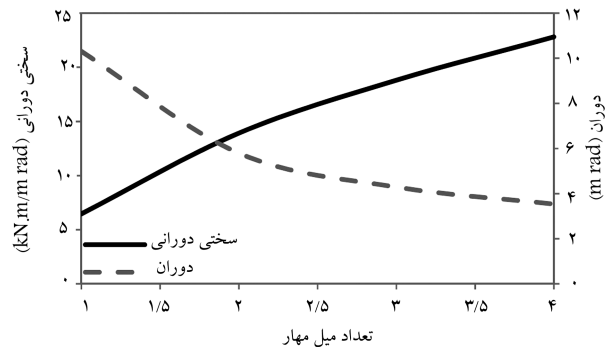
تعداد میل مهار در آزمایش ۱ گومز و همکاران (۲۰۱۰)، [۳] دو عدد است، ولی در این قسمت با فرض ثابت بودن دیگر پارامترها تعداد میل مهارها از ۱ الی ۴ عدد تغییر داده شده‌اند.

براساس راهنمای شماره‌ی یک، AISC (فیشر و کلوپیر، ۲۰۰۶) [۸] هر چند تعداد میل مهار به عنوان پارامترهای ورودی وجود ندارد، اما در تعیین لنگر تسلیم نقش دارند. در شکل‌های ۹ الی ۱۱ تغییرات ویژگی‌های سازه نسبت به تغییرات میل مهارها نشان داده شده است.

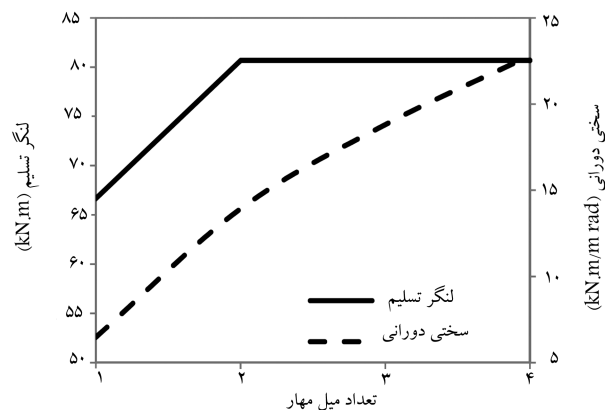
با توجه به شکل‌های ۹ الی ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد میل مهار باعث کاهش دوران و افزایش سختی دورانی اتصال خواهد شد و



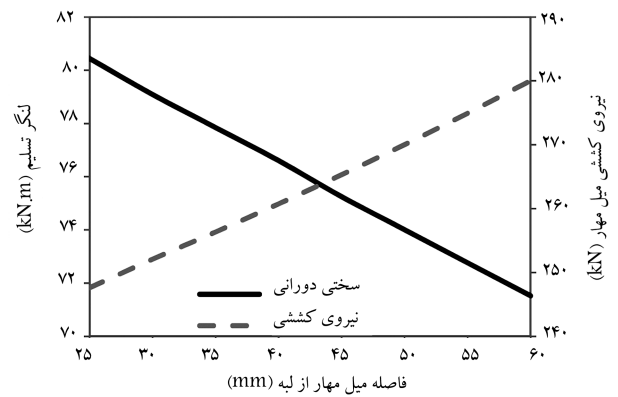
شکل ۸. روند تغییرات لنگر تسلیم و دوران تحت افزایش تعداد میل مهار.



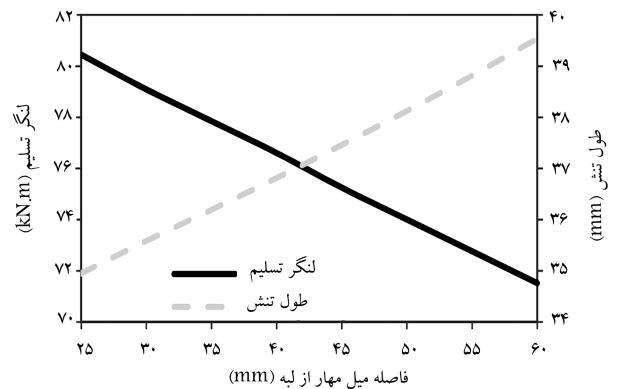
شکل ۹. تغییرات لنگر تسلیم و دوران تحت افزایش تعداد میل مهار.



شکل ۱۰. تغییرات سختی دورانی و لنگر تسلیم تحت افزایش تعداد میل مهار.



شکل ۷. روند تغییرات لنگر تسلیم و نیروی میل مهار نسبت به موقعیت میل مهار.

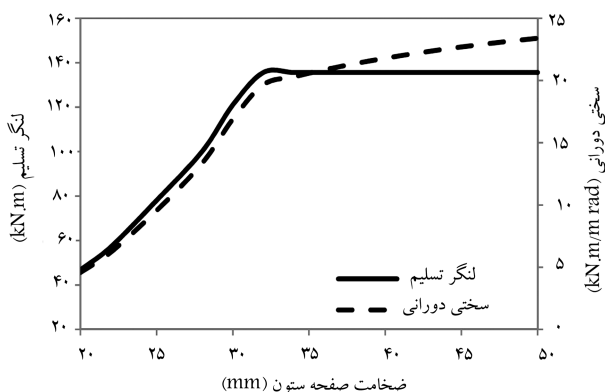


شکل ۸. روند تغییرات لنگر تسلیم و طول تنش میل مهار.

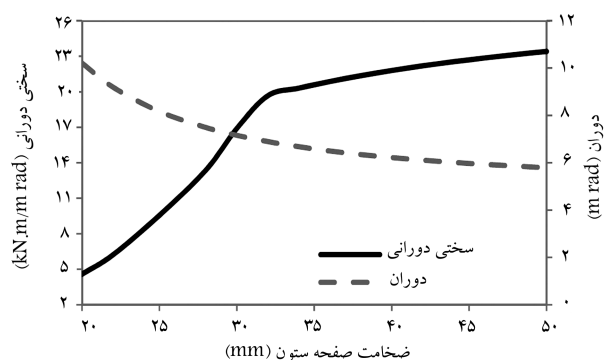
در صفحه‌ستون در نزدیک به میل مهارها کاسته و مابین صفحه‌ستون و سطح بتن تماس بیشتری ایجاد می‌شود، لذا طول تنش در زیر صفحه‌ستون افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که افزایش فاصله‌ی میل مهارها منجر به کاهش لنگر تسلیم، افزایش طول تنش در زیر صفحه‌ستون، افزایش نیروی موجود در میل مهارها، کاهش سختی دورانی و افزایش دوران اتصال پای ستون خواهد شد. لذا افزایش فاصله‌ی میل مهار از لبه‌ی صفحه‌ستون تأثیری منفی در عملکرد اتصال پای ستون خواهد داشت. به طور مثال هنگامی که فاصله‌ی مرکز میل مهار تا لبه‌ی صفحه‌ستون مطابق شرایط گفته‌شده ۲/۴ برابر شود، لنگر تسلیم و سختی دورانی اتصال به ترتیب ۱۱٪ و ۲۱٪ کاهش می‌یابد و طول تنش موجود در زیر صفحه‌ستون، نیروی میل مهار و دوران اتصال به ترتیب ۱۳٪، ۱۳٪ و ۱۲٫۵٪ کاهش می‌یابند. در بررسی تأثیر مساحت کل میل مهارها در سختی دورانی از آنجایی که افزایش قطر میل مهار باعث افزایش مقاومت میل مهار می‌شود، لذا افزایش مقاومت میل مهار در افزایش سختی تأثیر خواهد داشت. همچنین افزایش تعداد میل مهارها باعث کاهش نیروی موجود در هر میل مهار در سمت کششی صفحه‌ستون خواهد شد و با توجه به ثابت بودن مساحت میل مهارها، سختی اتصال افزایش و دوران کاهش می‌یابد، در نتیجه قطعاً تغییر در مقادیر قطر میل مهار و یا تعداد آن‌ها و به‌طورکلی مساحت میل مهارها در سختی دورانی و دوران مؤثر خواهد بود.

#### ۴.۴. تعداد میل مهارها

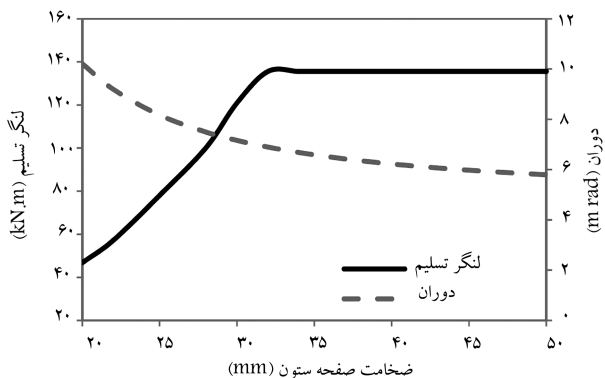
تعداد میل مهار می‌تواند بسته به نوع سازه متفاوت باشد. در این قسمت به بررسی اثر تعداد میل مهار در تعیین خصوصیات و ویژگی‌های اتصال پای ستون و به ویژه



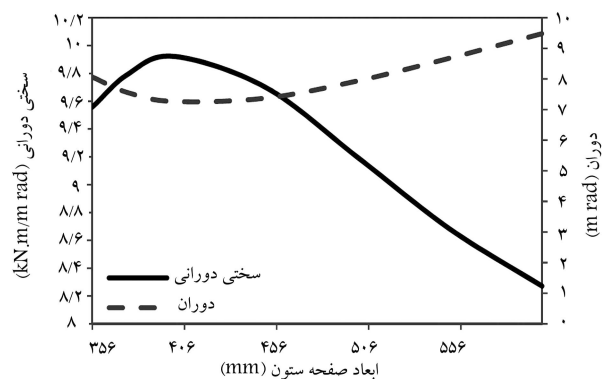
شکل ۱۲. لنگر تسلیم و سختی دورانی با افزایش ضخامت صفحه ستون.



شکل ۱۳. تغییرات دوران و سختی دورانی با افزایش ضخامت صفحه ستون.



شکل ۱۴. تغییرات دوران و لنگر تسلیم با افزایش ضخامت صفحه ستون.



شکل ۱۵. تغییرات دوران و سختی دورانی با افزایش ابعاد صفحه ستون.

روند افزایش سختی، به نسبت تغییر دیگر پارامترها بسیار زیاد و چشمگیر است. همچنین در صورتی که فقط یک میل مهار در اتصال وجود داشته باشد، به علت پایین تر بودن ظرفیت مقاومتی آن نسبت به صفحه ستون زودتر تسلیم می شود و لذا تعداد میل مهار عامل کنترل کننده در طراحی اتصال پای ستون خواهد بود. افزایش تعداد میل مهار باعث تغییر در عامل کنترل کننده بودن میل مهار و نیز افزایش ظرفیت مقاومتی آن می شود، لذا در این حالت صفحه ستون در طراحی اتصال تعیین کننده خواهد بود. به طور مثال هنگامی که تعداد میل مهارها از ۲ به ۴ تغییر می کند، سختی دورانی اتصال و دوران به ترتیب ۶۴٪ افزایش و ۳۹٪ کاهش می یابد.

## ۵. عدم قطعیت های صفحه ستون

ابعاد صفحه ستون در اتصال پای ستون یکی از مهم ترین پارامترها در تعیین خصوصیات رفتاری است، به طوری که افزایش و یا کاهش آن (حتی وقتی که طول و عرض ثابت هستند) باعث تغییر در رفتار واقعی اتصال خواهد شد.

### ۱.۵. ضخامت صفحه ستون

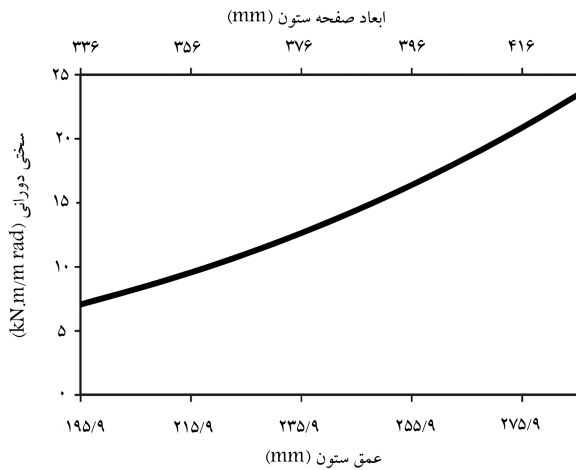
در صورتی که تغییری در قطر میل مهار صورت نگیرد، عامل کنترل کننده در اتصال از صفحه ستون به میل مهار تغییر پیدا می کند. تغییر لنگر تسلیم باعث تغییر مقدار سختی دورانی و دوران اتصال می شود، در نتیجه این تغییر در نتایج طراحی سازه نیز اثر خواهد گذاشت و اثر تغییر سختی دورانی در رفتار سازه تأثیر می گذارد. [۲۱-۲۳] در شکل های ۱۲ الی ۱۴ روند تغییرات سختی دورانی و دوران به همراه لنگر تسلیم نشان داده شده است.

با توجه به شکل های ۱۲ الی ۱۴ مشاهده می شود هنگامی که ضخامت صفحه ستون از مقدار ۳۰ میلی متر تجاوز کند، روند افزایش سختی دورانی اتصال به شدت کاهش می یابد، این تغییر در ضخامت همراه با تغییر در عامل کنترل کننده در اتصال است. لذا در نمودارها مشاهده می شود که نمودار لنگر تسلیم از ضخامت ۳۲ میلی متر به بعد به حالت افقی در می آید. بنابراین افزایش ضخامت صفحه ستون باعث افزایش سختی دورانی، کاهش دوران و افزایش لنگر تسلیم تا مقدار مشخصی خواهد شد. به طور مثال با افزایش ۵٪ ضخامت صفحه ستون، دوران ۳۰٪ کاهش و سختی دورانی و لنگر تسلیم اتصال به ترتیب ۳/۵۸ و ۲/۶ برابر می شود و عامل کنترل کننده ی اتصال از صفحه ستون به میل مهار تغییر می کند. با تغییر عامل کنترل کننده، با افزایش ۶۷٪ ضخامت صفحه ستون سختی دورانی ۱۲٪ افزایش می یابد و دوران اتصال ۱۹٪ با کاهش مواجه می شود.

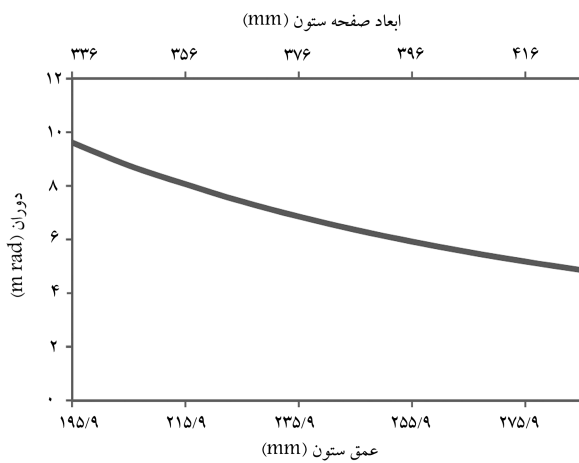
### ۲.۵. تغییر طول و عرض صفحه ستون

در روند مشاهده ی تغییرات رفتاری اتصال پای ستون، در این بخش طول و عرض صفحه ستون تغییر می یابد. در این قسمت طول و عرض صفحه ستون به طور مساوی افزایش می یابد و تغییرات در پارامترهای کلیدی اتصال بررسی می شود. روند تغییرات دوران و سختی دورانی نسبت به ابعاد صفحه ستون به ترتیب در شکل های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

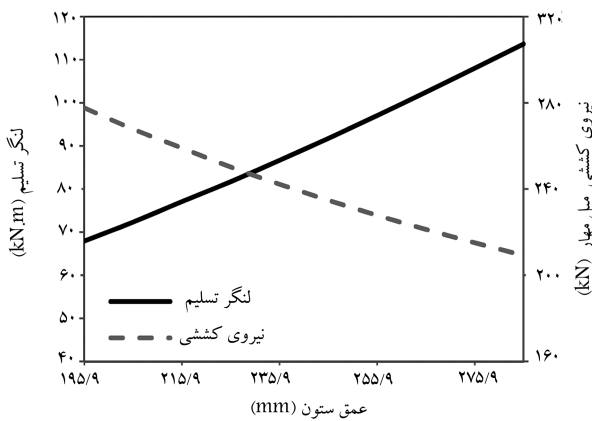
شکل های ۱۵ و ۱۶ نشان می دهند هنگامی که ابعاد صفحه ستون تغییر می کند، روند تغییرات پارامترهای صفحه ستون به نسبت دیگر پارامترها متفاوت است، به طوری



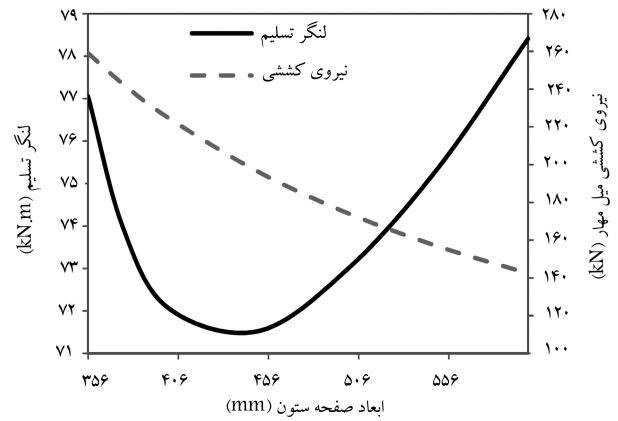
شکل ۱۷. تغییرات سختی دورانی نسبت به عمق ستون.



شکل ۱۸. تغییرات دوران اتصال ستون نسبت به عمق ستون.



شکل ۱۹. تغییرات لنگر تسلیم و نیروی موجود در میل مهارها.



شکل ۱۶. تغییرات دوران و سختی دورانی با افزایش ابعاد صفحه ستون.

که با افزایش ابعاد صفحه ستون به طور مثال لنگر تسلیم، روندی کاهشی از خود نشان می‌دهد و در صورتی که از مرز  $45^\circ$  میلی‌متر عبور کند، روندی افزایشی از خود نشان می‌دهد؛ این در حالی است که نیروی کششی موجود در میل مهار روندی نزولی را طی می‌کند.

سختی دورانی و دوران نیز به نوبه‌ی خود رفتاری مشابه با لنگر تسلیم دارند، به طوری که افزایش ابعاد صفحه ستون منجر به افزایش ابتدایی سختی می‌شود و سپس کاهش می‌یابد، در حالی که این روند برای دوران کاملاً برعکس است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که تغییر در ابعاد صفحه ستون می‌تواند باعث رفتاری دوگانه در اتصال شود، به خصوص هنگامی که تغییرات آن همراه با تغییرات دیگر پارامترها باشد.

بنابراین با مشاهده‌ی روند تغییرات در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش ابعاد صفحه ستون همراه با رفتار دوگانه‌ی سختی دورانی، دوران و لنگر تسلیم اتصال همراه خواهد بود، در حالی که تغییرات نیروی موجود در میل مهار و طول تنش موجود در زیر صفحه ستون یک حالت از خود نشان می‌دهند، به طوری که با افزایش ابعاد صفحه ستون نیروی میل مهار و طول تنش هر دو روندی کاهشی را طی می‌کنند. به طور مثال افزایش تقریبی  $68\%$  طول و عرض صفحه ستون باعث می‌شود که لنگر تسلیم و دوران اتصال پای ستون به طور کلی به ترتیب  $17\%$  و  $18/5\%$  افزایش یابد و سختی دورانی (به صورت کلی)، نیروی میل مهار و طول تنش موجود در زیر صفحه ستون به ترتیب  $13/5\%$ ،  $45\%$  و  $45\%$  کاهش یابد.

### ۳.۵. تغییر عمق ستون همراه با تغییر طول و عرض صفحه ستون

در اتصال پای ستون به دلیل خاصیت صلبیتی که جان ستون به عنوان سخت‌کننده به صفحه ستون می‌دهد، عمق ستون یکی از پارامترهای کلیدی دیگر در تعیین وضعیت رفتاری اتصال پای ستون است، که در این بخش به عنوان یکی دیگر از عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شده است.

شکل‌های ۱۷ الی ۱۹ بیان‌کننده‌ی این مطلب است که افزایش در مقدار عمق ستون و ابعاد صفحه ستون منجر به افزایش میزان لنگر تسلیم، کاهش نیروی موجود در میل مهارها، کاهش دوران و افزایش سختی دورانی می‌شود. افزایش هم‌زمان  $46\%$  عمق ستون و  $27\%$  طول و عرض صفحه ستون موجب می‌شود که لنگر تسلیم اتصال  $67\%$  افزایش و سختی دورانی اتصال پای ستون  $3/3$  برابر شود، همچنین طول تنش در زیر صفحه ستون  $24/6\%$  و نیروی میل مهار  $24/7\%$  و دوران اتصال حدود  $49\%$  کاهش یابد.

## ۶. فاصله‌ی اطمینان سختی دوران و دوران اتصال پای

### ستون

هر اتصالی با توجه به نیروهای اعمال‌شده بر آن، پیکربندی خاص و هر مؤلفه در اتصال مقادیری مرتبط با نیرو دارد. در ابتدای طراحی سازه هیچ شناختی از

## ۷. نتیجه‌گیری

با توجه اهمیت اتصال پای ستون در طراحی سازه‌های فولادی، در این مطالعه به بررسی قابلیت اعتمادپذیری این اتصال در حالت‌های مختلف پرداخته شده است. طبق بررسی‌های صورت‌گرفته مشخص شد که به منظور شناسایی بهتر رفتار اتصال پای ستون دو ویژگی، لنگر تسلیم و سختی دورانی اتصال پای ستون به نسبت سایر ویژگی‌ها را بهتر مشخص می‌کنند. با استفاده از این دو ویژگی به بررسی رفتار اتصال پای ستون پرداخته شده است که در ادامه، به بیان مهم‌ترین نتایج حاصل شده پرداخته شده است:

افزایش طول میل‌مهارها منجر به کاهش سختی دورانی اتصال پای ستون می‌شود و در برابر کاهش سختی، دوران اتصال افزایش می‌یابد. افزایش طول میل‌مهار به تنهایی در اتصال پای ستون، در طراحی بهینه‌ی سازه کمکی نمی‌کند و در صورت افزایش طول میل‌مهار دوران افزایش می‌یابد و در نتیجه منجر به افزایش تغییرمکان طبقه‌های ابتدایی سازه می‌شود.

افزایش قطر میل‌مهار در اتصال پای ستون، باعث افزایش سختی دورانی اتصال می‌شود و همان‌طور که انتظار می‌رود میزان دوران اتصال کاهش می‌یابد که روند تغییرات هر دو خطی نیست.

افزایش فاصله‌ی میل‌مهارها منجر به کاهش لنگر تسلیم، افزایش طول تنش در زیر صفحه‌ستون، افزایش نیروی موجود در میل‌مهارها، کاهش سختی دورانی و افزایش دوران اتصال پای ستون خواهد شد. افزایش تعداد میل‌مهارها باعث افزایش سختی دورانی و کاهش دوران خواهد شد.

افزایش ضخامت صفحه‌ستون باعث افزایش سختی دورانی، کاهش دوران و افزایش لنگر تسلیم تا مقدار مشخصی از ضخامت صفحه‌ستون خواهد شد.

افزایش ابعاد صفحه‌ستون همراه با رفتار دوگانه‌ی سختی دورانی، دوران و لنگر تسلیم اتصال همراه خواهد بود، در حالی که تغییرات نیروی موجود در میل‌مهار و طول تنش موجود در زیر صفحه‌ستون یک حالت از خود نشان می‌دهند، به طوری که با افزایش ابعاد صفحه‌ستون نیروی میل‌مهار و طول تنش هر دو روندی کاهشی را طی می‌کنند.

افزایش در مقدار عمق ستون و همچنین ابعاد صفحه‌ستون منجر به افزایش میزان لنگر تسلیم، کاهش نیروی موجود در میل‌مهارها، کاهش دوران و افزایش سختی دورانی می‌شود و همچنین جان ستون نقش سخت‌کننده در اتصال پای ستون دارد.

مقدار سختی دورانی اتصال پای ستون وجود نخواهد داشت، بنابراین با توجه به عدم قطعیت‌های ارائه‌شده در قسمت‌های قبل و احتمال برآورد میانگین سختی دورانی و دوران اتصال پای ستون به درصد اطمینانی موردنظر پرداخته شده است. در این حالت اتصال پای ستون نیازی نیست که کاملاً مفصلی و یا گیردار فرض شود.

در این مطالعه در برآورد میانگین سختی دورانی از قضیه‌ی حد مرکزی و همچنین نظریه‌ی برآوردیابی<sup>[۲۴]</sup> استفاده شده است. براساس قضیه‌ی حد مرکزی در صورتی که تعداد نمونه‌های تصادفی دست‌کم ۳۰ عدد از هر جمعیت باشد، آن نمونه با تقریب خوبی بیان‌کننده‌ی توزیع نرمال است. همچنین براساس نظریه‌ی برآوردیابی در صورتی که واریانس جمعیت نامعلوم باشد، می‌توان یک فاصله‌ی اطمینان  $(1 - \alpha)$  ۱۰۰٪ برای میانگین جمعیت با مقدار  $\mu$  تخمین زد که عبارت است از (رابطه‌ی ۳):

$$\mu \in \left( \bar{x} - t_{(1-\frac{\alpha}{2})}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{(1-\frac{\alpha}{2})}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (3)$$

که در آن،  $\bar{x}$  و  $s$  به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد نمونه‌ی تصادفی  $n$  تایی (در برآورد سختی دوران تعداد نمونه برابر با  $n = 77$  است) و  $t_{(1-\frac{\alpha}{2})}(n-1)$  از جدول‌های آماری قابل استخراج است.

همچنین چون اغلب مقدار برآورد  $\bar{x}$  دقیقاً مساوی با  $\mu$  نیست، بنابراین، برآورد خطا دارد. با استفاده از حدود فاصله اطمینان می‌توان میزان خطا یعنی  $|\bar{x} - \mu|$  را در حالتی که واریانس نامعلوم باشد، مطابق رابطه‌ی ۴ تعیین کرد:

$$|\bar{x} - \mu| < t_{(1-\frac{\alpha}{2})}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

در جدول ۱ با توجه به درصد اطمینان و با استفاده از روابط مذکور، میانگین و خطا برآورد شده است، مطابق این جدول ۹۵٪ اطمینان وجود دارد که میانگین سختی دوران در فاصله‌ی (۱۴/۶۶، ۱۲/۱) و میانگین دوران اتصال در فاصله‌ی (۷/۱۹، ۶/۵۱) وجود داشته باشد، که به ترتیب در هر کدام ۹۵٪ اطمینان وجود دارد که خطای برآورد میانگین سختی دوران از ۱/۰۷ و خطای برآورد دوران از ۰/۳۴ کمتر باشد.

جدول ۱. برآورد میانگین سختی دورانی و دوران اتصال پای ستون.

درصد اطمینان	برآورد میانگین سختی دورانی اتصال (KN.M/miliradian)	خطای میانگین سختی (KN.M/miliradian)	برآورد میانگین دوران اتصال (milliradian)	خطای برآورد میانگین دوران (milliradian)
۹۵	(۱۲,۵۱, ۱۴,۶۶)	۱,۰۷	(۶,۵۱, ۷,۱۹)	۰,۳۴
۹۰	(۱۲,۶۹, ۱۴,۴۸)	۰,۹	(۶,۵۶, ۷,۱۳)	۰,۲۸
۸۰	(۱۲,۸۶, ۱۴,۲۸)	۰,۷	(۶,۶۳, ۷,۰۷)	۰,۲۲
۶۰	(۱۳,۱۳, ۱۴,۰۴)	۰,۴۶	(۶,۷, ۶,۹۹)	۰,۱۴
۵۰	(۱۳,۲۲, ۱۳,۹۴)	۰,۳۶	(۶,۷۳, ۶,۹۶)	۰,۱۲
۴۰	(۱۳,۳, ۱۳,۸۷)	۰,۲۸	(۶,۷۶, ۶,۹۴)	۰,۰۹



پانوشتها

1. rectangular stress block
2. triangular stress block

منابع (References)

1. Grauvilardell, J.E., Lee, D., Ajar, J.F. and Dexter, R.J. "Synthesis of design, testing and analysis research on steel column base plate connections in high seismic zones", Structural Engineering Report No. ST-04-02, Minneapolis (MN): Department of Civil Engineering, University of Minnesota (2005).
2. Azhari, M. and Mirghaderi, R. "Design of steel structures", *Arkan Danesh*, **14**(1), p.581 (In Persian) (2010).
3. Gomez, I., Kanvinde, A. and Deierlein, G. "Exposed column base connections subjected to axial compression and flexure", Final Report Presented to the American Institute of Steel Construction (2010).
4. American Institute of Steel Construction (AISC), *Seismic Design Manual*, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL (2005).
5. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C. (2000).
6. Aviram, A., Stojadinovic, B. and Kiureghian, A. "Performance and reliability of exposed column base plate connections for steel momentresisting frames", PEER Rep. 2010/107, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA (2010).
7. Liu, P.-L. and Der Kiureghian, A. "Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances", *Probabilistic Engineering Mechanics*, **1**(2), pp. 105-112 (1986).
8. Fisher, J.M. and Kloiber, L.A., *Steel Design Guide 1 - Base Plate and Anchor Rod Design*, 2nd Ed., AISC 801-06, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL (2006).
9. DeWolf, J.T. "Column base plates", *Structural Engineering Practice*, **1**(1), pp. 39-51 (1982).
10. Kanvinde, A., Grilli, D. and Zareian, F. "Rotational stiffness of exposed column base connections: Experiments and analytical models", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **138**(5), pp. 549-560 (2012).
11. Sato, K. "A research on the aseismic behavior of steel column base for evaluating its strength capacity and fixity", Report No. 69, Kajima Institute of Construction Technology, Tokyo, Japan (1987).
12. Wald, F., Sokol, Z. and Steenhuis, M. "Proposal of the stiffness design model of the column bases", *Proceedings of the Third International Workshop on Connections in Steel Structures*, Trento, Italy (1995).
13. Comité Européen de Normalisation (CEN), *ENV1993 Eurocode 3; Design of Steel Structures*, Brussels, Belgium (1992).
14. Building Center of Japan, *Commentary on Structural Design Standard and Techniques* (2001).
15. Ermopoulos, J. and Stamatopoulos, G. "Mathematical modeling of column Base plate connections", *Journal of Constructional Steel Research*, **36**(2), pp. 79-100 (1996).
16. Dumas, M., Beaulieu, D. and Picard, A. "Characterization equations for steel column base connections", *Can. J. Civ. Eng.*, **33**(4), pp. 409-420 (2006).
17. Stamatopoulos, G.N. and Ermopoulos, J.CH. "Experimental and analytical investigation of steel column bases", *Journal of Constructional Steel Research*, **67**(9), pp. 1341-1357 (2011).
18. Dumas, M., Beaulieu, D. and Picard, A. "Introduction of the true oundati of connections in structural steel analyses (ST- 154)", *Proceedings of the 5th Structural Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Saskatoon, Sask. Edited by B. Sparling. CD-ROM. Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Que. (2004).
19. MATLAB R2010a, Users Manual, The Math Works, Inc. (2010).
20. Salmon, C.G., Shaker, L. and Johnston, B.G. "Moment-rotation characteristics of column anchorages", *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, **122**(1), pp. 132-154 (1957).
21. Ermopoulos, J., Stamatopoulos, G. and Owens, G. "Influence of support conditions on the behavior of steel frames", *Proc., Nordic Steel Construction Conference, Norwegian Steel Association*, Oslo, Norway (1995).
22. Maan, O. and Osman, A. "The influence of column base flexibility on the seismic response of steel framed structures", *Proc., 4th Structural Specialty Conf. of the Canadian Society for Civil Engineering*, CSCE, Montréal (2002).
23. Yamada, T. and Akiyama, H. "Influence of the rigidity of column bases on the ultimate earthquake resistance of multi-story steel moment frames", *Journal of Struct. Constr. Eng., AIJ*, **496**, pp. 113-118 (1997).
24. Alyanak, E., Venkayya, V.B., Grandhi, R.V. and Penmetsa, R.C. "Structural response and optimization of a supercavitating torpedo", *Finite Elements in Analysis and Design*, **41**(6), pp. 563-582 (March 2005).