شبیه سازی المان محدود اتصال کفشک فلزی تحت بارگذاری کششی و خمش ی

فتاح پیرویان[1]*، مهدی پیرویان[2]

[1]- رییس هیأت مدیره شرکت مهندسی سازان، شیراز، ایران ،msco@gmail.com

[2]- مدیرعامل شرکت مهندسی سازان، شیراز، ایران ،msco@gmail.com

چکیده

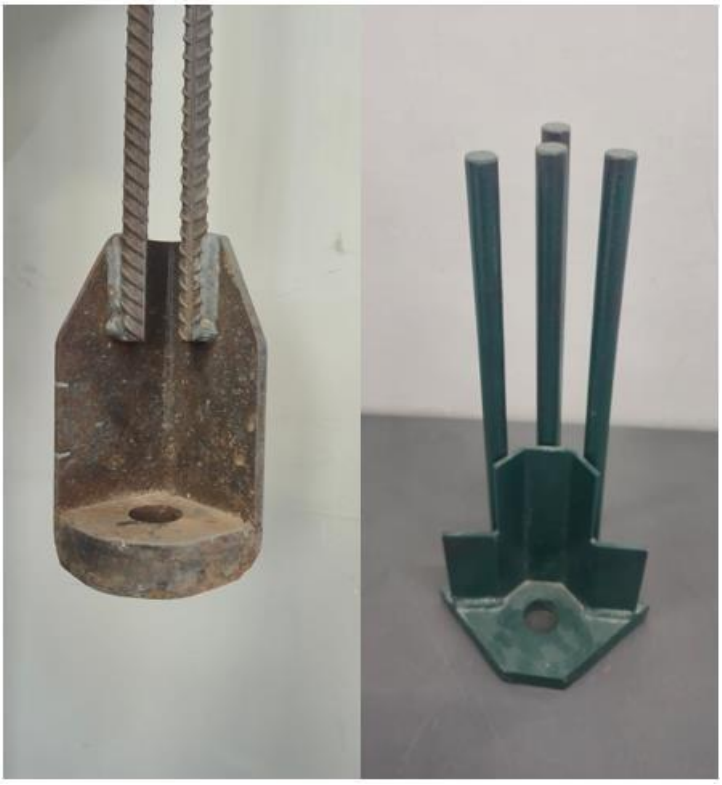
کفشکهای فل زی شامل یک بدنه فولادی، صفحه پایینی جو ششده و بول تهای رزو هدار است که در بتن پی شساخته مدفون میشود. این قطعه وظیفه دارد باره ای فشا ری، کششی و برشی را از عضو بتنی به المان متص لکننده)مانند صفحه ستون، فونداسیون یا قطعه بتن ی د یگر(منتقل کند. در این پژوهش به بررسی و شبیهسازی المان محدود تیرهای حاوی کفش کهای فلزی تحت بارگزاری کششی و خمشی پرداخته شده است. مدلسازی کفشکها و تیر در نرمافزار سالیدورکس و شبیهسازی آنها در نر مافزار انسیس انجام شده است. پارامترهای مختلف کفش کها شامل، فاصله آ نها از هم، ضخامت ورق کف، قطر و طول میلگردهای آن مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج عددی نشان میدهد که ابعاد و انداز ههای بهینه توسط شرکت سازنده کفشکها در کاتالوگ محصولات انتخاب شده اس ت، تناسب میان وزن سازه و میزان تحمل تنش آن برقرار شده است.

همچنین نتایج شبیه سازی با نتایج تست عملی همخو انی قابل قبولی دارد. بنابراین م یتوان از این اتصالات با ضریب اطمینان قابل قبولی در ساز ههای مختلف استفاده کرد.

واژههای کلیدی: اتصال کفشک فلزی، شبی هسازی المان محدود، بارکششی، گشتاور خمشی

۱- مقدمه

در سازههای عمرانی، کفشکهای فلزی بهعنوان عناصر اتصال و انتقال بار بین اجزاء مختلف سازه)مانند ستو نها، تیرها و پلها(به کار میروند؛ این قطعات ضمن ایجاد تکی هگاه مناسب، توزیع تنش، مقاومسازی اتصالات، تسهیل نصب و نگهداری را ممکن میسازند. تحلیل دقیق کفش کها از دیدگاه استاتیکی و دینامیکی، بررسی رفتار در برابر بارهای محوری، خمشی و برشی، و تحلیل خستگی و مقاومت لرزهای آ نها برای تضمین دوام و ایمنی سازه بسیار ضروری است. این کفش کها در نقاطی که سازه نیاز به اتصال اعضا، هدایت نیروها یا توزیع تمرکزهای بار دارد، بهکار میروند[۱]. تحلیل استاتیکی کفش کها به منظور ارزیابی ظرفیت باربری، توزیع تن شها و تغییرشکل لهای ناشی از بارگذاریهای ثقلی و جانبی انجام میشود تا اطمینان حاصل شود که کفش کها در محدوده عملکرد ایمن و با حد مطلوب دوام کار میکنند[۲]. در این پژوهش، فرضیات مرزی و بارگذاری معین شده، خواص مصالح و مدلهای مرزی مناسب برای تحلیل ارائه م یشود و مراحل شبی هسازی تعیین نیروی وارده، توزیع تن شها در نقاط تماس و پیوند، و کنترلهای لازم برای پایداری و تغییرشکل بررسی خواهد شد [۳]. در شکل ۱ مدلهای مختلف کفشکهای فلزی را میتوان مشاهده کرد .



شکل۱: انواع کفش کهای فلز ی

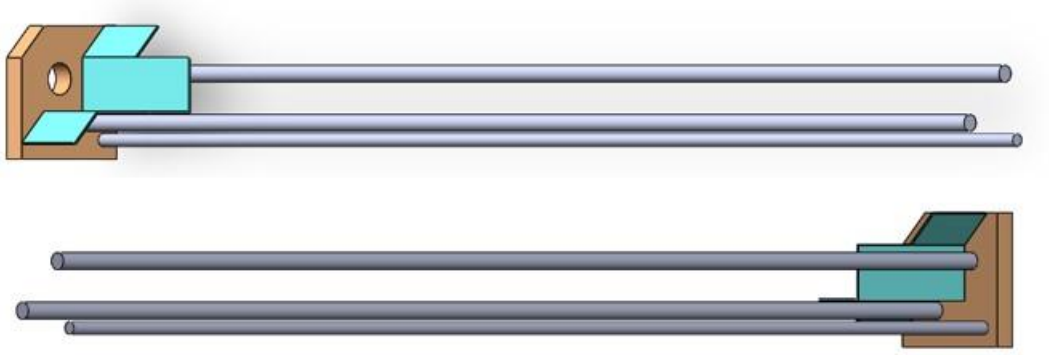
پژوهش حاضر با توجه به اهمیت کفش کهای فلزی در سازههای عمرانی، یکی از مدلهای موجود متداول را مورد بررسی قرار داده است و اعتبار مصالح و بارگذاری به کار رفته در آن را مورد بررسی قرار میدهد[۴] .

۲- کفشک فلز ی

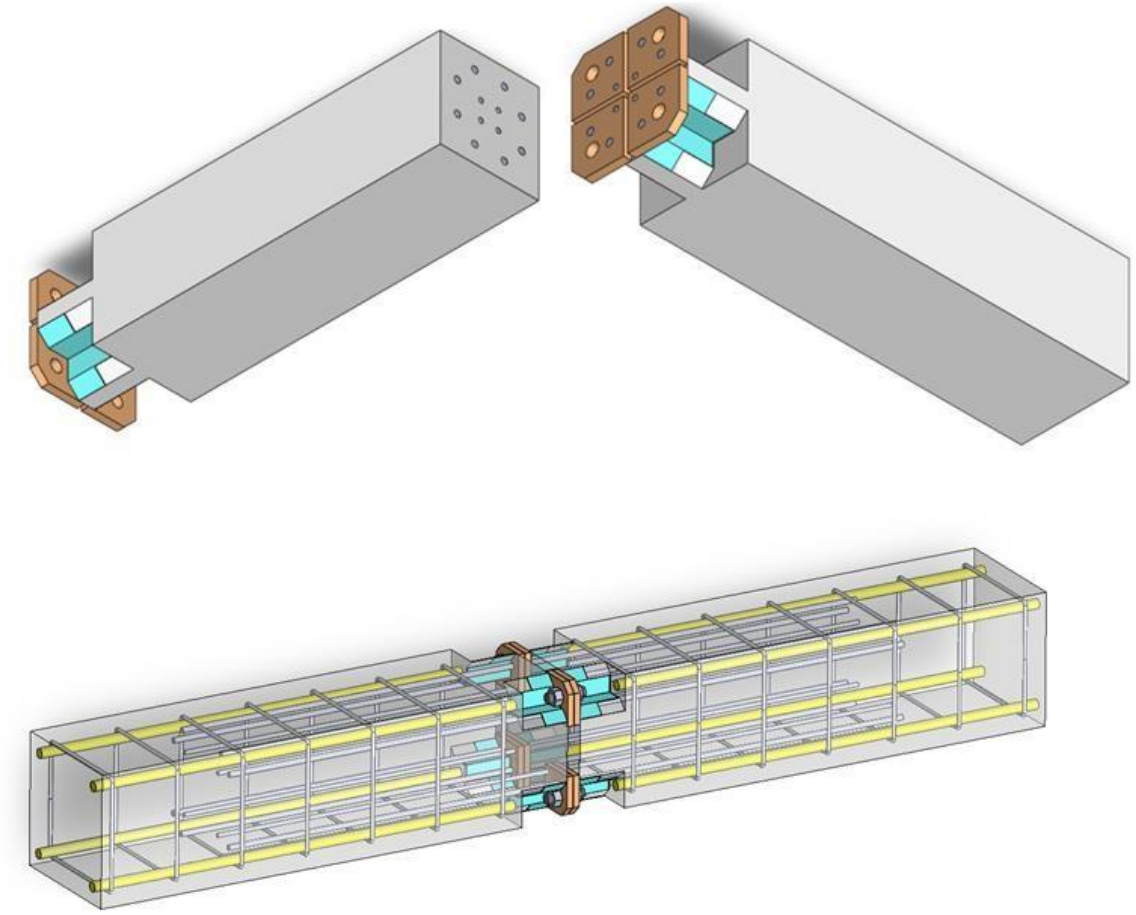
کفشک فلزی شامل یک بدنه فولادی، صفحه پایینی جوششده و بولتهای رزوهدار است که در بتن قطعه پیشساخته مدفون م یشود. این قطعه وظیفه دارد بارهای فشاری، کششی و برشی را از عضو بتنی به المان متصلکننده)مانند صفحه ستون، فونداسیون یا قطعه بتنی دیگر(منتقل کند. کارکرد اصلی کفشکها شامل توزیع و انتقال نیروهای محوری و عرضی، فراهم کردن تکی هگاه و تثبیت جهت اعضا، ممانعت از تمرکز تنش در گوش ها یا نقاط اتصال و ایجاد سطح تماس مناسب برای انتقال بار به عضو پایه یا فونداسیون است. علاوه بر این، کفشکها میتوانند نقش تنظیم ارتفاع و تراز کردن اعضا در حین نصب را داشته باشند و در برخی موارد با طراحی ویژه)مثلاً داشتن شیار یا بالهای تقویتی(به کنترل تغییرشکل موضعی و افزایش سختی سازه کمک کنند[۵].

در این پژوهش، مدلسازی کفشک فلزی در نرم افزار سالیدورکس انجام شده است. این مدل شامل یک تیر است که در انتهای آن ۴ عدد کفشک فلزی استفاده شده است. در شکل ۲ میتوان کفشک فلزی ساخته شده و در شکل ۳ میتوان مدل تهیه شده این کفشک را در نرمافزار سالیدورکس مشاهده کرد. همچنین در شکل ۴ نیز کل مجموعه اتصال تیر دارای ۴ عدد کفشک فلزی درکنار یکدیگر که با قطعه پیشساخته بتنی همراه شدهاند ، قابل مشاهده است .

شکل۲: کفشک فلزی مورد تحلیل در پژوهش حاضر [۴]



شکل۳: مدل کفشک فلزی مورد تحلیل این پژوه ش



شکل۴: تیر دارای اتصالات کفشک

۳- تحلیل المان محدو د

جهت تحلیل و بررسی کفشک فلزی و تیر دارای کفشک در این پژوهش، با استفاده از روش عددی المان محدود، از نرمافزار انسیس و ماژول استاتیک مکانیکال استفاده شده است. این نرمافزار قابلیتهای متعددی را در اختیار کاربر قرار میدهد که شبی هساز یهای سازهای به این گونه را تسهیل میبخشد. در مدل آماده شده در نرم افزار انسیس، صفحه زیرین یا پشتی ور قهای کف اتصال باید فیکس شوند و نیروی محوری ۳۸۴ کیلونیوتن میبایست به انتهای آزاد میلگردهای اتصال در جهت کشش وارد شود .ضریب اصطکاک میان میلگرد و بلوک بتنی نیز میتواند در حدود مقادیر ۰/۵ یا بیشتر از آن باشد .

در بارگزاری خمشی اما از یک مدل ۱/۸ از تیر دارای کفشک استفاده کردیم و با اعمال قیود تقارن در صفحات دارای تقارن و همچنین ثابت کردن انتهای مخالف تیر، اعمال گشتاور خمشی ۳۷/۵ کیلونیوت نمتر به کف ورق انتهایی و همچنین قرار دادن پیچ و مهره اتصال در کف ورق ، در مدول استاتیکی نرمافزار، تحلیل را انجام دادیم .

در اینجا با انجام تحلیلهای مختلف مقادیر تنش و جابجایی را به ازای مقادیر مختلف پارامترهای طراحی این کفشکهای فلزی، انجام داده و نمودار مقایسه آنها را ارائه کردیم. نمودارها بر اساس تغییرات بیان شده در پایین، انجام شده است که به شرح زیر میباشد]۴[:

تغییرات طول میلگردها را در سه حالت درنظر گرفتیم: به ترتیب طولهای ۹۳۰، ۱۰۸۵ و ۱۲۲۵ میلیمتر.

تغییرات ضخامت میلگردها در دو حالت: ۱۲ و ۱۶ میلیمتر .

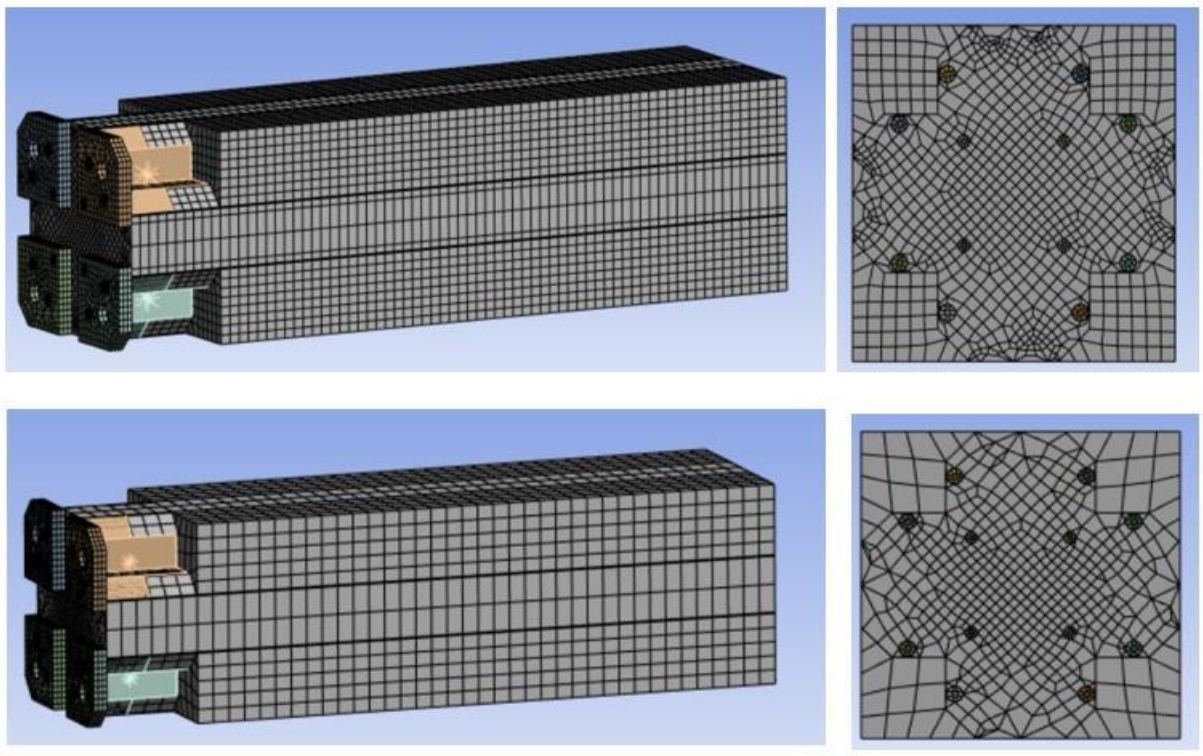
تغییرات ضخامت ورق کف در سه حالت: ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلیمتر .

تغییرات فاصله کفش کها نسبت به هم در سه حالت: ۲۶۰، ۳۱۰ و ۳۶۰ میلیمتر.

۴- بحث در نتای ج

۴-۱ - بار کششی

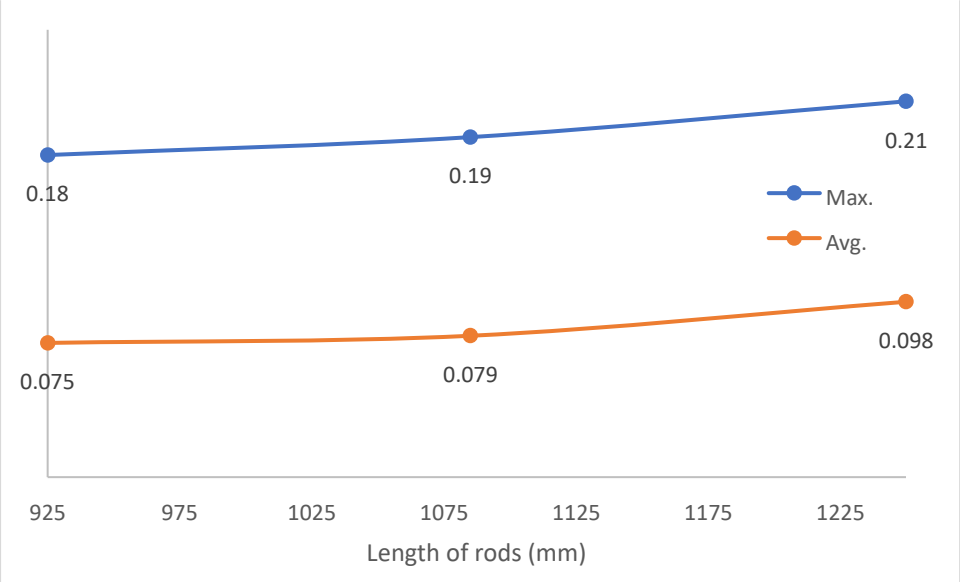
در این قسمت ابتدا با آنالیز شبکه المان محدود، به بررسی حداقل اندازه شبکه جهت دستیابی به پاسخ دقیق، چینش شبکه برای حل تمامی مسائل را بهدست آوردیم و سپس با استفاده از این شبکه بندی، سایر مسائل را نیز حل کردیم. در شکل ۶ میتوان شکل دو شبکه مختلف که اختلاف پاسخ آ نها کمتر از ۱/ ۰ درصد میباشد را مشاهده کرد. بنابراین برای انجام تحلیل در این پژوهش از شبکه بندی ریزتر میتوان استفاده کرد .



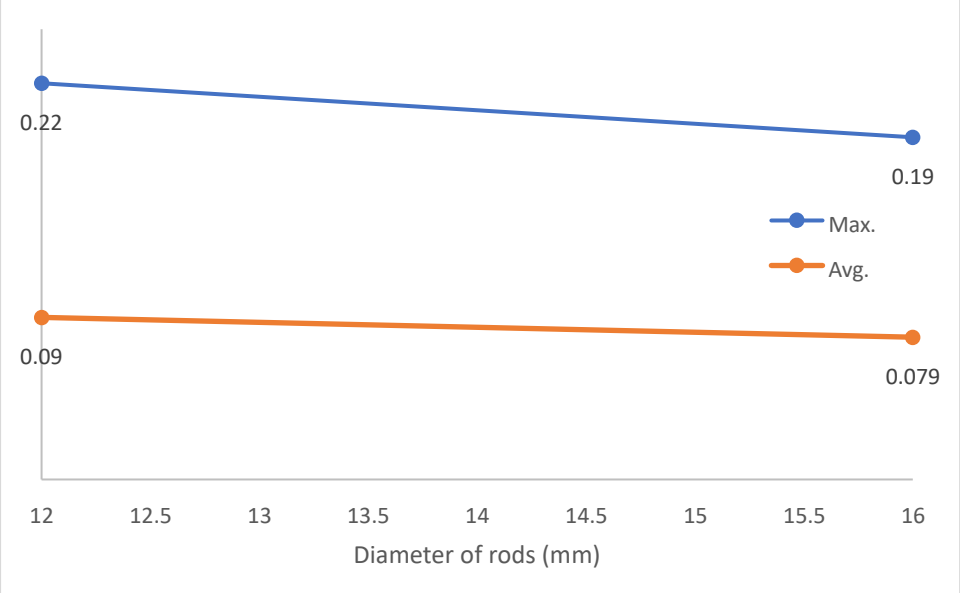
شکل۶: شبک هبندی های مختلف برای آنالیز شبک ه

نمودار شکلهای ۷ تا ۱۰ تغییرات جابجایی در هر ۴ حالت به ازای بارگذاری کششی ذکر شده در بالا را نشان میدهند، همچنین نمودار شک لهای ۱۱ تا ۱۴ نیز تغییرات تنش معادل فون-میسس را بیان میکنند. همانطور که در شکل ۷ و ۱۱ مشاهده

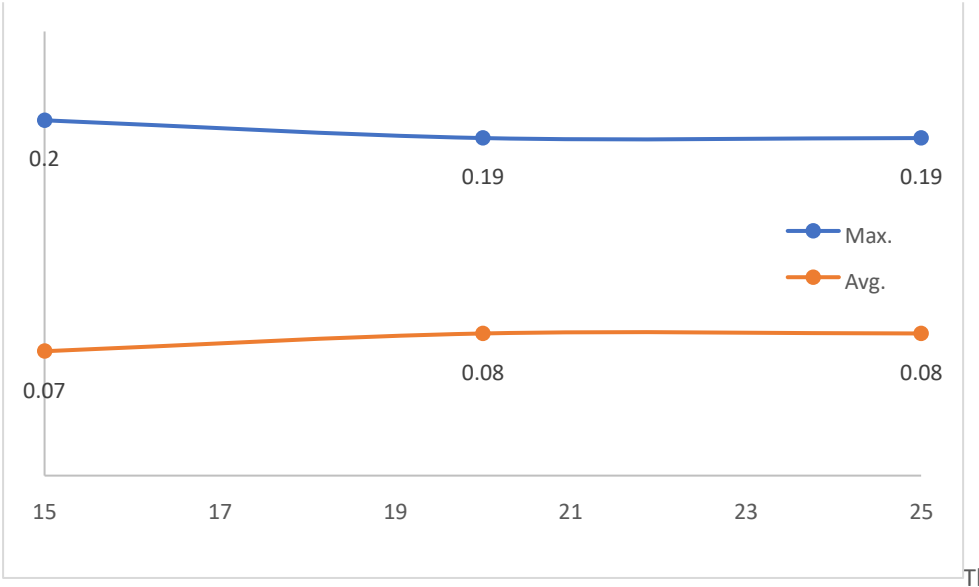
میشود، با بیشتر شدن طول میلگردها مقادیر جابجایی و تنش در سازه بیشتر شده است درحالیکه شکل ۸ و ۱۲ بیان میدارد که افزایش قطر میلگردها، تثبیت کننده یک روند کاهشی در جابجاییها و کاهش نسبی در تنش میباشد. از شکل ۹ و ۱۳ میتوان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت ورق کف اتصال، تاثیر چندانی در جابجایی و تنش ندارد و تنها وزن سازه را زیاد میکند اما شکل ۱۰ و ۱۴ بیان میدارند که افزایش فاصله میان کفش کها در یک اتصال با شدت بیشتری از مقدار جابجایی و تنش میکاهد. بنابراین پارامتر مناسبی است اما باید توجه داشت که مقدار و درصد وزنی حضور بتن در تیر را بسیار بالا میبرد .



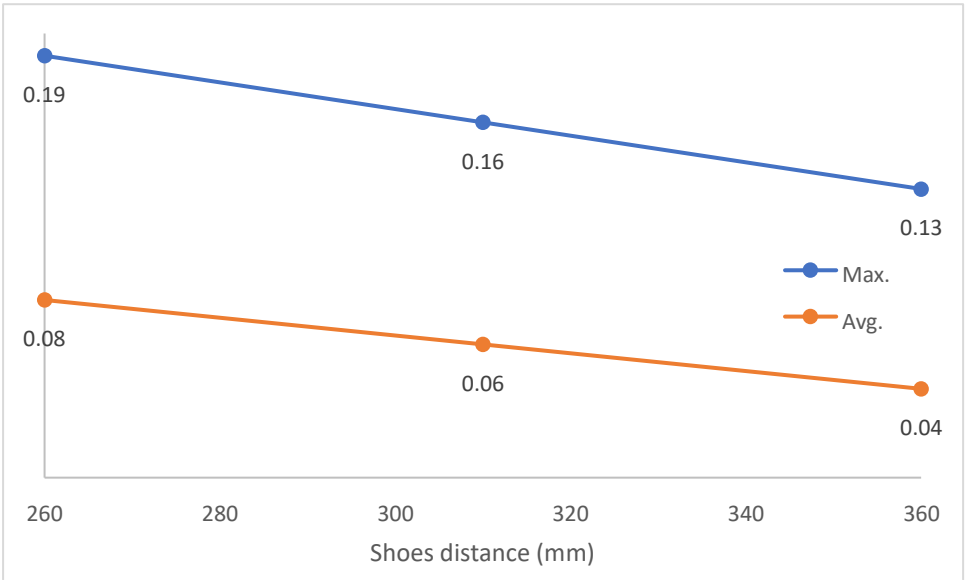
شکل۷: نمودار تغییرات میانگین و بیشینه جابجایی نسبت به تغییرات طول میلگرده ا



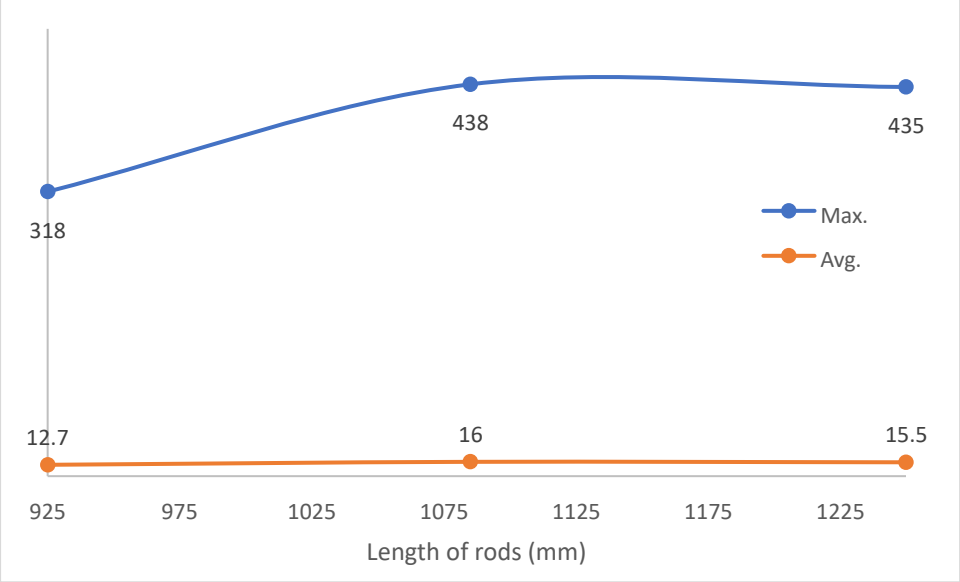
شکل۸: نمودار تغییرات میانگین و بیشینه جابجایی نسبت به تغییرات قطر میلگرده ا



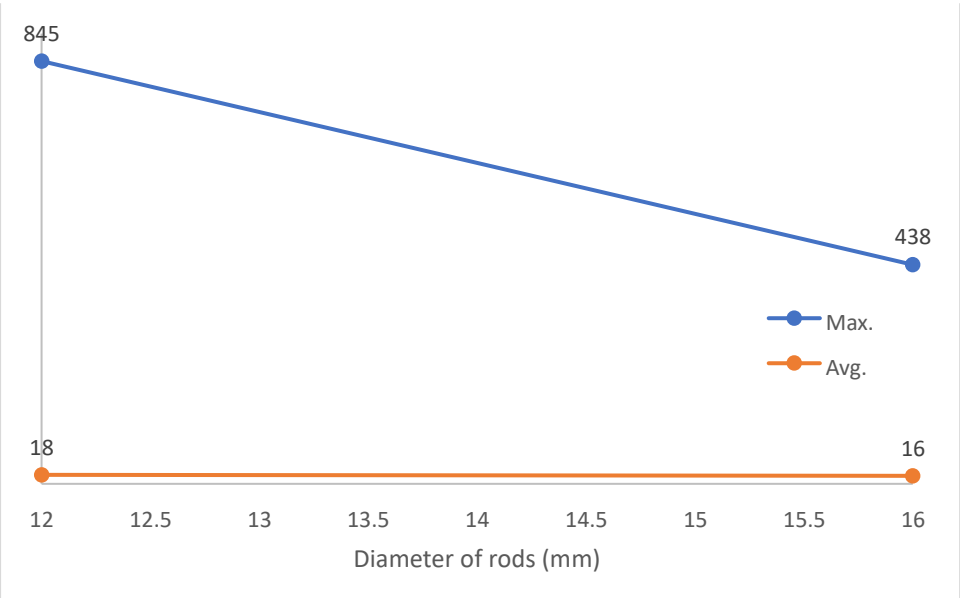
شکل۹: نمودار تغییرات میانگین و بیشینه جابجایی نسبت به تغییرات ضخامت ورق ک ف



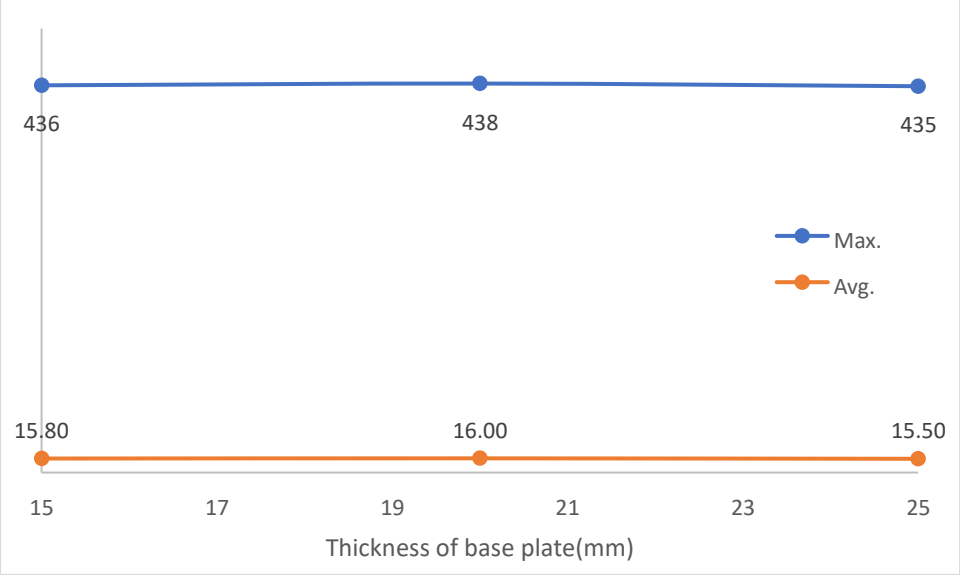
شکل۱۰: نمودار تغییرات میانگین و بیشینه جابجایی نسبت به تغییرات فاصله کفش کها



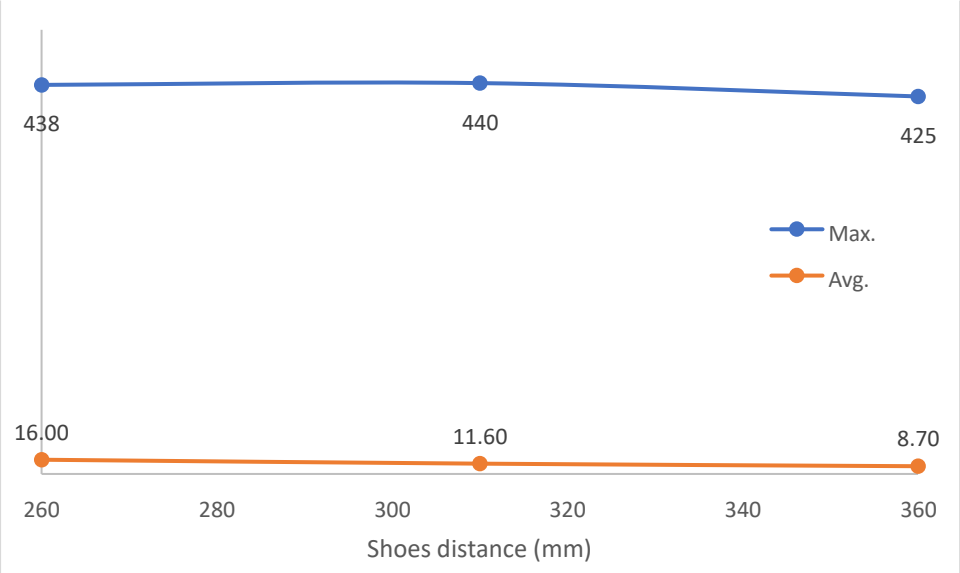
شکل۱۱: نمودار تغییرات میانگین و بیشینه تنش معادل نسبت به تغییرات طول میلگرده ا



شکل۱۲: نمودار تغییرات میانگین و بیشینه تنش معادل نسبت به تغییرات قطر میلگرده ا

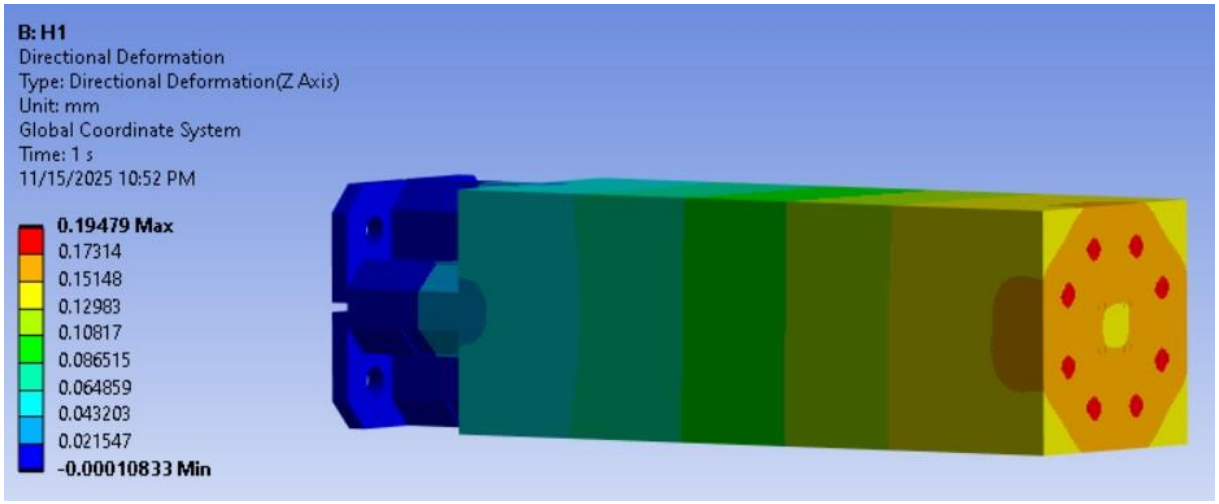


شکل۱۳: نمودار تغییرات میانگین و بیشینه تنش معادل نسبت به تغییرات ضخامت ورق ک ف



شکل۱۴: نمودار تغییرات میانگین و بیشینه تنش معادل نسبت به تغییرات فاصله کفش کها

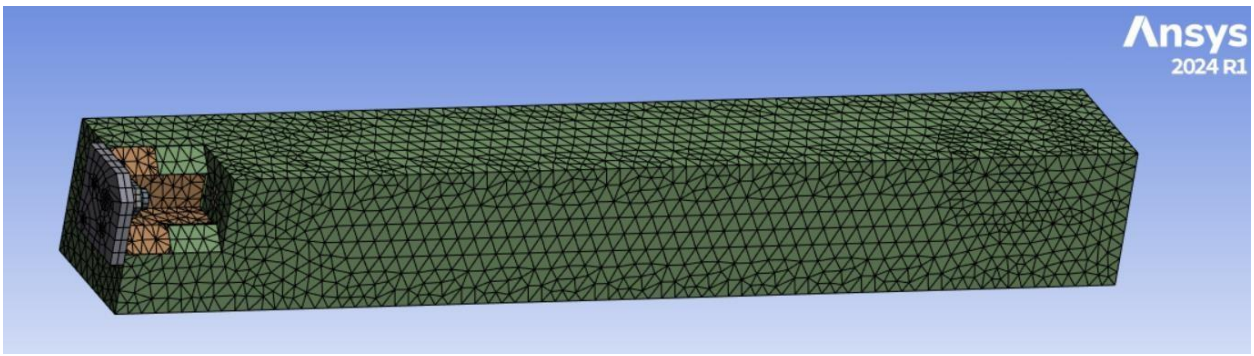
شکل ۱۵ بیانکننده نقاط بیشینه تنش که دقیقا زیر پای محل اعمال نیرو اتفاق افتاده است که مطابق اصل س نونان با دورتر شدن از محل اعمال نیرو، کانتورهای تنش معادل به صورت تقریبا یکنواختی در طول میلگردها قابل مشاهده هستند .



شکل۱۵: کانتور جابجایی تحت بار کششی بر روی کل تی ر

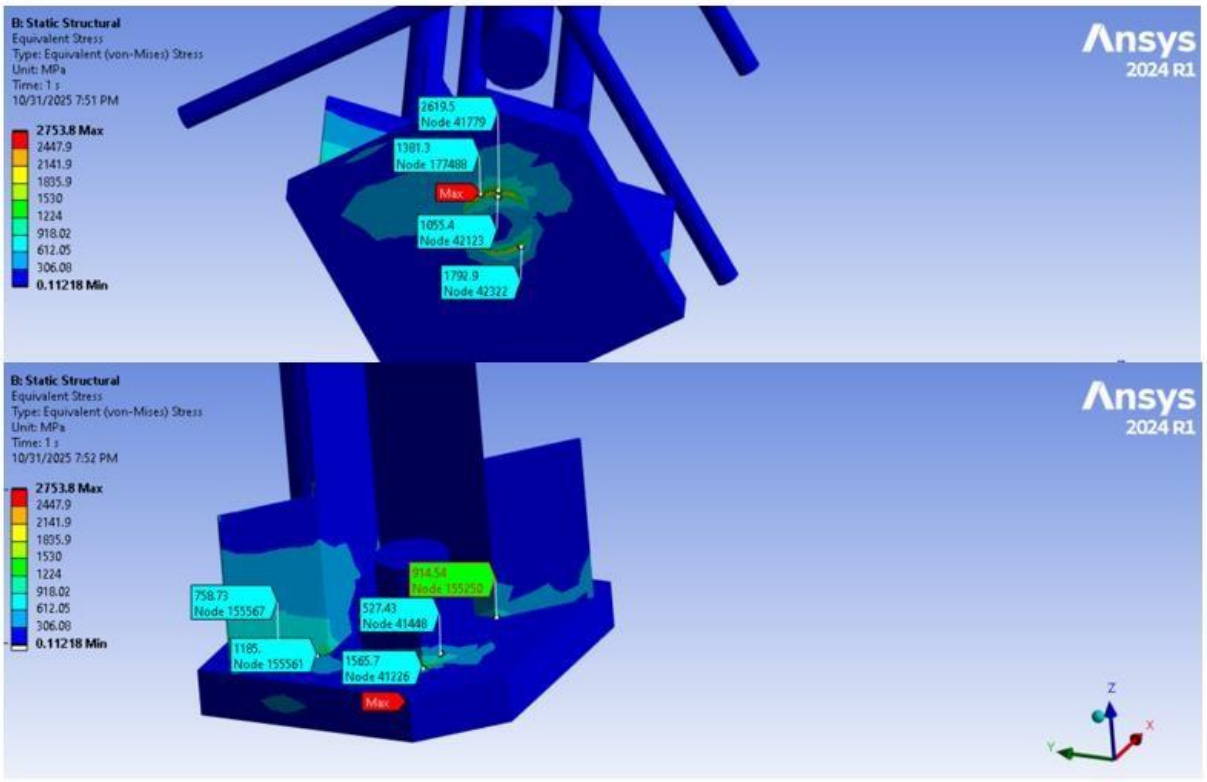
۴-۲ - بار خمشی

دقیقا مطابق آنچه برای بارگزاری کششی انجام شد، برای بارگزاری خمشی نیز انجام شده است، ابتدا آنالیز شبکه انجام شده و شکل ۱۶ شبکه مناسب برای مدل ۱/۸ تیر به همراه آرماتورهای آن تحت گشتاور خمشی میباشد. از مدل ۱/۸ جهت کوتاهتر شدن زمان و کمتر شدن هزینه محاسباتی شبیه سازی استفاده شده است.



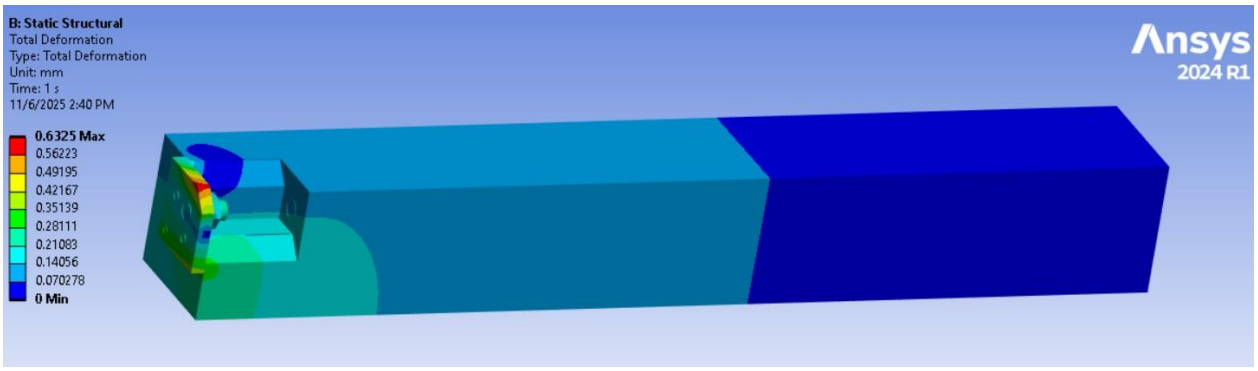
شکل۱۶: شبک هبندی برای آنالیز مسأله تحت گشتاور خمشی

شکل ۱۷ بیانکننده نقاط بیشینه تنش است که در حالت کلی بر روی ورق کف کفشک که دارای اتصالات است اتفاق افتاده است. در این شکل م یتوان توزیع تنش در قسمت بالایی و پایینی ورق را ملاحظه کرد که مقادیر بیشینه بر روی آن نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر تنش قابل مشاهده ، اتصال پیچ و مهره شکل فوق در کفشک محل بیشترین تنش است و لذا اگر قرار به هر نوع زوال در مجموعه باشد، این اتصال اولین محل شروع زوال خواهد بود که این نتیجه نیز با تست عملی انجام شده همخوانی دارد چرا که اتصالات پیچ و مهره در تستها نیز دچار زوال شده است که در شکل ۱۸ قابل مشاهده است .

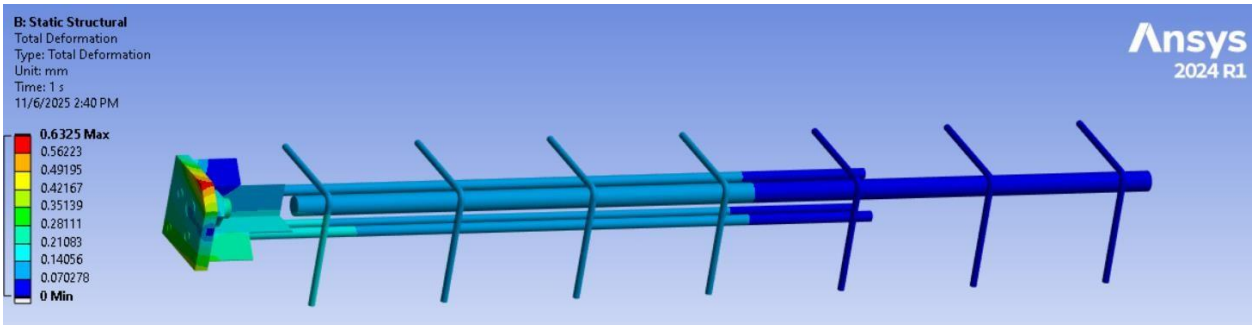


شکل۱۷: محل بیشینه تنش معادل

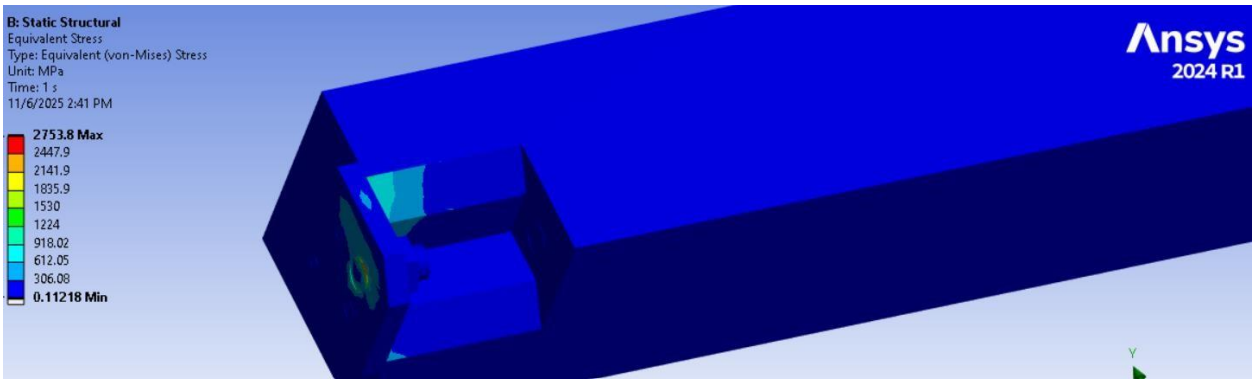
شکل۱۸: وضعیت اتصالات کفشک پس از انجام تست خم ش



شکل۱۹: کانتور جابجایی بر روی کل تی ر



شکل۲۰: کانتور جابجایی کفش کها و آرماتوره ا



شکل۲۱: کانتور تنش معادل تی ر

شکل ۱۹ و ۲۰ به ترتیب نشان دهنده کانتورهای توزیع جابجایی بر روی کل تیر و همچنین اتصالات کفشک میباشند. شکل۲۱ نیز نشان دهنده توزیع تنش بر روی کل تیر است. همانطور که مشاهده میشود بلوک بتنی تنش خاصی را تحمل نکرده و تنها نقش انتقال دهنده نیرو را دارد .

۵- نتیج هگیری و جم عبندی

در این پژوهش تلاش شد که با تحلیل یکی از مدلهای موجود در کاتالوگ شرکت Becco-Peikko یک صحت سنجی بر رفتار تحمل تنش و جابجایی و تغییر شکل این اتصالات حین بار کششی و خمشی انجام شود. در پژوهش حاضر، ابتدا با مدلسازی کفشک ها و تیر در نرم افزار سالیدورکس آنها را بازطراحی کردیم و سپس با تحلیل در نرم افزار انسیس به بررسی برخی از پارامترهای آنها نظیر طول و قطر میلگرد، فاصله کفشکها و ضخامت ورق کف آن پرداختیم و نهایتا با تحلیل نتایج آنها برای سه سایز مختلف در هر یک از موارد بالا رفتار آنها را مقایسه کردیم . نتایج نشان میدهد که رفتار تیر مدلشده در نرمافزار تحت بارگزاری نهایی، پاسخی بسیار نزدیک با مقادیر واقعی کفشکها حین تستهای آزمایشگاهی دارد و علاوه بر آن مقادیر اعلام شده توسط شرکت سازنده آنها، قابل اتکا میباشد. بنابراین کفشک فلزی به عنوان یک راهکار صنعتیشده و استاندارد برای اتصالات در سیستمهای پیشساخته، تضمی نکنندهی سرعت ، ایمنی، و دوام سازه است. تحلیلهای عدد ی نشان میدهند که این نوع اتصال در پروژههای پرتکرار، علاوه بر افزایش ضریب اطمینان سازه، صرفهجویی اقتصادی و زم انی قابل توجهی نیز دارد .

مراج ع

[1] J. Kinnunen, “ETA Tests and Design of HPKM Column Shoe Connections,” *Procedia Eng*, vol. 172, pp. 521–528, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.061.

[2] A. D. Abdulateef, “PERFORMANCE OF COLUMN-TO-COLUMN MECHANICAL CONNECTION IN PRECAST CONCRETE BUILDING UNDER SEISMIC,” no. March, 2023, doi: 10.17993/3ctic.2023.121.46-.36

[3] J. Yrjölä and J. Kinnunen, “Bolted Column Shoe Connections – Sustainable and Smart Solution for Precast Structures BT - Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient,” A. Ilki, D. Çavunt, and Y. S. Çavunt, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 1724–1733.

[4] P. Group, “TECHNICAL MANUAL BECO ® Beam Shoe BECO ® Beam Shoe,” *[catalogue]*, 2022.

[5] J. Propika, P. Pudjisuryadi, and J. Chandra, “Comparative Performance of Precast Column-To-Foundation Connections: A Review BT - Selected Articles from the 8th International Conference on Architecture and Civil Engineering,” E. M. Nia, M. Awang, M. F. N. Aulady, M. Traykova, and L. Yola, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2025, pp. 843–.458