

بررسی عددی رفتار تیرهای عمیق بتن آرمه با ستون‌های لوله فولادی پر شده با بتن تحت بارگذاری چرخه‌ای

حسام خشاب‌ی اسکوئی

کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی مراغه، مراغه، ایران

Hesam.oskuii7373@gmail.com

ارسال: مهر ماه ۹۹ پذیرش: آذر ماه ۹۹

چکیده

سیستم‌های سازه‌ای که با ستون‌های لوله‌ای شکل فولادی پر شده با بتن ساخته شده‌اند در مقایسه با سیستم‌های معمولی فولادی و با بتنی مسلح از مزایای زیادی برخوردار می‌باشند، هدف اصلی توسعه‌ی یک مدل اجزای محدود قابل اطمینان به منظور مطالعه‌ی رفتار تیر عمیق مرکب با وجود ستون‌های لوله فولادی پر شده با بتن تحت اثر بار چرخه‌ای می‌باشد بنابراین در مدلسازی رفتار تیر عمیق مرکب و نیز صحت‌سنجی آن، با استفاده از مدل اجزای محدود نرم افزاری آباکوس، ۷ مدل متفاوت با تغییر پارامترهای مختلف (ضخامت بال و جان تیر فولادی عمیق، ضخامت لوله‌ی فولادی ستون‌ها)، مدلسازی شده است که نتایج حاصل از مقایسه‌ی آنها نشان داد، افزایش ضخامت لوله‌های فولادی ستون باعث افزایش سختی اولیه شده و با افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی آن مقدار بار نهایی به ترتیب در حدود ۹، ۱۷ و ۲۴ درصد و مقدار انرژی مصرفی در حدود ۸، ۱۵ و ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. تغییر ضخامت بال و جان پروفیل فولادی تأثیری بر سختی اولیه، بار نهایی و انرژی مصرفی تیر عمیق مرکب مورد بحث در این تحقیق ندارد. با مقایسه‌ی همه‌ی مشخص گردید که ضخامت لوله‌ی فولادی ستون‌ها به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را روی بار نهایی و انرژی مصرفی تیر عمیق مرکب دارند.

کلمات کلیدی: ستون لوله فولادی پر شده با بتن، تحلیل اجزای محدود، تیر عمیق.

۱- مقدمه

استفاده از بتن به همراه فولاد در سازه‌ها می‌تواند نقش مؤثری در بهبود رفتار سازه یعنی افزایش مقاومت و شکل پذیری، ایفا نماید. در بسیاری از موارد در سازه‌های فولادی که ضوابط شکل پذیری قابل ملاحظه را ارضا نمی‌کنند، استفاده از بتن و به کار بردن قشر بتنی فوقانی در آنها همراه با آرماتور بندی مناسب، در ارتقاء رفتار لرزه‌ای با جلوگیری از کمانش‌های جزئی و کلی، تأمین دیافراگم مؤثر، بهبود جریان انتقال تنش‌ها، جایگزینی به عنوان ورق پیوستگی، کاهش اعوجاج ناحیه پانلی، بهبود قابل ملاحظه رفتار و عملکرد اتصال، تأمین یکپارچگی و انسجام سیستم برای مقابله با گسیختگی پیشرونده و تأمین مقاومت جانبی با شکل پذیری مطلوب، میسر خواهد بود. تیرهای مرکب فولادی بتنی شامل یک تیر فولادی هستند که بر روی آن بلوک بتنی با استفاده از اتصالات برشی نصب می‌شود. در ساخت و ساز سنتی تیرهای مرکب، بلوک‌های بتنی بدون اتصالات خاص روی تیر فولادی قرار می‌گیرد و توسط آن حمایت می‌شود. از آنجا که در این حالت هیچ اتصالی بین بلوک بتنی و تیر فولادی قرار ندارد، تحت اثر بارهای مختلف، هر کدام به شکل مستقل واکنش عمل می‌کنند. وقتی در اتصال میان بلوک بتنی و تیر فولادی از اتصالات برشی استفاده می‌شود، امکان لغزش

میان این دو عضو از بین می‌رود و در کنار هم مانند یک تیر مرکب یکپارچه عمل می‌کنند. رفتار تیر مرکب تحت بارهای مختلف مانند رفتار تیرهای T شکل است. مفهوم اساسی در ساخت تیرهای مرکب، بر این واقعیت استوار است که قدرت تحمل فشار در بتن بیشتر از فولاد است و فولاد در تحمل کشش بهتر عمل می‌کند. با استفاده از ترکیب عملکرد این دو، بیشترین بهره از مزایا و قابلیت‌های فولاد و بتن در کنار هم به دست می‌آید [۱]. به علت مزایای زیاد تیرهای مرکب پیوسته (تیر فولادی با عرشه بتنی) در ارتباط با توزیع مجدد مطلوب نیروهای داخلی در سراسر عضو و ارضاء راحت تر کنترل‌های نگهداری، این نوع تیرها یک روش ساده‌ای کارآمد در بسیاری از سیستم‌های سازه‌ای می‌باشند، مانند ساختمان‌ها و پل‌ها. با این حال، طراحی و تجزیه و تحلیل تیرهای ترکیبی پیوسته به علت رفتار متفاوت آنها در مناطق لنگر مثبت و منفی تا حدودی پیچیده است. علاوه بر این، در مناطق لنگر منفی، به عنوان مثال در مناطق تکیه‌گاه داخلی اعضای پیوسته، بخش بزرگی از بخش تیر فولادی تحت تنش فشاری قرار دارد، در نتیجه بال پایینی و جان در معرض ناپایداری موضعی هستند. در کارهای مهندسی، موقعیت‌های وجود دارد که در آن تیرهای ترکیبی تحت کنش‌های ترکیبی هستند یعنی به طور همزمان تحت کنش لنگر منفی یا مثبت و کشش یا فشار محوری هستند، این نمونه‌ها عبارتند: الف) در تیرهای طبقه، جایی که نیروی محوری هم می‌تواند بعنوان قسمتی از یک سیستم مهاربندی خاص باشد یا جایی که تیر بعنوان قسمتی از یک دیافراگم عمل می‌کند [۲].

ب) در قاب‌های سازه‌های بلند مرتبه جایی که اثرات بارگذاری باد به طور قابل توجهی زیاد است و می‌تواند نیروهای محوری بزرگی در تیرهای ساختمان تحمیل کند.

ج) در سازه‌هایی که از اعضای شیدار استفاده میشود بعنوان مثال: تیرهای استادیوم یا رمپ‌های شیدار ورودی پارکینگ

د) در پل‌ها جایی که ممکن است بارهای شیب دار و ترافیک بصورت نیروهای محوری بزرگ در تیرهای تکیه‌گاه وجود آیند [۳].

سیستم‌های سازه‌ای که با ستون‌های لوله‌ای شکل فولادی پر شده با بتن ساخته شده‌اند در مقایسه با سیستم‌های معمولی فولادی و یا بتنی مسلح از مزایای زیادی برخوردار می‌باشند، یکی از مزیت‌های اصلی در این سیستم‌ها اندرکنش بین فولاد و بتن است که باعث می‌گردد که در اثر مقاومت بتن، کماتش موضعی فولاد به تاخیر بیفتد از طرفی به علت محصوریت ناشی از فولاد مقاومت بتن نیز افزایش پیدا کند [۴].

ستون‌های فولادی پر شده با بتن هم به صورت طولی و هم به صورت عرضی عمل می‌کنند بنابراین هنگامی که تحت فشار تک محوری در جهت طولی قرار می‌گیرند تنش محیطی نیز وارد می‌گردد و در همان زمان بتن تحت تنش سه محوره قرار می‌گیرد [۵]. بنابراین نکته ضعف‌هایی به خاطر مقاومت و شکل‌پذیری وجود دارد. مخصوصاً، ترک خوردگی بتن در شکل‌پذیری و عمر مفید پل‌ها تاثیر دارد. به این ترتیب، سطح تیر ورق‌ها در اطراف تکیه‌گاه‌های میانی بعنوان قسمت بحرانی تیر ورق پیوسته می‌باشد. عملکرد مکانیکی، شامل کنترل ترک و بازپخش نیروی داخلی در این ناحیه، مورد توجه مطالعات اخیر می‌باشد [۶].

۲- تعریف واژه‌ها و اصطلاحات فنی و تخصصی

۱. کامپوزیت یا مرکب: کامپوزیت، ترکیب دو یا تعداد بیشتر از موادی که هر چند از نظر شکل با هم تفاوت دارند ولی در کنار یکدیگر تشکیل ترکیبی با خواص فیزیکی و مکانیکی دیگر می‌دهند. در کامپوزیت‌ها مواد تشکیل دهنده خواص خود را حفظ می‌کنند بدینصورت که حل نمی‌شوند یا بطور کامل جذب و در یکدیگر ترکیب نمی‌شوند و در عین حال با هم هماهنگی دارند. مواد تشکیل دهنده آنها خصوصیات فیزیکی خود را حفظ می‌کنند و مرز بین یکدیگر را نشان می‌دهند.

۲. سیستم ترکیبی: سیستم‌های سازه‌ای هستند که از ترکیب فولاد، بتن مسلح و المان‌های ترکیبی تشکیل می‌شوند.

۳. بتن مسلح: بتن مسلح یا بتن آرمه به بتن مسلح شده با میلگرد گفته می‌شود. برای مسلح کردن بتن از میلگردهای تقویتی، شبکه‌های توری تقویتی، صفحات فلزی یا الیاف تقویتی استفاده می‌گردد. هدف اصلی استفاده از بتن آرمه، واگذاری نیروهای کششی بوجود آمده در بتن به میلگردهاست تا بدین طریق نیروهای کششی به بتن وارد نشده و سبب ترک خوردگی و در نهایت پکیدن بتن نشود.

۳- وقایع مهم در زمینه توسعه سازه‌های ترکیبی از فولاد و بتن

در سال ۱۸۹۰، ساخت سازه‌های ترکیبی از چندنوع مصالح، توسعه یافت. اولین سازه ثبت شده در آمریکا که از تیرهای نوردرشده

مدفون در بتن ساخته شد، خانه ای در «پورت چستر» نیویورک بود که در سال ۱۸۷۷ تکمیل شد [۶].

در سال ۱۸۸۹، در ساخت سقف به جای چوب و سنگ از بتن استفاده شد. ساختمان «متدیست» در سال ۱۸۹۴ ساخته شد، جزو اولین ساختمان‌هایی بود که در سقف آن از تیرهای فولادی مدفون شده در بتن استفاده شد. در هشتم آگوست ۱۹۸۸، ساخت بانک چین در هنگ کنگ به پایان رسید. این بانک، یکی از تماشایی‌ترین سازه‌های ترکیبی از فولاد و بتن و بیانگر پیشرفت و توسعه در زمینه ساخت سازه‌های مرکب بود. حدود دو قرن بعد از آن، فولاد بسیار گران و استفاده از آن غیر اقتصادی محسوب می‌شد. رواج صنعت سیمان در آمریکا، زمانی آغاز شد که یک معدن سیمان طبیعی، در سال ۱۸۱۸، در نزدیکی شهر «سالیوان» در ایالت «نیویوریک» کشف شد. در سال ۱۸۱۹ «کنترس وایت»، مهندس کانال ساز، این آهک آبی را به نام خود به ثبت رساند و برای دیوارهای سنگی و آبراهه‌های کانال «آری» از آن استفاده کرد.

۴- مشخصات و نامگذاری نمونه‌های عددی

دو پارامتر شامل ضخامت لوله فولادی ستون و ضخامت بال و جان تیر عمیق در قالب ۷ مدل عددی، مدلسازی و آنالیز شده و با مدل صحت‌سنجی شده (REF) مقایسه گردیده است. همه ۷ مدل مطابق جدول ۱ لیست شده است.

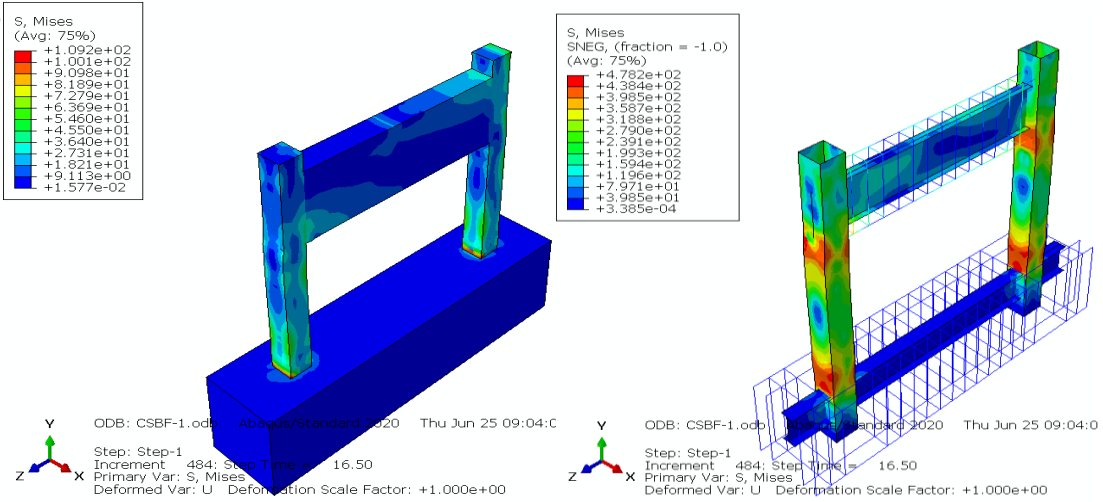
جدول ۱- مدل‌های تحلیلی برای مطالعه پارامتری

| ردیف | نام مدل | ضخامت لوله فولادی ستون mm | ضخامت بال و جان پروفیل تیر عمیق mm | مقاومت فشاری بتن MPa | سطح مقطع میلگردهای تقویتی | | |
|------|---------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------|-------------|
| | | | | | طول بالایی mm | طول پایینی mm | خاموت mm |
| ۱ | REF | 5.7 | 5.8 | 41.7 | 153.9 | 201.1 | 28.3 |
| ۲ | T1 | 6.3 | 5.8 | 41.7 | 153.9 | 201.1 | 28.3 |
| ۳ | T2 | 6.8 | 5.8 | 41.7 | 153.9 | 201.1 | 28.3 |
| ۴ | T3 | 7.4 | 5.8 | 41.7 | 153.9 | 201.1 | 28.3 |
| ۵ | I1 | 5.7 | 6.3 | 41.7 | 153.9 | 201.1 | 28.3 |
| ۶ | I2 | 5.7 | 6.8 | 41.7 | 153.9 | 201.1 | 28.3 |
| ۷ | I3 | 5.7 | 7.4 | 41.7 | 153.9 | 201.1 | 28.3 |

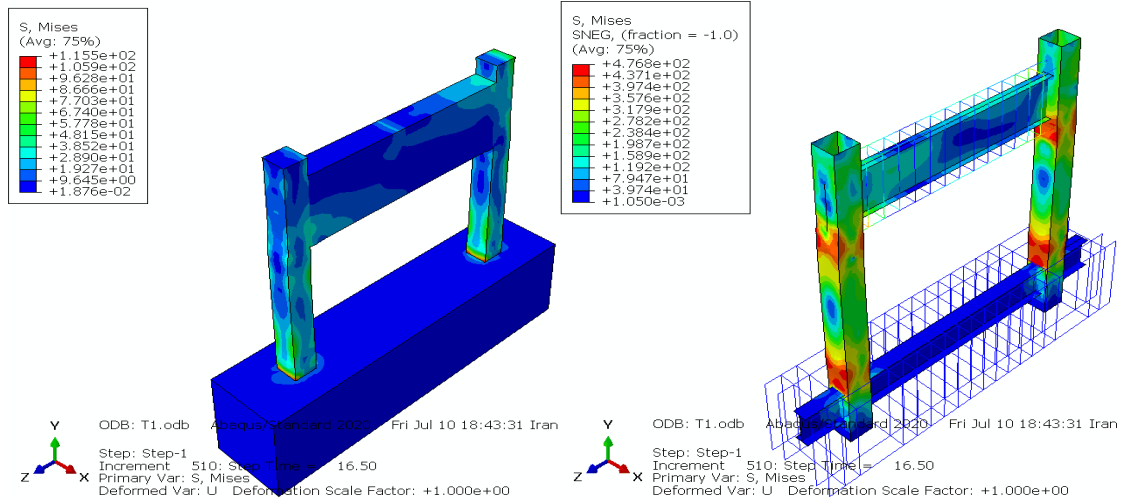
۵- مطالعه رفتار تیر عمیق با ناکید بر اثر ضخامت لوله فولادی ستون

تأثیر مقاومت فشاری بتن پرکننده ستون لوله فولادی بر رفتار چرخه‌ای تیر عمیق، سه مدل T1، T2 و T3 جدول ۱ مدلسازی و تحلیل شده است. به منظور مقایسه با مدل REF، نتایج هر چهار مدل به صورت کانتورهای رنگی و منحنی‌های هیستریزس در شکل‌های ۱ تا ۹ نشان داده شده و نتایج آن‌ها در جدول ۲ لیست شده است.

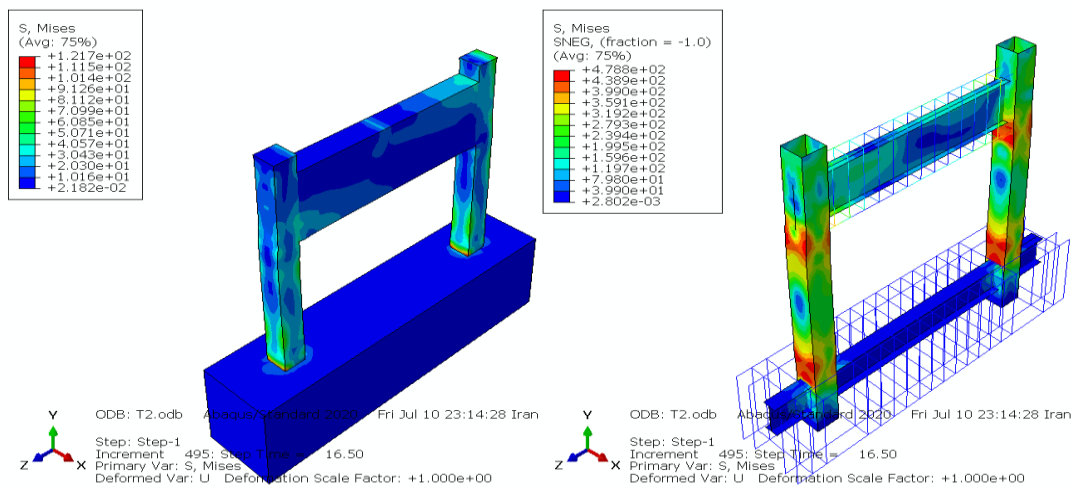
Archive



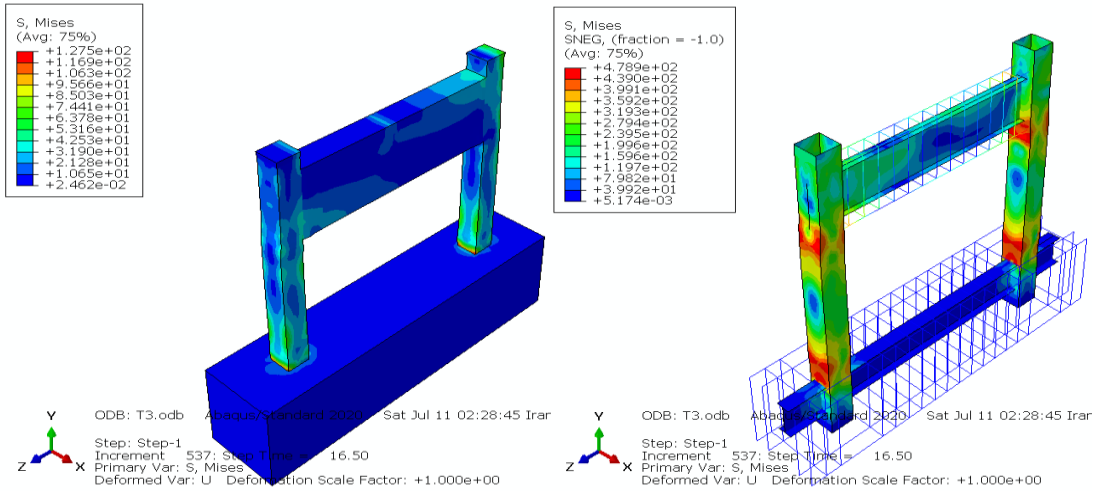
شکل ۱- کانتور تنش فون میزس مصالح بتنی و فولادی مدل REF



شکل ۲- کانتور تنش فون میزس مصالح بتنی و فولادی مدل T1

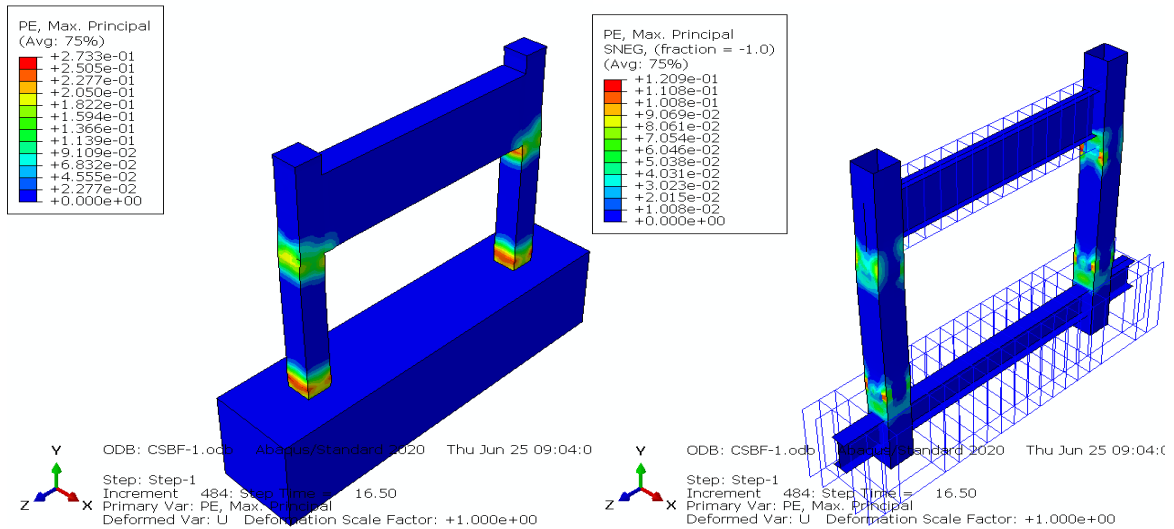


شکل ۳- کانتور تنش فون میزس مصالح بتنی و فولادی مدل T2

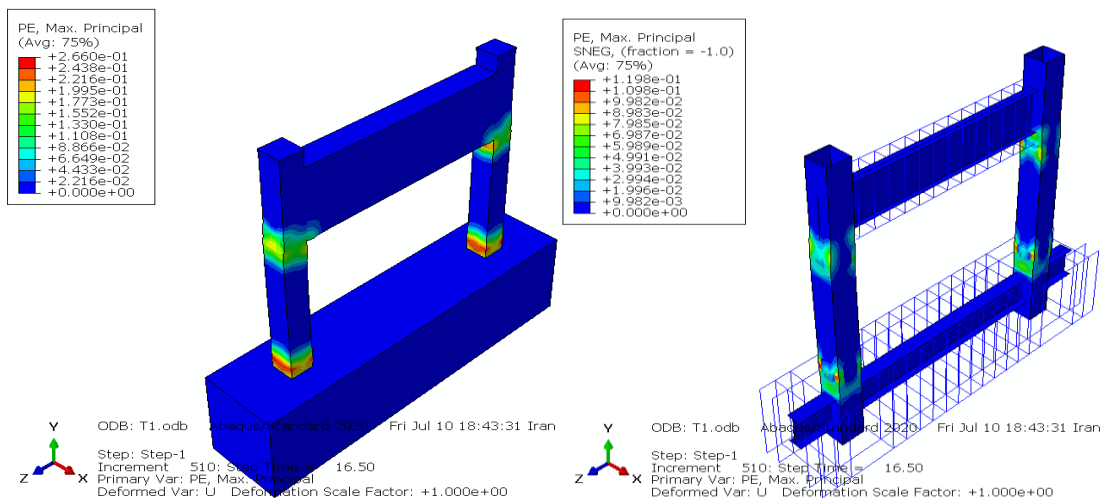


شکل ۴- کانتور تنش فون میزس مصالح بتنی و فولادی مدل T3

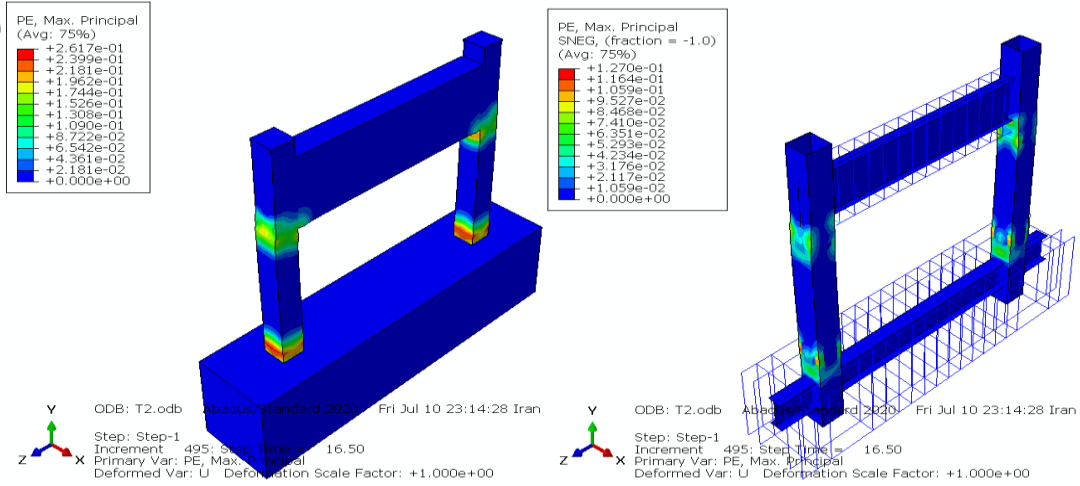
با توجه به شکل های ۱ تا ۴، افزایش ضخامت لوله های فولادی باعث افزایش مقدار تنش فون میزس ماکزیمم مصالح بتنی می شود به طوریکه تنش ماکزیمم بتن مدل REF، T1، T2 و T3 به ترتیب برابر ۱۰۹، ۱۱۶، ۱۲۲ و ۱۲۷ مگاپاسکال می باشد. از طرفی مقدار تنش ماکزیمم فون میزس مصالح فولادی تغییر چندانی نکرده است.



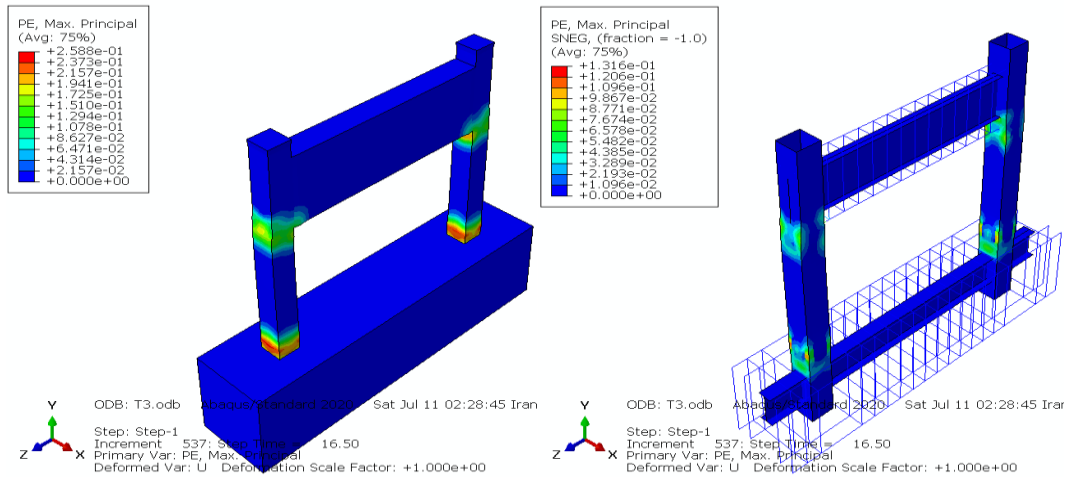
شکل ۵- کانتور کرنش پلاستیک مصالح بتنی و فولادی مدل REF



شکل ۶- کانتور کرنش پلاستیک مصالح بتنی و فولادی مدل T1

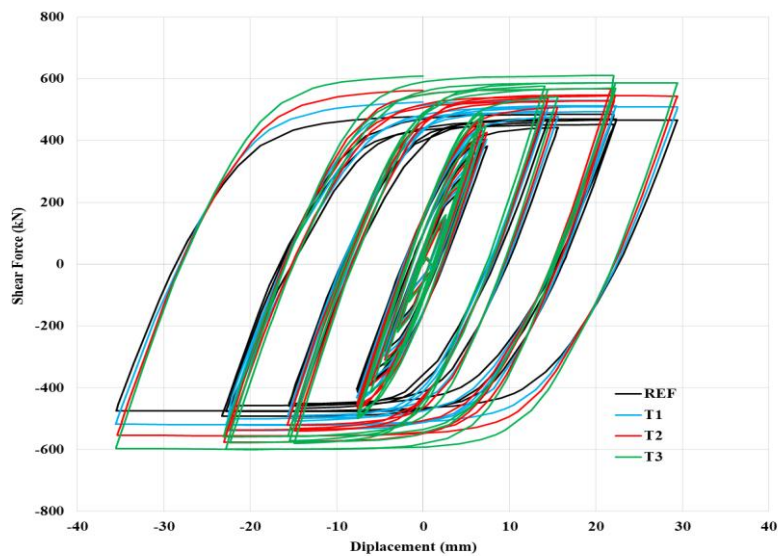


شکل ۷- کانتور کرنش پلاستیک مصالح بتنی و فولادی مدل T2



شکل ۸- کانتور کرنش پلاستیک مصالح بتنی و فولادی مدل T3

با توجه به شکل‌های ۵ تا ۸، افزایش ضخامت لوله‌های فولادی باعث کاهش مقدار کرنش پلاستیک ماکزیمم مصالح بتنی می‌شود به طوری که کرنش ماکزیمم بتن مدل‌های REF، T1، T2، T3 به ترتیب برابر ۰/۲۷۳، ۰/۲۶۶، ۰/۲۶۲ و ۰/۲۵۹ می‌باشد. از طرفی مقدار کرنش پلاستیک ماکزیمم مصالح فولادی تغییر چندانی نکرده است.



شکل ۹- منحنی هیستریزس مدل‌های REF، T1، T2 و T3

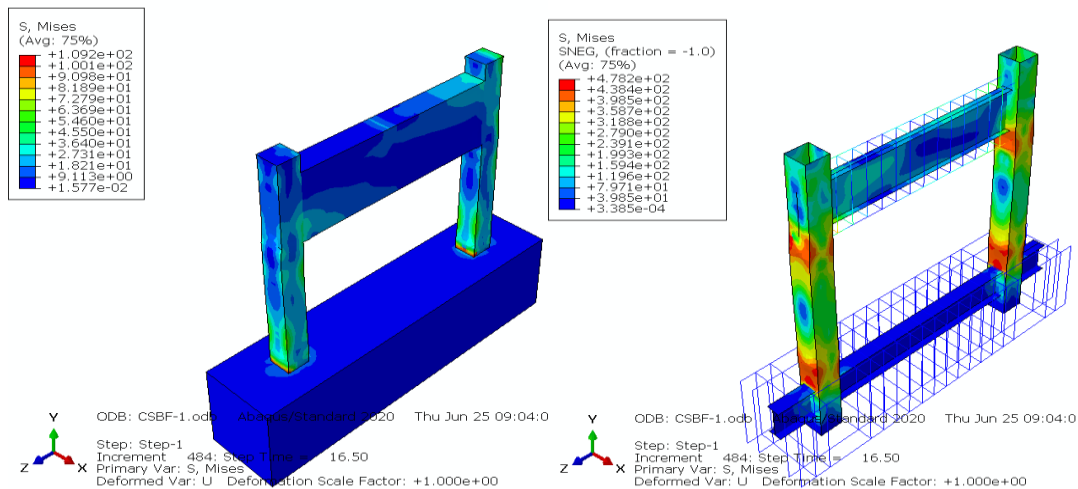
جدول ۲- مقایسه نتایج مدل‌های T3 و T2، T1، REF

| ردیف | نام مدل | بار نهایی ماکزیمم (کیلو نیوتن) | درصد تغییر بار نسبت به مدل REF | انرژی مصرفی (کیلو نیوتن متر) | درصد تغییر انرژی نسبت به مدل REF |
|------|---------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| ۱ | REF | 492.8 | - | 239.8 | - |
| ۲ | T1 | 538.1 | 9.2 | 259.4 | 8.2 |
| ۳ | T2 | 575.8 | 16.9 | 276.1 | 15.1 |
| ۴ | T3 | 610.3 | 23.8 | 293.3 | 22.3 |

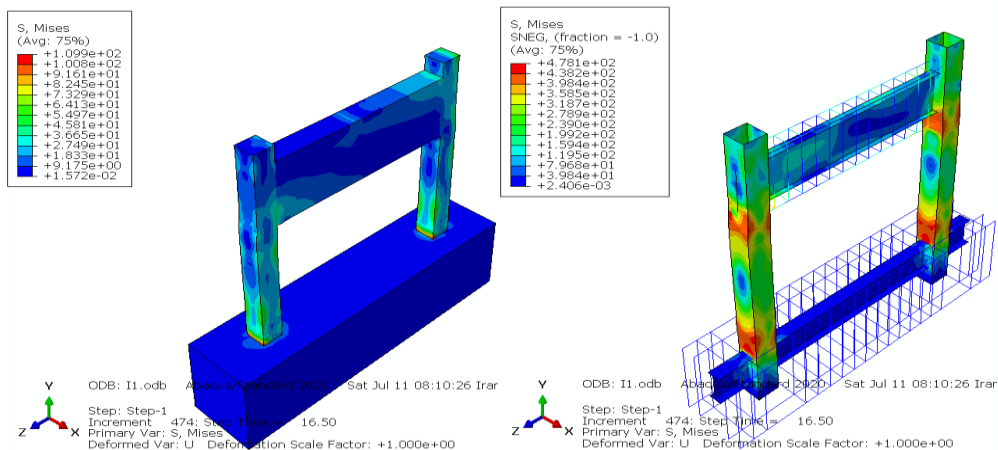
از شکل ۹ و جدول ۲ می‌توان فهمید که افزایش ضخامت لوله فولادی ستون‌ها در تیرهای عمیق مرکب تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای باعث افزایش مقدار سختی اولیه، بار نهایی و انرژی مصرفی مدل‌ها می‌شود به طوری که در مدل‌های T1، REF، T2 و T3 مقدار انرژی مصرفی به ترتیب برابر ۲۳۹/۸، ۲۵۹/۴، ۲۷۶/۱ و ۲۹۳/۳ کیلو نیوتن متر می‌باشد.

۶- مطالعه رفتار تیر عمیق با تاکید بر اثر ضخامت بال و جان پروفیل فولادی آن

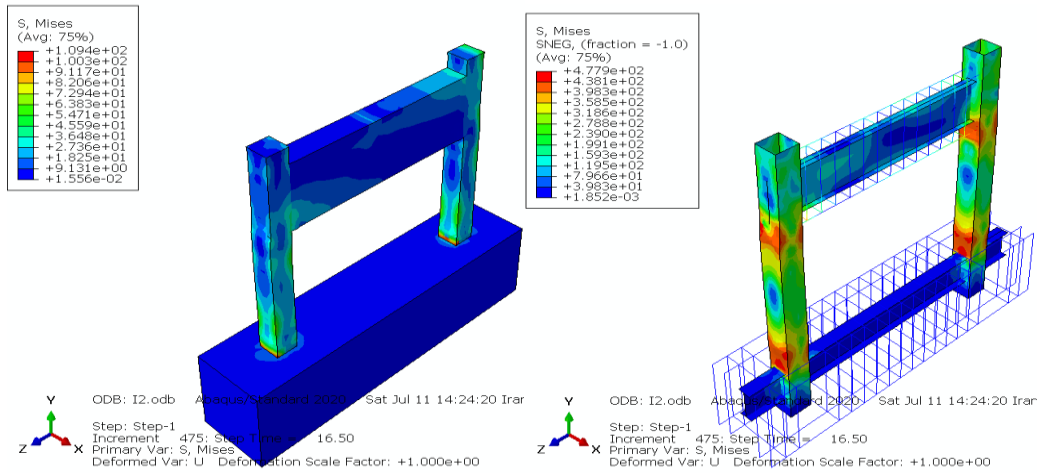
تأثیر ضخامت بال و جان پروفیل فولادی بر رفتار چرخه‌ای تیر عمیق، سه مدل I1، I2 و I3 جدول ۱ مدل‌سازی و تحلیل شده است. به منظور مقایسه با مدل REF، نتایج هر چهار مدل به صورت کانتورهای رنگی و منحنی‌های هیستریزس در شکل‌های ۱۰ تا ۱۸ نشان داده شده و نتایج آن‌ها در جدول ۳ لیست شده است.



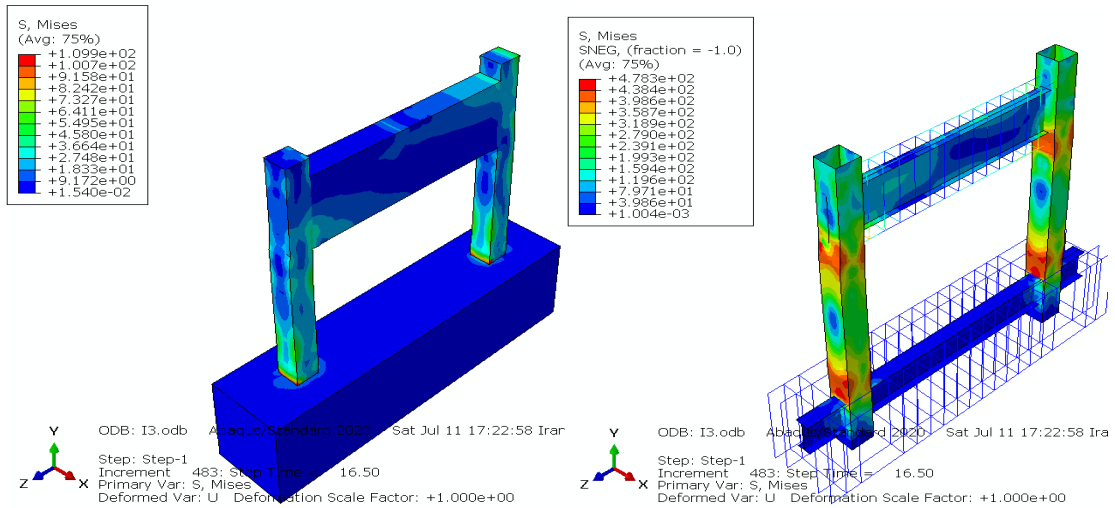
شکل ۱۰- کانتور تنش فون میزس مصالح بتنی و فولادی مدل REF



شکل ۱۱- کانتور تنش فون میزس مصالح بتنی و فولادی مدل I1

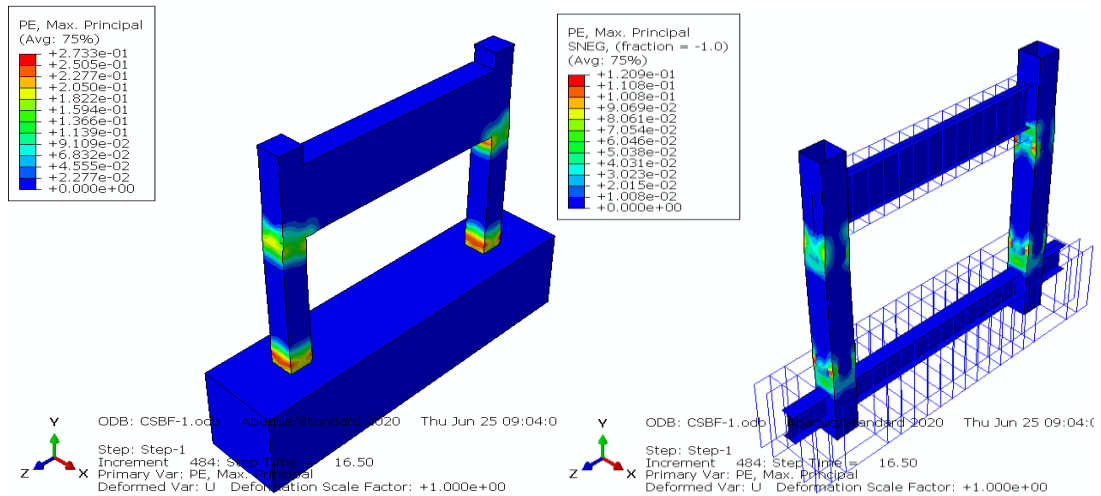


شکل ۱۲- کانتور تنش فون میزس مصالح بتنی و فولادی مدل I2



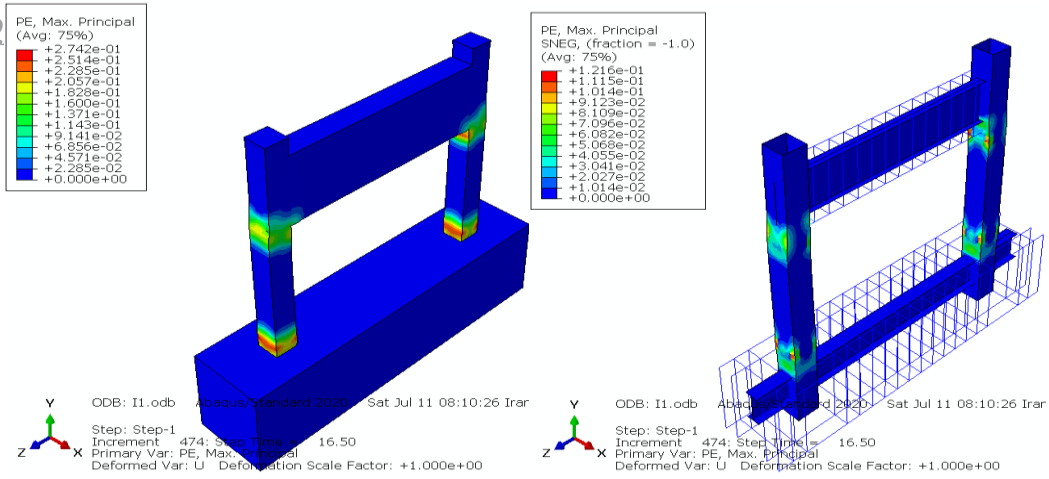
شکل ۱۳- کانتور تنش فون میزس مصالح بتنی و فولادی مدل I3

با توجه به شکل های ۱۰ تا ۱۳، افزایش ضخامت جان و بال تیر عمیق باعث افزایش کم مقدار تنش فون میزس ماکزیمم مصالح فولادی می شود. از طرفی مقدار تنش ماکزیمم فون میزس مصالح بتنی تغییر چندانی نکرده است.

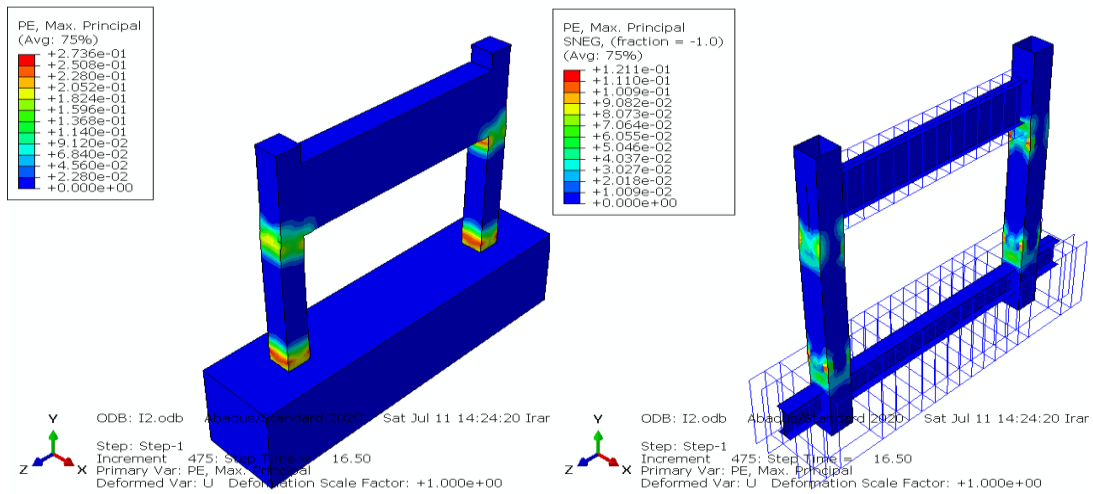


شکل ۱۴- کانتور کرنش پلاستیک مصالح بتنی و فولادی مدل REF

Archive ۰

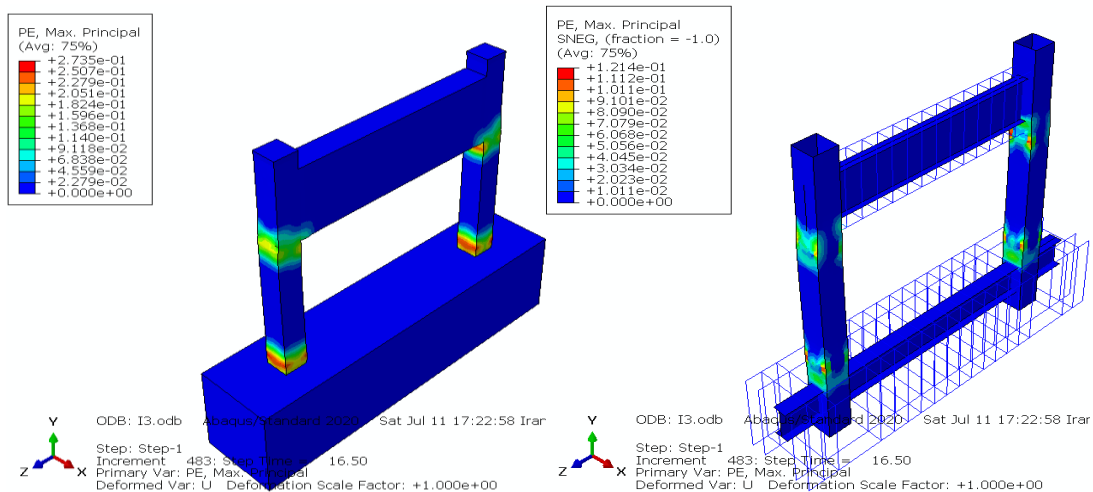


شکل ۱۵- کانتور کرنش پلاستیک مصالح بتنی و فولادی مدل II

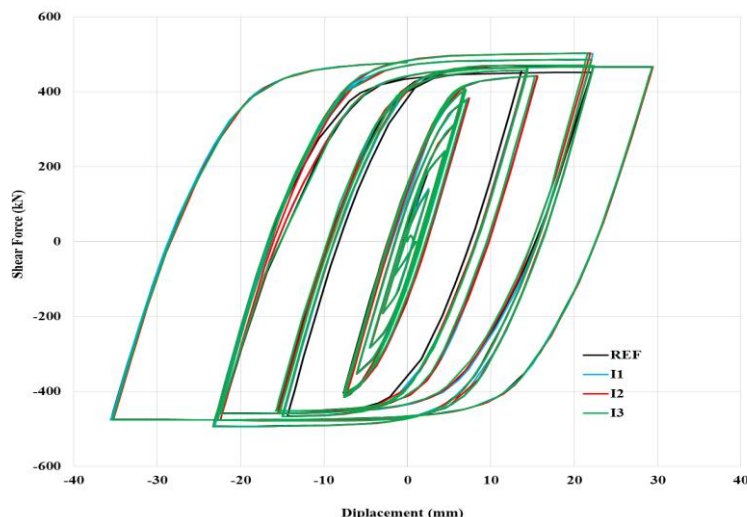


شکل ۱۶- کانتور کرنش پلاستیک مصالح بتنی و فولادی مدل I2

با توجه به شکل های ۱۴ تا ۱۷، افزایش ضخامت جان و بال تیر عمیق باعث تغییر قابل توجهی در مقدار کرنش پلاستیک ماکزیمم مصالح بتنی و فولادی نمی شود.



شکل ۱۷- کانتور کرنش پلاستیک مصالح بتنی و فولادی مدل I3



شکل ۱۸- منحنی هیستریزس مدل‌های REF، I1، I2 و I3

جدول ۳- مقایسه نتایج مدل‌های REF، I1، I2 و I3

| ردیف | نام مدل | بار نهایی ماکزیمم (کیلو نیوتن) | درصد تغییر بار نسبت به مدل REF | انرژی مصرفی (کیلو نیوتن متر) | درصد تغییر انرژی نسبت به مدل REF |
|------|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| ۱ | REF | 492.8 | - | 239.8 | - |
| ۲ | I1 | 502.0 | 1.9 | 242.5 | 1.1 |
| ۳ | I2 | 502.5 | 2.0 | 242.5 | 1.1 |
| ۴ | I3 | 502.6 | 2.0 | 242.6 | 1.2 |

از شکل ۱۸ و جدول ۳ می‌توان فهمید که افزایش ضخامت بال و جان پروفیل تیر عمیق مرکب تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای باعث افزایش خیلی نامحسوس مقدار سختی اولیه، بار نهایی و انرژی مصرفی مدل‌ها می‌شود به طوری که در مدل‌های REF، I1، I2 و I3 مقدار انرژی مصرفی به ترتیب برابر ۲۳۹/۸، ۲۴۲/۵، ۲۴۲/۵ و ۲۴۲/۶ کیلو نیوتن متر می‌باشد.

۷- نتایج

۱- تاثیر ضخامت لوله فولادی ستون‌های تیر عمیق با افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی آن نسبت به مدل مرجع مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند، با افزایش ضخامت لوله فولادی ستون مقدار تنش ماکزیمم بتن افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش ۱/۷ میلی متری ضخامت مقدار تنش بتن ۱۹ مگاپاسکال افزایش می‌یابد ولی تنش مصالح فولادی تغییر چندانی نمی‌کند. از طرفی مقایسه منحنی هیستریزس مدل‌ها نشانگر این است که افزایش ضخامت لوله‌های فولادی ستون باعث افزایش سختی اولیه شده و با افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی آن مقدار بار نهایی در حدود ۹، ۱۷ و ۲۴ درصد و مقدار انرژی مصرفی در حدود ۸، ۱۵ و ۲۲ درصد افزایش می‌یابد.

۲- تاثیر ضخامت بال و جان پروفیل فولادی قرار گرفته در تیر عمیق در قالب ۳ مدل عددی با تغییر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی ضخامت مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج با مدل مرجع بیانگر این مطلب بود که تنش‌های فون میزس مصالح فولادی و بتنی و محل شکل‌گیری مقدار ماکزیمم آن‌ها و همچنین کرنش‌های پلاستیک ماکزیمم مدل تغییر قابل توجهی ندارد. همچنین با مقایسه منحنی هیستریزس مدل مشخص گردید که تغییر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی ضخامت بال و جان پروفیل فولادی تاثیری ۲ درصدی بر بار نهایی و ۲ درصدی بر مقدار انرژی مصرفی دارد.

۱. اللهیاری، حامد؛ حسینعلی بیگی، مرتضی؛ دهستانی، مهدی و رحمانی، ابراهیم، (۱۳۹۱)، رفتار عرشه ارتوتروپیک پل همراه با برشگیرهای پرفوبوند و دال بتن سبک مسلح حاوی دانه‌های لیکا تحت بار متمرکز عرضی در شرایط خمش مثبت و منفی، اولین کنفرانس ملی صنعت بتن، کرمان، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی.
۲. بهفرنیا، کیاجهر و هاشمی نژاد، علیرضا، (۱۳۸۷)، ارزیابی کاربرد ورق‌های FRP در تقویت تیرهای مرکب، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تهران.
۳. داودی، پیام؛ (۱۳۸۰)، آنالیز و طراحی سازه‌های مرکب، تهران، انتشارات جهان نو
4. ABAQUS. (2005). "ABAQUS standard user's manual version 6.5." Hibbit, Karsson and Sorensen Inc.
5. Banfi M. (2008), Composite beams with web openings subject to axial load. EUROSTEEL; Graz, Austria.
6. Bode, H., (1976). "Columns of Steel Tubular Sections Filled with Concrete Design and Application." Journal of Acier, Stahl, Steel, 11-12, pp. 388-393.
7. Boyd, P. F., Cofer, W. F., and McLean, D. I., (1995). "Seismic Performance of Steel- Encased Concrete Columns under Flexural Loading." Structural Journal, ACI, 92, (3), pp.
8. Chen S. (2005). Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with external tendons for negative moments. J Constr Steel Res; 61(12):1613-30.