

توزیع تنش پسماند در ریل فولادی U33 پس از پروسه صافکاری

صافکاری آخرین مرحله تولید ریل است و تاثیر زیادی در خواص مکانیکی، صافی، همراستایی، تنش های پسماند و ... دارد. با افزایش بار محوری و سرعت ناوگان ریلی، مدیران سیستم های ریلی خواستار کاهش میزان تنش های پسماند در ریل ها شده اند. مقاله حاضر ارائه کننده تلاشی است که در راستای تعیین مقدار و چگونگی توزیع تنش های پسماند پس از مرحله صافکاری انجام شده است. نتیجه حاصله دربردارنده دلایل اختلاف بین جواب های حل عددی و تست های تجربی بوده و نشان دهنده توزیع غیر یکنواخت تنش های پسماند در طول ریل می باشد، همچنین مدل استفاده شده از نظر توزیع تنش های پسماند مطابقت خوبی با تست های تجربی دارد.

محمد علی معظم^۱

کارشناس

اعظم قاسمی^۲

استادیار

مهران مرادی^۳

استادیار

حسین مناجاتی زاده^۴

استادیار

واژه های راهنما: تنش های پسماند، ریل، صافکاری، خمیدگی

۱- مقدمه

مرحله نهایی تولید ریل شامل نورد گرم، خنک کاری و صافکاری است. در قسمت پایانی مرحله نورد گرم و زمانی که ریل از آخرین قفسه نورد خارج می شود دمایی در حدود $850^{\circ}C$ دارد. ریل ها به منظور کاهش دما در بستر خنک کاری قرار داده می شوند. با توجه به شکل هندسی ریل و توزیع مواد در سطح مقطع آن، انتقال حرارت از قسمت های مختلف آن یکسان نمی باشد. علت این امر نیز با توجه به شکل (۱) مشخص است. مقدار مواد موجود در قسمت کلاهدک ریل زیاد تر از دیگر قسمت های ریل است. همچنین قسمت پاشنه ریل دارای عرض بیشتری در مقایسه با قسمت های دیگر است. به طور کلی می توان اینگونه بیان نمود که ریل تنها یک محور تقارن دارد، لذا دمای قسمت هایی که دارای ضخامت کمتری هستند سریع تر کاهش پیدا می کند. این امر باعث بوجود آمدن تغییر شکل و ایجاد خم در ریل می گردد [۱]. با توجه به استانداردی که در حال حاضر در اروپا و بیشتر کشور ها مورد پذیرش است [۲]، ماکزیمم مقدار انحنای قابل قبول در طول ۱۵۰۰ میلیمتر حداکثر برابر ۰/۷ میلیمتر است. لذا ریل وارد پروسه صافکاری می گردد تا

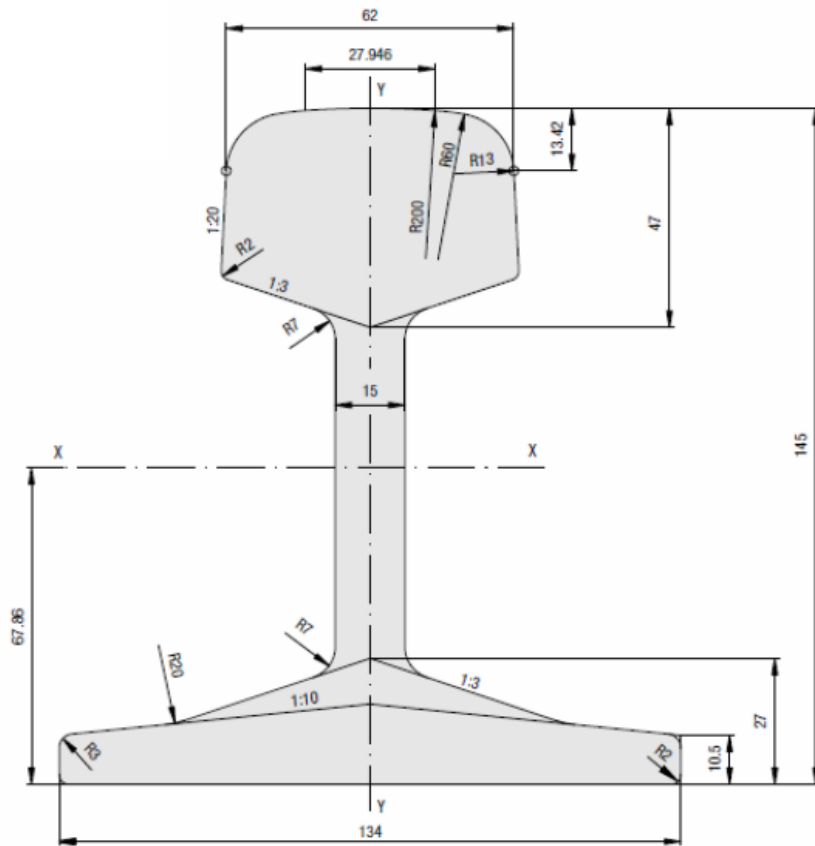
^۱ نویسنده مسئول، مهندسی نت ذوب آهن اصفهان، دانشجوی کارشناسی ارشد رشته ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد
Moazam-mo@esfahansteel.com

^۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد A_ghassemi@pmc.iaun.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان Moradi@cc.iut.ac.ir

^۴ استادیار، دانشکده مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد H_monajati@iaun.ac.ir

خواسته های استاندارد را برآورده سازد و قابل استفاده در سیستم حمل و نقل ریلی گردد. چگونگی خم ایجاد شده در شکل (۲) نشان داده شده است.



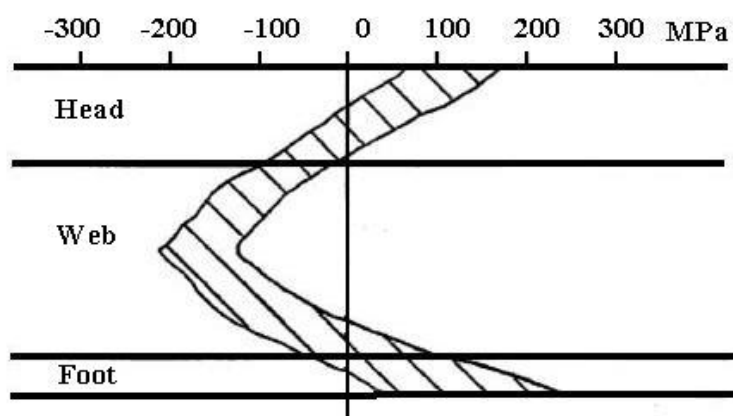
شکل ۱ - مقطع ریل U33



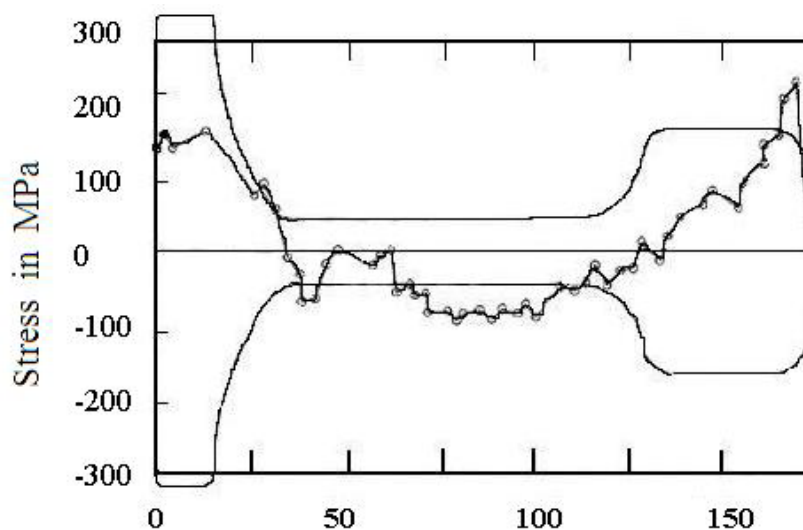
شکل ۲ - شماتیک انحنای ایجاد شده در ریل پس از مرحله خنک کاری

تنش های پسماند می توانند بسته به مقدار و نوع (کششی یا فشاری) سازه را تقویت و یا ضعیف نماید. در مورد ریل نیز وجود تنش های پسماند کششی می تواند باعث ایجاد و گسترش ترک گردند. همچنین در زمان بهره برداری تنش های متعددی از طرف چرخ ناوگان ریلی به ریل منتقل می گردد و تنش های پسماند در صورتی که هم علامت با تنش های اعمال شده باشند، ماده مورد استفاده در ریل را به سمت رسیدن به نقطه تسلیم سوق می دهند که این امر با توجه به سایش بین چرخ و ریل به سرعت باعث ایجاد خرابی های متعدد می گردد. لذا چگونگی توزیع تنش های پسماند در مقطع و طول ریل از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

در راستای تعیین و اندازه گیری تنش پسماند در ریل فولادی تلاش های متعددی به صورت تجربی و حل عددی صورت گرفته است. بیشتر اندازه گیری های تجربی نشان دهنده توزیع تنش پسماند به صورت C شکل در مقطع ریل می باشند [۳]، به صورتی که در قسمت کلاهدک و پاشنه ریل تنش های پسماند کششی و در قسمت جان ریل تنش های پسماند فشاری وجود دارد. شکل (۳) نشان دهنده توزیع تنش پسماند اندازه گیری شده با استفاده از ابزار کرنش سنج است. همچنین در تلاش دیگری که توسط Webster و همکارانش [۴] با استفاده از ابزار تفرق نوترون صورت گرفت، تنش های پسماند در زیر سطح قسمت کلاهدک ریل به صورت کششی نشان داده شد که این مورد در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳- اندازه گیری تنش پسماند با استفاده از کرنش سنج [۳]

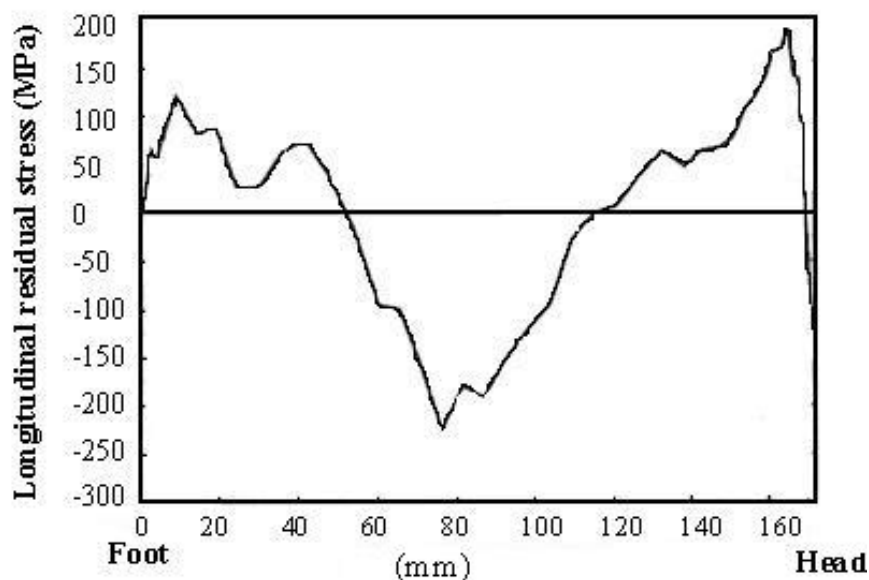


شکل ۴- اندازه گیری تنش پسماند با استفاده از ابزار تفرق نوترون [۴]

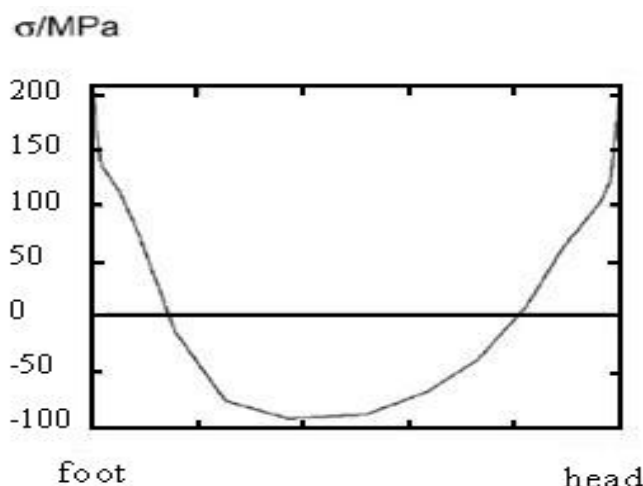
البته محققان دیگری نیز به صورت تجربی اقدام به اندازه گیری تنشهای پسماند نموده اند که جواب های متفاوتی در مقایسه با مراجع [۳] و [۴] به دست آورده اند. به طور مثال تحقیق انجام شده توسط Johnson [۵] و همچنین Deroche و همکارانش [۶] نشان دهنده تنش پسماند فشاری در قسمت کلاهدک ریل است.

به نظر آن ها تماس بین غلطک ها و کلاهک ریل عامل بوجود آمدن تنش های پسماند فشاری در این قسمت می باشد. در کنار تلاش هایی که به صورت تجربی صورت گرفته است، محققین زیادی نیز به صورت حل عددی اقدام به حل مسئله نموده اند. در زمینه حل عددی نیز نتایج مختلفی حاصل شده است. در تلاشی که توسط Finesterman و همکارانش [۷] صورت گرفت، تنش های پسماند در قسمت فوقانی ریل (سطح کلاهک) فشاری و در قسمت پاشنه ریل کششی نشان داده شد. نتیجه کار آن ها در شکل (۵) نشان داده شده است. G. Schleinzer و F.D. Fischer [۸] با مدنظر قرار دادن رفتار الاستوپلاستیک ماده و استفاده از sub model در شبیه سازی خود موفق شدند توزیع تنش پسماند به صورت C شکل را به دست آورند که در شکل (۶) قابل مشاهده است. همچنین SL Srimani و همکارانش [۹] نیمی از سطح مقطع و طول ریل را مورد شبیه سازی قرار دادند و با در نظر گرفتن سخت شوندهگی سینماتیک، توزیع زیک زاگ شکلی را نمایش دادند که تنش پسماند در قسمت کلاهک و پاشنه آن به صورت فشاری است.

در این مقاله سعی شده است دلایل اختلاف بین جواب های حاصل از تست های تجربی و حل عددی ریشه یابی گردد و بر اساس نتایج حاصله مدلی برای حل عددی بیان شود. براین اساس خم بوجود آمده در ریل ها اندازه گیری شد، خواص مکانیکی ماده با توجه به انجام تست کشش تعیین گردید و شرایط مرزی مانند موقعیت قرار گیری غلطک های صافکاری و ... مدنظر قرار داده شد. دلایل اختلاف جواب های حاصل از تلاش پژوهشگران دیگر بررسی شد و سعی شد شرایطی ایجاد شود که اختلاف های مطرح شده را به دنبال نداشته باشد. مدل ارائه شده بیان کننده مطابقت خوبی بین جواب های حاصله و تست های عملی است و می تواند به عنوان مرجعی برای کارهای مشابه مدنظر قرار گیرد.



شکل ۵- نتیجه حاصل از تلاش Finesterman و همکارانش در تعیین توزیع تنش پسماند [۷]



شکل ۶- نتیجه حاصل از تلاش F.D. Fischer و G. Schleinzer در تعیین توزیع تنش پسماند [۸]

۲- بررسی دلایل اختلاف بین جواب های حاصل از نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی

هنگامی که جسمی تحت نیرو های خارجی قرار گیرد، تنش و کرنش در آن پدیدار می گردد. زمانی که کرنش سنج در سطحی نصب گردد، نیرو های اعمال شده به سطح باعث تغییر ابعاد سطح می شود و این تغییر به کرنش سنج منتقل شده و باعث تغییر در مقاومت آن می گردد. بنابر این کرنش حاصله به صورت تغییر در مقاومت کرنش سنج قابل اندازه گیری می باشد. البته دقت کار انجام شده به عوامل متعددی وابسته است. نکته ای که باید به آن توجه شود این است که کرنش های حاصله، متوسط کرنش های اندازه گیری شده در سطحی است که کرنش سنج اندازه گیری می نماید. از طرف دیگر مبنای استفاده از کرنش سنج بر اساس آزاد شدن تنش و در نتیجه ایجاد کرنش در قطعه استوار است. آزمایشات مختلف نشان می دهد که کرنش های اندازه گیری شده در موضع آزاد شدن تنش، حد اکثر بوده و با فاصله گرفتن از آن مقدار آن کاهش پیدا می کند [۱۰]. بنابر این موقعیت ایجاد برش، سوراخ و ... که برای آزاد سازی تنش مورد استفاده قرار می گیرند بسیار حائز اهمیت است. در شبیه سازی های انجام شده به علت زمان بسیار زیاد مورد نیاز برای انجام محاسبات، معمولاً ساده سازی هایی انجام می گیرد. ساده سازی های انجام شده دارای اثرات مهمی هستند به عنوان مثال Bruning [۱۱] در شبیه سازی خود از المان Beam استفاده نمود و اینگونه بیان نمود که فشار تماس بین غلطک ها و ریل دارای اثر کمی بر تنش های پسماند است. این در حالی است که Naumann [۱۲] در شبیه سازی خود از یک مدل سه بعدی استفاده نمود و بیان نمود که تماس بین غلطک ها و ریل دلیل اصلی توزیع تنش پسماند در ریل است. اندازه گیری تنش ها در نرم افزار هایی که برای حل عددی مورد استفاده قرار می گیرند در گره ها و یا المان های مشخص صورت می گیرد، این در حالی است که در روش های آزاد سازی تنش متوسط مقدار کرنش را در محدوده نصب ابزار اندازه گیری ثبت می کنند، سپس با توجه به روابطی که در آن ها فرض هایی مانند همگن و ایزوتروپیک بودن در خواص ماده، داشتن رفتار الاستیک خطی در روابط تنش-کرنش و... لحاظ شده، تنش را محاسبه می کنند که این مورد می تواند یکی از منشاء های وجود اختلاف بین دو روش مذکور باشد.

یکی دیگر از مواردی که باید به آن اشاره نمود، این است که نتایج دو روش تجربی و حل عددی در شرایط گوناگونی با یکدیگر مقایسه شده اند. در اصل باید نتایج شبیه سازی و تجربی در شرایط یکسان با

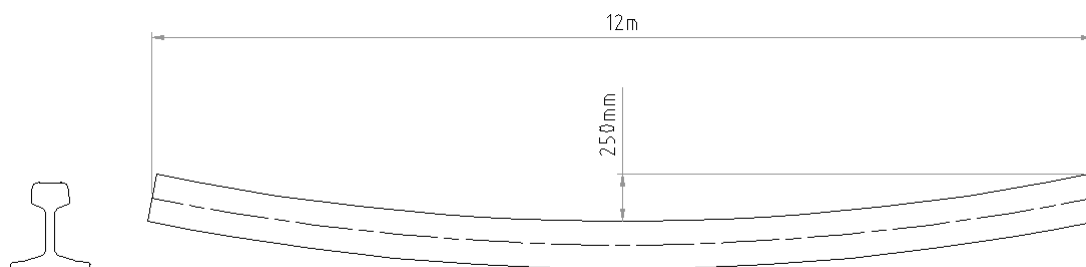
یکدیگر مقایسه شوند. به طور مثال شبیه سازی انجام شده توسط نویسندگان مرجع [۸] با استفاده از سیستم صافکاری متشکل از ۹ غلطک با فاصله ۱/۴ متر و قطر غلطک ۰/۸ متر انجام شده است و نویسندگان مرجع [۹] از سیستمی متشکل از ۶ غلطک با فاصله ۱/۲ متر استفاده نموده اند. با توجه به موارد ذکر شده می توان دلایل اختلاف بین جواب های حاصل از تلاش پژوهشگران مختلف را به صورت زیر بیان نمود:

- انجام ساده سازی در روند حل عددی به علت نیاز به زمان بسیار طولانی برای حل کامل مسئله.
- یکسان نبودن شرایط در برنامه های مختلف حل عددی.
- به دست آوردن مقدار متوسط جواب ها در روش های تجربی.
- مقایسه نتایج تجربی و حل عددی در شرایط غیر یکسان.

متأسفانه در اکثر مقاله های منتشر شده به جزئیات کلیدی اشاره نشده است. این جزئیات عبارتند از خم اولیه، فاصله بین غلطک ها در حالت عمودی که یکی از مهمترین پارامترها می باشد، ضریب اصطکاک بین غلطک و ریل و شایان ذکر است که در برخی از مقاله ها به یک یا چند مورد از جزئیات مطرح شده اشاره شده است. براین اساس در ادامه حل عددی پروسه صافکاری با توجه به جزئیات مورد نیاز شرح داده می شود.

۳- پارامترهای ریل مورد استفاده در حل عددی

انحنای بوجود آمده پس از پروسه خنک کاری ریل U33 در یک کارخانه تولید ریل اندازه گیری شد، شکل (۷). با توجه به اطلاعات مورد نیاز برای انجام حل عددی پروسه، نمونه ای مطابق با استاندارد تولید ریل [۲] برای انجام آزمون کشش تهیه شد که نتایج حاصل از آن در جدول (۱) ارائه شده است. پس از اندازه گیری، ماکزیمم انحنای اندازه گیری شده برابر ۲۵۰ میلیمتر و در وسط ریل حاصل شد. شایان ذکر است که انحنا، کمانی از یک دایره می باشد و اعداد به دست آمده در دو طرف وسط ریل یکسان هستند (انحنا نسبت به نقطه وسط طول ریل متقارن است).



شکل ۷- ماکزیمم مقدار انحنای اندازه گیری شده در ریل U33

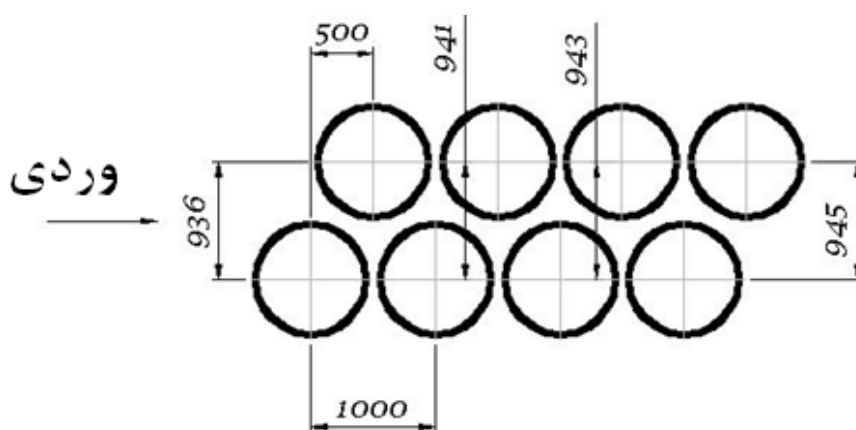
ماشین صافکاری موجود در کارگاه، دارای هشت غلطک می باشد که شماتیک آن در شکل (۸) نشان داده شده است. غلطک های پائینی ماشین مذکور ثابت بوده و غلطک های بالایی می توانند در راستای عمودی جابه جا شوند. مقدار جابجایی غلطک ها با توجه به نتایج شبیه سازی مرجع [۹] به صورت اندازه های نشان داده شده در شکل (۸) در نظر گرفته شده است. اطلاعات مورد نیاز دیگر در مورد ماشین صافکاری در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین مطابق با اطلاعات تجربی، سرعت صافکاری حدود ۱/۵ m/sec و سرعت ریل قبل از ورود به ماشین صافکاری حدود ۱ m/sec است.

جدول ۱- نتایج حاصل از تست کشش نمونه ریل U33

| σ_y (Pa) | UTS (Pa) | E (Pa) | % δl |
|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| 590×10^6 | 950×10^6 | 200×10^9 | ۱۴ |

جدول ۲- اطلاعات ماشین صافکاری

| تعداد غلطک های بالایی | تعداد غلطک های پائینی | فاصله افقی بین غلطک ها (mm) | قطر غلطک ها (mm) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------|
| ۴ | ۴ | ۱۰۰۰ | ۱۰۰۰ |

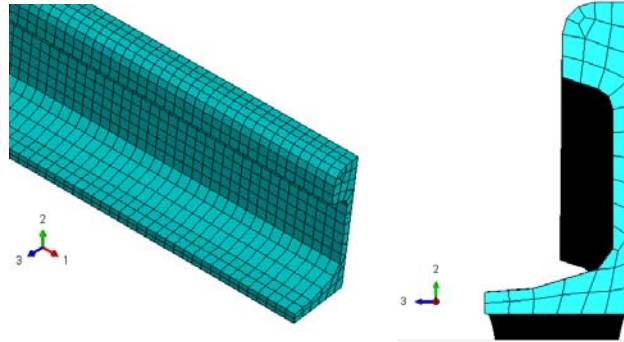


شکل ۸- شماتیک ماشین صافکاری و فاصله تنظیم غلطک ها در جهت عمودی

۴- مدل سه بعدی

برای انجام محاسبات عددی از نرم افزار Abaqus Explicit [۱۳] استفاده شده است. با توجه به اینکه هدف، تعیین چگونگی توزیع تنش های پسماند در ریل می باشد، غلطک ها از نوع صلب مدل شده اند. با توجه به اینکه مقطع ریل دارای یک خط تقارن است و همچنین انحنای بوجود آمده در طول ریل نیز نسبت به وسط طول آن متقارن است، تنها نیمی از سطح مقطع و طول ریل مدل شده است. خواص مکانیکی مطابق با اطلاعات جدول (۱) به ماده ریل نسبت داده شده است. همچنین با توجه به مطالعات انجام شده توسط [۸] و همچنین توضیحات داده شده در [۹] سخت شوندگی ماده به صورت سینماتیک در نظر گرفته شده است. فاصله عمودی و افقی غلطک های صافکاری نیز مطابق با شکل (۸) می باشد. تماس بین غلطک ها و ریل از نوع سطح به سطح و با ضریب اصطکاک ۰/۲ در نظر گرفته شده است. پروفیل ریل در صفحه Y-Z ترسیم شده است و بنابر این محور X در امتداد طول قطعه می باشد. نظر به اینکه تنش های پسماند طولی قطعه دارای اهمیت می باشد لذا هدف تعیین تنش پسماند طولی (σ_{xx}) است. در شبکه بندی ریل از المان C3D8R استفاده شده است و با توجه به سیستم کامپیوتر در دسترس، سعی شده است از شبکه بندی مناسب استفاده گردد تا تماس بین غلطک ها و ریل حفظ شده و نتایج دقیقی حاصل گردد. شکل (۹) نشان دهنده شبکه مورد استفاده در این شبیه سازی می باشد. طول شبکه مورد استفاده ۱cm می باشد و ریل با استفاده از ۲۱۳۵۰ المان C3D8R مدل شده است. در این مش بندی ۳۴۸۲۷ گره ایجاد شده است. شبکه

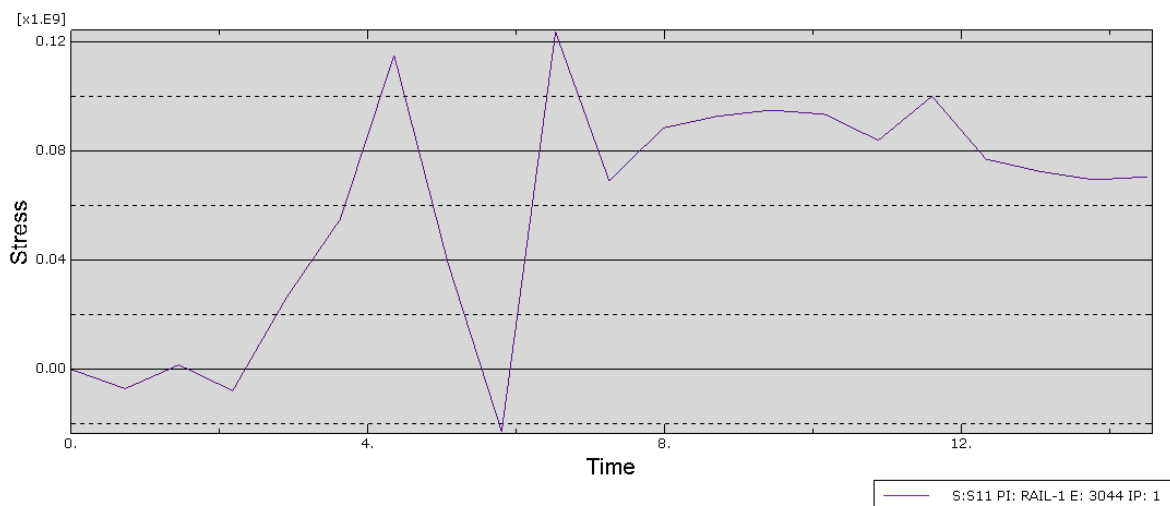
نشان داده شده در نمای سطح مقطع در طول ریل گسترش داده شده است. از حرکت ریل در جهت Z با اضافه نمودن قید جلوگیری شده است. سرعت ورودی ریل به ماشین صافکاری ۱ m/sec و سرعت چرخش غلطک ها نیز ۴ rad/sec در نظر گرفته شده است.



شکل ۹- مش مورد استفاده در مدل سه بعدی ریل

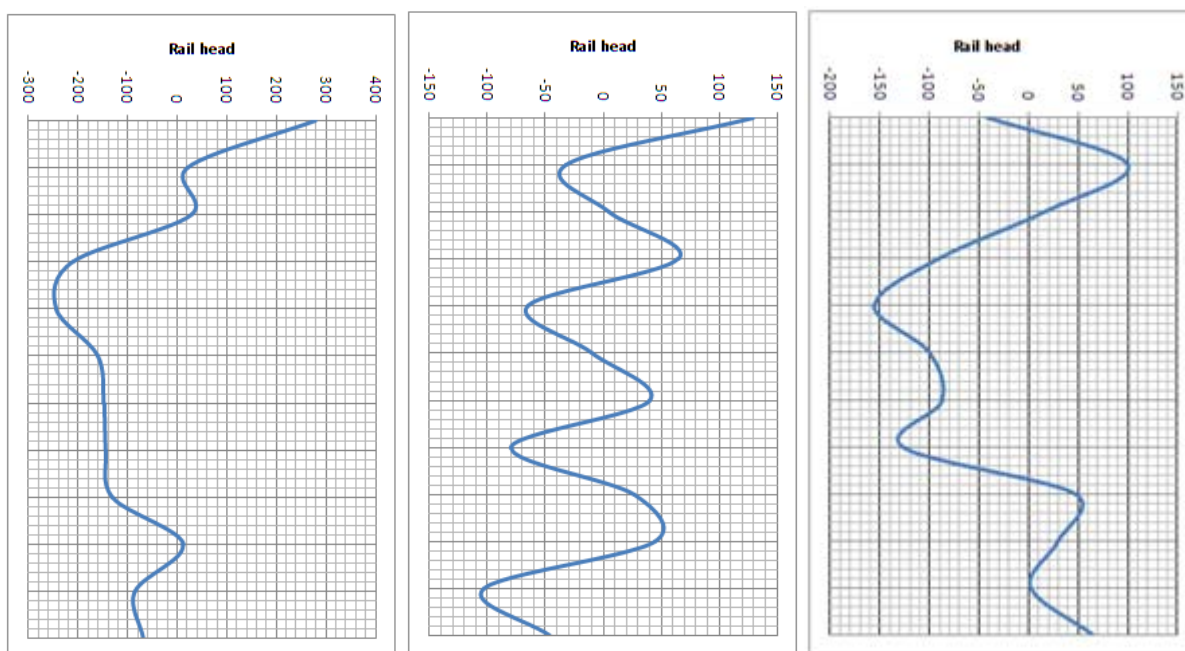
۵- چگونگی توزیع تنش های پسماند

پس از پایان فرآیند صافکاری، ریل تحت تنش های خارجی نمی باشد، لذا کانتور تنش در این مرحله نشان دهنده میزان تنش های پسماند است. برای اندازه گیری میزان تنش های پسماند می توان تاریخچه تنش المان های مورد نظر را بررسی نمود، شکل (۱۰). تنش های پسماند پس از مرحله صافکاری در المان های میانی سطح مقطع و در دوازده قسمت از طول، اندازه گیری شد. شکل (۱۱) نشان دهنده چگونگی توزیع تنش پسماند این المان ها به ترتیب در ابتدا، وسط و انتهای مدل ایجاد شده می باشد.



```
Type: C3D8R
Material: "RAIL MATERIAL"
Section: RAIL.Section-ASSEMBLY_RAIL-1_RAIL, Homogeneous Solid Section
Connect: 7672, 7667, 9948, 9947, 7673, 7668, 9623, 9622
S, S11 (Not averaged): 7.06235e+07
```

شکل ۱۰- تاریخچه تنش در یک المان (تنش ها در واحد Pa)



شکل ۱۱- توزیع تنش های پسماند (MPa) در المان های منتهی به خط تقارن سطح مقطع در ابتدا، وسط و انتهای طول ریل (به ترتیب از راست به چپ) پس از مرحله صافکاری

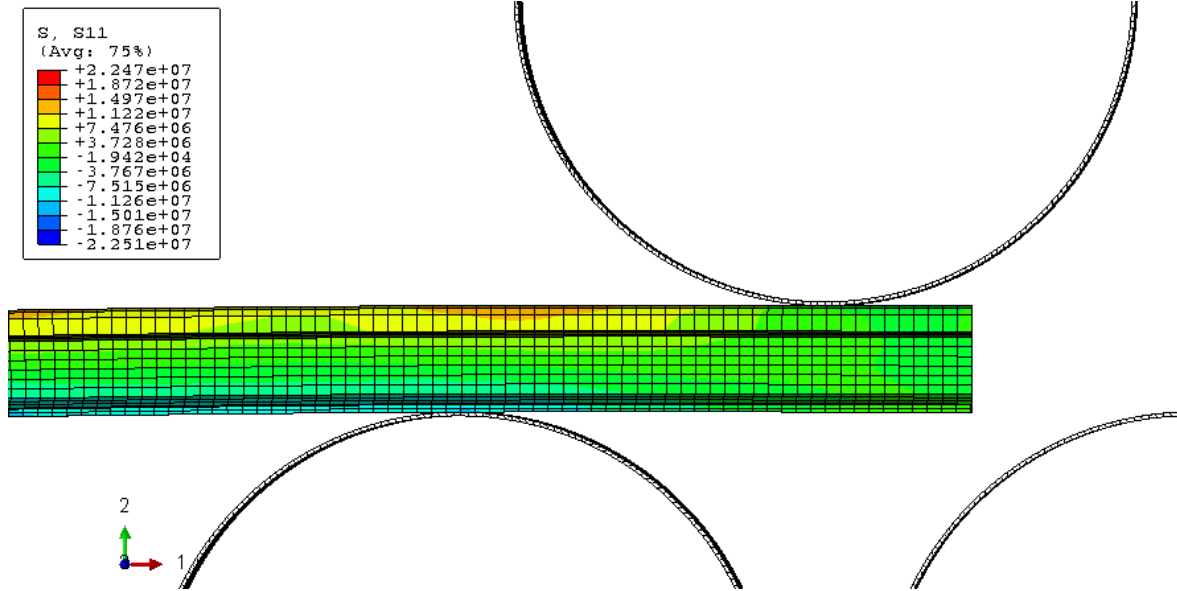
جدول ۳- تنش های پسماند (MPa) در المان های منتهی به خط تقارن سطح مقطع در طول ریل

| ردیف | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ |
|------|------|-------|------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| ۱ | ۲۸۰ | ۱۹۳/۵ | ۱۶۵ | ۷۵ | ۱۳۰ | ۱۴۵ | ۱۸۰ | ۲۰۰ | ۱۳۰ | ۱۴۰ | -۲۵ | -۴۲/۵ |
| ۲ | ۲۲/۵ | ۳۰ | ۱۳ | ۳۵ | -۳۲ | -۲۰ | ۵۷/۵ | ۲۵ | ۴۰ | ۱۵ | ۱۲/۵ | ۱۰۰ |
| ۳ | ۳۰ | -۵ | -۲/۵ | -۱۰ | ۵ | ۵۶ | ۶۸ | ۱۰۰ | ۱۷۲/۵ | ۸۳ | ۷/۵ | ۱۷/۵ |
| ۴ | -۲۱۰ | -۸۲ | -۵۶ | -۱۳ | ۶۵ | ۷ | -۶۲/۵ | ۶۸ | -۴۵ | -۱۱۷/۵ | -۸۲ | -۹۰ |
| ۵ | -۲۴۳ | ۱۱۹ | ۳۷ | ۱۰ | -۶۵ | -۳۷/۵ | ۲۸/۵ | -۱۵ | -۱ | ۲۵ | ۷۱ | -۱۵۵ |
| ۶ | -۱۵۹ | -۴ | -۸ | ۳۲/۵ | -۱۰ | ۸۱ | ۲۰ | -۲/۵ | -۱/۵ | ۶۳ | -۳۰ | -۱۰۰ |
| ۷ | -۱۴۷ | ۵/۵ | -۷۴ | -۸۰ | ۴۰ | -۳۰ | ۷/۵ | ۱۱ | -۴ | -۴۶ | -۴۲ | -۸۷ |
| ۸ | -۱۴۳ | -۸۵ | -۸۸ | -۱۰۷/۵ | -۷۹ | ۴۰ | -۴۷/۵ | -۱۱۰ | -۱۳۷/۵ | -۲/۵ | -۹۷/۵ | -۱۲۶ |
| ۹ | ۱۲۹ | -۱۲۰ | -۶۹ | -۴۶ | -۲۷/۵ | ۱۲/۵ | -۸۵ | -۱۰۷/۵ | -۱۲۰ | -۱۶۰ | -۶۰ | ۴۷/۵ |
| ۱۰ | ۱۲/۵ | -۱۴۷ | -۵۰ | -۷۹ | ۴۵ | -۱۰۵ | -۱۶ | -۱۷۵ | -۵۰ | -۱۲۰ | -۶۳ | ۳۰ |
| ۱۱ | -۸۵ | -۸۸ | -۲۰ | ۱۲۰ | -۱۰۳ | -۹۵ | -۱۲/۵ | -۱۵۰ | -۱۷۵ | -۱۴۰ | -۱۳۲ | ۲/۵ |
| ۱۲ | -۶۷ | ۱۷/۵ | -۵ | ۳ | -۴۶ | -۴۵ | -۷/۵ | -۹۷/۵ | -۶۲/۵ | -۱۶۰ | ۱۲۹ | ۶۵ |

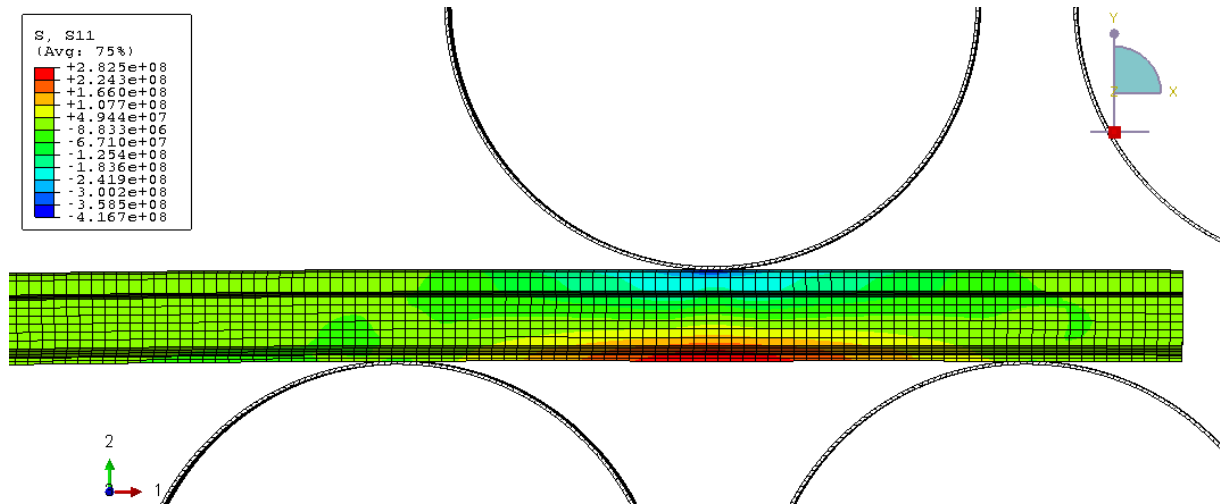
۶- دلیل توزیع های متفاوت تنش های پسماند در قسمت های مختلف طول ریل

در فرآیند صافکاری تنش های فشاری و کششی مختلفی به ریل وارد می شود. از آنجایی که شرایط مرزی نیز پیوسته در حال تغییر است، تعریف تئوری جامعی که بتواند بیان کننده حالت های مختلف باشد دشوار است. هنگامی که ریل با توجه به شرایط ذکر شده برای موقعیت غلطک ها وارد ماشین صافکاری می شود

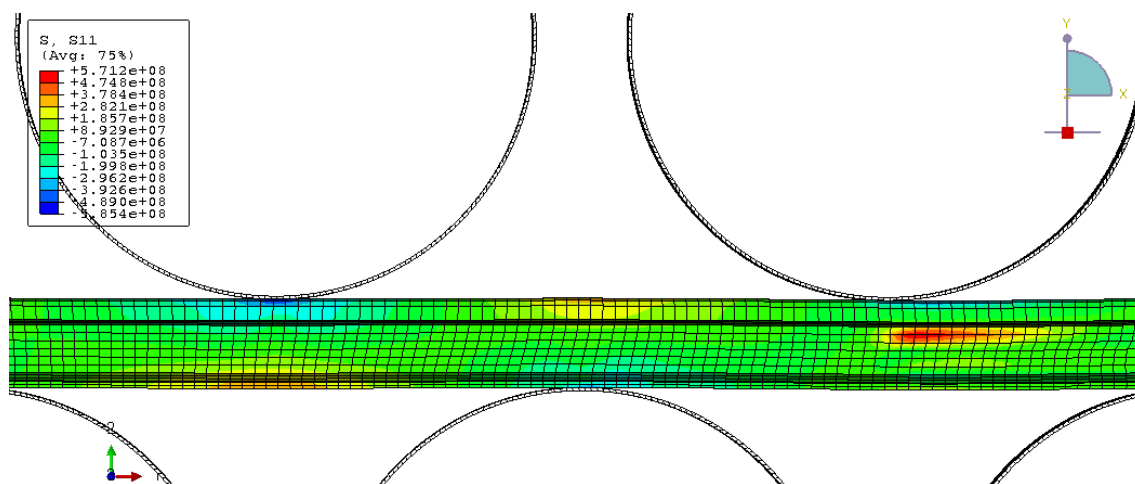
شکل (۱۲) قسمت کلاهدک ریل تحت تنش های کششی و قسمت پاشنه ریل تحت تنش های فشاری قرار می گیرد. با ادامه مراحل کار قسمتی که تحت تنش کششی بوده، تحت فشار و بالعکس قرار می گیرد که این مورد به روشنی در شکل شکل (۱۳) قابل مشاهده است. این رویه در طول فرآیند صافکاری چندین بار تکرار می شود که نمای دیگری از آن در شکل شکل (۱۴) نشان داده شده است. لذا تفاوت شرایط مرزی در هر لحظه از فرآیند صافکاری یکی از دلایل توزیع غیر یکنواخت تنش های پسماند در طول ریل است.



شکل ۱۲- ورود ریل به ماشین صافکاری (تنش ها بر حسب Pa)



شکل ۱۳- تغییر موقعیت تنش های کششی و فشاری در ریل (تنش ها بر حسب Pa)



شکل ۱۴- تغییر موقعیت تنش های کششی و فشاری در ریل (تنش ها بر حسب Pa)

۷- نتیجه گیری و بحث

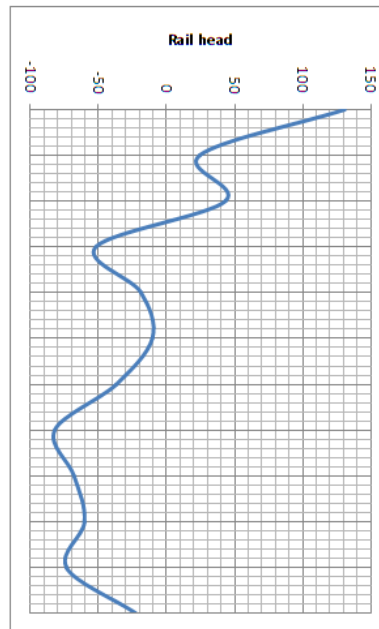
با توجه به شکل (۱۰) و همچنین اطلاعات نشان داده شده در جدول (۳) مشخص می شود که تنش های پسماند در طول ریل دارای مقادیر مختلفی می باشند. این اختلاف نه تنها در مقدار بلکه در نوع تنش نیز می باشد (تنش های کششی و فشاری). با توجه به مورد ذکر شده در مورد انتخاب ابزار مناسب برای اندازه گیری تنش پسماند به صورت تجربی، باید دقت بیشتری را مبذول داشت. به عنوان مثال در استفاده از روش hole drilling یکی از فرضیات، توزیع یکنواخت تنش پسماند در طول موضع اندازه گیری است [۱۰] و در غیر اینصورت باید ضرایب اصلاحی مناسب به کار برده شود. جدول (۴) نشان دهنده متوسط مقادیر اندازه گیری شده است که با استفاده از جدول (۳) حاصل شده است و شکل (۱۵) نیز ارائه کننده توزیع تنش های پسماند متناسب با مقادیر متوسط اندازه گیری شده در طول ریل می باشد.

جدول شماره ۴- متوسط تنش های پسماند (MPa) در المان های منتهی به خط تقارن و در طول ریل

| ردیف | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ |
|-------------|-------|-------|------|-------|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| مقدار متوسط | ۱۳۰/۹ | ۲۴/۸۷ | ۴۳/۵ | -۵۱/۵ | -۱۸ | -۹/۸۷ | -۳۶/۱۶ | -۸۱/۹۵ | -۶۷/۴۱ | -۵۹/۷۹ | -۷۳/۱۶ | -۲۳ |

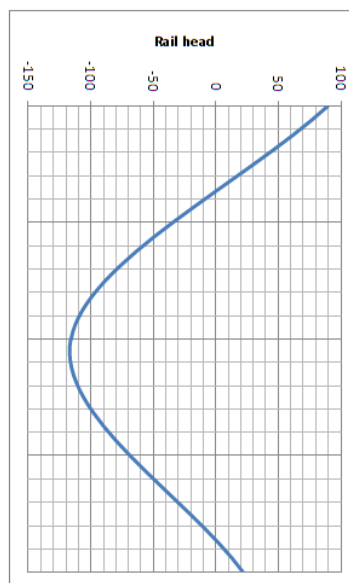
هر کدام از شکل های نشان داده شده در مورد توزیع تنش های پسماند، تقریباً با یکی از مقالات منتشر شده در این زمینه مطابقت دارد و این موضوع نشان دهنده این است که مقادیر تنش های پسماند در هر سطح مقطعی از ریل لزوماً یکسان نیست، و نمی توان به طور دقیق با اندازه گیری یک سطح مقطع از ریل و به دست آوردن نمایی از توزیع تنش های پسماند اعلام نمود که توزیع تنش های پسماند به چه صورت است. بنابر این به نظر می رسد استفاده از یک sub model با طول ۰/۵ متر که در پژوهش مرجع [۸] مورد استفاده قرار گرفته است، نمی تواند به طور کامل در مورد کل طول ریل مطابقت داشته باشد. از طرف دیگر با توجه به موارد ذکر شده در مورد اندازه گیری تنش با استفاده از روش هایی که بر اساس آزاد سازی تنش و اندازه گیری کرنش حاصل از آن کار می کنند و نظر به اینکه در اینگونه روش ها جواب های حاصله مقدار

متوسط تنش را شامل می شوند، در صورتی که متوسط تنش های موجود در کلاهک، جان و پاشنه ریل را در یک مقطع از مدل محاسبه کنیم و سپس با استفاده از آن نمودار توزیع تنش های پسماند را ترسیم کنیم باید نتیجه ای به دست آوریم که با نتایج تجربی مطابقت داشته باشد.



شکل ۱۵- توزیع متوسط تنش های پسماند (MPa) در طول ریل

این کار در یک سطح مقطع از مدل صورت گرفته و نتیجه آن در شکل (۱۶) نشان داده شده است و مطابقت خوبی با اندازه گیری های تجربی انجام شده با استفاده از ابزار کرنش سنج [۳] دارد. بنابراین می توان اینگونه بیان نمود که در مقایسه حل عددی با نتایج تجربی باید روش مورد استفاده در تست های تجربی را به خوبی مورد ارزیابی قرار داد.



شکل ۱۶- توزیع مقدار متوسط تنش های پسماند (MPa) در سطح مقطع ریل

نتیجه گیری

۱- عدم تطابق نتایج حل عددی و تست های تجربی (در اکثر موارد) در مورد تنش های پسماند طولی در ریل را می توان به صورت زیر بیان نمود:

- وجود خطا و فرضیات مختلف در اندازه گیری های انجام شده در تست های تجربی.
- عدم مطابقت شرایط انجام شبیه سازی فرآیند صافکاری اعم از خم اولیه، تعداد غلطک های مورد استفاده، فاصله طولی و عمودی بین غلطک ها، ضریب اصطکاک، سرعت انجام صافکاری و ... در مقایسه با ریلی که مورد تست تجربی قرار گرفته است.
- عدم در نظر گرفتن محدودیت های تست های تجربی در چگونگی تفسیر نتایج حاصل از حل عددی.
- انجام ساده سازی در پروسه حل عددی.

۲- توزیع تنش های پسماند در طول ریل لزوما در تمامی مقاطع یکسان نیست و با اندازه گیری تنش پسماند در یک سطح مقطع از ریل نمی توان در مورد کل ریل قضاوت نمود.

۳- در حل عددی پروسه صافکاری ریل، در صورت محاسبه متوسط تنش های پسماند در کلاهک، جان و پاشنه ریل و ترسیم نمودار توزیع تنش های پسماند متناسب با آن می توان توزیع تنش های پسماند متناسب با روش های تجربی که با استفاده از آزاد سازی تنش و محاسبه کرنش حاصله کار می کنند را به دست آورد. البته این امر مستلزم ارائه مدلی است که در آن خواص ماده منطبق بر شرایط واقعی باشد.

تشکر و قدردانی

از معاونت بهره برداری ذوب آهن اصفهان مدیریت های مهندسی نت، مهندسی نورد (کارگاه نورد ۶۵۰)، آزمایشگاه مرکزی و به صورت ویژه از مدیریت پژوهش فن آوری و بومی سازی تشکر و قدردانی می گردد.

مراجع

- [1] Basu, J., Srimani, S.L., and Gupta, D.S., "Rail Behaviour During Cooling after Hot Rolling", The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 39, pp. 15- 24, (2004).
- [2] English version of DIN EN 13674-1,(2008).
- [3] Hodgson, W.H., "Residual Stresses in Rail", Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 61-73, (1993).
- [4] Webster, P.j., Mills, G., Wang, X., and Xamg, W.P., "Residual Stress Measurements in Rails by Neutron Diffraction", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 307-314, (1993).
- [5] Bower, A.F., and Johnson, K.L., "Metal Working, Steel Research", Vol. 69, pp. 239-249, (1998).

- [6] Deroche, R.Y., Bettembourg, J.P., Brafil, B., Bertrand, J.p., and Jockum, C., "Metal Working, Steel Research", Vol. 69, pp. 435-448, (1998).
- [7] Finsterman, G., Fischer, F.D., Shan, G., and Schleinzer, G., "Residual Stresses in Rails Due to Roll Straightening", Steel Research, Vol. 69, pp. 272-278, (1998).
- [8] Schleinzer, G., and Fischer, F.D., "Residual Stress Formation During the Roller Straightening of Railway Rails", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43, pp. 2281-2295, (2001).
- [9] Srimani, S.L., and Basu, J., "An Investigation for Control of Residual Stress in Roller Straightened Rails", The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 38, pp. 261-268, (2003).
- [10] ASTM E837, Tech Note TN-503, (2002).
- [11] Bruning, M., "A Finite-element-model for the Simulation of the Roller Straightening of Heavy Profiles", Ruhr-University Bochum, Germany, (1989).
- [12] Naumann, N.Z., "Straightening of Long Products about the First Moment of Area", Ph.D.Thesis, Montan University, Leoben, Austria, (1998).
- [13] ABAQUS Finite Element Analysis Products, (www.hks.com).

فهرست نمادهای انگلیسی

C3D8R: المان سه بعدی هشت نقطه ای با انتگرال کاهش یافته

E: مدول یانگ یا شیب منحنی تنش- کرنش در قسمت الاستیک بر حسب پاسکال

U33: نوعی از پروفیل ریل می باشد که جرم یک متر آن برابر $46/27 \text{ Kg}$ می باشد

UTS: تنش نهایی در تست کشش بر حسب پاسکال

δl : مقدار ازدیاد طول نمونه در تست کشش که بر اساس درصد

σ_{xx} : مولفه تنش قائم در جهت X

σ_y : تنش تسلیم در تست کشش بر حسب پاسکال

Abstract

Straightening is final process in rail manufacturing route and has very important effect on mechanical properties, flatness, straightness, residual stress and etc. By increasing in velocity and axial load in rail systems the management of rail systems wants reduction in residual stresses. Presented paper offer the result of investigation for determine the pattern of residual stress after straightening. Results contain reasons of difference between experimental and numerical answers and indicate non homogenous pattern of residual stress in rail's length, also used model has good accordance with experimental results.