



سمپوزیوم فولاد ۸۹
۱۰ و ۱۱ اسفند ماه ۱۳۸۹
اصفهان، شرکت سهامی ذوب آهن اصفهان



حل عددی پروسه صافکاری ریل های فولادی به منظور تعیین آرایش تنش های پسماند

محمد علی معظم^۱، اعظم قاسمی^۲، مهران مرادی^۳، حسین مناجاتی زاده^۴
^۱ گروه کنترل کیفیت مهندسی برنامه ریزی و نظارت بر نگهداری و تعمیرات (مهندسی نت) ذوب آهن اصفهان
^۲ استادیار گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
^۳ استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان
^۴ استادیار دانشکده مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

چکیده

تنش های پسماند در ریل ها دارای اهمیت بالایی هستند. تحقیقات زیادی به صورت تجربی و حل عددی جهت استخراج تنش های پسماند صورت گرفته است. اغلب روش های تجربی حاکی از توزیع تنش های پسماند به صورت C شکل در مقطع ریل است ولی روش های عددی به روشنی نمایش دهنده شکل خاصی از توزیع تنش های پسماند نمی باشند. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از نتایج کوشش های قبلی شبیه سازی مناسب تری صورت گیرد و توزیع تنش های پسماند در حالت های صافکاری افقی و عمودی با یکدیگر مقایسه شوند، همچنین مشاهده شد که تنش های پسماند پس از صافکاری افقی به صورت S شکل می باشند و پس از صافکاری عمودی حالت S شکل به سمت C شکل تمایل پیدا می کند.

کلمات کلیدی: تنش های پسماند، ریل، صافکاری، حل عددی.

¹ Moazam-Mo@safahansteel.com

مقدمه

صافکاری ریل آخرین مرحله تولید آن است، از اینرو مشخص کننده بسیاری از پارامترها مانند خواص مکانیکی، مسطح بودن، تنش های پسماند و ... می باشد. وجود تنش های پسماند می تواند عاملی برای ایجاد ترک و یا گسترش آن در ریل باشد. بنابر این کاهش تنش های پسماند می تواند روشی برای افزایش طول عمر سرویس دهی ریل باشد. اندازه گیری تنش های پسماند با استفاده از کرنش سنج [۱] نشان دهنده وجود تنش های پسماند کششی در قسمت های بالا و پائین ریل و تنش های پسماند فشاری در قسمت جان ریل است که در شکل ۱ نمایان است. لازم به ذکر است که توزیع تنش های پسماند به این صورت خوشایند نیست زیرا در زمان سرویس دهی ریل تنش خمشی ناشی از بار چرخ ها با تنش پسماند موجود در ریل جمع می شود. بنابر این نقطه بحرانی در ریل قسمت پائینی آن است، یعنی جایی که تنش ناشی از خمش و تنش های پسماند هر دو کششی هستند. علاوه بر این کمیته استاندارد سازی اروپا (CEN) استاندارد را ترسیم نموده است [۲] که در آن مقدار تنش های پسماند موجود در نقاط بحرانی ریل به 250 MPa محدود شده است.

در جهت بهینه نمودن صافکاری ریل با استفاده از غلطک های صافکاری تلاش هایی در سال های اخیر توسط شبیه سازی صورت گرفته است. با توجه به اینکه اگر شبیه سازی بخواد به صورت کامل صورت پذیرد نیازمند زمان انجام محاسبات زیادی خواهد بود و همچنین پروسه شبیه سازی پیچیده می گردد، ساده سازی هایی توسط افرادی که در این زمینه فعالیت نموده اند انجام شده است. با بررسی نتایج به دست آمده از کار ایشان این نتیجه حاصل می شود که ساده سازی های انجام شده دارای اهمیت بالایی بوده و باعث شده است تا نتیجه های متفاوتی حاصل گردد.

برونینگ^۱ [۳] با استفاده از المان Beam سطح مقطع خاصی از ریل را مورد بررسی قرار داده. اما اگر با استفاده از این نوع المان تمام عرض سطح را پوشش دهیم دیگر آن ها نمی تواند در اثر وجود تنش ها در جهت عرضی تغییری انجام دهند؛ از اینرو در بهترین حالت نتیجه به دست آمده از تحقیق ایشان، میزان متوسط تنش های پسماند می باشد. همچنین ایشان اعلام می کند که فشار تماس غلطک ها دارای کمترین تاثیر بر تنش های پسماند می باشد. نایمن^۲ [۴] پژوهش خود را با استفاده از المان سه بعدی و به روش المان محدود با استفاده از مدل پلاستیک با مکانیزم سخت شوندگی سینماتیک انجام داد. در مقایسه با برونینگ، نتایج نایمن کاملاً برعکس است. او اینگونه بحث می کند که فشار تماس غلطک ها در هنگام صافکاری دارای نقش بسیار مهمی در چگونگی توزیع تنش های پسماند می باشد. او همچنین بیان می کند

¹ Bruning

² Naumann

که شکل هندسی ریل باعث بوجود آمدن نوع خاصی از توزیع تنش های پسماند می گردد، البته او نتایج به دست آمده اندازه گیری تنش های پسماند در قسمت های مختلف ریل را منتشر نموده است. فینسترمین [۵] نیروها و ممان های شبیه سازی با المان Beam را به مدل سه بعدی اجزای محدود اضافه نمود. او همچنین پارامترهای تماس غلطکها را برای داشتن تقریبی خوب به مدل اضافه نموده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده تغییر تنش های پسماند در قسمت بالا و پائین ریل به نوع فشاری است. نتایج او در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج حاصله از شبیه سازی انجام شده در این مقاله مشاهده می شود که توزیع تنش های پسماند پس از صافکاری افقی به صورت S شکل می باشد و پس از صافکاری عمودی حالت S شکل به سمت C شکل تمایل پیدا می کند.

روش تحقیق

با توجه به اینکه در حین صافکاری غلطکی، ریل فولادی دچار خم و راست شدن متناوب می گردد لذا لازم است رفتار پلاستیک آن در طی سیکل های دارای کرنش پلاستیک بررسی گردد. در این مقاله از نتایج حاصل شده توسط بررسی های فیشر [۶] استفاده شده است. روش انجام کار به این صورت است که لازم است چگونگی ایجاد سخت شوندگی در ماده مشخص شود. برای به دست آوردن پارامترهای پلاستیسته، انجام یک آزمایش کشش و فشار با کرنش کنترل شده کفایت می کند. مشخصات آماده سازی نمونه در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود از یک کرنش سنج برای اندازه گیری کرنش کل استفاده شده است. نرخ کرنش نیز حدود 0.0005 s^{-1} در نظر گرفته شده است که معادل یک سیکل در دقیقه است. شکل ۴ نشان دهنده نتایج به دست آمده از اولین سیکل بارگذاری در ریل هایی با کلاس های مختلف است. همانگونه که مشاهده می شود اثر باوشینگ نیز به وجود آمده است. با توجه موارد به دست آمده و همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی های انجام شده قبلی نمایان می گردد که اضافه نمودن حالت سخت شوندگی نوع سینماتیکی غیر خطی به مدل برای به دست آوردن نتیجه ای صحیح ضروری است. با توجه به مرجع [۶]، پیشنهاد چابوچه [۷] مبنی بر تقسیم تانسور تنش به تعداد دلخواهی مولفه، به خوبی با ریل فولادی سازگار است.

$$\alpha_{ij} = \sum_{n=1}^M \alpha_{ij}^n \quad (1)$$

هر کدام از مولفه های ذکر شده دارای نموی از سخت شوندگی سینماتیکی می باشند:

$$\alpha_{ij}^n = \left(\frac{2}{3}\right) c^n \dot{\epsilon}_{ij}^p - \gamma^n \alpha_{ij}^n \dot{\epsilon}_{eqv}^p \quad (2)$$

در عبارت های فوق C^n و γ^n پارامتر های سخت شوندگی سینماتیکی هستند که برای هر مولفه دلخواه تانسور تنش متفاوت می باشند. شکل (۵) نشان دهنده مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده با استفاده از موارد ذکر شده می باشد. همچنین چابوجه [۷] در مدل خود یک سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک نیز اضافه نموده است.

$$\delta\gamma = \delta\gamma_0 + Q \left(1 - e^{-b s_{Eq}^p}\right)^n \quad (3)$$

که مقادیر Q ، b و $\sigma\gamma_0$ پارامتر های مدل هستند. نتایج شبیه سازی انجام شده با استفاده از موارد ذکر شده نشان دهنده توزیع C شکل از تنش های پسماند در مقطع ریل است که با نتایج تجربی به دست آمده تطابق دارد. چگونگی توزیع تنش های پسماند در خط تقارن ریل در شکل ۶ نشان داده شده است. جهت انجام شبیه سازی نرم افزار ABAQUS/Explicit [۸] استفاده شده و از اطلاعات منابع ذکر شده به عنوان وردی استفاده گردیده است. مش بندی با استفاده از المان C3D8R انجام شده و مدل غلطک های صافکاری از نوع Rigid انتخاب شده اند. در ابتدا صافکاری در حالت افقی شبیه سازی شد و پس از آن صافکاری عمودی به آن اضافه گردید. در پروسه صافکاری افقی با ایجاد قید در جهت $(UX=0)$ ریل مهار شده است و در صافکاری عمودی، این کار با عبور ریل از میان غلطک ها صورت می گیرد و تماس غلطک ها از نوع سطح به سطح انتخاب شده است. نتیجه نهایی پس از انجام شبیه سازی های ذکر شده در شکل ۷ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

یکی از مهمترین پارامتر ها در شبیه سازی تنش های پسماند در ریل فولادی، به دست آوردن معادلات مربوط به رفتار مدل در حالت های الاستیک و پلاستیک است. همچنین نتایج به دست آمده از کوشش های انجام شده حاکی از آن است که فرض هایی که برای ساده سازی حل مسئله در نظر گرفته می شود می تواند به مقدار قابل توجهی در نتیجه به دست آمده نقش داشته باشد. توزیع تنش های پسماند در ریل با توجه به نتایج تجربی به دست آمده به صورت C شکل است ولی در کوشش هایی که به وسیله محاسبات عددی صورت گرفته است شکل خاصی مورد توافق قرار نگرفته که علت اصلی آن می تواند ساده سازی هایی باشد که برای حل در نظر گرفته شده است. البته شبیه سازی هایی نیز انجام شده است که با نتیجه های تجربی تطابق خوبی دارند. مشاهده می شود که پس از انجام پروسه صافکاری افقی توزیع تنش های پسماند به صورت S شکل است. براین اساس در قسمت های فوقانی سر ریل، قسمت های پائینی کمر ریل و قسمت های پائینی ریل تنش پسماند کششی و در قسمت های پائینی سر ریل و بالایی کمر ریل تنش پسماند فشاری مشاهده می شود. پس از انجام صافکاری عمودی باز هم مشاهده می شود که تنش های

پسماند حالت S شکل دارند ولی به حالت با قاعده تری در آمده اند و پراکندگی آن ها کم شده است و تقریباً به سوی C شکل بودن حرکت کرده اند. در این حالت مشاهده شد که تنش های پسماند در برخی از نقاط از حالت کششی به فشاری تغییر یافتند. در حالت کلی می توان گفت تنش های پسماند در قسمت فوقانی سر ریل، قسمت پایینی کمر ریل و قسمت پائینی ریل به صورت کششی است و در قسمت های پائینی سر ریل، قسمت میانی و بالای کمر ریل، تنش های پسماند از نوع فشاری می باشد. مقدار متوسط تنش های پسماند پس از انجام صافکاری عمودی تا حدی کاهش می یابد و می توان عنوان نمود که صافکاری عمودی علاوه بر تغییر دادن نوع تنش های پسماند در برخی از نقاط، بر میزان آن ها نیز در حد کمی تاثیر گذار است. در این حالت ماکزیم مقدار تنش های پسماند در قسمت پائین ریل مشاهده می گردد.

نتیجه گیری

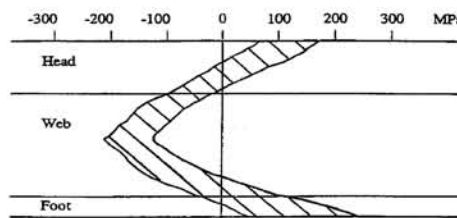
- ۱- یکی از مهمترین پارامترها در انجام حل عددی به منظور تعیین تنش های پسماند به دست آوردن معادلات مربوط به رفتار ماده در حالت الاستیک و پلاستیک است.
- ۲- فرض هایی که برای ساده سازی حل مسئله در مورد آرایش تنش های پسماند در ریل های فولادی در نظر گرفته می شود می تواند به طور چشمگیری در نتایج حاصله تاثیر گذار باشد.
- ۳- توزیع تنش های پسماند در ریل های فولادی با استفاده از نتایج تجربی به صورت C شکل است ولی در کوشش های عددی انجام شده شکل خاصی مورد توافق قرار نگرفته است.
- ۴- توزیع تنش های پسماند پس از انجام پروسه صافکاری افقی به صورت S شکل است و بعد از پروسه صافکاری عمودی به سمت C شکل شدن میل می کند.
- ۵- صافکاری عمودی باعث تغییر نوع تنش های پسماند در برخی نقاط می گردد و مقدار تنش را نیز متاثر می سازد ولی مقدار آن در حدی نیست که به عنوان کاهش دهنده مقدار تنش های پسماند مدنظر قرار گیرد، ولی موقعیت تنش های پسماند را تغییر می دهد و آن ها را با قاعده می سازد.

تشکر و قدر دانی

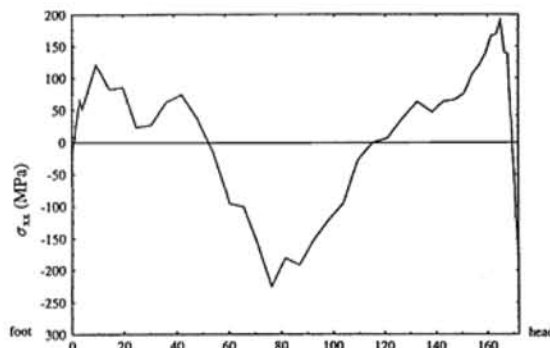
از مدیریت های محترم آموزش و پژوهش، مهندسی نت و مهندسی نورد (کارگاه نورد ۶۵۰) شرکت سهامی ذوب آهن اصفهان تشکر و قدر دانی می گردد.

مراجع

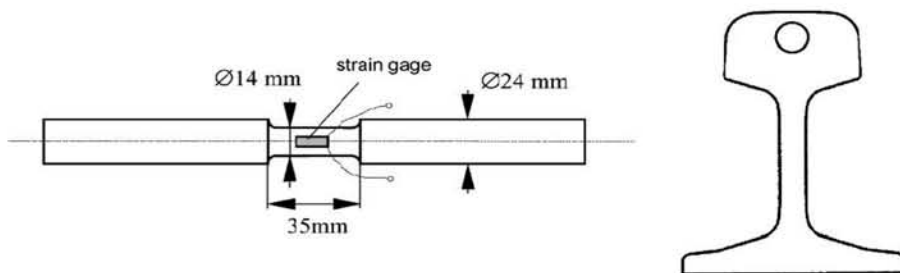
- [1] Hodgson WH, "Rail quality and maintenance for modern railway operation", The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 61–73.
- [2] CEN=TC256=WG4 Draft Standard Railway applications—track heavy rail, Part 1: Flat bottom symmetrical railway rails 46 kg=m and above, European Committee for Standardization (www.cenorm.be), 1997.
- [3] Bruning M. Ein, "A Finite-element-model for the simulation of the roller straightening of heavy profiles", Ruhr-University Bochum, Germany, 1989.
- [4] Naumann N. Zum, "Straightening of long products about the first moment of area", Ph.D.Thesis, Montan university Leoben, Austria, 1998.
- [5] Finstermann G, Fischer FD, Shan G, Schleinzer G, "Residual stresses in rails due to roll straightening", Steel Research 1998, pp.272–278.
- [6] G. Schleinzer, F.D. Fischer, "Residual stress formation during the roller straightening of railway rails", International Journal of Mechanical Sciences, 2001, pp.2281–2295.
- [7] Chaboche JL, "Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity" International Journal of Plasticity, 1989, pp. 247–302.
- [8] ABAQUS Finite Element Analysis Products (www.hks.com).



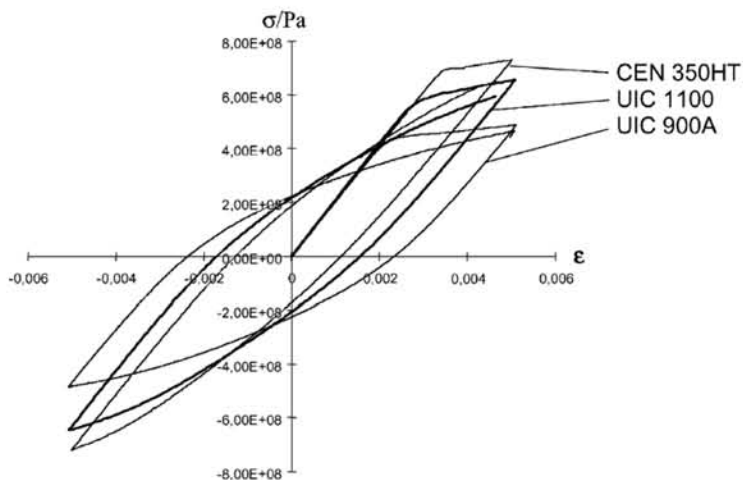
شکل ۱. تعیین تنش های پسماند با استفاده از کرنش سنج [۱].



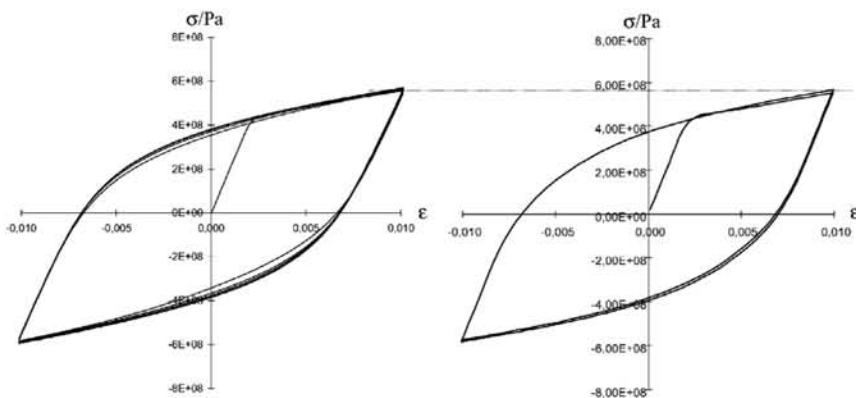
شکل ۲. نتایج به دست آمده مرجع [۵].



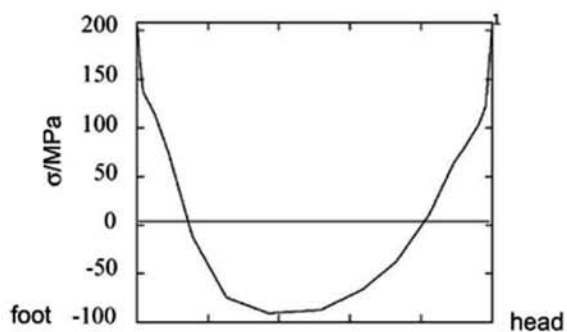
شکل ۳. مشخصات نمونه آماده شده برای انجام آزمایش [۶].



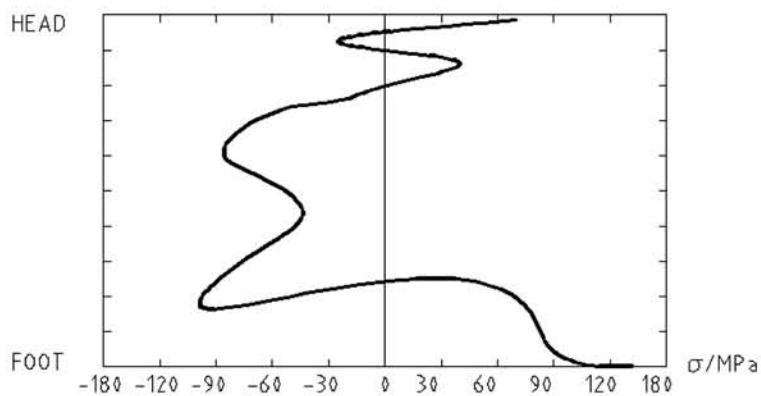
شکل ۴. اولین سیکل بار گذاری برای ریل های UIC 900A, UIC 1100, CEN 350HT [۶].



شکل ۵. مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده (سمت چپ) و مقادیر به دست آمده از مدل Chaboche [۶].



شکل ۶. توزیع تنش های پسماند با استفاده از اعمال سخت شوندگی غیر خطی سینماتیکی به مدل [۶].



شکل ۷. توزیع تنش های پسماند در خط تقارن سطح مقطع ریل پس از صافکاری افقی و عمودی.