

تحلیل تماس چرخ و ریل در سامانه ریلی مسافری ایران

جواد علیزاده کاکلر

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد
j_alizadeh@dena.kntu.ac.ir

رحمتا... قاجار

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد
ghajar@kntu.ac.ir

چکیده

چرخ و ریل در محدوده عمر کاری خود، حدود ده‌ها میلیون تماس شدید با یکدیگر دارند. که در نتیجه آن، دچار نوع خاصی از خستگی به نام خستگی تماس غلتشی می‌شوند. نخستین گام برای مطالعه این پدیده، تحلیل تماس چرخ و ریل تحت شرایط کاری موردنظر است. در این مقاله، ابتدا تماس چرخ منوبلوک R7T با قطر ۹۲۰ میلی‌متر و پروفیل استاندارد S1002 روی ریل UIC60 به کمک مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزا محدود Abaqus 6.7 تحلیل شده است. مشخصات و شرایط استفاده شده نیز منطبق بر شرایط کاری سامانه ریلی مسافری ایران می‌باشد. در این تحلیل، رفتار ماده الاستوپلاستیک با سخت‌شوندگی سینماتیک تعریف شده است. برای صحت‌گذاری و مقایسه نتایج، تماس موردنظر با استفاده از تئوری تحلیلی تماس هرتز با فرض الاستیک بودن مواد مطالعه شده است. براساس نتایج به دست آمده، چرخ در محل تماس دچار تغییر شکل پلاستیک شده، حداکثر تنش وان میسز ۳ میلی‌متر زیر سطح چرخ رخ می‌دهد. با توجه به تغییر شکل پلاستیک چرخ، نتایج تحلیل اجزا محدود دقیق‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تماس چرخ و ریل، آباکوس، تئوری هرتز

مقدمه

خستگی را تحمل نماید. این نوع خستگی را خستگی تماس غلتشی می‌نامند که با توجه به غیرخطی بودن هندسه تماس چرخ و ریل، به صورت چندمحوره می‌باشد. [۱ و ۲] غیرخطی بودن ماهیت تماس، هندسه تماس و غیرخطی بودن رفتار ماده با فرض تغییر شکل

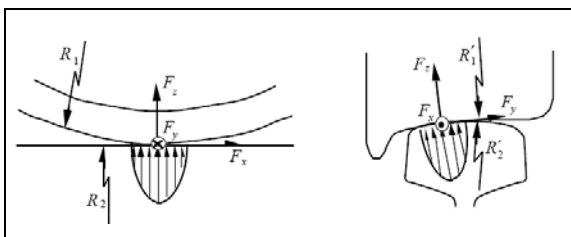
چرخ فولادی راه آهن، در محدوده عمر کاری خود، عمدتاً حرکت غلتشی و ندرتاً لغزشی روی ریل دارد. این حرکت غلتشی سبب می‌شود که هر نقطه از سطح چرخ در کسری از زمان غلتش روی ریل، بارگذاری

تئوری تماس هرتز [۶]

تئوری حاکم بر تماس چرخ و ریل، تئوری هرتز است. براساس این تئوری، هنگامی که دو جسم توسط نیروهای عمودی به هم فشرده می‌شوند، بین آنها ناحیه‌ی تماسی به شکل بیضی ایجاد می‌گردد. فرض‌های تئوری هرتز عبارتند از: (۱) شعاع‌های بیضی ناحیه‌ی تماس (a,b) در مقایسه با ابعاد اجسام در تماس بسیار کوچک‌اند. (۲) در ناحیه‌ی تماس تنها نیروی فشاری وجود داشته، از نیروهای مماسی صرف‌نظر می‌شود. (۳) تغییرشکل در محدوده‌ی الاستیک باقی می‌ماند. در تحلیل ناحیه‌ی تماس هرتز، پارامترها و روابط زیر ارائه شده است:

$$\begin{cases} A = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \\ B = \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2} \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، R_1 شعاع انحنای اصلی غلتش چرخ، R_2 شعاع انحنای اصلی غلتش ریل (که معمولاً برای ریل بی‌نهایت است)، R'_1 شعاع عرضی انحنای پروفیل چرخ در نقطه‌ی تماس و R'_2 شعاع عرضی انحنای پروفیل ریل است. (شکل ۱)



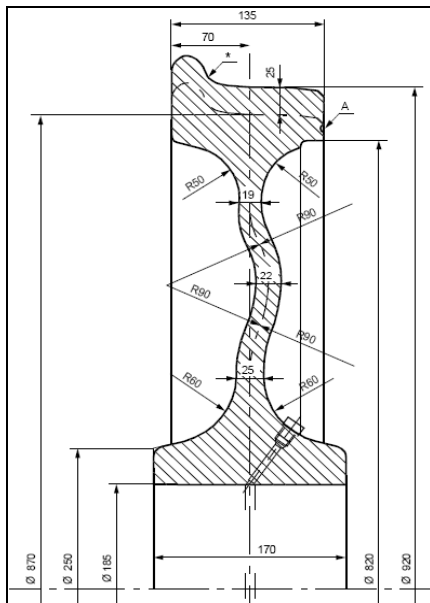
شکل (۱) - شعاع انحنای اصلی و عرضی چرخ و ریل [۷]

پس از محاسبه پارامترهای A و B، شعاع‌های بزرگ و کوچک بیضی هرتز که به ترتیب با a و b نشان داده می‌شوند از رابطه‌ی زیر به دست می‌آیند:

پلاستیک، تحلیل تماس چرخ و ریل را با پیچیدگی‌های خاصی روبرو می‌کند. برای تحلیل این تماس به صورت تحلیلی و با استفاده از برخی فرض‌های ساده‌شونده می‌توان از تئوری تماس هرتز استفاده کرد. تحلیل دقیق‌تر به کمک اجزا محدود میسر است که امکان تعریف رفتار غیرخطی را برای مواد فراهم کند. مدل‌سازی و تحلیل تماس چرخ و ریل با استفاده از اجزا محدود در مطالعات برخی از محققان نیز انجام شده است. [۳-۵] در مدل‌سازی اجزا محدود، دو یا سه‌بعدی بودن مدل، چگونگی بارگذاری، چگونگی المان‌بندی و هندسه‌ی تماس نقش بسیار مهمی بر دقت تحلیل انجام شده و میزان انطباق آن بر واقعیت دارند. این نوع تحلیل به خصوص بسیار متأثر از هندسه‌ی تماس بوده، لذا برای هر سامانه‌ی ریلی با مشخصات خاص هندسه‌ی چرخ و ریل نیاز است. نتایج تحلیل تماس چرخ و ریل به عنوان مقدمه‌ی تحلیل خستگی چرخ یا ریل به خصوص از بعد امکان‌پذیری، محل‌های خستگی و جهت‌های خستگی ترک و عمر آن به حساب می‌آید.

در این مقاله، تماس چرخ منوبلوک با قطر ۹۲۰ میلی‌متر در تماس با ریل UIC60 به دو روش عددی و تحلیلی مطالعه شده است. جنس چرخ، فولاد گرید R7T و مدل ماده برای تحلیل اجزا محدود، الاستوپلاستیک با سخت‌شوندگی سینماتیک خطی لحاظ شده است. پیش‌فرض تئوری تحلیلی هرتز که برای مطالعه تحلیلی تماس استفاده شده است، الاستیک ماندن ماده در فرایند تماس می‌باشد. برای مدل‌سازی چرخ از پروفیل استاندارد S1002، که پروفیل مورد استفاده در تراش چرخ‌های سامانه‌ی ریلی مسافری ایران است، استفاده شده است. سایر شرایط مدل‌سازی نیز منطبق بر شرایط کاری سامانه‌ی ریلی مسافری ایران می‌باشد.

Abaqus 6.7 صورت گرفته است. در گام نخست، مدل‌سازی هندسی چرخ و ریل انجام گرفت. در مدل‌سازی هندسی چرخ، از پروفیل S1002 که در حال حاضر پروفیل مورد استفاده در تراش چرخ‌های سیستم ریلی ایران است، استفاده شد. برای افزایش دقت در مدل‌کردن این پروفیل، مختصات ۶۱۶ نقطه که توسط دستگاه پروفیل‌نگار از نمونه چرخ تازه‌تراش‌خورده استخراج شده بود، مورد استفاده قرار گرفت. این در حالی است که استاندارد ریلی UIC 510-2، تنها از ۱۹۵ نقطه برای تعریف این پروفیل استفاده نموده است. علت نشان‌دادن حساسیت در مدل‌کردن دقیق پروفیل چرخ، تأثیر بسیار بالای آن در میدان تنش تماسی چرخ است. سایر قسمت‌های هندسه سطح مقطع چرخ با استفاده از استانداردهای UIC 510-2 و UIC 515-1 (شکل ۲) مدل شد. نوع چرخ انتخابی برای این مطالعه، منوبلوک با قطر ۹۲۰ میلی‌متر است که قطر چرخ نو مورد استفاده در سیستم ریلی ایران می‌باشد.



شکل (۲) - نقشه سطح مقطع چرخ منوبلوک با قطر ۹۲۰ میلی‌متر [۸]

$$\left(\frac{a}{m}\right)^3 = \left(\frac{b}{n}\right)^3 = \frac{3F(\delta_1 + \delta_2)}{A+B} \quad (2)$$

که در آن F بار عمودی وارده و δ_1 و δ_2 پارامترهای وابسته به جنس بوده و به صورت زیر تعریف شوند:

$$\delta_1 = \frac{1-\nu_1^2}{2E_1} \quad (3)$$

$$\delta_2 = \frac{1-\nu_2^2}{2E_2}$$

m و n نیز با توجه به زاویه β و جدول ۱ تعیین می‌شوند:

$$\cos \beta = \frac{A-B}{A+B} \quad (4)$$

جدول (۱) - مقادیر پارامترهای m و n [۶]

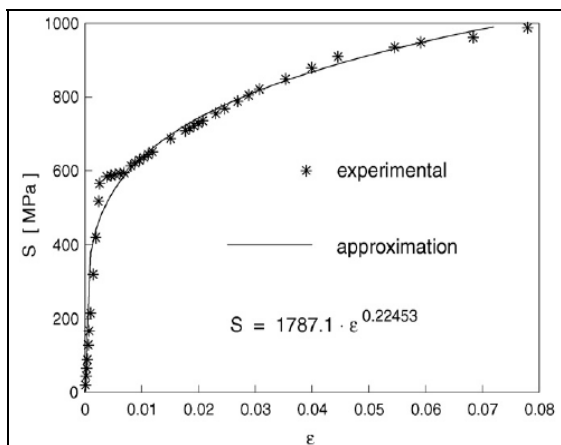
β°	m	n
90	1	1
80	1.128	0.893
70	1.284	0.802
60	1.486	0.717
50	1.754	0.641
40	2.136	0.567
30	2.731	0.493
20	2.778	0.408
10	6.612	0.319

و نهایتاً با مشخص شدن ابعاد بیضی هرتز، تنش فشاری ماکزیمم در منطقه تماس به دست می‌آید:

$$P_{\max} = \frac{3F}{2\pi ab} \quad (5)$$

مدل‌سازی اجزا محدود

مراحل گوناگون تحلیل عددی تماس در نرم‌افزار



شکل ۴: نمودار تنش واقعی - کرنش واقعی R7T در دمای محیط [۱۱]

جدول ۲: خواص مکانیکی ریل UIC60 در دمای ۲۴°C [۱۰]

ضریب پواسون، ν	مدول پلاستیک بر حسب GPa	مدول الاستیسیته بر حسب GPa	تنش تسلیم بر حسب MPa
۰/۲۹۵	۲۲/۷	۲۰۶/۹	۴۸۳

جنس چرخ و ریل، همگن و ایزوتروپیک تعریف شده است. جدول ۳ مقادیر خواص مکانیکی ماده وارد شده در نرم‌فزار را نشان می‌دهد.

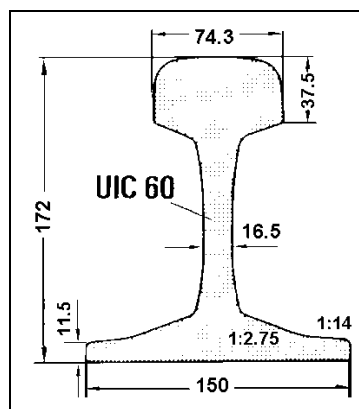
پس از تعیین خواص و مدل مادی، چرخ و ریل مدل شده در موقعیت مناسبی نسبت به هم قرار داده شدند. فرض بر این است که مرکز تاج ریل با نقطه‌ای از چرخ به فاصله ۷۰ میلی‌متر از لبه داخلی فلنج در یک امتداد باشند. مبدأ دستگاه مختصات مرجع، روی محور چرخ و در محل سطح داخلی قرار داده شده است. محور چرخ و محورهای مختصات در موقعیت‌های نشان داده در شکل ۵ قرار دارند.

یکی از مسائل مهم به هنگام نصب ریل، شیبی است که به زیر ریل و به سمت مرکز دو ریل داده می‌شود. این شیب معمولاً دو مقدار ۱:۲۰ یا ۱:۴۰ را داراست که در

برای مدل‌سازی هندسی ریل، پروفیل UIC60 مورد استفاده قرار گرفت که پروفیل غالب ریل‌های سیستم ریلی ایران به حساب می‌آید. نقشه سطح مقطع این ریل در شکل ۳ آورده شده است. طول ریل مدل شده، طولی از ریل است که بین دو تراورس قرار دارد که برابر ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. مدل چرخ و ریل هر دو از نوع سه‌بعدی تغییرشکل‌پذیر^۱ انتخاب شدند.

پس از مدل‌سازی هندسی، نوبت تعیین خواص و مدل مادی است. برای مطالعه حاضر، جنس چرخ از فولاد گرید R7T در نظر گرفته شده است؛ زیرا در حال حاضر عمده خریدهای چرخ در سیستم ریلی ایران از این جنس می‌باشد. منحنی تنش-کرنش، این گرید فولاد در شکل ۴ نشان داده شده است. جنس ریل نیز از فولاد گرید UIC60 بوده که خواص مکانیکی آن در جدول ۲ ارائه گردیده است.

در نرم‌افزار Abaqus، مدل مادی چرخ و ریل الاستوپلاستیک با سخت‌شوندگی سینماتیک خطی انتخاب شد. سخت‌شوندگی سینماتیک در واقع بیانگر انتقال سطح تسلیم در فضای تنش بوده که اثرات باشینگر و تعدیل پلاستیک^۲ را لحاظ می‌نماید. همچنین



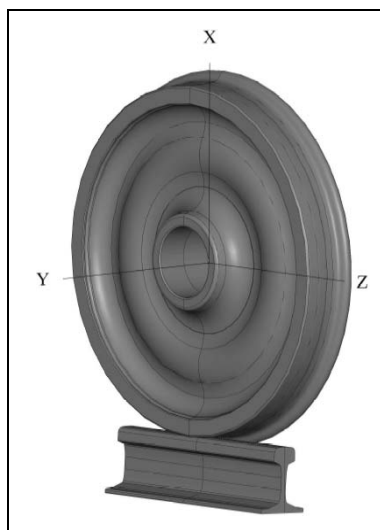
شکل (۳) - نقشه سطح مقطع ریل UIC60 [۹].

جدول (۳) - خواص مکانیکی وارد شده در نرم افزار Abaqus برای چرخ و ریل

پلاستیک (سخت شونده سیمناتیک خطی)			الاستیک			
کرنش پلاستیک حقیقی	تنش حقیقی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	مدول یانگ (MPa)		
۰/۰۴۰۲	۹۱۵	۵۶۷	۰/۳	۲۰۵۰۰۰	چرخ (R7T)	
۰/۰۲۲	۹۸۳	۴۸۳	۰/۲۹۵	۲۰۶۹۰۰	ریل (UIC60)	

مادی متغیر با زمان (مانند خزش و ویسکوالاستیسیته) صرف نظر می شود. زمان این مرحله یک ثانیه در نظر گرفته شده است. برای لحاظ شدن اثرات غیرخطی ناشی از هندسه و رفتار ماده، گزینه Nlgeom فعال انتخاب شده است. نوع نمو زمانی در این مرحله، Automatic با مقدار اولیه ۰/۰۰۱ ثانیه تعیین شده است. بارگذاری در طول بازه زمانی این مرحله، ثابت و بدون تغییر با زمان و برون یابی هر مرحله در آغاز هر نمو از نوع درجه دو انتخاب شد.

تعریف تماس و مشخصات آن مرحله بعدی است. برای تعریف اندرکنش چرخ و ریل، تماسی بین آنها از نوع سطح به سطح تعریف شده است. سطح تاج ریل و سطح طوقه چرخ به عنوان دو سطح در تماس با هم تعیین شده اند. از بین دو سطح انتخاب شده، یکی بایستی به عنوان slave و دیگری به عنوان master انتخاب شود که در این مطالعه سطح تاج ریل، سطح slave و سطح طوقه چرخ با توجه به مش بندی ریزتر به عنوان سطح master انتخاب گردید. برای تحلیل اصطکاک تماس چرخ و ریل از فرمولاسیون پنالتی استفاده و ضریب اصطکاک ماده در تمام جهات برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است. به عنوان مقدمات اعمال بارگذاری و شرایط مرزی، ابتدا یک نقطه مرجع (R_p) به مختصات (0,70,0) تعریف و پس از آن، نقطه مرجع تعریف شده با سطح داخلی چرخ؛ یعنی جایی که محل



شکل (۵) - مدل چرخ و ریل و موقعیت محورها نسبت به آن.

ایران از شیب ۱:۲۰ استفاده می شود. لذا برای قرار گرفتن چرخ و ریل در موقعیت نسبی مناسب، ابتدا به میزان $\text{Arctan}(1/20) = 2.86^\circ$ ریل را حول محور Z دوران می دهند، سپس نقطه وسط تاج ریل را در امتداد نقطه غلتان چرخ قرار داده، نهایتاً ریل در راستای X به اندازه ای جابه جا می شود که در تماس با چرخ قرار گیرد. نقطه تماس چرخ و ریل در وسط طول ریل؛ یعنی به فاصله ۳۰۰ میلی متر از دو سر ریل، است.

دو مرحله برای تحلیل مدل تعریف شده است. اولین مرحله به صورت پیش فرض و توسط نرم افزار تعریف شده، اعمال شرایط مرزی در این مرحله صورت می گیرد. مرحله دوم به صورت استاتیکی تعریف شده است که در این روش، از اثرات اینرسی و نیز تغییرات



حل مسئله، گزینه مناسب انتخاب گردید:

- (۱) ابتدا کل چرخ با اندازه ۱۶ میلی متر و کل ریل با اندازه ۱۰ میلی متر دانه ریزی و المان بندی شدند.
- (۲) در گام بعدی، اندازه دانه ها ریزتر شده، کل چرخ با اندازه ۱۲ میلی متر و کل ریل با اندازه ۸ میلی متر دانه ریزی و المان بندی شدند.
- (۳) در گام سوم، اندازه دانه ها ریزتر شده، کل چرخ با اندازه ۹ میلی متر و کل ریل با اندازه ۶ میلی متر دانه ریزی و المان بندی شدند.
- (۴) در گام چهارم، اندازه دانه ها ریزتر شده، کل چرخ با اندازه ۸ میلی متر و کل ریل با اندازه ۸ میلی متر دانه ریزی و المان بندی شدند.
- (۵) در این مرحله، مش بندی به صورت هدفمند انجام پذیرفت؛ بدین معنا که در نزدیکی محل تماس، که اندازه مش اهمیت بالایی دارد مش ریز و در نقاط دور از مش درشت تر استفاده شد. قطاعی $22/5$ درجه ای از چرخ حول محل تماس در ناحیه طوقه با اندازه ۴ میلی متر دانه ریزی شد. به طور مشابه در مورد ریل، تاج ریل در محل تماس با همان اندازه دانه، دانه ریزی شد. برای سایر نقاط مدل چرخ از اندازه دانه ۱۰ میلی متر و ریل ۶ میلی متر استفاده شد.
- (۶) اندازه المان در قطاع $22/5$ درجه ای از چرخ حول محل تماس و تاج ریل در محل تماس، ۳ میلی متر انتخاب شد. برای سایر نقاط مدل چرخ و ریل نیز از اندازه دانه ۱۰ میلی متر استفاده شده است.
- (۷) در این مرحله، قطاع مشخص شده از چرخ در ناحیه طوقه و تاج ریل در محل تماس با اندازه $2/5$ میلی متر دانه ریزی شده، برای سایر نقاط مدل چرخ و ریل از اندازه دانه ۱۰ میلی متر استفاده شده است.

اتصال با محور است، کوپله شده است. کوپله کردن نقطه با سطح باعث می شود تا نقطه مورد نظر با استفاده از رابط های صلب با سطح مقید گشته، در صورت اعمال بار به آن، بار به سطح منتقل شود.

واگن های آلمان شرقی به عنوان نمونه واگن مورد نظر در این مطالعه از سری واگن های موجود در سیستم مسافری ایران، در حالت مسافرگیری شده دارای وزنی معادل با ۵۱ تن می باشد. [۱۲] لذا با فرض تساوی بار تحمل شده توسط هر یک از چرخ ها، بار اعمالی به هر چرخ در حالت استاتیکی یک هشتم وزن واگن یعنی $6/375$ تن می باشد. در حالت دینامیکی، حداکثر بار وارده $1/5$ برابر وزن واگن در حالت استاتیکی خواهد بود. [۱۳] بنابراین، نهایتاً باری که در حالت دینامیکی توسط هر چرخ تحمل می شود $9/5625$ تن یا معادل $93/808$ کیلونیوتن خواهد بود. این بار در مدل حاضر به نقطه مرجع کوپله شده با سطح داخلی چرخ و در جهت منفی محور x اعمال شده است. درجه آزادی چرخ در دو راستای y و z کاملاً مقید شده و راستای x آزاد گذاشته شده تا بتواند در اثر وزن واگن پایین بیاید. در دو طرف ریل نیز شرایط مرزی کاملاً گیردار اعمال گردیده است.

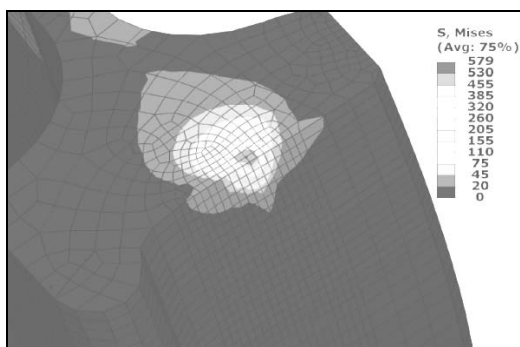
مرحله آخر قبل از انجام تحلیل، مش بندی مدل هندسی است که شاید بتوان آن را مهم ترین و مؤثرترین مرحله در نتایج دانست. المان انتخابی برای المان بندی چرخ و ریل از نوع سه بعدی شش وجهی ۸ گره ای با درونیابی خطی (المان C3D8R) می باشد. تعیین مش بندی مناسب از طریق بررسی همگرایی جواب یکی از الزامات تحلیل به کمک نرم افزارهای اجزاء محدود می باشد. لذا چرخ و ریل به روش های زیر دانه ریزی و مش بندی شده، با توجه به همگرایی جواب و توانایی سخت افزاری در



جدول (۴) - نتایج بررسی همگرایی جواب.

ردیف	تعداد المان (چرخ-ریل)	زمان حل (ساعت)	ماکزیمم تنش وان میسز (MPa)
۱	۷۸۰۰ - ۱۷۴۹۰	۰۰:۱۴	۲۷۷
۲	۱۲۹۴۵ - ۳۴۵۰۰	۰۰:۳۸	۴۸۷
۳	۳۰۰۰۰ - ۷۵۱۴۴	۲:۱۹	۴۶۲
۴	۱۲۳۷۵ - ۱۱۳۳۱۶	۶:۱۴	۳۶۷
۵	۳۴۶۰۸ - ۸۳۲۰۰	۶:۳۰	۵۰۷
۶	۱۵۰۴۸ - ۱۰۱۸۵۰	۷:۱۳	۵۷۹
۷	۱۷۱۶۸ - ۱۱۱۸۳۴	۷:۳۳	۵۶۸
۸	۱۵۰۴۸ - ۶۷۶۲۰	۳:۰۵	۵۷۹

میلی‌متر زیر سطح غلتان چرخ است که در شکل ۷ نشان داده شده است. بیشتر بودن اندازه این تنش از مقاومت تسلیم فولاد چرخ، نشان می‌دهد که چرخ در محل تماس دچار تغییرشکل پلاستیک می‌شود.



شکل (۷) - تغییرات شعاعی تنش وان میسز در ناحیه تماس.

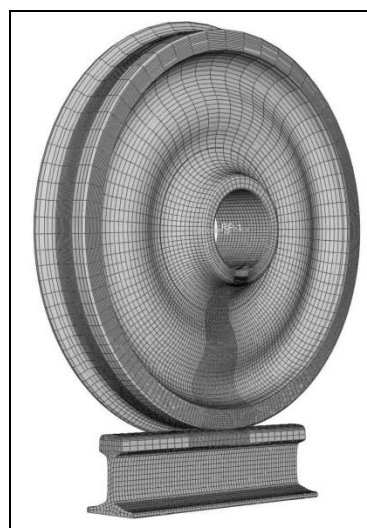
برای محاسبه بیضی هرتز و تنش‌های تماسی بایستی پارامترهای هندسی چرخ و ریل (شعاع انحنای اصلی و عرضی) و خواص مکانیکی آنها (مدول الاستیسیته و ضریب پواسون) مشخص باشند. معادله منحنی چرخ در منطقه غلتش به صورت زیر است [۱۵]:

(۸) برای بررسی تأثیر درشتی مش در نقاط دور از ناحیه تماس چرخ، چرخ در جهت محیطی و در ناحیه خارج از قطاع تماس به صورت افزایشی دانه‌ریزی شده است؛ یعنی برای کمانی به زاویه ۱۱/۲۵ تا ۱۸۰ درجه، به تعداد ۵۰ عدد و با ضریب رشد ۸ دانه‌ریزی انجام شد. محل تماس دانه به اندازه ۳ میلی‌متر و ریل نیز همانند قسمت ۶ دانه‌ریزی صورت گرفت (شکل ۶).

نهایتاً مشخصات حل مسئله از نظر تعداد المان، مدت زمان حل و نیز ماکزیمم تنش وان میسز در جدول ۴ گردآوری شده است. نتایج نشان می‌دهد که مناسب‌ترین اندازه مش برای ناحیه تماس ۳ میلی‌متر بوده و برای نقاط دور از ناحیه تماس اندازه المان فاقد اهمیت می‌باشد. این نتیجه در انطباق با نتیجه مرجع [۱۴] می‌باشد.

نتایج و بحث پیرامون آنها

براساس نتایج تحلیل اجزا محدود، ماکزیمم تنش وان میسز برابر ۵۷۹ مگاپاسکال و محل وقوع آن ۳



شکل (۶) - المان‌بندی هدفمند چرخ و ریل.

جدول (۵) - مقادیر پارامترهای تئوری هرتز برای چرخ و ریل.

E (MPa)	ν	R (mm)	R' (mm)	
205000	0.3	460	-950	چرخ (۱)
206900	0.295	∞	300	ریل (۲)
$F = 93808N$				

همچنین با استفاده از روابط ۱ داریم:

$$\begin{cases} A = \frac{1}{460} + \frac{1}{\infty} = 2.17 \times 10^{-3} \\ B = \frac{1}{-950} + \frac{1}{300} = 2.28 \times 10^{-3} \end{cases}$$

$$\beta = \text{Arc cos} \left(\frac{2.28 - 2.17}{2.17 + 2.28} \right) \cong 88.5^\circ \quad (10)$$

$$m = 0.981, n = 0.984$$

از رابطه (۲)، مقادیر a و b به دست می آیند:

$$\left(\frac{a}{0.981} \right)^3 = \left(\frac{b}{0.984} \right)^3$$

$$= \frac{3 \times 93808 \times (4.42 \times 10^{-6})}{4.45 \times 10^{-3}} \quad (11)$$

$$a = 6.41 \text{ mm}, b = 6.43 \text{ mm}$$

و نهایتاً از رابطه (۵) تنش فشاری ماکزیمم خواهد بود:

$$P_{\max} = \frac{3 \times 93808}{2\pi \times 6.41 \times 6.43} = 1087 \text{ MPa} \quad (12)$$

یکی از بهترین راه‌های صحه‌گذاری حل اجزا محدود در این مورد استفاده از تئوری تماس هرتز است. با توجه به شکل ۹، خروجی تحلیل اجزا محدود قطر کوچک و بزرگ بیضی منطقه تماس را به ترتیب ۱۲/۸ و ۱۸ میلی‌متر، مساحت بیضی را ۱۷۷ میلی‌متر مربع و ماکزیمم تنش فشاری عمودی را ۱۰۴۸ مگاپاسکال نشان می‌دهد. بنابراین، تحلیل الاستوپلاستیک المان محدود، ماکزیمم تنش عمودی فشاری ماکزیمم در محل

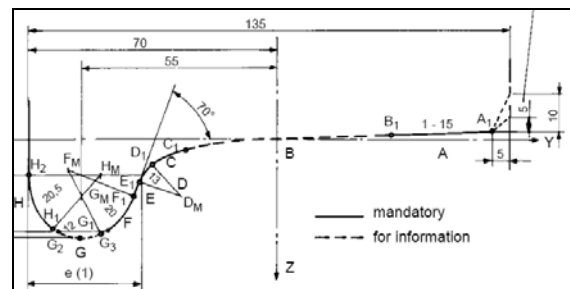
$$\begin{aligned} Z = & -\frac{3.358}{10^2} Y + \frac{1.565}{10^3} Y^2 - \frac{2.810}{10^5} Y^3 \\ & + \frac{5.844}{10^8} Y^4 - \frac{1.562}{10^8} Y^5 + \frac{5.309}{10^{15}} Y^6 \\ & - \frac{5.957}{10^{12}} Y^7 + \frac{2.646}{10^{13}} Y^8 \end{aligned} \quad (6)$$

به طوری که Z محور قائم و Y محور افقی است (شکل ۸). با داشتن معادله یک منحنی، می‌توان شعاع انحنا را در یک نقطه از آن از رابطه زیر حساب نمود:

$$R = \frac{(1 + Z'^2)^{3/2}}{|Z''|} \quad (7)$$

که در آن Z' و Z'' به ترتیب مشتق اول و دوم معادله منحنی نسبت به متغیر مربوطه و R شعاع انحنا است. بنابراین شعاع عرضی انحنای چرخ در فاصله ۸۰ میلی‌متری از لبه داخلی چرخ که نقطه تماس چرخ با ریل در تحلیل اجزا محدود نشان داده شد، خواهد بود:

$$Y = 10, R'_1 = \frac{(1 + Z'^2)^{3/2}}{|Z''|} \Big|_{Y=10} = 950 \text{ mm} \quad (8)$$



شکل (۸) - موقعیت دستگاه مختصات روی پروفیل چرخ [۱۵].

لذا نهایتاً مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه اقطار بیضی هرتز با فرض فولاد R7T به عنوان جنس چرخ و ریل UIC60، به صورت جدول ۵ خواهد بود.

با توجه به معادلات ۳، δ_1 و δ_2 به دست می‌آیند:

$$\delta_1 = \frac{1 - 0.3^2}{2 \times 205000} = 2.22 \times 10^{-6} \quad (9)$$

$$\delta_2 = \frac{1 - 0.295^2}{2 \times 206900} = 2.20 \times 10^{-6}$$

ماکزیم تنش عمودی فشاری و مساحت سطح ناحیه تماس، دیگری افزایش یابد. افزایش مساحت سطح ناحیه تماس و کاهش ماکزیم تنش عمودی فشاری در تحلیل الاستوپلاستیک نسبت به تحلیل الاستیک هرتز در مراجع بسیاری از جمله مرجع [۱۶] گزارش شده است. بنابراین با مقایسه نتایج این دو روش حل و مطالب بیان شده می توان گفت که نتایج حل روش المان محدود از دقت بالایی برخوردار است و دقت آن بیشتر از حل مسئله به کمک تئوری هرتز می باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله، تماس چرخ و ریل با اعمال مشخصات و شرایط کاری سامانه ریلی مسافری ایران به دو روش عددی و تحلیلی ارزیابی شد. برای تحلیل عددی از نرم افزار اجزا محدود آباکوس و برای حل تحلیلی از تئوری هرتز استفاده شد. تماس چرخ با ریل براساس شرایط منطبق بر سامانه ریلی مسافری ایران، منجر به تغییر شکل پلاستیک در سطح چرخ می شود. همچنین حداکثر تنش وان میسز، ۳ میلی متر زیر سطح چرخ واقع می شود که خود دلیلی بر پیدایش ترک های زیرسطحی خواهد بود. مقایسه نتایج حاصل از تئوری هرتز و حل عددی انطباق نسبتاً خوبی را نشان می دهد. علاوه بر این، با توجه به وجود تغییر شکل پلاستیک در محل تماس چرخ با ریل، و فرض الاستیک بودن مواد در تئوری هرتز، حل الاستوپلاستیک عددی دقیق تر و به واقعیت نزدیک تر می باشد.

منابع و مراجع

[۱] ر.، قاجار و ج.، علیزاده کاکلر، «بررسی پدیده خستگی تماس غلتشی در ریل های راه آهن»، فصل نامه جاده ۱۳۸۷، شماره ۶۲، ص ۸۷-۹۶.

تماس چرخ و ریل را در مقایسه با تئوری هرتز با ۳/۷ درصد خطا نشان می دهد. همچنین با مقایسه مساحت بیضی هرتز حاصل از حل تحلیلی (۱۲۹/۵ میلی متر مربع) و حل عددی (۱۷۷ میلی متر مربع) خطای حل عددی نسبت به حل تحلیلی ۲۷ درصد می باشد.



شکل (۹) - بیضی هرتز و تنش عمودی فشاری چرخ در محل تماس آن با ریل

درصد عمده ای از خطای موجود بین نتایج تحلیل المان محدود و تئوری هرتز ناشی از فرض سوم تئوری هرتز یعنی الاستیک باقی ماندن ماده در پدیده تماس است. به عبارت دیگر تئوری هرتز فرض می کند که در نتیجه تماس بین دو جسم، تغییر شکل پلاستیک وجود ندارد، در حالی که نتایج تحلیل المان محدود نشان داد که تحت این شرایط بارگذاری و هندسه و ماده، سطح چرخ در محل تماس اندکی دچار تغییر شکل پلاستیک می شود. با لحاظ نمودن تغییر شکل پلاستیک، با توجه به نمودار تنش- کرنش و به دلیل کمتر بودن E_p نسبت به E ، مقدار ماکزیم تنش عمودی فشاری کاهش و کرنش کل افزایش قابل ملاحظه ای می یابد. افزایش کرنش در حالت تحلیل الاستوپلاستیک منجر به افزایش تغییر شکل و نهایتاً افزایش مساحت ناحیه تماس بین چرخ و ریل می شود. همچنین با توجه به برابری بار وارده به چرخ در دو تحلیل الاستیک هرتز و الاستوپلاستیک المان محدود و نیز استاتیک بودن مسئله، طبیعی است که در صورت کاهش یکی از دو پارامتر



- [۱۲] جدول مشخصات واگن‌های مسافری راه‌آهن ایران، شرکت قطارهای مسافری رجا، ۱۳۸۷.
- [13] UIC 505-2 Leaflet, International Union of Railways, 2nd ed., 2007.
- [۱۴] ر. آشفته، «تخمین عمر چرخ فولادی در راه‌آهن ایران با فرض مدل الاستوپلاستیک»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، اسفند ۱۳۸۶.
- [15] UIC 510-2 Leaflet, International Union of Railways, 4th ed., 2004.
- [16] W. Yan and F. D. Fischer, "Applicability of the Hertz contact theory to rail-wheel contact problems", Applied Mechanics 2000; 70:255-268.

پی‌نوشت‌ها:

- 1- 3D deformable
2- plastic shakedown

- [۲] ج.، علیزاده کاکلر و ا.، فرهنگیان، «بررسی پدیده خستگی تماس غلتشی در چرخ‌های فولادی راه‌آهن»، فصل‌نامه رجا ۱۳۸۶، شماره ۲۴، ص ۸-۱۲.
- [3] J. W. Ringsberg, "Shear mode growth of short surface-breaking of RCF cracks", Wear 2005; 258:955-963.
- [4] A. Makoto, "Development of Finite Element Model for Analysis of Rolling Contact Fatigue Cracks in wheel/rail systems", Quarterly report of RTRI 2007; 48:8-14.
- [5] Y. Liu, B. Stratman and S. Mahadevan, "Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels", International Journal of Fatigue 2006; 28:747-756.
- [6] I. Sebesan, C. Tudorache, M. Dumitriu and M. Spiroiu, "The study of the wheel diameter influence over the loading capacity of a railway vehicle", XVIII International Scientific Conference Transport 2008.
- [7] A. Ekberg, "Rolling contact fatigue of railway wheels- computer modeling and infield data", Division of solid mechanics and CHARMECH 2006.
- [8] UIC 515-1 Leaflet, International Union of Railways, 2nd ed., 2003.
- [9] UIC 861-3 Leaflet, International Union of Railways, 3rd ed., 1991.
- [10] B. Gordon and A. B. Perlman, "Finite element estimation of the residual stresses in roller-straightened rail UIC60 proper", ASME International Mechanical Engineering Congress, Anaheim, CA USA, 2004.
- [11] B. Strnadl and P. Hausild, "Statistical scatter in the fracture toughness and Charpy impact energy of pearlitic steel", Material science and engineering A 2008; 486:208-214.



شرکت ایتراک

مهندسی و ساخت تجهیزات صنایع ایران

طراحی و ساخت تجهیزات صنایع :

به ویژه برای:

- صنایع غذایی و دارویی
- صنایع شیمیایی و پتروشیمی
- تجهیزات کشتارگاهها و صنایع جنبی گوشت
- سیستم‌های انتقال مواد
- تجهیزات خطوط رنگ کارخانه‌ها
- کوره‌های زباله‌سوز و لاشه سوز
- مخازن تحت فشار و راکتورها
- سازه‌های صنعتی و انواع گریتنگ با گالوانیزه گرم

تهران - خیابان ظفر - خیابان نصیری - بلوار سیما جنوبی - شماره ۱۶
صندوق پستی ۱۱۳۶ - ۱۹۳۹۵
تلفن: ۰۲۲۲۶۰۷۴۲ - ۲۲۲۷۲۸۳۹ تلفکس: ۰۲۲۲۶۰۹۹۰
web site: www.itrac-co.com
E-mail: info@itrac-co.com

