

(یادداشت پژوهشی)

مانیتورینگ سایش چرخهای قطار به منظور کنترل و برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیرات*

مسعود انصاری، کارشناس، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
امین اوحدی، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمدعلی رضوانی، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: m_ansari@mail.iust.ac.ir

چکیده

سایش چرخ همواره یکی از مشکلات گریز ناپذیر صنعت ریلی بوده است. جدا از روشهایی که باید برای کاهش سایش اعمال شوند، برنامه ریزی برای تراش، تعویض و خرید بموقع چرخها از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مقاله روشی برای تعیین پیش بینی رفتار سایشی چرخ ارایه می شود که از طریق آن می‌توان مدیریتی بهینه بر سیستم تعمیراتی چرخ حاکم کرد و زمان رسیدن چرخ به حد تراش از قبل پیش بینی شده و نسبت به انجام عملیاتی مانند پروفیل تراشی و یا تعویض چرخ از قبل آمادگی داشت. به علاوه مقطع زمانی‌یی که وسیله نقلیه ریلی یادشده در حالتی که بوژی یدکی در اختیار نیست را می‌توان تعیین کرد. با استفاده از همین روش، نرم افزاری تهیه شده است که تمامی این موارد را به صورت همزمان انجام داده و موارد مقتضی را با سرعت و دقت بسیار به صورت خروجی در اختیار قرار می دهد.

واژه‌های کلیدی: سایش، چرخ قطار، رفتار سایشی، نگهداری، تعمیرات.

1. مقدمه

[3،4]، اصلاح بوژی [5،6]، و ... اشاره کرد. به علاوه همواره کارشناسان این صنعت سعی در شبیه سازی مسأله سایش چرخ به روشهای مختلف داشته‌اند [7،8،9] تا بتوانند از آن طریق سایش چرخ را به نحو مطلوبی کنترل کنند. این شبیه‌سازی‌ها یا به صورت نظری بوده و یا با استفاده از نرم افزارهای مرتبط صورت می‌گیرند [10،11] و بنابراین محدودیت‌های خاصی

مسأله سایش چرخ همواره یکی از مشکلات موجود در صنعت ریلی بوده است، زیرا سایش در موارد مختلفی مانند راحتی مسافر، دینامیک وسیله نقلیه، خروج از خط و ... نقش بسیار مهم و غیر قابل انکاری دارد و از گذشته مهندسان این صنعت سعی در ارایه راهکارهایی برای کاهش سایش داشته‌اند که از آن جمله می‌توان به عملیات روانکاری [1،2]، تعیین پروفیل بهینه چرخ

3. مانتورینگ وضعیت سایش چرخ

نمودارهای ضخامت فلنج - کیلومتر از کارکرد برای هر چرخ، روند تغییرات سایشی چرخ را نشان می‌دهند و در ضمن می‌توان از آنها جهت تعیین خطاهای اندازه‌گیری احتمالی استفاده کرد. نمونه‌ای از این نمودارها در شکل 2 نشان داده شده است.

جدول 1. اطلاعات اندازه‌گیری شده برای چرخ 1 واگن 7

قطار 118 متروی تهران

تاریخ اندازه‌گیری	کیلومتر از کارکرد (Km)	ضخامت فلنج (mm)
81/11/09	74054	28
82/02/22	95118	27
82/07/07	129482	26
82/12/06	149826	25.5
83/03/05	173450	25.1
83/05/26	195990	25

با مشتق‌گیری از نمودار ضخامت فلنج - کیلومتر از کارکرد، نرخ سایش چرخ در ضخامت فلنج‌های مختلف نمایان می‌شود که خود تصویری مفید از روند سایش چرخ ارائه می‌کند، یعنی مشخص می‌شود که نرخ سایش در حال افزایش است یا کاهش شکل 3 نرخ سایش چرخ 4 واگن 1 قطار 204 متروی تهران در ضخامت فلنج‌های مختلف را نشان می‌دهد.

4. تحلیل داده‌ها

هدف از تحلیل داده‌ها، به دست آوردن نرخ سایش چرخ و تعیین رفتار سایشی چرخ است. برای تعیین نرخ سایش کلی چرخ، دو روش مختلف ارائه می‌شود که عبارتند از:

الف) روش میانگین‌گیری

در این روش ابتدا در هر مقطع، نرخ سایش با استفاده از رابطه 1 تعیین می‌شود:

$$W_i = \frac{d_1 - d_2}{l_2 - l_1} \quad (1)$$

که در آن: W_i نرخ سایش چرخ در مقطع i ام، d_1, l_1 ضخامت فلنج و کیلومتر از کارکرد در اندازه‌گیری اول، d_2, l_2 ضخامت

دربدارند. این محدودیت‌ها قابل تعمیم نیستند و نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین نمی‌توان صرفاً از شبیه‌سازی برای بررسی وضعیت سایش چرخ بهره برد. برای دستیابی به این مهم، با توجه به اینکه در صنعت ریلی همواره بازدیدهای دوره‌ای برای چرخ‌ها وجود دارد و چرخ برای رسیدن به حد تراش مورد بررسی قرار می‌گیرد، یکی از بهترین روش‌های کنترل سایش، بررسی رفتار چرخ در مدت بهره‌برداری است. به این معنی که با کنترل منظم وضعیت سایش چرخ‌ها و تهیه بانک اطلاعاتی هدفمند و با تحلیل دقیق داده‌ها می‌توان رفتار سایشی چرخ را پیش‌بینی کرده و تصمیم‌گیری‌های مقتضی به عمل آورد. به این منظور، چنین ایده‌ای در مورد چرخ‌های مورد استفاده در ناوگان موجود در خط 2 متروی تهران مطرح شد تا رفتار چرخ‌های ناوگان در طی یک چرخه زمانی مشخص شود. به این منظور نخست برای هریک از چرخ‌ها، با توجه به اطلاعات قدیم و جدید، یک بانک اطلاعاتی تهیه شد و سپس با پردازش اطلاعات به دست آمده، نهایتاً نرم‌افزاری تهیه شد تا بتوان وضعیت هر یک از چرخ‌ها و روند سایش آنها را پیش‌بینی کرد.

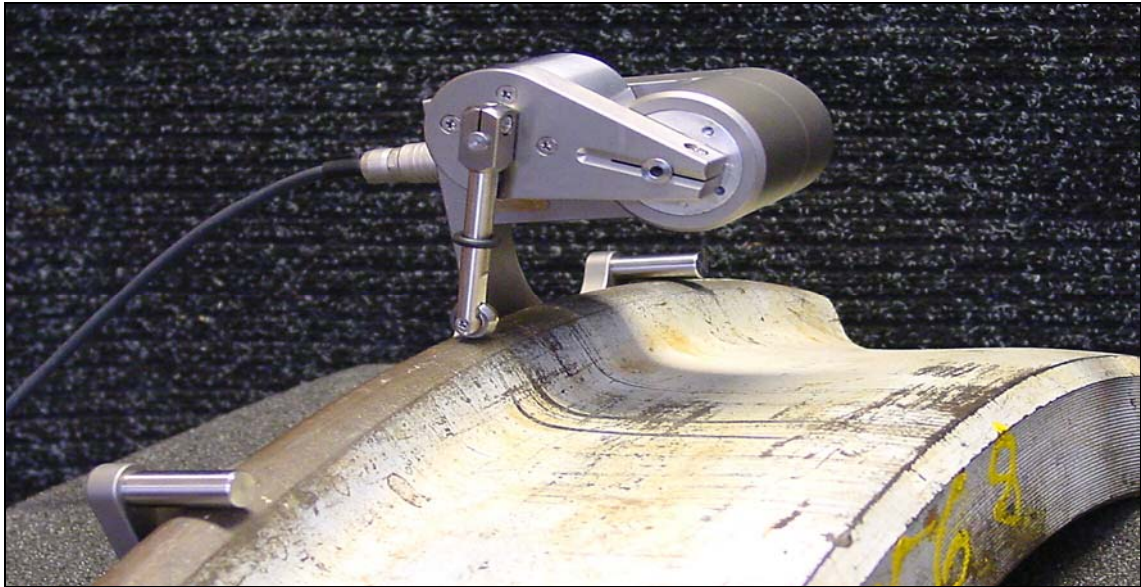
2. ایجاد بانک اطلاعاتی

ابتدا برای هر چرخ با توجه به موقعیت مکانی آن در ناوگان، بانک اطلاعاتی تهیه شد و در آن، ضخامت فلنج چرخ که در بازدیدهای دوره‌ای اندازه‌گیری شده است و کیلومتر از کارکرد مربوطه و تاریخ اندازه‌گیری‌ها نیز ثبت شد. بانک اطلاعاتی براساس مجموعه اطلاعات به دست آمده از خط 2 متروی تهران تهیه شد که شامل بیش از 1500 چرخ بود. این بانک اطلاعاتی شامل اندازه‌گیری‌های گذشته موجود در مجموعه متروی تهران در طی 2 سال و توسط شابلونهای اندازه‌گیری و اندازه‌گیری‌های جدیدی بود که توسط دستگاه پروفیل نگار چرخ (Miniprof) در مدت 6 ماه و به صورت هفتگی به دست آمد. شکل 1 چرخ قطار و دستگاه Miniprof را نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که خط 2 متروی تهران از نوع بدون بالاست و پروفیل ریل در آن UIC 54 و سرعت طراحی این خط 80 Km/h است. در ضمن چرخ‌های ناوگان موجود در این خط از نوع منوبلوک و پروفیل آنها S1002 است. جدول 1 نمونه‌ای از اطلاعات اندازه‌گیری ضخامت فلنج چرخ را نشان می‌دهد.

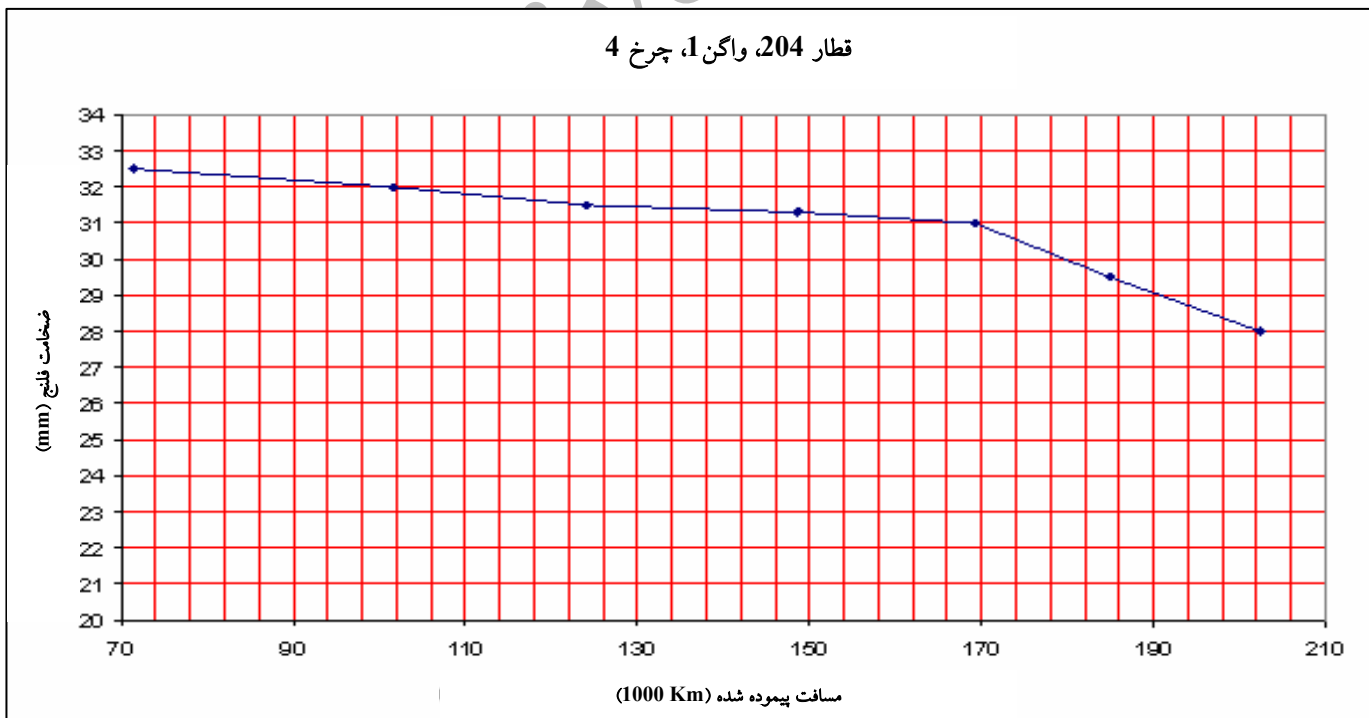
که در آن W_i نرخ سایش کلی چرخ و n تعداد دفعات اندازه‌گیری ضخامت فلنج چرخ است. یادآوری می‌شود در این فرآیند خطاهای اندازه‌گیری باید از محاسبات حذف شوند. برای چرخ 7 واگن 1 قطار 114 متروی تهران اطلاعات اندازه‌گیری شده در جدول 2 آمده است.

فلنج و کیلومتر از کارکرد در اندازه‌گیری بعدی هستند. سپس با استفاده از رابطه 2 نرخ سایش کلی چرخ تعیین می‌شود.

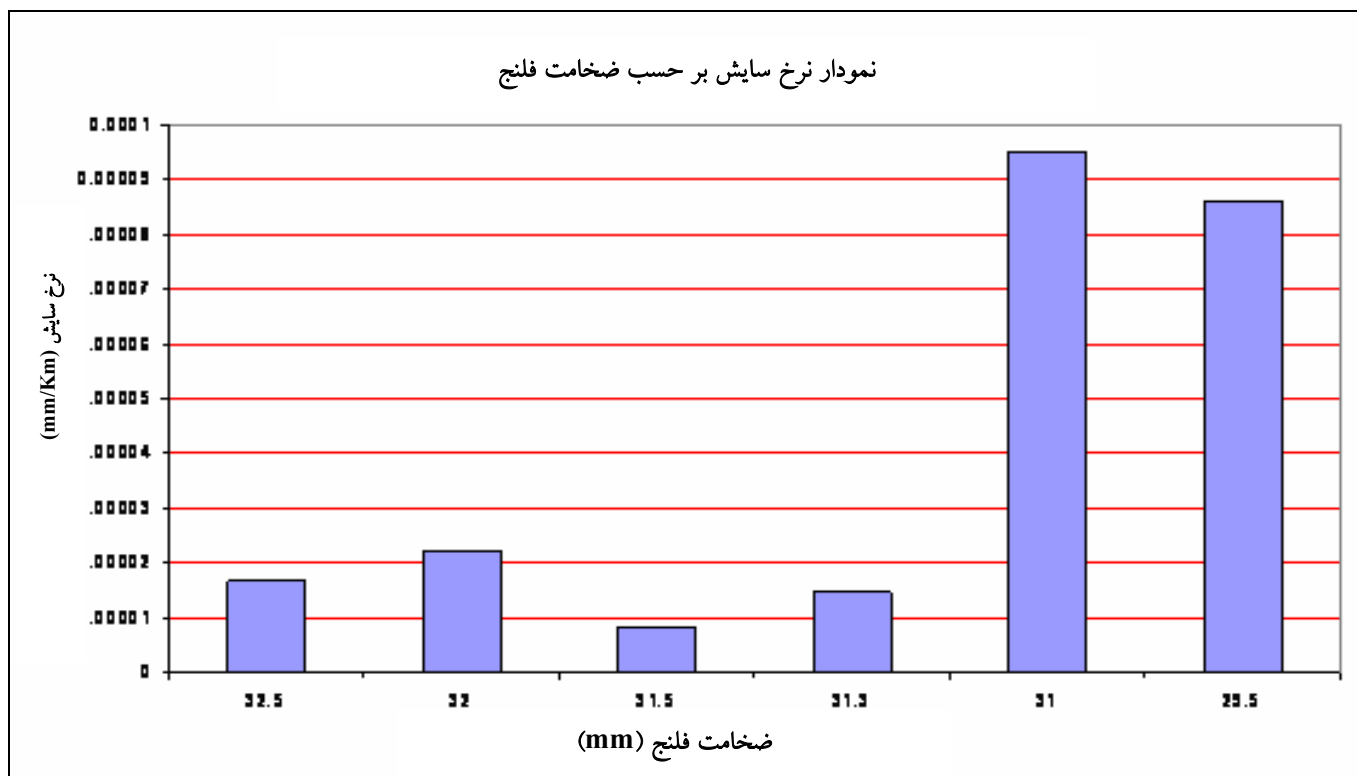
$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} W_i}{n-1} \quad (2)$$



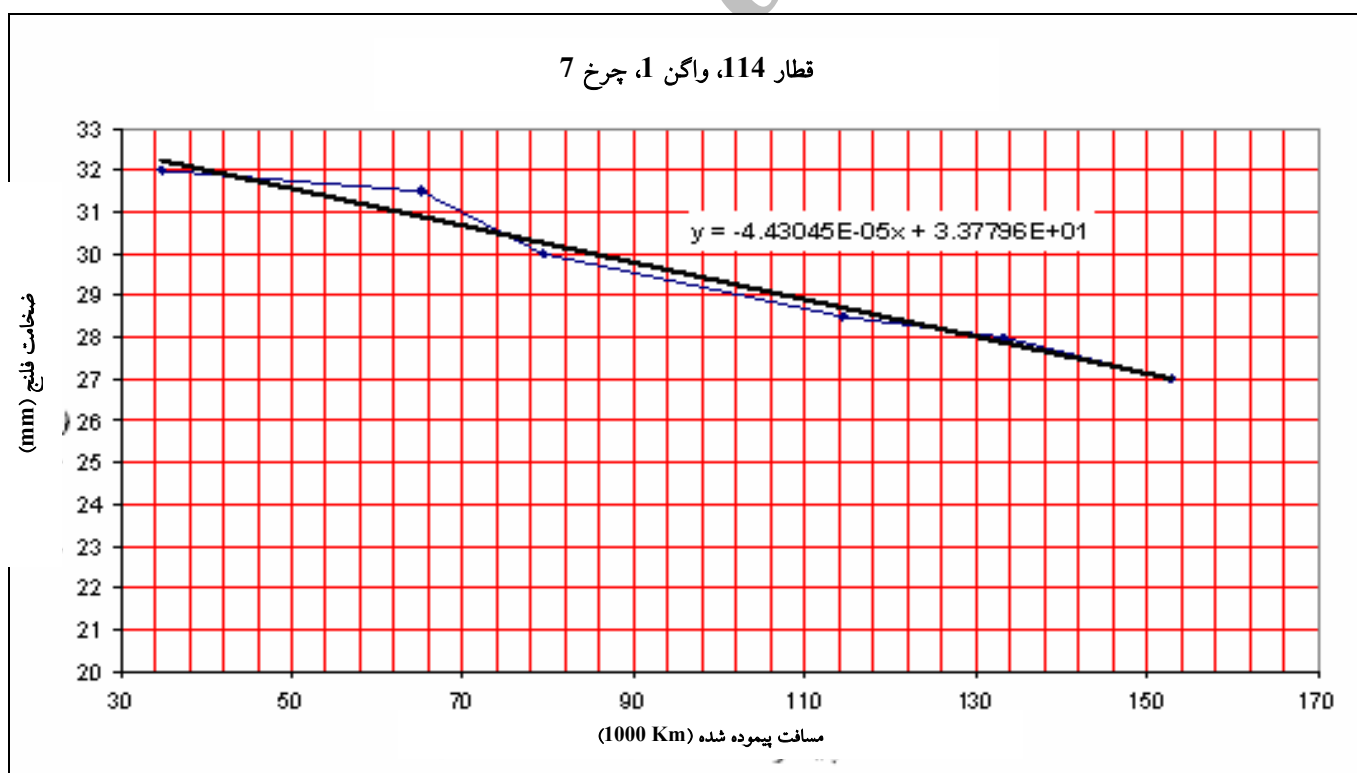
شکل 1. چرخ قطار و دستگاه ثبت پروفیل (Miniprof)



شکل 2. نمودار ضخامت فلنج - کیلومتر از کارکرد برای چرخ 4 واگن 1 قطار 204 متروی تهران



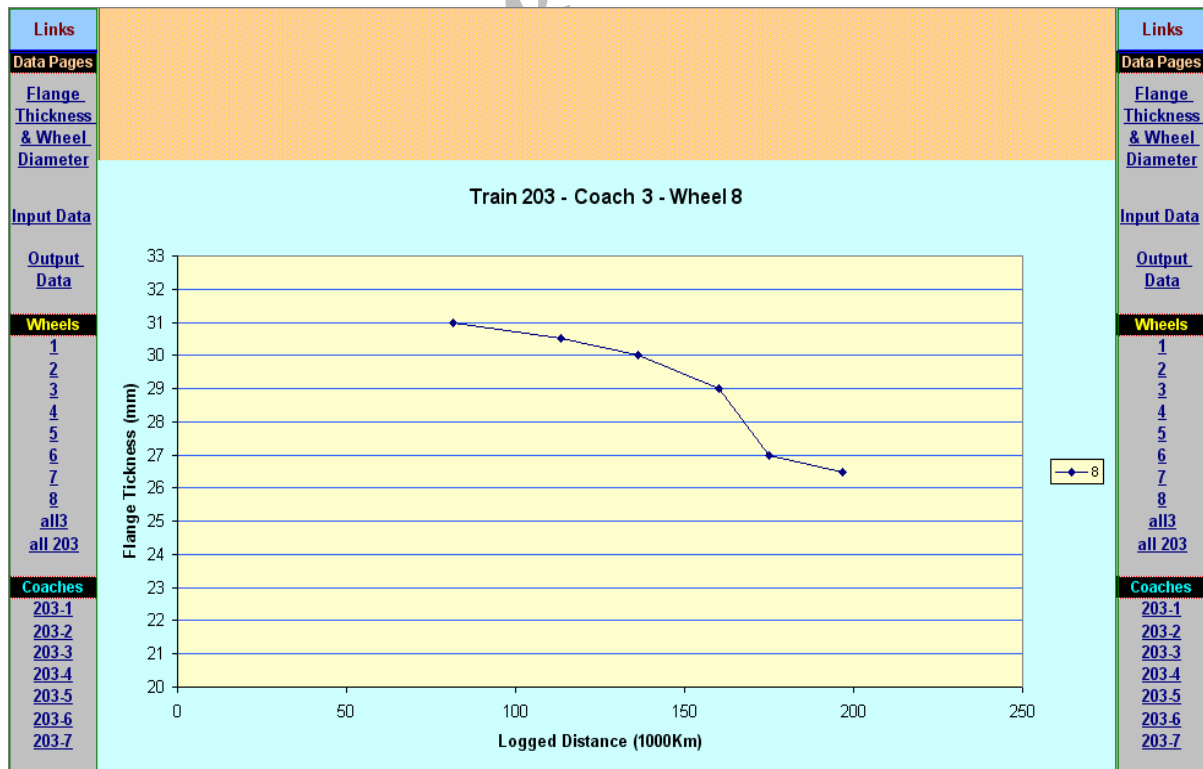
شکل 3. تغییرات نرخ سایش چرخ 4 واگن 1 قطار 204 متروی تهران در ضخامت فلنج های مختلف



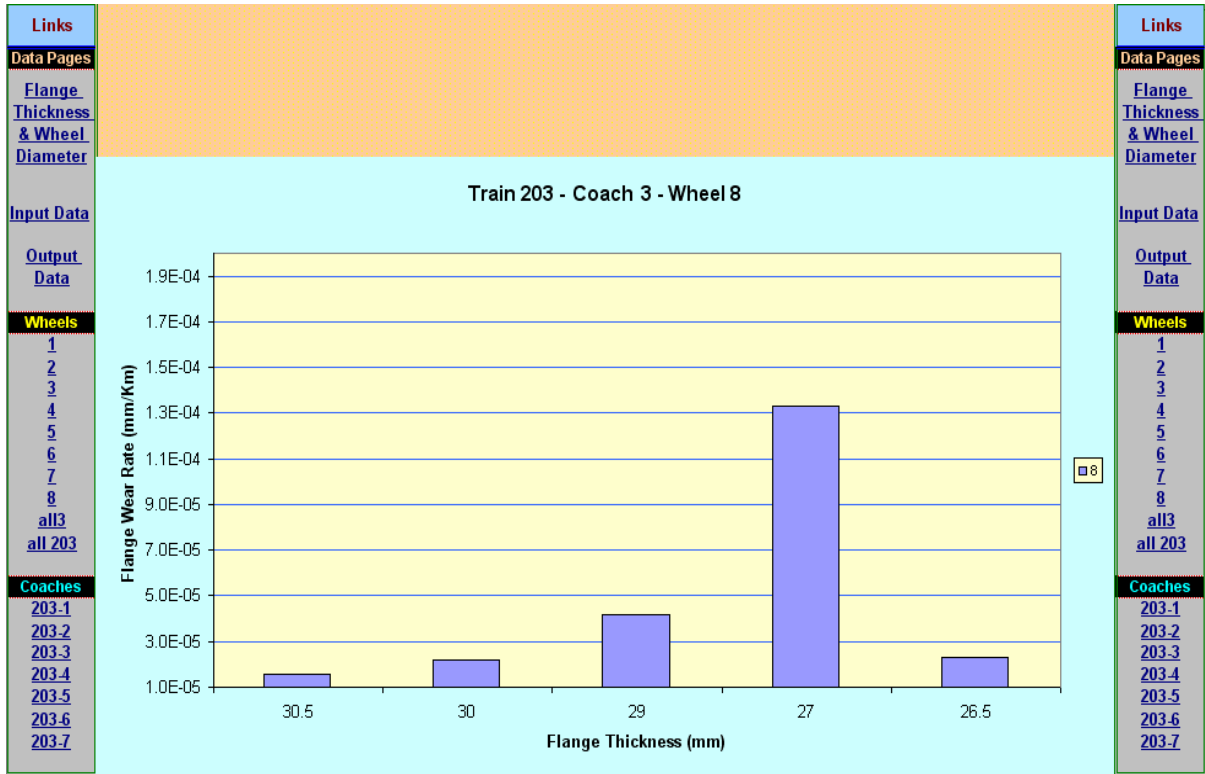
شکل 4. نمودار ضخامت فلنج - کیلومتر از کارکرد و تابع سایشی چرخ 7 واگن 1 قطار 114 متروی تهران

Links	Date	Kilometer	Flange Thickness (mm)								Wheel Diameter (mm)								Links	
			1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8		
Data Pages	81/11/29	124072	24	26	26	28	25	29	27	26									Data Pages	
Flange Thickness & Wheel Diameter	82/4/7	153217	24.5	24	27	28	25	29	27	26									Flange Thickness & Wheel Diameter	
	82/8/21	184233	24	25.5	26	27.5	25	29	25.5	25.5										
	82/9/10	192000	25	24	27.5	26	29	25	26	26										
	82/11/20	207133	25	24	28	26	30	26	26	26										
	83/2/25	229133	24	24.5	26	28	25	29	26	26										
Input Data	83/5/24	249573	30	26	29	29	31	29	30	27									Input Data	
	83/9/28	265305	29	27.5	29.5	29.5	30	29	30.5	26.5										
Output Data	84/1/16	289982	29	29	29	28	30	29	30	27									Output Data	
Wheels																			Wheels	
1																			1	
2																			2	
3																			3	
4																			4	
5																			5	
6																			6	
7																			7	
8																			8	
all1																			all1	
all 107																			all 107	
Coaches																			Coaches	
107.1																			107.1	
107.2																			107.2	
107.3																			107.3	
107.4																			107.4	
107.5																			107.5	
107.6																			107.6	
107.7																			107.7	

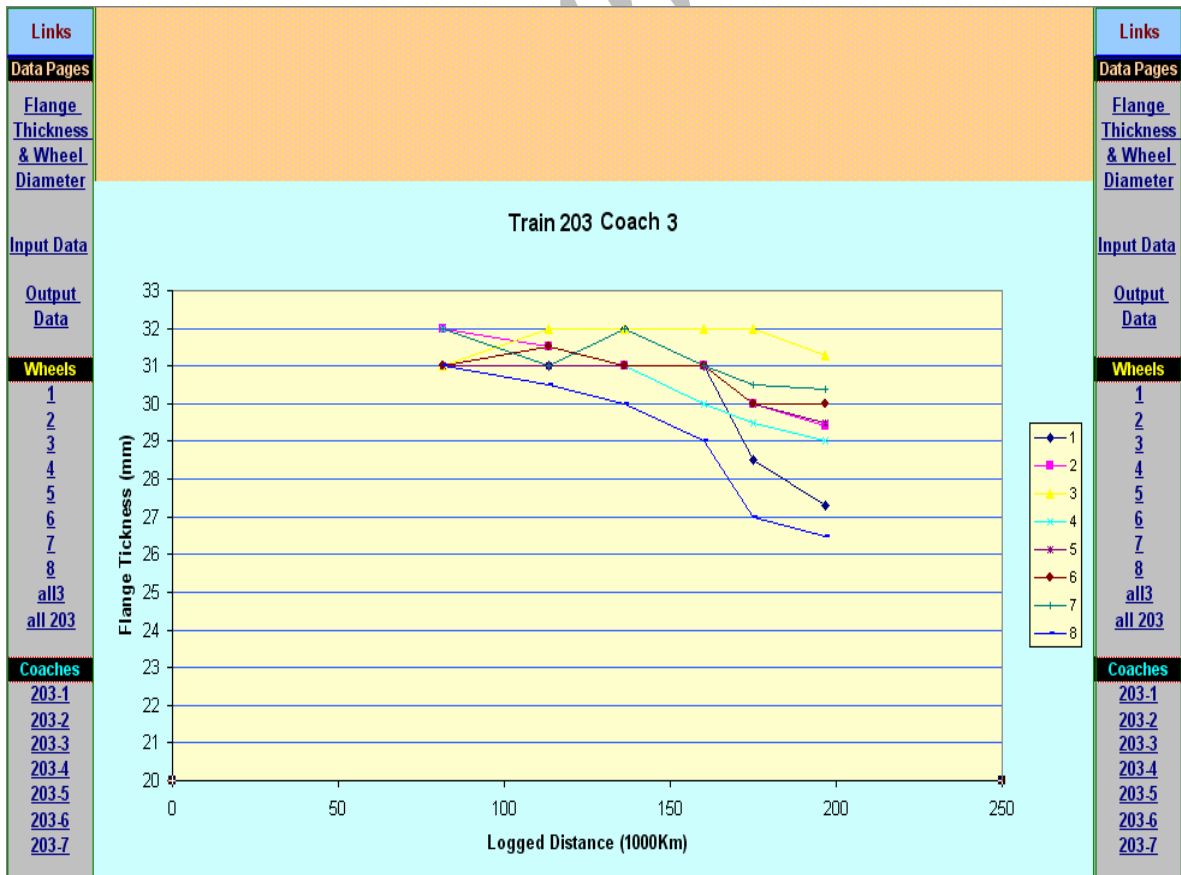
شکل 5. بخش ورودی اطلاعات در نرم افزار جامع تعمیر و نگهداری چرخ قطار



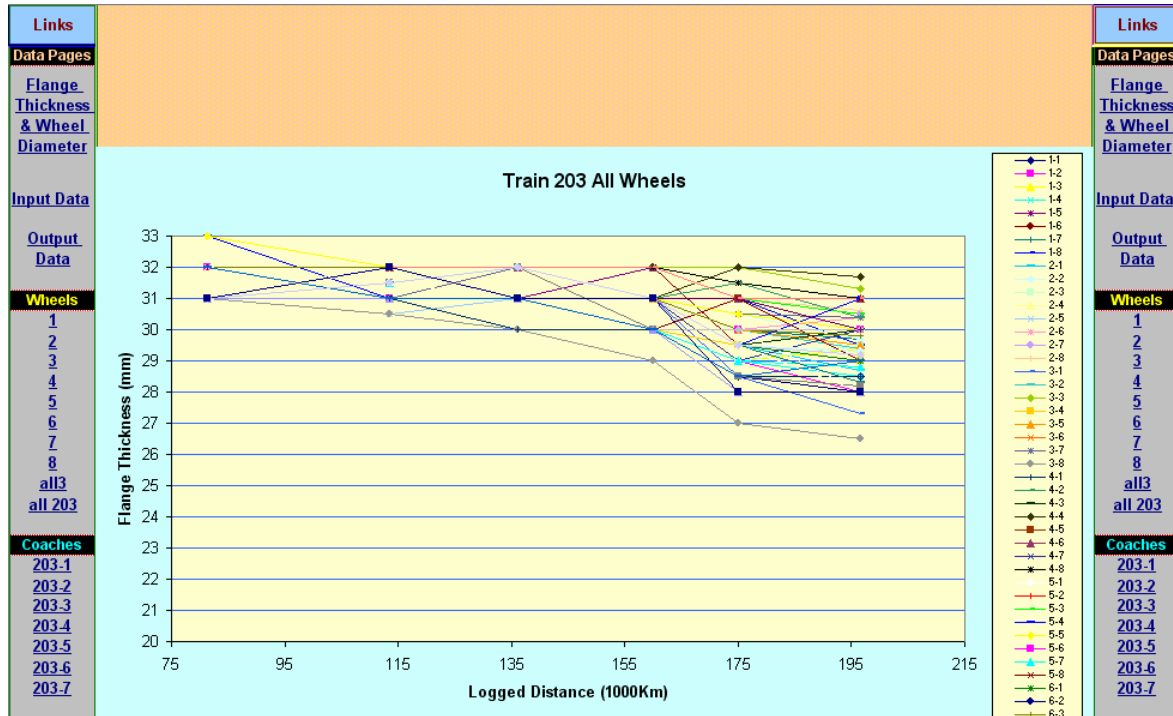
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

- شکل 6. الف) نمودار ضخامت فلنج - کیلومتر از کارکرد برای چرخ 8 واگن 3 قطار 203 متروی تهران
 ب) تغییرات نرخ سایش چرخ 8 واگن 3 قطار 203 متروی تهران
 ج) نمودارهای ضخامت فلنج - کیلومتر از کارکرد چرخهای تمام واگن 8 قطار 203 متروی تهران
 د) نمودارهای ضخامت فلنج - کیلومتر از کارکرد تمام چرخهای قطار 203 متروی تهران

Output Data										
Latest Wheel Flange Wear Rate (mm/Km)										
1	2	3	4	5	6	7	8	Coach	Train	
Previous Wheel Flange Wear Rate (mm/Km)										
1	2	3	4	5	6	7	8	Coach	Train	
Average Wheel Flange Wear Rate (mm/Km)										
1	2	3	4	5	6	7	8	Coach	Train	
Reprofiling Kilometer										
1	2	3	4	5	6	7	8			
Coach			Minimum			Maximum			Average	
Train										
Left Side Wear Rate			Right Side Wear Rate			Difference (mm/Km)			Turning Kilometer	
Maximum Operated Distance (Km)										

شکل 7. قسمتی از خروجی های نرم افزار جامع تعمیر و نگهداری چرخ قطار

5. نرم افزار جامع تعمیر و نگهداری چرخ قطار

از آنجا که تحلیل داده‌ها و پیش بینی وضعیت سایش از اهمیت خاصی برخوردار است، نرم افزاری تهیه شد تا اطلاعات حاصل را بتوان به سرعت پردازش و روند عملیات تعمیراتی را سریعاً کنترل کرد. در این نرم افزار بخشهای مختلفی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

الف) ورودی‌ها

برای تشکیل بانک اطلاعاتی، ورودی‌های نرم افزار شامل نتایج اندازه‌گیری ضخامت فلنج چرخ به همراه کیلومترهای کارکرد و تاریخ اندازه‌گیری است. همچنین برای تعیین وضعیت چرخ حین رسیدن به حد تراش قطر چرخ نیز ثبت می‌شود. شکل 5 نمایی از بخش ورودی (Input) نرم افزار را نشان می‌دهد. البته بسته به نوع خروجی مورد نظر، ورودی‌های دیگر نیز در نظر گرفته می‌شوند.

ب) مانیتورینگ وضعیت سایش و نمودارهای آن

در این نرم افزار به محض ورود اطلاعات هر چرخ، نمودار ضخامت فلنج - کیلومترهای کارکرد و همچنین نمودارهایی که بیانگر روند تغییرات نرخ سایش هر چرخ است ترسیم می‌شوند. در این شرایط علاوه بر این که اپراتور از وضعیت سایش چرخ فوراً یک تصویر کلی و کامل به دست می‌آورد، در صورت وجود خطای اندازه‌گیری می‌تواند به اندازه‌گیری مجدد دستور دهد. شکل 6 نمونه‌هایی از نمودارهای یاد شده را نشان می‌دهد.

ج) خروجی‌های نرم افزار

پس از ورود اطلاعات علاوه بر مانیتورینگ وضعیت سایش موارد زیر نیز قابل دسترس‌اند:

- 1- نرخ سایش هر چرخ در آخرین اندازه‌گیری
- 2- نرخ سایش هر چرخ در اندازه‌گیری قبلی
- 3- نرخ سایش کلی چرخ
- 4- نرخ سایش کلی چرخ‌های هر واگن
- 5- نرخ سایش کلی چرخ‌های هر قطار
- 6- کیلومترهای که باید نسبت به تراش یا تعویض چرخ اقدام شود (در صورت ثبت تاریخ و مشخص بودن

برای این چرخ نرخ سایش در مقاطع مختلف به صورت زیر است:

$$W_1 = \frac{32 - 31.5}{65112 - 34808} = 1.64995 \times 10^{-5}$$

$$W_2 = \frac{31.5 - 30}{79375 - 65112} = 1.05167 \times 10^{-4}$$

$$W_3 = \frac{30 - 28.5}{114417 - 79375} = 4.28058 \times 10^{-5} \quad (3)$$

$$W_4 = \frac{28.5 - 28}{133149 - 114417} = 2.66923 \times 10^{-5}$$

$$W_5 = \frac{28 - 27}{152715 - 133149} = 5.11091 \times 10^{-5}$$

و نرخ سایش کلی عبارتست از:

$$W_t = 4.84548 \times 10^{-5} \text{ mm/Km} \quad (4)$$

ب) روش حداقل مربعات

در این مرحله با استفاده از روش حداقل مربعات بهترین خط عبوری از داده‌ها (نمودار ضخامت فلنج بر حسب مسافت پیموده شده) تعیین می‌شود [12، 13]. ضریب زاویه خط به دست آمده، نرخ سایش کلی چرخ است. در شکل 4 تابع سایشی چرخ 7 واگن 1 قطار 114 متروی تهران آمده است. بنابراین بر طبق این محاسبات نرخ سایش کلی چرخ 7 واگن 1 قطار 114 متروی تهران $W_t = 4.43045 \times 10^{-5}$ است. با توجه به این که حد مجاز ضخامت فلنج چرخ برای انواع چرخ‌های قطار معلوم است [14]، می‌توان ابتدا با استفاده از روش‌های یاد شده، تابع سایشی چرخ را به دست آورد و سپس از طریق آن تعیین کرد که ضخامت فلنج چرخ بدون تغییر شرایط بهره‌برداری در چه کیلومترهای به حد تراش خواهد رسید. به عنوان مثال برای چرخ 7 واگن 1 قطار 114 متروی تهران با استفاده از دو روش یاد شده کیلومترهای که ضخامت فلنج چرخ به 22mm (حد تراش) می‌رسد به صورت زیر است:

روش اول ← 255904 Km

روش دوم ← 265878 Km

همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف میان دو روش کمتر از 4٪ است. البته با احتساب یک ضریب مناسب می‌توان نقش این اختلاف را کم‌رنگ کرد، به گونه‌ای که همواره پیشگویی زودتر از موعد رسیدن ضخامت فلنج چرخ به حد تراش باشد نه دیرتر از آن.

5. Matsumotoa, A., Satoa, Y., Ohnoa, H., Tomeokab, M., Matsumotob, K., Oginob, T. Tanimotoc, M., Okad, Y. and Okanoc, M. (2005) "Improvement of bogie curving performance by using friction modifier to rail/wheel interface verification by full-scale rolling stand test", *Wear*, Vol. 258, pp.1201–1208.
6. Zakharov, S. M. and Zharov, I. A. (2005) "Criteria of bogie performance and wheel/rail wear prediction based on wayside measurements", *Wear*, Vol. 258, pp.1135–1141.
7. Telliskivi, T. and Olofsson, U. (2004) "Wheel–rail wear simulation", *Wear*, Vol. 257, pp.1145–1153.
8. Magel, E., Kalousek, J. and Caldwell, R. (2005) "A numerical simulation of wheel wear", *Wear*, Vol. 258, pp.1245–1254.
9. Braghin, F., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R. S. and Bruni, S. (2006) "A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear", *Wear*, Vol. 260, pp. 890–895.
10. Sladkowski, A. Sitarz, M. (2005) "Analysis of wheel–rail interaction using FE software", *Wear*, Vol. 258, pp.1217–1223.
11. Jendel, T. (2002) "Prediction of wheel profile wear—comparisons with field measurements", *Wear*, Vol. 253, pp.89–99.
12. بابلیان، اسماعیل و مالک نژاد، خسرو (1377) "محاسبات عددی"، تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت.
13. دوست کنفی، یوسف ابراهیم (1381) "محاسبات عددی" تهران: انتشارات بهمن برنا.
14. UIC Code 510-2 (2004) "Trailing stock, conditions concerning the use of wheels of various diameters with running gear of different types".

- کیلومتر از کارکرد روزانه هر قطار می توان این مورد را بهنگام اعلام کرد)
- 7- زمانی که مجموعه تراش دهنده یا تعویض کننده چرخ باید برای عملیات آمادگی داشته باشند.
 - 8- کیلومتری که باید در آن، سمت بهره برداری از قطار معکوس شود (تغییر جبهه قطار)
 - 9- مدیریت تجهیز انبار برای اطمینان از موجودی در زمان نیازمندی
 - 10- خروجیهای اضافی دیگر بسته به نیاز مجموعه قابل دسترس است که در صورت نیاز به ورودی خاص محل ورود اطلاعات خاص هم در نظر گرفته شده است.

سپاسگزاری

از دانشکده مهندسی راه آهن دانشگاه علم و صنعت برای استفاده از پروفیل نگار Miniproff و از همکاری مدیریت شرکت متروی تهران و حومه و تمامی کارکنانی که به نحوی ما را در اندازه گیری و دستیابی به اطلاعات سایش چرخ های یاری کردند، سپاسگزاری می شود.

6. مراجع

1. Tomeokaa, M., Kabea, N., Tanimoto, M., Miyauchi, E. and Nakata, M. (2002) "Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication", *Wear*, Vol. 253, pp.124–129
2. Lu, X., Cotter, J. and Eadie, D.T. (2005) "Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface", *Wear*, Vol. 259, 1262–1269
3. R. Enblom, R. and Berg, M. (2005) "Simulation of railway wheel profile development due to wear-influence of disc braking and contact environment", *Wear*, Vol. 258, 1055–1063.
4. Shevtsov, I. Y., Markine, V. L. and Esveld, C. (2005) "Optimal design of wheel profile for railway vehicles", *Wear*, Vol. 258, pp.1022–1030