



Geometrical Optimization of a Railway Rail Using Modal Analysis to Improve Vibrational and Stress Responses

Mohammad Javad Khoshgoftar^{*1} , Mohammad Sahraei²

1. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

2. M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

Abstract

The passage of trains over railway rails induces significant vibrations in the rail structure—a phenomenon that has gained increasing importance with the development of high-speed rail systems. Severe vibrations can lead to increased fatigue stresses, reduced rail lifespan, and potential structural instability. One effective approach to mitigating these issues is to increase the gap between the natural frequency of the rail and the excitation frequency, thereby preventing resonance. In this study, the geometric dimensions of the railway rail are optimized with the aim of enhancing vibrational performance and reducing fatigue-induced stresses. To achieve this, a combined methodology involving Response Surface Methodology (RSM) and Genetic Algorithm (GA) is employed. A numerical model of the rail is developed and simulated using ANSYS software. The analyses focus on extracting natural frequencies and evaluating stress responses under torsional, bending, and combined vibration modes. The results indicate that increasing the excitation speed leads to a reduction in the optimal width of the rail's bottom flange for similar vibration modes. Additionally, increasing the width of the rail head from 40 to 80mm significantly reduces local stresses. These findings provide a practical basis for intelligent and resilient design of railway rails under dynamic loading conditions.

Keywords

Railway rail

Geometrical optimization

Genetic algorithm

Response surface methodology

Modal analysis

Received: 17.07.2025

Revised: 07.08.2025

Accepted: 10.09.2025

*Corresponding Author

Mohammad Javad Khoshgoftar

Email

m-khoshgoftar@araku.ac.ir

1- Introduction

Increasing highway congestion worldwide has made railways a leading mode of mass, clean, and efficient transportation, fueling demand for faster, more reliable trains. This has driven rail engineers to develop advanced high-speed systems, where track design—particularly rail geometry and vibrational modes (torsional, bending, combined)—directly governs structural strength and dynamic performance. Optimal design thus depends on precise tuning of these parameters.

A typical track consists of concrete sleepers supporting two parallel steel rails via pads, over ballast and sub-ballast layers. Rails bear and

distribute train loads while guiding wheels to supports. Forces transmit through wheel-rail contact to fastenings and substructure, forming resilient panels that resist bending, shear, motion-induced vibrations, and thermal expansion [1].

Extensive prior work includes Zhiping et al. (2019) [2], who tested full-scale low-vibration tracks and demonstrated reduced acceleration, faster decay, and significant ground vibration attenuation; Wei et al. (2017) [3], revealing non-uniform contact forces causing wear; Germonpré et al. (2018) [4], showing track irregularity outweighs stiffness variation in vibration generation; and Ji Jin et al. (2020) [5],

How to Cite this Article:

[1] M. J. Khoshgoftar and M. Sahraei, "Geometrical optimization of a railway rail using modal analysis to improve vibrational and stress responses," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 99–111, 2026. <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535239.1146>. (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

validating tuned impact dampers for broadband rail vibration and noise control.

Geometric optimization via modal analysis is essential for minimizing contact stresses and enhancing durability. Methods include B-spline joint parameterization, genetic algorithms with finite elements to reduce stress concentrations (e.g., at insulated joints), wheel-rail excitation for natural frequency detection, and robust optimization under wear and misalignment—despite persistent challenges from real-world variability.

Resonance poses a critical risk; design must maximize separation between excitation and natural frequencies to prevent catastrophic amplification.

This research investigates the influence of geometric dimensions on rail vibro-stress response under cyclic fatigue loading in domestic rail systems. Using ANSYS finite element modeling integrated with genetic algorithms and response surface methodology, optimal profiles are derived to improve dynamic stability, reduce fatigue stresses, and extend service life.

2- Modeling

Rail design prioritizes material selection for high strength-to-weight ratio to optimize structure and dynamics under severe loads. AISI 1084 stainless steel was chosen for its high manganese content, enabling deep heat treatment that enhances tensile strength, hardness, and fatigue life by reducing surface crack propagation. Chemical, physical, and mechanical properties were input into simulations.

3D geometry was modeled in SolidWorks and imported to ANSYS (Figure 1). Analysis proceeds through applying torsional ($0\text{--}5^\circ$) and bending ($0\text{--}5\text{mm}$) preloads separately and combined, followed by modal analysis to extract natural frequencies, and finally transient vibrational analysis under cyclic loading. Meshing used 32,000 quadratic hexahedral elements via multi-zone method for accuracy and efficiency. Boundary conditions include fixed supports at 60cm intervals (sleeper locations), symmetric constraints, and a fully fixed base assumption for reference consistency.

Optimization variables are upper length a_f and lower length b_f , selected for their strong influence on vibrational behavior. The bi-objective function maximizes $|\omega_n - \omega_e|$ to avoid resonance while minimizing stress σ . Genetic algorithm with RSM converged after 54 (torsional), 20 (bending), and 78 (combined) generations, with no fitness change in 10 consecutive generations as the stopping criterion. Fluctuations after generation 30 remained within 5–15% engineering error. Equal weighting was applied (Figure 2).

Parametric modal analysis in ANSYS varied support stiffness via sleeper velocity to capture real dynamics. Elastic and shear moduli were derived from the global stiffness matrix. Larger rails ($80 \times 140\text{ mm}$) exhibited lower modulus at 200 mm/min—favorable for torsional and bending modes—but axial failure strain dropped from 3.2% to 1.9%, necessitating trade-off consideration in optimization.

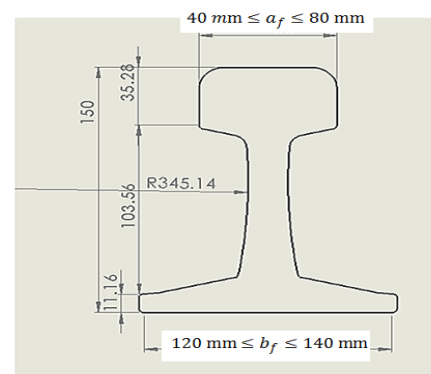


Figure 1: Geometric variables (a_f , b_f)

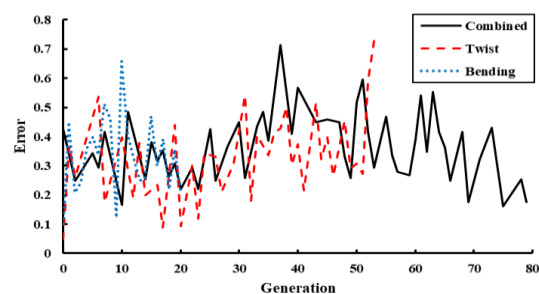


Figure 2: Genetic algorithm convergence trend

3- Results

The genetic algorithm optimization identified optimal rail dimensions of $a_f=80\text{mm}$ and

$b_f=140\text{mm}$, yielding the best vibrational and stress performance. Table 1 lists optimized objective functions—strain-free elastic modulus (E_{NC}), shear modulus (G_{NC}), bending failure strain (FSA), and torsional failure strain (FSF)—at various excitation velocities.

Parametric analysis shows all objectives degrade gradually with increasing excitation velocity. At lower speeds (especially 100mm/min), E_{NC} and G_{NC} reach peak values, alongside maximum failure strains: $FSA = 3.5\%$ and $FSF = 4.7\%$. This reflects superior mechanical behavior in low-frequency ranges.

As velocity increases to 300mm/min , both moduli drop significantly, indicating reduced resistance to cyclic dynamic loads. Failure strains also decline, suggesting elevated fatigue and localized cracking risk under higher frequencies. Responses converge at 250 and 300mm/min , signaling vibrational stabilization at high speeds—a key indicator for long-term fatigue assessment in high-traffic lines.

Overall, larger dimensions within the defined range improve vibrational response and reduce induced stresses, whereas higher excitation velocities degrade mechanical performance and increase structural failure risk. Achieving balance between optimal geometry and dynamic operating conditions is essential for safe rail operation.

Table 1: Optimized objective functions for rail dimensions $80 \times 140\text{mm}$

Excitation Velocity (mm/min)	E_{NC}	G_{NC}	FSA (%)	FSF (%)
100	3.5	4.7	3.5	4.7
150	3.4	4.4	1.9	2.3
200	3.1	4.2	1.8	2.1
250	3.8	3.8	2.2	2.0
300	3.8	3.8	2.0	1.9

Response Surface Methodology (RSM) was employed to model relationships between design variables (a_f , b_f) and objectives. Figure 3 and Figure 4 present 3D response surfaces for frequency difference $\Delta\omega$ and critical stress σ , providing

quantitative and qualitative insight into parameter effects on structural behavior.

Numerical results reveal higher stresses under bending than torsional excitation, but combined loading maximizes $\Delta\omega$, enhancing resonance resistance—a significant mechanical advantage. Increasing upper rail width from 40 to 80mm substantially reduces critical stress due to enhanced bending stiffness and moment of inertia. Lower width variation has minimal stress impact but gradually increases $\Delta\omega$, prioritizing vibrational safety.

RSM surfaces demonstrate smoothness and continuity, crucial for successful metaheuristic convergence and stable optimization paths. These models offer deep understanding of dynamic response under variable loads and serve as a reliable foundation for design optimization.

Bi-objective RSM modeling simultaneously targeted maximizing $\Delta\omega$ to prevent resonance and minimizing σ . Genetic algorithm optimization on these models analyzed dynamic responses at 100 , 200 , and 300mm/min excitation velocities.

Results indicate optimal upper width decreases with rising velocity, reflecting reduced need for high bending inertia and increased vibrational sensitivity at speed. This suggests smaller profiles may enhance dynamics at high velocities, provided stress remains acceptable. Fitness values cluster near 0.7 , indicating balanced trade-off between conflicting objectives and reliable convergence.

Torsional mode produces lower stress but weaker frequency separation. Combined mode, despite higher stress, achieves maximum $\Delta\omega$, promoting greater dynamic stability. Final geometry and loading selection depend on design priorities—resonance avoidance or stress control. For critical 300mm/min operation, combined mode with $\Delta\omega=38.71\text{ Hz}$ delivers optimal vibrational safety despite elevated stress, making it preferable in high-risk scenarios.

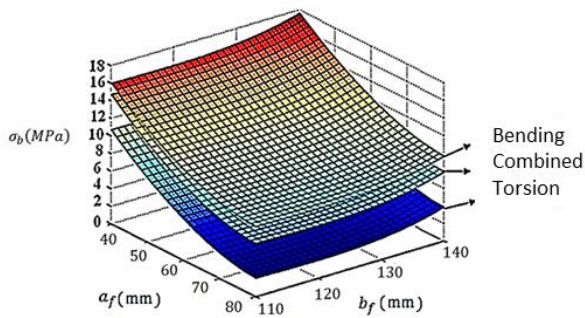


Figure 3: 3D RSM surface for $\Delta\omega$

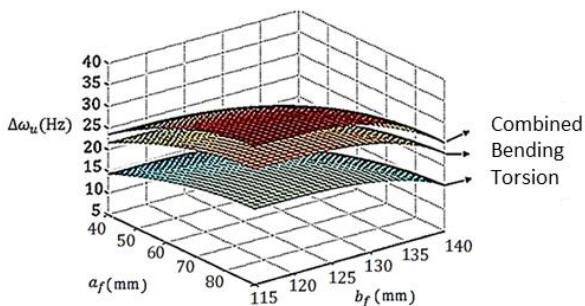


Figure 4: 3D RSM surface for critical stress σ

4- Conclusion

This study conducted modal and vibrational analysis of railway rails to investigate and optimize dynamic behavior using numerical modeling in ANSYS. A precise 3D CAD model was developed and transferred to the finite element environment to evaluate the impact of geometric dimensions on vibrational characteristics.

Analyses covered three primary vibrational modes—torsional, bending, and combined—computing natural frequencies and their differences with excitation frequencies. This frequency gap served as a critical indicator for assessing resonance risk. Critical region stresses, particularly at supports, were also monitored to ensure they remained below the yield strength of the selected material (AISI 1084 steel).

Multi-objective optimization was performed using a genetic algorithm, simultaneously maximizing the natural-excitation frequency difference while enforcing a stress constraint to prevent exceeding the material's allowable yield limit.

Numerical and optimization results revealed that optimal geometric dimensions vary with loading

conditions, vibrational mode, and excitation velocity; no single cross-section is universally ideal. However, the systematic integration of modeling, modal analysis, and multi-objective optimization yielded a robust range of recommended dimensions, enabling designs with enhanced vibrational performance and improved safety margins.

Overall, these findings provide a scientific foundation for optimization-driven rail design in the rail industry, contributing to reduced vibrational effects, extended service life, and superior dynamic performance under real-world operating conditions.

5- References

- [1] M. A. Sayeed and M. A. Shahin, "Design of ballasted railway track foundations using numerical modelling. Part I: Development," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 55, No. 3, pp. 353–368, Mar. 2018, doi: [10.1139/cgj-2016-0633](https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0633) (in Persian)
- [2] Z. Zeng, Z. Wang, N. Zhang, Y. Wang, and J. Zhang, "Experimental investigation on the vibration reduction characteristics of an optimized heavy-haul railway low-vibration track," *Shock and Vibration*, Vol. 2019, Art. No. 1539564, Jun. 2019, doi: [10.1155/2019/1539564](https://doi.org/10.1155/2019/1539564)
- [3] Z. Wei, I. Nuñez, A. Nuñez, R. Dollevoet, and Z. Li, "Wheel–rail impact at crossings: Relating dynamic frictional contact to degradation," *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 12, No. 4, Art. No. 041017, Jul. 2017, doi: [10.1115/1.4035649](https://doi.org/10.1115/1.4035649)
- [4] M. Germonpré, L. Van Hoorebeeck, and G. Degrande, "Contributions of longitudinal track unevenness and track stiffness variation to railway induced vibration," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 437, pp. 292–307, Dec. 2018, doi: [10.1016/j.jsv.2018.09.027](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.09.027)
- [5] J. Jin, L. Jiang, M. Sun, X. Li, and Y. Wen, "Development of tuned particle impact damper for reduction of transient railway vibrations," *Applied Acoustics*, Vol. 169, Art. No. 107487, Dec. 2020, doi: [10.1016/j.apacoust.2020.107487](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107487)



بهینه‌سازی ابعاد ریل راه‌آهن با استفاده از تحلیل مودال به منظور بهبود پاسخ ارتعاشی-تنشی

محمدجواد خوش‌گفتار^۱، محمد صحرایی^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

عبور قطار از روی ریل موجب ایجاد ارتعاشات گسترده در سازه ریل می‌شود؛ پدیده‌ای که با توسعه قطارهای سریع‌السیر، اهمیت بیشتری یافته است. ارتعاشات شدید می‌توانند منجر به افزایش تنش‌های خستگی، کاهش عمر مفید ریل و بروز ناپایداری‌های سازه‌ای شوند. یکی از راهکارهای مؤثر برای مقابله با این چالش، افزایش فاصله بین فرکانس طبیعی ریل و فرکانس تحریک به‌منظور جلوگیری از وقوع پدیده تشدید است. در این پژوهش، بهینه‌سازی ابعاد هندسی ریل راه‌آهن باهدف ارتقای پاسخ ارتعاشی و کاهش تنش‌های خستگی مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به این هدف، از ترکیب روش تحلیل سطح پاسخ (RSM) و الگوریتم ژنتیک استفاده شده و مدل عددی ریل در محیط نرم‌افزار ANSYS طراحی و شبیه‌سازی شده است. تحلیل‌ها شامل استخراج فرکانس‌های طبیعی و ارزیابی رفتار تنشی در موده‌های ارتعاشی پیچشی، خمشی و ترکیبی بوده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که افزایش سرعت تحریک باعث کاهش عرض بهینه مقطع پایینی ریل در موده‌های یکسان می‌شود. همچنین، افزایش عرض مقطع بالایی از ۴۰ به ۸۰ میلی‌متر موجب کاهش محسوس تنش‌های موضعی می‌گردد. این نتایج می‌تواند مبنایی برای طراحی هوشمندانه و مقاوم ریل‌های راه‌آهن در مواجهه با بارهای دینامیکی فراهم سازد.

کلمات کلیدی

ریل راه‌آهن
بهینه‌سازی هندسی
الگوریتم ژنتیک
روش سطح پاسخ
تحلیل مودال

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

*نویسنده مسئول

محمدجواد خوش‌گفتار

ایمیل

m.khoshgoftar@araku.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش ترافیک سنگین در بزرگراه‌های بسیاری از کشورهای جهان باعث شده است که راه‌آهن به یکی از محبوب‌ترین وسایل حمل‌ونقل عمومی تبدیل شود. به همین دلیل، در سالیان اخیر تقاضا برای قطارهای سریع‌تر و کارآمدتر به طور چشمگیری افزایش یافته است. حمل‌ونقل ریلی به دلیل قابلیت ارائه حمل‌ونقل انبوه، پاک و کارآمد، به‌عنوان وسیله‌ای دوستدار محیط‌زیست موردتوجه قرار گرفته است. این تقاضای روبه‌افزایش، مهندسان و کارشناسان فعال در صنعت ریلی را به طراحی و ساخت قطارهای مدرن و سریع‌السیر ترغیب کرده است. طراحی مهندسی سازه ریل راه‌آهن شامل پارامترهایی است که با حصول آن‌ها، سازه می‌تواند بهترین عملکرد ارتعاشی را از خود نشان دهد. در خصوص ریل راه‌آهن، پارامترهایی مانند ابعاد هندسی و موده‌های ارتعاشی (پیچشی، خمشی و ترکیبی) از عوامل مهمی هستند

که بر استحکام و رفتار ارتعاشی تجهیزات مرتبط تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین، شرط طراحی بهینه سازه، انتخاب دقیق این پارامترها است. مسیر راه‌آهن، مطابق شکل ۱، شامل تراورس بتنی، دو ریل که به تراورس‌ها متصل می‌شوند، بالاست و زیر بالاست است. ریل‌ها از فولاد نورد شده ساخته می‌شوند و به صورت موازی روی ریل‌بندها نصب می‌گردند. بخش اصلی خط‌آهن، ریل است که دو وظیفه تحمل بار قطار و هدایت آن به سمت تکیه‌گاه‌ها را بر عهده دارد. بار ناشی از وزن قطار و حرکت آن از طریق چرخ‌ها به ریل و سپس از ریل به پارسنگ‌ها (بالات) و زیرسازی تراورس منتقل می‌شود. ریل و تراورس به وسیله مجموعه بست ریل به یکدیگر متصل شده و سازه‌ای واحد به نام بست خط یا پنل را تشکیل می‌دهند. این سازه به گونه‌ای طراحی شده است

How to Cite this Article:

[1] M. J. Khoshgoftar and M. Sahraei, "Geometrical optimization of a railway rail using modal analysis to improve vibrational and stress responses," Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 99-111, 2026. <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535239.1146>. (in Persian)



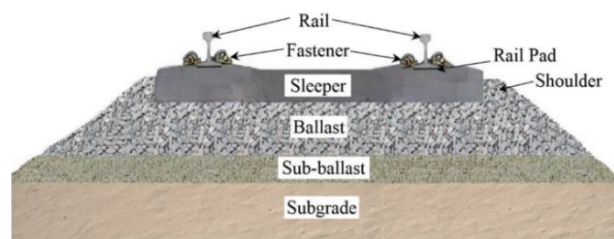
تجربی قابلیت کاهش ارتعاش آن را بررسی کردند. دمپر طراحی شده شامل مجموعه‌ای از توده‌های جاذب دینامیکی تنظیم‌شده فولادی، پایه‌های لاستیکی و توپ‌های ضربه‌ای آهنی است که با گیره‌های فنری به ریل متصل می‌شود. نتایج نشان داد دمپر قابلیت کاهش ارتعاش در یک باند فرکانسی خاص را با میرایی اضافی در محدوده فرکانس باند پهن دارد.

مسعودی نژاد و همکاران (۲۰۱۹) [۶] به بررسی نحوه شروع و انتشار ترک‌ها و مشخصات هندسی آن‌ها پرداختند. آن‌ها رفتار رشد ترک خستگی را با روش‌های عددی و تجربی مطالعه کردند، آزمایش‌های رشد ترک و سختی خستگی انجام دادند و مطالعات فراکتوگرافی روی نمونه‌های شکسته انجام دادند. با استفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی، رشد ترک خستگی تحت میدان تنش مدل‌سازی شد و نرخ رشد ترک با مدل پارسی اصلاح شده تخمین زده شد. نتایج عددی تطابق خوبی با داده‌های تجربی داشت. ترک‌های عرضی بیشتر در ناحیه اتصال تار به سر ریل مشاهده شد.

فنگ و همکاران (۲۰۲۱) [۷] مدل کوپلی از مسیر بدون بالاست و وسیله نقلیه را با در نظر گرفتن ترک با روش اجزای محدود ارائه دادند. آن‌ها از عناصر تیر اویلر ترک‌خورده برای مدل‌سازی دال بتنی و لایه پشتیبان با ترک‌های عرضی استفاده کردند و روش تکراری برای تخمین رشد ترک خستگی بتن تحت بار دینامیکی قطار پیشنهاد کردند. نتایج نشان داد با افزایش سختی ملات، جابه‌جایی عمودی و ضریب شدت تنش نوک ترک کاهش می‌یابد و عمق اولیه ترک در لایه پشتیبان تأثیر مهمی بر عمر خستگی ترک دارد. روش تعاملی ارائه شده توانایی پیش‌بینی عمر باقیمانده اعضای بتنی ترک‌خورده را دارد. همچنین، فرکانس تحریک بار قطار تأثیر قابل توجهی بر نرخ رشد ترک دارد.

بهینه‌سازی هندسه ریل‌های راه‌آهن از طریق تحلیل مودال نقش حیاتی در بهبود عملکرد ارتعاشی و تنشی دارد. این فرآیند شامل تنظیم هندسه ریل و محل اتصال‌ها به منظور کاهش تنش‌های تماس و افزایش دوام سازه می‌باشد. استفاده از تحلیل مودال باعث درک بهتر رفتار دینامیکی سیستم‌های ریلی تحت شرایط کاری شده و منجر به اصلاحات طراحی مؤثرتر می‌گردد. روش‌های مختلف بهینه‌سازی شامل تنظیم پارامترهای هندسی مانند به‌کارگیری پارامترسازی-B اسپیلین در محل اتصال‌ها است که می‌تواند فشارهای تماس نرمال و سایش را به طور قابل توجهی کاهش دهد و عمر مفید نقاط اتصال را افزایش دهد [۸، ۹]. همچنین، بهینه‌سازی شکل پروفیل سر ریل با استفاده از

که در برابر تنش‌های خمشی، برشی، ارتعاشات ناشی از حرکت قطارها و همچنین تنش‌های حرارتی محیط مقاومت کند.



شکل ۱: برش عرضی از یک راه‌آهن معمول به همراه بالاست و لایه‌های

زیرین [۱]

در مطالعات پیشین، تحقیقات گسترده‌ای در حوزه رفتارهای ارتعاشی ریل و اجزای مسیر انجام شده است. ژیبینگ و همکاران (۲۰۱۹) [۲] رفتار ارتعاشی دو نوع سیستم مسیر کم ارتعاش را برای راه‌آهن سنگین بررسی کردند. آن‌ها ابتدا دو مدل مسیر کم ارتعاش در مقیاس کامل شامل ریل، بست، بلوک یاتاقان، چکمه لاستیکی، دال مسیر و پایه فونداسیون را بر اساس نقشه‌های طراحی ساختند. سپس پاسخ‌های ارتعاشی اجزای مختلف مسیر تحت تحریک ضربه یک مجموعه چرخ را اندازه‌گیری و ویژگی‌های حوزه زمانی هر جزء مسیر را با منحنی‌های تاریخچه زمانی ارتعاش به دست آوردند و مقایسه کردند. توزیع دامنه فرکانس نیز تحلیل شد و عملکرد کاهش ارتعاش با نتایج تحلیل زمان-فرکانس به طور جامع ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که مسیر کم ارتعاش جدید دارای شتاب ارتعاش کمتر، مدت زمان کوتاه‌تر ارتعاش، فرکانس ارتعاش پایین‌تر اجزای مسیر و اثر قابل توجه کاهش ارتعاش بر روی زمین است.

وی و همکاران (۲۰۱۷) [۳] سایش و تغییر شکل پلاستیک ناشی از برخورد چرخ به ریل در تقاطع راه‌آهن را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند. نتایج نشان داد نیروهای تماس عمودی و مماسی روی ریل هنگام ضربه ناهمگن هستند.

گرمونپره و همکاران (۲۰۱۸) [۴] نقش ناهمواری مسیر طولی و تغییر سفتی مسیر را در ایجاد ارتعاشات راه‌آهن بررسی کردند. آن‌ها مطالعه موردی یک خط راه‌آهن در فورت سوئد را انجام دادند و ارتعاشات میدان آزاد محاسبه شده را با داده‌های اندازه‌گیری شده تطبیق دادند. مشخص شد سهم تغییر سختی مسیر در نیروهای برهم‌کنش و ارتعاشات میدان آزاد بسیار کمتر از سهم ناهمواری مسیر طولی است.

جی جین و همکاران (۲۰۲۰) [۵] دمپر ضربه‌ای تنظیم‌شده‌ای برای کاهش صدای غلتش و ارتعاشات ریل پیشنهاد دادند و به‌صورت

۲- مدل‌سازی

در طراحی ریل‌های راه‌آهن، یکی از مهم‌ترین پارامترها انتخاب جنس مناسب است که باید علاوه بر استحکام کافی، وزن نسبتاً کمی داشته باشد تا بتواند به بهینه‌سازی ساختاری و عملکرد دینامیکی سیستم کمک کند. در این راستا، اولین گزینه استفاده از جنس فولادی است که نسبت استحکام به وزن بالایی دارد و به همین دلیل در بسیاری از پروژه‌های مهندسی راه‌آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه ریل‌ها تحت بارگذاری‌های شدید دینامیکی و ارتعاشی قرار دارند، انتخاب آلیاژ مناسب می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش دوام و کاهش هزینه‌های نگهداری داشته باشد.

یکی از روش‌های مرسوم برای کاهش وزن و افزایش مقاومت، استفاده از مقاطع تقویتی یا به‌کارگیری فولادهای زنگ‌نزن با خواص مکانیکی بالا است. در این پژوهش، فولاد زنگ‌نزن AISI 1084 برای شبیه‌سازی ریل راه‌آهن انتخاب شده است. این نوع فولاد به دلیل ترکیبات شیمیایی خاص، به‌ویژه درصد بالای منگنز، قابلیت عملیات حرارتی عمیق‌تری دارد که منجر به افزایش خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی و سختی می‌شود. علاوه بر این، این عملیات حرارتی عمیق موجب کاهش احتمال گسترش ترک‌های سطحی در طول زمان بهره‌برداری می‌شود که یکی از عوامل کلیدی در افزایش عمر خستگی ریل‌ها است.

مشخصات ترکیبات شیمیایی، خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد AISI 1084 به‌عنوان ورودی‌های اصلی برای تعریف ماده در مدل‌های شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای ساخت مدل هندسی سه‌بعدی ریل، از نرم‌افزار سالیدورکس استفاده شده است و پس از تکمیل مدل، به نرم‌افزار انسیس جهت انجام تحلیل‌های عددی منتقل گردیده است. شکل ۲، مدل سه‌بعدی ریل راه‌آهن را به همراه نحوه مش‌بندی و انواع المان‌های به کار رفته نمایش می‌دهد.

تحلیل عددی مدل در سه مرحله اصلی صورت می‌گیرد: ابتدا اعمال پیش‌بارهای خمشی و پیچشی، سپس انجام تحلیل مودال به‌منظور استخراج فرکانس‌های طبیعی و در نهایت تحلیل گذرا و ارتعاشی جهت بررسی پاسخ دینامیکی سازه تحت بارگذاری‌های متناوب. پیش‌بارهای اعمال شده شامل بار پیچشی در محدوده صفر تا ۵ درجه و پیش‌بار خمشی در محدوده صفر تا ۵ میلی‌متر است که به‌صورت جداگانه و ترکیبی بر روی ریل وارد می‌شوند [۸]. پس از اعمال این پیش‌بارها، تحلیل مودال برای تعیین فرکانس‌های طبیعی

الگوریتم‌های ژنتیک و روش اجزاء محدود، باعث کاهش تمرکز تنش‌ها به ویژه در نواحی حساس مانند اتصالات عایق شده می‌شود [۱۰]. در بخش تحلیل مودال، شناسایی فرکانس‌های طبیعی ریل با استفاده از تحریکات چرخ-ریل به عنوان روشی نوین، امکان تشخیص ویژگی‌های ارتعاشی و نقص‌های احتمالی در سیستم‌های ریلی پرسرعت را فراهم می‌آورد [۱۱]. علاوه بر این، بهینه‌سازی مقاوم با در نظر گرفتن تغییرات پروفیل چرخ و انحراف مسیر، تضمین می‌کند که طرح‌های بهینه تحت شرایط واقعی عملکرد مناسبی داشته باشند [۱۲]. تحلیل اجزاء محدود در تماس چرخ و ریل نیز به فهم بهتر توزیع تنش‌ها و تحلیل عمر خستگی کمک کرده است [۱۳]. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، پیاده‌سازی عملی این روش‌ها همچنان با چالش‌هایی در مواجهه با شرایط عملیاتی و بارگذاری متغیر روبرو است.

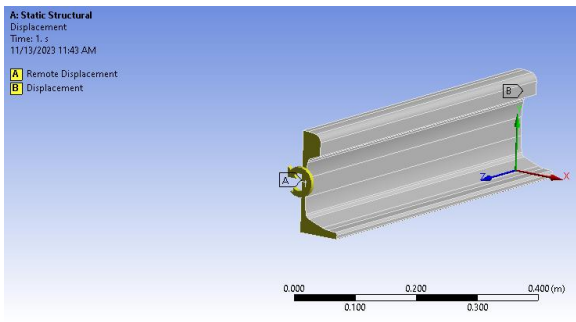
باتوجه به اهمیت بالای این مسائل، طراحی بهینه ریل راه‌آهن جهت جلوگیری از وقوع پدیده تشدید بسیار حیاتی است. ریل‌ها به دلیل شرایط کاری خاص خود، مستعد بروز تشدید هستند که در آن ارتعاشات سازه‌ای در فرکانس‌های طبیعی به حد بحرانی می‌رسد و منجر به خرابی‌های جدی می‌شود. در طراحی بهینه، تلاش بر این است که اختلاف بین فرکانس تحریک و فرکانس طبیعی ریل به حداکثر مقدار ممکن برسد تا سازه در شرایط ایمنی پایدار کار کند.

هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر ابعاد هندسی بر رفتار ارتعاشی-تنشی ریل راه‌آهن و بهینه‌سازی هندسی آن تحت بارگذاری متناوب خستگی در صنایع ریلی کشور است. با استفاده از روش‌های عددی و الگوریتم ژنتیک همراه با روش سطح پاسخ، مدلی از ریل در نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود تا ابعاد بهینه‌ای که موجب بهبود عملکرد دینامیکی و کاهش تنش‌های خستگی می‌شود، استخراج گردد.

باتوجه به پیچیدگی و چندبعدی بودن مسائل بهینه‌سازی هندسی در ریل‌های راه‌آهن، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته ضروری است. الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، به دلیل توانایی جستجو در فضای وسیع طراحی، مقابله با بهینه‌سازی چندهدفه و جلوگیری از گیرافتادن در بهینه‌های محلی، انتخاب مناسبی برای این پژوهش بوده است. این الگوریتم با ترکیب روش سطح پاسخ، امکان تحلیل دقیق‌تر و کارآمدتر پارامترهای مؤثر بر رفتار ارتعاشی و تنشی ریل را فراهم می‌آورد. بدین ترتیب، رویکرد پیشنهادی می‌تواند به ارائه راهکارهای بهینه جهت بهبود عملکرد دینامیکی ریل و افزایش عمر مفید آن کمک نماید.

می‌شوند و نقطه مرکز به کل سطح کوپل شده است تا انتقال بار به شکل یکنواخت و واقعی صورت گیرد. درجات آزادی در فاصله ۶۰ سانتی‌متر در طول ریل که محل قرارگیری تراورس است، به طور کامل بسته شده‌اند تا شرایط مرزی صحیح شبیه‌سازی شود. همچنین، مدل به صورت متقارن ساخته شده و درجات آزادی تقارن در سطح مخالف بارگذاری بسته شده‌اند تا شرایط مرزی مدل کامل و منطبق بر واقعیت باشد.

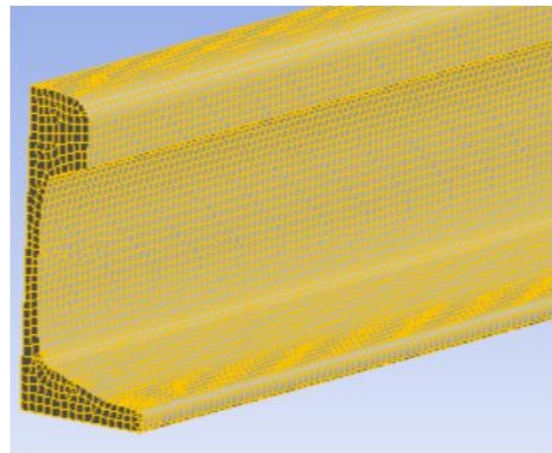
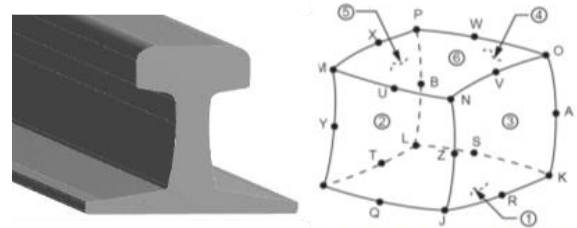
با توجه به طبیعت الاستیک بستر ریل، در این پژوهش فرض اتصال کاملاً مفید به منظور ارائه مدل مرجع و حذف ابهامات ناشی از تغییرات سختی تکیه‌گاه‌ها انتخاب شده است. این فرض همچنین امکان مقایسه مستقیم با شرایط آزمایشگاهی مشابه را فراهم می‌کند و بنابراین، علی‌رغم سادگی فرض، دقت نتایج تحلیل فرکانس‌های طبیعی حفظ شده است.



شکل ۳: بارگذاری پیچشی به سطح انتهایی ریل

متغیرهای هندسی مهمی که برای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند، طول قسمت بالایی ریل a_f و طول قسمت پایینی ریل b_f هستند که در محدوده‌های مشخص شده قرار دارند (شکل ۴). این دو پارامتر به دلیل تأثیر چشمگیر بر رفتار ارتعاشی ریل انتخاب شده‌اند. برای ارزیابی اثر این پارامترها، تحلیل مودال در مراحل پیشین انجام شده است. هرچند روش سطح پاسخ (RSM) از نظر تئوریک محدود به دو پارامتر نیست و توانایی مدل‌سازی چندمتغیره را دارد، در این تحقیق به منظور افزایش دقت مدل‌سازی و جلوگیری از پیچیدگی بیش‌ازحد مدل، تنها دو پارامتر هندسی مؤثر و بحرانی انتخاب شده‌اند. تابع هدف به گونه‌ای تعریف شده است که اختلاف فرکانس‌های طبیعی و فرکانس تحریک (رابطه ۱) بیشینه شود تا احتمال تشدید ارتعاشات کاهش یابد و همزمان تنش‌های بوجود آمده در ریل (رابطه ۲) کمینه گردد. بنابراین مسأله بهینه‌سازی به صورت دو هدفه فرمول‌بندی و به شکل رابطه (۳) بیان می‌شود که در آن ω_n فرکانس طبیعی، ω_{ex} فرکانس تحریک و σ_b تنش در ریل می‌باشد.

انجام می‌شود و سپس بارگذاری ارتعاشی متناوب اجرا می‌شود تا رفتار دینامیکی و پاسخ ارتعاشی ریل مورد ارزیابی قرار گیرد.

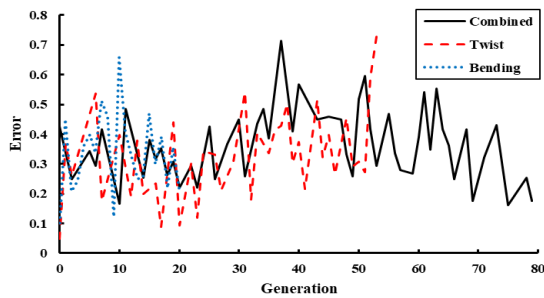


شکل ۴: نمای سه‌بعدی دقیق هندسه ریل راه‌آهن مدل‌سازی شده به همراه مدل مش‌بندی شده آن

یکی از نکات کلیدی در مدل‌سازی عددی و تحلیل‌های مبتنی بر روش اجزای محدود، دقت و کیفیت مش‌بندی است. در این مطالعه، به دلیل نیاز به دقت بالا در نتایج و هم‌زمان کاهش زمان محاسباتی به منظور اجرای تعداد زیاد شبیه‌سازی‌های بهینه‌سازی، تصمیم گرفته شد تا از المان‌های مربعی استفاده شود. این المان‌ها علاوه بر دقت مناسب، بهینه‌تر از المان‌های مثلثی بوده و زمان محاسباتی کمتری دارند. مش‌بندی با استفاده از ۳۲۰۰۰ المان مربعی انجام شده است که تعادل خوبی بین دقت و سرعت حل ایجاد می‌کند (شکل ۲).

هندسه، موقعیت گره‌ها و سیستم مختصات المان‌های سازه‌ای مثلثی در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، نرم‌افزار انسیس قابلیت انتخاب روش‌های مختلف شبکه‌بندی را دارد که با توجه به پیچیدگی هندسه ریل و نیاز به دقت بالا، روش چند ناحیه‌ای با المان‌های شش‌وجهی مکعبی برای شبکه‌بندی انتخاب شده است. این روش امکان ایجاد شبکه سازمان‌یافته و با کیفیت را فراهم می‌کند که در دقت نتایج و پایداری محاسبات تأثیر مستقیم دارد.

بارگذاری و شرایط مرزی نیز به صورت دقیق تعریف شده‌اند. مطابق شکل ۳، بار پیچشی و خمشی به انتهای ریل و در مرکز سطح وارد



شکل ۵: روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در ریل راه‌آهن درصد خطا محاسباتی برای مودهای مختلف

در ادامه، تحلیل پارامتریک رفتار ارتعاشی ریل با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود انسیس مودال انجام شده است. شرایط تکیه‌گاهی در تحلیل‌ها متغیر در نظر گرفته شده است؛ زیرا تأثیر قابل‌توجهی بر فرکانس‌های طبیعی و رفتار ارتعاشی ریل دارد و نمی‌توان آن را ثابت فرض کرد. این شرایط متغیر مرتبط با تکیه‌گاه‌های بخش‌های اتصال ریل به تراورس است و بر اساس سرعت جابه‌جایی تراورس تعریف می‌شود تا بتوان تخمینی دقیق‌تر از فرکانس‌ها و پاسخ ارتعاشی سازه به دست آورد.

شکل ۶ و شکل ۷ نمودارهای تغییرات مدول الاستیک و مدول برشی ریل راه‌آهن با ابعاد هندسی مختلف و سرعت‌های مختلف تحریک فرکانسی را نمایش می‌دهند. مدول‌ها و صلبیت‌ها بر اساس روش ماتریس کل محاسبه شده‌اند؛ به این صورت که ماتریس سختی وابسته به پارامترهای نرمال و برشی در طول کل سازه محاسبه و با تبدیل نیرو به تنش و جابه‌جایی به کرنش، به صورت پارامتری از فرکانس استخراج می‌شوند. این فرآیند به صورت خودکار توسط نرم‌افزار انسیس انجام می‌شود. کاهش مقدار مدول الاستیک در سرعت ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه برای ریل با ابعاد ۱۴۰×۸۰ نشان‌دهنده رفتار مطلوب در مودهای پیچشی و خمشی است. در تمامی سرعت‌های بارگذاری، ریل با ابعاد بزرگ‌تر نسبت به ابعاد کوچک‌تر عملکرد بهتری دارد، اما افزایش ابعاد از ۱۲۰×۴۰ به ۱۴۰×۸۰ باعث کاهش کرنش شکست محوری از ۳/۲ درصد به ۱/۹ درصد شده که این کاهش ممکن است در برخی شرایط نامطلوب باشد و لازم است در مباحث بهینه‌سازی لحاظ شود.

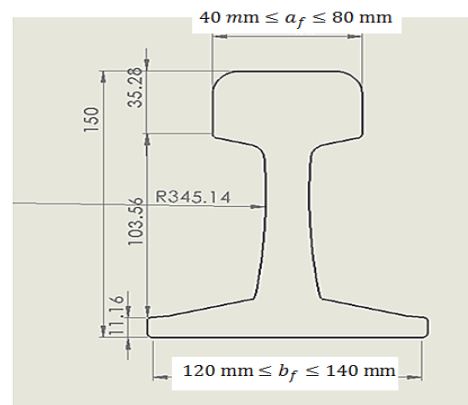
$$\Delta\omega_u(a_f, b_f) = \omega_n - \omega_{ex} \quad (1)$$

$$\sigma_b(a_f, b_f) \quad (2)$$

$$\text{Maximize}(\Delta\omega_u(a_f, b_f) - \sigma_b(a_f, b_f))$$

$$40 \text{ mm} \leq a_f \leq 80 \text{ mm} \quad (3)$$

$$120 \text{ mm} \leq b_f \leq 140 \text{ mm}$$



شکل ۴: متغیرهای هندسی ریل برای بهینه‌سازی

فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تا رسیدن به همگرایی یا اتمام تکرارهای تعیین‌شده ادامه دارد. معیار توقف همگرایی، عدم تغییر مقدار بهترین برازندگی در ۱۰ نسل متوالی است. این الگوریتم در مودهای پیچشی، خمشی و ترکیبی به ترتیب پس از ۵۴، ۲۰ و ۷۸ تکرار به معیار توقف رسیده است. روند تغییرات الگوریتم در شکل ۵ نمایش داده شده است. اگرچه در بخش‌هایی از نمودار، به‌ویژه پس از نسل ۳۰، نوساناتی مشاهده می‌شود، این تغییرات در محدوده خطای مهندسی قابل قبول (۵ تا ۱۵ درصد) قرار داشته و شیب تغییرات پاسخ به مرور کاهش یافته است که این درصد بیانگر اختلاف نسبی بین بهترین پاسخ‌های هر نسل و مقدار بهینه نهایی است که در محدوده مهندسی قابل قبول باقی می‌ماند. بنابراین، روند کلی الگوریتم بیانگر دستیابی به پاسخ‌های پایدار و نزدیک به بهینه است. وزن‌دهی بین اختلاف فرکانس و تنش بحرانی در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت مساوی اعمال شده است.

با افزایش تدریجی سرعت تحریک تا حدود ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در هر دو مدول (الاستیک و برشی) مشاهده می‌شود که این افت می‌تواند ناشی از کاهش توانایی ریل در مقاومت در برابر بارگذاری‌های دینامیکی تکرارشونده باشد. همچنین، رفتار کرنش شکست نیز در این بازه کاهش نشان داده و به مقادیر کمتری رسیده است که نشان‌دهنده افزایش احتمال بروز پدیده‌های خستگی و شروع ترک‌های موضعی در اثر تحریک‌های فرکانسی بالاتر است.

از سوی دیگر، روند تغییرات مقادیر در سرعت‌های تحریک ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه همگرا بوده و اختلاف چشمگیری در مقادیر نهایی دیده نمی‌شود. این همگرایی رفتاری حاکی از تثبیت پاسخ ارتعاشی ریل در سرعت‌های بالا است که می‌تواند به‌عنوان معیاری جهت تخمین عملکرد پایدار سازه در شرایط بحرانی مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع همچنین می‌تواند به تحلیل خستگی بلندمدت ریل در خطوط با تردد سریع کمک شایانی کند.

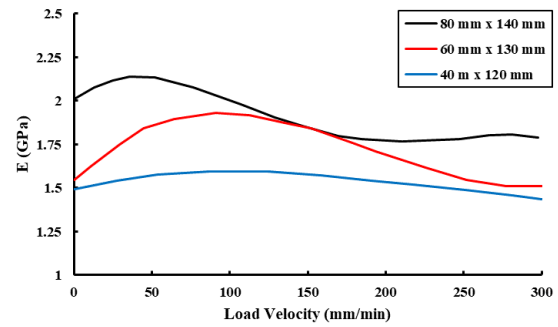
در مجموع، نتایج این بخش به‌وضوح نشان می‌دهد که افزایش ابعاد هندسی در محدوده تعریف‌شده موجب بهبود رفتار ارتعاشی و کاهش تنش‌های ایجاد شده در ریل می‌شود، درحالی‌که افزایش سرعت تحریک، منجر به افت پاسخ‌های مکانیکی شده و احتمال بروز تخریب ساختاری را بالا می‌برد؛ لذا دستیابی به یک تعادل میان ابعاد هندسی بهینه و شرایط بهره‌برداری دینامیکی برای عملکرد ایمن ریل از اهمیت بالایی برخوردار است.

جدول ۱: نتایج مرتبط با توابع هدف پس از حل مسأله بهینه‌سازی ابعاد

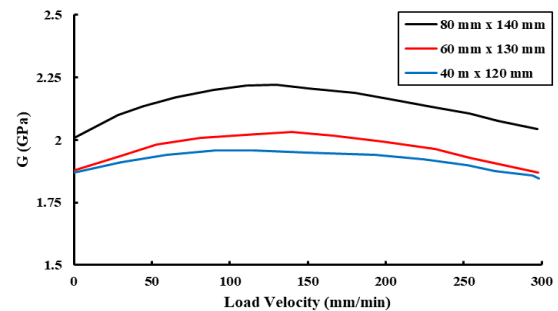
ریل $(a_f, b_f) \times 80 (mm) \times 140 (mm)$

سرعت اعمال تحریک (mm/min)	E_{NC} (GPa)	G_{NC} (GPa)	FSA (%)	FSF (%)
۱۰۰	۱/۲	۲/۱	۳/۵	۴/۷
۱۵۰	۱/۹	۲/۳	۳/۴	۴/۴
۲۰۰	۱/۸	۲/۱	۳/۱	۴/۲
۲۵۰	۲	۲	۳	۳/۸
۳۰۰	۲	۱/۹	۲/۸	۳/۸

در راستای تحلیل دقیق و مدل‌سازی پاسخ دینامیکی ریل راه‌آهن، از روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology) برای بررسی ارتباط میان متغیرهای طراحی و توابع هدف استفاده شد.



شکل ۶: نمودار تغییرات مدول الاستیک ریل راه‌آهن با ابعاد هندسی و تحریک فرکانسی با سرعت‌های مختلف

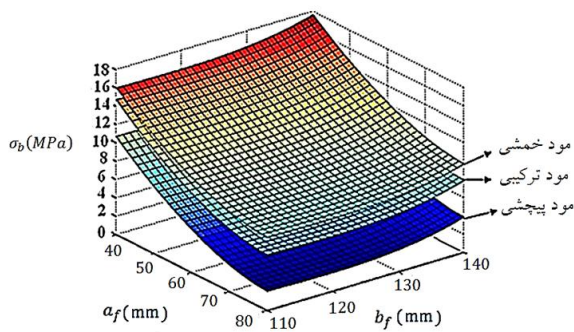


شکل ۷: نمودار تغییرات مدول برشی ریل راه‌آهن با ابعاد هندسی و تحریک فرکانسی با سرعت‌های مختلف

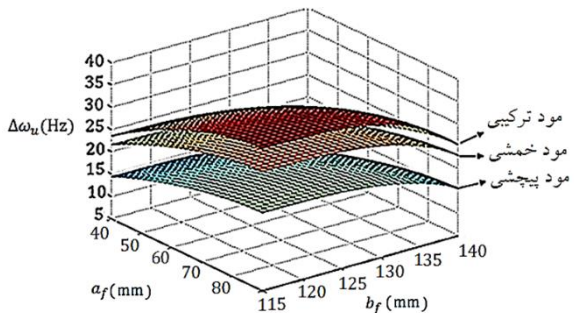
۳- نتایج

پس از اجرای فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهترین ترکیب ابعاد هندسی ریل راه‌آهن برابر با $a_f=80$ و $b_f=140$ میلی‌متر به دست آمد که منجر به بهینه‌ترین پاسخ از منظر رفتار ارتعاشی و مقاومت تنشی گردید. جدول ۱ مقادیر بهینه‌شده توابع هدف شامل مدول الاستیسیته بدون کرن (ENC)، مدول برشی بدون کرنش (GNC)، کرنش شکست در مود خمشی (FSA)، و کرنش شکست در مود پیچشی (FSF) را برای ابعاد مذکور در سرعت‌های مختلف تحریک فرکانسی ارائه می‌دهد.

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل پارامتریک نشان می‌دهد که با افزایش سرعت تحریک، هر چهار تابع هدف دچار افت تدریجی می‌شوند. به‌ویژه، در بازه سرعت‌های پایین‌تر (به‌ویژه ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه)، مقادیر ENC و GNC در بیشترین مقدار خود ظاهر شده‌اند. در همین سرعت، بیشترین مقادیر برای کرنش شکست در هر دو مود نیز به ثبت رسیده است؛ به‌طوری‌که کرنش شکست محوری (FSA) برابر با ۳/۵ درصد و کرنش شکست پیچشی (FSF) برابر با ۴/۷ درصد اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد مکانیکی مطلوب ریل در محدوده فرکانسی پایین‌تر است.



شکل ۸: ترسیم مدل ۳ بعدی حاصل شده از روش سطح پاسخ برای تابع هدف $\sigma_b(a_f, b_f)$ بر حسب متغیرهای طراحی a_f و b_f



شکل ۹: ترسیم مدل سه‌بعدی حاصل شده از روش سطح پاسخ برای تابع هدف $\Delta\omega_u(a_f, b_f)$ بر حسب متغیرهای طراحی a_f و b_f

در این بخش، مدل‌سازی ریاضی مبتنی بر روش سطح پاسخ برای بررسی و تحلیل هم‌زمان دو تابع هدف انجام گرفته است. هدف اول، بهینه‌کردن اختلاف فرکانس طبیعی و فرکانس تحریک $\Delta\omega_u(a_f, b_f)$ با هدف کاهش احتمال وقوع پدیده تشدید در ریل، و هدف دوم، کمیته‌سازی تنش بحرانی $\sigma_b(a_f, b_f)$ در سازه بوده است. این توابع هدف بر حسب متغیرهای طراحی، شامل طول بالایی ریل a_f و عرض پایین آن b_f ، به صورت تابعی استخراج شده و سپس فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر بستر این مدل‌های ریاضی اجرا شده است.

نتایج حاصل از این بهینه‌سازی که در جدول ۲ ارائه شده‌اند، رفتار پاسخ دینامیکی ریل راه‌آهن را در سه سرعت تحریک فرکانسی مختلف شامل ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تحلیل و مقایسه می‌کنند. بر اساس این نتایج، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت تحریک، مقادیر بهینه‌ی حاصل شده برای عرض فوقانی ریل کاهش پیدا کرده است؛ این موضوع را می‌توان به کاهش نیاز به اینرسی خمشی بالا در سرعت‌های بالاتر و در عین حال افزایش حساسیت ارتعاشی سازه نسبت داد. چنین رفتاری از منظر طراحی به معنای آن است که در سرعت‌های

نمودارهای سه‌بعدی ارائه شده در شکل ۸ و شکل ۹، به ترتیب نمایانگر تغییرات تابع اختلاف فرکانس طبیعی و فرکانس تحریک $\Delta\omega_u(a_f, b_f)$ و تنش بحرانی $\sigma_b(a_f, b_f)$ در فضای طراحی تعریف شده بر حسب پارامترهای هندسی a_f و b_f هستند. این نمودارها بینشی کمی و کیفی از نحوه تأثیرگذاری این پارامترها بر پاسخ سازه فراهم می‌سازند.

بر اساس نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی، مشاهده می‌شود که با تغییر نوع تحریک از حالت پیچشی به خمشی، مقادیر تنش ایجاد شده در ریل افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که در تحریک ترکیبی، اختلاف میان فرکانس طبیعی و فرکانس تحریک نسبت به سایر حالات بیشتر بوده و این امر نشانگر بهبود وضعیت دینامیکی ریل در برابر پدیده تشدید است. به بیان دیگر، حالت ترکیبی موجب بیشینه شدن تابع $\Delta\omega_u$ شده است که می‌تواند به عنوان یک مزیت مکانیکی در طراحی ریل‌های مقاوم در برابر ارتعاشات مورد توجه قرار گیرد.

از سوی دیگر، تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که افزایش عرض بخش فوقانی ریل از ۴۰ به ۸۰ میلی‌متر منجر به کاهش محسوس تنش در ناحیه بحرانی شده است. این کاهش را می‌توان به افزایش سختی خمشی و ممان اینرسی بیشتر در بخش بالایی نسبت داد که منجر به بهبود عملکرد سازه‌ای در برابر خمش می‌گردد. در مقابل، تغییر پهنای بخش پایینی ریل تأثیر محسوسی بر کاهش تنش نداشته، اما باعث افزایش تدریجی در مقدار $\Delta\omega_u$ شده است. این موضوع بیانگر آن است که افزایش این پارامتر، بیش از آنکه در کاهش تنش مؤثر باشد، در بهبود رفتار ارتعاشی و فاصله‌گیری از ناحیه تشدید نقش ایفا می‌کند.

سطوح حاصل از شبیه‌سازی تابع هدف در فضای طراحی، پیوستگی و همواری مناسبی از خود نشان داده‌اند؛ ویژگی‌ای که برای اجرای موفق الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک ضروری است. پیوستگی سطح پاسخ، تضمین‌کننده همگرایی مناسب در فرآیند بهینه‌سازی و جلوگیری از پرش‌های ناگهانی در مسیر جستجوی پاسخ بهینه خواهد بود. در نتیجه، داده‌های حاصل از تحلیل سطح پاسخ، ضمن ارائه دید عمیق‌تر نسبت به رفتار دینامیکی ریل تحت بارهای متغیر، پایه‌ای مطمئن برای استخراج نتایج بهینه‌سازی در مراحل بعدی فرآیند طراحی محسوب می‌شوند.

مطلوب‌تری حاصل می‌شود که می‌تواند پایداری دینامیکی بیشتری برای سازه ایجاد کند.

در نهایت، انتخاب ابعاد هندسی و شرایط بارگذاری مناسب برای ریل راه‌آهن، تابعی از اولویت‌های طراحی و حساسیت نسبت به وقوع تشدید در سرعت‌های مختلف تحریک است. به‌عنوان نمونه، اگر اجتناب از پدیده تشدید در شرایط کاری با سرعت تحریک ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه برای طراح از اهمیت بالایی برخوردار باشد، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که مود ترکیبی با اختلاف فرکانسی برابر با ۳۸/۷۱ هرتز، بهترین پاسخ بهینه را فراهم می‌کند. چنین انتخابی با وجود افزایش سطح تنش، تضمین‌کننده ایمنی بیشتر در برابر ناپایداری‌های ارتعاشی خواهد بود و می‌تواند در شرایط بحرانی عملیاتی گزینه ارجح تلقی شود.

جدول ۲: نتایج بهینه‌سازی ابعاد هندسی ریل راه‌آهن برای مودها و سرعت تحریک متفاوت

سرعت تحریک (mm/min)	مود ارتعاشی	ابعاد بهینه شده (a, b)	F_g	$d_{\Delta\omega_u}$	d_{σ_b}	$\Delta\omega_u$ (Hz)	σ_b (MPa)
۱۰۰	پیچشی	(۵۸/۱۳۱)	۰/۷۳۵۸	۰/۵۴۸۱	۰/۸۳۴۲	۲۵/۵۱	۴/۲۶
۱۰۰	خمشی	(۵۷/۱۳۳)	۰/۷۳۲۱	۰/۵۲۲۳	۰/۸۲۴۵	۳۴/۳۳	۹/۱۱
۱۰۰	ترکیبی	(۶۲/۱۳۶)	۰/۷۱۲۵	۰/۵۲۲۲	۰/۸۱۳۶	۳۷/۱۲	۷/۳۲
۲۰۰	پیچشی	(۶۱/۱۳۰)	۰/۶۸۴۳	۰/۷۳۴۲	۰/۶۴۶۹	۲۳/۶۸	۶/۱۱
۲۰۰	خمشی	(۶۱/۱۳۲)	۰/۶۷۵۲	۰/۷۳۱۳	۰/۶۲۲۹	۳۱/۳۹	۱۱/۳۴
۲۰۰	ترکیبی	(۶۰/۱۳۵)	۰/۶۸۴۳	۰/۷۴۵۵	۰/۶۳۴۵	۳۵/۹۲	۹/۱۲
۳۰۰	پیچشی	(۵۹/۱۲۹)	۰/۷۷۵۴	۰/۶۴۵۷	۰/۶۳۵۲	۲۲/۴۲	۷/۳۴
۳۰۰	خمشی	(۵۹/۱۳۰)	۰/۷۱۳۳	۰/۶۴۲۳	۰/۶۲۷۸	۳۱/۹۸	۱۰/۲۹
۳۰۰	ترکیبی	(۵۸/۱۳۳)	۰/۷۳۶۱	۰/۶۱۷۹	۰/۶۲۴۹	۳۸/۷۱	۸/۱۲

شاخصی کلیدی در ارزیابی احتمال وقوع پدیده تشدید مورد استفاده قرار گرفت. از سوی دیگر، تنش‌های ایجاد شده در نواحی بحرانی همچون محل تکیه‌گاه‌ها نیز تحت بررسی قرار گرفت تا از عدم تجاوز آن‌ها از حد تسلیم ماده اطمینان حاصل شود.

به‌منظور استخراج پیکربندی بهینه ابعادی ریل، الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزار اصلی بهینه‌سازی چندهدفه به کار گرفته شد. در این الگوریتم، ضمن بهینه‌سازی اختلاف فرکانس تحریک-فرکانس طبیعی، قید محدودیت تنش به‌گونه‌ای لحاظ شد که مقدار تنش ایجاد شده در سازه از مقدار مجاز تنش تسلیم فولاد انتخاب شده (AISI 1084) فراتر نرود.

بالا، کاهش ابعاد ریل ممکن است باعث بهبود رفتار ارتعاشی شود، البته مشروط بر آنکه سطح تنش در محدوده‌ی مجاز باقی بماند.

از سوی دیگر، مقادیر حاصل شده برای شاخص برازندگی الگوریتم ژنتیک F_g ، در اکثر حالات در نزدیکی مقدار ۰/۷ قرار داشته‌اند که این امر نشانگر تعادل نسبی میان دو هدف متناقض در بهینه‌سازی است. از آنجا که بهینه‌سازی $\Delta\omega_u(a_f, b_f)$ و کمینه‌سازی $\sigma_b(a_f, b_f)$ اهدافی در تقابل هستند، رسیدن به این سطح از همگرایی حاکی از موفقیت مدل در تولید پاسخ‌های بهینه قابل اتکا است.

تحلیل‌های انجام شده همچنین نشان می‌دهد که پاسخ‌های بهینه در مود ارتعاشی پیچشی، اگرچه با مقادیر تنش کمتری همراه هستند، ولی از نظر فاصله فرکانسی نسبت به فرکانس تحریک ضعیف‌تر عمل می‌کنند. در مقابل، در مود ترکیبی (ترکیب بارگذاری پیچشی و خمشی)، با وجود بالابودن نسبی تنش، اختلاف فرکانسی بهینه و

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل مودال و ارتعاشی ریل راه‌آهن باهدف بررسی و بهینه‌سازی رفتار دینامیکی آن، با استفاده از مدل‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار ANSYS انجام شد. به‌منظور دستیابی به نتایج قابل اتکا، مدل سه‌بعدی دقیقی از ریل در نرم‌افزار CAD طراحی و به نرم‌افزار اجزای محدود منتقل گردید تا اثر ابعاد هندسی بر ویژگی‌های ارتعاشی آن مورد بررسی قرار گیرد.

تحلیل‌ها در سه مود ارتعاشی اصلی شامل پیچشی، خمشی و ترکیبی صورت گرفت و برای هر حالت، مقادیر فرکانس طبیعی و اختلاف آن با فرکانس تحریک محاسبه شد. این اختلاف به‌عنوان

Acoustics, Vol. 169, Art. No. 107487, Dec. 2020, doi: [10.1016/j.apacoust.2020.107487](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107487)

[6] R. Masoudi Nejad, K. Farhangdoost, and M. Shariati, "Three-dimensional simulation of rolling contact fatigue crack growth in UIC60 rails," *Tribology Transactions*, Vol. 59, No. 6, pp. 1059–1069, 2016, doi: [10.1080/10402004.2015.1130768](https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1130768)

[7] Q. Feng, B. Yan, X. Yang, and J. Li, "Long-term prediction of fatigue crack growth in ballastless track of high-speed railway due to cyclic train load," *Construction and Building Materials*, Vol. 292, Art. No. 123375, Jul. 2021, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.123375](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123375)

[8] V. Markine and C. Wan, "Performance optimised geometry of railway crossings: Design and implementation," *International Journal of Railway Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 1–25, 2016, doi: [10.4203/ijrt.5.2.1](https://doi.org/10.4203/ijrt.5.2.1)

[9] C. Wan, V. Markine, and R. Dollevoet, "Robust optimisation of railway crossing geometry," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 54, No. 5, pp. 617–637, 2016, doi: [10.1080/00423114.2016.1150536](https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1150536)

[10] N. Zong and M. Dhanasekar, "Minimization of railhead edge stresses through shape optimization," *Engineering Optimization*, Vol. 45, No. 9, pp. 1043–1060, Sep. 2013, doi: [10.1080/0305215X.2012.722684](https://doi.org/10.1080/0305215X.2012.722684)

[11] B. An, L. Gao, T. Xin, G. Xiu, and Z. Cai, "A novel approach of identifying railway track rail's modal frequency from wheel-rail excitation and its application in high-speed railway monitoring," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 180986–180997, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2959666](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959666)

[12] H. Fu, Y. Yang, and S. Kaewunruen, "Multi-hazard effects of crosswinds on cascading failures of conventional and interspersed railway tracks exposed to ballast washaway and moving train loads," *Sensors*, Vol. 23, No. 4, Art. No. 1786, Feb. 2023, doi: [10.3390/s23041786](https://doi.org/10.3390/s23041786)

[13] T. Axinte, "Finite elements analysis of the rail-wheel rolling contact," *Advanced Materials Research*, Vol. 1036, pp. 559–563, 2014, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.559](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.559)

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی و بهینه‌سازی نشان داد که تعیین دقیق ابعاد هندسی بهینه برای ریل، بسته به شرایط بارگذاری، نوع مود ارتعاشی و سرعت تحریک فرکانسی، متغیر بوده و نمی‌توان یک سطح مقطع واحد را به‌عنوان گزینه بهینه برای تمامی شرایط معرفی کرد. با این حال، بهره‌گیری از رویکردی سیستماتیک برای مدل‌سازی، تحلیل مودال، و بهینه‌سازی چندهدفه، امکان ارائه طیف مناسبی از ابعاد هندسی پیشنهادی را فراهم نموده است که می‌توانند در طراحی ریل‌ها با عملکرد ارتعاشی بهبودیافته و ضریب ایمنی بالاتر مورد استفاده قرار گیرند.

در مجموع، یافته‌های این تحقیق می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای علمی برای توسعه طراحی‌های مبتنی بر بهینه‌سازی در صنعت ریلی مورد استفاده قرار گیرد و زمینه‌ساز کاهش اثرات ارتعاشی، افزایش دوام و بهبود عملکرد دینامیکی ریل‌های راه‌آهن در شرایط بهره‌برداری واقعی باشد.

۵- منابع

[1] M. A. Sayeed and M. A. Shahin, "Design of ballasted railway track foundations using numerical modelling. Part I: Development," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 55, No. 3, pp. 353–368, Mar. 2018, doi: [10.1139/cgj-2016-0683](https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0683) (in Persian)

[2] Z. Zeng, Z. Wang, N. Zhang, Y. Wang, and J. Zhang, "Experimental investigation on the vibration reduction characteristics of an optimized heavy-haul railway low-vibration track," *Shock and Vibration*, Vol. 2019, Art. No. 1539564, Jun. 2019, doi: [10.1155/2019/1539564](https://doi.org/10.1155/2019/1539564)

[3] Z. Wei, I. Nuñez, A. Nuñez, R. Dollevoet, and Z. Li, "Wheel-rail impact at crossings: Relating dynamic frictional contact to degradation," *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 12, No. 4, Art. No. 041017, Jul. 2017, doi: [10.1115/1.4035649](https://doi.org/10.1115/1.4035649)

[4] M. Germonpré, L. Van Hoorebeeck, and G. Degrande, "Contributions of longitudinal track unevenness and track stiffness variation to railway induced vibration," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 437, pp. 292–307, Dec. 2018, doi: [10.1016/j.jsv.2018.09.027](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.09.027)

[5] J. Jin, L. Jiang, M. Sun, X. Li, and Y. Wen, "Development of tuned particle impact damper for reduction of transient railway vibrations," *Applied*