

MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



Lightweight Design and Structural Finite Element Analysis of a Composite Railway Axle: A Case Study of Iranian Rail-Bus axle

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

M. M Shokrieh*

School of Mechanical Engineering, Iran
University of Science and Technology,
Tehran, Iran

Abbas Moradi

School of Mechanical Engineering, Iran
University of Science and Technology,
Tehran, Iran

* Corresponding Author

Shokrieh@iust.ac.ir

Postal Code: 16846-13114.

Article History

Received: 21 Dec, 2025

Accepted: 15 Jun, 2026

ePublished: 16 Jun, 2026

ABSTRACT

With population growth and rising concerns about environmental hazards and resource depletion, attention has turned to the rail transportation industry as a productive and sustainable sector. As one of the simplest modes of transportation, the rail industry plays a crucial role in passenger and freight mobility. In this research, a solid steel axle from an operational rail vehicle in Iran was selected. Subsequently, based on structural analysis of its mechanical properties and operational conditions, a redesign was undertaken. The primary objective of the axle redesign was to reduce weight by adopting a hollow configuration. Polymer-based composite materials were employed in the design process. The overall design consists of a pair of steel collars and two composite shafts with different geometries. Static analysis was performed in a finite-element environment on the composite axle assembly, yielding a Tsai-Wu failure index of 0.36. The maximum von Mises stress in the steel collar was 216 MPa, the static safety factor was 1.94, and the maximum shear stress in the adhesive joint was 28 MPa. Furthermore, the modal analysis results showed that the natural frequency of the composite axle was 89 Hz, which is a significant improvement compared to 68 Hz for the solid steel axle. The mass of the lightweight axle is 173 kg, representing a 62% reduction in weight. The approach used in this study can be applied to the design of other axle models and shafts subjected to bending and torsion.

Keywords: Railway axle; Weight reduction; Composite materials; Structural analysis; Finite element method.

طراحی کاهش وزن و تحلیل اجزای محدود سازه‌ای یک اکسل ریلی کامپوزیتی: مطالعه موردی اکسل ریل باس ایرانی

محمود مهرداد شکریه*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران،

ایران

عباس مرادی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران،

ایران

کلید واژه‌ها

اکسل ماشین ریلی، سبک‌سازی، مواد کامپوزیت، تحلیل ساختاری، روش اجزای محدود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

* نویسنده مسئول: Shokrieh@iust.ac.ir

چکیده

امروزه با گسترش جمعیت و بروز نگرانی‌هایی دربارهٔ مخاطرات پیش روی محیط زیست و اتلاف منابع، نگاه‌ها به سمت صنعت حمل و نقل ریلی، به عنوان یک صنعت مولد معطوف است. این صنعت به عنوان یکی از ساده‌ترین راه‌های حمل‌ونقل، نقش مهمی در جابه‌جایی مسافر و بار دارد. در این تحقیق، اکسل^۱ توپر فولادی یک ماشین ریلی در حال بهره‌برداری در کشور ایران و با بررسی خواص مکانیکی و شرایط عملکردی، به بازطراحی آن بر پایهٔ تحلیل ساختاری، پرداخته شده است. هدف اصلی بازطراحی اکسل، سبک‌سازی و توخالی کردن آن است. از مواد کامپوزیت پایه پلیمری در فرآیند طراحی استفاده گردید. طرح کلی شامل یک جفت طوقه فولادی و دو عدد محور کامپوزیتی با هندسهٔ متفاوت است. تحلیل استاتیکی در فضای اجزای محدود بر روی مجموعهٔ اکسل تقویت‌شده به وسیلهٔ مواد کامپوزیت صورت پذیرفت که

۱ مقدمه

با رشد سریع جمعیت در پنجاه سال اخیر در دنیا و لزوم بهبود عملکرد خدمات، یکی از صنایعی که در برآورده کردن یکی از نیازهای مهم انسان (حمل‌ونقل) ایفای نقش می‌کند، صنعت حمل‌ونقل ریلی می‌باشد. کشور ایران با داشتن قدمت نسبتاً بالا در زمینهٔ احداث خط ریلی، همچنان راه درازی را تا پیمودن تکامل در این حوزه دارد.

اکسل میله‌ایست از جنس فولاد سخت که از طریق آهنگری تهیه می‌شود؛ سپس به منظور بهبود کیفیت سطح، یک مرحله ماشین‌کاری بر روی آن انجام می‌شود. دو طرف اکسل (محور) که

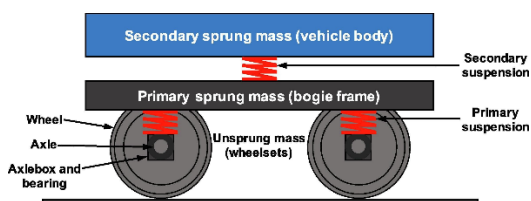
² Tsai-Wu

¹ Axle

فراتر از یک میلیون سیکل کاری برای مجموعه چرخ و محور است. استفاده از مواد کامپوزیت پلیمری (مانند کامپوزیت کربن/اپوکسی^۵) که در شرایط یکسان با فلزات عمر خستگی بهتری دارند، می‌تواند افزایش عمر مفید اکسل را به دنبال داشته باشد. راهکار دیگری که در سبک‌سازی محور، مورد توجه قرار می‌گیرد، تغییر در هندسه قطعه است. تمامی محور (اکسل)‌های موجود در کشور ایران، فولادی توپر هستند که در تحقیق حاضر با ترفندهایی، آن را به صورت توخالی طراحی کرده که این عمل، غیر از کاهش وزن، مزایای دیگری در بهره‌برداری نیز خواهد داشت که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

۱-۱ جرم فنربندی شده و فنربندی نشده

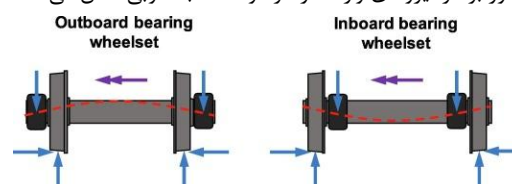
جرم فنربندی شده در صنعت ریلی و مهندسی راه‌آهن به آن قسمت از وزن واگن می‌گویند که روی مجموعه سیستم تعلیق قرار دارد. جرم فنربندی‌شده معمولاً شامل بدنه واگن، قاب بوژی، تجهیزات داخل اتاق، سرنشینان و بار می‌شود؛ اما اجزایی که روی هیچ‌گونه فنر و سیستم تعلیقی قرار نداشته باشند، جرم فنربندی‌نشده نامیده می‌شوند که در واگن ریلی این مجموعه چرخ و محور مانند شکل (۲) بر روی هیچ‌گونه فنری قرار ندارند.



شکل ۲: جرم فنربندی‌شده و جرم فنربندی‌نشده در بوژی [۱]

سرمحور نامیده می‌شوند، صیقلی بوده و محل تعبیه یاتاقان در واگن‌های یاتاقانی و یا بوش و یاتاقان غلطکی^۳ در واگن‌های رولربیرینگی می‌باشند.

محورها بر اساس محل قرارگیری یاتاقان‌ها، به دو دسته یاتاقان-داخل^۴ و یاتاقان-بیرون^۵ دسته‌بندی می‌شوند. محورهای یاتاقان-داخل، معمولاً در قطارهای شهری و کشورهای اروپایی کاربرد دارند؛ در صورتی که در کشور ما، همچنان از محورهای یاتاقان-بیرون استفاده می‌شود. در شکل (۱) نحوه تغییر شکل عمودی محور بر اثر نیروهای وارده در هر دو دسته به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۱: دسته‌بندی اکسل بر اساس محل قرارگیری یاتاقان [۱]

یکی از مشکلات سیستم‌های ریلی، خروج از خط می‌باشد که علت اصلی آن فرسودگی و کیفیت پایین قطعات است. مسئله دیگر وزن واگن می‌باشد که همانند بقیه وسائط نقلیه برای جابه‌جایی با حجم بار و مسافری بالا، وزن زیادی دارد. کاهش وزن واگن می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای در مصرف سوخت قطار و کاهش خسارات را در پی داشته باشد. بدین منظور یکی از راهکارها می‌تواند کاهش وزن یکی از قطعات سنگین وزن بوژی باشد. راهکار اصلی کاهش وزن، استفاده از مواد بالافن سبک وزن، در عین حال با استحکام باشد. ماده انتخابی، پلیمر تقویت‌شده با الیاف می‌باشد. این ماده چگالی حدوداً یک چهارم فولاد و استحکام کششی دو برابر آن را دارا هستند.

دلیل اصلی واماندگی محورهای فولادی، شکست بر اثر واماندگی خستگی در نشیمن‌گاه چرخ و محل بسته‌شدن یاتاقان‌ها است [۲]. طول عمر محور چیزی در بین ۲۰ الی ۳۰ سال است که در واقع در بین طراحان، این عمر به عمر نامحدود اطلاق می‌شود که چیزی

^۵ Outboard bearing

^۶ Carbon/Epoxy

^۳ Roller bearing

^۴ Inboard bearing

۲-۱ سابقه اکسل کامپوزیتی

در سال ۲۰۲۲، میستری^۷ و همکاران، توانستند بعد از چند سری تحقیق و بهبود نواقص طراحی، یک اکسل یاتاقان داخل طراحی کنند که شامل دو عدد بانداژ فولادی در طرفین جهت جازنی در چرخ‌ها، یک عدد محور کامپوزیتی اصلی از جنس کربن/اپوکسی و یک عدد لوله کامپوزیتی دیگر در میانه محور می‌باشد [۳]. معذک ایرادات تخصصی مانند ادعای تولید لایه‌های صفر درجه به وسیله روش رشته‌پیچی الیاف در طراحی آنان وجود دارد که خلاف توانایی دستگاه‌های رشته‌پیچی دوماحوره است.

در تحقیق حاضر، برای اولین بار طراحی یک اکسل یاتاقان-بیرون سبک‌سازی شده ارائه است اکسل فلزی در حال حاضر در حال کارکرد در خطوط ریلی ایران می‌باشد. طراحی بر اساس اصولی که شرح داده شد، انجام می‌شود. تحلیل ساختاری و تنش بر اساس روابط مقاومت مصالحی ارائه می‌گردد. توسط نرم‌افزار المان محدود مدل‌سازی صورت می‌پذیرد.

۲ بارگذاری‌های موجود در اکسل

محور انتخاب‌شده در تحقیق حاضر، محور ترپلر^۸ مورد استفاده در ریل‌باس^۹ مورد بررسی قرار گرفته است. ریل‌باس گونه‌ای قطار مسافری خودکشش می‌باشد که دارای ۴ واگن با ظرفیت ۳۳۶ مسافر نشسته است و با سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت (با اعمال تغییراتی تا سرعت ۱۶۰ کیلومتر در ساعت خواهد بود) در مسیرهای کوتاه حومه شهرهای بزرگ به کار گرفته می‌شود. این قطارها خودکشش هستند و برای حرکت نیازی به لکوموتیو ندارند. نوع اکسل و نحوه مونتاژ آن در استانداردهای بین‌المللی راه‌آهن، TRP04622 می‌باشد. ریل‌باس از جدیدترین واگن‌های مورد استفاده در خطوط مسافری راه‌آهن کشور ایران می‌باشد. جرم

اکسل توپر آن، ۴۵۳ کیلوگرم می‌باشد و با مونتاژ چرخ‌ها و دیسک‌های ترمز، جرم کل مجموعه به ۱۵۰۰ کیلوگرم می‌رسد. جنس آن از فولاد EA4T (25CrMo4) می‌باشد که فولادی شناخته شده‌ای در ساخت قطعات صنعت ریلی می‌باشد.

به طور کلی با توجه به این که محور، دوار می‌باشد و سیکل‌های تکرار شونده وجود دارد، علاوه بر حضور بارهای استاتیکی (به عنوان مثال، فشار ناشی از جازنی چرخ‌ها)، اثرات خستگی نیز کاملاً بر آن مشهود می‌باشد. این بارهای خستگی، در تمام مدت ساعات کاری محور وجود خواهند داشت. به علت وجود بارهای زیاد، به منظور طراحی و بررسی از یک بارگذاری معادل که شامل چندین نیرو و ممان می‌باشد، استفاده می‌گردد. همچنین برای بالا بردن ضریب اطمینان و قابلیت بهره‌برداری در کلیه شرایط، در راستای بررسی مقاومت و کارایی طرح، بحرانی‌ترین حالت ممکن برای محور نیز در نظر گرفته می‌شود. بحرانی‌ترین حالت، زمانی است که ناوگان ریلی بر روی یک قوس در حال حرکت باشد و ترمزگیری اضطراری فعال شده باشد.

به طور کلی سه نوع بار مکانیکی بر مجموعه چرخ و محور وارد می‌گردد: ۱- نیروهای ناشی از جرم متحرک مجموعه؛ ۲- نیروهای ناشی از کشش واگن؛ ۳- نیروهای ناشی از ترمزگیری

برای به‌کارگیری این بارگذاری‌ها و تنش‌ها در روش المان محدود^{۱۰}، می‌بایست بارگذاری‌ها را به تعدادی بارگذاری متداول و متعارف بدل کرد. لازم است عمل معادل‌سازی با دقت تمام، انجام شود؛ تا از اثرات مهم بر روی مجموعه صرف نظر نگردد.

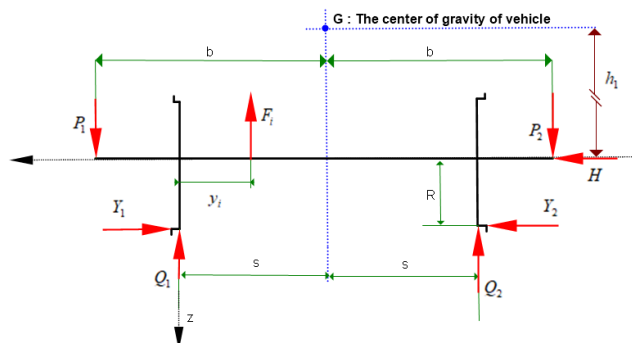
¹⁰ Finite element method

⁷ Mistry

⁸ Trailer

⁹ Rail-bus

وجود ۴ اکسل در هر واگن، جرم موثر روی یک اکسل به مقدار ۱۵ تن می‌باشد.



شکل ۳: وضعیت نیروهای نقطه‌ای وارد بر اکسل

با توجه به مقادیر هندسی و روابط نیرویی، نیروها محاسبه گردیده و در جدول (۲) آورده شده‌اند.

جدول ۲: مقدار نیروهای اصلی و مهم در بارگذاری

نیرو	مقدار (کیلو نیوتون)
P_1	۱۱۷.۴۷۴
P_2	۷۳.۸۲۱
Y_1	۵۱.۵۰۳
Y_2	۲۲.۷۳
H	۲۹.۴۳۰
Q_1	۱۳۳.۳۹۲
Q_2	۵۷.۹۰۳

نمودار ممان خمشی و پیچشی در راستای طول اکسل در شکل (۴) رسم شده و مقدار تنش بحرانی با توجه به رابطه (۵) به مقدار ۹۸ مگاپاسکال محاسبه می‌شود.

$$\sigma = \frac{32KM_R}{\pi d^3} \quad (۵)$$

کلیه نیروهای موثر بر عملکرد یک اکسل طبق استاندارد EN 13103 در شکل (۳) ارائه شده‌اند [۴].

با توجه به تریلر بودن اکسل انتخاب شده از ریل‌باس، بحرانی‌ترین مقدار بارگذاری، از استاندارد مذکور انتخاب شده و بر اکسل اعمال می‌گردد. روابط ۱ الی ۴ در این راستا هستند.

$$P_1 = (0.65 + 0.0975 \frac{h_1}{b}) m_1 g \quad (۱)$$

$$P_2 = (0.65 - 0.0975 \frac{h_1}{b}) m_1 g \quad (۲)$$

$$Y_1 = 0.35 m_1 g \quad (۳)$$

$$Y_2 = 0.15 m_1 g \quad (۴)$$

مقدار این نیروها با توجه به هندسه موجود اکسل، محاسبه می‌شود. مقدار پارامترهای هندسی نیز با توجه به نقشه دوبعدی اکسل منتخب، در جدول (۱) آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که این اندازه‌ها از سری نقشه‌های دریافت‌شده از اداره کل واگن راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران استخراج شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای هندسی موجود در تحلیل نیرویی

مقدار (میلی‌متر)	پارامتر هندسی
۹۸۶	b
۷۴۹.۵	s
۴۶۰	R
۳۳۰.۵	R_b
۲۵۴.۵	y_i
۱۵۰۰	h_1

یکی از پارامترهای مورد نیاز در محاسبه مقادیر بارگذاری، جرم موثر بر روی اکسل است. در یک واگن ریل‌باس، با ضریب اطمینان مناسب، می‌توان جرم کل را ۶۰ تن در نظر گرفت که با توجه به

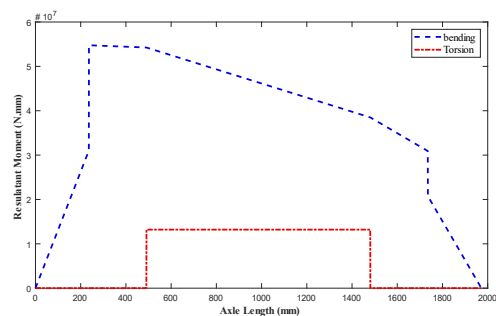
۳ اکسل تقویت شده با مواد کامپوزیت

طراحی پیشنهادی اکسل تقویت شده با مواد کامپوزیت، مطابق شکل (۵) از سه جزء اصلی تشکیل شده است؛ محور اصلی کامپوزیتی، طوقه های فولادی^{۱۳} که در دو سر محور اصلی و آن نصب می گردند و محور ثانویه کامپوزیتی بر روی محور اصلی و در بین دو طوقه فولادی جانمایی می شود.

محور اصلی کامپوزیتی دارای وظیفه اصلی تحمل بارگذاری های مماني، طوقه فولادی نیز جهت تحمل بار فشاری ناشی از جازنی ذکر شده در بخش قبلی و بخش ثانویه کامپوزیتی نیز در راستای افزایش سفتی و کاهش تغییر مکان عمودی در وسط مجموعه اکسل، افزوده می گردد.

برای طوقه (بانداز) فولادی، از همان فولاد EA4T استفاده می شود که در تولید محور توپر استفاده شده بود. این انتخاب به منظور سهولت و کاهش هزینه های تولید، انجام شده است. ماده کامپوزیتی مورد استفاده، ترکیبی از الیاف کربن و رزین اپوکسی از مدل SE75 ساخته شرکت Gurit به صورت پارچه های پیش آغشته^{۱۴} است. این پارچه ها با دمای پخت ۸۰ درجه سانتی گراد و ویسکوزیته پایین، فرآیند پخت با کیفیتی دارند. خواص مکانیکی این ماده کامپوزیت می باشد [۷]. چسب مورد استفاده، اتصال چسبی دوجزئی LOCTITE® EA 9394 AERO می باشد که قابلیت اتصال به انواع مواد مهندسی از قبیل فلزات، شیشه، سرامیک ها و پلاستیک ها از جمله پلاستیک های تقویت شده با الیاف کربن و شیشه را دارد [۸].

ابتدا برای تعیین اولیه ضخامت هر کدام از اجزا، می بایست جازنی تداخلی مجموعه اکسل با چرخ مدنظر قرار بگیرد. از راهکار مورد استفاده در مرجع [۹] برای بررسی تنش های ایجاد شده در هر سه استوانه توخالی در این قسمت نیز استفاده می شود. نصف شعاع تداخل اکسل توپر با هاب چرخ، برای تداخل طوقه فولادی با هاب



شکل ۴: ممان های خمشی و پیچشی در طول اکسل

مؤلفه مهم دیگر، تغییر مکان عمودی در اکسل است. با کمی ساده سازی و فرض تیر اویلر-برنولی، مقدار جابه جایی از رابطه (۶) محاسبه می شود [۵].

$$\delta_{\max} = \frac{P_1 a^2}{6ET} (4a - 3L) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، I ممان دوم سطح، E مدول الاستیسیته فولاد مذکور، L طول کامل اکسل و a فاصله بین محل بارگذاری دو نیروی P_1 و Q_1 می باشد که نهایتاً بیشینه تغییر مکان عمودی، برابر با ۰/۹۵ میلی متر رو به پایین است.

تنش دیگری که ماهیت آن با تنش های قبلی، تفاوت دارد، تنش ناشی از جازنی تداخلی^{۱۱} است که مقدار آن ناشی از فشار موضعی ایجاد شده بر روی اکسل و هاب چرخ^{۱۲} می باشد. مقدار فشار نیز بر اساس تداخل استاندارد رابطه (۷) [۴] است و سپس بر اساس رابطه (۸) [۶] مقدار فشار داخلی به مقدار ۸۰ مگاپاسکال محاسبه می شود.

$$0.0010 * D_{o,w} \leq j \leq 0.0015 * D_{o,w} + 0.06 \quad (7)$$

$$p_i = \frac{E_{st} \cdot j}{2D_{o,w}^3} \left[\frac{(D_h^2 - D_{o,w}^2) \cdot (D_{o,w}^2 - D_l^2)}{(D_h^2 - D_l^2)} \right] \quad (8)$$

این مقدار فشار خارجی، به صورت فشاری بر سطح خارجی اکسل توپر وارد می شود و دو نوع تنش شعاعی و محیطی ایجاد می شود که توزیع این دو تنش، با یکدیگر همخوانی ندارد.

¹³ Steel collars

¹⁴ Prepreg

¹¹ Interference fit

¹² Wheel hub

فرض می‌شود [۹]. بر اثر این تداخل در این ناحیه، فشار به وجود می‌آید. بر اثر فشار، جابه‌جایی شعاعی در جدازه داخلی طوقه به وجود می‌آید و فشار سطحی دیگری نیز مابین طوقه و محور ثانویه کامپوزیتی به وجود می‌آید. پس طوقه فولادی تحت دو فشار ثابت در جدازه داخلی و خارجی خود قرار دارد که مقادیر آن‌ها بر اساس ابعاد اجزاء تعیین می‌شود.

تنش اصلی دیگر وارد بر مجموعه، ناشی از خمش است که در قسمت‌های قبل بر روی آن بحث گردید. تئوری تیر مرکب اوپلر-برنولی^{۱۵} با وجود ساده‌سازی‌های استفاده شده در آن، می‌تواند تخمین مناسبی از حداقل ابعاد مورد نیاز برای تحمل بارگذاری وارده را ارائه کند. قید موجود در تعیین ابعاد این است که نباید ضخامت لوله‌های کامپوزیتی از ۱۵ میلی‌متر بیشتر شود؛ چرا که با عدول از این مقدار، ساخت این هندسه و جنس در عمل به شدت مشکل خواهد بود.

به منظور سبک‌سازی هر چه بیشتر مجموعه اکسل، می‌بایست قطر محل اتصال یاتاقان‌ها را تغییر داد؛ چرا که تفاوت قطر این مقطع با نشیمن‌گاه چرخ‌ها به نسبت زیاد است و اجازه توخالی کردن مناسبی را نمی‌دهد. ضمن آن که با افزایش قطر، می‌توان صلبیت خمشی^{۱۶} را افزایش داد. لذا در این قسمت، هندسه مقطع تغییر خواهد کرد.

ابعاد در نظر گرفته شده، مطابق شکل (۵)، بدین شرح است: قطر طوقه در محل نشیمن‌گاه چرخ، ۲۱۰ میلی‌متر؛ قطر طوقه در محل اتصال یاتاقان‌ها، ۲۰۵ میلی‌متر؛ قطر داخلی طوقه، ۱۶۰ میلی‌متر؛ استوانه کامپوزیتی اصلی با قطر داخلی ۱۳۳ میلی‌متر و قطر خارجی ۱۶۰ میلی‌متر و قطر خارجی ۱۸۸/۸ میلی‌متر. جرم مجموعه محور طراحی شده، حدوداً ۱۷۳ کیلوگرم است که کاهش وزن ۶۲

درصدی مجموعه اکسل نسبت به حالت اولیه با وزن ۴۵۳ کیلوگرم ایجاد خواهد کرد.

برای تعیین لایه‌چینی از روش استحکام خالص که توسط باربرو^{۱۷} توسعه داده شده است، استفاده می‌گردد. فرض می‌شود که هر نوع بارگذاری (تنش) را، یک دسته از الیاف با زاویه معلوم متحمل خواهند شد [۱۰]. تنش ناشی از خمش توسط لایه صفر درجه، تنش فشاری محیطی^{۱۸} ناشی از جازنی توسط لایه ۹۰ درجه و تنش برشی ناشی از ترمزگیری توسط لایه ۴۵ درجه؛ زیرا لایه‌ای با زاویه الیاف $\pm 45^\circ$ درجه، بهترین خواص برشی را دارد [۱۱]. محور ثانویه، وظیفه افزایش صلبیت خمشی را نیز بر عهده دارد و باید مانع از تغییر مکان عمودی زیاد محور شود. بدین منظور، برای داشتن یک مقیاس مناسب از یک تخمین نزدیک، برای محاسبه مدول ینگ معادل از قاعده ده درصد هارت-اسمیت^{۱۹} بهره برده می‌شود. مدول موثر در راستای طولی برای الیافی با زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه، یک دهم مدول الیاف صفر درجه فرض می‌شود [۱۰].

$$E_{11,H-S} = E_{11,t} * \left(\frac{t_{0^\circ}}{t} + 0.1 * \frac{t_{\pm 45^\circ}}{t} + 0.1 * \frac{t_{90^\circ}}{t} \right) \quad (9)$$

با توجه به ماهیت رشته‌پیچی الیاف و عدم امکان پیچش الیافی با زاویه صفر درجه، می‌بایست از الیافی با زاویه ۱۵ درجه استفاده نمود و با توجه افت استحکام، تعداد لایه‌ها نسبت به آنچه که محاسبه گردید، افزایش پیدا می‌کند.

لایه‌چینی محور اصلی:

$$[\pm 15, 90, \pm 45, 90, \pm 15, \pm 45, \pm 15, 90, \pm 15]_S$$

لایه‌چینی محور ثانویه:

$$[\pm 45, 90, \pm 15, \pm 45, \pm 15, \pm 45, 90, \pm 15]_S$$

¹⁸ Hoop

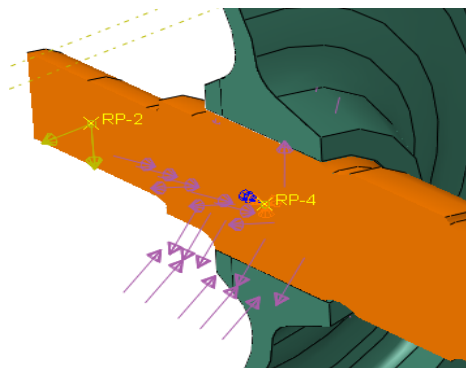
¹⁹ Hart-Smith 10% rule

¹⁵ Euler-Bernoulli composite beam theory

¹⁶ Flexural rigidity

¹⁷ Barbero

اصطکاک تعریف می‌شود. سپس دو رفتار نرمال از نوع تماس سخت و مماسی با ضریب اصطکاک ۰/۱ قرارداد می‌شود. در بحث بارگذاری و شرایط مرزی، برای اعمال بارگذاری‌ها و ممان‌ها، نقاط مرجع تعریف می‌شوند. چهار نقطه مرجع^{۲۲} اصلی (نماینده رفتار کینماتیکی بخشی از قطعه) که برای اکسل تعریف می‌شوند، عبارتند از دو نقطه در مرکز بخش محل اتصال یاتاقان و دو نقطه در مرکز بخش نشیمن‌گاه چرخ. دو نقطه مرجع ابتدایی، به سطح خارجی اکسل کوپل^{۲۳} شده؛ دو نقطه مرجع دیگر نیز به سطح داخلی چرخ‌ها کوپل می‌شوند. سپس نیروهایی که نیاز می‌باشد در محل یاتاقان به اکسل وارد شود، به این نقاط مرجع اعمال می‌شوند. در مورد شرایط مرزی نیز، همان دو نقطه مرجعی که به سطح داخلی چرخ‌ها کوپل شده بودند، به عنوان تکیه‌گاه در نظر گرفته می‌شوند. جابه‌جایی در راستای هر سه جهت و چرخش در راستای محور مولد اکسل، بسته می‌شوند. در واقع برقراری بارگذاری و شرایط مرزی، شبیه به یک تیر اویلر-برنولی می‌باشد. این شرایط در شکل (۶)، قابل مشاهده است.



شکل ۶: اعمال بارگذاری بر روی سطوح و نقاط مرجع در شبیه‌سازی اجزا محدود

المان C3D8R با اندازه دانه‌بندی ۸ برای شبکه‌بندی تمام قطعات فولادی استفاده می‌شود؛ زیرا بار غالب خمشی است. در بخش تئوری با فرض وجود شرایط تقارنی، مقدار تغییر مکان عمودی در

بر اساس مدول معادل، انتظار می‌رود مقدار تغییر مکان عمودی در وسط اکسل کامپوزیتی، ۴/۱۵ میلی‌متر باشد. طرح نهایی و ابعاد و اندازه‌های آن در شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۵: اکسل کامپوزیتی طراحی شده در تحقیق حاضر و جزئیات آن

۴ حل اجزای محدود

فرضیاتی که در روند بخش طراحی تئوری و هم در روند حل روش اجزای محدود در متن کار قرار گرفته‌اند، بدین شرح است:

- ۱- فرآیند بارگذاری و تجزیه و تحلیل به صورت شبه الاستیک، در حوزه الاستیک خطی می‌باشد. اثرات دینامیکی و ارتعاشاتی نادیده گرفته شده‌اند؛
- ۲- اثرات محیطی دما، انبساط مواد و تغییرات خواص مکانیکی مورد بررسی قرار نگرفتند؛
- ۳- واماندگی به طور انحصاری مربوط به اولین نقطه‌ای است که واماندگی در آن رخ بدهد. استخراج آسیب در مکان‌های بین لایه‌ای، بررسی رشد ترک و اثرات غیرخطی آسیب، از اهداف تحقیق حاضر نیستند.

برای مدل‌سازی اکسل توپر فولادی، ابتدا فایل سه‌بعدی در نرم‌افزار تجاری سالی‌دورکس^{۲۰} ایجاد شده و سپس برای تحلیل به نرم‌افزار آباکوس^{۲۱} وارد می‌گردد. نیاز است خواص تماسی مناسب میان تنها دو قطعه موجود که اکسل فولادی و چرخ قطار است، برقرار شود. خاصیت تماسی مورد نظر با توجه به جازنی تداخلی، از نوع

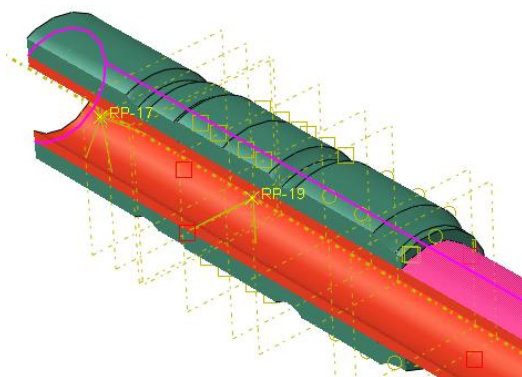
²² Reference point

²³ Couple

²⁰ SolidWorks

²¹ Abaqus

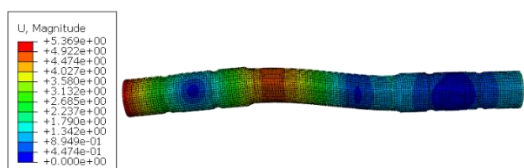
عنوان، به محورهای کامپوزیتی وارد نمی‌گردد. المان انتخابی در مورد محورهای کامپوزیتی، المان SC8R است. المان C3D8R برای طوقه فولادی استفاده می‌شود. اندازه دانه‌بندی قطعات، ۸ می‌باشد.



شکل ۸: سطوح در تماس با یکدیگر در شبیه‌سازی اکسل کامپوزیتی

طبق حل روش اجزای محدود، بیشینه تغییر مکان در محور کامپوزیتی اصلی در نزدیکی طوقه‌ها ۴/۶۵ میلی‌متر است. این مقدار همگرایی خوبی با میزان محاسبه‌شده تئوری ۴.۱۵ میلی‌متر با حدود ۱۲٪ خطا دارد که با توجه به ساده‌سازی‌های تئوری، قابل قبول می‌باشد.

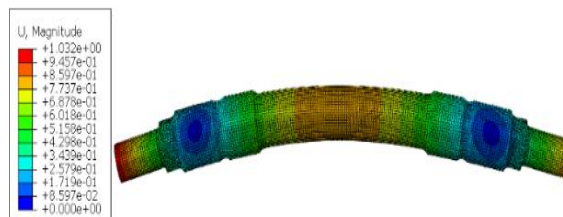
نتایج خروجی جابه‌جایی کل مجموعه در شرایط بارگذاری نامتقارن در شکل (۹) آورده شده است.



شکل ۹: تغییر شکل اکسل کامپوزیتی بر اساس حل اجزای محدود

نتایج تنش محوری ناشی از خمش خالص برای طوقه فولادی و مقایسه آن با مقدار مجاز اکسل‌های توخالی از طرف استاندارد در جدول (۴) و نتایج تنش برای محورهای کامپوزیتی در جدول (۵) آورده شده است. مقادیر بدست آمده از دو روش در جدول (۴)، اختلاف محسوسی دارند. دلیل آن این است که در روند طراحی

وسط اکسل ۰/۶۶ میلی‌متر و در سر متصل به یاتاقان، ۰/۹۵ میلی‌متر است. طبق حل روش اجزای محدود مطابق شکل (۷)، این مقادیر به ترتیب ۰/۸۱ و ۱/۰۳۲ میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۷: تغییر شکل اکسل فولادی توپر بر اساس حل اجزای محدود

نتایج تنش در اکسل توپر فولادی به صورت خلاصه در جدول (۳) آورده شده است. کاملاً مشخص است با توجه به مقادیر مجاز اعلامی از طرف استاندارد انگلیسی، عمر بی‌نهایت خستگی تضمین می‌شود.

جدول ۳: تنش ناشی از خمش در اکسل توپر و مقایسه با استاندارد

اکسل توپر فولادی	بیشینه تنش در بدنه اکسل، پشت‌بندها و نشیمن‌گاه یاتاقان	بیشینه تنش در نشیمن‌گاه چرخ، دیسک ترمز و یاتاقان‌های غلتشی
	ساده (مگاپاسکال)	(مگاپاسکال)
مقدار مجاز بر اساس استاندارد اکسل توپر	۱۸۰ مگاپاسکال	۱۱۰ مگاپاسکال
مقدار محاسبه‌شده تئوری	۹۸ مگاپاسکال	۶۷ مگاپاسکال
مقدار روش اجزای محدود	۱۰۵ مگاپاسکال	۷۵ مگاپاسکال

برای ارزیابی عملکرد اکسل کامپوزیتی، همین روند بار دیگر تکرار می‌شود. تنها تفاوت عمده، تماس طوقه فولادی و محور اصلی کامپوزیتی است. به منظور برقراری نوع تماس میان طوقه و محور کامپوزیتی اصلی، از خواص اتصال چسبی نوع لغزش کوچک، بهره برده می‌شود. نوع بارگذاری و اعمال شرایط مرزی کاملاً مشابه اکسل توپر می‌باشد (شکل ۸)، با این تفاوت که به جای اکسل توپر، طوقه‌های توخالی فولادی حضور دارند. نیروی مستقیم به هیچ

فرضیات بسیار ساده‌کننده‌ای در پیش گرفته شده بود و این وضعیت، قابل پیش‌بینی بود. برای بررسی واماندگی خستگی در سیکل‌های چرخه بالا، تنها معیار دسترس، استحکام کششی و فشاری در راستای الیاف در طول عمر ۱۰ میلیون سیکل است که همین مقدار نیز، به طور تخمینی است. مقدار بیشینه شاخص تسای-وو برای واماندگی استاتیکی، در محور اصلی ۰/۳۶ و در محور ثانویه ۰/۲۱ است.

جدول ۴: تنش ناشی از خمش در بخش طوقه فولادی اکسل توخالی و مقایسه با استاندارد

مقدار تنش	جداره داخلی اکسل توخالی (مگاپاسکال)	محل ژورنال‌ها (مگاپاسکال)	نشیمین‌گاه‌ها غیر از محل یاتاقان‌های پش‌بندها و نشیمین‌گاه یاتاقان ساده ژورنال (مگاپاسکال)	همه بیشینه تنش در بدنه اکسل، نشیمین‌گاه یاتاقان ساده (مگاپاسکال)	بیشینه تنش
مقدار مجاز بر اساس استاندارد اکسل توخالی مقدار محاسبه شده تئوری مقدار روش اجزای محدود	۷۲	۸۵	۹۹	۱۸۰	۱۸۰
۶۰	۲۴	۸۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
۳۵	۱۱۲	۱۵۶	۱۱۲	۱۵۶	۱۵۶

جدول ۵: بیشینه تنش در لایه‌ها و مقایسه با مقدار مجاز

محور کامپوزیتی اصلی	تنش فشاری (مگاپاسکال)	تنش کششی (مگاپاسکال)
استحکام خستگی در راستای الیاف در عمر ۱۰ میلیون سیکل	۵۶۱	۱۱۲۲

بیشترین تنش در راستای الیاف برای زوایای ۱۵ درجه	۲۷۴	۲۶۸
بیشترین تنش در راستای الیاف برای زوایای ۹۰ درجه	۱۵۲	۱۵۴

پارامتر مهم دیگر در فرضیات تئوری طراحی، تنش برشی موجود در محل اتصال چسبی است. اتصال چسبی استحکام برشی در حدود ۳۵ تا ۴۵ مگاپاسکال بسته به فرآیند پخت چسب دارد. طی حل اجزای محدود، تنش برشی موجود در ناحیه مابین طوقه فولادی و محور کامپوزیتی اصلی، در بحرانی‌ترین شرایط، ۲۸ مگاپاسکال است.

همچنین یک حل ارتعاشی برای استخراج فرکانس طبیعی هر دو اکسل، بر پایه همان شرایط مرزی ذکرشده، انجام گردید که برای اکسل فولادی توپر ۶۸ هرتز و برای اکسل کامپوزیتی توخالی ۸۹ هرتز محاسبه گردید. بنابراین، پدیده تشدید برای اکسل کامپوزیتی در فرکانس‌های بالاتری اتفاق می‌افتد.

۵ نتیجه‌گیری

تحلیل و بررسی عملکرد در این تحقیق برای دو حالت اکسل توپر فولادی و اکسل توخالی کامپوزیتی صورت پذیرفت. نحوه بارگذاری تشریح گردید و خصوصیات مکانیکی و عملکردی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحلیل اجزای محدود برای اکسل فولادی توپر نشان داد که بیشینه تنش معادل فون میسز برابر با ۱۷۴ مگاپاسکال بوده و ضریب اطمینان استاتیکی ۲/۴۱ حاصل می‌شود. همچنین تنش کاملاً معکوس‌شونده ناشی از خمش برابر با ۱۰۵ مگاپاسکال است که نسبت به مقدار مجاز استاندارد EN 13103، ضریب اطمینان خستگی ۱/۷۱ را برای دستیابی به عمر نامحدود فراهم می‌کند.

با وجود نتایج امیدوارکننده، در این پژوهش صحت‌سنجی تجربی نمونه طراحی‌شده و بررسی رفتار آن تحت بارگذاری‌های دینامیکی و شرایط واقعی بهره‌برداری انجام نشده است. از این رو پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، ساخت نمونه اولیه، انجام آزمون‌های استاتیکی، خستگی و ارتعاشی، و همچنین ارزیابی و دقیق‌تر دوام بلندمدت اتصال چسبی و رفتار اکسل در شرایط محیطی مختلف مورد توجه قرار گیرد.

۶ فهرست علائم

فاصله بین مرکز محل اتصال یاتاقان و مرکز نشیمن‌گاه	a
چرخ	
قطر اکسل، mm	D
مدول الاستیسیته، GPa	E
ممان دوم سطح، mm ⁴	I
تداخل جازنی، mm	j
ضریب تمرکز تنش	K
طول اکسل، mm	L
نیروی وارد بر یاتاقان، N	P
نیروی تکیه‌گاهی وارد بر چرخ، N	Q
ضخامت، mm	t
علائم یونانی	
جابه‌جایی عمودی اکسل، mm	δ
تنش محوری، MPa	σ
زیر نویس	
هاب چرخ	h
داخلی	i
بیشینه	max
خارجی	o
برآیند	R
فولاد	st
نشیمن‌گاه چرخ	w

مراجع

- [1] Mistry, P. and M. Johnson, Lightweighting of railway axles for the reduction of unsprung mass and track access charges. Proceedings of the

علاوه بر این، فرکانس طبیعی نخست اکسل فولادی برابر با ۶۸ هرتز به دست آمد.

اکسل توخالی کامپوزیتی طراحی‌شده با جرم ۱۷۳ کیلوگرم، نسبت به اکسل فولادی توپر با جرم ۴۵۳ کیلوگرم، کاهش وزن ۶۲ درصدی را محقق ساخت. در این طرح، بیشینه تنش معادل فونمیسز در طوقه فولادی ۲۱۶ مگاپاسکال بوده که متناظر با ضریب اطمینان استاتیکی ۱/۹۴ است. همچنین شاخص واماندگی تسای-وو در محورهای کامپوزیتی اصلی و ثانویه به‌ترتیب برابر با ۰/۳۶ و ۰/۲۱ محاسبه شد که بیانگر عملکرد ایمن سازه در بارگذاری طراحی است. بیشینه تنش برشی در اتصال چسبی نیز ۲۸ مگاپاسکال به دست آمد. نتایج تحلیل مودال نشان داد که فرکانس طبیعی نخست اکسل کامپوزیتی به ۸۹ هرتز افزایش یافته است که نسبت به اکسل فولادی توپر بهبود قابل توجهی را نشان می‌دهد.

از مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به بررسی تئوری و عددی فرآیند جازنی تداخلی چرخ، طوقه و محور کامپوزیتی، طراحی یک مجموعه اکسل کامپوزیتی یاتاقان‌بیرون، تحلیل عملکرد اکسل در شرایط بارگذاری نامتقارن و همچنین افزایش فرکانس طبیعی نسبت به نمونه فولادی اشاره کرد. این ویژگی‌ها پژوهش حاضر را از مطالعات پیشین در زمینه اکسل‌های تقویت‌شده با مواد کامپوزیتی متمایز می‌سازد.

با وجود مزایای عملکردی اکسل کامپوزیتی، استفاده از مواد کربن/اپوکسی می‌تواند هزینه ساخت را نسبت به اکسل‌های فولادی متداول افزایش دهد. با این حال، کاهش وزن ۶۲ درصدی حاصل شده می‌تواند از طریق کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌ها بخشی از این هزینه را در دوران بهره‌برداری جبران کند. همچنین، ساختار توخالی اکسل امکان انجام آسان‌تر آزمون‌های بازرسی و پایش سلامت را فراهم می‌سازد که می‌تواند به کاهش هزینه‌های نگهداری منجر شود. از این رو، ارزیابی نهایی توجیه‌پذیری اقتصادی این طرح نیازمند انجام تحلیل جامع هزینه-فایده و هزینه چرخه عمر است.

- Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020. 234(9): p. 958-968.
- [2] Peng, B., S. Iwnicki, P. Shackleton, D. Crosbee, and Y. Zhao, The influence of wheelset flexibility on polygonal wear of locomotive wheels. *Wear*, 2019. 432: p. 102917.
 - [3] Mistry, P.J., M.S. Johnson, S. Li, S. Bruni, and A. Bernasconi, Parametric sizing study for the design of a lightweight composite railway axle. *Composite Structures*, 2021. 267: p. 113851.
 - [4] EN 13103: Railway applications - Wheelsets and bogies - Non-powered axles - Design method. 2010: London.
 - [5] Beer, F., E. Johnson, and J. DeWolf, *Mechanics of materials. 3/e in SI units*, ed. 2004.
 - [6] Boresi, A.P. and R.J. Schmidt, *Advanced mechanics of materials*. 2002: John Wiley & Sons.
 - [7] Gurit, SE 75 FLAX, low temperature cure epoxy prepreg. 2024.
 - [8] LOCTITE® EA 9394 AERO, Multipurpose/aerospace structural paste for durable bonds at high temperatures, Technical Data Sheet. 2013.
 - [9] Qiu, J. and M. Zhou, Analytical solution for interference fit for multi-layer thick-walled cylinders and the application in crankshaft bearing design. *Applied Sciences*, 2016. 6(6): p. 167.
 - [10] Barbero, E.J., *Introduction to composite materials design*. 2010: CRC Press.
 - [11] Hu, Y., M. Yang, J. Zhang, C. Song, and T. Hong, Effect of stacking sequence on the torsional stiffness of the composite drive shaft. *Advanced Composite Materials*, 2017. 26(6): p. 537-55.

ضمائم

جدول (۶): خواص مکانیکی پارچه پیش‌آغشته Gurit HMC Fiber300 SE 75 در راستای صفر درجه

توضیحات	نماد	مقدار	واحد
کسر حجمی الیاف	v_f	۵۷	%
ضخامت هر لایه	t_{ply}	۰/۴۵	mm
وزن هر لایه	W_{ply}	۶۴۰	$\frac{g}{m^2}$
چگالی	ρ	۱۴۹۸	$\frac{kg}{m^3}$
مدول کششی در راستای الیاف (طولی)	$E_{11,t}$	۲۰۸	GPa
استحکام کششی در راستای الیاف (طولی)	$\sigma_{11,t}$	۲۳۱۸	MPa
استحکام خستگی کششی در راستای الیاف (طولی) در عمر ۱۰ میلیون چرخه	$\sigma_{11,t,10^7}$	۱۱۵۹	MPa
مدول فشاری در راستای الیاف (طولی)	$E_{11,c}$	۱۸۷	GPa
استحکام فشاری در راستای الیاف (طولی)	$\sigma_{11,c}$	۱۱۲۲	MPa
استحکام خستگی فشاری در راستای الیاف (طولی) در عمر ۱۰ میلیون چرخه	$\sigma_{11,c,10^7}$	۵۶۱	MPa
مدول کششی عمود بر الیاف (عرضی)	$E_{22,t}$	۶/۳۹	GPa
استحکام کششی عمود بر الیاف (عرضی)	$\sigma_{22,t}$	۲۶	MPa
مدول فشاری عمود بر الیاف (عرضی)	$E_{22,c}$	۷	GPa
استحکام فشاری عمود بر الیاف (عرضی)	$\sigma_{22,c}$	۸۶	MPa

GPa	۴/۳۱	G_{13}	مدول برشی بین‌لایه‌ای
MPa	۶۴/۷۰	σ_{13}	استحکام برشی بین‌لایه‌ای
GPa	۴/۳۱	G_{12}	مدول برشی درون‌لایه‌ای (صفحه‌ای)
MPa	۶۴/۷۰	σ_{12}	استحکام برشی درون‌لایه‌ای (صفحه‌ای)
-	۰/۳۳۷	v_{12}	نسبت پواسون - کرنش طولی

جدول (۷): خواص مکانیکی اتصال چسبی دو جزئی LOCTITE EA 9394 AERO

توضیحات	نماد	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	$E_{adhesive}$	۴/۱	GPa
نسبت پواسون	$\nu_{adhesive}$	۰/۳۷	-
چگالی	ρ	۱۱۵۰	$\frac{kg}{m^3}$
استحکام برشی	$\sigma_{12,adh}$	۲۵	MPa