

# تحلیل ارتعاشی پنل‌های کامپوزیتی ترمز آیرودینامیکی قطارهای پر سرعت

پریسا حسینی تهرانی، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محسن غضنفری (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

زهیر سلیمانی، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: m\_ghazanfari@rail.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۹ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۶

## چکیده

در حال حاضر از آلومینیوم و فولاد به عنوان جنس پنل ترمز آیرودینامیک در قطارهای پر سرعت استفاده می‌شود اما هدف این مقاله بررسی اثر کامپوزیت‌ها در افزایش فرکانس‌های طبیعی و کاهش وزن پنلها در یک زمان است. در این مقاله از کامپوزیت گرافیت اپوکسی (AS4/3501-6) استفاده شده است که در میان کامپوزیت‌ها خواص ارتعاشی بهتری دارد. فرکانس طبیعی پنل زمانی که از کامپوزیت گرافیت اپوکسی استفاده می‌شود نسبت به فلزات آلومینیوم و فولاد بهبود یافته و از ۸۴/۲۰۵ هرتز به ۱۰۱/۵۵ هرتز رسیده است که افزایشی ۲۰ درصدی است. علاوه بر این، مقدار بیشینه تنش وارد بر پنل با استفاده از کامپوزیت گرافیت اپوکسی ۷۱ مگاپاسکال و مقدار بیشینه جابجایی عرضی ۲/۹۵۲ میلی‌متر است. با بررسی فرآیند باز شدن پنل از وضعیت ۵- درجه تا ۷۳ درجه در مدت زمان ۳ ثانیه با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس، تغییرات در جابجایی عرضی و تنش پنل کامپوزیتی در حین باز شدن بدست آمده است. با ادامه تحلیل دینامیکی تا زمانی که پنل به اندازه ۹۰ درجه باز شود، مقدار تنش و جابجایی پنل با مقادیر تنش و جابجایی پنل در حالت استاتیکی همخوانی دارد.

واژه‌های کلیدی: ترمز آیرودینامیکی، فرکانس طبیعی، قطارهای پرسرعت، کامپوزیت

## ۱. مقدمه

همچنین پدیده تداخل سری<sup>۳</sup> به منظور استفاده از چند ردیف پنل پشت سر هم را نیز مورد بررسی قرار داده اند.

[Jianyong et al. 2013] به بهینه سازی کنترل موقعیت یک مدل صفحه ترمز آیرودینامیکی پرداخته‌اند. برای رسیدن به این هدف، جنبه‌های مختلف شامل دقت موقعیت و نیروی اینرسی تولید شده در لحظات شروع و توقف را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها برای این کار از سه تابع کنترل ثابت، خطی و درجه دوم استفاده کرده‌اند. تاثیر ترمز آیرودینامیکی بر روی میدان جریان اطراف قطار و نیروی ترمزگیری بررسی شده و همچنین پدیده تداخل سری در هنگام استفاده از چند ردیف پنل ارائه شده است [Puharic et al. 2010, 2014].

[Jianyong et al. 2013] طرحی برای ترمز آیرودینامیکی قطارهای پرسرعت ارائه داده‌اند. وسیله ارائه شده یک مدل یک طرفه بازشونده است که با سیستم هیدرولیکی حرکت می‌کند. آنها در تحقیق خود نیروی ترمز پنل‌ها و بادگیرهای جریان را، وقتی پنل‌های ترمز در زوایای ۰، ۴۵ و ۷۵ درجه باشند مورد بررسی قرار دادند. از روش المان محدود برای تحلیل ترمز آیرودینامیکی در قطارهای CRH<sup>۴</sup> استفاده شده است. با توجه به اینکه بار محوری قطارهای CRH تقریباً ۱۵ تن است و با در نظر گرفتن زاویه بازشوندگی ۷۵ درجه، کاهش سرعت از ۵۰۰ کیلومتر در ساعت به ۳۰۰ کیلومتر در ساعت، بیشینه نیروی ۱۲۰۶۳ نیوتون وارد بر اولین بالچه، ضخامت ۲۵ میلی‌متر بالچه و جنس فولاد و استفاده از مش چهار ضلعی، آزمایش انجام شده است. برای شکل خاصی از یک ترمز آیرودینامیکی در سرعت ۵۰۰ کیلومتر بر ساعت ارتعاشات و میزان جابجایی‌های پنل در فرکانس‌های خاصی بررسی شده است [Zhu and Zhu, 2012]. مشخصات یک ترمز آیرودینامیکی که در یک مگلو<sup>۵</sup> مورد استفاده قرار گرفته است بحث و بررسی شده است.

[Yoshimura Saito and Hosaka, 2000]

با توجه به بررسی‌های انجام شده تا کنون تحقیقی در جهت بررسی ارتعاشات پنل‌های کامپوزیتی به عنوان صفحه ترمز آیرودینامیکی انجام نشده است. در این تحقیق سعی شده تا با استفاده از پارامترهایی که از صفحه ترمز در دسترس است با

در این مقاله هدف تغییر جنس پنل ترمز آیرودینامیکی<sup>۱</sup> و افزایش فرکانس‌های طبیعی آن است. با توجه به موقعیت نصب پنل ترمز آیرودینامیکی به ماده‌ای نیاز است که علاوه بر داشتن خصوصیات ارتعاشی مناسب، استحکام بالا و در عین حال وزن کمی داشته باشد. بنابراین از کامپوزیت‌ها استفاده شده است که علاوه بر داشتن استحکام بالا، وزن کمی دارند. بررسی این موضوع در قطارهای پرسرعت اهمیت بسیاری دارد. ترمزهای سایشی در سرعت‌های بالا به دلیل افزایش اصطکاک بین چرخ و ریل، نیروی ترمزی کافی تولید نمی‌کنند، بنابراین استفاده از ترمزهای غیرسایشی اهمیت زیادی دارد. مقدار نیروی ترمز آیرودینامیکی با مجذور سرعت قطار رابطه مستقیم دارد، بنابراین با افزایش سرعت قطار، کارایی ترمز آیرودینامیکی بهتر می‌شود. علاوه بر این افزایش سرعت قطار باعث افزایش سر و صدا و بروز مشکلات ارتعاشی می‌شود که نشان می‌دهد افزایش فرکانس در ترمزهای آیرودینامیکی اهمیت زیادی دارد. بنابراین باید از ترمزی استفاده کرد که علاوه بر برطرف کردن مشکلات ناشی از افزایش سرعت در قطارها، ایمنی قطار را نیز هنگام توقف تضمین کند [Chun, Mengling and Lihui et al., 2009].

امروزه استفاده از کامپوزیت‌ها در حال افزایش است و برتری‌هایی که این مواد نسبت به مواد فلزی دارند باعث شده است تاکنون علاوه بر صنایع فضایی و دریایی، در صنعت راه‌آهن نیز مورد استفاده قرار گیرند. کامپوزیت‌ها تنوع زیادی دارند و انتخاب ماده مناسب از میان آنها کار بسیار دشواری است که نیازمند مطالعه زیادی در این زمینه است و در نهایت کامپوزیت گرافیت اپوکسی که خواص ارتعاشی مناسبی نیز دارد، برای این مطالعه انتخاب شده است. تحلیل آیرودینامیکی به منظور تعیین شکل مناسب پنل از لحاظ ایجاد نیروی زیاد پسا<sup>۲</sup> و همچنین فضای لازم قرارگیری پنل در سقف قطار انجام شده است. [Ghazanfari and Hosseini Tehrani, 2015] آنها همچنین در پژوهش خود به بررسی ضخامت مناسب پنل با استفاده از فاکتورهای جابجایی، تنش، فرکانس طبیعی و وزن مناسب پرداخته‌اند. آنها

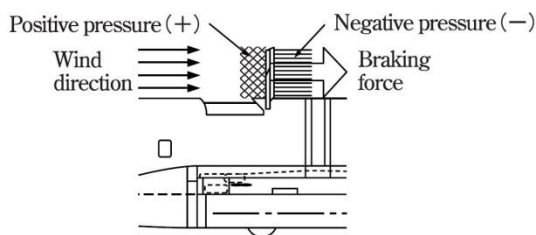
## تحلیل ارتعاشی پنل‌های کامپوزیتی ترمز آیرودینامیکی قطارهای پر سرعت



(ج)

شکل ۱. انواع ترمز آیرودینامیکی (الف) نوع A یا دو پنل متقارن در کنار هم (ب) نوع B یا تک پنل (ج) ترمز آیرودینامیکی قطار مگلو [Ghazanfari MLU0002N and Hosseini Tehrani, 2015]

وقتی صفحات ترمز باز شده و جریان هوای عبوری را سد می‌کنند، فشار مثبت در جلو این صفحات ایجاد شده، در نتیجه یک فشار منفی در پشت این صفحات ظاهر شده و جدایی جریان در پشت صفحات ایجاد می‌شود. اختلاف فشار بین جلو و عقب این صفحات یک نیروی عمودی مقاوم ایجاد می‌کند که عامل اصلی ترمزگیری آیرودینامیکی محسوب می‌گردد. در شکل (۴) این موضوع به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۲. مکانیزم عملکرد ترمز آیرودینامیکی [Ghazanfari and Hosseini Tehrani, 2015]

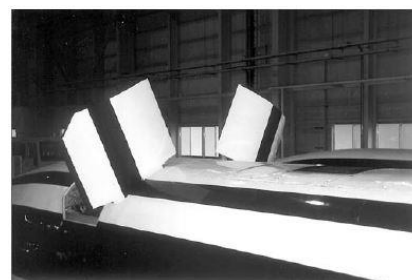
### ۳. مدل‌سازی

برای شبیه‌سازی جریان پیرامون ترمزگیری بایستی نوع جریان (آرام<sup>۸</sup> یا آشفته<sup>۹</sup>) مشخص گردد. برای مشخص کردن نوع جریان می‌بایست عدد رینولدز<sup>۱۰</sup> محاسبه شود. عدد رینولدز برای گذر از ناحیه آرام به آشفته  $5 \times 10^5$  است. با در نظر گرفتن سرعت ۳۶۰ کیلومتر در ساعت برای قطار با استفاده از رابطه (۱) عدد

استفاده از نرم افزار آباکوس<sup>۶</sup> به تحلیل مودال و تنش صفحه پرداخته شود.

### ۲. ویژگیهای ترمز آیرودینامیکی و مکانیزم عملکرد آن

از مزایای ترمز آیرودینامیکی می‌توان به مواردی چون قابلیت اطمینان بالای این سیستم، کاهش قسمت عظیمی از هزینه‌های مربوط به استهلاک سیستم ترمز، کاهش گرمای تولید شده حاصل از اصطکاک حاصل از سیستم ترمزهای چسبان<sup>۷</sup>، عملکرد خوب در سرعت‌های بالا، وابسته نبودن به عوامل محیطی و عدم سایس (نسبت به ترمزهای کفشکی و دیسکی) اشاره کرد. از دیگر مزیت‌های این ترمزها نسبت به دیگر ترمزهای غیر چسبان مثل ترمزهای مغناطیسی و جریان ادی می‌توان مواردی مثل برنامه‌ی کنترلی ساده تر، ایجاد یک نیروی عمودی به منظور بهبود تماس بین چرخ و ریل، انرژی کم برای انجام ترمزگیری، قابل انعطاف بودن از لحاظ مکان و فضای قرارگیری و عدم نیاز به تغییرات اساسی در ساختار بوژی و سیستم تعلیق ثانویه را بیان نمود. در شکل (۱) می‌توان نمونه‌هایی از کاربرد ترمز آیرودینامیکی را در قطارهای متفاوت مشاهده کرد.



(الف)



(ب)

جدول ۱. خصوصیات پنل طراحی شده [Ghazanfari and Hosseini Tehrani, 2015]

نوع A (دو پنل در کنار هم)	ساختار
۱۳۵۰	طول (mm)
۹۰۰	ارتفاع (mm)
۹۰۰	شعاع انحنای در جهت طول پنل (mm)
۹	ضخامت (mm)
۵	زاویه پنل نسبت به افق (درجه)
۱/۴۶	ضریب پسا

### ۱-۳ جنس پنل

در میان انواع کامپوزیت پرکاربرد در صنعت، کامپوزیت‌های پلیمری دارای قیمت پایین تر نسبت به دیگر انواع کامپوزیتها هستند، از دیگر خصوصیات آنها می‌توان علاوه بر وزن کمتر این نوع کامپوزیت‌ها به استحکام کششی بالا، چقرمگی شکست و سفتی بالا، مقاومت سایشی و مقاومت خوردگی خوب آن‌ها اشاره نمود. همچنین کامپوزیت‌های پلیمری دارای خصوصیات ارتعاشی بسیار مناسبی هستند و در مقابل پدیده تشدید در ارتعاشات نسبت به فلزات مقاوم‌تر هستند. همچنین می‌توان تنها عیب این نوع از کامپوزیت‌ها را مقاومت گرمایی پایین آنها برشمرد که این عیب برای استفاده برای پنل ترمزگیری آیرودینامیکی تاثیر چندانی ندارد. در بین کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، اپوکسی ماتریس پلیمری نسبتاً گران‌تری است که در کاربردهای صنعتی بخصوص هوا-فضا به وفور استفاده می‌شود و دارای خواص مکانیکی بهتری است و در برابر رطوبت مقاوم‌تر است. با توجه به اینکه هدف ما بررسی ارتعاشی پنل است، جنس پنل از کامپوزیت با رزین اپوکسی و الیاف گرافیت انتخاب شده است. خواص مکانیکی کامپوزیت گرافیت- اپوکسی (AS4/3501-6) در شرایط خشک، دمای اتاق و کسر حجمی رزین  $v_f = 63\%$  در جدول (۲) آورده شده است.

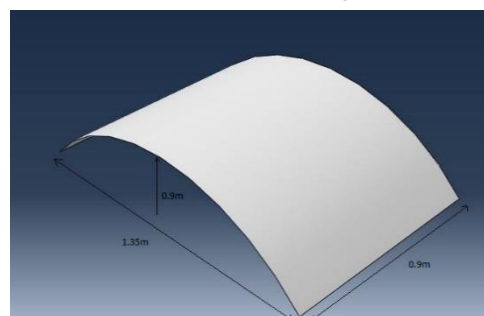
رینولدز تقریباً برابر با  $2.23 \times 10^7$  می‌شود. [Ghazanfari and Hosseini Tehrani, 2015, Zhu et al. 2014]

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (۱)$$

در جریان آشفته نیروی پسا با مجذور سرعت متناسب است. بنابراین برای محاسبه نیروی پسا می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$F_D = 0.5 \rho C_{dp} A_{eff} v^2 \quad (۲)$$

در رابطه (۱) و (۲)  $Re$  و  $F_D$  به ترتیب عدد رینولدز و نیروی پسا پنل ترمزگیری هستند. همچنین  $d, \rho, \mu, v, C_{dp}$  و  $A_{eff}$  به ترتیب ضریب پسا فشاری، سرعت نسبی بین قطار و باد، ویسکوزیته هوا، چگالی هوا، قطر معادل هیدرولیکی و سطح موثر پنل قرار گرفته در مقابل جریان هستند. لازم به توضیح است که مقدار  $C_{dp}$  ثابت نیست و به سرعت، چگالی، ویسکوزیته، جهت جریان، وضعیت قرارگیری پنل و ابعاد پنل وابسته است. به دلیل وجود این پارامترها در عدد رینولدز می‌توان ضریب پسا را تابعی از عدد رینولدز بیان نمود. از دیگر پارامترهایی که در ضریب پسا بخصوص در جریان قابل تراکم موثر است عدد ماخ<sup>۱۱</sup> (نسبت سرعت حرکت به سرعت صوت) است. با توضیحات بیان شده می‌توان ضریب پسا را تابعی از سه پارامتر رینولدز، ماخ و جهت جریان دانست. به منظور تعیین جنس مناسب برای پنل و آنالیز مودال پنل ترمزگیری نیاز به اطلاعات لازم از شکل و نیروهای آیرودینامیکی پنل ترمزگیری است که این اطلاعات را از تحقیق [Ghazanfari and Hosseini Tehrani, 2015] استفاده شده در تحلیل و مشخصات آن در ادامه آمده است.



شکل ۳. مشخصات هندسی پنل

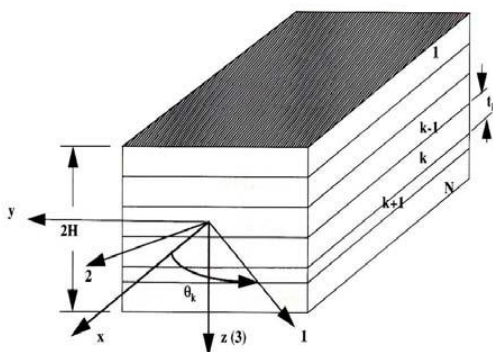
## تحلیل ارتعاشی پنل‌های کامپوزیتی ترمز آیرودینامیکی قطارهای پرسرعت

قوانین طراحی به منظور بهبود استحکام:

۱. کمینه کردن گروه‌های لایه‌های با جهت یکسان به منظور کاهش تنش‌های درون لایه‌ای. در هر گروه نباید بیش از ۴ لایه تکراری وجود داشته باشد.
۲. پرهیز از ساخت گروه‌های ۹۰ درجه و جدا کردن این لایه‌ها با استفاده از زوایای دیگر به منظور کاهش تنش‌های برشی و نرمال درون لایه‌ای.
۳. جدایی لایه‌های  $\pm\theta$  برای کاهش تنش برشی درون لایه‌ای
۴. برای جلوگیری از ترک خوردگی و پدیده‌ی لایه لایه شدن، اختلاف زاویه بین دو لایه مجاور نباید بیش از ۴۵ درجه باشد.

البته قوانین فوق با توجه به شرایط بارگذاری و هندسی مسئله ممکن است تغییر کنند یا فقط یک سری از آنها مورد استفاده قرار گیرند [Jung et al. 2004].

### ۳-۳ تئوری لایه‌ها



شکل ۴. ساختار کامپوزیت چند لایه

محاسبه ماتریس‌های سختی، کرنش و تنش در هر لایه نشان داده شده در شکل (۴) به صورت زیر است. [Tsai, 1988, Quin, 2002 and Gay Hoa and Tsai, 2003, Mallick et al. 2008 and Reddy, 2004]

- محاسبه ماتریس سختی کاهش یافته لایه  $\bar{Q}_k$

- محاسبه کرنش سطح میانی و انحناء بر اثر نیروها و ممانهای اعمال شده

- محاسبه کرنش‌های صفحه‌ای  $\epsilon_{xx}$ ،  $\epsilon_{yy}$  و  $\epsilon_{xy}$  برای هر لایه

- محاسبه تنش‌های صفحه‌ای  $\sigma_{xx}$ ،  $\sigma_{xy}$  و  $\tau_{xy}$  در هر لایه

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}]_k \{\epsilon\} \quad (3)$$

جدول ۲. خواص مکانیکی گرافیت-اپوکسی (AS4/3501-6)

مقدار	خواص
$E_1 = 144 \text{ GPa}$	مدول الاستیسیته طولی
$E_2 = 9.68 \text{ GPa}$	مدول الاستیسیته عرضی
$G_{12} = G_{13} = 4.14 \text{ GPa}$ , $G_{23} = 3.45 \text{ GPa}$	مدول برشی
$\nu_{12} = 0.3$	ضریب پواسون
$\rho = 1389 \text{ Kg/m}^3$	چگالی
$X_t = 2200 \text{ MPa}$	استحکام کششی طولی
$X_c = 1700 \text{ MPa}$	استحکام فشاری طولی
$Y_t = 60 \text{ MPa}$	استحکام کششی عرضی
$Y_c = 200 \text{ MPa}$	استحکام فشاری عرضی
$S = 100 \text{ MPa}$	استحکام برشی

### ۲-۳ قوانین طراحی در کامپوزیت‌ها

با توجه به اینکه انتخاب زوایا و تعداد لایه‌ها در یک کامپوزیت در خصوصیات مکانیکی آن مانند استحکام، سختی و تنش تاثیر گذار است، برای رفع نیازهای مسئله باید طراحی خود را بر اساس قوانین طراحی انجام دهیم. قوانین کلی طراحی عبارتند از:

۱. طراحی باید به گونه‌ای باشد که نسبت به لایه میانی متقارن باشد تا کوپلینگ خمشی-پیچشی به حداقل برسد.
۲. طراحی باید متعادل باشد تا کوپلینگ کششی-برشی به حداقل برسد.
۳. زوایای  $\pm\theta$  باید دسته‌بندی شوند تا کوپلینگ پیچشی-خمشی کاهش یابد.

قوانین طراحی به منظور بهبود سختی:

۱. از هر یک از زوایای رایج باید استفاده شود تا سختی به حداقل برسد.

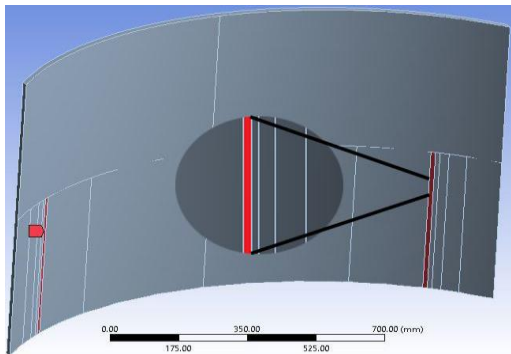
در نهایت می توان شکل کلی روابط (۸) و (۹) را به صورت

زیر بیان نمود.

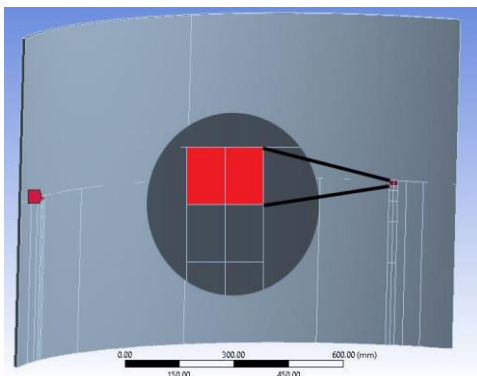
$$\begin{Bmatrix} \dot{V} \\ \dot{M} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{e} \\ \dot{c} \\ \dot{g} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} B \\ D \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} e^0 \\ k \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

### ۳-۴ شرایط تکیه گاهی و بارگذاری پنل

با توجه به شکل (۱) دو نوع از تکیه گاه های پر کاربرد قطارهای پرسرعت مطابق شکل های (۵) و (۶) همین دو مدلی است که در تحلیل ها مورد استفاده قرار گرفته است (مدل با تکیه گاه قاب مانند ثابت و دیگری استفاده از تکیه گاه های هیدرولیکی با سطح مقطع کوچک). همانطور که در شکل ها نیز مشخص شده است، تکیه گاه نوع اول در دو خط و تکیه گاه نوع دوم در دو نقطه مقید شده اند و شش درجه آزادی هر دو تکیه گاه بسته شده است. تحلیل ها برای هر دو نوع تکیه گاه انجام شده است.



شکل ۵. تکیه گاه نوع اول (ثابت شده در دو خط)



شکل ۶. تکیه گاه نوع دوم (ثابت شده در دو نقطه)

در پنل های منحنی به دلیل ایجاد جدایی جریان و گردابه های شدیدتر نسبت به حالت پنل مسطح فشار منفی تری در پشت پنل بوجود می آید. بدین ترتیب پنل های انحنادار طرحی مناسب برای افزایش نیروی پسا هستند. مقدار نیروی باد با سرعت ۳۶۰

تنش در لایه K ام از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}]_k (\{\epsilon^0\} + Z\{\kappa\}) \quad (4)$$

ماتریس  $\begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{66} \end{Bmatrix}$  به صورت زیر قابل بیان است.

$$\begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{66} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 q + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 q \cos^2 q + Q_{22} \sin^4 q \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 q \cos^2 q + Q_{12} (\sin^4 q + \cos^4 q) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 q + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 q \cos^2 q + Q_{22} \cos^4 q \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{22} - 2Q_{66}) \sin q \cos^3 q + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 q \cos q \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{22} - 2Q_{66}) \sin^3 q \cos q + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin q \cos^3 q \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 q \cos^2 q + Q_{66} (\sin^4 q + \cos^4 q) \end{aligned} \quad (6)$$

$$Q_{11}^{(k)} = \frac{E_1^{(k)}}{1 - u_{12}^{(k)} u_{21}^{(k)}} \cdot Q_{12}^{(k)} = \frac{u_{12}^{(k)} E_2^{(k)}}{1 - u_{12}^{(k)} u_{21}^{(k)}} \cdot Q_{22}^{(k)} = \frac{E_2^{(k)}}{1 - u_{12}^{(k)} u_{21}^{(k)}} \cdot Q_{66}^{(k)} = G_{12}^{(k)} \quad (7)$$

برآیند نیروها و ممان ها در صفحات چند لایه با استفاده از روابط (۸) و (۹) بدست می آید.

$$N = \int_{-H}^H \sigma \cdot dZ \quad (8)$$

$$M = \int_{-H}^H \sigma \cdot Z dZ \quad (9)$$

ماتریس سختی کششی A، ماتریس جفت کننده سختی کششی-خمشی B و ماتریس سختی خمشی D به ترتیب از روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) تعیین می شوند.

$$[A] = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k (h_k - h_{k-1}) \quad (10)$$

$$[B] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (11)$$

$$[D] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (12)$$

## تحلیل ارتعاشی پنل‌های کامپوزیتی ترمز آبرودینامیکی قطارهای پر سرعت

جدول ۳. عدم وابستگی نتایج تحلیل مودال پنل کامپوزیتی به مش

تعداد المان	فرکانس طبیعی اول (Hz)
۳۵۱۰	۱۰۱/۷۱
۶۲۲۲	۱۰۱/۶۵
۱۳۶۸۰	۱۰۱/۶۲
۱۶۹۶۸	۱۰۱/۶۱
۲۱۷۲۸	۱۰۱/۵۸
۲۸۱۶۰	۱۰۱/۵۷
۳۸۴۰۰	۱۰۱/۵۶

با مشاهده اعداد جدول (۳) مشاهده می‌شود که هر چه تعداد المان‌ها افزایش یافته است، فرکانس طبیعی اول سیستم تغییر چندانی نکرده و اختلاف بین ۳۵۱۰ المان و ۳۸۴۰۰ المان کمتر از ۰/۲ درصد است، بنابراین برای تحلیل‌های فرکانسی از تعداد المان ۳۵۱۰ استفاده شده است.

جدول ۴. عدم وابستگی نتایج تنش و جابجایی پنل کامپوزیتی به مش

تعداد المان	بیشینه تنش (MPa)	بیشینه جابجایی (mm)
۳۵۱۰	۶۳/۱۳	۲/۹۵۰
۶۲۲۲	۷۱/۰۰	۲/۹۵۲
۱۳۶۸۰	۷۳/۹۲	۲/۹۵۲
۱۶۹۶۸	۷۳/۹۶	۲/۹۵۲

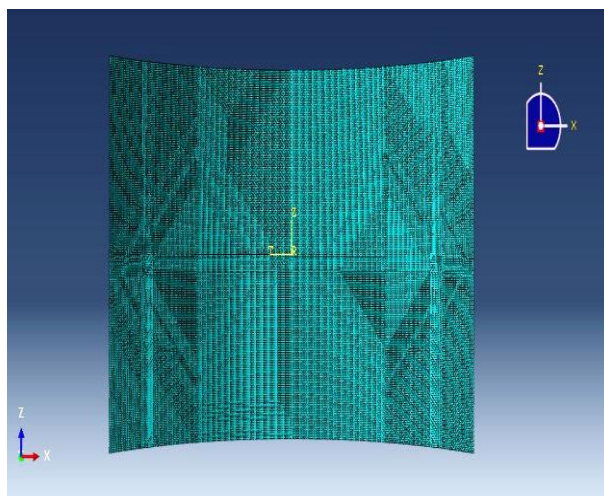
اعداد جدول (۴) نشان می‌دهد که اختلاف بین بیشینه تنش حاصل از ۱۶۹۶۸ المان و ۶۲۲۲ المان کمتر از ۱/۵ درصد است و مقدار بیشینه جابجایی نیز کمتر از ۰/۰۷ درصد اختلاف در دو

کیلومتر در ساعت در مقابل پنل منحنی با استفاده مقاله [Ghazanfari and Hosseini Tehrani, 2015] برای بهترین شکل هندسی پنل ۹۲۵۰ نیوتون بر متر مربع بدست آمده است که به صورت استاتیکی و گسترده به سطح درونی پنل در وضعیت کاملاً باز شده وارد می‌شود.

### ۴. اعتبارسنجی

در این پروژه، تحلیل‌ها با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس ۱۴.۱ به عنوان آخرین نسخه از این نرم افزار انجام شده است. با توجه به اینکه هندسه‌ی مدل به صورت پوسته تعریف شده است برای مش‌بندی از المان S4R با مش‌بندی Structure به عنوان بهترین تکنیک و شکل المان Quad به عنوان شکل رایج برای مدل‌های دو بعدی استفاده شده است. شکل (۷) پنل کامپوزیتی مش‌زده را نشان می‌دهد.

به منظور نشان دادن عدم وابستگی نتایج فرکانس طبیعی، تنش و جابجایی به مش، دو جدول (۳) و (۴) ارائه شده‌اند.



شکل ۷. پنل مش زده

ابتدا برای رسیدن به بهترین چیدمان تحلیل‌ها برای تکیه‌گاه نوع اول ارائه شده است. در ابتدا زوایای صفر و ۹۰ درجه بررسی شده‌اند. در صورتی که زاویه الیاف یک لایه ۹۰ درجه باشد نتیجه نسبت به زاویه صفر درجه بهتر است. با چینش‌های متفاوت این دو زاویه در کامپوزیت‌های دو لایه‌ای، سه لایه‌ای و چهار لایه‌ای نتیجه می‌شود که چیدمان (0/90/90/0) بهترین نتیجه را می‌دهد، بنابراین این چیدمان به عنوان یک الگو برای استفاده در ادامه مسیر در نظر گرفته شده است. در بررسی زوایای  $\pm 45^\circ$  درجه این موضوع مشخص می‌شود که تقدم و تاخر این دو زاویه نسبت به هم تاثیر چندانی در نتیجه ندارد. بنابراین هر گونه ترکیبی از این دو زاویه نتیجه یکسانی دارد، به شرطی که در کنار هم باشند و از هر دو زاویه استفاده شود. بهترین الگو در این بخش (45/-45) یا (45/45-) است. هیچ یک از این دو الگو به تنهایی نمی‌تواند نتایج مناسبی ارائه دهد زیرا بر اساس قوانین طراحی استفاده از تمامی زوایا برای برقراری تعادل در کامپوزیت بهتر است. در پنل‌های ترمز آیرودینامیکی با توجه به ایجاد دو منطقه‌ی پرفشار در دو طرف، استفاده از آرایش متقارن می‌تواند بهترین آرایش را برای هر دو طرف پنل بوجود آورد زیرا شرایط دو طرف یکسان است. بنابراین در ادامه تحلیل به دنبال ترکیب مناسبی از این دو الگو خواهیم بود. حداقل ترکیب این دو آرایش منجر به افزایش تعداد لایه‌ها به ۱۲ عدد است. در جدول (۵) نتایج چیدمان لایه‌ها در ۱۲ لایه ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج چیدمان‌های متفاوت کامپوزیت ۱۲ لایه‌ای

بیشینه جابجایی (mm)	بیشینه تنش (MPa)	فرکانس	
		طبیعی اول (Hz)	چیدمان لایه‌ها
۳/۶۲۰	۷۳/۸۱	۹۱/۶۳۸	(0/90/90/0/45/-45)s
۳/۰۲۲	۷۶/۳۰	۹۸/۶۷۶	(45/-45/0/90/90/0)s

تقدم  $\pm 45^\circ$  بر صفر و ۹۰ باعث افزایش چشمگیر فرکانس طبیعی سیستم شده است و جابجایی پنل را نیز کمتر کرده است ولی در مقابل تنش وارده را اندکی افزایش داده است. با توجه به

حالت ۳۵۱۰ المان و ۱۶۹۶۸ المان دارد. بنابراین از تعداد المان ۶۲۲۲ برای تحلیل تنش و جابجایی پنل استفاده شده است. در مورد اعتبار سنجی مسئله با توجه به نیافتن پنل مورد نظر با شرایط مرزی حاکم بر آن در مراجع برای اطمینان از صحت نتایج، یک پنل تخت کامپوزیتی با سه لایه‌ی آزاد و یک لایه‌ی مقید از جنس گرافیت اپوکسی با طول و پهنای یک متر، ضخامت ۴ میلی‌متر و چیدمان لایه‌ای (90/-90/90) با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس تحلیل شده و نتایج حاصل با نتایج اولیه‌ی آن که با استفاده از کد نویسی فورترن<sup>۱۲</sup> بدست آمده مقایسه گردیده است. همانطور که از شکل (۸) مشاهده می‌شود اختلاف میان فرکانس طبیعی اول سیستم با استفاده از نرم افزار آباکوس و کد نویسی فورترن حدود ۱/۵ درصد است که نتیجه قابل قبولی است.

## ۵. نتایج و تفسیر آنها

در این بخش به طور کلی رفتار یک کامپوزیت ورقه‌ای تحت بارگذاری گسترده تحلیل می‌شود. برای این منظور با انتخاب المان مناسب و با بهره‌گیری از نرم افزار آباکوس، روش اجزای محدود برای تحلیل انتخاب شده است. سپس نحوه چیدمان لایه‌ها و تعداد لایه‌ها برای ورق کامپوزیتی خمیده با جنس گرافیت اپوکسی بررسی شده است تا تاثیر آن در نتایج بدست آید. در نهایت تنش، جابجایی و فرکانس‌های طبیعی پنل کامپوزیتی با نتایج پنل آلومینیومی و فولادی مقایسه می‌شود.

### ۱-۵ بررسی اثر تغییر زاویه الیاف و تعداد لایه

تعداد لایه‌های یک کامپوزیت هر چه کمتر باشند علاوه بر کاهش تنش برشی درون لایه‌ای کل کامپوزیت با صرفه اقتصادی نیز همراه خواهد بود زیرا با فرض ضخامت ثابت به تولید تعداد لایه‌های کمتری نیاز است. در واقع ساخت کامپوزیت‌های با ضخامت بزرگتر ساده‌تر خواهد بود. زوایای الیاف نیز در مواردی همچون استحکام، سفتی و اثر کوپلینگ تنش تاثیرگذارند. رایج‌ترین زوایای مورد استفاده برای تعیین جهت الیاف کامپوزیت‌ها زوایای صفر، ۹۰ و  $\pm 45^\circ$  درجه هستند. قوانین طراحی کامپوزیت‌ها به صورت کلی ارائه شده‌اند بنابراین تنها در نظر گرفتن قوانین طراحی برای یک مسئله کافی نیست و باید شرایط هندسی، تکیه‌گاهی و بارگذاری را نیز در نظر گرفت. در



## تحلیل ارتعاشی پنل‌های کامپوزیتی ترمز آبرودینامیکی قطارهای پر سرعت

مورد افزایش تعداد لایه‌ها بدست آید افزایش می‌یابند. ترکیب جدید برای آخرین الگو موجب ایجاد ۲۰ و ۲۴ لایه می‌شود که نتایج آن در جدول (۷) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که افزایش تعداد لایه‌ها موجب افزایش تنش و جابجایی پنل می‌شود که ناشی از افزایش نیروهای برشی درون‌لایه‌ای است و تاثیر چندانی نیز در فرکانس طبیعی سیستم نمی‌گذارد. بنابراین بهترین چیدمان همان (45/45/0/90/90/0)s است. در مرحله بعد تاثیر زاویه ۳۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. بدیهی است که ترکیب ۱۲ لایه‌ای از این زاویه با دیگر زوایا نتایج چندان متفاوتی ارائه نمی‌دهد بنابراین با اضافه کردن لایه‌های ۳۰ درجه به آخرین الگو نتایج جدیدی بدست می‌آید که در جدول (۸) ارائه شده است. در مرحله‌ی آخر اثر تمامی زوایای مورد بحث مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که نتایج حاصل از آن در جدول (۹) ارائه شده است. با توجه به شکل (۹) و اهمیت پارامترهای تنش، جابجایی و البته مهم‌تر از همه فرکانس طبیعی چیدمان ۱۶ لایه‌ای (30/-30/45/-45/0/90/90/0)s بهترین نتیجه را در فرکانس طبیعی، تنش و جابجایی دارد. در ادامه ابتدا پنل عمود بر جریان باد در حالت استاتیکی بررسی می‌شود و سپس پنل در حالت دینامیکی بررسی می‌شود. در حالت دوم پنل از وضعیت با زاویه منفی ۵ درجه به زاویه ۷۳ درجه در مقابل جریان باد تغییر خواهد کرد که این مدت حدود ۳ ثانیه طول خواهد کشید.

جدول ۷. نتایج چیدمان‌های مختلف برای کامپوزیت‌های ۲۰ و ۲۴ لایه

چیدمان لایه‌ها	فرکانس طبیعی اول (Hz)	بیشینه تنش (MPa)	بیشینه جابجایی (mm)
(45/-45/45/-45/0/90/90/0/45/-45)s	۹۵/۲۵۰	۸۱/۶۰	۲/۹۸۲
(45/-45/0/90/90/0/45/-45/45/-45)s	۹۹/۳۲۹	۸۵/۸۹	۳/۰۹۵
(0/90/90/0/45/-45/0/90/90/0/45/-45)s	۹۴/۵۳۴	۷۷/۷۴	۳/۳۸۴

جدول ۸. چیدمان ۱۶ لایه‌ای با افزودن لایه‌ی ۳۰ درجه‌ای

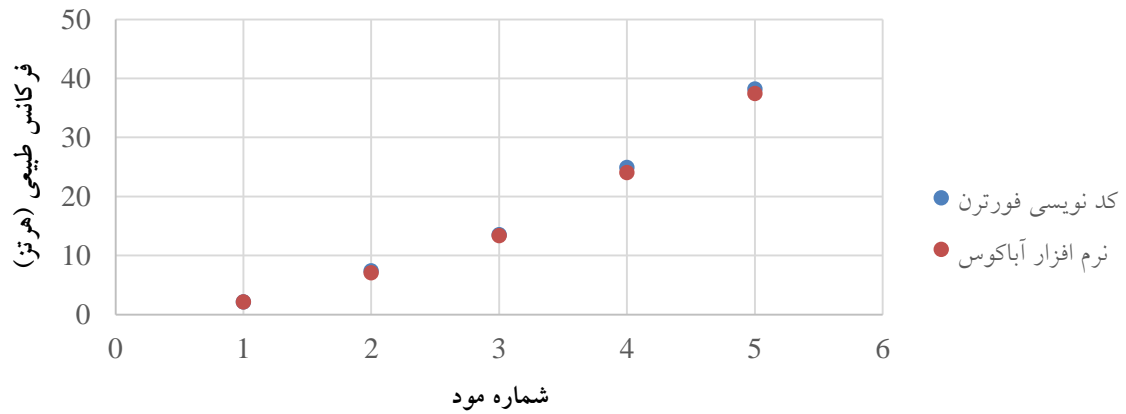
چیدمان لایه‌ها	فرکانس طبیعی اول (Hz)	بیشینه تنش (MPa)	بیشینه جابجایی (mm)
(30/-30/45/-45/0/90/90/0)s	۱۰۱/۵۵	۷۱/۰۰	۲/۹۵۲
(45/-45/0/90/90/0/30/-30)s	۹۸/۸۰۲	۸۴/۰۸	۳/۱۱۹

اهمیت فرکانس، چیدمان (45/-45/0/90/90/0)s در این مرحله به عنوان الگوی جدید انتخاب می‌شود. ترکیب بعدی این الگو یک کامپوزیت ۱۶ لایه‌ای بوجود می‌آورد که نتایج آن در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج چیدمان‌های متفاوت کامپوزیت ۱۶ لایه‌ای

چیدمان لایه‌ها	فرکانس طبیعی اول (Hz)	بیشینه تنش (MPa)	بیشینه جابجایی (mm)
(45/-45/0/90/90/0/45/-45)s	۹۹/۳۵۷	۸۲/۵۲	۳/۰۴۲
(45/-45/45/-45/0/90/90/0/0)s	۹۳/۴۹۴	۷۷/۴۰	۲/۹۶۳
(0/90/90/0/45/-45/0/90)s	۹۲/۳۳۰	۷۷/۷۸	۳/۵۴۷

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که بهترین فرکانس را چیدمان (45/-45/0/90/90/0/45/-45)s دارد ولی تنش آن بزرگتر است که البته با این حال بهترین الگو است اما با مقایسه نتایج الگوهای این دو مرحله مشخص می‌شود که افزایش تعداد لایه تاثیر چندانی در نتایج ندارد و در عین حال تنش را نیز افزایش می‌دهد بنابراین تعداد لایه‌ها تا جایی که نتیجه درست‌تری در

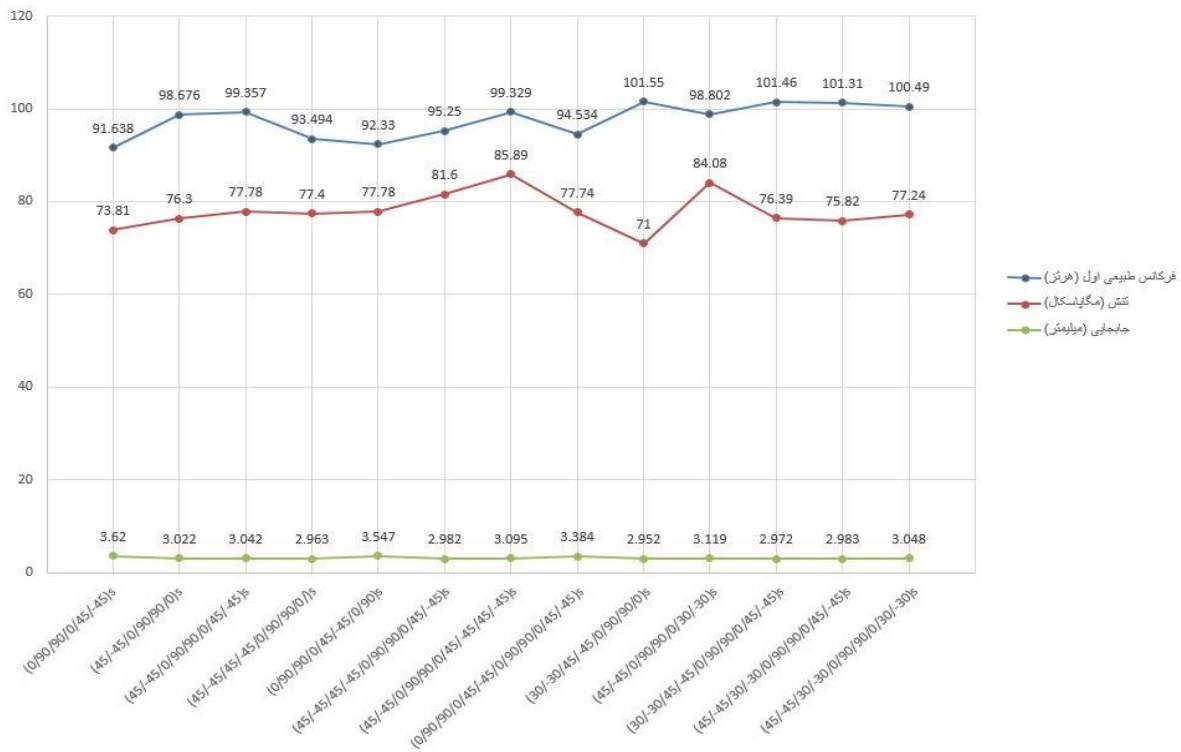


شکل ۸. مقایسه فرکانس‌های طبیعی یک پنل تخت کامپوزیتی [Dey et al. 2016]

جدول ۹. نتایج تاثیر استفاده از لایه‌های ۳۰ درجه‌ای برای کامپوزیت ۲۰ لایه‌ای

چیدمان لایه‌ها	فرکانس طبیعی اول (Hz)	بیشینه تنش (MPa)	بیشینه جابجایی (mm)
(30/-30/45/-45/0/90/90/0/45/-45)s	۱۰۱/۴۶	۷۶/۳۹	۲/۹۷۲
(45/-45/30/-30/0/90/90/0/45/-45)s	۱۰۱/۳۱	۷۵/۸۲	۲/۹۸۳
(45/-45/30/-30/0/90/90/0/30/-30)s	۱۰۰/۴۹	۷۷/۲۴	۳/۰۴۸

## تحلیل ارتعاشی پنل‌های کامپوزیتی ترمز آبرودینامیکی قطارهای پر سرعت



شکل ۹. بررسی اثر تغییر زاویه الیاف و تعداد لایه بر روی فرکانس طبیعی اول، تنش و جابجایی پنل کامپوزیتی

با مشاهده جدول (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از کامپوزیت گرافیت اپوکسی موجب افزایش ۲۰ درصدی فرکانس طبیعی سیستم می‌شود و در عین حال وزن آن نسبت به پنل آلومینیومی حدود ۵۰ درصد و نسبت به پنل فولادی ۸۰ درصد کاهش یافته است. با توجه به اینکه در قطارهای پرسرعت وزن فاکتور مهمی بشمار می‌آید استفاده از کامپوزیت می‌تواند در این زمینه بسیار سودمند باشد. اهمیت این موضوع زمانی مشخص می‌شود که بدانیم برای رسیدن به فرکانس طبیعی بدست آمده برای کامپوزیت گرافیت اپوکسی باید از فولادی با ضخامت ۱۵ میلی‌متر و وزنی حدود ۱۵۰ کیلوگرم استفاده کرد. ۱۰ فرکانس طبیعی ابتدایی پنل با هر دو نوع تکیه‌گاه در جداول زیر آورده شده است.

### ۲-۵ بررسی تنش، جابجایی و فرکانس طبیعی پنل در حالت استاتیکی

در این بخش کامپوزیت لایه‌ای گرافیت اپوکسی با چیدمان ۱۶ لایه‌ای (30/-30/45/-45/0/90/90/0)s با هر دو نوع تکیه‌گاه مورد ارزیابی قرار گرفته و با نتایج حاصل از فولاد و آلومینیوم مقایسه شده است.

### ۱-۲-۵ بررسی فرکانس طبیعی سیستم

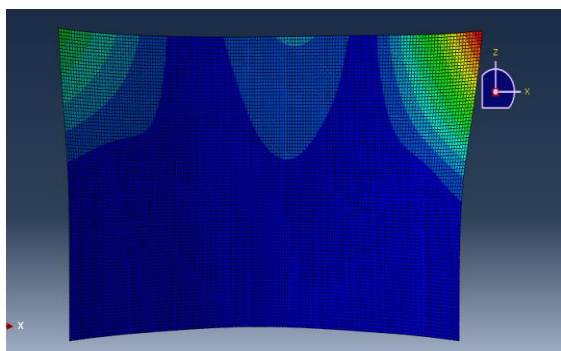
در جدول (۱۰) فرکانس طبیعی اول پنل با ضخامت ۹ میلی‌متر برای مواد مختلف ارائه شده است.

جدول ۱۰. فرکانس طبیعی اول پنل با ضخامت ۹ میلی‌متر برای

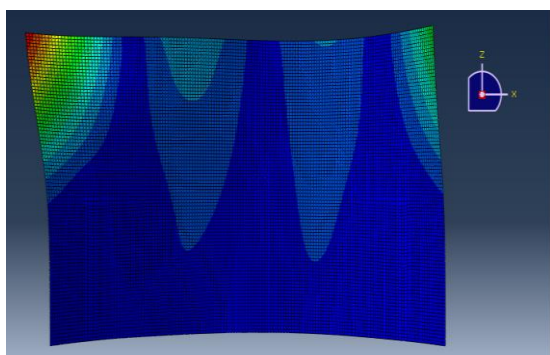
مواد مختلف

جنس پنل	فرکانس طبیعی اول سیستم (Hz)	وزن پنل (Kg)
آلومینیوم	۸۲/۰۷۳	۳۴/۲۵
فولاد	۸۴/۲۰۵	۹۷/۰۶
گرافیت اپوکسی	۱۰۱/۵۵	۱۷/۱۷

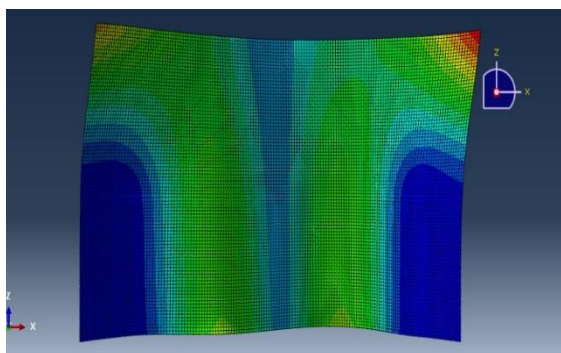
با مقایسه دو جدول (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود که فرکانس طبیعی سیستم با استفاده از تکیه‌گاه نوع اول حدوداً دو برابر زمانی است که از تکیه‌گاه نوع دوم استفاده می‌شود. تکیه‌گاه نوع اول با توجه به اینکه در دو خط مقید شده و نسبت به تکیه‌گاه نقطه‌ای از صلیبیت بیشتری برخوردار است، پنل را با قدرت بیشتری نگه می‌دارد. شکل مود ارتعاشی اول، دوم و سوم پنل کامپوزیتی با تکیه‌گاه اول به ترتیب در شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) ارائه شده است.



شکل ۱۰. شکل مود ارتعاشی اول پنل کامپوزیتی با تکیه‌گاه اول



شکل ۱۱. شکل مود ارتعاشی دوم پنل کامپوزیتی با تکیه‌گاه اول



شکل ۱۲. شکل مود ارتعاشی سوم پنل کامپوزیتی با تکیه‌گاه اول

جدول ۱۱. فرکانس طبیعی پنل کامپوزیتی با تکیه‌گاه نوع اول

شماره فرکانس	فرکانس طبیعی (Hz)
۱	۱۰۱/۵۵
۲	۱۰۹/۳۳
۳	۱۱۴/۴۷
۴	۱۷۶/۴۴
۵	۲۴۶/۴۵
۶	۲۵۳/۵۴
۷	۲۷۴/۴۳
۸	۳۰۷/۶۵
۹	۳۲۴/۰۵
۱۰	۳۵۲/۹۸

جدول ۱۲. فرکانس طبیعی پنل کامپوزیتی با تکیه‌گاه نوع دوم

شماره فرکانس	فرکانس طبیعی (Hz)
۱	۵۳/۶۸۸
۲	۶۳/۱۱۳
۳	۶۶/۷۰۸
۴	۸۹/۱۶۹
۵	۱۱۵/۳۶
۶	۱۲۷/۶۳
۷	۱۳۰/۹۹
۸	۱۶۸/۴۸
۹	۱۸۸/۰۴
۱۰	۲۶۲/۱۲

## تحلیل ارتعاشی پنل‌های کامپوزیتی ترمز آیرودینامیکی قطارهای پر سرعت

قابل توجه است. در مقایسه با پنل آلومینیومی نیز مقدار کمی جابجایی افزایش یافته است. البته توجه به این نکته ضروری است که با توجه به استحکام بسیار زیاد کامپوزیت، این مقدار تنش اهمیت چندانی ندارد که این مزیت بزرگی برای کامپوزیت‌ها بشمار می‌آید.

جدول ۱۴. بیشینه تنش و جابجایی پنل با ضخامت ۹ میلی‌متر برای مواد مختلف (تکیه‌گاه دوم)

جنس پنل	بیشینه تنش (MPa)	بیشینه جابجایی (mm)
آلومینیوم	۱۲۲/۳	۲/۴۹۹
فولاد	۱۲۲/۳	۰/۸۳۵
گرافیت اپوکسی	۲۳۰/۸	۳/۴۶۰

شکل (۱۳) مقدار فرکانس طبیعی پنل با تکیه‌گاه نوع اول را به ازای هر شماره مود نشان می‌دهد.

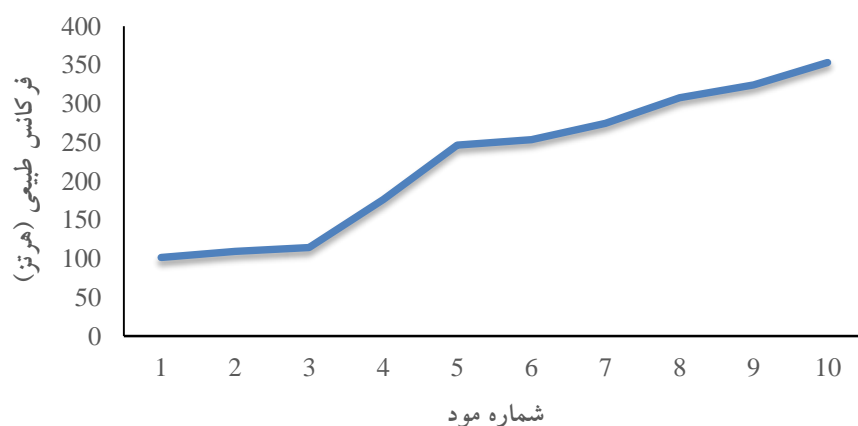
### ۲-۲-۵ بررسی تنش و جابجایی پنل

به منظور بررسی تنش و جابجایی پنل در هر دو نوع تکیه‌گاه جداول (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است.

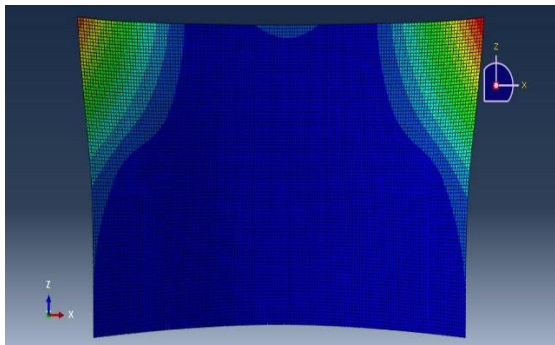
جدول ۱۳. بیشینه تنش و جابجایی پنل با ضخامت ۹ میلی‌متر برای مواد مختلف (تکیه‌گاه اول)

جنس پنل	بیشینه تنش (MPa)	بیشینه جابجایی (mm)
آلومینیوم	۹۴/۰۲	۲/۲۴۹
فولاد	۹۳/۹۳	۰/۷۵۲
گرافیت اپوکسی	۷۱/۰۰	۲/۹۵۲

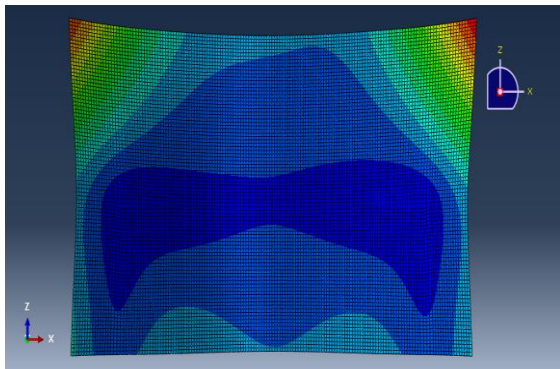
از نتایج بدست آمده در جدول (۱۳) مشاهده می‌شود که تاثیر استفاده از کامپوزیت در کاهش تنش چندان چشم‌گیر نیست (۳ درصد) و جابجایی نیز در مقایسه با پنل فولادی حدود ۲ میلی‌متر افزایش یافته است که با توجه به وزن زیاد پنل فولادی



شکل ۱۳. نمودار فرکانس طبیعی-شماره مود



شکل ۱۶. جابجایی پنل کامپوزیتی با تکیه‌گاه نوع اول



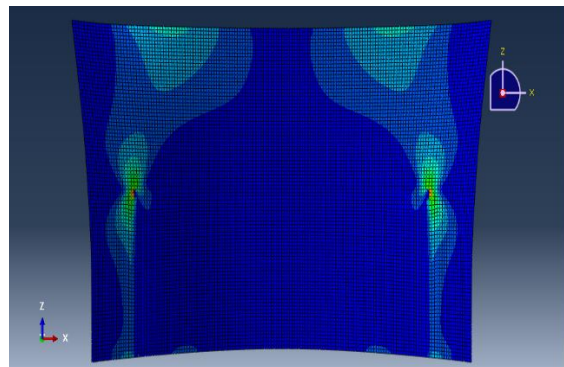
شکل ۱۷. جابجایی پنل کامپوزیتی با تکیه‌گاه نوع دوم

همانطور که در دو شکل (۱۶) و (۱۷) مشخص است تکیه‌گاه نوع اول وضعیت بهتری را در سطح پنل بوجود می‌آورد. در حالت اول تنها دو گوشه بالایی پنل در معرض جابجایی قرار می‌گیرند ولی در پنل با تکیه‌گاه دوم سطح بیشتری از پنل در معرض جابجایی قرار می‌گیرد. مقدار بیشینه جابجایی نیز در حالت اول حدود ۰/۵ میلی‌متر کمتر از حالت دوم است. با بررسی چیدمان‌های متفاوت برای پنل پس از بررسی‌های مختلف در نهایت چیدمان ۱۶ لایه‌ای (-30/45/-30)S انتخاب شده است. افزایش بیش از حد لایه‌ها باعث افزایش تنش درون لایه‌ای می‌شود. جدول (۱۵) نتایج حاصل از بهترین چیدمان‌ها در هر مرحله را نشان می‌دهد.

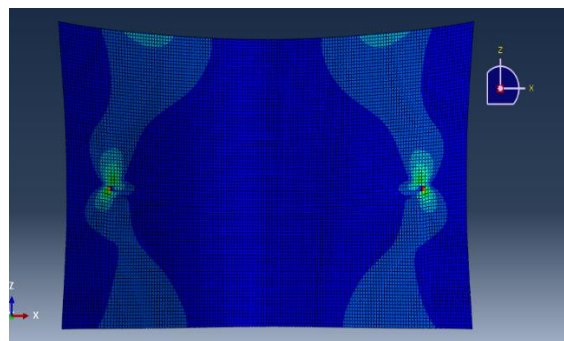
### ۳-۵ بررسی تنش و جابجایی پنل در حالت دینامیکی

در این بخش از تحلیل، صفحه پنل در مدت زمان حدود ۳ ثانیه از وضعیت زاویه منفی ۵ درجه نسبت به افق به ۷۳ درجه ۴۴۴ مهندسی حمل و نقل، سال نهم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۷

برای بررسی اثر تکیه‌گاه در تنش و جابجایی کامپوزیت گرافیت اپوکسی با مراجعه به دو جدول (۱۳) و (۱۴) ملاحظه می‌شود که مقدار تنش با تکیه‌گاه اول کمتر از نصف آن با تکیه‌گاه دوم است. با توجه به شکل هندسی دو تکیه‌گاه نیز مشخص است که نوع اول تمرکز تنش کمتری را در پنل بوجود می‌آورد. مقدار جابجایی نیز در تکیه‌گاه اول کمتر است زیرا پنل را در دو خط مقید می‌کند و آن را محکم‌تر از زمانی نگه می‌دارد که در دو نقطه ثابت باشد. برای بررسی بهتر این موضوع، شکل‌های زیر ارائه شده‌اند که با استفاده از نرم افزار آباکوس بدست آمده‌اند. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) توزیع تنش در پنل کامپوزیتی را با هر دو نوع تکیه‌گاه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در شکل اول توزیع تنش گسترده‌تر از شکل دوم است که در دو نقطه متمرکز شده است. دو شکل (۱۶) و (۱۷) نیز جابجایی پنل را در دو حالت مختلف نشان می‌دهد.

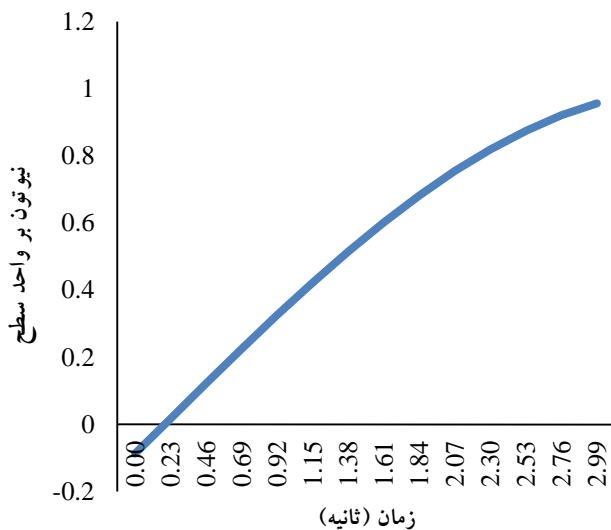


شکل ۱۴. توزیع تنش در پنل کامپوزیتی با تکیه‌گاه نوع اول (ثابت شده در دو خط)



شکل ۱۵. توزیع تنش در پنل کامپوزیتی با تکیه‌گاه نوع دوم (ثابت شده در دو نقطه)

## تحلیل ارتعاشی پل‌های کامپوزیتی ترمز آیرودینامیکی قطارهای پر سرعت

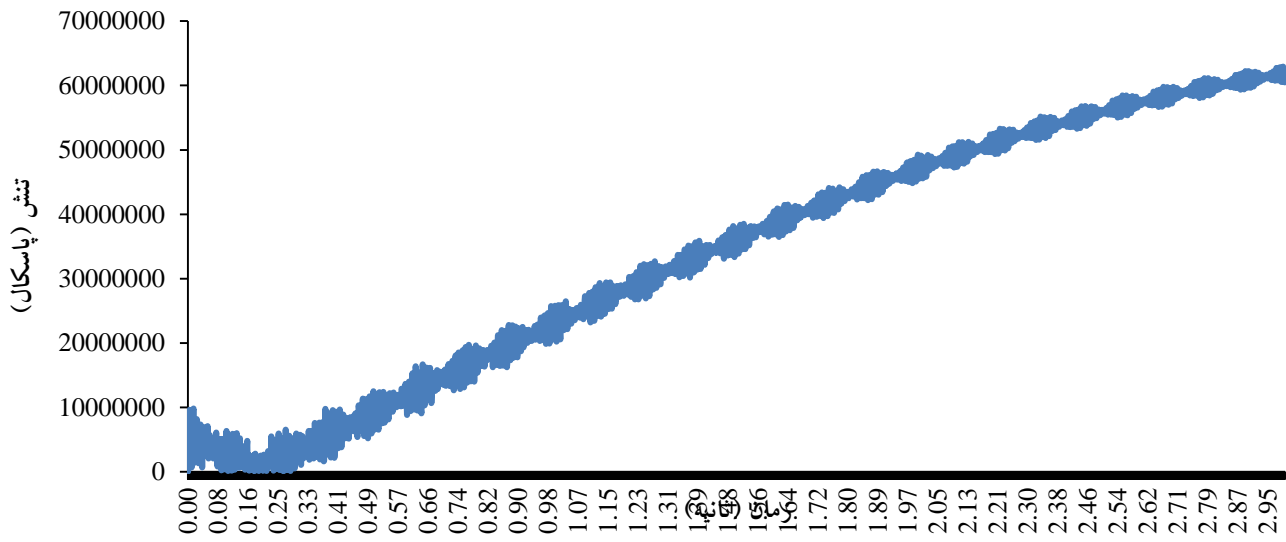


شکل ۱۸. دامنه تنش وارد بر پل بر حسب زمان

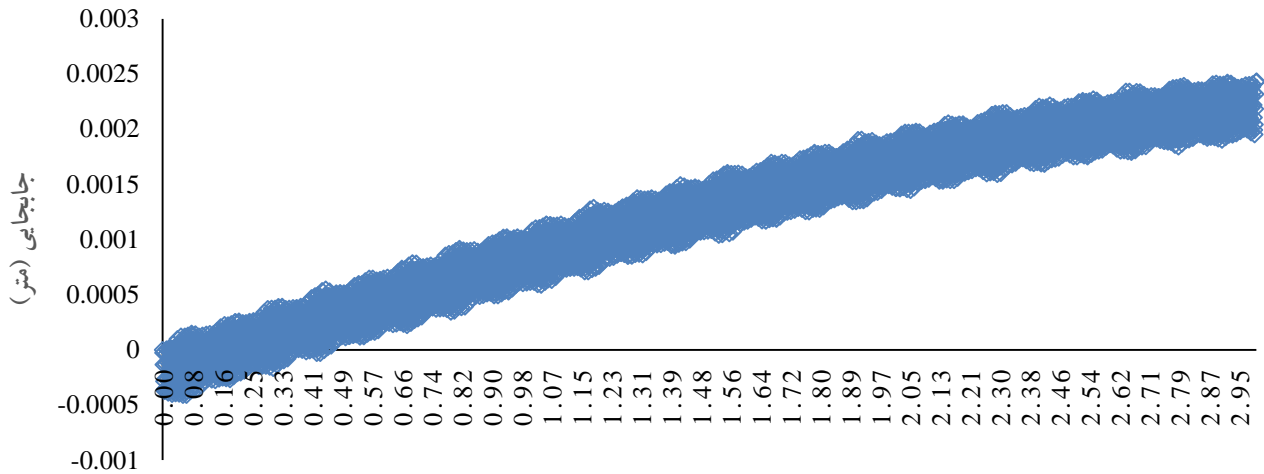
خواهد رسید و تکیه‌گاه از نوع اول است. بدین منظور یک درجه آزادی برای چرخش پل حول محور افقی در نظر گرفته شده است و دامنه بار وارد بر پل در طول این مدت به صورت شکل (۱۸) خواهد بود. در زمانی نزدیک به ثانیه سوم که پل در وضعیت ۷۳ درجه نسبت به افق قرار دارد مقدار تنش وارده حدود ۸۸۵۰ نیوتون بر متر مربع است و در لحظه شروع که پل منفی ۵ درجه پایین‌تر از سطح افق قرار دارد، مقدار نیرو حدود منفی ۸۰۰ نیوتون بر متر مربع است و در لحظه‌ای حدود ۰/۲ ثانیه از شروع فرآیند که پل موازی سقف قطار است مقدار نیرو به صفر می‌رسد. شکل‌های (۱۹) و (۲۰) مقدار تنش و جابجایی عرضی پل در طول فرآیند را نشان می‌دهد که بیشینه جابجایی حدود ۲/۵ میلی‌متر است. شکل (۱۹) روند افزایش تنش در حین فرآیند باز شدن پل را نشان می‌دهد که در لحظه آخر به ۶۰ مگاپاسکال می‌رسد.

جدول ۱۵. بهترین چیدمان‌ها برای پل کامپوزیتی در هر مرحله

چیدمان	فرکانس طبیعی اول (Hz)	بیشینه تنش (MPa)	بیشینه جابجایی (mm)
(45/-45/0/90/90/0)s	۹۸/۶۷۶	۷۶/۳۰	۳/۰۲۲
(45/-45/0/90/90/0/45/-45)s	۹۹/۳۵۷	۸۲/۵۲	۳/۰۴۲
(45/-45/0/90/90/0/45/-45/45/-45)s	۹۹/۳۲۹	۸۵/۸۹	۳/۰۹۵
(30/-30/45/-45/0/90/90/0)s	۱۰۱/۵۵	۷۱/۰۰	۲/۹۵۲
(30/-30/45/-45/0/90/90/0/45/-45)s	۱۰۱/۴۶	۷۶/۳۹	۲/۹۷۲



شکل ۱۹. نمودار تنش-زمان



زمان (ثانیه)

شکل ۲۰. نمودار جابجایی-زمان



## ۶. نتیجه گیری

برای تحلیل ارتعاشی پنل کامپوزیتی از دو نوع تکیه‌گاه استفاده شده است و برای رسیدن به بهترین چیدمان لایه‌ای در ورق کامپوزیتی قوانین طراحی ارائه شده است. در ادامه با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس ۱۴.۱ فرکانس طبیعی، بیشینه تنش و بیشینه جابجایی پنل کامپوزیتی بدست آمده است و با نتایج حاصل از پنل آلومینیومی و فولادی مقایسه شده است. با توجه به خصوصیات مناسب ارتعاشی و خوردگی بیان شده برای کامپوزیت های زمینه پلیمری و همچنین کاهش حدود ۵۰ درصدی وزن پنل کامپوزیتی نسبت به پنل آلومینیومی، با توجه به کاربرد این نوع ترمز در قطارهای پرسرعت و اهمیت وزن در این قطارها، لذا استفاده از این نوع پنل ها قابل توجه است.

با بررسی چیدمان‌های متفاوت برای پنل پس از بررسی‌های مختلف در نهایت چیدمان ۱۶ لایه‌ای (30/-30/45/-45/0/90/90/0)s انتخاب شده است. افزایش بیش از حد لایه‌ها باعث افزایش تنش درون لایه‌ای می‌شود. با استفاده از تکیه‌گاه خطی نتایج بهتری نسبت به تکیه‌گاه نقطه‌ای حاصل شده است؛ فرکانس طبیعی تقریباً دو برابر و تنش نصف حالت دوم شده است و جابجایی نیز حدود ۰/۵ میلی‌متر کاهش یافته است که نشان از صلبيت بالای تکیه‌گاه خطی دارد. توزیع تنش در تکیه‌گاه خطی گسترده‌تر از تنش نقطه‌ای بدست آمده است و جابجایی نیز در پنل با تکیه‌گاه اول وضعیت بهتری را بوجود آورده است.

استفاده از کامپوزیت گرافیت اپوکسی موجب افزایش ۲۰ درصدی فرکانس طبیعی سیستم شده است و در عین حال وزن آن نسبت به پنل آلومینیومی حدود ۵۰ درصد و نسبت به پنل فولادی ۸۰ درصد کاهش یافته است. استفاده از کامپوزیت، تنش را اندکی افزایش داده است و جابجایی در مقایسه با پنل آلومینیومی ۰/۵ میلی‌متر کاهش داشته ولی در مقایسه با پنل فولادی حدود ۲ میلی‌متر افزایش یافته است. فرآیند باز شدن پنل از زاویه ۵- درجه تا ۷۳ درجه در مدت زمان ۳ ثانیه مورد تحلیل قرار گرفته است. با ادامه تحلیل دینامیکی تا زمانی که پنل به اندازه ۹۰ درجه باز شود، مقدار تنش و جابجایی پنل با مقادیر تنش و جابجایی پنل در حالت استاتیکی همخوانی دارد.

## ۷. پی نوشتها

1. Aerodynamic brake
2. Drag force
3. Interference Series
4. China Railway High-speed
5. Maglev
6. ABAQUS
7. Adhesion braking system
8. Laminar
9. Turbulent
10. Reynolds number
11. Mach number
12. FORTRAN

## ۸. مراجع

- Chun, T., Mengling, W. and Lihui, R. (2009) "Initial discussion of research in aerodynamic brake", Rolling Stock, Vol. 47, No.3, pp. 10-12.

- Dey, S., Mukhopadhyay, T., Spickenheuer, A., Adhikari, S. and Heinrich, G. (2016) "Bottom up surrogate based approach for stochastic frequency response analysis of laminated composite plates", Leibniz-Institute fur Polymerforschung Dresden e.V., 01069 Dresden, Germany.

- Gay, D., Hoa, S.V. and Tsai, S.W. (2003) "Composite materials design and applications", London, CRC Press.

Ghazanfari, M. and Hosseini Tehrani, P. (2015) "Study on braking panels in high speed trains using CFD", International Journal of Advances in Railway Engineering (IJARE), Vol. 2, pp. 93-106.

- Hosseini Tehrani, P. and Ghazanfari, M. (2015) "Effects of panels configuration on braking force of aerodynamic brake in high speed train", International Congress on Advanced Railway Engineering (IC-ARE'15), Istanbul, Turkey, pp.56-62.

- Jianyong, Z., Mengling, W., Chun, T., Ying, X., Zhuojun, L. and Zhongkai, C. (2013) "Aerodynamic braking device for

Mechanics and Materials, Vols. 226-228 pp. 102-105.

- Zhu, Y., Shang, W., Zhang, X., Yan, H. and Wu, P. (2014) "Research on braking process of high-speed train with aerodynamic brake", International Journal of Control and Automation, Vol. 7, No. 12, pp. 363-374.

high-speed trains: Design, simulation and experiment", proceedings of the institution of mechanical engineers, Part F: Journal of rail and rapid transit, 0954409712471620.

- Jianyong, Z. and Zhongkai, Ch. (2012) "Study on anti-skid control of railway train braking based on adhesion creep behavior", Chinese journal of mechanical engineering, Vol, 25, No.3, pp. 543-549.

- Jung, S. K., Nam, P. K and Seong, H. H. (2004) "Optimal stiffness design of composite laminates for a train carbody by an expert system and enumeration method", Composite structures, Vol. 68, pp.147-156.

Composites, Materials, Manufacturing, and design".

- Puharic, M., Matic, D., Linic, S., Ristic, S. and Lucanin, V. (2014) "Determination of braking force on the aerodynamic brake by numerical simulation", FME Transactions, Vol. 42, No. 2, pp. 106-101.

- Puharic, M., Lucanin, V., Ristic, S. and Linic, S. (2010) Application of the aerodynamic brake on trains. Ipp Conference, pp. 13-21.

- Quin, J. A. (2002) "Composites – Design Manual", James Quinn Associates Ltd.

- Reddy, J. N. (2004) "Mechanics of laminated composite plates and shells-theory and analysis", London, CRC Press.

- Tsai, S.W., (1988) "Composites design", published by Think composites.

- Yoshimura, M., Saito, S. and Hosaka, S. (2000) "Characteristics of the aerodynamic brake of the vehicle on the Yamanashi maglev test line", Quarterly Report Of Railway Technical Research Institute, Vol. 41, No.2 pp. 74-78.

- Zhu, W.Q. and Zhu, Y.Y. (2012) "The vibration response analysis about high-speed train's braking wing", Applied

## تحلیل ارتعاشی پنل‌های کامپوزیتی ترمز آیرودینامیکی قطارهای پر سرعت

پریسا حسینی تهرانی در سال ۱۳۷۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک از دانشگاه امیرکبیر گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل سازه‌ها تحت بارهای حرارتی و دینامیکی، خستگی و شکست و انتشار امواج بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



محسن غضنفری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی مکانیک را در سال ۱۳۹۱ و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی ماشینهای ریلی را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۳ وارد دوره دکتری در رشته مهندسی راه آهن، گرایش مهندسی ماشینهای ریلی در دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان آیرودینامیک قطار، جوش سر به سر جرقه ای ریل‌های راه آهن است.



زهیر سلیمانی، درجه کارشناسی در رشته مکانیک را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه کاشان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی ماشینهای ریلی در سال ۹۴ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان آیرودینامیک قطار است.

