



## بازطراحی، تحلیل مودال و تحلیل تنش تیر تقویتی داشبورد

مجید صفرآبادی<sup>1\*</sup>، محسن صداقت<sup>2</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14399-57131، [msafarabadi@ut.ac.ir](mailto:msafarabadi@ut.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله:
<p>در قلب داشبورد یک خودرو، یک ساختار پشتیبانی کننده با عنوان تیر تقویتی داشبورد برای تحمل بارها و پاسخ به نیروهای تصادف وجود دارد. تیر تقویتی داشبورد ستون اصلی داشبورد شناخته می‌شود. چراکه عملکرد آن شامل ایمنی، پشتیبانی سازه‌ای از مجموعه داشبورد و برآورده کردن استانداردهای صدا، لرزش و سفتی می‌باشد. اگر فرکانس‌های طبیعی ساختار تیر تقویتی داشبورد با یکی از فرکانس‌های تحریک کننده آن همپوشانی داشته باشند، پدیده‌ای به نام تشدید رخ می‌دهد. با توجه به پایین بودن سفتی تیر تقویتی موجود، برای جلوگیری از این پدیده مخرب، پاسخ مودال مجموعه تیر تقویتی مورد مطالعه و اصلاح قرار گرفت. در این مقاله با تغییر جنس تیر تقویتی از فلزی به کامپوزیتی پایه پلیمری، تیر مورد طراحی مجدد قرار گرفت و عملکرد ارتعاشی و تحلیل تنش آن انجام شد. شبیه‌سازی‌ها نشان داد تغییر جنس تیر فلزی به کامپوزیت شیشه/اپوکسی، کربن/اپوکسی و چندلایه فلز/الیاف/اپوکسی باعث افزایش 18 درصدی فرکانس طبیعی می‌شود. به منظور جلوگیری از تشدید به مقدار بیشتری افزایش فرکانس طبیعی نیاز است لذا در کنار تغییر جنس به کامپوزیت، برای کاهش درجه آزادی تیر تعدادی تکیه‌گاه جهت اتصال تیر به بدنه خودرو، اضافه شد. اعمال هم‌زمان تغییر جنس و کاهش درجه آزادی افزایش 460 درصدی فرکانس طبیعی را در پی داشت. از آنجایی که افزایش بیش از حد فرکانس طبیعی منجر به بالا رفتن صلبیت سازه و در نتیجه تمرکز تنش خواهد شد، تحلیل عددی تنش صورت گرفت و در نهایت لایه‌چینی مناسب برای تیر تقویتی داشبورد پیشنهاد گردید.</p>	<p>دریافت: ... پذیرش: ... <b>کلیدواژه‌ها</b> تیر تقویتی داشبورد، تشدید، فرکانس طبیعی، چندلایه فلز الیاف</p>

## Redesign, modal analysis and stress analysis of cross car beam

Majid Safarabadi<sup>1\*</sup>, Mohsen Sedaghat<sup>1</sup>

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14399-57131, Tehran, Iran, [msafarabadi@ut.ac.ir](mailto:msafarabadi@ut.ac.ir)

### Keywords

Cross car beam,  
Resonance,  
Natural frequency,  
Fiber in metal laminate

### Abstract

As components of the car's dashboard, there is a support structure which is called cross-car beam (CCB). This beam bears the loads and respond to crash forces. Cross-car beam is essential, because its functions include safety, structural support of the instrument panel and passing sound, vibration and harshness (NVH) standards. If the natural frequencies of the cross-car beam overlap with one of the excitement frequencies, a phenomenon known as resonance occurs. According to the low stiffness of the cross-car beam, the modal response of the cross-car beam should be studied and modified to avoid this destructive phenomenon. In this article, by changing the material of the cross-car beam from steel to polymer-based composite, the beam was redesigned and its vibration performance and stress analysis were performed. The simulations showed that changing the material of the metal beam to glass-epoxy composite, carbon-epoxy composite and fiber in metal laminate (FML) increased the natural frequency by 18%. In order to avoid resonance, more increasing is required for natural frequency amount. Therefore, several supports were added to connect beam to car body and reduce degree of freedom. Changing the material and increasing supports at the same time resulted 460% increasing for natural frequency. Because excessive increase of natural frequency will lead to increasing structure rigidity and as a result stress concentration, so numerical stress analysis was done and finally a suitable laminated composite was suggested for cross-car beam.

1- مقدمه

تحلیل رفتار سازه با استفاده از نرم‌افزارهای روش اجزای محدود<sup>1</sup>، برای طراحان خودرو از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. این روزها، در میان تحلیل‌های مختلفی که بر روی خودرو انجام می‌شود، شبیه‌سازی تصادف و تحلیل صدا، لرزش و سفتی<sup>2</sup> به طور فزاینده‌ای برای برنامه توسعه وسیله نقلیه جدید ضروری است. [1]

در قلب داشبورد خودرو یک ساختار پشتیبانی با عنوان تیر تقویتی داشبورد وجود دارد که نقش کلیدی در فضای داخلی خودرو ایفا می‌کند و ستون اصلی داشبورد شناخته می‌شود. چراکه عملکرد آن شامل ایمنی، پشتیبانی سازه‌ای از مجموعه داشبورد و برآورده کردن استانداردهای صدا، لرزش و سفتی می‌باشد [2].

شکل 1 یک نمونه تیر تقویتی داشبورد را نمایش می‌دهد. عملکردهای اصلی تیر تقویتی داشبورد را می‌توان در چند نکته شرح داد [3]:

- تیر تقویتی داشبورد تحت بار گسترده است که جرم ستون فرمان را از طریق اتصالات آن با بدنه خودرو در طرفین، بالا و پایین، به بدنه منتقل می‌کند.
- این ساختار همچنین از تمام اجزا و سیستم‌های زیرمجموعه داشبورد از جمله جعبه فیوز، سیستم گرمایش و تهویه مطبوع<sup>3</sup>، ستون فرمان، سیستم صوتی، کیسه هوا، سیم‌کشی برق، سیستم ناوبری و بسیاری از اجزا و سیستم‌های دیگر پشتیبانی می‌کند.
- در صورت وقوع تصادف، مسئولیت تیر تقویتی داشبورد و جاذب-های انرژی آن است که تحت نیروی تصادف تغییر شکل دهند و از انتقال نیروی حاصل از ضربه شدید به سرنشینان جلوگیری کنند.
- تیر تقویتی داشبورد جزء اصلی اسکلت بدنه خودرو است که در یکپارچگی و سفتی کلی آن مشارکت می‌کند و بر پاسخ فرکانسی کل خودرو تأثیر می‌گذارد.

محدودیت‌های اصلی در طراحی تیر تقویتی داشبورد به عنوان صدا، ارتعاش و سفتی و همچنین عملکردهای قابلیت تصادف<sup>4</sup> شناخته می‌شوند. رعایت معیارهای خاصی که هر یک از این محدودیت‌ها را توصیف می‌کند، ضروری است. عملکرد استانداردهای صدا، لرزش و سفتی به فرکانس‌های طبیعی سازه و جدا نکه داشتن آن‌ها از فرکانس‌های منابع تحریک‌کننده، مربوط می‌شود. موتور، سیستم انتقال نیرو و سطح جاده منابع رایج برای لرزش هستند. اگر فرکانس‌های طبیعی ساختار تیر تقویتی داشبورد با یکی از فرکانس‌های تحریک‌کننده همپوشانی داشته باشند، پدیده‌ای به نام تشدید رخ می‌دهد. در تشدید، دامنه ارتعاش می‌تواند بسیار زیاد باشد (از لحاظ نظری می‌تواند تا بی‌نهایت باشد). چنین ارتعاشاتی با دامنه بالا می‌تواند صدای آزاردهنده قابل توجهی را در داخل و خارج خودرو ایجاد کند. همچنین می‌تواند به ستون فرمان منتقل شود و باعث ناراحتی و حواس‌پرتی راننده شود. برای جلوگیری از این پدیده مخرب، پاسخ مودال مجموعه تیر تقویتی داشبورد باید مورد مطالعه و اصلاح قرار گیرد [4].

1-1- تاریخچه

روش‌ها و مواد زیادی برای تولید، بهینه‌سازی و افزایش کارایی تیرهای تقویتی داشبورد خودرو وجود دارد. در پژوهشی توسط پیتروف و همکاران [5] استفاده از کامپوزیت پلاستیک تقویت‌شده با شیشه<sup>5</sup> در تیر تقویتی داشبورد باعث کاهش جرم خودرو شده است. به طوری که تیر کامپوزیتی طراحی شده از نظر فرکانس ارتعاشی و همچنین تحلیل خستگی می‌تواند به خوبی با تیر فولادی برابری کند. دای جیل لی و همکاران [6] در سال 2004 محور محرک<sup>6</sup> یک‌تکه کامپوزیتی را جایگزین محور محرک دوتکه فلزی به جهت آزمایش در خودروهای دیفرانسیل عقب کردند. در نتیجه 30 درصد عمر خستگی محور بهبود یافت. در مقاله‌ای دیگر [7] به طور خلاصه یک طراحی منحصر به فرد برای تیر تقویتی داشبورد منیزیمی<sup>7</sup> خودروی فورد جی تی 2005 توضیح داده شده است. ساختار تیر تقویتی منیزیمی، خودرو فورد جی تی را قادر می‌سازد تا با کاهش هزینه به عملکرد و اهداف ایمنی برسد. شانکار و همکاران [8] در سال 2006 به تحلیل و طراحی و ارائه ساخت کم‌هزینه فنر شمش<sup>8</sup> کامپوزیت با جنس پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداختند. نتایج نشان داد که فنر کامپوزیت در مقایسه با فنر فولادی دارای تنش‌های بسیار کمتر، فرکانس طبیعی بیشتر و از نظر جرمی نزدیک به 85 درصد کمتر است. درک چگونگی فرآیند طراحی و توسعه محصول برای محصولات پیچیده‌ای مانند تیر تقویتی داشبورد، هدف پایان‌نامه منتشرشده توسط آتاریتا [9] در سال 2013 است. راه‌حل‌های بسیار متنوعی در مورد طراحی و جنس پیدا شد. برای نتیجه‌گیری نهایی، تجزیه و تحلیل تیر تقویتی داشبورد با مواد مختلف مانند آلومینیوم و منیزیم، پلاستیک‌ها و در نهایت کامپوزیت‌ها برای کاهش جرم ارائه شد. یارانسون و همکاران [10] با استفاده از مواد ترکیبی جرم تیر تقویتی داشبورد را کاهش دادند. در نمونه‌ی تیر ساخته‌شده از جنس کامپوزیت کربن اپوکسی بافته‌شده، جرم تیر 5.2 کیلوگرم کاهش یافت که 30 درصد کمتر از نمونه اولیه با جنس فولاد است.

هدف از اجرای پروژه خودروی سبک‌وزن<sup>9</sup> در سال 2015 [11]، ارزیابی امکان دستیابی به سطح قابل توجهی از کاهش جرم خودرو از طریق تغییر جنس اجزا (آلیاژهای آلومینیوم و آلیاژهای منیزیم و کامپوزیت‌های الیاف کربن و ...) بوده است. آزمایش‌های کامل بر خودروهای توسعه‌یافته تأیید کرد که خودروهای توسعه‌یافته معادل خودروهای پایه عمل می‌کنند و در بهترین حالت جرم آن‌ها 761 کیلوگرم کاهش یافته است. در ادامه تحقیقات موجود در سال 2015، در مقاله‌ای به نوشته دوهیونگ کیم و همکاران [12]، ساخت تیر ضربه-گیر سپر کامپوزیت شیشه/کربن از طریق فرآیند بهینه‌سازی طراحی همراه با تحلیل ضربه، ارائه شده است. برای کاهش جرم تیر ضربه‌گیر، کامپوزیت ترموپلاستیک شیشه‌ای/کربن<sup>10</sup> جایگزین ترموپلاستیک شیشه‌ای معمولی<sup>11</sup> شده است. در این مقاله مشخص شده است که تیر کامپوزیت ترموپلاستیک شیشه‌ای/کربن با طراحی بهینه در مقایسه با تیر ترموپلاستیک شیشه‌ای معمولی، 33 درصد جرم کمتری دارد. در حالی که تیر کامپوزیت ترموپلاستیک شیشه‌ای/کربن عملکرد ضربه‌ای بهتری دارد. کیم‌دونگ هیون و همکاران در سال 2017 [13]، بهینه‌سازی طراحی یک درب موتور را با استفاده از ورقه‌های

<sup>7</sup> AM60B

<sup>8</sup> leaf spring

<sup>9</sup> Multi-Material Lightweight Vehicle (MMLV)

<sup>10</sup> GCMT

<sup>11</sup> GMT

<sup>1</sup> Finite element method

<sup>2</sup> Noise, vibration, and harshness (NVH)

<sup>3</sup> Heating, Ventilation, and Air Conditioning System (HVAC)

<sup>4</sup> قابلیت تصادف، توانایی یک سازه برای محافظت از سرنشینان خود در هنگام برخورد است.

<sup>5</sup> GFRP

<sup>6</sup> drive shaft

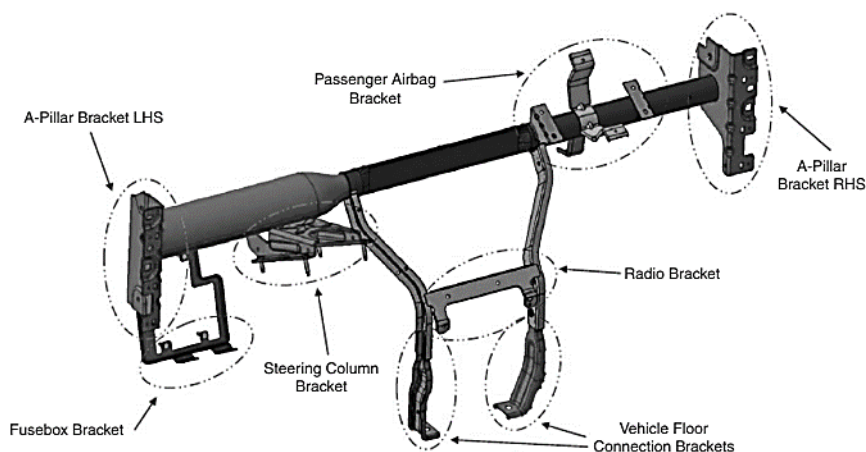


Fig. 1 Example of cross car beam [1]

شکل 1 نمونه تیر تقویتی داشبورد خودرو [1]

در سال 2021 در مقاله‌ای [18] دو نوع مجموعه ستون فرمان کامپوزیت و تیر تقویتی داشبورد تولید شده است: یکی از جنس پلی‌آمید<sup>۵۶۶</sup> تقویت‌شده با الیاف کربن<sup>۶</sup> با خواص مکانیکی بالا و دیگری پلی‌آمید<sup>۶۶</sup> تقویت‌شده با الیاف شیشه<sup>۷</sup> با خواص پایین‌تر. طبق آزمایش‌ها فرمان و تیر کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن می‌تواند نیاز عملکرد صدا و ارتعاش و سفتی را برآورده کند و می‌توان نتیجه گرفت الیاف کربن می‌تواند جایگزین مناسبی برای فولاد باشد. علی داور و همکاران [19] در مقاله‌ای در همان سال، تأثیر پارامترهای مختلف (از جمله نسبت حجمی حفره‌ها، ترتیب و شکل حفره‌ها، نسبت ضخامت به شعاع و نسبت طول به شعاع) را بر روی فرکانس‌های طبیعی یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیت یکپارچه بررسی کردند. تحلیل‌ها نشان داده است از آن-جایی که پوسته استوانه‌ای با خواص مکانیکی ارتوتروپیک<sup>۸</sup> (پوسته کامپوزیتی) وزن سبک‌تری نسبت به پوسته استوانه‌ای با خواص مکانیکی ایزوتروپیک<sup>۹</sup> (پوسته فلزی) دارد. در نتیجه فرکانس طبیعی 40 درصد افزایش داشته است. در پروژه‌های متعلق به سال 2022 [20]، یک تیر تقویتی داشبورد در برنامه کتیا<sup>۱۱</sup> مدل و سپس در برنامه انسیس<sup>۱۱</sup> با سه نوع جنس آلیاژ آهن و کربن، فولاد و آلیاژ آلومینیوم تحلیل شده است. همچنین بر روی هر سه نوع جنس، سه نیروی استاتیکی 100، 120، 150 نیوتنی اعمال شده است. طبق این مقاله، تغییر شکل‌های ایجاد شده در ساختار تیر برای فولاد بیشتر از آلیاژ آهن و کربن و آلیاژ آلومینیوم مشاهده شده است. اما میزان کرنش در آلیاژ آهن و کربن و آلیاژ آلومینیوم یکسان بوده است. با توجه به یکسان بودن نتایج، پایین بودن چگالی آلیاژ آلومینیوم مزیت قابل‌توجهی شناخته شده است. در یک مطالعه توسط کپانانی و همکاران [21] در زمینه توسعه‌ی صفحه‌های کامپوزیتی چندلایه، رفتار ارتعاشی صفحه‌های پلیمری تقویت‌شده با گرافن<sup>۱۲</sup>/الیاف کربن، پلیمری تقویت‌شده با گرافن و پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن مورد بررسی قرار می‌گیرد. گرافن به دلیل نازک بودن، سفتی و استحکام کششی عالی به یک نانومواد قابل توجه تبدیل شده است. بنابراین می‌توان از آن برای تقویت ماتریس پلیمری کامپوزیت‌ها، افزایش استحکام و سفتی آن‌ها استفاده کرد. در بین سه صفحه کامپوزیت مشاهده می‌شود که بالاترین فرکانس طبیعی برای

کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن<sup>۱</sup> و کامپوزیت هیبریدی تقویت‌شده با الیاف شیشه<sup>۲</sup>، بر اساس تحلیل اجزای محدود انجام دادند. درب‌های موتور کامپوزیتی عملکرد ضربه‌ای بهبود یافته و کاهش جرم قابل توجه را نشان دادند. همچنین درب موتور توسعه‌یافته الزامات خمشی و انحراف پیچشی را در مقایسه با درب موتور فولادی و آلومینیومی معمولی برآورده کرد. در مقاله‌ای دیگر در همین سال، پارک و همکاران [14] طراحی و تحلیل ساختاری درب موتور خودرو را با کامپوزیت‌های الیاف طبیعی کتان/وینیل استر<sup>۳</sup> انجام دادند. از طریق طراحی سازه و آزمایش، تأیید شد که ساختار درب موتور طراحی شده قابل‌قبول است و در مقایسه با درب موتور فولادی، 31.7 درصد کاهش جرم را نشان می‌دهد. سوراخ و همکاران [15] در سال 2018 به‌منظور کاهش مصرف سوخت و کاهش جرم به بررسی استفاده از آلیاژ منیزیم به‌جای فولاد در تیر تقویتی داشبورد روی آوردند. پس از انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری و آزمون‌های آزمایشگاهی، مشخص شد که با استفاده از آلیاژ منیزیم، جرم تیر به 1.73 کیلوگرم کاهش می‌یابد که 73 درصد کمتر از تیر فولادی (5.8 کیلوگرم) و همچنین 34 درصد کمتر از تیر آلومینیومی می‌باشد. همچنین فرکانس اول جانبی و عمودی تیر بالای 100 هرتز بوده و قابلیت اطمینان بالایی دارد. بنابراین استفاده از منیزیم می‌تواند کاربرد بهینه‌تری نسبت به فولاد در تیر تقویتی داشبورد خودرو داشته باشد. در سال 2019 [16] یک فرمان ساخته‌شده از کامپوزیت‌های الیاف موز ارائه شد که به کاهش جرم و هزینه کمک کرده است و در نهایت باعث افزایش راندمان سوخت و ترویج سازگاری با محیط‌زیست شده است. در نتیجه این پروژه بدون ایجاد تغییری بر استحکام فرمان، جرم کل فرمان به میزان 50 درصد کاهش یافت. در مقاله‌ای دیگر [17] از کامپوزیت الیاف کربن تقویت‌شده با پلیمر<sup>۴</sup> برای برآوردن نیاز افزایش ایمنی تصادف و کاهش جرم در جهت توسعه تیر تقویت‌کننده سپر استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تیر جدید نسبت به همتای یکنواخت خود در سبک‌وزنی و قابلیت تصادف برتری دارد و در نتیجه به عنوان یک رویکرد بهتر برای جایگزینی تیر فلزی معمولی توصیه شده است.

<sup>7</sup> GF  
<sup>8</sup> orthotropic  
<sup>9</sup> isotropic  
<sup>10</sup> Catia V5  
<sup>11</sup> Ansys  
<sup>12</sup> Graphene

<sup>1</sup> CFRP  
<sup>2</sup> CFRP/GFRP  
<sup>3</sup> flax/vinyl ester  
<sup>4</sup> CFRP  
<sup>5</sup> PA66  
<sup>6</sup> CF

## 2- معرفی مسئله و مدل سازی

نمونه مورد نظر از یک لوله به قطر 14 میلی متر و ضخامت 2 میلی متر تشکیل شده است که چندین براکت با جوشکاری به آن متصل شده اند. لوله و براکت های متصل به آن طبق استاندارد آمریکایی از فولاد با جنس 1010 با خواص مواد ذکر شده در جدول های 1 و 2 و 3 ساخته شده اند [25,24]. مدل کاملی که در کل کار استفاده می شود، بدون براکت ها و مجموعه ستون فرمان است.

جدول 1 خواص شیمیایی فولاد 1010 [24]

Table 1 Chemical properties of 1010 steel [24]

Element	Content (%)
Iron, Fe	99.18-99.62 %
Manganese, Mn	0.30-0.60 %
Sulfur, S	≤0.050 %
Phosphorous, P	≤0.040 %
Carbon, C	0.080-0.13 %

جدول 2 خواص فیزیکی فولاد 1010 [24]

Table 2 Physical properties of 1010 steel [24]

Properties	Metric
Density	7.87 gr/cm <sup>3</sup>

جدول 3 خواص مکانیکی فولاد 1010 [25]

Table 3 Mechanical properties of 1010 steel [25]

Young's Modulus (GPa)	200
Poisson's ratio	0.285
Total Elongation (%)	28.453
Yield Strength (MPa)	305
Tensile Strength (MPa)	395
Tensile/Yield	1.3
Uniform Elongation (%)	18.973

### 1-1- مدل طراحی شده با کامپیوتر

بر اساس ابعاد واقعی، نمونه مورد نظر با استفاده از نرم افزار کتیا توسعه داده شد و به عنوان مدل مرجع برای فرآیندهای طراحی و ارزیابی بعدی استفاده شد. شکل 2 مدل سه بعدی نمونه را نشان می دهد که برای این مقاله توسعه یافته است.

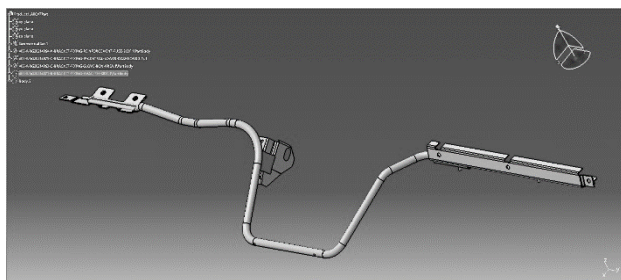


Fig. 2 3D model of the cross-car beam

شکل 2 مدل سه بعدی تیر تقویتی داشبورد

### 2-2- مدل مورد تحلیل با کامپیوتر

برای ساخت مدل المان محدود و تحلیل معیارهای صدا، لرزش و سفتی تیر تقویتی مورد نظر از نرم افزار آباکوس استفاده شد. به جهت کاهش هزینه های

صفحه کامپوزیت گرافن/ الیاف کربن برای تمام حالت های شرایط مرزی به دست می آید. همچنین نتایج نشان می دهد که فرکانس های طبیعی با افزایش نسبت حجمی گرافن افزایش می یابد. با افزودن 1 درصد گرافن به ماتریس پلیمری، فرکانس طبیعی تا 48.96 درصد افزایش می یابد.

علیرضا شوشتری و همکاران [22] در سال 2023 ارتعاشات عرضی صفحه کامپوزیتی از جنس شیشه/ اپوکسی تقویت شده با نانوذرات کربنی را مورد بررسی قرار دادند. تأثیر این نانوذرات و درصد جرمی آن ها بر روی فرکانس طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. در آخر نیز تأثیر پارامترهای هندسی شامل ضخامت و نسبت طول به عرض ورق در حالت های بدون تقویت کننده و تقویت شده توسط نانوذرات با درصد جرمی های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده با تقویت صفحه کامپوزیتی توسط نانوذرات کربنی، فرکانس طبیعی افزایش می یابد. همچنین با افزایش نسبت طول به عرض صفحه، فرکانس طبیعی افزایش می یابد.

در همین سال در مقاله ای توسط رضا آذر افزا [23] و همکاران، یک مدل فلنچ کامپوزیتی با هدف حداکثر سبک سازی ساخته شد. وظیفه ای این فلنچ اتصال پوسته های کامپوزیتی بزرگ به هم دیگر جهت ساخت یک سازه ی کامل می باشد. ارزیابی نتایج حاصل از آزمون ها و تحلیل عددی روی قطعات ساخته شده، نشان دهنده فرکانس ویژه بالای کامپوزیت نسبت به وزن در مقایسه با نوع فولادی و آلومینیومی می باشد. همچنین عامل تورق در تیغه ی فلنچ کامپوزیتی بیشتر از آن که باعث شکست ماتریس و الیاف شود، در افزایش طول سازه بر اثر نیروی کشش تأثیر داشته است.

### 2-1- بیان مسئله و نوآوری

در این مقاله با توجه به عدم تأمین معیارهای صدا، لرزش و سفتی و استحکام در طراحی تیر تقویتی داشبورد مورد نظر، راه حل تغییر جنس با هدف ایجاد استحکام قابل قبول، بهبود عملکرد ارتعاشی و افزایش فرکانس طبیعی بیان می شود. علاوه بر این، اثرات تغییرات مواد بر جرم تیر تقویتی داشبورد مورد نظر پیش بینی می شود تا هزینه های تولید بر اساس داده های هزینه موجود محاسبه شود. بنابراین نوآوری این مقاله باز طراحی و تحلیل تیر تقویتی داشبورد با رویکرد تغییر جنس، سبک سازی، کاهش درجه آزادی تیر و در نهایت افزایش فرکانس طبیعی است.

### 3-1- خلاصه مقاله

در این بخش از ابتدا به معرفی تیر تقویتی داشبورد و اهمیت و کاربردهای آن در خودرو پرداخته شد. سپس با بررسی تاریخچه پژوهش و بیان مشکل موجود در مورد تیر تقویتی داشبورد مورد نظر به طور خلاصه، راه حل تغییر جنس به جهت بهبود مسئله مطرح گردید. بخش دوم این مقاله به شرح مدل سازی (طراحی<sup>1</sup> و تحلیل مهندسی<sup>2</sup> به کمک کامپیوتر) می پردازد. سپس در بخش سوم روش تغییر جنس و افزایش تکیه گاه به جهت بهبود عملکرد داشبورد ارائه می گردد. همچنین در بخش چهارم به روش های تحلیلی تیر تقویتی یعنی تحلیل تنش و مودال به صورت کامل اشاره می شود. از آن جایی که تمام تمرکز این مقاله بر روی تحلیل های عددی و المان محدود است، تمام اقدامات لازم به جهت اعتبار سنجی<sup>3</sup> داده ها و راستی آزمایی<sup>4</sup> در بخش پنجم شرح داده می شود. در همین بخش نتایج حاصل از مدل سازی های عددی روش معرفی شده بیان می شود. در نهایت به عنوان آخرین بخش نتیجه گیری کلی مقاله بیان می گردد.

<sup>3</sup> validation  
<sup>4</sup> verification

<sup>1</sup> Computer-aided design (CAD)  
<sup>2</sup> Computer-aided engineering (CAE)

جدول 5 خواص فیزیکی و مکانیکی شیشه اپوکسی و کربن اپوکسی [26]

Table 5 Physical and mechanical properties of glass/epoxy and carbon epoxy [26]

Mechanical Properties	Glass/Epoxy	Carbon/Epoxy
Elastic Modulus (MPa)		
E <sub>1</sub>	45000	121000
E <sub>2</sub>	10000	8600
E <sub>3</sub>	10000	8600
Shear Modulus (MPa)		
G <sub>12</sub>	5000	4700
G <sub>13</sub>	5000	4700
G <sub>23</sub>	3846.2	3100
Poisson's ratio		
ν <sub>12</sub>	0.3	0.27
ν <sub>13</sub>	0.3	0.27
ν <sub>23</sub>	0.4	0.40
Density(kg/m <sup>3</sup> )		
	2000	1490
Tensile Strength (MPa)		
TS <sub>1</sub>	1100	2231
TS <sub>2</sub>	35	29
TS <sub>3</sub>	35	29

محاسباتی از المان شل<sup>1</sup> برای مدل سازی استفاده شده است. شرایط مرزی تیر تقویتی با توجه به شکل 3 از نوع کاملاً محصور<sup>2</sup> هستند و در شبیه سازی اجازه هیچ گونه جابجایی و دوران به مدل داده نمی شود. همچنین برای مش بندی مدل از شکل المان مربعی<sup>3</sup> با روش سوئیپ<sup>4</sup> و اندازه<sup>5</sup> 7.5 میلی متر استفاده شد.

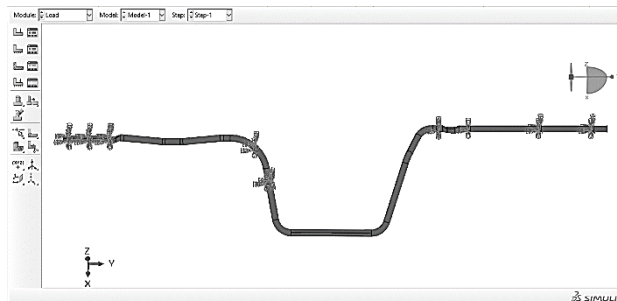


Fig. 3 Boundary conditions in simulation

شکل 3 شرایط مرزی در شبیه سازی

### 3- بهبود طراحی

به جهت بهبود طراحی، افزایش استحکام و تأمین استانداردهای صدا، لرزش و سفتی دو روش بررسی گردید: تغییر جنس و افزایش تکیه گاه. تغییر جنس با هدف سبک سازی و افزایش فرکانس طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت. اضافه کردن تکیه گاه نیز در راستای کاهش درجه آزادی تیر و افزایش فرکانس طبیعی، انجام شد. در نهایت برای رسیدن به بهترین پاسخ هر دو روش به صورت ترکیبی اعمال گردید.

### 3-2- تغییر جنس و اضافه کردن تکیه گاه به صورت همزمان

طبق بررسی ها می توان به تیر تقویتی در سه مختصات بیشتر نسبت به مکان هایی که در حال حاضر تکیه گاه دارند، تکیه گاه اضافه کرد (شکل 4). بنابراین شرایطی بررسی می شود که جنس ها و لایه چینی های منتخب و تکیه گاه های اضافه شده، به صورت همزمان اعمال شوند و مورد مطالعه قرار گیرند. این امر باعث افزایش سفتی مجموعه و در نهایت افزایش فرکانس طبیعی می شود.

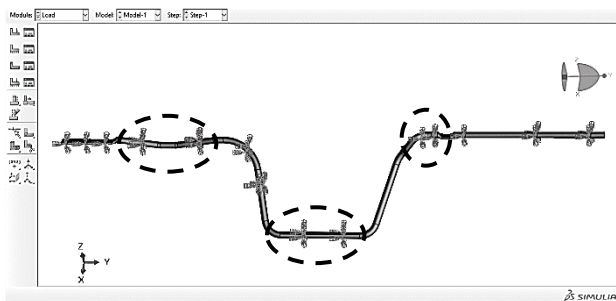


Fig. 4 Boundary conditions added in simulation

شکل 4 شرایط مرزی اضافه شده در شبیه سازی

### 3-1- تغییر جنس

از روش های افزایش فرکانس طبیعی استفاده از موادی است که کاهش جرم و یا در بعضی از آن ها به صورت همزمان کاهش جرم و افزایش سفتی را سبب می شود. در این مقاله از آلومینیوم و کامپوزیت های کربن/ اپوکسی<sup>6</sup> و شیشه/ اپوکسی<sup>7</sup> و ترکیب های این کامپوزیت ها با آلومینیوم<sup>8</sup> استفاده می شود. جدول 4-5 نشان دهنده خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت ها و آلومینیوم می باشند. در این بخش کامپوزیت ها و چند لایه فلز الیاف با لایه چینی های متفاوتی از نظر ضخامت لایه ها و زاویه لایه ها و ترتیب چیدمان لایه ها ارائه و مقایسه می شوند. تمام لایه چینی ها در پیوست 1 ارائه شده اند. انتخاب این لایه چینی ها براساس لایه چینی های پر استفاده و مرسوم که پر کاربرد هستند، بوده است. لازم به ذکر است تمامی ضخامت های ذکر شده در جدول های معرفی لایه چینی ها، مربوط به لایه های قبل از تقارن می باشند.

### 4- تحلیل مودال و تحلیل تنش

تحلیل مودال روشی است که برای محاسبه مدهای ارتعاشی و فرکانس های مرتبطی که یک سازه نشان می دهد، استفاده می شود. معادله تعادل برای سازه ای که ارتعاش آزاد انجام می دهد به عنوان مسئله مقدار ویژه ظاهر می شود [27]:

$$[K - \lambda M]x = 0 \quad (1)$$

که در آن K ماتریس سفتی سازه و M ماتریس جرم است. میرایی در این محاسبه نادیده گرفته شده است. حل مسئله مقدار ویژه، n مقدار ویژه λ را به

جدول 4 خواص فیزیکی و مکانیکی الیاز آلومینیوم 2024-T3

Table 4 Physical and mechanical properties of aluminum alloy 2024-T3

E <sub>x</sub> (GPa)	E <sub>y</sub> (GPa)	E <sub>s</sub> (GPa)	Poisson's ratio	Density(kg/m <sup>3</sup> )	Tensile Strength (MPa)
72.4	72.4	28	0.33	2700	465

1 shell  
2 clamp  
3 Quad  
4 Sweep

5 Global seed  
6 Carbon epoxy  
7 Glass epoxy  
8 Fiber in metal

مش ریزتر شبیه‌سازی کرده و نتایج با هم مقایسه می‌شود. اگر این دو مش اساساً نتیجه یکسانی داشته باشند، می‌توان اطمینان داشت که مدل یک راه‌حل دقیق ریاضی تولید می‌کند. با توجه به مقایسه‌های انجام شده و نتایج بدست آمده طبق شکل 6، مش بندی با سایز 7.5 میلی‌متر و تعداد المان 2054 مناسب است.

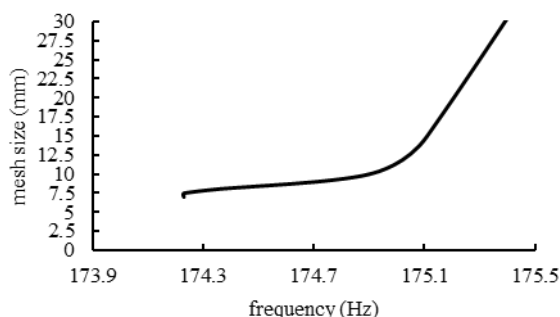


Fig. 6 Meshing convergence

شکل 6 همگرایی مش بندی

### 2-5- راستی آزمایی

الف) در پایان‌نامه منتشر شده در سال 2020 [28]، تحلیل ارتعاشی یک لوله مستقیم با انواع شرایط مرزی و مواد با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود از طریق نرم‌افزار انسیس ترسیم شده است. هدف این پایان‌نامه ایجاد بستری برای مطالعات آتی در تحلیل طیف پاسخ، تحلیل هارمونیک یا تحلیل ساختاری به‌منظور مطالعه بیشتر در مورد رفتار ارتعاشی و انحراف ساختاری است. تحلیل مودال این لوله به جهت راستی آزمایی در نرم‌افزار آباکوس انجام شد و نتایج با یک دیگر مقایسه شدند. جدول 6 نتایج مقایسه شده را ارائه می‌دهد.

جدول 6 مقایسه فرکانس طبیعی اول (برحسب هرتز) حاصل از تحقیق حاضر و مرجع [28]

Table 6 Comparison of the natural frequency (Hz) between the current research and the reference [28]

Length(m)	Ref [28]	First natural frequency (present study)	Percentage Difference (%)
1	732.430	681.70	7
2	220.705	203.97	7.5
4	58.338	53.985	7.46
6	26.311	22.980	12.66
8	14.859	12.977	12.66
10	9.527	8.783	7.8

ب) در این مقاله [29] برای تعیین کانتور تنش نوعی آلومینیوم، آزمایش کشش و تحلیل اجزای محدود انجام شده است. برای راستی آزمایی فرایند تحلیل تنش، مقاله فوق در نرم‌افزار آباکوس مورد راستی آزمایی قرار گرفت. در این مدل‌سازی پس از اعمال هندسه مورد نظر و اعمال ویژگی‌های مکانیکی<sup>۱</sup>، تحلیل دینامیکی تعریف شد. در نهایت نتیجه بدست آمده در شکل 7 با نتیجه ارائه شده در مرجع [29] مقایسه گردید. قابل ذکر است که در این مقاله با صرف‌نظر از معیارهای آسیب به همین روش برای تحلیل تنش عمل گردید.

دست می‌دهد که در آن  $n$  تعداد درجه‌های آزادی است. فرکانس طبیعی  $f_i$  مستقیماً از مقدار ویژه پیروی می‌کند [27]:

$$f_i = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \quad (2)$$

بنابراین با افزایش سفتی سازه و کاهش جرم آن، افزایش فرکانس طبیعی سازه محقق می‌شود. بدین جهت تحلیل مودال بر روی تیر تقویتی موجود انجام می‌شود.

همچنین برای انتخاب بهترین لایه‌چینی، بر روی نمونه‌های بخش 3-2 تحلیل عددی تنش در حالات الاستیک خطی و پلاستیک همسانگرد با صرف‌نظر از تعریف معیارهای آسیب صورت می‌گیرد. ویژگی ناحیه‌ی پلاستیک نمودار تنش/ کرنش تمام مواد استفاده شده در پیوست 2 آمده است. به جهت تحلیل تنش، سطوح در تماس با داشبورد طبق شکل 5 تحت بار استاتیکی گسترده 15 مگاپاسکالی قرار می‌گیرند. بارگذاری در این مقاله ناشی از وزن داشبورد و اجزای آن می‌باشد و تعیین میزان آن تخمینی است. چراکه اطلاعات دقیقی نسبت به وزن اعمالی از طرف داشبورد به تیر در دسترس نیست و قصد از بارگذاری مقایسه طراحی‌ها و انتخاب بهترین حالت می‌باشد.

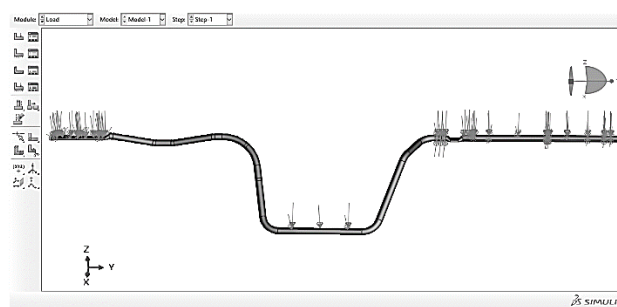


Fig. 5 Static loading in modeling

شکل 5 بارگذاری استاتیکی در مدل سازی

### 5- تحلیل نتایج و بحث

به جهت تأمین معیارهای صدا، لرزش و سفتی و افزایش استحکام تیر، تیری که جنس آن تغییر یافته مورد تحلیل عددی قرار گرفت. از آن جایی که تمام تمرکز این مقاله بر روی تحلیل‌های عددی و المان محدود بوده است، تمام اقدامات لازم به جهت اعتبار سنجی داده‌ها و راستی آزمایی صورت گرفت.

تحلیل مودال‌های متعددی برای مطالعه فرکانس‌های طبیعی و مودهای متناظر با آن‌ها انجام شد. همچنین از آن جایی که پیش‌بینی می‌شد با افزایش فرکانس طبیعی افزایش تنش در سازه رخ دهد، تحلیل تنش نیز انجام شد که در ادامه تمامی نتایج به صورت کامل بیان می‌شود.

### 1-5- بررسی استقلال پاسخ از سایز مش

در تحلیل‌های عددی مهم است که از یک مش به اندازه کافی اصلاح شده استفاده کرد تا اطمینان حاصل شود که نتایج شبیه‌سازی کافی است. مش‌های درشت می‌توانند نتایج نادرستی در تجزیه و تحلیل ارائه دهند. زمانی که اصلاح مش بیشتر تغییر ناچیزی در پاسخ ایجاد می‌کند، مش همگرا می‌شود. انجام یک مطالعه همگرایی مش همیشه لازم است، جایی که همان مسئله را با یک

1 معیارهای آسیب ductile و MSFLD و shear، الاستیک خطی، پلاستیک همسانگرد و چگالی

طبق شکل 8، لایه‌چینی شماره 11 از آن جهت انتخاب گردید که در بین لایه‌چینی‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی دارای میانگین جرمی است و در میان لایه‌چینی‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی با جرم مشابه، بهترین فرکانس طبیعی را دارد. همچنین جرم سازه نسبت به مدل فلزی 49 درصد کاهش می‌یابد. تمام لایه‌چینی‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی نتوانستند فرکانس طبیعی مورد نظر را تأمین کنند. به همین علت ترکیب آن‌ها با آلومینیوم نیز بررسی شد. طبق شکل 9 مشاهده می‌شود که از طریق لایه‌چینی شماره 156، فرکانس طبیعی نسبت به سازه فلزی 2.5 درصد و نسبت به لایه‌چینی شماره 11، افزایش 49 درصدی داشته است. اما لازم به ذکر است لایه‌چینی شماره 156 باعث افزایش 80 درصدی جرم نسبت به سازه فلزی و افزایش 253 درصدی نسبت به لایه‌چینی شماره 11 شده است. همچنین لایه‌چینی شماره 46 از آن جهت انتخاب شد که فرکانس طبیعی سازه را نسبت به لایه‌چینی شماره 11، 38 درصد افزایش داد. این لایه‌چینی همچنین باعث کاهش 66 درصدی جرم سازه نسبت به حالت فلزی و کاهش 35 درصدی نسبت به لایه‌چینی شماره 11 شد.

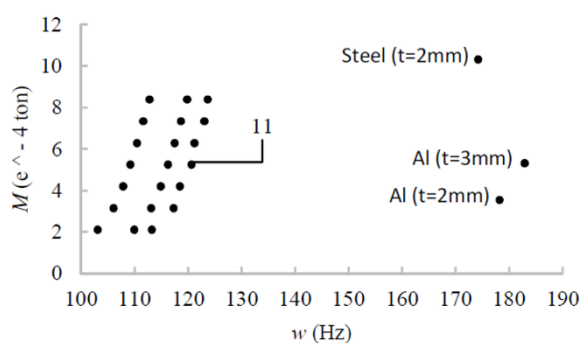


Fig. 8 Mass-natural frequency diagram of glass epoxy and comparison with aluminum and steel 1010 (All 21 points on the left side correspond to the layers of composite with code 1 to 21)

شکل 8 نمودار جرم - فرکانس طبیعی کامپوزیت شیشه/اپوکسی و مقایسه با آلومینیوم و آهن 1010 (تمام 21 نقطه‌ی سمت چپ مربوط به لایه‌چینی‌های شماره 1 تا 21 کامپوزیت می‌باشد)

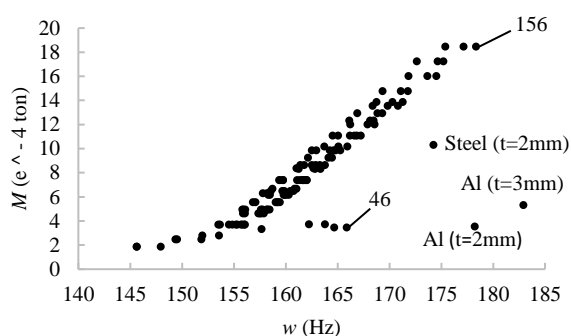


Fig. 9 Mass-natural frequency diagram of glass epoxy-aluminum and comparison with aluminum and steel 1010

شکل 9 نمودار جرم - فرکانس طبیعی شیشه/اپوکسی/آلومینیوم و مقایسه با آلومینیوم و آهن 1010

طبق شکل 10، لایه‌چینی شماره 32 از آن جهت انتخاب گردید که در بین لایه‌چینی‌های کامپوزیت کربن/اپوکسی دارای میانگین جرمی است و در میان لایه‌چینی‌های کامپوزیت کربن/اپوکسی با جرم مشابه، بهترین فرکانس

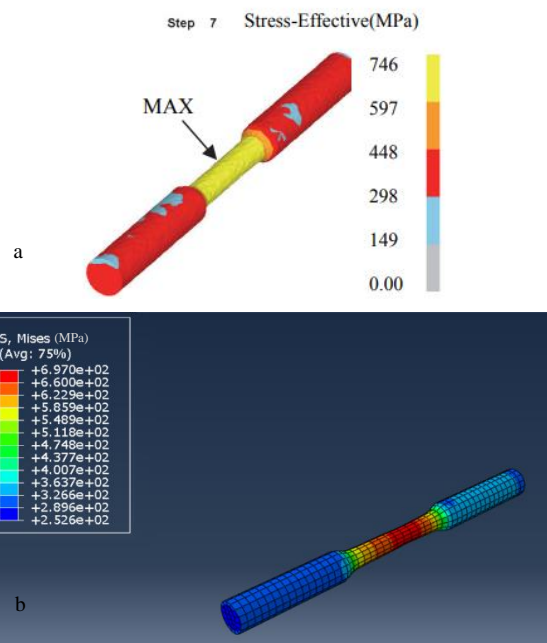


Fig. 7 Comparison of results: a) according to Ref [29] b) according to the current modeling (present study)

شکل 7 مقایسه نتایج: الف) مطابق مقاله [29] و ب) مطابق با مدل سازی

### 3-5- نتایج تحلیل مودال

در ابتدا لازم به ذکر است که طبق مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار آباکوس، فرکانس طبیعی تیر فعلی مطابق جدول 7 می‌باشد.

جدول 7 فرکانس‌های طبیعی برای تیر تقویتی داشبورده موجود

Table 7 Natural frequencies for existing cross car beam

num.	frequencies
1	فرکانس متناظر با مقدار ویژه اول (هرتز) 174.23
2	فرکانس متناظر با مقدار ویژه اول (هرتز) 454
3	فرکانس متناظر با مقدار ویژه اول (هرتز) 509.61
4	فرکانس متناظر با مقدار ویژه اول (هرتز) 680.56
5	فرکانس متناظر با مقدار ویژه اول (هرتز) 732.81

همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، در این بخش از آلومینیوم و کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی و ترکیب‌های این کامپوزیت‌ها با آلومینیوم استفاده شد. استفاده از این مواد فرکانس طبیعی را افزایش می‌دهد چراکه این مواد کاهش جرم و یا در بعضی از آن‌ها به صورت هم‌زمان کاهش جرم و افزایش سفتی را سبب می‌شود. شکل‌های 8 تا 11 تمام لایه‌چینی‌ها را در شرایط تکیه‌گاه پیش‌فرض با هم مقایسه کرده و بهترین آن‌ها را از نظر فرکانس طبیعی و جرم ارائه می‌دهد.

طبق نتایج، استفاده از آلومینیوم به تنهایی به علت چگالی کمی که دارد باعث کاهش جرم و در نتیجه افزایش فرکانس طبیعی می‌شود. کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی به علت ماهیتشان دارای سفتی بالا و چگالی کم هستند. در نتیجه افزایش سفتی و کاهش جرم در این حالت باعث افزایش فرکانس طبیعی می‌شود. با توجه به نتایج، شیشه/اپوکسی به تنهایی نتوانست سفتی مورد نظر را تأمین کند، بنابراین از ترکیب آن با آلومینیوم استفاده شد تا سفتی سازه افزایش یابد و در نتیجه‌ی آن فرکانس طبیعی نیز افزایش پیدا کند.

اپوکسی/ آلومینیوم بهترین فرکانس طبیعی را دارد. بنابراین این لایه چینی نیز انتخاب گردید. هرچند این لایه چینی جرم را نسبت به سازه فلزی 60 درصد افزایش می‌دهد.

#### 4-5- نتایج تحلیل تنش

شکل 12 یک نمونه از تحلیل تنش‌های صورت گرفته در نرم‌افزار آباکوس را برای تیر فلزی با جنس 1010 نشان می‌دهد.

جدول 8 نتایج حاصل از تحلیل مودال و تحلیل تنش را برای لایه چینی- های منتخب در شرایط اضافه شدن تکیه‌گاه‌ها، نشان می‌دهد. استحکام کشش نهایی فلز 1010 طبق جدول 3، 395 مگاپاسکال و آلومینیوم طبق جدول 5، 465 مگاپاسکال می‌باشد. همچنین طبق جدول 4 استحکام کشش نهایی کامپوزیت شیشه/ اپوکسی و کامپوزیت کربن/ اپوکسی به ترتیب 1100 و 2231 مگاپاسکال می‌باشند. استحکام کشش نهایی مربوط به شیشه اپوکسی/ آلومینیوم و کربن اپوکسی/ آلومینیوم نیز در پیوست 2 آمده است. همان‌طور که در جدول‌ها و منابع معرفی ویژگی‌های مکانیکی چندلایه فلز الیاف مشاهده می‌شود، استحکام کشش نهایی نسبت به نوع و نحوه لایه چینی‌ها متفاوت است. طبق جدول 8 که چندین تکیه‌گاه به سازه اضافه شده است و با توجه به اعمال نیروی گسترده استاتیکی 15 مگاپاسکالی در تحلیل تنش، تنها لایه چینی‌های 11 و 32 و 41 و 156 و 256 و 270 و 284 قابل قبول هستند. چراکه در لایه چینی‌ها و جنس‌های دیگر ماکزیمم تنش از استحکام کشش نهایی یا بیشتر شده است و یا برابری می‌کند. یعنی سازه تحت شرایط مرزی تکیه‌گاه اضافه شده و نیروی گسترده 15 مگاپاسکالی در جنس‌های فلز، آلومینیوم و لایه چینی‌های 46 و 193 دچار شکست می‌شود. بنابراین با اعمال دو شرط اضافه کردن تکیه‌گاه و تغییر جنس، فرکانس طبیعی تا 460 درصد افزایش یافته است.

طبیعی را دارد. همچنین نسبت به مدل فلزی، جرم آن 62 درصد کمتر و فرکانس طبیعی آن 13 درصد بیشتر می‌باشد. لایه چینی شماره 41 نیز جزو لایه چینی‌های منتخب کامپوزیت کربن/ اپوکسی است چون نسبت به همه لایه چینی‌های کامپوزیت کربن/ اپوکسی بهترین فرکانس طبیعی را دارد. لایه چینی شماره 41، فرکانس طبیعی را نسبت به مدل فلزی 16 درصد افزایش داد. این لایه چینی جرم را نیز نسبت به مدل فلزی 39 درصد کاهش داد.

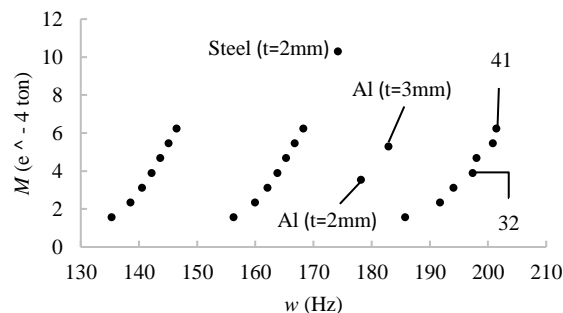


Fig. 10 Mass-natural frequency diagram of carbon epoxy and comparison with aluminum and steel 1010

شکل 10 نمودار جرم - فرکانس طبیعی کامپوزیت کربن/ اپوکسی و مقایسه با آلومینیوم و آهن 1010

طبق شکل 11، لایه چینی‌های 193 و 256 و 270 انتخاب شدند. سازه با این لایه چینی‌ها درحالی‌که جرمی معادل با سازه آلومینیومی به ضخامت 2 میلی‌متر و ضخامت 3 میلی‌متر و سازه فلزی دارد، فرکانس طبیعی بیشتری را ارائه می‌دهد. لایه چینی‌های 193 و 256 و 270 به ترتیب فرکانس طبیعی را نسبت به سازه فلزی 5 درصد و 8 درصد و 12 درصد افزایش می‌دهد. همچنین لایه چینی 284 نسبت به همه‌ی لایه چینی‌های چندلایه فلز الیاف کربن/

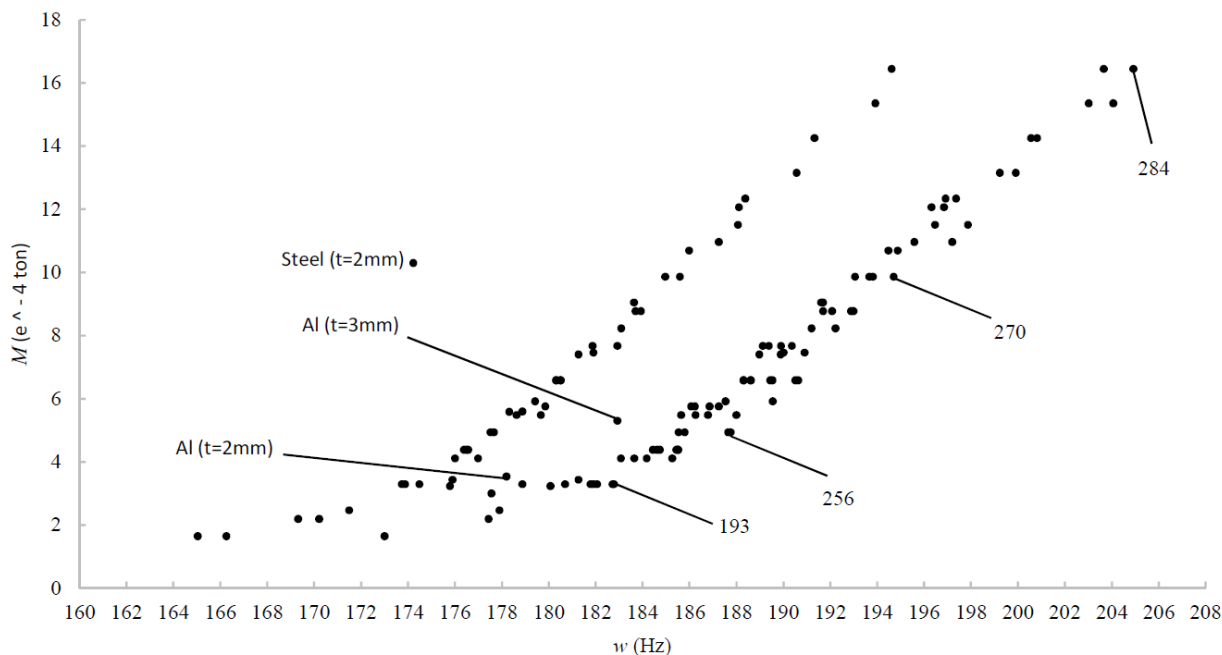


Fig. 11 Mass-natural frequency diagram of carbon epoxy-aluminum and comparison with aluminum and steel 1010

شکل 11 نمودار جرم - فرکانس طبیعی کربن/ اپوکسی/ آلومینیوم و مقایسه با آلومینیوم و آهن 1010



هم (چندلایه فلز الیاف) بررسی شدند. در هر کدام از لایه‌چینی‌ها، سه ترکیب زاویه‌ای 45/45 و 90/0 و 45/45- بررسی شدند. همچنین برای هر لایه‌چینی، تعداد 8 لایه تا 32 لایه در نظر گرفته شد. هدف افزایش لایه‌ها بررسی کاهش جرم و افزایش فرکانس طبیعی بود. در تمامی حالات لایه‌چینی چندلایه فلز الیاف، ضخامت آلومینیوم در مجموع نصف کامپوزیت بود. در این مرحله سازه‌هایی با 9 لایه‌چینی متفاوت و سازه آلومینیومی با ضخامت‌های 2 و 3 میلی‌متر که از نظر جرم و فرکانس طبیعی برتری داشتند، انتخاب شدند. تغییر جنس در بهترین حالت باعث افزایش 18 درصدی فرکانس طبیعی شد. البته قابل ذکر است که کاهش جرم قابل توجهی در بعضی از لایه‌چینی‌ها رخ داد.

سپس به‌منظور کاهش درجه آزادی سازه و افزایش فرکانس طبیعی آن سه تکیه‌گاه اضافه شد و لایه‌چینی‌های منتخب مجدد مورد تحلیل مودال قرار گرفتند. تمرکز تنش حاصل از افزایش بیش از حد فرکانس طبیعی باعث شد که در این مرحله تحلیل تنش نیز از طریق اعمال نیروی گسترده 15 مگاپاسکالی صورت بگیرد و نشان داده شد که سازه پیش‌فرض و سازه آلومینیومی استحکام لازم را ندارند. همچنین از بین 9 لایه‌چینی انتخاب شده در مرحله قبل 7 لایه‌چینی استحکام لازم را تأمین کردند. در نهایت با توجه به تغییرات طراحی و نتایج ارائه شده در جدول 8، لایه‌چینی شماره 11 در شرایطی که تمامی تکیه‌گاه‌های مورد نظر اضافه شده باشد، بهترین حالت است. چراکه نسبت به چندلایه فلز الیاف و کامپوزیت کربن/اپوکسی دارای هزینه کمتر است. این لایه‌چینی نسبت به حالت پیش‌فرض، دارای فرکانس طبیعی 3 برابری است. همچنین جرم آن نصف حالت پیش‌فرض است. طبق تحلیل تنش رخ داده نیز استحکام سازه را تأمین می‌کند. لایه‌چینی‌های شماره 32 و 41 و 256 و 270 در همه‌ی پارامترهای فرکانس طبیعی و جرم و استحکام بسیار مناسب هستند، اما بسیار پرهزینه می‌باشند. لایه‌چینی 156 در پارامترهای فرکانس طبیعی و استحکام مناسب است، اما جرم آن نزدیک به دو برابر حالت پیش‌فرض است. لایه‌چینی 284 نیز دارای جرمی بیش از حالت پیش‌فرض می‌باشد. استفاده از این لایه‌چینی هم بسیار پرهزینه می‌باشد.

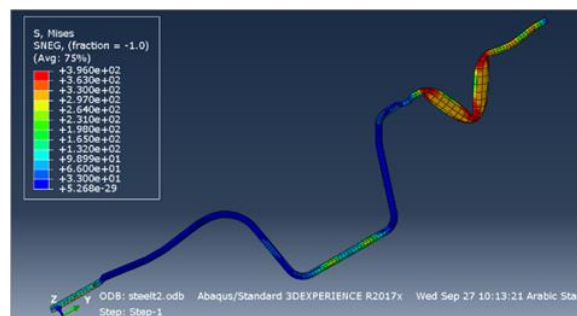


Fig. 12 Stress analysis of beam with 1010 material in the all-additional supports' mode

شکل 12 تحلیل تنش تیر با جنس 1010 در حالت همه تکیه‌گاه‌های اضافه شده

### 7- نتیجه‌گیری

داشبورد خودرو مجموعه‌ای از بخش‌های مختلف است که هر کدام مسئول جنبه‌ای از عملکرد، کنترل و ایمنی خودرو را به عهده دارند. در قلب داشبورد یک ساختار پشتیبانی فلزی به نام تیر تقویتی داشبورد وجود دارد که وظیفه تحمل بارها و تا حدی پاسخ به نیروهای تصادف را برعهده دارد. محدودیت‌های اصلی در طراحی تیر تقویتی داشبورد به عنوان صدا، ارتعاش و سفتی و همچنین عملکردهای قابلیت تصادف شناخته می‌شوند. عملکرد صدا، ارتعاش و سفتی به فرکانس‌های طبیعی سازه و جدا نگه داشتن آن‌ها از فرکانس‌های منابع تحریک‌کننده، مربوط می‌شود. موتور، سیستم انتقال نیرو و سطح جاده منابع رایج برای لرزش هستند. اگر فرکانس‌های طبیعی ساختار تیر تقویتی داشبورد با یکی از فرکانس‌های تحریک‌کننده همپوشانی داشته باشند، پدیده‌ای به نام تشدید رخ می‌دهد. چنین ارتعاشاتی می‌تواند صدای آزاردهنده قابل توجهی را در داخل و خارج خودرو ایجاد کند. همچنین می‌تواند به ستون فرمان منتقل شود و باعث ناراحتی و حواس‌پرتی راننده شود. با توجه به وجود این ارتعاشات آزاردهنده در داشبورد مورد نظر، برای جلوگیری از این پدیده مخرب، پاسخ مودال مجموعه تیر تقویتی داشبورد مورد مطالعه و اصلاح قرار گرفت. در این مقاله راه‌حل تغییر جنس بیان شد که هدف آن بهبود عملکرد ارتعاشی و افزایش فرکانس طبیعی بود. سه نوع جنس آلومینیوم و کامپوزیت-های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی به صورت جداگانه و به صورت ترکیب با

جدول 8 مقایسه تنش و فرکانس و جرم آلومینیوم و آهن 1010 با بهترین لایه‌چینی‌ها در حالت اضافه کردن همه تکیه‌گاه‌ها

Table 8 Comparison of tension, frequency and mass of aluminum and steel 1010 with the best FMLs in the all-support mode

Composite or FML codes	w (Hz)	m (e <sup>-4</sup> ton)	Max stress (MPa)	Yield stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)
Steel t=2mm	840.35	10.2979	Fail: max stress >396	305	395.98
Al t=2mm	862.6	3.53296	Fail: max stress >465.3	345	465.28
Al t=3mm	873.02	5.299	Fail: max stress >465.3	345	465.28
11	567.59	5.23402	479.7	-	1100
32	941.5	3.89935	670.6	-	2231
41	967.77	6.23895	417.6	-	2231
46	798.93	3.43483	Fail: max stress >603.2	-	603
156	866.5	18.4499	194.6	-	580
193	887.05	3.28958	Fail: max stress >1000	-	1000
256	896.52	4.93437	615	-	920
270	933.5	9.86875	279.2	-	808.8
284	976.53	16.4479	157.7	-	690

8- پیوست 1

جدول 9 انواع لایه‌چینی‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

Table 9 Types composites studied in this research (The unit of measurements is mm)

Carbon/Epoxy codes	Glass/Epoxy codes	Number of layers	laminated sequence	Thickness of layers
22	1		$[\pm 45]_{2s}$	0.2
23	2	8	$[0/45/90/-45]_s$	0.2
24	3		$[0/90]_{2s}$	0.2
25	4		$[\pm 45]_{3s}$	0.2
26	5	12	$[0/45/90/-45/0/45]_s$	0.2
27	6		$[0/90]_{3s}$	0.2
28	7		$[\pm 45]_{4s}$	0.2
29	8	16	$[0/45/90/-45]_{2s}$	0.2
30	9		$[0/90]_{4s}$	0.2
31	10		$[\pm 45]_{5s}$	0.2
32	11	20	$[(0/45/90/-45)_2/0/45]_s$	0.2
33	12		$[0/90]_{5s}$	0.2
34	13		$[\pm 45]_{6s}$	0.2
35	14	24	$[0/45/90/-45]_{3s}$	0.2
36	15		$[0/90]_{6s}$	0.2
37	16		$[\pm 45]_{7s}$	0.2
38	17	28	$[(0/45/90/-45)_3/0/45]_s$	0.2
39	18		$[0/90]_{7s}$	0.2
40	19		$[\pm 45]_{8s}$	0.2
41	20	32	$[0/45/90/-45]_{4s}$	0.2
42	21		$[0/90]_{8s}$	0.2

جدول 10 انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 8 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

Table 10 Types of 8 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al/Carbon/Epoxy codes	Al/Glass/Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
171	43	$[AL/\pm 45/AL]_s$	0.2	0.2	0.2
172	44	$[AL/\pm 45/AL]_s$	0.5	0.2	0.25
173	45	$[AL/\pm 45/AL]_s$	0.15	0.15	0.15
174	46	$[AL/\pm 45/AL]_s$	0.5	0.15	0.25
175	47	$[AL/45/-45/45]_s$	0.6	0.2	-
176	48	$[AL/45/-45/45]_s$	0.45	0.15	-
177	49	$[AL/45/90/AL]_s$	0.2	0.2	0.2
178	50	$[AL/0/45/90]_s$	0.6	0.2	-
179	51	$[AL/45/90/AL]_s$	0.15	0.15	0.15
180	52	$[AL/0/45/90]_s$	0.45	0.15	-
181	53	$[AL/0/90/AL]_s$	0.2	0.2	0.2
182	54	$[AL/0/90/AL]_s$	0.5	0.2	0.25
183	55	$[AL/0/90/0]_s$	0.6	0.2	-
184	56	$[AL/0/90/AL]_s$	0.15	0.15	0.15
185	57	$[AL/0/90/AL]_s$	0.5	0.15	0.25
186	58	$[AL/0/90/0]_s$	0.45	0.15	-

جدول 11 انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 12 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

Table 11 Types of 12 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al/Carbon/Epoxy codes	Al/Glass/Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
187	59	$[AL/\pm 45_2/AL]_s$	0.4	0.2	0.4
188	60	$[AL/\pm 45_2/45]_s$	1	0.2	-
189	61	$[AL/\pm 45_2/AL]_s$	0.3	0.15	0.3
190	62	$[AL/\pm 45_2/45]_s$	0.75	0.15	-
191	63	$[AL/0/45/90/-45/AL]_s$	0.4	0.2	0.4
192	64	$[AL/0/45/90/-45/0]_s$	1	0.2	-
193	65	$[AL/0/45/90/-45/AL]_s$	0.3	0.15	0.3
194	66	$[AL/0/45/90/-45/0]_s$	0.75	0.15	-
195	67	$[AL/(0/90)_2/AL]_s$	0.4	0.2	0.4
196	68	$[AL/(0/90)_2/0]_s$	1	0.2	-
197	69	$[AL/(0/90)_2/AL]_s$	0.3	0.15	0.3
198	70	$[AL/(0/90)_2/0]_s$	0.75	0.15	-

جدول 12 انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 14 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

Table 12 Types of 14 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al/Carbon/Epoxy codes	Al/Glass/Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Thickness of Al layer number 4	Al thickness for middle layer
199	71	$[AL/\pm 45/AL/\pm 45/AL]_s$	0.2	0.2	0.4	0.2
200	72	$[AL/\pm 45/AL/\pm 45/AL]_s$	0.15	0.15	0.3	0.15
201	73	$[AL/0/90/AL/0/90/AL]_s$	0.2	0.2	0.4	0.2

جدول 13 انواع لایه‌چینی‌های چندلایه فلز الیاف 16 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها میلی‌متر می‌باشد)

Table 13 Types of 16 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al/Carbon/Epoxy codes	Al/Glass/Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
202	74	$[AL/\pm 45_3/AL]_s$	0.54	0.18	0.54
203	75	$[AL/\pm 45_3/AL]_s$	0.6	0.2	0.6
204	76	$[AL/\pm 45_3/AL]_s$	0.45	0.15	0.45
205	77	$[AL/\pm 45_3/45]_s$	1.4	0.2	-
206	78	$[AL/\pm 45_3/45]_s$	1.05	0.15	-
209	81	$[AL/0/45/90/-45/0/45/AL]_s$	0.54	0.18	0.54
211	83	$[AL/0/45/90/-45/0/45/AL]_s$	0.6	0.2	0.6

254	126	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0/45/90]_s$	1.65	0.15	-
257	129	$[AL/(0/90)_5/AL]_s$	1	0.2	1
258	130	$[AL/(0/90)_5/AL]_s$	0.75	0.15	0.75
259	131	$[AL/(0/90)_5/0]_s$	1.65	0.15	-
260	132	$[AL/(0/90)_5/0]_s$	2.2	0.2	-

جدول 16 انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 28 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

Table 16 Types of 28 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
263	135	$[AL/\pm 45_6/AL]_s$	1.2	0.2	1.2
264	136	$[AL/\pm 45_6/AL]_s$	0.9	0.15	0.9
265	137	$[AL/\pm 45_6/45]_s$	1.95	0.15	-
266	138	$[AL/\pm 45_6/45]_s$	2.6	0.2	-
269	141	$[AL/(0/45/90/-45)_3/AL]_s$	1.2	0.2	1.2
270	142	$[AL/(0/45/90/-45)_3/AL]_s$	0.9	0.15	0.9
271	143	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0]_s$	2.6	0.2	-
272	144	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0]_s$	1.95	0.15	-
275	147	$[AL/(0/90)_6/AL]_s$	1.2	0.2	1.2
276	148	$[AL/(0/90)_6/AL]_s$	0.9	0.15	0.9
277	149	$[AL/(0/90)_6/0]_s$	2.6	0.2	-
278	150	$[AL/(0/90)_6/0]_s$	1.95	0.15	-

جدول 17 انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 32 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

Table 17 Types of 32 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
281	153	$[AL/\pm 45_7/AL]_s$	1.05	0.15	1.05
282	154	$[AL/\pm 45_7/AL]_s$	1.4	0.2	1.4
283	155	$[AL/\pm 45_7/45]_s$	2.25	0.15	-
284	156	$[AL/\pm 45_7/45]_s$	3	0.2	-
287	159	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0/45/AL]_s$	1.05	0.15	1.05
288	160	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0/45/AL]_s$	1.4	0.2	1.4
289	161	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0/45/90]_s$	2.25	0.15	-
290	162	$[AL/(0/45/90/-45)_3/0/45/90]_s$	3	0.2	-
293	165	$[AL/(0/90)_7/AL]_s$	1.05	0.15	1.05
294	166	$[AL/(0/90)_7/AL]_s$	1.4	0.2	1.4
295	167	$[AL/(0/90)_7/0]_s$	2.25	0.15	-
296	168	$[AL/(0/90)_7/0]_s$	3	0.2	-

212	84	$[AL/0/45/90/-45/0/45/AL]_s$	0.45	0.15	0.45
214	86	$[AL/0/45/90/-45/0/45/90]_s$	1.4	0.2	-
215	87	$[AL/0/45/90/-45/0/45/90]_s$	1.05	0.15	-
216	88	$[AL/(0/90)_3/AL]_s$	0.54	0.18	0.54
219	91	$[AL/(0/90)_3/0]_s$	1	0.15	-
220	92	$[AL/(0/90)_3/0]_s$	1.4	0.2	-
221	93	$[AL/(0/90)_3/AL]_s$	0.6	0.2	0.6
222	94	$[AL/(0/90)_3/AL]_s$	0.45	0.15	0.45
223	95	$[AL/(0/90)_3/AL]_s$	0.51	0.17	0.51

جدول 14 انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 20 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

Table 14 Types of 20 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
224	96	$[AL/\pm 45_4/AL]_s$	0.68	0.17	0.68
225	97	$[AL/\pm 45_4/AL]_s$	0.8	0.2	0.8
226	98	$[AL/\pm 45_4/AL]_s$	0.6	0.15	0.6
227	99	$[AL/\pm 45_4/45]_s$	1.8	0.2	-
228	100	$[AL/\pm 45_4/45]_s$	1.35	0.15	-
231	103	$[AL/0_2/45_2/90_2/-45_2/AL]_s$	0.68	0.17	0.68
233	105	$[AL/(0/45/90/-45)_2/AL]_s$	0.8	0.2	0.8
234	106	$[AL/(0/45/90/-45)_2/AL]_s$	0.6	0.15	0.6
236	108	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0]_s$	1.8	0.2	-
237	109	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0]_s$	1.35	0.15	-
238	110	$[AL/(0/90)_4/AL]_s$	0.68	0.17	0.68
240	112	$[AL/(0/90)_4/AL]_s$	0.8	0.2	0.8
241	113	$[AL/(0/90)_4/AL]_s$	0.6	0.15	0.6
243	115	$[AL/(0/90)_4/0]_s$	1.8	0.2	-
244	116	$[AL/(0/90)_4/0]_s$	1.35	0.15	-

جدول 15 انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 24 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

Table 15 Types of 24 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Al thickness for first layer	Thickness of composite layers	Al thickness for middle layer
245	117	$[AL/\pm 45_5/AL]_s$	1	0.2	1
246	118	$[AL/\pm 45_5/AL]_s$	0.75	0.15	0.75
247	119	$[AL/\pm 45_5/45]_s$	1.65	0.15	-
248	120	$[AL/\pm 45_5/45]_s$	2.2	0.2	-
251	123	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0/45/AL]_s$	1	0.2	1
252	124	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0/45/AL]_s$	0.75	0.15	0.75
253	125	$[AL/(0/45/90/-45)_2/0/45/90]_s$	2.2	0.2	-

**جدول 18** انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 16 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

**Table 18** Types of 16 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Thickness of all layers
207	79	[AL/45/AL/-45] <sub>2s</sub>	0.2
208	80	[AL/45/AL/-45] <sub>2s</sub>	0.15
210	82	[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45] <sub>s</sub>	0.2
213	85	[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45] <sub>s</sub>	0.15
217	89	[AL/0/AL/90] <sub>2s</sub>	0.2
218	90	[AL/0/AL/90] <sub>2s</sub>	0.15

**جدول 21** انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 28 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

**Table 21** Types of 28 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Thickness of all layers
267	139	[(AL/45/AL/-45) <sub>3</sub> /AL/45] <sub>s</sub>	0.2
268	140	[(AL/45/AL/-45) <sub>3</sub> /AL/45] <sub>s</sub>	0.15
273	145	[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0/AL/45/AL/90] <sub>s</sub>	0.2
274	146	[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0/AL/45/AL/90] <sub>s</sub>	0.15
279	151	[(AL/0/AL/90) <sub>3</sub> /AL/0] <sub>s</sub>	0.15
280	152	[(AL/0/AL/90) <sub>3</sub> /AL/0] <sub>s</sub>	0.2

**جدول 19** انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 20 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

**Table 19** Types of 20 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Thickness of all layers
229	101	[(AL/45/AL/-45) <sub>2</sub> /AL/45] <sub>s</sub>	0.2
230	102	[(AL/45/AL/-45) <sub>2</sub> /AL/45] <sub>s</sub>	0.15
232	104	[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0] <sub>s</sub>	0.2
235	107	[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0] <sub>s</sub>	0.15
239	111	[(AL/0/AL/90) <sub>2</sub> /AL/0] <sub>s</sub>	0.2
242	114	[(AL/0/AL/90) <sub>2</sub> /AL/0] <sub>s</sub>	0.15

**جدول 22** انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 32 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

**Table 22** Types of 32 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Thickness of all layers
285	157	[AL/45/AL/-45] <sub>4s</sub>	0.15
286	158	[AL/45/AL/-45] <sub>4s</sub>	0.2
291	163	[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45] <sub>2s</sub>	0.15
292	164	[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45] <sub>2s</sub>	0.2
297	169	[AL/0/AL/90] <sub>4s</sub>	0.15
298	170	[AL/0/AL/90] <sub>4s</sub>	0.2

**جدول 20** انواع لایه چینی های چندلایه فلز الیاف 24 لایه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (واحد اندازه ها میلی متر می باشد)

**Table 20** Types of 24 layers FML studied in this research (The unit of measurements is mm)

Al\Glass\Epoxy codes	Al\Carbon\Epoxy codes	laminated sequence	Thickness of all layers
249	121	[AL/45/AL/-45] <sub>3s</sub>	0.2
250	122	[AL/45/AL/-45] <sub>3s</sub>	0.15
255	127	[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0/AL/45] <sub>s</sub>	0.2
256	128	[AL/0/AL/45/AL/90/AL/-45/AL/0/AL/45] <sub>s</sub>	0.15
261	133	[AL/0/AL/90] <sub>3s</sub>	0.15
262	134	[AL/0/AL/90] <sub>3s</sub>	0.2

**9- پیوست 2**

**جدول 23** تنش واقعی و کرنش پلاستیک فلز 1010 [25]

**Table 23** True stress and plastic strain of metal [25]

True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
305	0
306.6822729	0.078823805
311.3144875	0.079580754
332.8049375	0.083154783
354.445	0.086728003
368.998875	0.089228084
383.85655	0.09233576
392.4691	0.0954888
395.9799641	0.098631929

**جدول 27** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (کربن/اپوکسی/آلومینیوم دوازده لایه) [32]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	323.86	0
2	450	0.002
3	544.32	0.004
4	690	0.006
5	808.8	0.008
6	920	0.01
7	1000	0.011

**جدول 28** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (کربن/اپوکسی/آلومینیوم بیست و چهار لایه) [32]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	290.53	0
2	323.86	0.002
3	450	0.004
4	544.32	0.006
5	690	0.008
6	808.8	0.01
7	920	0.011

**جدول 29** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (کربن/اپوکسی/آلومینیوم بیست و هشت لایه) [32]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	245.61	0
2	290.53	0.002
3	323.86	0.004
4	450	0.006
5	544.32	0.008
6	690	0.01
7	808.8	0.011

**جدول 30** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (کربن/اپوکسی/آلومینیوم سی و دو لایه) [32]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	224.36	0
2	245.61	0.002
3	290.53	0.004
4	323.86	0.006
5	450	0.008
6	544.32	0.01
7	690	0.011

**جدول 24** تنش واقعی و کرنش پلاستیک فلز آلومینیوم [30]

**Table 24** True stress and plastic strain of aluminum metal [30]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	345.00	0
2	346.71	0.00037873
3	351.10	0.00053702
4	355.19	0.00058501
5	359.35	0.001755
6	363.50	0.0032176
7	367.66	0.0046801
8	371.81	0.0052651
9	378.04	0.0073126
10	384.27	0.0087751
11	389.00	0.01053
12	394.66	0.013455
13	398.81	0.01638
14	405.04	0.019013
15	409.20	0.021938
16	413.35	0.024278
17	421.66	0.02691
18	427.89	0.029835
19	434.12	0.032761
20	438.28	0.034808
21	442.43	0.038026
22	448.66	0.042121
23	454.90	0.045631
24	459.05	0.048263
25	465.28	0.051481

**جدول 25** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (شیشه/اپوکسی/آلومینیوم هشت لایه) [31]

**Table 25** True stress and true strain of FML (glass/epoxy/aluminum eight layers) [31]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	297	0
2	330.4	0.003
3	399	0.008
4	437.6	0.013
5	490	0.018
6	530.5	0.023
7	580	0.028
8	603.2	0.033

**جدول 26** تنش واقعی و کرنش چندلایه فلز الیاف (شیشه/اپوکسی/آلومینیوم سی و دو لایه) [31]

**Table 26** True stress and true strain of FML (glass/epoxy/aluminum thirty-two layers) [31]

num.	True stress (MPa)	True plastic strain (mm/mm)
1	218	0
2	283.65	0.003
3	330.4	0.008
4	399	0.013
5	437.6	0.018
6	490	0.023
7	530.5	0.028
8	580	0.033

- Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJRSET), Vol. 11, No. 6, pp.8163-8170, June 2022
- [21] Koppanati, M. S., Naga Rani, M. and Krishna Bhaskar, K., "Free Vibration Analysis of Graphene Reinforced Laminated Composite Plates Using Experimental Modal Testing" *Mechanics Of Advanced Composite Structures*, Vol. 10, No. 2, pp. 363-374, 2023.
- [22] Ghahremanian, Z., Shoostari, A.R. and Rafiee, M., "Analytical Modeling for Transverse linear and Nonlinear Vibrations of Glass Fiber/Epoxy Composites Reinforced with Carbon Nano Particles " *In Persian, Journal of mechanical engineering of Tabriz University* , Vol. 53, No. 1, pp. 81-90, 2023.
- [23] Azarafza, R., Davar, A and Ghaffari, H., "Fabrication and Testing of Composite Flange Using Experimental and Numerical Methodss " *In Persian, Journal of Aeronautical Engineering* , Vol. 25, No. 2, pp. 34-47, 2023.
- [24] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6539> , available in 18, February 2024.
- [25] Orhan, S., Öztürk, F. and Gattmah, J., "Effects of the Semi Die/Plug Angles on Cold Tube Drawing with a Fixed Plug by Fem for Aisi 1010 Steel Tube" *Sakarya University Journal of Science*, Vol. 21, No. 5, pp. 886-892, 2017.
- [26] Waqas, H. M., Shi, D., Imran, M., Khan, S. Z., Tong, L., Ahad, F. E., Zaidi, A. A., Iqbal, J. and Ahmed, W., "Conceptual Design of Composite Sandwich Structure Submarine Radome" *Materials*, Vol. 12, No. 12, pp. 1966, 2019.
- [27] Mr. Pruthviraj. K. Patil, M. K. D. B., Dr. S.M. Pise, "Optimization of Cross-Car Beam (Ccb) a Sub-System of Automobile by Modal Analysis" *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 08, No. 01, pp. 403-409, 2021.
- [28] ISHAK, M. H. I., "Modal Analysis of a Straight Pipe with and without Fluid" in *Proceeding of IRC*, pp.
- [29] Chen, D.-C., You, C.-S. and Gao, F.-Y., "Analysis and Experiment of 7075 Aluminum Alloy Tensile Test" *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 1252-1258, 2014.
- [30] Zehsaz, M., Hassanifard, S. and Esmaeili, F., "Fatigue Life Estimation for Different Notched Specimens Based on the Volumetric Approach" in *Proceeding of EDP Sciences*, pp. 42001.
- [31] Ergun, H., Liaw, B. M. and Delale, F., "Experimental-Theoretical Predictions of Stress–Strain Curves of Glare Fiber Metal Laminates" *Journal of Composite Materials*, Vol. 52, No. 1, pp. 109-121, 2018.
- [32] Xue, J., "Tensile Strength and Thermal Residual Stress of Carall and Uacs/Al Laminates" Thesis, Ph. D. dissertation. Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu ..., 2012.
- [1] Pinto, A. F., Tavares, S., César de Sá, J. M. and de Castro, P., "Structural Analysis of a Cross Car Beam Using Finite Element Models" *International Journal of Structural Integrity*, Vol. 6, No. 6, pp. 759-774, 2015.
- [2] <https://aec.org/page/cross-car-beam>, available in 18, February 2024.
- [3] Muhammad, A., Rahman, M. R., Bains, R. and Bakri, M. K. B., "Applications of Sustainable Polymer Composites in Automobile and Aerospace Industry" in: *Advances in Sustainable Polymer Composites*, Eds., pp. 185-207: Elsevier, 2021.
- [4] Rahmani, M., "Multidisciplinary Design Optimization of Automotive Aluminum Cross-Car Beam Assembly" Thesis, University of Toronto, 2013.
- [5] Pitrof, S. M. and Merrifield, R. A., "Engineering Development of a Composite Cross Car Beam" *SAE transactions*, pp. 738-743, 1997.
- [6] Lee, C. S., Lee, H. G., Hwang, H. Y. and Kim, J. W., "Novel Applications of Composite Structures to Robots, Machine Tools and Automobiles" *Composite Structures*, Vol. 66, No. 1-4, pp. 17-39, 2004.
- [7] Li, N., Chen, X., Hubbert, T. and Berkmortel, R., "2005 Ford Gt Magnesium Instrument Panel Cross Car Beam" 0148-7191, SAE Technical Paper, pp. 2005.
- [8] Shankar, G. S. S. and Vijayarangan, S., "Mono Composite Leaf Spring for Light Weight Vehicle–Design, End Joint Analysis and Testing" *Materials science*, Vol. 12, No. 3, pp. 220-225, 2006.
- [9] Silva, A. R. C. R. d., "Early Phase of the Cross Car Beam Concept Development", 2013.
- [10] Jaranson, J. and Ahmed, M., "Mmlv: Lightweight Interior Systems Design 2015-01-1236" *The Multi Material Lightweight Vehicle (MMLV) Project*, pp. 35, 2015.
- [11] Skszek, T., "Demonstration Project for a Multi-Material Lightweight Prototype Vehicle as Part of the Clean Energy Dialogue with Canada", *Vehma International Of America, Inc., Troy, MI (United States)*, pp. 2015.
- [12] Kim, D.-H., Kim, H.-G. and Kim, H.-S., "Design Optimization and Manufacture of Hybrid Glass/Carbon Fiber Reinforced Composite Bumper Beam for Automobile Vehicle" *Composite Structures*, Vol. 131, pp. 742-752, 2015.
- [13] Kim, D.-H., Jung, K.-H., Kim, D.-J., Park, S.-H., Kim, D.-H., Lim, J., Nam, B.-G. and Kim, H.-S., "Improving Pedestrian Safety Via the Optimization of Composite Hood Structures for Automobiles Based on the Equivalent Static Load Method" *Composite Structures*, Vol. 176, pp. 780-789, 2017.
- [14] Park, G. and Park, H., "Structural Design and Test of Automobile Bonnet with Natural Flax Composite through Impact Damage Analysis" *Composite Structures*, Vol. 184, pp. 800-806, 2018.
- [15] Satheesh, S., Srikari, S. and Shivakumar, H., "Numerical Investigation of Cross Car Beam Using Magnesium Alloy for Weight Reduction" *SASTech-Technical Journal of RUAS*, Vol. 17, No. 1, pp. 45-48, 2018.
- [16] Deokar, V., Gumma, V., Bhagwat, P. and Dange, A., "Development, Manufacturing and Testing of a Steering Wheel Prototype Processed out of Banana Fibre Composites", 2019.
- [17] Zhu, G., Wang, Z., Cheng, A. and Li, G., "Design Optimisation of Composite Bumper Beam with Variable Cross-Sections for Automotive Vehicle" *International journal of crashworthiness*, Vol. 22, No. 4, pp. 365-376, 2017.
- [18] Ding, M., Liu, B., Fan, Z., Wang, J., Zhai, F. and Li, L., "Damping Property of Carbon Fiber Reinforced Plastic for Noise/Vibration/Harsh of Steering Column Support Assembly", 2021.
- [19] Davar, A., Mehrabani, M., Zamani, M., Heydari Bani, M. and Eskandari Jam, J., "Analysis of Composite Lattice Cylindrical Shells under Transient Dynamic Loading" *In Persian, علوم و مهندسی*, هوافضا, Vol. 14, No. 1, pp. 30-44, 2021.
- [20] Thatithooru Vasantha , yalamanchili Suresh, " Structural Analysis on Cross Car Beam by Varying Materials ", *International Journal of*