

# بررسی روشهای مختلف بهینه سازی سازه های کامپوزیتی

مسعود طهانی<sup>۱</sup>، مهدی عباچی زاده<sup>۲</sup>

گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد - صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

[mtahani@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:mtahani@ferdowsi.um.ac.ir)

## چکیده

در این مقاله جنبه های مختلف بهینه سازی سازه های متفاوت کامپوزیتی اعم از کلاسیک، هوایی و خودروی مورد بررسی قرار می گیرد. به لحاظ گستردگی مطالب، موضوعات در قالبهای مناسب و مرتبط با هم دسته بندی شده اند. در ابتدا تحلیل پیچیدگی مسائل طرح شده تا به امروز در سه جهت پیچیدگی مدل، پیچیدگی تحلیل و پیچیدگی پروسه بهینه سازی انجام می شود. سپس رهیافتهای حل مسائل و نحوه بکارگیری رایانه در آنها بررسی می گردد و در انتها از میان سازه های اشاره شده بالا، توجه عمده به سمت سازه ها و اجزای خودرو معطوف می شود. از میان سازه های مختلفی که در آن بخش ارائه خواهد شد و به عنوان نمونه ای مناسب، فنرهای تخت به لحاظ ویژگیهای خاص خود مورد مطالعه دقیقتری قرار می گیرند.

واژه های کلیدی: سازه های کامپوزیتی - بهینه سازی - تحلیل پیچیدگی - فنرهای تخت.

## ۱- مقدمه

ترکیب این دو مقوله موجب بوجود آمدن حیطه بسیار جذاب و وسیعی از مسائل می شود که از حدود سی سال قبل، توجه مهندسين مکانیک و سازه را به خود معطوف کرده است. کامپوزیتها با داشتن قابلیتهای شاخصی چون نسبت استحکام به وزن و صلبیت به وزن بالا دارای پارامترهای طراحی متعددی هستند که تنظیم آنها نظیر زاویه الیاف، ضخامت لایه ها، نحوه چیدمان الیاف و نوع الیاف و ماتریس بکار رفته برای دستیابی به بهترین سازه ممکن، مستلزم بکارگیری الگوریتمهای مناسب بهینه سازی است که در این بین به لحاظ پیچیدگی ذاتی مسائل کامپوزیتی لازم است با توجه به ساختار مدل، دقت زیادی در انتخاب محدوده تحلیل و بهینه سازی مورد نظر به خرج داده شود. در ادامه، این مقاله سعی دارد راهنماییهای کلی و کلیدی را برای انتخاب و بکارگیری موضوع و روش کارآموده تر در اختیار خواننده قرار دهد. در بخش نخست این مقاله، مسائل طرح شده در زمینه

کامپوزیتها دسته ای از مواد پیشرفته هستند که به لحاظ قابلیتهای ویژه خود از همان ابتدا مورد توجه طراحان بوده اند. در کنار این قابلیتهای ویژه، رفتار کامپوزیتها رفتاری ارتوتروپیک است که موجب پیچیده تر شدن روابط و طبعاً روند تحلیل و طراحی آنها در مقایسه با مواد معمول فلزی می گردد.

از جهتی دیگر بهینه سازی نیز حیطه بسیار وسیعی از ریاضیات را در بر می گیرد که بویژه در نیم قرن اخیر توجه تمامی حوزه های مهندسی را به خود جلب نموده است. ارائه آنالیزهای تحلیلی جامعتر، امکان استفاده از رایانه و بالطبع قابلیت بکارگیری الگوریتمهای تکرارشونده و در نهایت ظهور الگوریتمهای هوشمند باعث شده قابلیت روشهای بهینه سازی، دیگر به حل مسائل ساده خطی محدود نبوده و توانایی روشهای جستجوگر اتفاقی موجب تعیین سریعتر بهینه های عمومی مدلها پیچیده گردد.

۱- استادیار

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

طراحی سازه های کامپوزیتی از دیدگاه پیچیدگی آنها مورد بررسی قرار می گیرند و از سه منظر ساختار مدل انتخابی، تحلیل انجام شده روی مدل و نوع بهینه سازی دسته بندی می شوند. در بخش دوم به لحاظ اهمیت استفاده از رایانه در حل مسائل بهینه سازی که آنرا به جزیی جدا ناپذیر در این زمینه مبدل ساخته است رهیافتهای ممکن برای بکارگیری کدهای رایانه ای بررسی می شوند و چند نمونه از مقالات ارائه شده در هر گروه معرفی می گردند. در بخش سوم از میان کاربردهای گوناگون سازه های کامپوزیتی، قطعات کامپوزیتی شده یا دارای قابلیت کامپوزیتی شدن خودروها مورد بررسی قرار گرفته اند و از میان آنها طراحی و بهینه سازی فنرهای تخت بدلیل سابقه بیشتر کارهای انجام شده بر روی آنها و نیز امکان مقایسه تحلیلهای مبتنی بر کدهای استاندارد طراحی خودرو و نتایج تستهای عملکردی و تحلیلهای عددی، عمیقتر و جزیی تر مطالعه شده اند.

## ۲- تبیین پیچیدگی بهینه سازی کامپوزیتها

مهمترین دغدغه طراح در مورد حل مسائل بهینه سازی سازه ها بویژه سازه های کامپوزیتی، تبیین محدوده پیچیدگی (complexity) مسأله می باشد که ونکاتاماران و هفتکه (Venkataraman & Haftka) [۱] به نحو جالبی این امر را مورد بررسی قرار داده اند. بر همین اساس و برای آشکارسازی کیفیت پیچیدگی مسائل سه محور عمده قابل طرح هستند: پیچیدگی مدل، پیچیدگی تحلیل و پیچیدگی بهینه سازی.

### ۲-۱- پیچیدگی مدل

در مورد کامپوزیتها به سه دسته عمده از مسائل طرح شده بر حسب پیچیدگی مدل می توان اشاره نمود؛ مسائلی که شامل چند لایه ها می شود، مسائلی که راجع به انواع پانلهای تقویت شده بحث می کند و در نهایت مسائلی که به مخازن، بالها، خودروها و شاتلها می پردازد. شکل (۱) شمایی کلی از مدلهای قابل طرح را ارائه می نماید.

### ۲-۱-۱- چند لایه های کامپوزیتی

پایینترین سطح بهینه سازی، مدلسازی و تحلیل، زمانی

روی می دهد که حل بسته ای در دسترس باشد. طراحی چند لایه های کامپوزیتی نمونه مناسبی از این گونه است چرا که طراحی برای مقاومت و کماتش صفحه ای با قیدهای ساده، دارای حل تحلیلی بسته می باشد. از طرف دیگر چون زاویه الیاف اغلب به مجموعه محدودی از زوایا (مثلاً صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه) منتهی می گردد طراحی چیدمان الیاف تبدیل به مسأله از نوع بهینه سازی ترکیبی می شود که نقاط بهینه محلی متعددی خواهد داشت.

الگوریتم ژنتیک رهیافتی معمول و مناسب در برخورد با چنین مسایلی است. بعنوان نمونه می توان به مقاله ویکس و کالاهان (Callahan & weeks) [۲] و یوکویاما و گوتو (Yokoyama & Goto) [۳] اشاره نمود. در چنین مسایلی به رغم هندسه ساده، محدوده جوابها می تواند بسیار وسیع باشد و با توجه به اینکه ساختار جستجوگرهای اتفاقی به جوابهای مختلفی در هر بار از اجرا منتج می شود محدودیت زمانی حل اهمیت می یابد.

بدین ترتیب تعیین درجه کارایی الگوریتمهای هوشمند مقوله مهمی در تحلیل نتایج محسوب می شود. قابلیت اطمینان الگوریتم در رسیدن به جواب بهینه به ازاء تعداد مشخصی اجرا می تواند معیار مناسبی باشد.

بطور مثال اگر الگوریتمی نقطه بهینه را فقط در ۴۰٪ اجراهای خود و دیگری در ۶۰٪ همان تعداد اجرا بدست آورد در نگاه نخست می توان الگوریتم دوم را کارتر دانست ولی اگر این نتایج بر پایه فقط ۱۰ اجرا بدست باشند می توان نشان داد انحراف استاندارد تخمین قابلیت اطمینان حدود ۱۵/۵٪ است که فاصله معنایی ۴۰٪ و ۶۰٪ را از بین خواهد برد. حال اگر تعداد این اجراها به ۱۰۰ بار افزایش یابد انحراف ذکر شده به ۴/۹٪ تقلیل می یابد و اختلاف عملکرد دو الگوریتم معنی دارتر خواهد بود [۴]. بدین ترتیب باید توجه داشت در اغلب مقالاتی که از روشهای جستجو هوشمند استفاده می شود تعداد تکرار اجرای الگوریتم تا حد امکان بالا در نظر گرفته می شود تا بهترین نتایج با بالاترین قابلیت اطمینان بدست آید که همین امر موجب محدود شدن کاربرد آنها در مدلهای از رده ساده تا نهایتاً متوسط شده است.

تابع هدفی که در اغلب مسائل بهینه سازی کامپوزیتها اتخاذ می گردد وزن سازه مورد نظر است اما ساختار چند

لایه ها این اجازه را می دهد نسبت به سایر سازه های پیچیده تر، توابع جامعت با صرف هزینه و زمان کمتر، هدف بهینه سازی واقع شوند.

مقوله عدم قطعیت پایداری سازه یکی از این نمونه ها است. کوگیسو (Kogiso) حداکثرسازی قابلیت اطمینان کمانش صفحات لامینیتی را روی پارامتر پیوسته زاویه الیاف مورد بررسی قرار داده است [۵]. لوریش و گودن (LeRiche & Gaudin) [۶]، همچنین کو (Qu) [۷] پایداری ابعادی تحت انبساط حرارتی و رطوبتی را با روش مونت کارلو شبیه سازی نموده اند.

مقاومت پسماند از دیگر این موارد است. این پارامتر به جهت افزایش اطمینان از سالم ماندن چند لایه ها پس از شکستهای حادثه ساز مورد توجه طراحان بوده است که همراه با پاسخهای پس کمانشی و رفتارهای غیرخطی این مرحله، در مقالات شین (Shin) [۸] و هممر (Hammer) [۹] بهینه شده است.

#### ۲-۱-۲- پانلهای تقویت شده

معمولاً جذابترین سیستمها در مبحث بهینه سازی سازه های کامپوزیتی و بطور کلی سازه ها، مدل‌های با پیچیدگی متوسط هستند چرا که به کاربر امکان می دهند ضمن مواجهه با سیستمی واقعی تر و کاربردی تر نسبت به سازه های کلاسیک و با هندسه ساده، تحلیلها و روشهای پیچیده ای که در بر روی مدل‌های با پیچیدگی زیاد قابل اجرا نیستند اعمال نماید.

پانلهای تقویت شده از نمونه های بارز این گروه می باشند که کاربردهای مختلفی در ساخت مخازن تحت فشار و نیز سازه های هوایی و دریایی دارند. در عمل، تقویت کننده ها نقش افزایش صلبیت خمشی اجزا جدار نازک و مقاومت آنها نسبت به کمانش را بعهده دارند که همین ساختار دو جزیی باعث بروز رفتارهای غیرخطی پیچیده ای می گردد. بدلیل نوع کاربرد، پانلهای عمدتاً دارای خم ساخته می شوند که باعث بالا رفتن حساسیت عملکرد سازه به شرایط ساخت و در حین تحلیل به نحوه مش زدن می گردد که عامل دوم در فرآیندهای تحلیل به کمک نرم افزارهای اجزا محدود اغلب دردرساز می شود.

در پروسه بهینه سازی این نوع از سازه ها، متغیرهای

طراحی معمولاً چیدمان الیاف در بخشهای مختلف (نظیر پوسته بدنه، جان و فلنجهای تقویت کننده ها)، پروفیل سطح مقطع تقویت کننده و اندازه آن است که بدین ترتیب فرآیند بهینه سازی شامل هم متغیرهای ناپیوسته نظیر ضخامت و جهت الیاف و متغیرهای پیوسته نظیر اندازه تقویت کننده ها خواهد بود.

اولین مقالات در این زمینه به دهه هفتاد بر می گردد که اشترود و آگرانوف (Stroud & Agranoff) [۱۰] بهینه سازی وزن را بر اساس تحلیل استاتیکی خطی که ساده ترین نوع تحلیل محسوب می شود با احتساب ۱۰۰۰ درجه آزادی و ۲۰ متغیر طراحی انجام دادند. در طی سالهای بعد ضمن افزایش درجات آزادی و متغیرهای طراحی، تحلیل‌های پیچیده تری نیز به چشم می خورد.

#### ۲-۱-۳- سازه های با پیچیدگی زیاد

بالها، مخازن سوخت، اجرام پرتاب شونده و اجزا پیچیده خودرو نظیر شاسی و بدنه در ردیف چنین سازه هایی قرار می گیرند که البته بیشترین مقالات در این حوزه، علیرغم برخی محدودیتها در انعکاس نتایج نمونه های واقعی به بالها اختصاص دارد.

آنچه که در بهینه سازی ساختارهای بزرگ و پیچیده اهمیت می یابد تعیین حدود درجات آزادی در نظر گرفته شده برای سیستم به عنوان معیاری از حدود تحلیل و تعداد متغیرهای طراحی به عنوان معیاری از حدود بهینه سازی است. پیشرفتهای سخت افزاری و نرم افزاری بویژه در طی سالهای اخیر دائماً در حال شکستن این محدودیتها می باشد.

بعنوان نمونه اشمیت و میورا (Schmit & Miura) [۱۱] در ۱۹۷۶ دو نوع بال هواپیما را با ۱۲۰ و ۱۰۳ درجه آزادی و ۳۲ و ۴۰ متغیر طراحی به لحاظ استحکام بهینه کردند. ۱۲ سال بعد، بال گزارش شده در کنفرانس ناتو با ۳۵۰۰ درجه آزادی و ۴۷۶ متغیر طراحی بهینه گردیده بود [۱۲]. نمونه مقاله ارائه شده در سال ۲۰۰۲ که البته مدل بال توسط نرم افزار ویژه Genesis [۱۳] طراحی و بهینه شده بود دارای ۵۰۰۰۰ درجه آزادی، ۱۳۸۴ متغیر طراحی و ۴۸۰۰ محدودیت بود [۱۴]. استفاده از روشهای meshless و موازی سازی جستجوگرها از جمله

ترفندهای جدید در حل چنین مسائل بزرگی هستند.

## ۲-۳- پیچیدگی بهینه سازی

شکل (۳) سطوح مختلف بهینه سازی که سومین و آخرین بعد تحلیل پیچیدگی ارائه گردیده می باشد را به تصویر می کشد. ابتدایی ترین سطح، بهینه سازی نقطه ای چیدمان لایه ها بر اساس گرافهای پارامتری لایه ای سازی (عبارات کششی و خمشی که انتگرال خواص تک لایه ها هستند) می باشد که در این حیطه و بویژه در سالهای دورتر مقالات متعددی به چاپ رسیده است.

سطح بعدی، بهینه سازی محلی مبتنی بر روشهای شیب (gradient based) می باشد که باز هم بویژه در دهه هفتاد و هشتاد بیشتر به آنها پرداخته شده است و مثلاً در مقاله اشمیت و فرشی (Schmit & Farshi) [۲۴] از این روش استفاده شده است. بهینه سازی چند هدفه، رده بعدی این ساختار را تشکیل می دهد. در این گروه از مسائل طراح می بایست از طرفی با انتخاب توالی مناسبی از پروسه بهینه سازی، دقت و هزینه محاسباتش را در نظر داشته باشد و از سوی دیگر در قالب سطوح پارتو و با دیدی مهندسی، گروههای مناسب جواب را شناسایی نماید.

پارک و دیگران (park et al.) [۲۵] حداقل کردن خیز ماکسیمم و هزینه پر کردن قالب را در فرآیند ساخت قطعات کامپوزیتی به روش RTM مورد بررسی قرار دادند. وانگ و دیگران (Wang et al.) [۲۶] نیز دو تابع هزینه و وزن را برای سازه ای هوایی بهینه کردند.

در دو سطح بعدی، بهینه سازی پارامترهای ناپیوسته و بهینه سازی global قرار دارند. بهینه سازی پارامترهای ناپیوسته اغلب با ورود پارامتر ضخامت لایه ها و در مسائل کاربردی تر زاویه الیاف پدیدار می گردد و مسأله را به حالت ترکیبی وارد می کند. نمونه قابل توجهی از این نوع مسائل، مقاله اسپالینو و ریتزو (Spallino & Rizzo) است [۲۷]. الگوریتمهای تکاملی جستجوگر نظیر الگوریتم ژنتیک، تبرید تدریجی و جستجوی پخشی (scatter search) به واسطه پرداختن مستقیم به مجموعه جوابها و پرهیز از تحلیل سیستم که در مورد سازه های کامپوزیتی همیشه مشکلات و پیچیدگی های خاص خود را به همراه دارد توانایی زیادی برای حل چنین حالتیهای از خود نشان داده اند که البته الگوریتم ژنتیک به واسطه پیشینه بیشتر و انعطاف مناسب در برخورد با حالتیهای مختلف، بسیار بیشتر

## ۲-۲- پیچیدگی تحلیل

یکی دیگر از اضلاع سه گانه ساختار شناسی تحلیل پیچیدگی بهینه سازی سازه های کامپوزیتی، محث پیچیدگیهای تحلیل می باشد و همانطور که در شکل (۲) می توان دید سه محور عمده قابل بررسی هستند که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

ساده ترین رده، تحلیلهای خطی استاتیکی شامل تنشها و خیزها هستند که به همین دلیل موضوع عمده مقالات سالهای دورتر را شامل می شوند. مقالات خوت و همکارانش (Khot et al.) [۱۵] و هفتکه و گوردال (Haftka & Gurdal) [۱۶] دو نمونه از آثار قدیمی تر و پروشازکا (Prochazka) [۱۷]، مارتین (Martin) [۱۸] و فارس و همکارانش (Fares et al.) [۱۹] از نمونه های متأخرتر هستند.

گروه دوم تحلیلها که در جایگاه متوسطی از پیچیدگی جای دارند مربوط به تحلیل کماتش و مدهای طبیعی سیستم می شود. مقاله مسکیتا و کمت (Mesquita & Kamat) در دهه ۸۰ [۲۰] و کوریا و همکارانش در سال ۲۰۰۳ (Correia et al.) [۲۱] از جمله مقالات متعدد به چاپ رسیده در این بخش هستند.

تحلیلهای حالت گذرا و تحلیلهای غیر خطی از جمله پس کماتش، برخورد و نیز توسعه ترک در بالاترین سطح پیچیدگی جای می گیرند. چنین تحلیلهایی نیازمند تکرارهای متوالی از برآوردهای نموی پاسخ هستند و هزینه چنین تحلیلهایی به زمان و گام بار اعمالی و نیز حداکثر زمانی که جوابها تا آن دوره مد نظر هستند بستگی دارد. بیزانی و لانزی (Bissagni & Lanzi) [۲۲] به کمک شبکه های عصبی، بهینه سازی محدوده پس کماتشی پانلهای تقویت شده را مورد بررسی قرار داده و به کاهش وزنی حدود ۱۸٪ دست یافتند. آنها کد نوشته شده با Matlab را با نرم افزار ABAQUS همراه کردند و در پروسه خود از GA نیز سود جستند. همچنین لانزی (Lanzi) [۲۳] شکل یک جاذب انرژی را تحت اثرات crashworthiness در قالبی چند جهته بهینه کرد. حلگر اصلی بهینه ساز وی نیز از GA استفاده می کرد.

از سایر روشها مورد توجه واقع شده است.

پیچیده ترین حالت بهینه سازی مربوط به زمانی است که طراح، مفهوم عدم قطعیت (uncertainty) را وارد معادلات می نماید. عمده‌تاً این مفهوم برای یافتن احتمال ساقط شدن سیستم بکار می رود که می بایست مفهوم احتمال خرابی را در قالب مسأله ای دو سطحی برای پیدا کردن محتمل ترین نقطه خرابی تعریف نمود. یانگ (Yang) [۲۸] جزء اولین نفراتی است که وارد این فاز از مسائل شده است. از جمله مطالعات جدیدتر می توان به مقاله کو و همکارانش (Qu et al.) [۷] اشاره کرد که سه مفهوم قابلیت اطمینان، وزن و هزینه را برای کامپوزیتهای بکار رفته در دماهای بسیار پایین بررسی نمودند.

### ۳- رهیافتهای حل به کمک رایانه

یکی از جنبه های مهم بررسی مسائل بهینه سازی بخصوص در مورد کامپوزیتهای که امکان حل دستی برای ساده ترین مدلها آن نیز تقریباً وجود ندارد شناخت روشهای مختلف تعامل کاربر به عنوان طراح مسأله و رایانه به عنوان ماشین حل کننده آن می باشد. در این رهگذر و با توجه به توضیحاتی که در مورد سطوح مختلف پیچیدگی مسائل گذشت سه رهیافت عمده قابل تمیز از یکدیگر هستند.

#### ۳-۱- کدنویسی مستقیم

در تعداد قابل توجهی از مقالات و بویژه در مقالات قدیمی تر و بواسطه نبود و یا عمومی نشدن نرم افزارهای تجاری تحلیل و بهینه سازی، محقق به کمک یکی از زبانهای مناسب نظیر Fortran ، C++ و یا حتی زبان سطح بالایی چون Matlab کدی را می نویسد که بطور کامل تبیین وضعیت هندسی، تحلیل مدل و راهکار بهینه سازی را شامل می گردد. بی تردید عمده کاربرد چنین استراتژی در مورد سیستمهای با پیچیدگی بهینه سازی کم و یا متوسط و با ساختار هندسی ساده و کلاسیک می باشد. چنین روشی برای تعیین قابلیت الگوریتمهای جدید، بهترین متد محسوب می شود. مقاله لی و دیگران (Lee et al.) [۲۹] نمونه جدیدی از این رهیافت است.

#### ۳-۲- ادغام کد نویسی و نرم افزارهای FEM

در مورد سیستمهای با پیچیدگی بهینه سازی کم تا متوسط و با ساختار هندسی ساده تا نسبتاً پیچیده، مناسبترین استراتژی، استفاده ترکیبی از نرم افزارهای تجاری اجزای محدود و کد رایانه ای است. نرم افزار اجزای محدود، نقش تحلیلگر و نیز عامل نشاندهنده گرافیکی پارامترها، قبل و بعد از پروسه تحلیل و بهینه سازی را بعهده دارد و توسط رابطی نرم افزاری به هسته حلگر بهینه ساز که کدی خاص و مناسب همان مسأله و یا کدی عمومی شامل یک یا چند روش کلی بهینه سازی می باشد متصل می گردد. از جمله مقالات در این موضوع می توان به مقاله ماک و گوربا (Muc & Gurba) [۳۰] اشاره کرد که کد الگوریتم ژنتیک با نرم افزار NISA ارتباط داده شده است.

#### ۳-۳- استفاده از نرم افزارهای بهینه سازی خاص

در برخورد با سیستمهای با ابعاد بزرگ، مشکل همیشگی، تعداد بسیار زیاد پارامترهای تحلیل و بهینه سازی است. با این توضیح باید گفت روش کدنویسی مستقیم بدلیل عدم امکان تعریف مسأله و کنترل فرآیند تعریف، تحلیل و بهینه سازی در ابعاد بزرگ و روش ترکیبی بدلیل لزوم تحلیل سیستمی پیچیده و به دفعات مکرر، کارایی خود را از دست می دهند. نرم افزارهای بهینه سازی- تحلیلی خاصی همچون Genesis ، Optistruct [۳۱] و Hypersizer [۳۲] تنها گزینه قابل اعتنا محسوب می شوند.

باید توجه داشت این نرم افزارها متفاوت از انواع نرم افزارهای عمومی بهینه سازی کار می کنند. نرم افزارهای عمومی از حدود دهه شصت به بعد بصورت مجموعه ای از کدها ارائه شدند و توانایی اغلب آنها حل مسائل عمومی پژوهش عملیاتی (operation research) است اما آنچه در این بخش مد نظر است نرم افزارهای ویژه ای هستند که شامل هسته ای بهینه ساز با توانایی ویژه در حل مسائل پیچیده با حداقل تکرار می باشند. فضای ارتباطی گرافیکی برای تعریف هندسه مسأله، نحوه اعمال قیود و بارها و نیز نمایش خروجی از شاخصه های دیگر آنها است. همچنین امکان تعریف متغیرهای بسیار زیاد از توانایی آنها محسوب می شود.

#### ۴- سازه های کامپوزیتی در خودروها

در طی سالهای اخیر و به واسطه افزایش قیمت فرآورده های نفتی و الزامات زیست محیطی و نیز تغییر سلیقه مصرف کنندگان به سمت خودروهای کوچکتر، بهینه سازی وزنی و عملکردی سازه ها و قطعات خودرو به شدت مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این میان کاربرد کامپوزیتها به عنوان ماده جایگزین به دلیل خواص بسیار خوب مکانیکی همیشه مد نظر بوده است. در دهه شصت و هفتاد میلادی این تلاشها بیشتر در قالب گزارشهای امکان سنجی کلی بوده و کمتر به قطعه خاصی پرداخته شده است. شیمامورا (Shimamura) [۳۳] جنبه های استفاده از مواد مرکب با الیاف شیشه را در سازه های خودرو بررسی نمود. زاران (Dharan) [۳۴] نیز بصورت کلی همین مطالعه را به چاپ رساند.

در طی سالهای بعد به تدریج قطعات خاصی مورد توجه بیشتری واقع گردید. داورتی (Daugherty) [۳۵] قابلیت استفاده فنرهای تخت کامپوزیتی را در خودروهای سنگین مورد بررسی قرار داد. گاردانهای کامپوزیتی هم توسط هابرمایر و رویگ (Reugg & Habermeier) [۳۶] معرفی شد؛ اما مهمتر آنکه طی پانزده سال اخیر علاوه بر رشد قابل توجه تعداد مقالات ارائه شده در این زمینه، پروسه بهینه سازی هم مورد توجه قرار گرفت که در ادامه به چند نمونه از آنها اشاره خواهد شد. همانطور که اشاره شد عمده این بهینه سازی ها به هدف کاهش وزن انجام گرفته است هرچند که بهینه سازی آئرودینامیکی شکل سازه های بدنه نیز چه در قالب طراحی مجدد بر اساس سس و خطا و چه انجام پروسه واقعی بهینه سازی موضوع تعداد زیادی از مقالات واقع گردیده است.

کواک و دیگران (Kwak et al.) [۳۷] طراحی بهینه کاپوت کامپوزیتی یکپارچه دارای اجزای تقویت کننده را با استفاده از تحلیل صلبیت انجام دادند. در این تحقیق ضخامت اجزاء مختلف بهینه شده تا وزن و هزینه ساخت، نسبت به نمونه دو تکه فولادی کاهش یابد که در نتیجه آن ۳۷٪ کاهش وزن ضمن حفظ مقدار صلبیت قبلی گزارش داده شده است.

باتکین (Botkin) [۳۸] مدلسازی و طراحی بهینه سقف کامپوزیتی کربنی را ارائه نمود. وی مدل پوسته ای سقف و

مدل تیر بدنه را باهم ترکیب نمود و عملاً روی کل سازه ساده شده خودرو، بهینه سازی را اعمال کرد. در پایان، سقف طراحی شده برای یک نمونه خودرو سواری، ۷۱٪ نسبت به نمونه فولادی سبکتر شده بود.

راستوگی (Rastogi) [۳۹] گاردان کامپوزیتی را مد نظر قرار داد و با استفاده از نرم افزار Genesis، نحوه چیدمان الیاف را هم برای ساختار لوله ای خود گاردان و هم برای اتصالات آن بهینه نمود تا وزن گاردان با حفظ محدودیتهای عملکردی کمینه شود. وی در مقاله ای دیگر برای یک کامیونت پیکاپ دارای شاسی فلزی، شاسی کاملاً کامپوزیتی طراحی نمود و باز هم از همان نرم افزار قدرتمند استفاده نمود [۴۰]. مقالات دیگری هم به ساختارهای پیچیده ای نظیر بدنه و شاسی پرداخته اند و حتی بهینه سازیهای چند هدفه روی آنها انجام داده اند. به لحاظ پرداختن دقیقتر روی یک نمونه از این قطعات، فنرهای تخت انتخاب شده اند که در طی بخش آینده به آن پرداخته خواهد شد.

#### ۵- فنرهای تخت کامپوزیتی

فنرهای تخت از جمله قطعات سیستم تعلیق عقب و ندرتاً جلو بسیاری از خودروها بویژه خودروهای سنگین محسوب می شوند. فنرهای تخت در دسته بندی کلی و در کنار قطعاتی چون مجموعه چرخ و اکسلها اجزاء unsprung خودروها را شامل می شوند؛ اجزایی که وزن آنها به سیستم تعلیق خودرو منتقل نمی شود. با توجه به اهمیت کاهش وزن این اجزا در کم کردن وزن کلی خودرو و نیز بهبود ویژگیهای کنترلی، حرکتی و خوش سواری آن، کامپوزیتی کردن فنرهای تخت که ۱۰ تا ۲۰ درصد وزن این گروه از اجزاء را دارا می باشند به عنوان رهیافتی مناسب شناخته شده است.

این امر از ابتدای دهه شصت و بصورت گزارش، امکان سنجی و ساخت نمونه در کمپانی های خودروساز مطرح گردید. در این راستا می توان به تلاشهای کمپانی GM در سالهای ۱۹۶۳ تا ۱۹۶۷ اشاره کرد. اغلب این تلاشها بدلیل مشکلات بازاریابی با شکست مواجه شدند اما در موج دوم که از بحران نفتی دهه هفتاد و با سیری صعودی تا اوایل دهه نود ادامه یافت نمونه هایی در ابعاد تجاری چند صد

هزاری برای خودروهای سواری چون Corvette مدل ۱۹۸۱ یا گروه خودروهای GM-10 سالهای ۸۹ و ۹۰ ساخته شدند. در سالهای اخیر و پس از اندکی رخوت، استفاده تجاری از فنرهای کامپوزیتی در خودروهای سنگین و نیمه سنگین نیز مورد توجه قرار گرفته است؛ اما از بعد آکادمیک ظاهراً تا قبل از ابتدای دهه هشتاد مقاله علمی در این زمینه ارائه نشده است. در یکی از اولین این مقالات که پیشتر نیز به آن اشاره شد داورتی (Daugherty) کاربرد فنرهای تخت کامپوزیتی را در خودروهای سنگین بررسی نموده است [۳۵]. یک سال بعد از آن تانابه و دیگران (Tanabe et al.) [۴۱] چنین بررسی را بر اساس کامپوزیتهای کربنی- فایبرگلاسی انجام دادند. کیم و یو (Yu & Kim) [۴۲] در سال ۱۹۸۸ طرح فنرهای از دو سو باریک شده فایبر گلاسی را معرفی نمودند که اولین قدم در بهینه سازی شکل این فنرها محسوب می گردد هر چند که تا چند سال بعد از آن مقاله شاخصی مستقیماً به بهینه سازی انواع کامپوزیتی آن پرداخته است و تنها به بهینه سازی وزن و شکل نوع فولادی این فنرها توسط لیو و چادا (Liu & Chadda) [۴۳] می توان اشاره نمود. اما در مورد مقوله بهینه سازی فنرهای تخت کامپوزیتی همراه با بحث طراحی آنها که عمده‌تاً در قالب کامپوزیتی کردن نمونه موجود فولادی انجام گرفته است می توان به ساناکتر و گراتون (Sancakter & Gratton) [۴۴] اشاره کرد که در آن این بحث، به هدف طراحی نمونه ای برای سیستم تعلیق جلو خودروبی خورشیدی مطرح گردیده است. آنها با ساخت و تست نمونه ای واقعی، وضعیت بارگذاری روی فنر را بررسی کرده و پیش فرض منطقی غالب بودن اثر خمشی را تأیید نمودند. آنها همچنین با تغییر گام به گام فنر از فرم با اضلاع راست به سمت فرم بیضوی و اعمال ضرایب تصحیح طراحی و چک کردن نتایج به کمک یک کد اجزاء محدود، پروسه بهینه سازی را با تابع هدف وزن، متغیرهای اصلی عرض و طول فنر، متغیر وابسته ضخامت پروفیل و اعمال حداکثر خیز و حداکثر تنش مجاز به عنوان محدودیتها به انجام رساندند. شکل نهایی پروفیل بدست آمده دارای ضخامت بیشتر در وسط و ضخامت کمتری در دو انتها بود. راجندران و همکارش ویدجاریانگان دو محقق هندی بودند

(Rajendran & Vijayarangan) [۴۵] که پروسه بهینه سازی این فنرها را به کمک الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار دادند. قبل از توضیح بیشتر راجع به این مقاله لازم است پروسه مشترک انتخاب پارامترهای هندسی این فنرها تبیین گردد. سه متغیر اصلی هندسی شامل طول، عرض و ضخامت فنر می باشند که می توانند ثابت یا متغیر فرض شوند. در مقاله اشاره شده قبلی طول و عرض ثابت فرض شده و ضخامت بهینه گردیده و در مقاله راجندران و همکارش، سطح مقطع و طول بدلیل الزامات ساخت ثابت در نظر گرفته شده و نتیجه تحلیل، عرض و ضخامت در میانه فنر می باشد (شکل (۴)). نتیجه نهایی این مقاله که در جدول (۱) منعکس گردیده کاهش وزنی را از ۹/۲۸ کیلوگرم در نمونه فولادی به ۲/۲۶ کیلوگرم در نمونه کامپوزیتی نشان می دهد و حال آنکه در همین مرجع، بکارگیری روش مشابه بهینه سازی منجر به کاهش تنها ۰/۷ کیلوگرمی در صورت حفظ فولاد به عنوان ماده طراحی گردیده است. آنچه در این تحقیق به آن پرداخته نشده استفاده از کد اجزاء محدود برای تحلیل مدل ساده نشده برای چک کردن نتایج می باشد ضمن اینکه روابط مقاومت مصالحی بکار گرفته شده چندان جامع نیستند. در مقاله الکورشی (Al-Qureshi) [۴۶] بیشتر به جنبه های ساخت پرداخته شده بگونه ایکه فنر تخت نوعی جیب با نمونه فایبرگلاسی جایگزین و تست شده است. نتایج وی حکایت از کاهش قابل توجه وزن و نیز ارضاء صلبیت و خواص خستگی مورد نظر دارد. نمونه فنر وی دارای عرض ثابت بوده و با دادن قوسی بیضوی به پروفیل ضخامت، به حالت مطلوبی از توزیع تنش دست یافته است. اما یکی از کاملترین مراجع در این زمینه مقاله دکتر شکرئیه و همکارش (Shokrieh & Rezaei) [۴۷] می باشد. وی که در این مقاله از نرم افزار Ansys 5.4 و قابلیت آن در تحلیل و بهینه سازی همزمان سود برده است ابتدا نمونه واقعی فنر چهار برگی فولادی خودروبی معمولی را مدل نموده و پس از چک کردن صحت مدل خود با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی و بر اساس همان مدل، فنری یکپارچه با الیاف شیشه و رزین اپوکسی فرض نموده است. سپس با هدف کاهش وزن و با رعایت محدودیت معیار تنش Tsai-Wu و نیز تغییر مکان حداکثر، شکل تغییرات

2. Callahan, K. J., and Weeks, G. E., "Optimum design of composite laminates using genetic algorithms," *Composite Engineering*, Vol. 2, No. 3, 1992, pp. 149-160.
3. Goto, A., and Yokoyama, A., "Optimum design of composites with functional properties by genetic algorithm," *Proceedings of second joint Canada-Japan workshop on composites*, Montreal, 1998, pp. 235-240.
4. Gurdal, Z., Haftka, R. T., and Hajela, P., *Design and optimization of laminated composite structures*, John Wiley and Sons, New York, 1998
5. Kogiso, N., Shao, S., and Morutsu, Y., "Reliability-based optimum design of symmetric laminated plate subject to buckling," *Structural Optimization*, Vol. 14, 1997, pp. 184-192.
6. Le Riche, R., and Gaudin, J., "Design of dimensionally stable composites by evolutionary optimization," *Composite Structures*, Vol. 41, 1998, pp. 97-111.
7. Qu, X., Venkataraman, S., Haftka, R. T., and Johnson, T. F., "Reliability, weight and cost tradeoffs in the design composite laminates for cryogenic environments," *AIAA*, 2001, pp. 1052-1066.
8. Shin, D. K., Gurdal, Z., and Griffin, O. H., "Minimum weight design of laminated composite plates for postbuckling performance," *Applied Mechanics Review*, Vol. 44, No. 11, Part 2, 1991, pp. S219-S231.
9. Hammer, V. B., "Optimization of fibrous laminates undergoing progressive damage," *Int'l Journal for Numerical methods in Engineering*, Vol. 48, 2000, pp. 1265-1284.
10. Stroud, J. W., Agranoff, N., "Minimum mass design of filamentary composite panels under combined loads: design procedure based on simplified equations," *NASA-TN-D-8257*, Washington, D.C., 1976
11. Schmit, L. A., and Miura, H., "A new

بهینه پروفیل فنر بدست آمده است. نتایج آنها فنری است که عرض آن از مرکز به سمت دو چشم فنر بصورت هذلولوی افزایش و همزمان ضخامت بصورت خطی کاهش می یابد. این نتایج که با تقسیم فنر به ۱۰ جزء مساوی در جهت طولی حاصل شده حدود ۸۰٪ کاهش وزن، کاهش چشمگیر مقادیر تنش و افزایش فرکانسهای طبیعی را نسبت به نوع فولادی نشان می دهند.

## ۶- نتیجه گیری و پیشنهاد

همانگونه که گذشت مقوله بهینه سازی سازه های کامپوزیتی عرصه ای وسیع برای کار آزمایشی روشهای بهینه سازی مختلف و نیز بررسی وضعیتهای متفاوتی از تحلیل و مدلسازی آنهاست. از میان سازه های مختلف، سازه های بکار رفته در خودرو و نیز سازه های هوایی بیشتر مورد نظر محققان بوده اند. از جمع سازه های مناسب سیستم تعلیق، شاسی و بدنه برای کامپوزیتی شدن، فنرهای تخت بدلیل سادگی نسبی هندسی و در عین حال فرآیند ساخت نه چندان پیچیده و امکان محتمل تر حصول به نتیجه مطلوب، مورد توجه واقع شده اند. علیرغم تنوع نسبی مقالات ارائه شده که به چند نمونه از آنها پرداخته شد موارد زیر می تواند جایگاه تحقیقی جدیدی فراهم آورد:

- ۱- فنرهای هیبرید کامپوزیتی - فولادی
- ۲- بررسی پدیده *contact* در صورت بکارگیری فنرهای چند برگی و نقش آن در پروسه طراحی و بهینه سازی
- ۳- در نظر گرفتن اثر *large deformation* و نقش آن در همگرایی پروسه بهینه سازی
- ۴- انجام پروسه بهینه سازی جامع با توجه به تمام مفروضات هندسی ممکن و مقایسه نتایج
- ۵- بررسی امکان بکارگیری ساختارهای ساندویچی
- ۶- بررسی انواع مختلف فنرهای تخت جهت کاربرد در خودروهای نوین از جمله خودروهای الکتریکی و خورشیدی

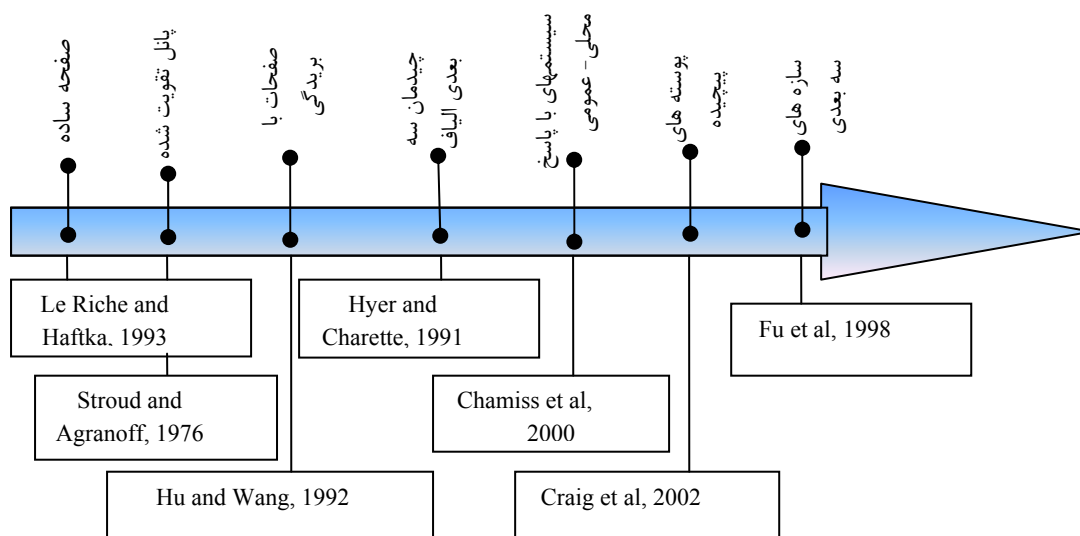
## مراجع

1. Venkataraman, S., Haftka, R. T., "Structural optimization: What has Moore's law done for us?" *AIAA*, 2002, pp. 1342-1357

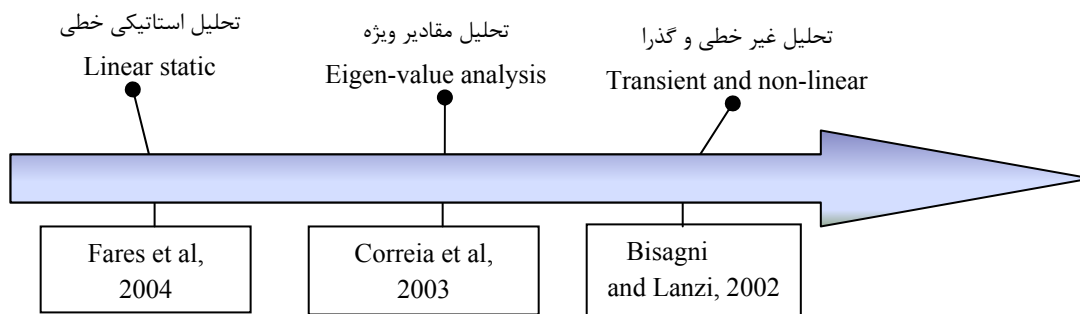


- stiffened panels using neural networks,” *Composite Structures*, Vol. 58, 2003, pp. 237-247.
23. Lanzi, L., Castelletti, L. M. L., and Anghileri, M., “Multi-objective optimization of composite absorber shape under crashworthiness requirements,” *Composite Structures*, Vol. 65, 2004, pp. 433-441.
  24. Schmit, L. A., and Farshi, B., “Optimum design of laminated fiber composite plates,” *International journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 11, 1977, pp. 623-640.
  25. Park, C. H., Lee, W. I., Han, W. S., and Vautrin, A., “Simultaneous optimization of composite structures considering mechanical performance and manufacturing cost,” *Composite Structures*, Vol. 65, 2004, pp. 117-127.
  26. Wang, K., Kelly, D., and Dutton, S., “Multi-objective optimization of composite aerospace structures,” *Composite Structures*, Vol. 57, 2002, pp. 141-148.
  27. Spallino, R., and Rizzo, S., “Multi-objective discrete optimization of laminated structures,” *Mechanics Research Communications*, Vol. 29, 2002, pp. 17-25.
  28. Yang, L., and Ma, Z. K., “Optimum design based on reliability for a composite structural system,” *Computers and Structures*, Vol. 36, No. 5, 1990, pp. 785-790.
  29. Lee, H., Jiang, K. and Li, K., “Optimizing parameters of CVI process for manufacturing carbon-carbon composites by genetic algorithms,” *Materials Letters*, Vol. 57, 2003, pp. 2366-2370.
  30. Muc, A., and Gurba, W., “Genetic algorithms and finite element analysis in optimization of composite structures,” *Composite Structures*, Vol. 54, 2001, pp. 275-281.
  31. Optistruct Ver.7, Altair Engineering Inc.
  32. Hypersizer Pro, Collier R&D Co.
  12. Lecina, A., and Petiau, Advances in optimal design with composite materials, NATO ASI series, Vol. F27, Springer-Verlag, Heidelberg, 1987, pp. 943-953.
  13. Genesis Ver. 7, Vanderplaats R&D Inc.
  14. Vanderplaats, G. N., “Very large scale optimization,” NASA contractor report, 2002.
  15. Khot, N. S., Venkaya, V. B., and Berke, L., “Optimum design of composite structures with stress and displacement constraints,” *AIAA*, Vol. 14, No. 2, 1976, pp. 131-132.
  16. Gurdal, Z., and Haftka, R. T., “Automated design of composite plates for improved damage tolerance,” *Composite Materials*, 1988, pp. 5-22.
  17. Prochazka, P. P., “Deterministic and stochastic optimization of composite cylindrical laminates,” *International journal of solids and structures*, Vol. 40, 2003, pp. 7109-7127.
  18. Martin, P. M. J. W., “Computer-automated optimal design of laminates,” *Lecture notes in engineering*, Springer-Verlag, 1988.
  19. Fares, M. E., Youssif, Y. G., Alamir, A. E., “Design and control optimization of composite laminated truncated conical shells for minimum dynamic response including transverse shear deformation,” *Composite Structures*, Vol. 64, pp. 139-150.
  20. Mesquita, L., and Kamat, M. P., “Optimization of stiffened laminated composite plates with frequency constraints,” *Engineering Optimization*, Vol. 11, 1987, pp. 77-88.
  21. Franco Correia, V. M., Mota Soares, C. M., and Mota Soares, C. A., “Buckling optimization of composite laminated adaptive structures,” *Composite Structures*, Vol. 62, 2003, pp. 315-321.
  22. Bissagni, C., and Lanzi, L., “Postbuckling optimization of composite

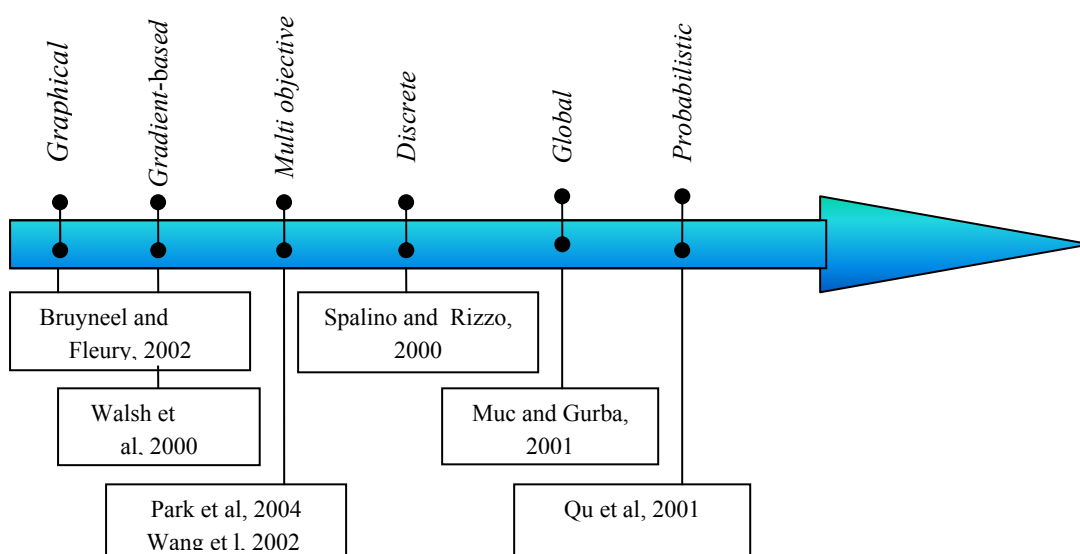
- truck chassis structure,” SAE 2004-01-1519.
41. Tanabe, K., Seini, T., and Kajio, Y., “Characteristics of carbon/glass fiber reinforced plastic leaf spring,” SAE820403, 1982, pp. 1628-1634.
  42. Yu, W. J., Kim, H. C., “Double tapered FRP beam for automobile suspension leaf spring,” Composite Structures, 1988, pp. 279-300.
  43. Liu, X., and Chadda, Y., “Automated optimal design of a leaf spring,” SAE933044, 1993, pp. 993-998.
  44. Sancakter, E., Gratton, M., “Design, analysis and optimization of composite leaf springs for light vehicle applications,” Composite Structures, Vol. 44, 1999, pp. 195-204.
  45. Rajendran, I., Vijayarangan, S., “Optimal design of a composite leaf spring using genetic algorithms,” Computers & Structures, Vol. 79, 2001, pp. 1121-1129.
  46. Al-Qureshi, H. A., “Automobile leaf springs from composite materials,” Material Processing Technology, Vol. 118, 2001, pp. 58-61.
  47. Shokrieh, M., Rezaei, D., “Analysis and optimization of a composite leaf spring,” Composite Structures, Vol. 60, 2003, pp. 317-325.
  33. Shimamura, S., “Some problems arising in the structural application of FRP to automobile,” Annual technical conference of reinforced plastics and composites, 1970, pp. 43-50.
  34. Dharan, C. K., “Composite materials design and process for automotive applications,” The ASME winter annual meeting, San Francisco, 1978, pp. 19-30.
  35. Daugherty, R. L., “Composite leaf springs in heavy truck applications,” Composite Materials, 1981, pp. 529-538.
  36. Reugg, C., and Habermeier, J., “Composite propeller shafts, design and optimization,” Automotive Engineer, July 1981, pp. 13-15.
  37. Kwak, D., Jeong, J., Cheon, J., and Im, Y., “Optimal design of composite hood with reinforcing ribs through stiffness analysis,” Composite Structures, Vol. 38, 1997, pp. 351-359.
  38. Botkin, M. E., “Modeling and optimal design of a fiber reinforced composite automotive roof,” Engineering with Computers, Vol. 16, 2000, pp. 16-23.
  39. Rastogi, N., “Design of composite drive shafts for automotive applications,” SAE International, 2004 -01-485.
  40. Rastogi, N., “Stress analysis and lay-up optimization of an all-composite pick-up



شکل ۱- دسته بندی مدل‌های معمول کامپوزیتی بر اساس مقدار پیچیدگی



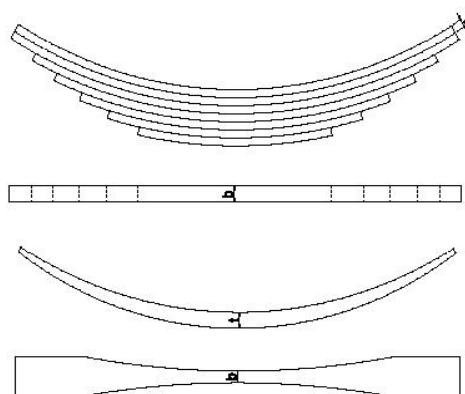
شکل ۲- دسته بندی آنالیز سازه های کامپوزیتی بر حسب پیچیدگی



شکل ۳- دسته بندی سطوح بهینه سازی بر حسب پیچیدگی

جدول ۱- مقایسه عملکرد دو نوع فنر تخت بهین

Parameters	Steel spring	Composite spring
Width (mm)	34.25 (each leaf)	28.475
Thickness (mm)	6.55 (each leaf)	25.015
Maximum stress (MPa)	799.52	462.17
Maximum deflection(mm)	144.10	141.03
Estimated weight (Kg)	8.54	2.26



شکل ۴- فنر فولادی در بالا و فنر کامپوزیتی بهینه شده در پایین (هر دو از دو نما)