

یادداشت تحقیقاتی:

بهینه‌سازی ستون میانی خودرو (B-pillar) از جنس کامپوزیت جهت دستیابی به چیدمان مناسب لایه‌ها در تست برخورد از کنار به کمک الگوریتم ژنتیک

محمدحسن شجاعی فرد^۱، روح‌الله طالبی توتی^{۲*}، مرتضی میرباقری^۳ و منصور ترابی^۴

^۱استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک

^۲استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک

^۳دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی خودرو

^۴دانشجو کارشناسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی خودرو

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۳/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۲۴

چکیده

در مقاله حاضر به منظور بهبود رفتار خودرو سمند در برخورد از کنار، بخش داخلی ستون میانی خودرو سمند با استفاده از کامپوزیت‌های لایه‌ای ساخته شده از کربن - اپوکسی مدل شده است و سپس شبیه سازی تست برخورد از کنار بر اساس استاندارد FMVSS 214 از طریق آنالیز اجزای محدود صورت گرفته است. از آنجایی که تغییر در چیدمان لایه‌ها سبب تغییر مقاومت سازه در برابر برخورد می‌شود، با استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک نتایج بهینه برای کمترین میزان نفوذ ستون ارائه گردیده است. در راستای آموزش شبکه‌های عصبی برای شناسایی رفتار سازه در برخورد، از تکنیک‌های طراحی آزمایشات تاگوچی و هم‌رسلی برای دستیابی به پوشش یکنواختی از فضای طراحی، استفاده شده است. پس از بررسی کامل صحت آزمایشات و شناسای رفتار پدیده به کمک شبکه‌های عصبی با استفاده از نتایج مدل‌سازی و انجام فرآیند بهینه‌سازی، نتایج بیان‌گر آن بود که بهترین رفتار سازه در این برخورد در محدوده چیدمان ۴۰ تا ۵۰ درجه اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب چیدمانی ارائه شد که به ازای آن کمینه‌ی جابجایی در سازه و در نتیجه بیشترین محافظت از محفظه سرنشینان صورت می‌گیرد که از مهمترین چالش‌ها در برخورد از کنار می‌باشد.

کلمات کلیدی: ستون میانی؛ کامپوزیت لایه‌ای؛ تاگوچی و هم‌رسلی؛ شبکه‌های عصبی؛ الگوریتم ژنتیک.

Technical Note:

Design optimization of a vehicle B-pillar made of laminated composite subjected to side impact using Genetic Algorithm

M.H. Shojaeefard¹, R. Talebitooti^{2*}, M. Mirbagheri³ and M. Torabi⁴

¹ Prof. Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

² Assist. Prof., Mech. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

³ M.Sc. Student, Automotive Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

⁴ B.Sc. Student, Automotive Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

In present paper, The B-pillar of the national car, Samand, is modeled with laminated Carbon-Epoxy composite to improve the side crash behavior. Then, a side crash simulation is applied with the aid of finite element simulation according to FMVSS 214. As the change in stacking sequence of the lamina may lead into strength improvement, the results are optimized for the minimum of intrusion using neural networks and genetic algorithm. In order to train neural networks for identification of B-pillar crash behavior, experimental design techniques such as Taguchi and Hammersley has been utilized. After verifying modeling results and using them to identify structure behavior through neural networks and conducting optimization, results indicated that proper stacking sequences are occurred in a band of [40°,50°] layer orientations with the minimum of intrusion. Therefore, the intrusion of passenger cabin, which is of high important parameters in side crash, is properly enhanced

Keywords: B-pillar; Laminate composite; Taguchi and hammersley; Neural networks; Genetic algorithm.

۱- مقدمه

با افزایش تمرکز بر ایمنی در وسایل نقلیه‌ی جدید، لازم است که تست‌های جدید با شرایط و استانداردهای به‌روز برای اتومبیل‌ها وضع گردد. توانایی بهتر خودرو در برخورد، مستلزم داشتن بدنه‌ای با استحکام بالاتر و مقاومت بیشتر و در نتیجه داشتن ضخامت ورق بالاتری است که این امر سبب بالا رفتن جرم خودرو و در نتیجه مصرف سوخت بالاتر آن می‌شود. این امر بر اساس ملاحظات زیست محیطی و همچنین اقتصاد سوخت امری نامطلوب بوده در نتیجه این ملاحظات امروزه به دنبال تولید خودروهایی با وزن کمتر و همچنین میزان آسیب کم به هنگام برخورد می‌باشند. استفاده از مواد کامپوزیت در سازه بدنه خودرو از راه‌حل‌های خوب این مسئله بوده و علاوه بر افزایش میزان استحکام، می‌تواند کاهش وزن نیز به همراه داشته باشد. در دنیای امروز در هر لحظه تعداد زیادی برخورد اتفاق می‌افتد که بخش اعظم آنها در دسته تصادفات شدید قرار می‌گیرند. از میان انواع برخورد، برخورد از کنار، دومین برخورد به لحاظ کمی پس از برخورد از جلو می‌باشد. از طرفی از آن جهت که در تصادف از کنار فضای لازم برای جذب انرژی بسیار کم است میزان صدمات وارد به سرنشینان در این تصادف نسبت به تصادف از جلو بسیار بالاتر می‌باشد لذا بررسی راهکارهایی برای افزایش محافظت در برخورد از کنار از جمله‌ی مهمترین موضوعات در طراحی بدنه خودروها می‌باشد [۱].

در این ارتباط، تحقیقات و مقالات علمی در دو دسته طی سال‌های اخیر ارائه شده است که دسته‌ی نخست به استفاده از کامپوزیت‌ها در ستون میانی خودرو پرداخته‌اند و دسته‌ی دیگر مقالاتی در ارتباط با بهینه‌سازی کامپوزیت‌های لایه‌ای در سازه‌های مختلف می‌باشد. استفاده از کامپوزیت‌های لایه‌ای در ستون میانی خودرو برای کاهش صدمات سرنشینان برای اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط شانتوش ردی^۱ [۱] صورت گرفته است. وی مدل‌سازی و تحلیل ستون میانی یک خودرو سدان را در تصادف از کنار با استفاده از دو نوع کامپوزیت با الیاف کربن و شیشه به انجام رساند و بر اساس نتایج آن یک چیدمان بالانس بهینه را برای مدل

انتخابی خود ارائه کرد که دارای نفوذ^۲ کمتر نسبت به ستون فولادی می‌باشد. بر اساس نتایج ردی استفاده از چیدمان لایه مناسب می‌تواند سبب بهبود خواص مکانیکی سازه در مقایسه با فولاد گردد.

در همین زمینه شرکت فولکس واگن^۳ در پروژه سال ۲۰۱۰ برای خودرو آ-دی، ای-۸ در ستون میانی از یک ماده کامپوزیتی سه لایه استفاده کرد که شامل یک لایه فولاد تقویت شده، یک لایه از آلومینیوم در قسمت میانی ستون و نهایتاً بخش اصلی ستون اصلی از جنس آلومینیوم می‌باشد. در این تحقیق ستون شرح داده شده در تست‌های مختلف کشش و فشار و ضربه، جهت بررسی استحکام تحت آزمون قرار گرفته است تا با ایجاد وزن کمتر و استحکام بالاتر در تحمل بارهای اعمالی ضخامت‌ها و نحوه اتصال اجزا نیز بهینه گردد. بر اساس نتایج ارائه شده در این مقاله با کاهش ۴۰ درصدی وزن برای ستون اصلی نتایج بهتری در جذب انرژی و جابجایی‌های ناشی از برخورد بدست آمده‌است [۲].

در سال ۲۰۱۰ غریبی و همکاران [۳] با استفاده از کامپوزیت لایه‌ای در پوسته یک سیلندر استوانه‌ای و بررسی چیدمان بهینه لایه‌ها، مقاوم‌ترین حالت ممکن برای سیلندر را در برابر بارهای ارتعاشی و کماتشی گزارش کرده‌اند و زادروکو ونوسس^۴ [۴] در سال ۲۰۰۰ با بررسی تحلیلی بر روی یک ورق کامپوزیتی با لایه چینی متقارن α و α -نمودارهای مختلفی برای تغییرات مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، تنش‌های عمودی و برشی بر حسب زوایای مختلف در محدوده صفر تا ۹۰ درجه ارائه کرده است. همچنین در سال ۲۰۱۱ شمس و همکاران [۵] به بررسی چیدمان مناسب برای برخورد مرکزی یک پوسته مخروطی پرداختند. آن‌ها با بررسی یک چیدمان دو لایه با زوایای قرینه و فاصله چیدمان ۱۵ درجه در محدوده صفر تا ۹۰ درجه، پاسخ بهینه را از نتایج نرم‌افزاری آزمایشات انجام شده برای بهترین جابجایی و بهترین جذب انرژی به طور جداگانه ارائه نموده‌اند.

بر اساس مطالعات بالا و مطالعات دیگر در زمینه بررسی کامپوزیت‌های لایه‌ای مقاله حاضر بر اساس استاندارد برخورد

² Intrusion

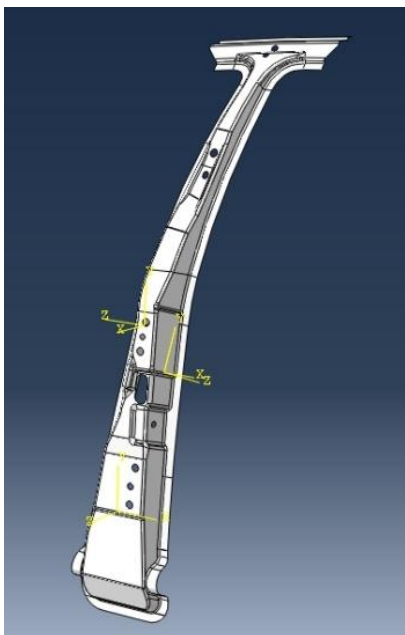
³ Volkswagen

⁴ Audi A-8

⁵ Zdravko Venucc

¹ Santosh Reddy

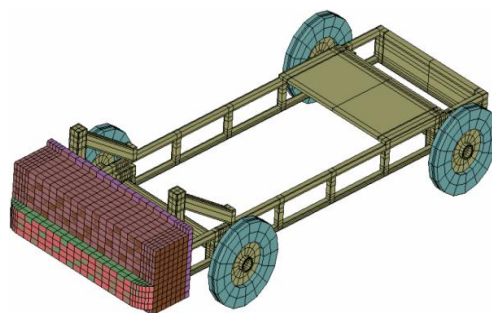
جهت دستیابی به نتایج کاربردی در مقاله حاضر از بخش درونی ستون میانی خودرو سمند استفاده می‌شود. مدل ستون میانی از آرشیو شرکت ایران خودرو گرفته شده و با حذف برخی پیچیدگی‌های سازه از قبیل فیلته‌ها و برخی سوراخ‌ها، برای تحلیل آماده شده است (شکل ۲).



شکل ۲- بخش درونی ستون میانی خودرو سمند ساخت شرکت ایران خودرو

ایجاد تغییر در جنس قطعه و استفاده از کامپوزیت‌ها بر اساس جدول ۱ سبب کاهش ۷۲ درصدی وزن سازه در این مسئله شده است. قطعه مورد نظر در خودرو سمند از جنس فولاد با چگالی $7/8$ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شده و ضخامتی در حدود ۱ میلی‌متر ($0/8$ میلی‌متر) دارد. مساحت کل قطعه $0/302$ متر مربع می‌باشد و لذا هر بخش داخلی ستون میانی خودرو سمند $1/88$ کیلوگرم وزن دارد. استفاده از ماده کامپوزیتی گرافیت - اپوکسی سختی بالا - GY-70 - HYE 1534 با چگالی $1/7$ گرم بر سانتی‌متر مکعب و قرار دادن ۸ لایه از آنها با ضخامت ۱۲۵ میکرومتر و تولید ضخامت نهایی ۱ میلی‌متر برای ستون کامپوزیتی سبب می‌شود که وزن ستون میانی به $0/513$ کیلوگرم کاهش یابد و این امر در مجموع یک کیلوگرم از وزن خودرو می‌کاهد.

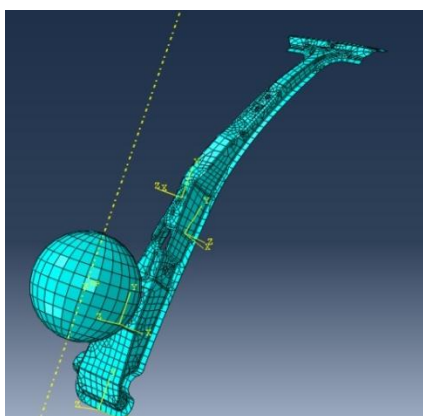
از کنار، ستون میانی خودرو سمند را با مدلسازی کامپوزیت لایه‌ای مورد بررسی قرار داده است تا در ادامه بررسی‌ها روشی برای رسیدن به چیدمان بهینه لایه‌ها ارایه نماید که در آن زوایای الیاف هر لایه به صورت آزاد انتخاب گردد. در این مقاله، از استاندارد شماره ۲۱۴ ایمنی وسایل نقلیه فدرال (FMVSS) با موضوع محافظت سرنشینان در برخورد از کنار، در مدلسازی شرایط برخورد استفاده شده است. بر اساس آخرین اصلاحات این استاندارد، برخورد از کنار به وسیله‌ی ارابه شکل ۱ و با سرعت $33/5$ مایل بر ساعت (معادل $14/5$ متر بر ثانیه)، با زاویه 27 درجه با راستای عمود بر اتومبیل اتفاق می‌افتد [۶].



شکل ۱- ارابه تست برخورد دینامیکی و صفحه از جنس صفحات ساندویچی [۱]

در برخورد از کنار که از مرگبارترین تصادفات در سراسر جهان می‌باشد ستون میانی نقش مهمی در حفظ شکل محفظه سرنشینان دارد و لذا افزایش کارایی آن در برخورد از کنار در کنار پژوهش بر روی افزایش کارایی درب خودرو از مهمترین مسایل در برخورد از کنار می‌باشند. امروزه در صنعت خودروسازی ستون میانی خودرو از دو جزء اصلی تشکیل شده است که عبارتند از بخش بیرونی و بخش درونی که البته بین آنها معمولاً یک یا دو بخش تقویتی نیز جوش داده می‌شود که کارایی بهتری از سازه در برخورد از کنار دیده شود. امروزه هر دو بخش از فولاد بدنه ساخته می‌شود و بخش بیرونی با باقی قسمت‌های کناری خودرو یک تکه از پرس بیرون می‌آید و امکان تغییر جنس ندارد. اما قسمت درونی این قابلیت را دارد که از جنسی متفاوت با جنس بدنه ساخته شود [۷].

شرایط ارایه شده در استاندارد FMVSS-214 که برای شرایط برخورد از کنار ارایه به اتومبیل کامل بیان شده است. مطابق با مرجع [۱] و از آنجایی که پژوهش حاضر افزایش کارایی یک جز را بررسی می‌کند، ضربه زننده در این تست گوی صلب با قطر ۳۰۰ میلی‌متر و جرم ۵/۱۲ کیلوگرم می‌باشد که با سرعت ۱۴/۵ متر بر ثانیه (۳۳/۵ مایل بر ساعت) بر نقطه میانی ستون و در فاصله ۳۳۰ میلی‌متر بالای خط پایینی ستون مطابق شکل ۴ برخورد خواهد کرد.



شکل ۴- مدل مش بندی شده ستون میانی در هنگام برخورد

تعداد و نوع المان‌های ستون میانی و گوی صلب در جدول ۳ ارایه شده است.

جدول ۳- مشخصات مش بندی ستون میانی و ضربه زننده

صلب	
shell-quad-dominated	نوع المان ستون
Rigid	نوع المان ضربه زننده
2977	تعداد المان ستون
1600	تعداد المان ضربه زننده

در ادامه‌ی روند مدلسازی ستون میانی آزمایشاتی برای شناخت چگونگی رفتار ستون برای زوایای الیاف مختلف، طراحی شده‌است. وجود بازه ۹۰- تا ۹۰ سبب شده است تا تنوع بالایی برای این منظور موجود باشد، لذا با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش تاگوچی و هم‌رسلی آزمایشاتی

جدول ۱- مقایسه وزن نهایی ستون میانی فولادی و ستون میانی کامپوزیتی بر اساس ضخامت و چگالی

	ستون فولادی	ستون کامپوزیتی
$\rho (\frac{g}{cm^3})$	۷/۸	۱/۷
t (mm)	۰/۸	۱
A (m ²)	۰/۳۰۲	۰/۳۰۲
Wt (Kg)	۱/۸۸	۰/۵۱۳

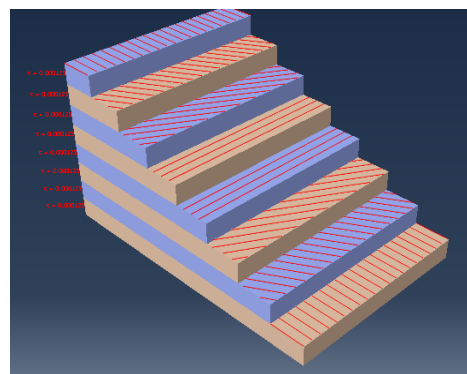
۲- مدلسازی شرایط برخورد

مراحل آماده سازی ستون میانی برای تست برخورد با گوی صلب براساس شرایط استاندارد FMVSS - 214 با انتقال ستون میانی شکل (۲) به درون محیط کاری نرم‌افزار ABAQUS به شکل یک قطعه از نوع Shell و به طور یک پارچه، آغاز می‌شود.

ماده‌ی مورد نظر برای مدلسازی ستون براساس جداول مرجع [۸] به صورت لمینیت^۱ و مطابق جدول ۲ از جنس کربن- اپوکسی تعریف گردیده و ۸ لایه هر کدام با ضخامت ۱۲۵ میکرون برای ستون ۸ در نظر گرفته شده است. نمونه‌ای از چیدمان لایه‌های کامپوزیتی در شکل ۳ به نمایش در آمده است [۹].

جدول ۲- خصوصیات ماده کربن- اپوکسی [۸ و ۱۰]

E_1 (Gpa)	E_2 (Gpa)	$G_{12} = G_{13} = G_{23}$ (Gpa)	ν_{12}
۲۹۰	۶/۹	۴/۸	۰/۲۵



شکل ۳- نمایی از چیدمان لایه ستون میانی به صورت ماکروسکوپی

^۱ Laminate

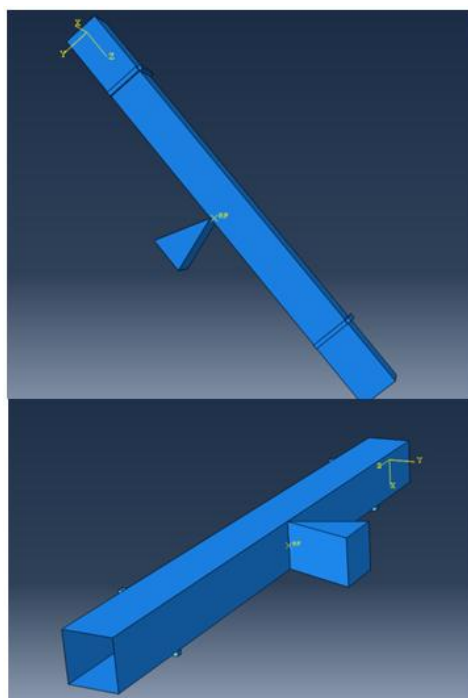
با فاصله ۱۸۰ میلی‌متر قرار گرفته است و با ضربه زننده صلبی مطابق شکل به جرم ۲۰ کیلوگرم با سرعت ۸ متر بر ثانیه در مدت ۸ میلی‌ثانیه برخورد می‌کند [۱۴]. خواص آلومینیوم و نیز مشخصات مش‌بندی در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۴ - خواص فیزیکی آلومینیوم برای مدل‌سازی تیر آلومینیومی

Tensile yeiled strength	Poisson Ratio	E	نام ماده
230 Mpa	0.33	80 Gpa	AL 6063-T3

جدول ۵ - مشخصات مش‌بندی تیر آلومینیومی و ضربه‌زننده صلب

Thin shell element	نوع المان تیر
Rigid	نوع المان ضربه‌زننده
4800	تعداد المان تیر آلومینیومی
500	تعداد المان ضربه‌زننده
2*2 mm	اندازه‌ی مش‌ها



شکل ۵ - تیر آلومینیومی مدل شده بر اساس آزمایشات

جنگ [۱۴]

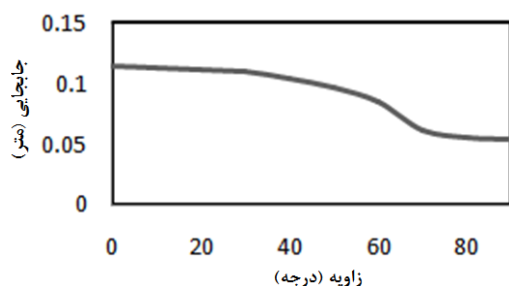
برای پوشش‌دهی یکنواخت محدوده‌ی ۹۰- تا ۹۰ درجه باشد طراحی شد. تاگوچی آزمایشات را با استفاده از جداولی معروف به "آرایه‌های ارتوگونال" طراحی می‌کند. در استفاده از آرایه‌های ارتوگونال تعداد متغیرها و تعداد سطح هر متغیر اهمیت دارد. بر اساس نتایج بدست آمده از مرجع [۱۱] آرایه‌ای برای ۸ سطح (۸ لایه کامپوزیت) و ۷ حالت تغییر استفاده شد. برای ایجاد تنها ۷ سطح، فاصله ۹۰- تا ۹۰ به ۷ زیربازه تقسیم شده و در هر زیربازه یک زاویه تصادفی اختیار می‌شود. تعداد آزمایشات طراحی شده توسط تاگوچی در این مسئله ۴۹ چیدمان بوده است که از تحلیل نرم‌افزاری این ۴۹ چیدمان در بخش بهینه‌سازی استفاده شده است. با توجه به کافی نبودن ۴۹ چیدمان تاگوچی برای پیش‌بینی رفتار ستون توسط شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک از دنباله هم‌رسانی برای تولید ۱۲۰ چیدمان کاملاً یکنواخت در محدوده صفر تا ۹۰ درجه استفاده شده است. همچنین با توجه به شرایط متقارن برخورد محدوده‌ی ۹۰- تا صفر نیز حذف گردیده است تا بررسی دقیق‌تری بر روی زوایا انجام گیرد و بتوان به نتایج بهتری در تشخیص چگونگی رفتار سازه به کمک شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک دست‌یافت [۱۲-۱۴].

۳- صحت سنجی مدل‌سازی

جهت صحت سنجی مراحل مختلف مدل‌سازی در این بخش اقداماتی از قبیل تست تیر آلومینیومی به منظور تعیین صحت مدل‌سازی شرایط برخورد از طریق مقایسه نتایج نرم‌افزار با نتایج تست عملی تیر آلومینیومی توسط سنونگ مینگ جنگ^۱ و همکاران، تست برخورد برای یک ورق ساده با برخورد کاملاً متقارن و برخورد ستون میانی در حالت‌های مختلف مثل استفاده از ماده همگن و غیر همگن و ... انجام گرفته است. نتایج این بخش برای شروع بهینه‌سازی نتایج آزمایشات ضروری می‌باشد.

به منظور بررسی صحت مدل‌سازی شرایط برخورد از قبیل تماس سطوح و ... از مدل‌سازی تیر آلومینیومی مطابق شکل ۵ و مقایسه نتایج آن با داده‌های تجربی استفاده گردیده است. این تیر دارای مقطعی مربع شکل با طول ضلع ۲۰ میلی‌متر و طول ۲۴۰ میلی‌متر که به صورت متقارن بر روی دو تکیه‌گاه

^۱ Seung Min Jang



شکل ۷ - نمودار بیشترین نفوذ ورق در برخورد متقارن برای چیدمان زوایای یکسان برای هر لایه

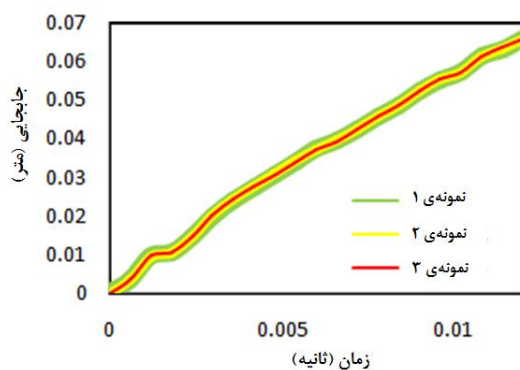
علاوه بر بررسی‌های صورت گرفته به منظور بررسی دقیق‌تر مدلسازی کامپوزیت لایه‌ای برای ستون میانی در این قسمت به بررسی رفتار مدل‌های لایه‌ای با چیدمان‌های شبه همگن و مدل‌های غیرلایه‌ای و کاملاً همگن پرداخته‌ایم. با این هدف مدل‌های زیر را در تست برخورد آزمایش کرده ایم.

۱- ستون میانی کامپوزیتی با چیدمان مشابه (همه لایه‌ها صفر درجه). (sample1 در شکل ۸)

۲- ستون میانی کامپوزیتی با چیدمان غیر یکسان نزدیک به صفر $[-1/0/1/0/-1/0/1/0]$ (sample2 در شکل ۸).

۳- ستون میانی از جنس کامپوزیت با مقطع همگن و ضخامت ۱ میلی‌متر. (sample3 در شکل ۸).

انطباق بسیار نزدیک سه منحنی در شکل ۸ نیز بار دیگر صحت مدلسازی‌های انجام گرفته در این مقاله را نشان می‌دهد.



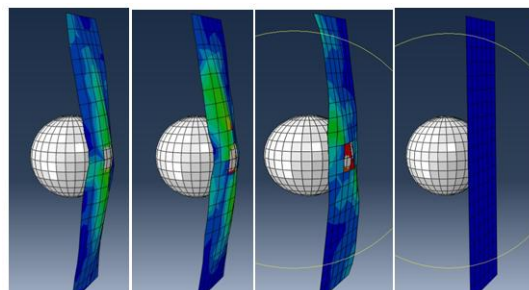
شکل ۸- منحنی جابجایی بر حسب زمان سه حالت ستون میانی

نتایج سئوینگ مین جنگ و همکارانش که به بررسی بیشترین میزان تغییر شکل آن پرداخته‌اند با نتایج تست مدل شده در نرم‌افزار در جدول ۶ مقایسه شده است. خطای کمتر از ۰/۲ درصد در این مدلسازی صحت روند مدلسازی در نرم‌افزار ABAQUS را نشان می‌دهد.

جدول ۶ - مقایسه نتایج تیر آلومینیومی مدلسازی شده با نتایج تجربی آزمایشات جنگ و همکاران [۱۴]

بیشترین میزان جابجایی پس از ۸ میلی ثانیه	آزمون
۱۰/۵۱	آزمون تجربی جنگ و همکاران
۱۰/۵۴	تیر مدلسازی شده در نرم‌افزار با شرایط مشابه آزمون تجربی

به‌منظور بررسی صحت مدلسازی کامپوزیت در نرم‌افزار نیز به بررسی برخورد ورق ساده در ابعاد تقریبی ستون و با برخورد متقارن مطابق شکل ۶ پرداخته‌ایم. چیدمان‌های متفاوت (شامل چیدمان‌های طراحی شده توسط دنباله هم‌مرسلی و ۱۰ چیدمان با زوایای یکسان ۹۰ و ۸۰ و ۷۰ و ۶۰ و ۵۰ و ۴۰ و ۳۰ و ۲۰ و ۱۰) با استفاده از نرم‌افزار مدلسازی شده است. در این نتایج سازه‌ی مدل‌شده رفتار منظم و پیوسته داشته و بهترین نتایج (مربوط به کمترین میزان نفوذ ورق) در زوایای صفر درجه برای تمام لایه‌ها و بدترین نتایج برای زوایای ۹۰ درجه بدست آمده است (مطابق تئوری مرجع [۸])، که این مشاهدات نشان از صحت مدلسازی لایه‌های کامپوزیتی دارد. نمودار شکل ۷ رفتار منظم و پیوسته‌ی این برخورد کاملاً متقارن را نمایش می‌دهد.



شکل ۶- برخورد گوی با ورق در زمان‌های ۰ و ۴ و ۸ و ۱۲ میلی ثانیه

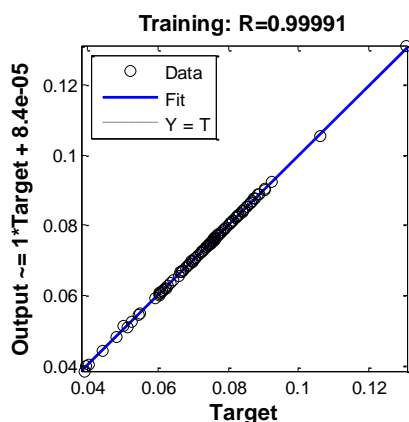
دارای بهترین نتایج می‌باشد و سرانجام کاهش تعداد لایه‌ها از ۸ لایه به ۴ لایه، البته در این حالت به منظور اجتناب از تغییر ضخامت، ضخامت هر لایه ۲ برابر قبل تعریف گردیده است.

همانطور که در جداول ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است تنها کاهش تعداد لایه‌ها به ۴ لایه و طراحی مجدد ۱۲۰ آزمایش سبب شده است تا شبکه عصبی به شناختی دقیق و درست از رفتار سازه دست یابد. در جدول ۹ که چیدمان پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی را برای ۳۰ آزمایش گزین شده از میان ۱۲۰ آزمایش هم‌رسلی نشان می‌دهد، میزان نفوذ ستون توسط شبکه عصبی $0/0802$ متر پیش‌بینی شده است در حالی که در میان آزمایشات میزان نفوذ $0/039$ متر نیز دیده شده است. به همین ترتیب در جدول ۱۰ نیز میزان نفوذ برای چیدمان پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی $0/041$ متر بوده است اما در میان ۳۰ تست با زوایایی در محدوده ۴۰ تا ۵۰ درجه میزان نفوذی در حدود $0/037$ متر نیز به چشم می‌خورد. بر خلاف داده‌های جدول‌های ۹ و ۱۰، در جدول ۱۱ که نتایج مربوط به بهینه‌سازی نتایج ۱۲۰ آزمایش هم‌رسلی با ۴ لایه را نشان می‌دهد، انطباق کاملی بین نتایج مدل‌سازی و پیش‌بینی شبکه عصبی دیده می‌شود.

جدول ۷- نتایج بهینه‌سازی بیشترین نفوذ چیدمان بهینه در آزمایشات تاگوچی برای ۸ لایه

چیدمان بهینه: [۱۹/۵۸ و ۹۰-۴۹ و ۴۵/۴۸ و ۴۵/۳۷ و ۳۱-۴۵ و ۴۶/۶۸ و ۸۶/۲۵]

میزان نفوذ پیش‌بینی شده شبکه عصبی	۰/۰۰۶۴ متر
میزان نفوذ ناشی از مدل‌سازی چیدمان	۰/۰۹ متر



۴- بهینه‌سازی نتایج

به منظور بهینه‌سازی نتایج از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. با طراحی چیدمان مختلف و استفاده از الگوریتم‌های شناسایی رفتار، برای رسیدن به بهترین نتایج و نیز بهترین شناخت از رفتار ستون تلاش شده است. از آن جایی که رابطه ریاضی معینی برای شرایط این برخورد موجود نیست، با استفاده از نتایج آزمایش‌های متعدد مدل‌سازی و استفاده از آن برای آموزش شبکه‌های عصبی سعی شده است تا رفتار سازه ستون در شرایط برخورد شناسایی گردد. به منظور طراحی آزمایشاتی که بتوان بر اساس آن رفتار ماده را شناسایی کرد از تکنیک‌های طراحی آزمایش تاگوچی و استفاده از دنباله‌ی هم‌رسلی استفاده شد. در این بررسی‌ها رفتار بهینه‌ی سازه (چیدمانی که به ازای آن کمترین میزان نفوذ در سازه نتیجه می‌شود) با تعداد ۴ و ۸ لایه جست‌وجو شد. شکل‌های ۹ و ۱۰ نمونه‌ای از نتایج مربوط به بهینه‌سازی با داده‌های حاصل از طراحی آزمایش به روش هم‌رسلی می‌باشند.

جداول ۷ و ۸ نشان دهنده عدم تطبیق مدل بهینه پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک با نتایج مدل‌سازی می‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۷ میزان بیشترین نفوذ ستون برای چیدمان پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی در آزمایشات طراحی شده توسط روش تاگوچی $0/064$ متر می‌باشد و این در حالی است که بیشترین میزان نفوذ این چیدمان در مدل‌سازی صورت گرفته $0/09$ متر است، به همین ترتیب مطابق جدول ۸ در ۱۲۰ چیدمان طراحی شده به روش دنباله هم‌رسلی نیز میزان نفوذ پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی ($0/04$ متر) با بیشترین میزان نفوذ ستون مدل‌سازی شده در چیدمان مورد نظر ($0/086$ متر) بسیار متفاوت است. از مهمترین علل این عدم انطباق می‌توان به تعدد سطوح تغییر و پیچیدگی‌های ذاتی قطعه اشاره کرد. این امر سبب شده است تا تشخیص چگونگی تاثیر هر لایه بر عملکرد قطعه در برخورد با گوی صلب به‌وسیله این تعداد آزمایش غیر ممکن باشد. اقدامات انجام‌شده به‌منظور کاهش پیچیدگی‌ها عبارتند از انتخاب ۳۰ چیدمان با نتایج بهتر به لحاظ جایجایی کمتر از میان ۱۲۰ آزمایش هم‌رسلی، طراحی ۳۰ چیدمان در محدوده ۴۰ تا ۵۰ درجه که تست‌های پیشین نشان داده بود این محدوده

جدول ۸- نتایج بهینه سازی بیشترین نفوذ چیدمان بهینه

در ۱۲۰ آزمایش هم‌رسلی برای ۸ لایه

چیدمان بهینه: [۵۴/۰۸ و ۱۱/۲۵ و ۰ و ۴۳/۴۵ و ۰ و ۳۴/۸۴ و ۸/۷۷ و ۴۳/۲۵]

میزان نفوذ پیش‌بینی شده شبکه عصبی ۰/۰۴ متر

میزان نفوذ ناشی از مدلسازی چیدمان ۰/۰۸۶ متر

جدول ۹- نتایج بهینه سازی بیشترین نفوذ چیدمان بهینه

در ۳۰ آزمایش با بهترین نتایج نفوذ در روش هم‌رسلی -

چیدمان بهینه: [۳/۲ و ۳/۲ و ۳۸/۵۲ و ۸۷/۸ و ۸۷/۸ و ۳/۲ و ۳/۲ و ۴۳/۹۳]

میزان نفوذ پیش‌بینی شده شبکه عصبی ۰/۰۸۰۲ متر

بهترین میزان نفوذ در میان آزمایشات انتخابی ۰/۰۳۹ متر

جدول ۱۰- نتایج بهینه سازی بیشترین نفوذ چیدمان بهینه

در ۳۰ آزمایش در محدوده ۴۰ تا ۵۰ درجه در روش

هم‌رسلی -

چیدمان بهینه: [۴۹/۷ و ۴۹/۷ و ۴۹/۷ و ۴۲/۹۸ و ۴۴/۴۲ و ۴۳/۲۱ و ۴۰]

میزان نفوذ پیش‌بینی شده شبکه عصبی ۰/۰۴۱ متر

بهترین میزان نفوذ در میان آزمایشات انتخابی ۰/۰۲۷ متر

جدول ۱۱- نتایج بهینه سازی بیشترین نفوذ چیدمان بهینه

در ۱۲۰ آزمایش هم‌رسلی برای ۴ لایه -

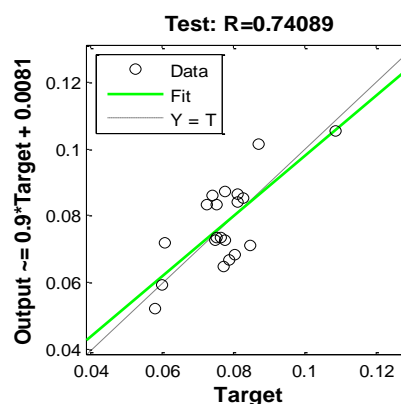
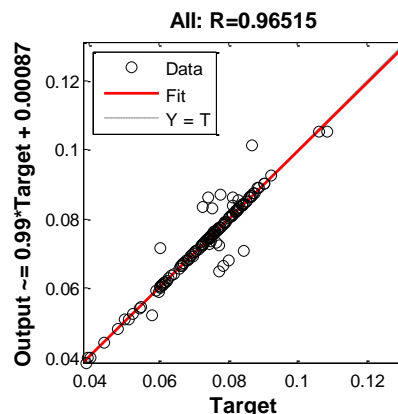
چیدمان بهینه: [۴۳/۹۴ و ۴۵/۵۴ و ۴۴/۹۷ و ۴۰/۲۶]

میزان نفوذ پیش‌بینی شده شبکه عصبی ۰/۰۳۸۱ متر

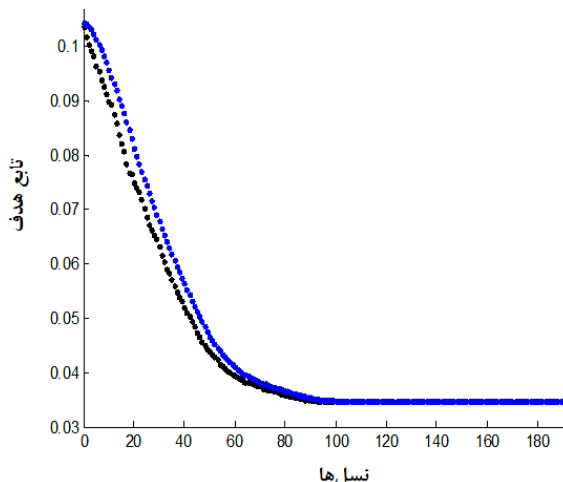
میزان نفوذ ناشی از مدلسازی چیدمان ۰/۰۳۸ متر

۵- نتایج عددی

بر اساس نتایج ارائه شده در نمودار شکل ۱۱، استفاده از کامپوزیت لایه‌ای طبق اصول تئوریک همیشه سودمند نیست، مگر آنکه چیدمان لایه‌ای مناسبی در نظر گرفته شده باشد تا با کمترین جابجایی ستون، ضربه تصادف کمترین صدمه را به سرنشینان وارد نماید. بررسی ۱۲۰ آزمایش طراحی شده در بازه تغییرات زوایا از صفر تا ۹۰ درجه و همچنین تست‌های مدل شده بر روی زوایای یکسان لایه‌ها مشخص می‌کند که رفتار ستون دارای پیچیدگی‌هایی است که پیش‌بینی دقیق رفتار آن را مشکل کرده است. بر اساس نتایج بدست آمده برای ستون اگر چیدمان لایه‌ها به گونه‌ای باشد که الیاف در قطعه بیشتر در هم تنیده شده باشند نتایج



شکل ۹- نمودار کارایی شبکه عصبی در پیش‌بینی رفتار جابجایی حاصل از شبکه‌های عصبی



شکل ۱۰- روند همگرایی در فرایند بهینه‌سازی تابع مربوط به جابجایی حاصل از شبکه‌های عصبی

با توجه به بررسی‌های متعدد و انواع مختلف چیدمان بررسی شده در محدوده‌های مختلف، از جمله ۴۹ آزمایش تاگوچی در محدوده ۹۰- تا ۹۰، ۱۲۰ آزمایش هم‌رسلی در محدوده صفر تا ۹۰، ۳۰ آزمایش هم‌رسلی برای محدوده بهینه ۴۰ تا ۵۰ و ۱۲۰ آزمایش هم‌رسلی در محدوده صفر تا ۹۰ برای ۴ لایه کامپوزیت و تقریباً ۴۰۰ آزمایش بر روی ستون میانی با چیدمان لایه‌های مختلف، این امکان در اختیار است که بهترین نتایج ممکن برای کمترین میزان نفوذ و جابجایی در جدول ۱۲ ارائه شود.

جدول ۱۲ - بهترین نتایج نفوذ و جابجایی در بررسی‌های

صورت گرفته بر روی ستون میانی خودرو سمند

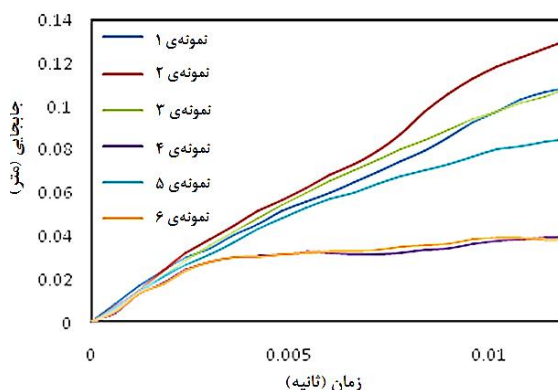
	میزان نفوذ بر حسب متر	چیدمان بهینه
A	۰/۰۳۷۸	[۴۶/۳ و ۴۷/۸ و ۴۴/۱ و ۴۹/۲ و ۴۷/۶ و ۴۷/۴ و ۴۴/۷ و ۴۱/۲]
B	۰/۰۳۸۱	[۴۳/۹۴ و ۴۵/۵۴ و ۴۴/۹۷ و ۴۰/۲۶]

در چیدمان بهینه A جدول ۱۲ بهترین جابجایی در کل بررسی‌های صورت گرفته برای ۸ لایه ارائه شده است که همان‌طور که قبلاً اشاره شد در محدوده ۴۰ تا ۵۰ درجه یعنی محدوده بهینه چیدمان برای این منظور می‌باشد و در چیدمان بهینه B بهترین جابجایی برای ۴ لایه ارائه شده است که با توضیحات بخش قبل به طور مستقیم از روند بهینه‌سازی شبکه‌عصبی و الگوریتم ژنتیک بدست آمده است.

۶- جمع‌بندی

ملاحظات از قبیل ساخت خودروهایی با مقاومت بیشتر در برابر ضربه تصادف و همچنین وزنی کمتر به منظور کاهش میزان مصرف سوخت خودرو، این صنعت را به سوی استفاده روزافزون از کامپوزیت‌ها هدایت می‌کند. دسته‌ای از کامپوزیت‌ها موسوم به کامپوزیت‌های لایه‌ای به علت داشتن خواص متفاوت در جهت‌های مختلف می‌توانند با طراحی چیدمان مناسب ملاحظات فوق را محقق کنند. مقاله حاضر به بررسی این موضوع در برخورد از کنار پرداخته است و چیدمان بهینه برای داشتن کمترین میزان نفوذ را در برخورد از کنار برای ستون میانی خودرو سمند ارائه نموده است. برای دستیابی به چیدمان بهینه، ابتدا آزمایشاتی طراحی با استفاده از الگوریتم‌های تاگوچی و هم‌رسلی طراحی شد،

بهتری برای کمترین میزان جابجایی و نفوذ به چشم می‌خورد. به‌عنوان مثال در حالتی که زوایا همگی در محدوده ۴۰ تا ۵۰ درجه تغییر می‌کنند به علت خم‌های ستون و صفحات عمود برهم، درهم تنیدگی الیاف به بهترین شکل اتفاق افتاده و لذا کمترین میزان جابجایی‌ها در بین آزمایشات در این گونه موارد اتفاق افتاده است.



شکل ۱۱- مقایسه جابجایی برای ستون کامپوزیتی در چیدمان‌های مختلف و ستون از جنس فولاد

در نمودار شکل ۱۱ نمونه ۱ نشان دهنده میزان نفوذ ستون کامپوزیتی برای چیدمان همه زوایا صفر درجه، نمونه ۲ نشان دهنده میزان نفوذ ستون کامپوزیتی برای چیدمان همه زوایا ۹۰ درجه، نمونه ۳ نشان دهنده میزان نفوذ ستون فولادی با ضخامت یک میلی‌متر، نمونه ۴ نشان دهنده میزان نفوذ ستون کامپوزیتی برای چیدمان همه زوایا ۴۵ درجه، نمونه ۵ نشان دهنده میزان نفوذ ستون کامپوزیتی برای چیدمان [۸۰، ۹۰، ۲۰، ۲۲، ۴۹، ۸۷، ۶۲، ۱۰] و در نهایت نمونه ۶ نشان دهنده میزان نفوذ ستون کامپوزیتی برای چیدمان همه زوایا ۵۰ درجه می‌باشد. همان‌گونه که این نمودار نشان می‌دهد در نمونه‌های ۱ و ۲ و ۵ رفتار سازه کامپوزیتی بر رفتار سازه فولادی برتری قابل توجهی ندارد بلکه در مواردی میزان نفوذ ستون فولادی کمتر نیز می‌باشد اما در نمونه‌های ۴ و ۶ سازه کامپوزیتی برتری قابل توجهی در مقابل سازه فولادی از خود نشان می‌دهد و این امر نشان از آن دارد که در طراحی سازه‌ها از جنس کامپوزیت لایه‌ای توجه به دستیابی به چیدمان خاص بر اساس رفتار سازه بسیار با اهمیت می‌باشد.

- buckling and free vibration using genetic algorithm and neural network. Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University: 1-6.
- [4] Vnucec Z (2000) Analysis of the laminated composite plate under combined load. TMT 2000 – Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Proceedings, Zenica: 267-274.
- [۵] شمس ش، وطن پرست م، حسنی ع الف (۱۳۸۹) بررسی رفتار پوسته مخروطی کامپوزیتی در جذب انرژی برخورد تحت ضربه محوری. دهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، ص ۱-۵.
- [6] Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS) (1995) No.214 Side Impact Protection, U.S Department of Transportation.
- [7] Niu MCY (1988) Airframe structural design. Conmilitt Press.
- [۸] محسنی شکیب س م (۱۳۸۹) مکانیک سازه‌های مرکب. انتشارات دانشگاه امام حسین(ع).
- [9] Department of Defense Handbook (2002) Composite material handbook, polymer matrix composite materials usage, design and analysis. MIL-HDBK-17-3F, Volume 3.
- [10] Robert M. Jones, "Mechanics of Composite Material", Published by Taylor and Francis, Second Edition, 1999
- [11] Penning RL (1982) Failure modes of fiber reinforced laminates. ESDU Journal, composite series: 82025
- [12] Tasi SW, Pagano NJ (1968) Invariant properties of composite material. Technomic, Stamford, Connecticut: 233-253.
- [13] Ranjit R (1990) A primer on the taguchi method. Van Nostrand Reinhold.
- [14] <http://www2.research.att.com/~njas/oadir/index.html>, a Library of Orthogonal Array, N. J. A. Sloan (2007).
- [15] Jang SM, Kawai Y (2005) Energy absorption characteristics on aluminum beams strengthened with cfrp laminated under impact loading. Key Engineering Materials 297-300: 1-3.

سپس مدل‌سازی بر اساس این آزمایشات صورت گرفت. از نتایج مدل‌سازی برای پیش‌بینی رفتار سازه در این برخورد به کمک شبکه‌های عصبی استفاده گردید. از شبکه‌های عصبی آموزش دیده به عنوان تابع هدف فرایند بهینه‌سازی استفاده شد. در فرایند بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شد تا به این ترتیب چیدمان بهینه‌ای یافت شود که به ازای آن، سازه کمترین میزان جابجایی یا نفوذ را داشته باشد. در نهایت پیش‌بینی‌های شبکه عصبی مجدداً مدل شده و تا دستیابی به نتایج یکسان با پیش‌بینی‌ها روند بهینه‌سازی ادامه یافته است. این روند برای بخش‌های دیگر خودرو نیز قابل بررسی بوده و ارایه چیدمان بهینه برای تیر درون درب خودرو، درها و ... می‌تواند بر ایمنی برخورد از کنار بیافزاید.

علائم، نشانه‌ها

ρ	چگالی ($\frac{g}{cm^3}$)
t	ضخامت (mm)
A	مساحت (m^2)
Wt	وزن (kg)
E_1	مدول الاستیک در راستای الیاف (Gpa)
E_2	مدول الاستیک در راستای عمود بر الیاف (Gpa)
G_{12}, G_{13}, G_{23}	مدول برشی (Gpa)
ν_{12}	ضریب پواسون

مراجع

- [1] Reddy S (2007) Modeling and analysis of composite b-pillar for side-impact protection of occupant in a sedan. Submitted to college of engineering Wichita state university for the degree of Master of Science: 5-22.
- [2] Menzel S (2010) Optimization of a composite b-pillar. Volkswagen Group Research: 1-5.
- [3] Garib A, Shakeri M (2010) Stacking sequence optimization of laminated cylindrical shell for