

بررسی تأثیر قطر رشته‌های پارچه‌های اسپیسر استفاده شده به عنوان جاذب ضربه در کلاه ایمنی سرنشین خودرو بر میزان ضربات وارده به سر

بهنام بنزاده^ا، محمد مهدی جلیلی^{ب*}، محمد جعفری گلوپیک^پ

^ا ایران، یزد، خیابان پژوهش، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، دانشجوی کارشناسی ارشد

^ب ایران، یزد، خیابان پژوهش، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، دانشیار

^پ ایران، یزد، خیابان پژوهش، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، استادیار.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: jalili@yazd.ac.ir

چکیده

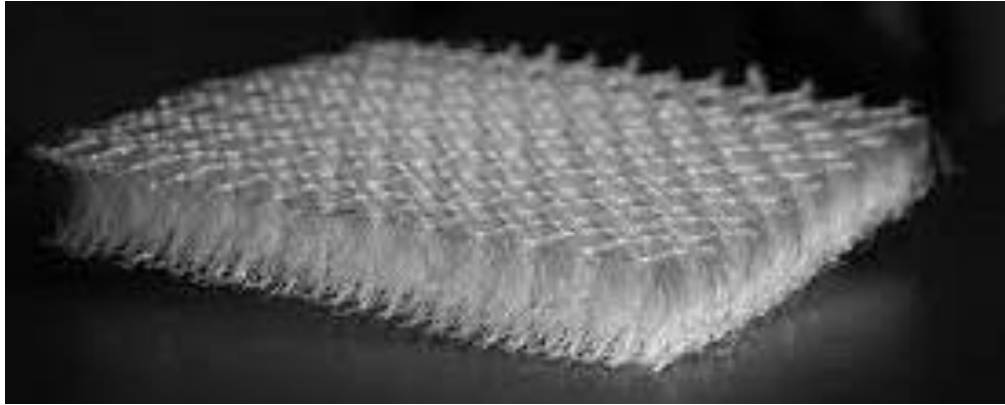
کلاه ایمنی نقش مهمی در جذب ضربه‌های وارد به سر هنگام تصادف یا عبور خودرو بر روی ناهمواری‌های جاده ایفا می‌کند. در این مقاله اثر قطر رشته‌های تشکیل‌دهنده پارچه اسپیسر که به عنوان جاذب ضربه در کلاه ایمنی سرنشین خودرو مورد استفاده قرار گرفته است بر میزان نیروهای ضربه‌ای وارد به سر مورد بررسی قرار گرفته است. مدل اجزای محدود پارچه برای تعیین مشخصه نیرو-جابجایی پارچه مورد استفاده قرار گرفته و منحنی‌های غیر خطی این مشخصه به دست آمده‌اند. به منظور شبیه‌سازی حرکت خودرو حامل سرنشین بر روی ناهمواری جاده از یک مدل ۴ درجه آزادی خودرو و سرنشین آن استفاده شده است. با حل معادلات دیفرانسیل حرکت مدل به روش رانگ کوتا، نیروهای ضربه‌ای وارد به سر برای قطرهای مختلف رشته پارچه به دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که می‌توان قطر بهینه‌ای برای رشته‌ها تعیین کرد که در آن متوسط نیروی وارد به سر کمینه گردد.

کلمات کلیدی: پارچه اسپیسر؛ تحلیل اجزای محدود؛ مدل‌سازی دینامیکی؛ کلاه ایمنی.

۱- مقدمه

کلاه ایمنی نقش مهمی در جلوگیری از اعمال ضربه به سرنشینان وسایل نقلیه مختلفی همچون دوچرخه، موتورسیکلت و خودروهای مسابقه‌ای دارد. کاهش ضربه‌های وارد به سر ناشی از تصادم خودرو، ترمزگیری شدید و عبور از ناهمواری‌های جاده با سرعت بالا؛ همچنین کاهش وزن کلاه و امکان ایجاد حداکثر گردش هوا در آن به منظور جلوگیری از تعرق زیاد از پارامترهای مهم در طراحی کلاه ایمنی می‌باشد. مطابق شکل ۱، پارچه‌های اسپیسر، گونه‌ای از پارچه‌های بافته شده‌ی ساندویچی هستند که از دوصفحه‌ی بالایی و پایینی تشکیل شده و به

وسیله‌ی رشته نخ‌های اسپیسر به هم متصل شده‌اند. از خصوصیات مهم این‌گونه از پارچه‌ها می‌توان وزن کم، قابلیت شست و شوی بالا، تنفس‌پذیری و قابلیت زیاد در جذب ضربه را نام برد.



شکل ۱. نمونه‌ای از پارچه‌ی اسپیسر [۱]

پارچه‌های اسپیسر کاربردهای گوناگونی در صنایع مختلف از جمله پوشاک، حمل و نقل و عایق‌بندی دارند. استفاده از این پارچه‌ها در ساخت کفش علاوه بر جذب ضربه‌های وارد به پا به دلیل قابلیت جذب مناسب این پارچه‌ها، قابلیت تنفس را نیز برای پا فراهم می‌کنند. همچنین استفاده از این نوع از پارچه‌ها به عنوان پشتی صندلی به علت قابلیت گردش هوا در آن‌ها مرسوم است. در صنعت خودرو نیز استفاده از این پارچه‌ها در ساخت نشیمنگاه و پشتی صندلی خودروها کاربرد دارد. به دلیل کاربرد گسترده این پارچه‌ها، پژوهش‌های بسیاری به‌منظور بررسی عملکرد، بهبود خواص آن‌ها و ساخت پارچه‌های اسپیسر برای کاربردهای خاص صورت گرفته است. به عنوان نمونه حسن زاده و همکاران تأثیر نحوه به هم تنیده شدن رشته‌های اسپیسر و تشکیل مقاطع مختلف هندسی از جمله دایره، مربع و مثلث و همچنین جنس رشته‌ها مانند الیاف شیشه و پلی‌استر را بر عملکرد و کارایی این پارچه‌ها به صورت تجربی بررسی کردند. در این پژوهش انواع پارچه‌ها تحت آزمون‌های خمش و فشار قرار گرفته و عملکرد آن‌ها مقایسه شده‌اند [۱]. هسور و همکاران اثر جنس‌های مختلف لایه‌های خارجی بالایی و پایینی پارچه اسپیسر مانند الیاف کربن، الیاف شیشه و ترکیبی (الیاف شیشه در لایه خارجی یک سمت و الیاف کربن در لایه خارجی سمت دیگر) را بر عملکرد و کارایی این پارچه با استفاده از آزمایش‌های تجربی در کنار شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی کردند [۲]. فن و همکاران تأثیر فاصله بین دو لایه، نوع بافت رشته‌های اسپیسر و فاصله الیاف اسپیسر از هم را به دو صورت تئوری و تجربی بر عملکرد پارچه بررسی کردند [۳]. جانسون و همکاران با استفاده از آزمایش ضربه با تفنگ گازی، که در آن پرتابه‌های ژلاتینی به پوسته‌های استوانه‌ای پارچه اسپیسر از جنس شیشه / اپوکسی شلیک می‌شود، به بررسی اثرات ضربه بر این پارچه‌ها جهت تعیین پارامترهای کامپوزیت برای کارآمدی بهتر آن پرداختند [۴]. تور و کنی پاسخ ضربه‌های پارچه‌های ساندویچی با ساختار بهبود یافته را به کمک سقوط توپ مخصوص به روی دو نوع پارچه بررسی کردند. پارچه نوع اول با ساختار کلاسیک شامل پوسته با الیاف شیشه-پلی‌استر همراه با هسته فومی و پارچه نوع دوم با ساختاری که به طور خاص در این تحقیق ایجاد شده متشکل از پوسته ورقه ورقه از جنس الیاف شیشه-فنولیک و هسته با جنس فومی از جنس فنول می‌باشند. نوع دوم به منظور کاربرد خاص در حمل و نقل برای جذب ضربه‌ی ناشی از تصادفات طراحی شده‌است که این سازه‌ها نسبت به سازه‌های ساندویچی سنتی قابلیت جذب ضربه بهتر و استحکام بالاتری دارند [۵]. وایدیا و همکارانش با استفاده از روش قالب‌گیری مایع خارج از اتوکلاو به ساخت کامپوزیت‌های ساندویچی از جنس اسپیسر پرداختند. آن‌ها تأثیر نرخ کرنش بالا بر روی این پارچه‌های کامپوزیت ساندویچی بررسی کردند. در این پژوهش، نتایج برای تست ضربه با نرخ کرنش بالا بین ساختارهای ساندویچی هسته فوم سنتی و لانه زنبوری مقایسه شده است [۶]. ولوسا و همکاران تأثیر پارامترهای ساختاری مانند تراکم الیاف متقاطع، تراکم خطی نخ در پوسته و هسته را بر رفتار مکانیکی پارچه‌ها بررسی کردند. همچنین این پژوهش نوع جدیدی از این پنل‌های ساندویچی را با تار سه بعدی به کمک فرآیند قالب‌گیری انتقال رزین به کمک خلاء اصلاح شده، مورد بررسی قرار می‌دهد [۷]. کاوا و همکاران خواص ضربه پارچه‌های اسپیسر همچون بار اوج، زمان رسیدن به بار اوج و انرژی جذب شده توسط پنل‌های پارچه‌ای را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پارچه‌های ساندویچی توخالی با پوسته آلومینیومی به طور قابل توجهی مقاومت در برابر ضربه را افزایش می‌دهند. همچنین در این پژوهش به صورت خاص، ضربه با سرعت کم (کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه) به این سازه‌ها با استفاده از سقوط ابزار بر روی پارچه مورد آزمایش قرار گرفت [۸]. چن و همکاران، اثر پارامترهای

مختلف پارچه اسپیسر همچون فشردگی لایه‌های کامپوزیتی و نیز ساختار لایه‌ها، قطر نخ اسپیسر، زاویه تمایل نخ و ضخامت آن در پارچه‌ای که جنس هسته آن از فوم پلی اورتان می‌باشد را بر خواص مکانیکی پارچه همچون مقاومت در برابر ضربه مورد بررسی قرار دادند [۹]. در این مقاله استفاده از این پارچه‌ها به عنوان کلاه ایمنی برای سرنشین خودرو مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور، تأثیر قطر رشته‌های پارچه اسپیسر بر میزان ضربات وارد به سر هنگام عبور خودرو از ناهمواری‌های جاده بررسی می‌شود.

۲- تحلیل اجزای محدود پارچه اسپیسر

به منظور تعیین میزان سفتی پارچه اسپیسر در قطرهای مختلف رشته، مدل اجزای محدود پارچه ساخته شده و منحنی نیرو-جابجایی آن به دست آمده است. پارچه اسپیسر شامل دو رویه می‌باشد که به وسیله مجموعه‌ای از رشته‌ها به هم متصل شده‌اند. نمونه‌ای از مدل ساخته شده از این پارچه در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، مشخصات هندسی در نظر گرفته شده برای اجزای مختلف پارچه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۲. نمونه مونتاز شده پارچه

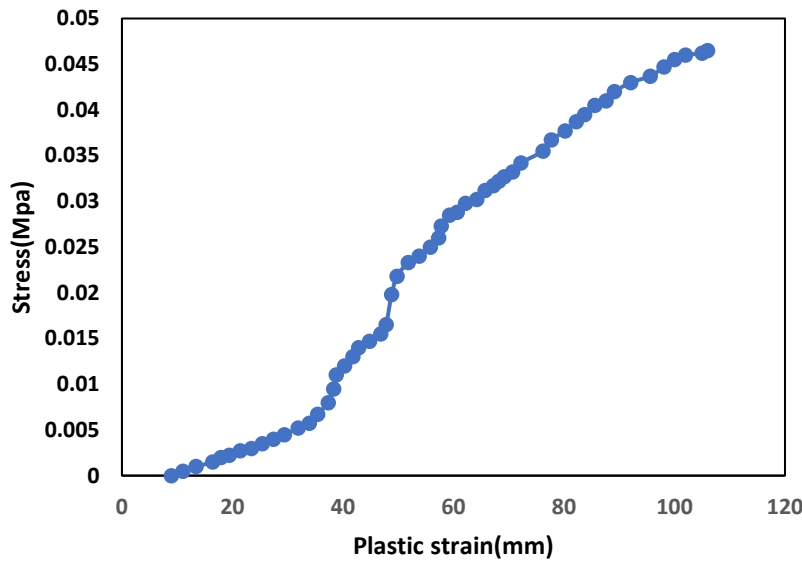
جدول ۱. مشخصات هندسی طرح مبنا

طول رشته نخ (mm)	قطر رشته نخ (mm)	زاویه انحنا	ابعاد رویه (mm)	تراکم نخ ($\frac{\text{filament}}{\text{mm}^2}$)
۴.۳۲	۰.۲	۶.۰°	۰.۳×۲×۲	۲۵/۵×۵

جنس ماده تشکیل دهنده پارچه اسپیسر از پلی استر انتخاب شده که خواص مکانیکی آن در جدول ۲ و شکل ۳ آورده شده است.

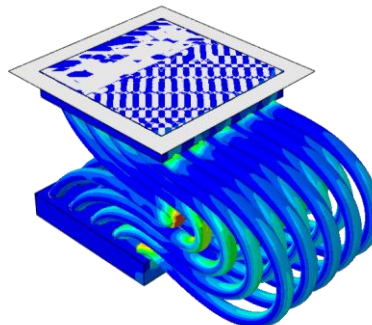
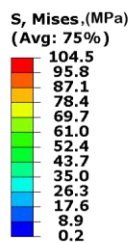
جدول ۲. خواص مکانیکی جنس پارچه طرح مبنا

چگالی (kg/m^3)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)
۱۳۸۰	۰/۲۴	۳۴۰

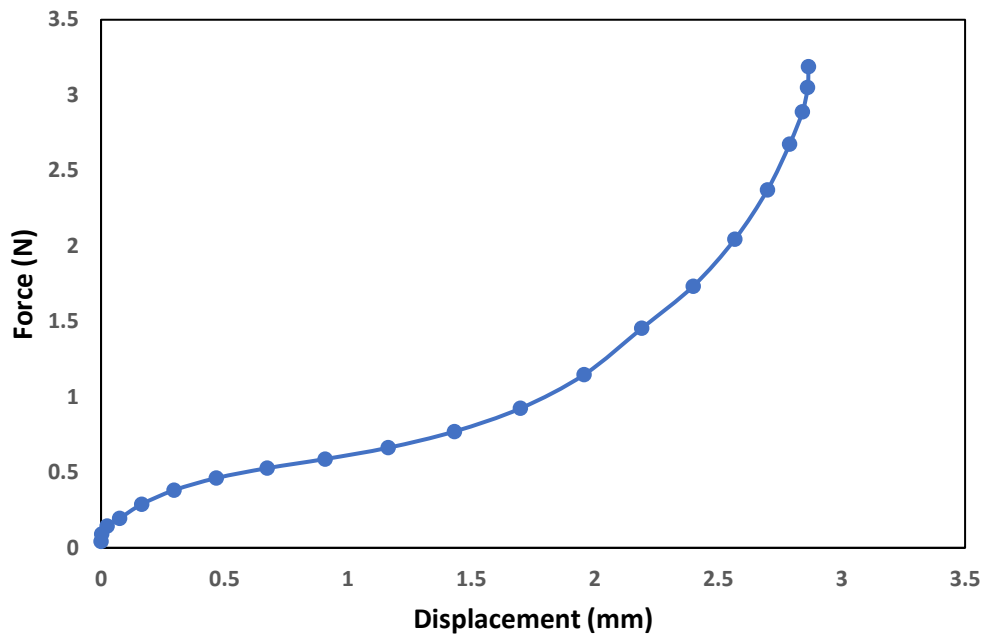


شکل ۳. نمودار تنش کرنش پلاستیک پارچه طرح مینا [۱۰]

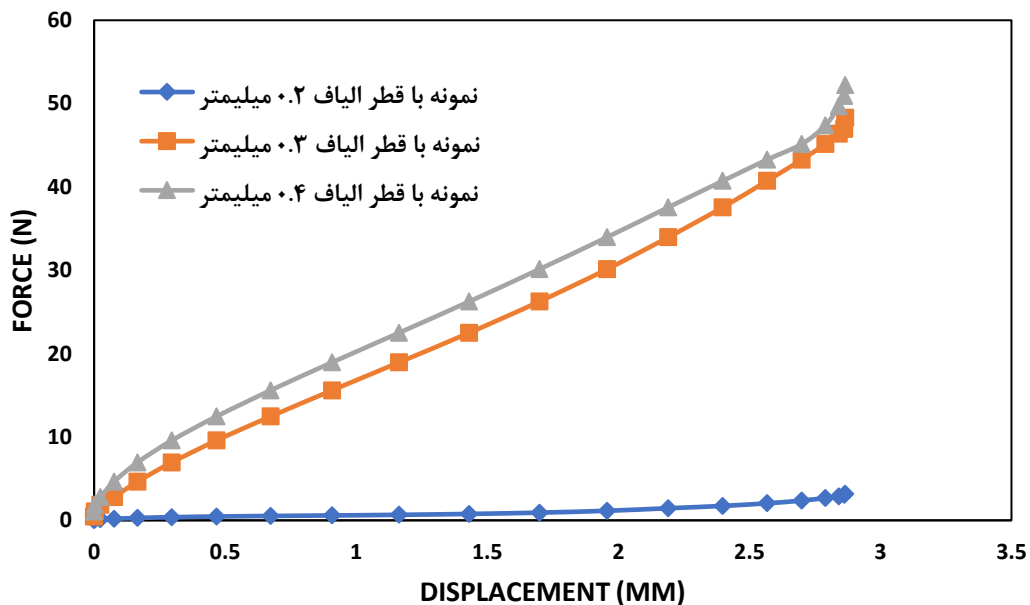
رویه پایینی پارچه در تمام جهات ثابت در نظر گرفته شده است. رویه بالایی در جهات جانبی ثابت شده و در جهت قائم با نرخ ۲۲ میلی متر بر دقیقه جابجا شده است. پس از ورود مشخصات هندسی و مکانیکی و تعیین شرایط مرزی، مدل تولید شده مش زده شده و تحلیل دینامیکی روی آن انجام شده است. شکل ۴، نتایج تحلیل تنش بر حسب مگاپاسکال را بر روی پارچه با مشخصات مینا نشان می‌دهد. همچنین، نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از تحلیل اجزای محدود برای این نمونه پارچه در شکل ۵ آورده شده است. همانطور که از نمودار نیرو-جابجایی به دست آمده برای نمونه پارچه اسپیسر در شکل ۵ مشاهده می‌شود، منحنی نیرو-جابجایی این پارچه‌ها رفتاری غیر خطی دارد. معمولاً این منحنی از سه بخش تشکیل شده است. در ناحیه اول که قبل از کمانش رشته‌ها می‌باشد، منحنی نیرو-جابجایی رفتاری تقریباً خطی دارد. در ناحیه دوم به علت کمانش رشته‌ها و فضای خالی بین آن‌ها، با افزایش جابجایی نیروی وارده به الیاف افزایش نمی‌یابد. در ناحیه سوم، به علت روی هم قرار گرفتن الیاف و ایجاد نهایت فشردگی در پارچه به علت تماس الیاف با هم با افزایش نیرو جابجایی هم افزایش می‌یابد. در ادامه با تغییر قطر رشته‌ها در بازه ۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر، نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه پارچه به دست آمده که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴. نتایج تحلیل تنش بر حسب مگاپاسکال بر روی نمونه پارچه اسپیسر



شکل ۵. نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه مبنا پارچه اسپیسر



شکل ۶. نمودار نیرو-جابجایی پارچه اسپیسر برای قطر رشته‌های مختلف

۳- مدل خودرو و سرنشین

مدل خودرو و سرنشین استفاده شده در این مقاله در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق شکل مدل استفاده شده برای خودرو یک مدل ¼ با دو درجه آزادی شامل حرکت قائم جرم‌های فنر بندی شده و فنربندی نشده می‌باشد. همچنین مدل سرنشین نیز دارای دو درجه آزادی حرکت قائم تنه و سر می‌باشد. مطابق شکل ۷، تنه از طریق یک سیستم فنر و میراگر که مدل صندلی خودرو می‌باشد به بدنه خودرو متصل شده است. همچنین تنه از بالا با استفاده از فنر و میراگر که مدلی از گردن سرنشین می‌باشد به سر اتصال دارد. سر از طریق کلاه ایمنی که با فنر و دمپر مدل شده است، با سقف بدنه خودرو مرتبط است. به منظور تعیین سفتی کلاه ایمنی، منحنی‌های

نیرو-جابجایی به دست آمده برای پارچه اسپیسر که در شکل ۶ ارائه شده‌اند توسط یک معادله درجه ۳ برازش داده شده‌اند و در صورت برخورد کلاه ایمنی به سقف خودرو تا لحظه حداکثر فشردگی پارچه از این رابطه برای تعیین سفتی اتصال سر به سقف خودرو استفاده شده است. در حالت کلی رابطه (۱)، بیانگر سفتی اتصال سر به سقف در مدل خودرو می‌باشد.

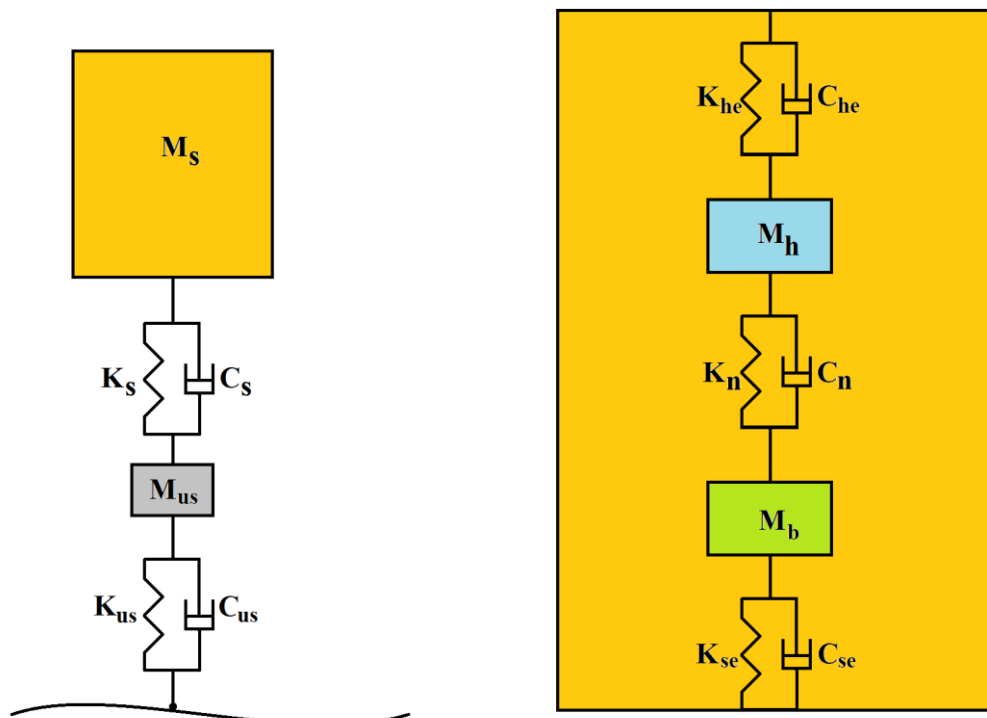
$$K_{he} = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ k_0 + k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 & 0 < x \leq t_s \\ k_f x & x > t_s \end{cases} \quad (1)$$

که در آن x میزان فشردگی فنر اتصال سر راننده و سقف خودرو، t_s ضخامت پارچه اسپیسر، k_0, k_1, k_2, k_3 ضرایب منحنی درجه ۳ برازش داده شده بر نمودار نیرو-جابجایی پارچه اسپیسر و k_f سفتی سقف خودرو می‌باشد. پارامترهای در نظر گرفته شده برای مدل خودرو و سرنشین در جدول ۳ تعریف شده و مقادیر در نظر گرفته شده برای آن‌ها آورده شده است.

به منظور مدل‌سازی تحریک جاده، از پروفیل اتفاقی جاده استفاده شده است. با در نظر گرفتن استاندارد ISO ۸۶۰۶ می‌توان پروفیل جاده اتفاقی را با استفاده از رابطه (۲) تولید کرد [۱۱]:

$$h(x) = \sum_{i=0}^N \sqrt{\Delta n} \cdot 2^k \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{n_0}{i \cdot \Delta n}\right) \cdot \text{Cos}(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \phi_i) \quad (2)$$

که در آن n_0 عدد موج مرجع و برابر با 0.1 cycle/m ، زاویه فاز اتفاقی در محدوده $[0, 2\pi)$ ، $\Delta n = 1/L$ و L طول پروفیل جاده بر حسب متر است. همچنین، k بر حسب طبقه‌بندی جاده مطابق جدول ۴ تعیین می‌گردد. در این پژوهش از جاده کلاس E در شبیه‌سازی حرکت خودرو استفاده شده است. شکل ۸، منحنی ارتفاع جاده را در طول آن که با استفاده از رابطه (۲) تولید شده و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است نشان می‌دهد.



شکل ۷. مدل خودرو و سرنشین

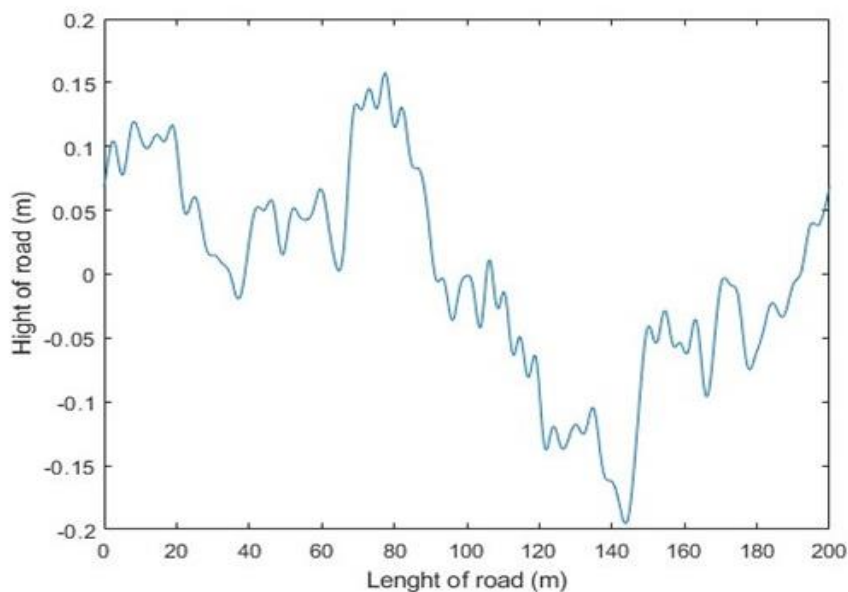
جدول ۳. مقادیر پارامترهای مدل خودرو و سرنشین

پارامتر	تعریف	مقدار
K_{us}	سفتی تعلیق جرم فنربندی نشده	2×10^5 N/m
C_{us}	میرایی تعلیق جرم فنربندی نشده	2×10^2 N.s/m
M_{us}	جرم فنربندی نشده	۲۰ kg
K_s	سفتی تعلیق جرم فنربندی شده	5×10^4 N/m
C_s	میرایی تعلیق جرم فنربندی شده	5×10^2 N.s/m
M_s	جرم فنربندی شده	۲۰۰ kg
K_{se}	سفتی صندلی	2×10^5 N/m
C_{se}	میرایی صندلی	2×10^2 N.s/m
M_b	جرم تنه سرنشین	۷۰ kg
K_n	سفتی گردن سرنشین	2×10^6 N/m
C_n	میرایی گردن سرنشین	2×10^2 N.s/m
M_h	جرم سر سرنشین	۵ kg
K_{he}	سفتی کلاه ایمنی	مطابق رابطه (۱)
C_{he}	میرایی کلاه ایمنی	5×10^1 N.s/m

جدول ۴. طبقه بندی جاده‌ها بر اساس مقدار k موجود در استاندارد ISO ۸۶۰۶ [۱۱]

k	کلاس جاده	
	حد پایینی	حد بالایی
-	B	A
۳	C	B
۴	D	C
۵	E	D
۶		

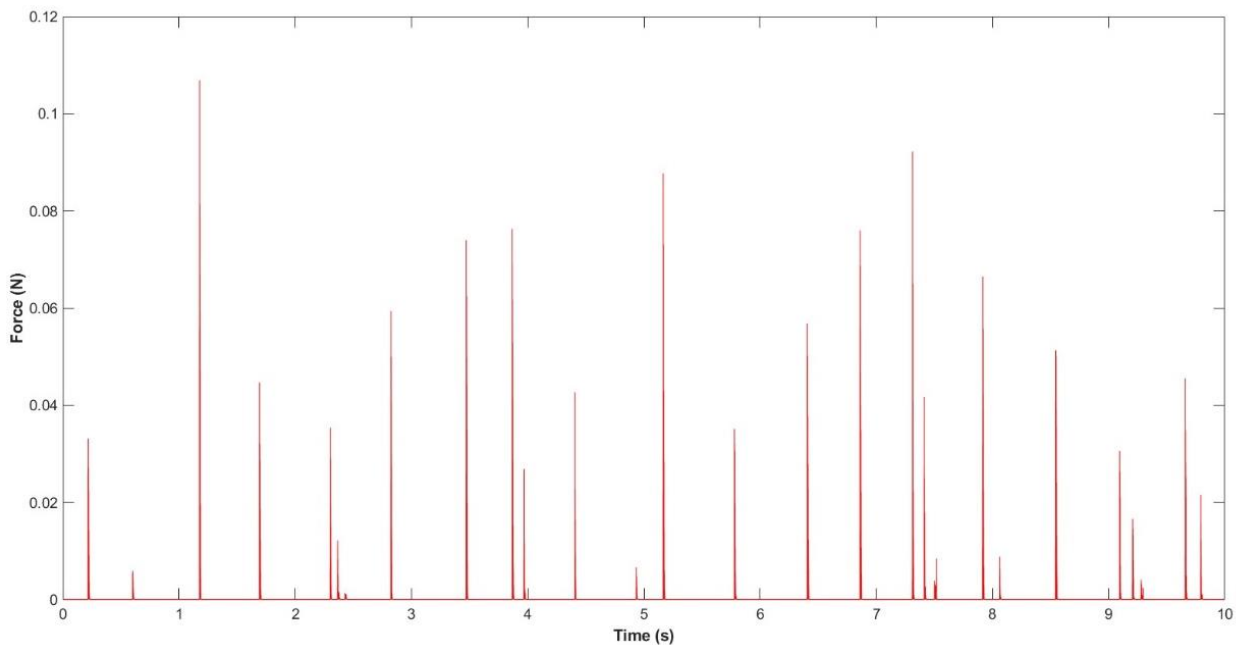
در این پژوهش از جاده کلاس E در شبیه‌سازی حرکت خودرو استفاده شده است. شکل ۸، منحنی ارتفاع جاده را در طول آن که با استفاده از رابطه (۲) تولید شده و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است نشان می‌دهد.



شکل ۸. منحنی ارتفاع جاده در طول آن برای جاده کلاس E

۴- نتایج

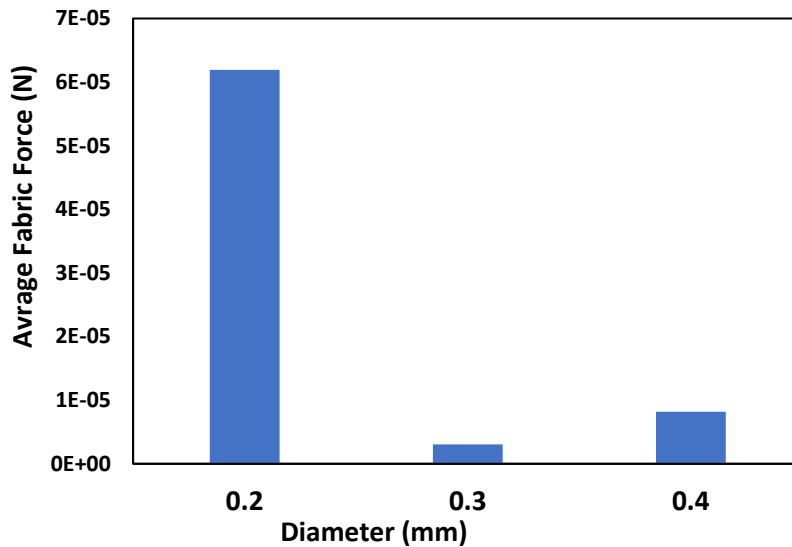
در این مقاله حرکت خودرو به همراه سرنشین بر روی جاده کلاس E شبیه‌سازی شده است. به منظور تعیین سفتی کلاه ایمنی سرنشین از منحنی‌های ارائه شده در شکل ۶ استفاده شده است و تأثیر قطر رشته‌های پارچه بر میزان ضربه وارد به سر هنگام عبور خودرو بر روی ناهمواری جاده و برخورد سر به سقف خودرو بررسی شده است. منحنی تغییرات نیروی ضربه‌ای وارد به سر برای کلاه ایمنی از جنس پارچه اسپیسر با قطر مبنا در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود تا هنگامی که کلاه ایمنی به سقف خودرو برخورد نکرده است، نیروی وارد به سر صفر می‌باشد. با برخورد کلاه ایمنی به سقف نیروی ضربه‌ای به سر وارد می‌شود. بیشینه این نیرو زمانی اتفاق می‌افتد که پارچه اسپیسر به اندازه ضخامت خود فشرده شده و سر مستقیم با سقف خودرو برخورد داشته باشد.



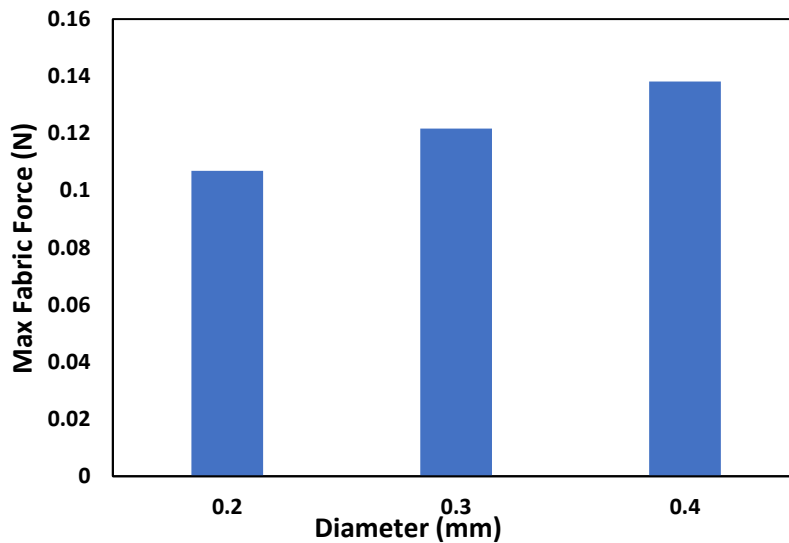
شکل ۹. تغییرات نیروی ضربه‌ای وارد به سر برای کلاه ایمنی از جنس پارچه اسپیسر با قطر مبنا

به منظور بررسی اثر قطر رشته‌های پارچه بر نیروی ضربه‌ای وارد به سر، از دو معیار متوسط نیروی وارد به سر و همچنین بیشینه نیروی وارد به سر در زمان شبیه‌سازی استفاده شده است. شکل ۱۰ اثر قطر رشته سازنده پارچه را بر متوسط نیروی وارد به سر نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱۱، بیشینه نیروی ضربه‌ای وارد به سر در اثر برخورد کلاه ایمنی به سقف خودرو نمایش داده شده است. مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۱۱، با افزایش سفتی کلاه ایمنی در صورت برخورد کلاه به سقف خودرو نیروی ضربه‌ای بیشتری به سر وارد می‌شود.

همچنین در صورتی که پارچه استفاده شده برای تهیه کلاه ایمنی بسیار نرم باشد، در اثر برخورد کلاه به سقف به سرعت به طول مرده خود می‌رسد. در این حالت تماس مستقیم مجموعه سر و کلاه به سقف اتفاق می‌افتد که به علت سفتی بالای سقف خودرو موجب وارد آمدن نیروی بیشتری به سر می‌شود. مطابق شکل ۱۰ برای قطرهای کم رشته پارچه اسپیسر، متوسط نیروی وارد به سر مقدار زیادی می‌باشد. این امر به دلیل برخورد مستقیم سر به سقف می‌باشد. با افزایش قطر رشته به $\frac{0}{3}$ میلی‌متر این نیرو کمینه می‌شود و پس از آن به علت سفت شدن پارچه مقدار متوسط نیروی ضربه‌ای وارد به سر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. میانگین نیروی وارد به سر در کلاه ایمنی ساخته شده از پارچه‌های اسپیسر با قطر رشته مختلف



شکل ۱۱. بیشینه نیروی وارد به سر در کلاه ایمنی ساخته شده از پارچه‌های اسپیسر با قطر رشته مختلف

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله امکان استفاده از پارچه‌های اسپیسر به علت وزن کم، قابلیت گذردگی هوا و جذب انرژی به عنوان کلاه ایمنی سرنشین خودرو مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور مدل ¼ خودرو شامل جرم‌های فنربندی شده و فنر بندی نشده و همچنین مدل سرنشین شامل بدن و سر که بر روی صندلی خودرو قرار گرفته است و مجموعاً دارای ۴ درجه آزادی می‌باشد مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور تعیین سفتی کلاه ایمنی برای استفاده در مدل دینامیکی، از روش اجزای محدود استفاده شده است. به این منظور مدل اجزای محدود پارچه با قطرهای مختلف رشته در نرم‌افزار آباکوس ساخته شده و مشخصه غیر خطی نیرو-جابجایی آن به دست آمده

است. با استفاده از مدل دینامیکی خوددور-سرنشین توسعه داده شده در این پژوهش، حرکت خودرو بر روی جاده استاندارد از نوع E شبیه‌سازی شده و نیروهای ضربه‌ای وارد به سر محاسبه شده است. با استفاده از نتایج به‌دست آمده مقدار بیشینه نیروی ضربه‌ای و همچنین متوسط این نیرو در طول مدت شبیه‌سازی برای قطرهای مختلف پارچه محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر افزایش مقدار بیشینه این نیرو با افزایش قطر رشته دارد. ولی می‌توان برای کمینه کردن مقدار متوسط نیروی وارد به سر قطر بهینه‌ای برای رشته‌های پارچه تعیین کرد.

مراجع

1. S. Hassanzadeh, H. Hasani, M. Zarrebini, "Thermoset composites reinforced by innovative 3D spacer weft-knitted fabrics with different cross-section profiles", *Materials and manufacturing process. Composites Part A Applied Science and Manufacturing* 91, 65-76 (2016).
2. M.V. Hosur, M. Abdullah, S. Jeelani, "Dynamic compression behaviour of integrated core sandwich composites", *Materials Science and Engineering A* 445, 54-64 (2007).
3. H. Fan, Q. Zhou, W. Yang, Z. Jingjing, "An experiment study on the failure mechanisms of woven textile sandwich panels under quasi-static loading", *Composites: Part B* 41(8), 686-692 (2010).
4. A.F. Johnson, M. Holzapfel, "Modelling soft body impact on composite structures", *Composite Structures* 61(1-2), 103-113 (2003).
5. L.Torre, J.M.Kenny, "Impact testing and simulation of composite sandwich structures for civil transportation", *Composite Structures* 50(3), 257-267 (2000).
6. U.K. Vaidya, S. Nelson, B. Sinn, B. Mathew, "Processing and high strain rate impact response of multi-functional sandwich composites", *Composite Structures* 52(3), 429-440 (2001).
7. J.C. Velosa, S. Rana, R. Fanguero, F. van Hattum, F. Soutinho, S. Marques, "Mechanical behaviour of novel sandwich composite panels based on 3D-knitted spacer fabrics", *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 31, 95-105 (2012).
8. H. Cao, K. Qian, Q. Wei, H. Li, "Low-velocity Impact Behaviour of 3-D Glass Fibre Hollow Integrated Core Sandwich Composites", *Polymers & Polymer Composites* 18(4), 175-180 (2009).
9. S. Chen, H. Long, Y. Liu, F. Hu, "Mechanical properties of 3D-structure composites based on warp-knitted spacer fabrics", *AUTEX Research Journal* 10, 127-137 (2004).
10. F. Sun, M. Ma, X. Pan, "Simulation of plate compression behaviour of warp-knitted spacer fabrics based on geometry and property parameters", *Textile Research Journal* 89, 13-23 (2019).
11. ISO 8606, "Mechanical vibration—Road surface profiles— Reporting of measured data", Geneva, Switzerland. International Standards Organization, (2016).