

# بررسی ظرفیت جذب انرژی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌های حلقوی پودی سه‌بعدی

## Investigation into the Energy Absorption Capacity of Reinforced Composite by 3D weft-knitted Fabrics

رضا حسامی، حسین حسینی، سعید آجلی\*، علی زادهوش

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۵/۰۵ تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۷/۲۳

### چکیده

ظرفیت جذب انرژی در کاربردهای مهندسی مانند قطعات ضربه‌گیر، کلاه‌های ایمنی و نیز بسته‌بندی از اهمیت بسیاری برخوردار است. کامپوزیت‌های تهیه شده از منسوجات به دلیل ظرفیت زیاد انرژی و وزن کم توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در این پژوهش، قابلیت جذب انرژی کامپوزیت‌های ساخته شده از پارچه‌های حلقوی پودی سه‌بعدی شده، بررسی شده است. برای دستیابی به این هدف، پارچه حلقوی پودی با ساختار و تراکم‌های سطحی متفاوت از نخ نایلون بافته شد. پارچه‌ها پس از عملیات شست‌وشو، با فرایند گرم‌اشکل‌دهی با استفاده از قالب‌های ویژه سه‌بعدی شدند. پارچه‌های سه‌بعدی شده با رزین اپوکسی پوشش‌دهی شدند و برای تبدیل شدن به جاذب انرژی ایده‌آل در بستر پلیمری از جنس اسفنج پلی‌وینیل کلرید (PVC) قرار گرفتند. نمونه‌ها در آزمون‌های شبه‌ایستای کششی و فشاری و آزمون دینامیکی ضربه پاندولی قرار گرفتند. نتایج حاصل نیز به کمک نرم‌افزار Mini-Tab تحلیل و نمونه بهینه مشخص شد.

### مقدمه

آنها در بسیاری از کاربردهای ساختمانی محدود شده است. این محدودیت‌ها ناشی از مشکلات تولید مانند زمان و هزینه زیاد لایه‌چینی دستی، خواص مکانیکی ضعیف از جمله آویزش (drape) ضعیف لایه‌های پیش‌آغشته و عدم دستیابی به شکل‌های پیچیده در قالب‌گیری است. از سایر مشکلات مکانیکی مهم چندلایه‌ها، مقاومت کم آنها در برابر جدایی لایه‌هاست [۱].

استفاده از پارچه‌های حلقوی سه‌بعدی به عنوان تقویت‌کننده برای کامپوزیت‌های پلیمری را Verpoest و همکاران [۲] در اوایل دهه ۱۹۹۰ توسعه داده‌اند. Phillips و همکاران [۳] نیز گزارش کرده‌اند، این کامپوزیت‌ها ظرفیت جذب انرژی بیشتر و در عین

ظرفیت جذب انرژی یکی از گزینه‌های مهم در انتخاب مواد برای بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند قطعات ضربه‌گیر در اتومبیل‌ها، کلاه‌های ایمنی مورد استفاده در دوچرخه و موتورسواری، محوطه‌های ساختمان‌سازی و نیز بسته‌بندی کالاهای شکننده است. مواد استفاده شده در جاذب‌های انرژی باید تغییر شکل پلاستیک را به عنوان سازوکار اصلی جذب انرژی به کار گیرند، ضمن اینکه سبکی وزن در این مواد بسیار مورد توجه است. با وجود استفاده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات دوبعدی (چندلایه‌ها) در دوره طولانی، استفاده از

### کلمات کلیدی

جذب انرژی، پارچه‌های حلقوی سه‌بعدی، اسفنج PVC، کامپوزیت پلیمری، خواص ضربه

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: sajeili@cc.iut.ac.ir

جدول ۱- مشخصات فنی پارچه‌های حلقوی پودی.

تعداد ردیف‌ها در یک سانتی‌متر	تعداد رج‌ها در یک سانتی‌متر	تعداد حلقه در سانتی‌متر مربع پارچه	وزن ( $g/m^2$ )	ضخامت (mm)	ساختار
۱۰	۱۶	۱۶۰	۱۳۰	۰/۵۹	ریب
۷	۸	۵۶	۱۲۰	۰/۵۶	
۱۶	۱۸	۲۸۸	۸۸	۰/۲۵	یک‌رو سیلندر ساده
۱۱	۱۲	۱۳۲	۵۶	۰/۲	

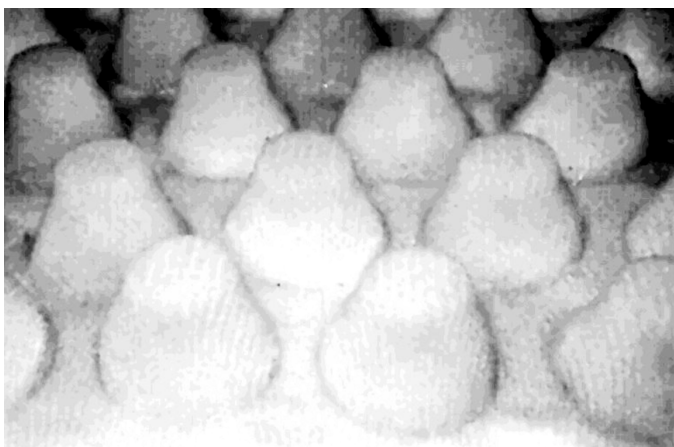
### روش‌ها

تراکم حلقه‌های پارچه حلقوی پودی در راستای رج و ردیف در نقاط مختلف نمونه شمارش شد و متوسط تعداد حلقه‌ها در سانتی‌متر مربع به عنوان شاخص اصلی این پارچه‌ها گزارش شد. ضخامت پارچه‌ها طبق استاندارد ASTM D1777-96 و وزن واحد سطح پارچه‌ها طبق استاندارد ASTM D3776-09 اندازه‌گیری شد. مشخصات فیزیکی پارچه‌های تولید شده در جدول ۱ آمده است.

سپس، برای حذف اثر روغن‌های باقی‌مانده روی نمونه‌ها، عملیات شست‌وشو انجام شد. پارچه‌ها پس از خشک‌شدن با استفاده از فرایند گرمایش دهی در گرم‌خانه با دمای  $180^{\circ}C$  و مدت ۵ min با استفاده از قالب‌های ویژه سه‌بعدی شدند. برای بررسی اثر شکل هندسی برجستگی‌های ایجاد شده روی پارچه در اثر فرایند گرمایش دهی، از دو شکل هندسی متفاوت به شرح زیر استفاده شده است:

- شکل هندسی مخروطی سرصاف دارای قطرهای ۱۰ mm در پایین و ۵ mm در بالا و ارتفاع ۷ mm.
- شکل هندسی نیم‌کره با قطر ۱۰ mm.

در سطح مشخصی از نمونه، فاصله بین دو سلول یا شکل هندسی مجاور باید طوری طراحی شود که تمام سلول‌ها یکنواخت در نمونه توزیع شوند. برای بررسی اثر تراکم سلول‌ها یا شکل‌های هندسی روی صفحه زیرین، از دو نوع تراکم، یک سلول یا برجستگی با



شکل ۱- پارچه سه‌بعدی آغشته به رزین.

حال سختی خمشی و مقاومت فشاری ویژه کمتری در مقایسه با کامپوزیت‌های پلیمری ساندویچی متداول دارند.

Yu و همکاران [۴] سازه‌های سه‌بعدی شبکه‌گنبدی (grid-domed) را از نظر ویژگی جذب انرژی زیر فشارهای شبه‌ایستا و ضربه‌ای مطالعه کرده‌اند. سازه‌های شبکه‌گنبدی در واقع پارچه‌های دوبعدی با ساختارهای مختلف تار-پودی، حلقوی، بی‌بافت و برید (braid) هستند که با شکل‌های هندسی مختلف و طی عملیات گرمایش دهی، سه‌بعدی می‌شوند. Xue و همکاران [۵] نیز شکل‌های سه‌بعدی به کار رفته در سازه‌های سلولی شبکه‌گنبدی را بررسی و اصلاح کرده‌اند. آنها گزارش داده‌اند، سلول‌های مخروطی سرصاف به واسطه تغییر شکل بیشتر، جذب انرژی زیادتری نیز دارند.

این کامپوزیت‌ها با ترکیب منحصر به فرد، ظرفیت جذب انرژی بیشتر و سبکی وزن، پتانسیل بیشتری در کاربردهایی مانند صفحات جاذب انرژی در درب خودروها، کلاه‌های ایمنی و بسته‌بندی‌های محافظ دارند.

Hwan و Chang [۶]، جذب انرژی را در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با سازه‌های جاذب انرژی، جعبه تخم‌مرغی شکل ساخته شده از پارچه‌های تار و پودی بررسی کرده‌اند. نتایج حاکی از آن است که با توجه به منحنی‌های تنش-کرنش نرم و پایدار که مشابه مواد جاذب انرژی ایده‌آل نیز هستند، این کامپوزیت‌ها ظرفیت جذب انرژی خوبی دارند. در میان تمام منسوجات به کار رفته در سازه‌های سلولی شبکه‌گنبدی، پارچه‌های حلقوی به علت قابلیت شکل‌پذیری و آویزش زیاد و همچنین ساختار ذاتی سلولی، مناسب‌ترین منسوج در کامپوزیت‌های منسوج سلولی شبکه‌گنبدی هستند.

برای تهیه کامپوزیتی با بهترین خواص مکانیکی، پارامترهای فراروش مانند ویژگی‌های هندسی پارچه سه‌بعدی بسیار مهم است. در پژوهش حاضر، از کامپوزیت‌های سه‌بعدی شبکه‌گنبدی تهیه شده از پارچه‌های حلقوی پودی برای تقویت اسفنج PVC استفاده شد و اثر پارامترهای مختلف هندسی مانند نوع برجستگی ایجاد شده، تراکم برجستگی‌ها، تراکم پارچه حلقوی و ساختار آن بر جذب انرژی سازه مدنظر بررسی شد. در نهایت، نیز پارامترهای بهینه برای جذب انرژی حداکثر معین شدند.

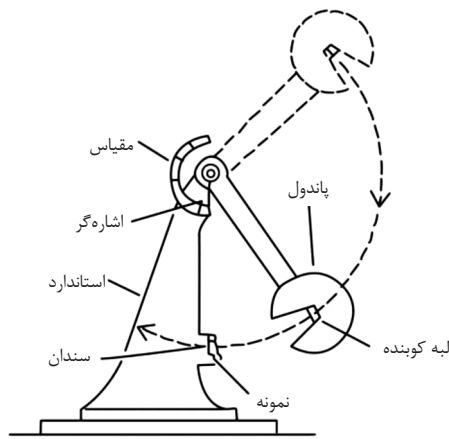
### تجربی

#### مواد و دستگاه‌ها

دو ساختار حلقوی پودی یک‌رو سیلندر ساده و دورو سیلندر ریب ساده با تراکم‌های سطحی متفاوت از نخ نایلون چندرشته‌ای بافته شده ۱۵۰ دنبری روی ماشین‌های گردباف یک‌رو سیلندر (ساخت شرکت Falmac، گج ۲۴ و قطر ۱۶ اینچ) و ماشین گردباف دورو سیلندر (ساخت شرکت Mayer & Cie، گج ۱۸ و قطر ۳۰ اینچ) بافته شد.



شکل ۲- نمای جانبی کامپوزیت تهیه‌شده.



شکل ۳- طرح کلی دستگاه ضربه پاندولی، روش چارپی.

برای تعیین مقدار اثر هریک از پارامترهای مدنظر بر خواص مکانیکی کامپوزیت تهیه شده و نیز بهینه‌سازی مقدار این پارامترها برای حصول بهترین نتیجه، از نرم‌افزار Mini-Tab استفاده شده است. سپس، نمونه‌های تولید شده در آزمون‌های شبه‌ایستای فشاری و آزمون دینامیکی ضربه پاندولی قرار گرفتند.

در حالتی که ضربه با سرعت کم روی نمونه اعمال شود، نحوه اعمال نیرو بسیار مشابه فرایند بارگذاری شبه‌ایستاست. معمولاً علت انجام پژوهش روی رفتار کامپوزیت‌ها در برابر ضربه، با آزمون بارگذاری شبه‌ایستا، دو دلیل دارد. اول اینکه تنظیمات لازم برای بارگذاری شبه‌ایستا از آزمون ضربه آسان‌تر است. دوم اینکه مشاهده جزئیات تغییر شکل نمونه در بارگذاری شبه‌ایستا بسیار ساده‌تر است. این آزمون با استفاده از فک‌های مسطح روی دستگاه Zwick انجام شد. سرعت آزمون نیز ۵ mm/min تنظیم شد. در این حالت حداکثر نیروی لازم برای فشردگی سه نمونه به اندازه ۱۰ mm از روی منحنی نیرو-جابجایی به دست آمد و میانگین نتایج حاصل گزارش شد. برای بررسی انرژی جذب شده به وسیله نمونه‌های کامپوزیتی از آزمون ضربه پاندولی به روش چارپی مجهز به چکش ۱۵ J (شکل ۳) استفاده شد.

## نتایج و بحث

### نتایج آزمون فشار جانبی

نتایج حاصل از آزمون‌های فشار و ضربه در جدول ۳ آمده است. در حالتی که ضربه با سرعت کم روی نمونه اعمال می‌شود، نحوه اعمال نیرو بسیار مشابه فرایند بارگذاری فشاری شبه‌ایستاست. هنگام اعمال نیروی فشار، بخشی از نیروی اعمال شده صرف تغییر شکل سلول‌ها می‌شود. در آزمون بارگذاری شبه‌ایستا، کرنش فشاری اعمال شده منجر به تغییر شکل پلاستیک سلول‌ها می‌شود. از آنجا که بخشی از نیروی فشار اعمال شده صرف چنین تغییر شکلی

ابعاد ۱۵×۱۵ mm و نیز یک سلول با ابعاد ۳۰×۱۵ mm استفاده شد. سپس، پارچه‌های سه‌بعدی شده و پوشش داده شده با رزین اپوکسی (شکل ۱)، برای دستیابی به جاذب انرژی ایده‌آل در بستر پلیمری از جنس اسفنج PVC قرار گرفتند. برای تهیه قطعه کامپوزیتی نهایی از قالب ویژه‌ای استفاده شد. پارچه سه‌بعدی در میان قالب قرار داده شده و رزین PVC آماده شده در دو طرف پارچه ذکر شده، درون قالب تزریق شد. برای تهیه نمونه، کامپوزیت ساندریچ درون گرم‌خانه با دما و زمان مشخص قرار گرفت که طی فرایند پخت رزین ذکر شده، پف کرده و پارچه سه‌بعدی را در میان خود محبوس می‌کند.

در نهایت، قطعه کامپوزیت با ماتریس PVC انعطاف‌پذیر تقویت‌شده با پارچه حلقوی پودی سه‌بعدی، حاصل شد. شکل ۲ نمای جانبی از کامپوزیت تهیه شده را نشان می‌دهد. این قطعه کامپوزیتی دارای ابعادی با طول ۱۶۰ mm، عرض ۳۰ mm و ضخامت ۲۰ mm است. نمونه‌ای از رزین PVC بدون تقویت‌کننده به عنوان نمونه شاهد تهیه شد. نمونه‌ها بر مبنای روش طراحی آزمایش تاگوچی (L8) آماده شدند. در این روش اثر عوامل مختلف نظیر شکل برجستگی‌های سه‌بعدی و تراکم آنها در واحد سطح، نوع بافت حلقوی مدنظر و تراکم بافت بررسی شد.

به دلیل آنکه چهار پارامتر هریک با دو سطح مختلف بررسی شدند، ماتریس L8 تاگوچی برای پژوهش مناسب خواهد بود که در جدول ۲ نشان داده شده است. هریک از پارامترهای ساختار پارچه، تراکم حلقه در پارچه، نوع ساختار سه‌بعدی ایجاد شده به روش گرم‌ماشکل‌دهی و تراکم هریک از ساختارهای سه‌بعدی ایجاد شده، در دو سطح مختلف بررسی شده است.

جدول ۲- ماتریس تاگوچی استفاده شده.

کد آزمون	تراکم سلول	نوع سلول	تراکم سطحی پارچه (تعداد حلقه در سانتی‌متر مربع)	ساختار پارچه
T1	کم* (سطح ۱)	نیم‌کره (سطح ۱)	۲۸۸ (سطح ۱)	ساده (سطح ۱)
T2	زیاد** (سطح ۲)	نیم‌کره (سطح ۱)	۲۸۸ (سطح ۱)	ساده (سطح ۱)
T3	کم (سطح ۱)	مخروطی (سطح ۲)	۱۳۲ (سطح ۲)	ساده (سطح ۱)
T4	زیاد (سطح ۲)	مخروطی (سطح ۲)	۱۳۲ (سطح ۲)	ساده (سطح ۱)
T5	زیاد (سطح ۱)	مخروطی (سطح ۲)	۱۶۰ (سطح ۱)	ریب ۱×۱ (سطح ۲)
T6	کم (سطح ۲)	مخروطی (سطح ۲)	۱۶۰ (سطح ۱)	ریب ۱×۱ (سطح ۲)
T7	زیاد (سطح ۱)	نیم‌کره (سطح ۱)	۵۶ (سطح ۲)	ریب ۱×۱ (سطح ۲)
T8	کم (سطح ۲)	نیم‌کره (سطح ۱)	۵۶ (سطح ۲)	ریب ۱×۱ (سطح ۲)

\* یک سلول یا برجستگی ۱۵×۱۵ mm. \*\* یک سلول ۳۰×۱۵ mm.

جدول ۳- نتایج آزمون‌های فشار و ضربه.

کد نمونه	نیروی فشار جانبی (kN)	مقدار جذب انرژی (J)
T <sub>1</sub>	۲/۵۱ (۱۴) <sup>o</sup>	۱۴/۳۶ (۰/۰۰۴)
T <sub>۲</sub>	۱/۳ (۱۱)	۱۱/۱۴ (۰/۰۰۹)
T <sub>۳</sub>	۲/۱۸ (۲)	۱۳/۰۲ (۰/۰۰۲)
T <sub>۴</sub>	۱/۵۳ (۶)	۱۴/۱۰ (۰/۰۰۵)
T <sub>۵</sub>	۶/۷ (۲)	۱۳/۶۶ (۰/۰۱۱)
T <sub>۶</sub>	۵/۷۹ (۵)	۱۱/۸۷ (۰/۰۰۹)
T <sub>۷</sub>	۶/۲ (۲)	۱۴/۷۲ (۰/۰۰۲)
T <sub>۸</sub>	۵/۳ (۵)	۱۳/۳۱ (۰/۰۰۱)

\* اعداد داخل پرانتز مقادیر ضریب تغییرات را نشان می‌دهد.

جدول ۴- نتایج پاسخ برای آزمون فشار جانبی.

رتبه	نسبت سیگنال به نویز محاسبه شده			سطح بهینه	عوامل
	دلتا	سطح ۲	سطح ۱		
۱	۱۰/۵۲۸	۱۵/۶۶۴	۵/۱۳۶	۲	ساختار پارچه
۴	۰/۰۷۸	۱۰/۳۶۱	۱۰/۴۳۹	۱	تراکم حلقه
۳	۰/۳۳۵	۱۰/۵۶۸	۱۰/۲۳۳	۲	ساختار سلول
۲	۲/۹۵۱	۸/۹۲۵	۱۱/۸۷۶	۱	تراکم سلول

است، بیشترین نیروی فشار را حین آزمون فشار ایجاد می‌کند که نمونه مطلوب‌تری نسبت به سایر نمونه‌هاست. از نمونه‌های گفته شده، نمونه کامپوزیتی T<sub>۵</sub> شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر نیروی فشار را در آزمون فشار دارد.

بر اساس شکل‌ها، تغییر در نیروی فشار اعمال شده روی کامپوزیت در سطوح مختلف از پارامترهای تراکم حلقه پارچه‌ها و نیز ساختار سلول‌ها کوچک است. با این حال نتایج حاصل از آزمون آماری ANOVA نشان‌دهنده معنی‌دار بودن تفاوت بین دو سطح مختلف از تمام پارامترهای بررسی شده جز تراکم حلقه و از بعد آماری است. در آزمون‌های فشار جانبی شبه‌ایستا یا ضربه با تغییر شکل زیاد، سلول در کامپوزیت تهیه شده تغییر شکل می‌دهد که مراحل این تغییر شکل برای سلول نیم‌کره در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۴-الف، سلول نیم‌کره ایجاد شده روی پارچه پیش از اعمال نیروی فشار را نشان می‌دهد.

شکل ۴-ب تغییر شکل خمشی ناشی از اعمال نیروی فشاری است که کمتر به عنوان سازوکار جذب انرژی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴-ج نیز نشان‌دهنده تغییر شکل پوسته سلول پس از اعمال نیروی فشاری است که به عنوان سازوکار اصلی جذب انرژی عمل می‌کند.

نتایج حاصل از آزمون فشار نشان می‌دهد، پارچه‌های با ساختار ریب اثر بیشتری بر جذب انرژی نسبت به ساختار یک‌رو سیلندر ساده می‌گذارند. حلقه‌ها در ساختار دورو سیلندر ریب که به شکل یک در میان در پارچه قرار گرفته‌اند، در اثر اعمال نیروی فشار به راحتی جابه‌جا شده و تغییر شکل می‌دهند، این مسئله منجر به

می‌شود، طی این فرایند مقداری انرژی جذب می‌شود. در علم مواد، چقرمگی به عنوان مقدار انرژی در واحد حجم تعریف می‌شود که ماده پیش از پارگی می‌تواند جذب کند. همچنین به عنوان مقاومت در برابر پارگی نیز تعریف می‌شود، زمانی که ماده زیر تنش قرار می‌گیرد.

چقرمگی به وسیله اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی تنش-کرنش معین می‌شود که در واقع همان انرژی لازم برای تغییر شکل در واحد حجم پیش از پارگی است.

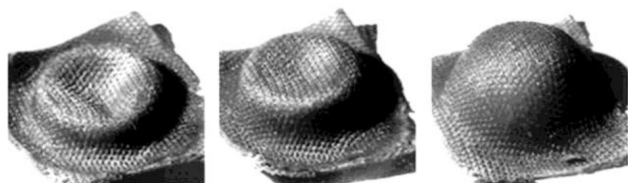
نتایج پاسخ برای نسبت‌های سیگنال به نویز محاسبه شده به کمک نرم‌افزار Mini-Tab در جدول ۴ آمده است. در این جدول، عوامل به ترتیب اثرگذاری بر نیروی فشار، رتبه‌بندی شده و سطح بهینه هر یک برای حصول به نیروی فشار بیشتر معین می‌شود.

رتبه‌بندی عوامل بر اساس مقدار دلتا (تفاضل بیشترین و کمترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای هر عامل) انجام می‌شود.

نسبت سیگنال به نویز (SN) بزرگی متوسط یک عامل از فرایندی خاص را نسبت به تغییرات آن بیان می‌کند.

سطح بهینه هر یک از عوامل با استفاده از بیشترین مقدار SN به دست آمده برای سطوح، معین می‌شود. به عبارت دیگر، آن سطحی از عامل شرایط بهینه را نتیجه می‌دهد که دارای بیشترین مقدار SN در بین مقادیر به دست آمده برای سطوح آن عامل باشد. بر اساس نتایج حاصل از جدول پاسخ، ساختار پارچه بیشترین تراکم حلقه کمترین اثر را بر نیروی فشار حداکثر دارد. همچنین، اثر پارامتر ساختار سلول‌های سه‌بعدی از تراکم سلول‌ها یا شکل کمتر است.

از ستون سطح بهینه این جدول نیز مشخص می‌شود، نمونه کامپوزیتی که با سطح ۲ ساختار پارچه (بافت ریب)، سطح ۱ تراکم حلقه (۱۶۰ حلقه در سانتی‌متر مربع)، سطح ۲ ساختار سلول (مخروطی شکل) و سطح ۱ تراکم سلول (یک سلول یا برجستگی در ابعاد ۱۵×۱۵ mm) تهیه شده



(الف) (ب) (ج)

شکل ۴- تغییر شکل نمونه در اثر اعمال نیروی فشار [۷]: (الف) بدون تغییر شکل، (ب) تغییر شکل متقارن محوری در شکست کوچک و (ج) تغییر شکل سه‌لایه در شکست بزرگ.

جدول ۵- جدول پاسخ برای آزمون ضربه پاندولی.

رتبه	نسبت سیگنال به نویز محاسبه‌شده			سطح بهینه	عوامل
	دلتا	سطح ۲	سطح ۱		
۲	۰/۹	۲۲/۵۱	۲۱/۶۱	۲	ساختار پارچه
۴	۰/۰۳	۲۲/۰۵	۲۲/۰۷	۱	تراکم حلقه
۳	۰/۱۸۵	۲۱/۰۳	۲۲/۴۸	۱	ساختار سلول
۱	۱/۶۴	۲۱/۲۴	۲۲/۸۸	۱	تراکم سلول

Mini-Tab به صورت تعریف شده مقادیر بزرگ‌تر، بهتر است، در جدول ۵ آمده است.

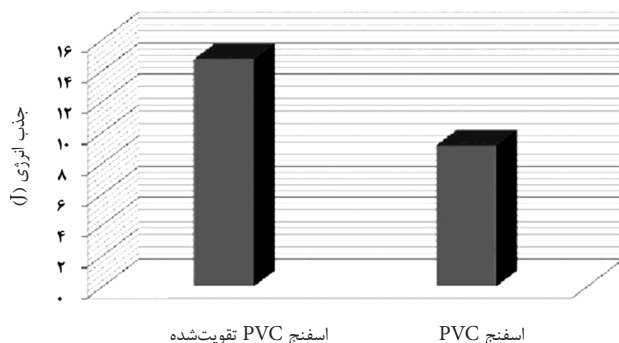
نحوه اثرگذاری پارامترهای ساختار و تراکم سلول‌های سه‌بعدی نسبت به یکدیگر به ترتیب زیر است:

تراکم حلقه > ساختار سلول > ساختار پارچه > تراکم سلول

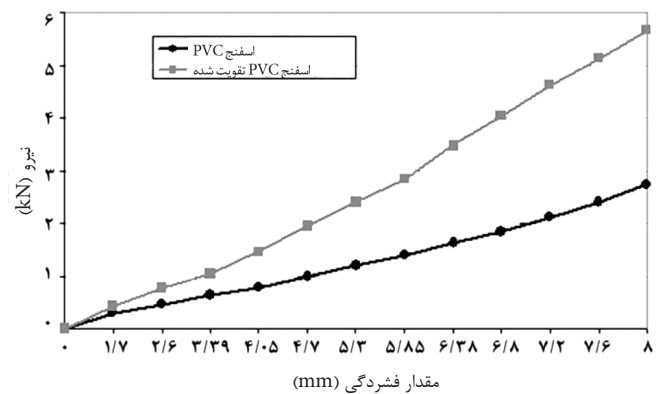
نتایج آزمون ضربه نشان می‌دهد، ساختار پارچه با بافت ریب و تراکم زیاد، ساختار سلول نیم‌کره و تراکم سلول زیاد بهترین نمونه را نتیجه می‌دهد. نتایج حاصل نشان‌دهنده مطلوب‌تر بودن ساختار ریب نسبت به بافت یک‌رو سیلندر ساده برای جذب انرژی است. این مسئله استدلالی شبیه به سازوکار فشار ایستا دارد.

همچنین، افزایش تراکم سلول‌ها در ساختار پارچه موجب افزایش جذب انرژی می‌شود. در آزمون ضربه، اعمال نیرو روی نمونه سریع و ناگهانی اتفاق می‌افتد. از آنجا که نیروی اعمال‌شده موجب تغییر شکل سلول نمی‌شود، سازوکار جذب انرژی از راه توزیع نیرو در سطح سلول‌ها توجیه‌پذیر خواهد بود. هرچه تراکم سلول‌های سه‌بعدی سطح پارچه بیشتر باشد، توزیع بیشتری روی سطح تقویت‌کننده انجام می‌شود. بنابراین افزایش تراکم سلول‌ها، انرژی جذب‌شده را زیاد می‌کند.

برخلاف آزمون فشار شبه‌ایستا که در آن ساختار مخروطی سرفاف به عنوان شکل هندسی بهینه معرفی شد، نتایج آزمون ضربه پاندولی



شکل ۶- مقدار انرژی جذب‌شده برای نمونه با بیشترین مقدار جذب و اسفنج PVC.



شکل ۵- تغییرات نیرو-مقدار فشردگی اسفنج PVC و کامپوزیت تهیه شده از آن (T5).

جذب انرژی می‌شود. بر همین اساس، ساختار ریب اصولاً ساختاری ایده‌آل برای جذب انرژی است.

درباره تراکم حلقه، نتایج حاصل نشان می‌دهد، اثر این پارامتر بر جذب انرژی معنی‌دار نیست. در ساختار سلول‌ها یا شکل‌های سه‌بعدی ایجادشده روی پارچه‌ها، مقاومت در برابر تغییر شکل و توزیع نیروی فشار وارده، اهمیت بسیاری دارند. نتایج حاکی از آن است، شکل مخروطی سرفاف نسبت به شکل نیم‌کره، ظرفیت جذب انرژی بیشتری دارد که این موضوع تأییدی بر نتایج Xue و همکاران [۵] است.

تراکم سلول به معنی تعداد سلول در واحد مساحت است. نتایج آزمون نشان می‌دهد، افزایش تراکم سلول منجر به افزایش مقدار نیروی فشار می‌شود. افزایش تعداد سلول‌ها باعث توزیع نیروی فشار روی تعداد بیشتری از سلول‌ها می‌شود.

بنابراین، به منظور ایجاد تغییر شکل روی سلول‌ها برای رسیدن به کرنش فشاری مدنظر، به نیروی فشار به مراتب بیشتری نیاز است. برای بررسی اثر پارچه سه‌بعدی بر ویژگی‌های فشاری کامپوزیت تهیه شده، منحنی نیرو-مقدار فشردگی نمونه کامپوزیت که شرایط بهینه را در نیروی فشار دارد با منحنی حاصل از آزمون فشار اسفنج PVC مقایسه شد. بر اساس جدول تاگوجی، نمونه T5 در مقایسه با سایر نمونه‌ها، شرایط بهینه را برای جذب انرژی دارد. شکل ۵ نمودار حاصل از آزمون فشار نمونه کامپوزیت و اسفنج PVC را نشان می‌دهد. استفاده از نمونه پارچه سه‌بعدی شده برای تقویت اسفنج PVC منجر به افزایش کار انجام شده و در نتیجه افزایش چقرمگی شده است. از آزمون ANOVA یک‌طرفی برای بررسی معنی‌دار بودن تفاوت چقرمگی بین نمونه PVC و PVC تقویت‌شده با پارچه‌های سه‌بعدی استفاده شده است. نتایج این آزمون، نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر تقویتی پارچه سه‌بعدی شده بر ظرفیت جذب انرژی در کامپوزیت تهیه شده است.

### نتایج آزمون ضربه پاندولی

جدول پاسخ برای نسبت‌های سیگنال به نویز حاصل از نرم افزار



## نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، ظرفیت جذب انرژی در کامپوزیت‌های PVC تقویت شده با پارچه‌های حلقوی شبکه‌گنبدی بررسی شده است. اثر پارامترهایی نظیر نوع سلول یا برجستگی ایجاد شده، تراکم سلول، ساختار پارچه و تراکم بافت روی ظرفیت جذب انرژی در آزمون ضربه با سرعت کم و زیاد، بررسی و بهینه‌سازی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد، ساختار پارچه بیشترین اثر و تراکم حلقه کمترین اثر را بر نیروی فشاری لازم برای فشردگی نمونه دارد. همچنین اثر پارامتر ساختار سلول‌های سه‌بعدی از تراکم سلول‌ها کمتر است. بنابراین، نمونه کامپوزیتی که با ساختار ریب، تراکم حلقه بیشتر (۱۶۰ حلقه در سانتی‌متر مربع)، ساختار سلول مخروطی‌شکل و تراکم سلول بیشتر (یک سلول یا برجستگی در ابعاد ۱۵×۲۱۵ mm) تهیه شده است، بیشترین نیروی فشار را حین آزمون فشار ایستا ایجاد می‌کند که نمونه مطلوب‌تری نسبت به سایر نمونه‌هاست.

نتایج آزمون ضربه پاندولی نیز نشان می‌دهد، بافت ریب با تراکم زیاد، ساختار سلول نیم‌کره و تراکم سلول زیاد بهترین نمونه را نتیجه می‌دهد. همچنین، تراکم سلول بیشترین اثر و تراکم حلقه کمترین اثر را بر انرژی جذب‌شده در آزمون ضربه پاندولی دارد. اثر پارامتر ساختار پارچه نیز از تراکم سلول‌ها کمتر است. نمونه بهینه با نمونه PVC بدون پارچه مقایسه شد که نتایج حاکی از معنی‌دار بودن اثر پارچه حلقوی برای تقویت اسفنج است.

حاکی از آن است که در اعمال ضربه، ساختار کروی انرژی بیشتری را جذب می‌کند.

علت این موضوع بهتر بودن توزیع نیرو در شکل هندسی نیم‌کره در مقایسه با مخروطی سرصاف است [۸]. این اثر را در کلاه‌های ایمنی نیز می‌توان مشاهده کرد که حالت کروی دارند. بنابراین، در کامپوزیت‌های تهیه شده از پارچه‌های سلولی کروی جذب انرژی بیشتری مشاهده می‌شود. افزایش تراکم حلقه نتایج مطلوب‌تری را برای جذب انرژی ایجاد کرده است. در تراکم‌های بیشتر حلقه، به دلیل افزایش سلول‌ها (حلقه‌ها) در ساختار پارچه‌ها، جذب انرژی افزایش می‌یابد. با این حال در مقایسه با سایر پارامترهای بررسی شده، این پارامتر اهمیت کمتری در جذب انرژی دارد.

به منظور بررسی اثر پارچه سه‌بعدی بر خواص ضربه کامپوزیت تهیه‌شده و مقایسه نتایج آزمون ضربه برای کامپوزیت تهیه‌شده و اسفنج PVC نمودار ستونی نمونه کامپوزیت که شرایط بهینه را در آزمون ضربه کسب کرده، با نمودار ستونی حاصل از آزمون ضربه اسفنج PVC مقایسه شده است.

بر اساس جدول تاگوچی، نمونه TV بیشترین مقدار انرژی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها جذب کرده است. شکل ۶ نتایج آزمون ضربه نمونه کامپوزیت مزبور و اسفنج PVC را نشان می‌دهد. از تحلیل ANOVA یک‌طرفی برای بررسی معنی‌دار بودن تفاوت ضربه پاندولی نمونه PVC و PVC تقویت‌شده با پارچه‌های سه‌بعدی استفاده شده است.

## مراجع

1. Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., and Leong K.H., Review of applications for advanced three-dimensional fiber textile composites, *Composite*, 30, 1445-1461, 1999.
2. Verpoest I., Ivens I., van Vuure A.W., Gommers B., Venderuzen P., Efstratiou V., and Phillips D., New developments in advanced textiles for composites, *Proceedings of the 4th Japan International SAMPE Symposium*, 1995.
3. Phillips D., Verpoest I., and van Raemdonk J., 3D-Knitted fabrics for sandwich panels, *Proceedings of Texcomp-3*, 1996.
4. Yu T.X., Tao X.M., and Wu K.Q., Energy absorption of cellular textile composite under impact, *Proc. ICCE/4*, USA, 1997.
5. Xue P., Yu T., and Tao X.M., Flat-Topped conical shell under axial compression, *Int. Mech. Sci.*, 43, 45-212, 2001.
6. Hwan S. and Hwan Chang S., An experimental study on energy absorbing structures made of fabric composites, *Compos. Struct.*, 86, 211-219, 2008.
7. Bannister M. and Herszberg I., *Resin Transfer Molding for Aerospace Structures, Advanced Reinforcements*, London, Chapman and Hall, 1998.
8. Surya Pandita D., Falconet D., and Verpoest I., Impact properties of weft knitted fabric reinforced composites, *Compos. Sci. Technol.*, 62, 1113-1123, 2002.

# Investigation into the Energy Absorption Capacity of Reinforced Composite by 3D weft-knitted Fabrics

R. Hesami, H. Hassani, S. Ajeli\* and A. Zadhoosh

Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, P.O. Box: 84156-83111, Isfahan, Iran

Received 27 July 2011; Accepted 15 October 2011

## Abstract

For many engineering applications, the ability to absorb energy is of highest priority in selection of materials and designing structures, especially structures that go under the impact forces during their application. Body of the vehicles should display high performance to protect passengers against impacts and collisions. This matter, has found double importance with increasing speed and number of vehicles. Auxiliary equipments, such as protective safety helmet, also need to have high energy absorption capacity. Honey combs, sponges, and corals are examples found in nature. Cellular textile composites due to several advantages such as low weight, high strength and energy absorption are frequently used. In this paper, energy absorption capability of PVC-foam reinforced by 3D weft-knitted fabrics has been examined. The energy absorption of 3D weft-knitted fabric composites was investigated based on their tensile and compression properties. From the test results it was found that the foam filled composite egg-box panels showed good energy absorption capacity with smooth stress-strain curves which resembles the ideal energy absorber.

energy absorption,  
3D weft-knitted fabrics,  
PVC foam,  
polymer composite,  
impact properties

(\* ) Address Correspondence to S. Ajeli, Email: sajeli@cc.iut.ac.ir