

شبیه سازی آزمون کشش متمرکز بر روی پارچه های بی بافت اسپان باند به روش اجزای محدود

مرتضی ودود

دانشکده نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

mortezaavadood@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۲/۰۹ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

چکیده

پارچه های بی بافت در حال حاضر در طیف وسیعی از صنایع مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه به اینکه این پارچه ها مانند پارچه های بافته یا حلقوی فرآیند بافت ندارند، بررسی رفتار آن ها تحت بارهای مختلف همواره از موضوعات مهم در مهندسی نساجی بوده است. مقالات زیادی در مورد رفتار این پارچه ها هنگام قرار گرفتن در معرض نیروهای توزیع شده منتشر شده است، اما مطالعات کمتری روی بارهای متمرکز انجام شده است. بنابراین، در این مقاله سعی شده است تا رفتار پارچه های بی بافت پلی پروپیلن اسپان باند در آزمون کشش متمرکز شبیه سازی شود. برای این منظور، چهار پارچه به وزن های 60 g/m^2 ، 70 g/m^2 ، 90 g/m^2 و 105 g/m^2 تهیه و رفتار هر پارچه در سه جهت به نام های راستای طولی دستگاه (تولید پارچه ها در آن راستا از دستگاه می باشد)، عرض دستگاه (راستای عمود بر راستای طولی) و جهت مورب (راستای قطری بین راستای طولی و عرضی) اندازه گیری شد. در ادامه، پارچه به صورت کامپوزیت لایه ای مدل سازی گردید که در آن رفتار هر لایه با رفتار پارچه در یکی از جهت های ذکر شده تعیین می گردید. نهایتاً، خطا در تخمین مقاومت پارچه بین شبیه سازی ها و آزمایش های کشش متمرکز واقعی حدود ۱ تا ۱۷ درصد مشاهده شد.

کلمات کلیدی: روش اجزای محدود، بی بافت اسپان باند، ساختار لایه ای، بار متمرکز، آزمون کشش

Simulation of concentrated tensile test on the spunbond nonwoven fabrics using finite element method

Morteza Vadood

Department of Textile Engineering, Yazd University, Yazd, Iran,

mortezaavadood@yazd.ac.ir

Abstract

Nonwoven fabrics are now used in a wide range of industries. Given that these fabrics do not have a weaving process like woven or knitted fabrics, investigating their behavior under different loads has always been an important topic in the textile engineering. Many papers have been published on the behavior of these fabrics when subjected to the distributed forces, but less studies have been conducted on the concentrated ones. Thus, the behavior of spunbond polypropylene nonwoven fabrics in the concentrated tensile test has been attempted to be simulated in this paper. To this aim, four fabrics weighing 60 g/m^2 , 70 g/m^2 , 90 g/m^2 , and 105 g/m^2 were prepared, and the behavior of each fabric was measured in three directions known as the machine direction (production of fabrics is in that direction of machine), machine cross direction (direction perpendicular to the machine direction), and diagonal direction (diagonal direction between machine and cross directions). The fabric was then modeled as a layered composite, where each layer was determined by the fabric behavior in one of the mentioned directions. Finally, the error in estimating the fabric strength between the simulations and actual concentrated tensile tests was observed to be about 1 to 17%.

Keyword: Finite Element Method, Spunbond Nonwoven, Layered Structure, Concentrated Load, Tensile Test

۱. مقدمه

در مقایسه با سایر پارچه‌ها، منسوجات بی‌بافت را می‌توان با هزینه و پیچیدگی کمتری ساخت. در نتیجه، امروزه از آن‌ها در طیف وسیعی از صنایع از جمله کشاورزی، خودروسازی، پوشاک، بهداشت و تولید فیلتر استفاده می‌شود. چگونگی واکنش منسوجات به انواع مختلف بارهای متمرکز یا توزیع شده، مانند کششی، فشاری، خمشی، پیچشی، برشی و غیره یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مهندسی نساجی است. بنابراین مطالعه نحوه رفتار سازه‌های لیفی تحت بارهای مختلف امری اجتناب‌ناپذیر است. تاکنون نیز مقالات متعددی در این زمینه در رابطه با بارهای گسترده (باری که در امتداد یک خط و یا در یک ناحیه اعمال می‌شود) منتشر شده است. به عنوان مثال، مجموعه آزمایش‌هایی با اعمال بارگذاری گسترده برای نشان دادن رفتار پیچشی نخ به دلیل کشش الیاف، خمش، پیچش و تغییرات توزیع تنش- کرنش در ابعاد محوری و جانبی نخ ارائه شده است [۱]. همچنین مقاله‌ای راجع به تحقیقات نظری و تجربی در مورد تغییر شکل ناشی از کاسه اندازی پارچه طی بارگذاری گسترده به چاپ رسیده است و بر اساس ویژگی‌های همسانگرد و ناهمسانگرد پارچه، سعی شده است رفتار کاسه اندازی پارچه به توزیع تنش مرتبط شود [۲]. یا در تحقیقی دیگر، بر اساس رفتار فشاری، کششی، خمشی و برشی از طریق بارگذاری گسترده، تلاش شده است تا تأثیر سطح مقطع الیاف بر روی رفتار مکانیکی پارچه ارزیابی شود [۳]. اخیراً نیز در یک تحقیق، با استفاده از نخ‌های پود مختلف، پارچه‌های تار-پودی تولید شده و رفتار برشی آن‌ها در بارگذاری گسترده از منظر معیارهایی مانند مدول و هیستریزس برشی بررسی شده است [۴]. اما نوع دیگر بارگذاری نیز وجود دارد که از

نوع متمرکز بوده و کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همان‌طور که از نام آن پیداست در اینجا، بار اعمالی به صورت متمرکز و یا در ناحیه‌ای بسیار محدود بر روی نمونه اعمال می‌شود. نیروهای اعمالی بر پارچه به‌واسطه نخ دوخت در محل درز، مواردی که پارچه به‌واسطه حضور دکمه یا محل اتصال (مانند دستگیره در کیف‌های بسته‌بندی و تبلیغاتی) تحت تنش متمرکز قرار می‌گیرد، عملاً نمونه‌ای از این نوع بارگذاری هستند. در گذشته نیز با استفاده از بارگذاری متمرکز بر روی پارچه‌های تار-پودی خواص کششی، برشی و خمشی آن‌ها مطالعه شده است [۵]. یا در تحقیقی دیگر، از همین روش برای بررسی پارچه‌های بی‌بافت استفاده شده و ۱۰ شاخص از نمودار نیرو-ازدیاد طول پارچه، تحت بارگذاری متمرکز معرفی شده است [۶].

اما از سوی دیگر، با توجه به پیشرفت‌های فناوری در سال‌های اخیر، نرم‌افزارهای مهندسی گوناگونی برای شبیه‌سازی انواع فرآیندها به‌طور گسترده توسعه یافته‌اند. نرم‌افزار مبتنی بر روش اجزا محدود^۱ (FEM) یکی از این نرم‌افزارها می‌باشد. در این روش، نمونه‌ای که مورد بارگذاری است به قطعات کوچکی که به عنوان یک جز شناخته می‌شود، تجزیه می‌گردد و نهایتاً پاسخ نمونه به بارگذاری، با تعمیم پاسخ‌های این اجزا به دست می‌آید [۷]. این روش برای تجزیه و تحلیل چگونگی واکنش اجسام مختلف به بارهای مکانیکی فوق‌العاده مؤثر عمل می‌نماید. شایان ذکر است که این روش، توسط محققان بسیاری در زمینه‌های نساجی و برای مدل‌سازی رفتار پارچه اتخاذ شده است. به عنوان مثال، به منظور شبیه‌سازی رفتار آویزش لباس روی بدن انسان، محققین افتایش پارچه را از حالت افقی با کمک FEM

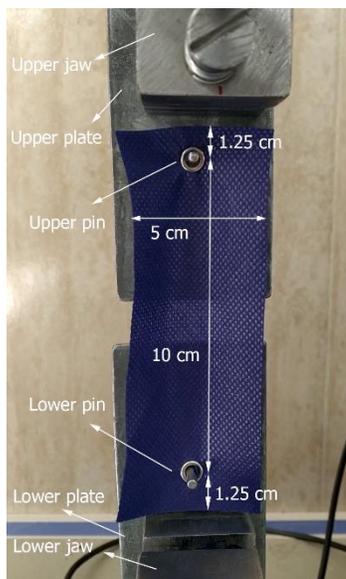
¹ Finite Element Method

[۱۷]. همچنین در تحقیقی دیگر، از FEM برای شبیه سازی فرآیند خمش کامپوزیت های دولایه با طرح لانه زنبوری ساخته شده از پارچه تار-پودی سه بعدی، استفاده شده است [۱۸]. حتی یک شبیه سازی مبتنی بر FEM برای تجزیه و تحلیل رابطه بین توزیع فشار در پارچه شلوار (روی زانو) و جابجایی سطح بدن و همچنین تعیین پارامترهای اثرگذار بر این رابطه، معرفی شده است [۱۹]. برخی از محققین رفتار پارچه های بی بافت اسپان باند را در برابر بارهای برشی با استفاده از FEM شبیه سازی کرده اند [۲۰] و یا در مقاله دیگری، برای شبیه سازی رفتار پارچه های تار-پودی در قالب منحنی تنش- کرنش در آزمایش کشش، از FEM استفاده نموده اند [۲۱]. حتی به منظور درک تغییرات هندسی که به صورت تغییر شکل پلاستیک در حین فرآیند فشرده سازی در پارچه های حلقوی تار اسپیسر رخ می دهد نیز از FEM استفاده شده است [۲۲]. همچنین در مقاله ای دیگر، پیش بینی خواص خمشی کامپوزیت های سیمانی تقویت شده با پارچه از طریق FEM به نتایج قابل قبولی رسیده است [۲۳]. البته شایان ذکر است که مقالات بی شماری در مورد استفاده از FEM وجود دارد که در اینجا تنها به تعدادی از آنها اشاره شده است.

در هر صورت، تمام کارهای اشاره شده در بالا در این واقعیت مشترک هستند که نتایج حاصل از FEM با نتایج تجربی همخوانی خوبی دارد و یا به عبارتی دیگر، خطای آن کم است. ضمناً لازم به ذکر است که با توجه به اطلاعات نویسنده، مقاله ای در مورد بارگذاری متمرکز و رفتار پارچه در چنین شرایطی با استفاده از FEM تاکنون به چاپ نرسیده است. بنابراین در این مقاله، سعی شده است تا رفتار پارچه های بی بافت تحت بار

مدل سازی کرده اند [۸]. در تحقیقی دیگر، برای درک تعاملات مکانیکی-دینامیکی بین بدن انسان و لباس، مطالعه توزیع سه بعدی فشار، تنش و تغییر شکل در لباس با استفاده از FEM انجام گرفته است [۹]. برای بررسی رفتار تنش-کرنش در یک سلول واحد از کامپوزیت، یک سلول واحد از منسوجات متعامد سه بعدی شبیه سازی شده و با استفاده از FEM رفتار آن زیر بار فشاری ارزیابی شده است [۱۰]. در مطالعه ای دیگر، به منظور بررسی رفتار پارگی در نخ های مولتی فیلامنتی بر اساس معیار حداکثر تنش قابل تحمل، هر تک فیلامنت از نخ مولتی فیلامنتی کربن را با استفاده از FEM تحت بارگذاری مورد تحقیق قرار داده اند [۱۱]. در مقاله ای دیگر، فرآیند ضربه بالستیک را بر روی کامپوزیت های متعامد سه بعدی ساخته شده از پارچه کولار و رزین اپوکسی با استفاده از FEM شبیه سازی کرده اند [۱۲]. تعدادی از محققین، رفتار پارچه های بی بافت را در قالب نمودار نیرو-جابجایی در آزمایش ترکیدگی از طریق FEM شبیه سازی نموده اند [۱۳]. قابل ذکر است از FEM برای شبیه سازی فرآیند کاسه اندازی پارچه تکمیل شده با استنتر نیز استفاده شده است [۱۴]. همچنین محققین، یک مدل بر اساس FEM در مقیاس مزو برای تجزیه و تحلیل مکانیسم های شکست و آسیب در کامپوزیت های حلقوی دو محوره توسعه داده اند [۱۵]. از طرفی دیگر، روش های ارزیابی مختلفی بر مبنای FEM توسعه داده شده تا از طریق آنها بتوان آسیب پیش رونده در کامپوزیت های چندلایه کربن/اپوکسی تحت بارهای کششی را شبیه سازی و مطالعه نمود [۱۶]. اخیراً نیز مراحل افتایش و فشرده گی کامپوزیت های ساخته شده از پارچه تار-پودی و پلاستیک تقویت شده با الیاف کربن از طریق FEM، به چاپ رسیده است

دادن پین‌ها از داخل پرچ‌ها، نمونه بین فک‌ها، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، درگیر می‌شود. فک بالا با سرعت 10 mm/min به سمت بالا حرکت می‌کند، در حالی که فک پایین ثابت می‌ماند. در این تحقیق نیز از همین روش استفاده شده است. قابل ذکر است که شبهه‌سازی FEM برای نمونه‌ها یا اجسام کوچک‌تر به اجزا کمتر یا کوچک‌تر نیاز دارد که این امر، عملاً باعث کوتاه شدن زمان شبهه‌سازی و افزایش دقت می‌شود.



شکل ۱ - نحوه قرارگیری نمونه در آزمون کشش متمرکز

۲-۳- مدل FEM

مدلی در نرم‌افزار ABAQUS برای شبهه‌سازی آزمون کشش متمرکز، همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، توسعه داده شد. به منظور سادگی و بهبود ساماندهی مش‌ها، تصمیم به مدل‌سازی سوراخ‌ها به صورت مربع‌هایی با ضلع $4/2 \text{ mm}$ گرفته شد. به روشی مشابه نیز، پین‌ها به صورت مربع‌هایی با ضلع‌های $0/5 \text{ mm}$ در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که این ساده‌سازی تأثیری بر نتایج نخواهد داشت. زیرا اندازه سوراخ‌ها و

متمرکز در قالب آزمون کشش شبهه‌سازی شود. این مطالعه می‌تواند به محققین به منظور درک بهتر رفتار پارچه‌های بی‌بافت در این نوع شرایط بارگذاری کمک کند.

۲. تجربیات

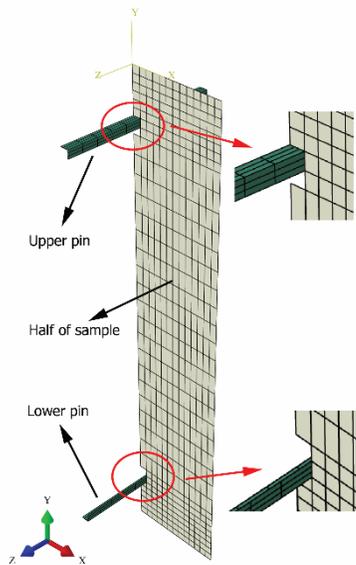
۲-۱- آزمون کشش

چهار پارچه بی‌بافت پلی‌پروپیلن اسپان‌باند به وزن‌های 60 ، 70 ، 90 و 105 g/m^2 برای این تحقیق از کارخانه حریر بافت، تهران، ایران تهیه شد. برای هر پارچه، داده‌های تنش-کرنش مطابق با استاندارد BS-2576 [۲۴] به دست آمد. این روش شامل قرار دادن یک نمونه پارچه $20 \times 5 \text{ cm}$ بین فک‌های دستگاه آزمون کشش است که فک بالایی با سرعت 50 mm/min به سمت بالا حرکت می‌کند در حالی که فک پایین ثابت می‌ماند. تغییر شکل عرضی نمونه در قسمت خطی منحنی تنش-کرنش به منظور محاسبه نسبت پواسون اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که آزمایش تا پاره شدن نمونه‌ها ادامه داشت. همچنین ضخامت هر نمونه بر اساس استاندارد ASTM-D5729 [۲۵] بر روی سطح دایره‌ای به قطر یک اینچ در زیر 100 گرم فشار اندازه‌گیری گردید.

۲-۲- آزمون کشش متمرکز

محققین روشی را برای بارگذاری متمرکز معرفی کرده‌اند که در آن نمونه‌ای به طول $12/5 \times 5 \text{ cm}$ تهیه می‌شود [۶]. سپس یک پرچ $4/2 \text{ mm}$ روی خط مرکزی نمونه و با فاصله $1/25 \text{ cm}$ از هر لبه (در امتداد طول نمونه) قرار داده می‌شود. در ادامه، صفحه‌ای فلزی که یک پین عمودی (قطر $0/5 \text{ mm}$) روی آن جوش داده شده در هر فک دستگاه آزمون کشش قرار می‌گیرد. نهایتاً، با عبور

مدل سازی اعمال شده آن است که تماس بین پین و پارچه به عنوان یک گره (فاقد سر خوردگی) در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ - مدل توسعه یافته برای شبیه سازی آزمون کشش

متمركز در حالت نیمه (مقارن نسبت به محور Y)

۲-۴- تعریف ماده در FEM

در تجزیه و تحلیل اجزای محدود، مواد با استفاده از روش های مختلفی تعریف می شوند. تعیین رفتار مواد بر اساس پاسخ تنش- کرنش مواد انعطاف پذیر تا نقطه شکست، یکی از پرکاربردترین رویکردها است (شکل ۳). در این روش ناحیه الاستیک با ناحیه 0-a، ناحیه رفتار پلاستیک با ناحیه a-b، ادامه رفتار پلاستیک در صورت عدم آسیب توسط ناحیه b-d و ناحیه آسیب با ناحیه b-e نمایش داده می شود. مسلماً اگر آسیب تعریف نشده باشد، رفتار ماده در ناحیه b-d ادامه می یابد. اما اگر ویژگی آسیب در نظر گرفته شود، رفتار ماده به دنبال منطقه a-b وارد منطقه b-e می شود. شاخص عددی آسیب^۲ (SDEG) یا D دارای حداکثر مقدار ۱ است که نشان دهنده شکستگی کامل است و مقدار

پین ها در مقایسه با اندازه نمونه پارچه بسیار کوچک است. علاوه بر این، با توجه به مقارن بودن نمونه نسبت به محور Y در این آزمایش، تنها نیمی از نمونه در شبیه سازی در نظر گرفته شده است. در نتیجه، به اجزا کمتری نیاز خواهد بود و مدت زمان شبیه سازی نیز کوتاه تر می شود. البته نتایج به دست آمده از مدل برای مقایسه با نتایج واقعی دو برابر خواهد شد.

ابعاد اجزا در روش FEM بسیار مهم است اما استفاده از المان کوچک در تمام مدل، زمان اجرای مدل را به شدت افزایش می دهد و همچنین نیاز به کامپیوتری با توان محاسباتی بالاتر خواهد بود. لذا با توجه به اینکه در آزمون کشش فک بالا متحرک و فک پایین ثابت می باشند، و پارچه تنها در دو نقطه تحت کشش است عملاً در آزمایش های واقعی مشاهده شد که بیشترین تغییر شکل ها در اطراف نواحی اعمال بار رخ می دهند (اطراف پین ها) و نواحی مرکزی تنها تغییر شکل کششی را متحمل می شوند. لذا همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، اجزا در انتهای نمونه و اطراف پین ها ابعاد کوچکتری دارند، از این رو بهتر می توانند اشکال پیچیده تغییر شکل را نمایش دهند. از طرف دیگر، اجزا بزرگتر برای نواحی مرکزی نمونه انتخاب شدند، زیرا تغییر شکل های پیچیده ای در این قسمت مشاهده نمی شود و این امر نیاز به اجزا کوچکتر را از بین می برد. ذکر این نکته ضروری است که برای هر پین ۶۰ جز از نوع R3D4 و برای نمونه پارچه ۴۶۴ جز از نوع S4R در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، مدل سازی پین به طور کامل در ناحیه ای که پین با نمونه تعامل ندارد، ضروری نیست. فقط نیمه بالایی پین بالا و نیمه پایینی پین پایین با پارچه در تماس است و به دلیل تقارن مدل، فقط یک چهارم پین نیاز به مدل سازی دارد. نکته دیگری که در

² Scalar stiffness degradation

راستای طولی مدل شده است و به عنوان یک لایه با ضخامت X در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴.ب پارچه را به صورت دو لایه نشان می‌دهد که یک لایه از خواص MD و یک لایه از خواص در جهت عرض ماشین^۴ (CD) یا اصطلاحاً راستای عرضی تبعیت می‌کند. اما در شکل ۴.ج، پارچه بی‌بافت به صورت سه لایه نشان داده شده است که هر کدام ضخامتی معادل یک سوم کل پارچه دارند و هر لایه از پارچه بی‌بافت در جهت خاصی از پارچه واکنش نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

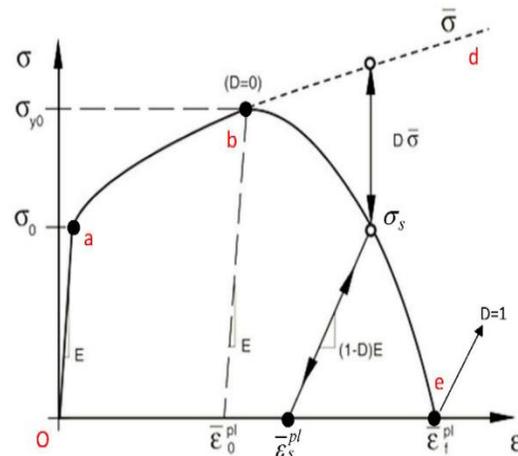
پارامترهای نمونه، مانند ضخامت، نسبت پواسون (بر اساس معادله ۲ در ناحیه الاستیک) و مدول یانگ (بر اساس معادله ۳ در ناحیه الاستیک) برای هر پارچه در هر جهت، در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. اگرچه نمونه‌ها از یک کارخانه تهیه شده‌اند، اما می‌توان مشاهده کرد که برای مثال، با افزایش وزن هیچ روند خاصی در داده‌ها ظاهر نمی‌شود (این موضوع مربوط به تنظیمات خط تولید است). علاوه بر این، شکل ۵ داده‌های تنش-کرنش را برای نمونه‌ها در جهات مختلف نشان می‌دهد.

$$\nu = \frac{\mathcal{E}_{Transverse}}{\mathcal{E}_{Axial}} \quad (2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

حداقل ۰ که نشان دهنده عدم آسیب است. از معادله ۱ می‌توان برای دستیابی به مقدار D استفاده کرد [۷]. کرنش پلاستیک، که به عنوان کرنش شکستگی نیز شناخته می‌شود، در نقطه b اساساً شروع مرحله آسیب تدریجی است.

$$\sigma_s = (1-D)\bar{\sigma} \quad (1)$$



شکل ۳ - منحنی تنش-کرنش مواد انعطاف‌پذیر، E : مدول یانگ،

$\bar{\epsilon}_0^{pl}$: کرنش پلاستیک معادل، $\bar{\epsilon}_f^{pl}$: کرنش پلاستیک معادل در

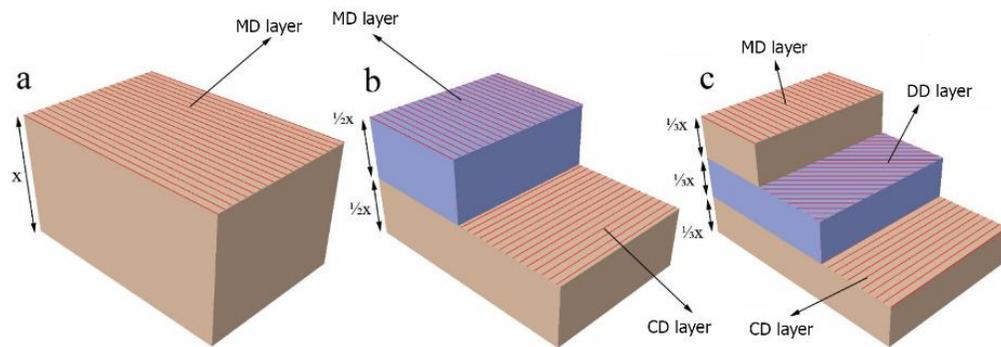
هنگام شکست

۵-۲- ساختار بی‌بافت

در واقع، پارچه‌های بی‌بافت اسپان‌باند از لایه‌هایی از الیاف درهم‌تنیده تشکیل شده‌اند که در هر جهت متفاوت رفتار می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، این مشخصه می‌تواند برای شناسایی آن‌ها به عنوان یک کامپوزیت لایه‌ای استفاده شود [۲۶]. به عنوان مثال، پارچه بی‌بافت در شکل ۴.الف منحصرأ بر اساس رفتار در جهت ماشین^۳ (MD) یا اصطلاحاً

⁴ Cross direction

³ Machine direction

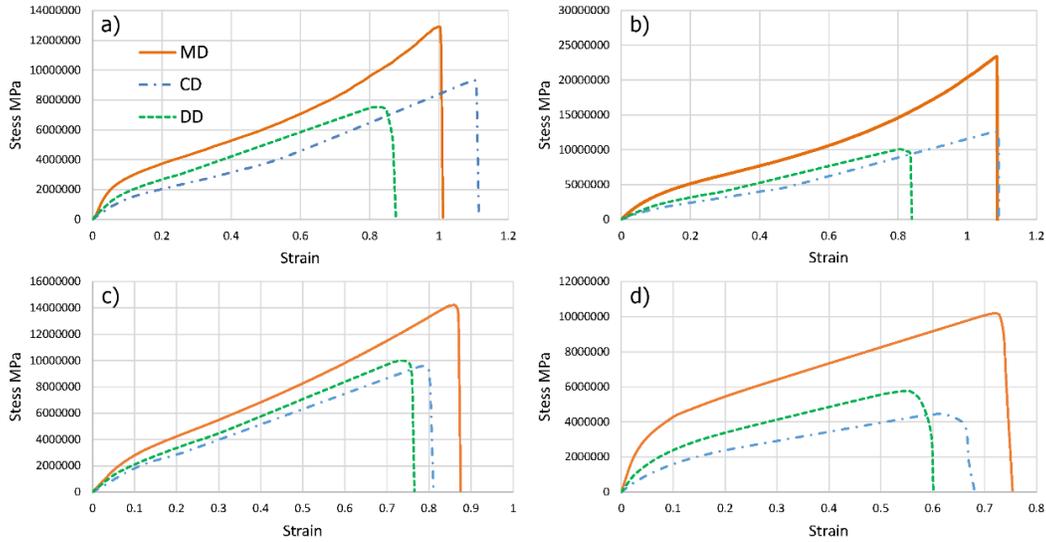


شکل ۴ - نمای شماتیک ساختار بی‌بافت در لایه‌های مختلف، الف) تک، ب) دوتایی، ج) سه‌تایی؛ DD: در امتداد جهت مورب (۴۵ درجه) بین

CD و MD

جدول ۱ - مشخصات نمونه‌های بی‌بافت

وزن (g/m^2)	ضخامت (mm)	جهت	مدول یانگ (MPa)	ضریب پواسون
60	0.39	MD	4.3	0.45
		CD	1.6	0.22
		DD	2.4	0.3
70	0.39	MD	4.2	0.33
		CD	1.7	0.22
		DD	2.3	0.18
90	0.55	MD	3.3	0.44
		CD	1.8	0.29
		DD	2.6	0.25
105	0.45	MD	8.6	0.22
		CD	2.2	0.1
		DD	4.0	0.12



شکل ۵ - منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های بی‌باخت در جهت مختلف؛ الف) ۶۰، ب) ۷۰، ج) ۹۰ و د) 105 g/m^2

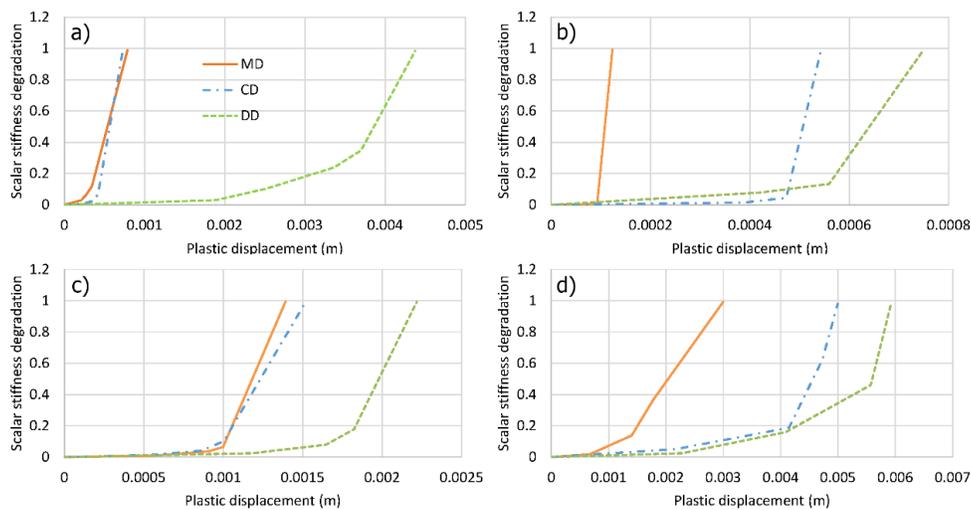
هر جهت مطابق جدول ۲ و شکل ۶ محاسبه شد.

مطابق با توضیحات قبلی و با توجه به داده‌های شکل ۵،

پارامترهای مربوط به مرحله آسیب پیش‌رونده برای هر نمونه در

جدول ۲ - کرنش شکست نمونه‌های بی‌باخت در هر جهت

جهت	وزن (g/m^2)			
	60	70	90	105
MD	0.7	0.53	0.43	0.60
CD	0.52	0.37	0.26	0.43
DD	0.51	0.36	0.35	0.39



شکل ۶ - شاخص عددی آسیب برای هر نمونه در جهت مختلف؛ الف) ۶۰، ب) ۷۰، ج) ۹۰ و د) 105 g/m^2

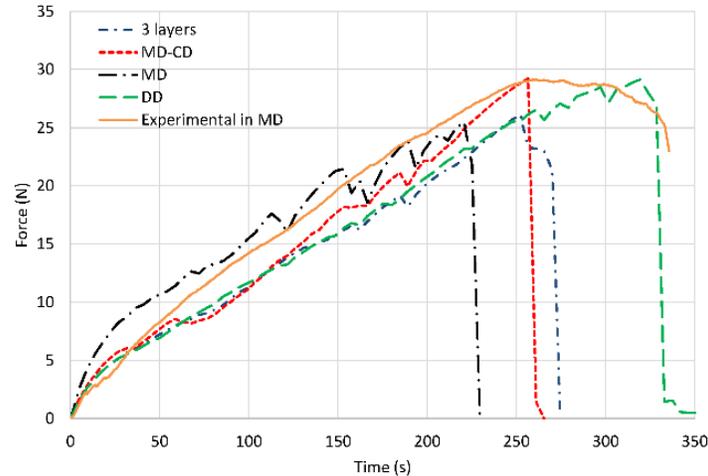
لازم به ذکر است که شکل ۶ فقط مربوط به مرحله آسیب پیش‌رونده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر و تقریباً حداقل ازدیاد طول قبل از پارگی برای هر پارچه در جهت قطری و جهت طول ماشین است. بنابراین، ساختار بی‌باخت عملاً با این مفهوم که پارچه بی‌باخت مانند یک کامپوزیت لایه‌لایه است، سازگار می‌باشد. لذا، پارچه‌ها علاوه بر اینکه به عنوان یک لایه همسانگرد واحد در نظر گرفته می‌شوند، همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، به عنوان ساختارهای دو لایه و سه لایه نیز برای مدل‌سازی در نظر گرفته شدند. MD-CD-DD تنها حالت برای در نظر گرفتن پارچه بی‌باخت، به عنوان یک ساختار سه لایه است. سایر ترکیبات دو لایه ممکن عبارتند از MD-CD، MD-DD و CD-DD. لازم به ذکر است که تغییر موقعیت لایه‌ها نسبت به یکدیگر، نتیجه را تغییر نمی‌دهد. از یک کامپیوتر با پردازنده Intel Core i7 و 16 GB RAM برای شبیه‌سازی آزمون‌های کشش متمرکز استفاده شد. از سوی دیگر، سه آزمون کشش متمرکز واقعی برای هر پارچه انجام گردید، به طوری که طول نمونه یک بار در راستای MD، یک بار در راستای CD و یک بار در راستای DD بود. خطای نسبی بین بیشترین مقاومت پارچه در شبیه‌سازی و آزمایش واقعی محاسبه و به عنوان

$$Error = \frac{|F_{sim} - F_{real}|}{F_{real}} \times 100 \quad (4)$$

جدول ۳ بیشترین نیروها را در آزمایش‌های شبیه‌سازی و واقعی نشان می‌دهد. بر این اساس، به عنوان مثال، نزدیک‌ترین نتیجه شبیه‌سازی با یک ساختار تک لایه به آزمون کشش متمرکز واقعی پارچه 60 g/m^2 در حالت MD، حالتی است که مدل پارچه فقط از خواص رفتاری DD پیروی می‌کند (۰.۰۳٪ خطا). همچنین، بهترین نتیجه شبیه‌سازی با ساختار دو لایه، حالت MD-CD (۰.۲۴٪ خطا) است و خطا در شبیه‌سازی با ساختار سه لایه نیز ۱۰.۳۲٪ بوده است. شکل ۷ نتایج ذکر شده را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که وقتی پارچه به عنوان یک لایه واحد با خواص در حالت عمودی شبیه‌سازی می‌شود، خطا تقریباً به ۱۲.۵٪ می‌رسد. این نشان می‌دهد که رفتار پارچه در جهات دیگر نیز در این نوع بارگذاری بسیار مؤثر هستند و نمی‌توان پارچه را منحصرأ به عنوان تابعی از جهت نمونه‌برداری فرض کرد.

جدول ۳ - بیشترین نیروهای اندازه‌گیری شده از پارچه‌ها در تمام آزمون‌های کشش متمرکز

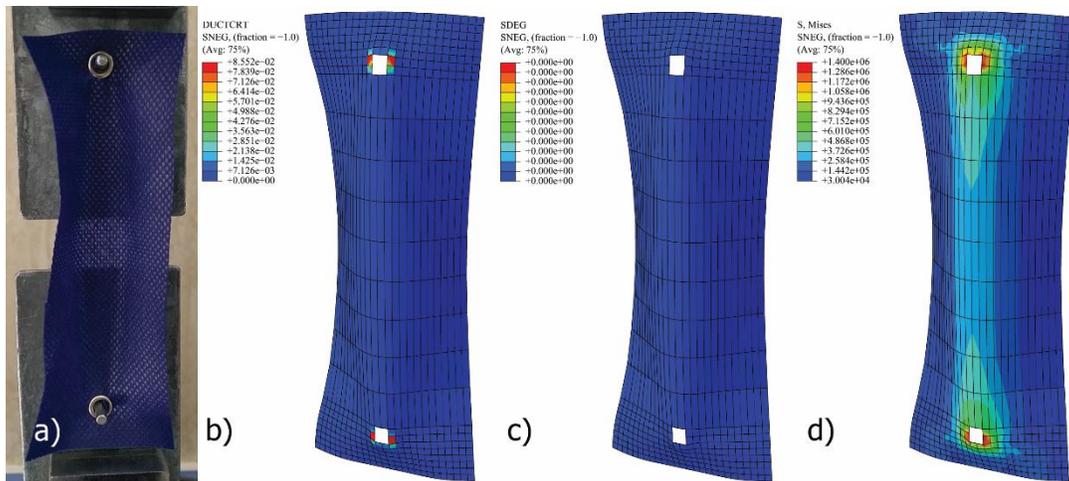
Weight (g/m ²)	Real test in different directions			Simulated tests with different structures						
	MD	CD	DD	3 layers	MD-CD	MD-DD	CD-DD	MD	CD	DD
60	29.15	35.49	32.43	26.14	29.22	27.30	29.54	25.51	24.21	29.14
70	36.9	47.25	37.64	33.89	42.15	35.53	26.41	54.24	30.24	22.06
90	46.13	51.07	44.98	41.85	55.03	55.75	44.76	58.48	38.32	51.67
105	26.3	38.61	29.19	33.75	36.83	39.71	29.51	46.55	26.53	32.62



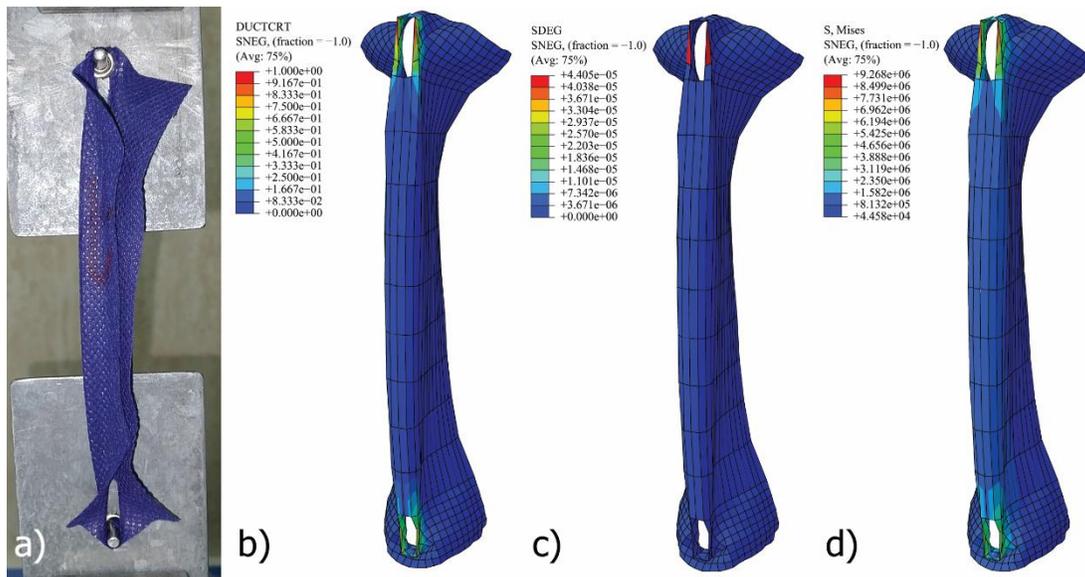
شکل ۷ - نتایج تجربی و FEM برای نمونه با وزن 60 g/m^2

($SDEG > 0$). عناصری که SDEG آن‌ها برابر با ۱ است حذف می‌شوند و به این ترتیب پارگی در پارچه شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۱۰ دقیقاً لحظه‌ای را نشان می‌دهد که پارچه بیشترین مقاومت را در شبیه‌سازی نشان داده است و حذف برخی از اجزا اطراف پین بالایی نشان می‌دهد که پارگی در واقع در آنجا رخ داده است. شکل ۱۱ لحظه پارگی را در آزمایش واقعی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد. اگرچه رفتار پارچه در هر دو آزمایش نزدیک به هم است، اما پارگی در هر دو به طور همزمان رخ نداده است. این اختلاف زمانی را می‌توان بیشتر به غیریکنواختی پارچه بی‌بافت نسبت داد. در شبیه‌سازی، پارچه بی‌بافت لایه‌لایه فرض شده و هر لایه نیز کاملاً همگن فرض شده است. ولی در واقعیت، توزیع الیاف در پارچه بی‌بافت یکنواخت نیست و از یک ناحیه به ناحیه دیگر تغییر می‌کند.

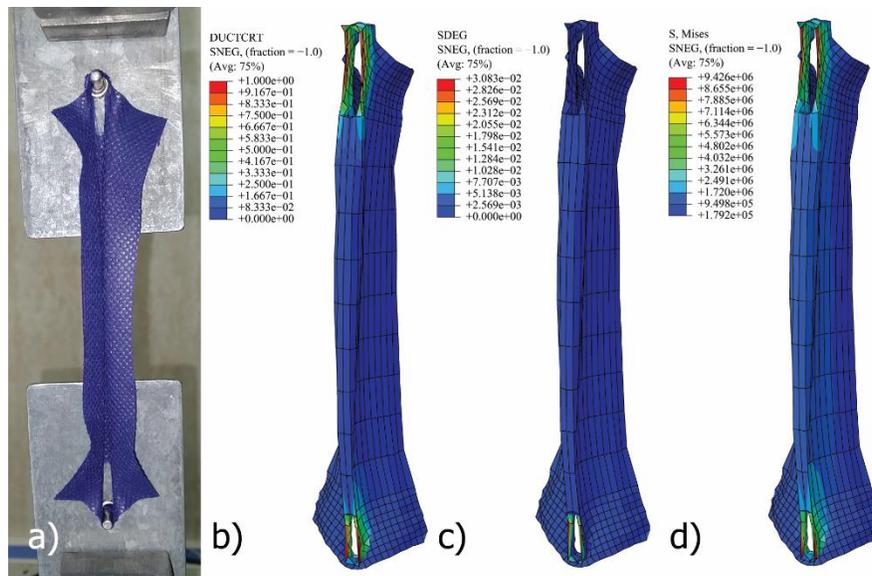
تصاویر لحظات مختلف در آزمایش‌های شبیه‌سازی شده ساختار دوگانه MD-CD و واقعی مربوط به نمونه‌برداری در راستای MD، برای پارچه به وزن 60 g/m^2 در شکل‌های ۸ تا ۱۲ نمایش داده شده‌اند. هنگامی که شاخص DUCTCRT یک جز به ۱ می‌رسد، آسیب در آن جز مربوطه شروع می‌شود. لذا، شاخص DUCTCRT درصد رسیدن به لحظه شروع مرحله آسیب را نشان می‌دهد. در طول آزمایش، مشاهده شد که پارچه در راستای طولی خود تا می‌شود، بنابراین ترجیح داده شد که تصاویر شبیه‌سازی از نمای عقب نمایش داده شوند تا توزیع شاخص‌ها بهتر قابل مشاهده باشد. علاوه بر این، پین‌ها از تصاویر شبیه‌سازی حذف شده‌اند تا رفتار پارچه بهتر مشخص شود. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در ثانیه ۱۵۳ اولین نشانه‌های آسیب در اجزا کنار پین بالایی ظاهر می‌شود



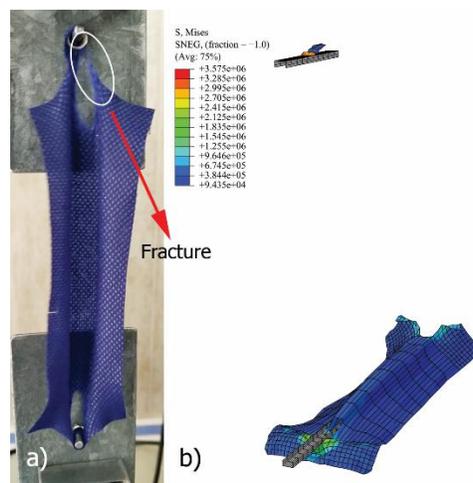
شکل ۸ - تصاویر آزمون کشش متمرکز در ثانیه ۱۸، الف) آزمایش واقعی، ب) معیار شروع آسیب، ج) شاخص عددی آسیب، د) توزیع تنش



شکل ۹ - تصاویر آزمون کشش متمرکز در ثانیه ۱۵۳، الف) آزمایش واقعی، ب) معیار شروع آسیب، ج) شاخص عددی آسیب، د) توزیع تنش



شكل ۱۰ - تصاویر آزمون ككش متمرکز در ثانیه ۲۵۶، الف) آزمون واقعی، ب) معیار شروع آسیب، ج) شاخص عددی آسیب، د) توزیع تنش



شكل ۱۱ - تصویر لحظه پایانی آزمون ككش متمرکز، الف) آزمون واقعی در ثانیه ۳۲۰، ب) آزمون شبيه سازى شده در ثانیه ۲۶۱

در پارچه 1.05 g/m^2 ، خطاهایی کمتر از ۵٪ مشاهده می شود. دلیل این امر را همان طور که پیش تر اشاره شد می توان به وزن پارچه نسبت داد. چرا که با سنگین تر شدن پارچه، نقاط درگیری و سطح تماس بین الیاف افزایش می یابد و پارچه دارای انسجام بیشتری خواهد بود و نهایتاً، توزیع جرمی الیاف در آن یکنواخت تر است. در شبيه سازى نیز فرض شده است که لایه های پارچه به

خطاهای مقاومت پارچه برای وزن های مختلف در شبيه سازى ها و آزمون های واقعی مرتبط در جداول ۴ تا ۷ نشان داده شده اند. با نگاهی اجمالی به جداول، مشخص می شود که حداقل خطای شبيه سازى برای نمونه پارچه در جهت CD، وقتی که پارچه ها سبک تر از 70 g/m^2 هستند، خیلی پایین نمی باشد. اما با سنگین تر شدن پارچه ها این خطا کاهش می یابد. به عنوان مثال،

واقعی به ازای نمونه برداری در جهت CD نشان می دهد. اما وقتی که نمونه گیری پارچه ها در جهت های MD و DD باشد، ساختار CD-DD خطاهای پایین را به ازای هر وزن از پارچه به دست می دهد. البته باید توجه شود که ساختار MD-DD باید به جای ساختار CD-DD فقط در پارچه 70 g/m^2 در نظر گرفته شود. بنابراین، ساختارهای لایه ای مانند کامپوزیتها می توانند برای شبیه سازی پارچه های بی یافت در مدل سازی آزمون کشش متمرکز استفاده شوند و ساختارهای دوتایی می توانند نتایج قابل قبولی را در شبیه سازی رفتار پارچه ارائه دهند.

صورت یکنواخت هستند. لذا با سنگین تر شدن پارچه، نتایج شبیه سازی با واقعی همخوانی بیشتری از خود نشان می دهند. در اینجا ساختارهای مختلفی برای شبیه سازی در نظر گرفته شده است، لذا انتظار می رود برای مفید بودن شبیه سازی، ساختاری یافت شود که نسبت به آزمایش واقعی در هر جهتی، خطای قابل قبولی از خود نشان دهد. بررسی کامل جداول ۴ تا ۷ نشان می دهد که دو ساختار خاص برای هر پارچه در مقایسه با سایر ساختارها، خطای تقریباً قابل قبولی دارند. در تمام پارچه ها، ساختار MD-CD خطای نسبتاً کمی را در مقایسه با آزمایش

جدول ۴ - خطای مقاومت پارچه با 60 g/m^2

Actual test	Simulation with different structures						
	3 layers	MD-CD	MD-DD	CD-DD	MD	CD	DD
MD	10.32	0.24	6.34	1.34	12.49	16.94	0.03
CD	26.34	17.67	23.07	16.77	28.12	31.78	17.89
DD	19.39	9.90	15.82	8.91	21.34	25.34	10.14

جدول ۵ - خطای مقاومت پارچه با 70 g/m^2

Actual test	Simulation with different structures						
	3 layers	MD-CD	MD-DD	CD-DD	MD	CD	DD
MD	8.16	14.24	3.71	28.42	46.98	18.05	40.23
CD	28.28	10.79	24.80	44.10	14.78	36.00	53.32
DD	9.97	11.99	5.60	29.83	44.09	19.66	41.40

جدول ۶ - خطای مقاومت پارچه با 90 g/m^2

Actual test	Simulation with different structures						
	3 layers	MD-CD	MD-DD	CD-DD	MD	CD	DD
MD	9.28	19.29	20.85	2.96	26.77	16.93	12.01
CD	18.05	7.75	9.16	12.35	14.51	24.97	1.17
DD	6.96	22.34	23.94	0.48	30.01	14.81	14.87

جدول ۷ - خطای مقاومت پارچه با 105 g/m^2

Actual test	Simulation with different structures						
	3 layers	MD-CD	MD-DD	CD-DD	MD	CD	DD
MD	28.33	40.03	50.97	12.20	77.01	0.87	24.03
CD	12.59	4.62	2.84	23.57	20.57	31.29	15.51
DD	15.62	26.16	36.03	1.09	59.48	9.12	11.75

نتایج شبیه سازی بهبود می یابد. علاوه بر این، می توان ادعا کرد که آزمون کشش متمرکز با در نظر گرفتن پارچه به عنوان یک ساختار لایه ای، که هر لایه رفتار متمایزی را نشان می دهد، شبیه سازی شد. طبق نتایج، مدل پیشنهادی لایه ای قادر به شبیه سازی آزمون کشش متمرکز است.

شبیه سازی ها با ساختار دو لایه بر اساس رفتار پارچه در امتداد CD و DD می توانند مقاومت پارچه را تحت بارگذاری متمرکز با خطای قابل قبول تخمین بزنند، البته زمانی که جهت نمونه برداری در آزمایش های واقعی در راستاهای MD یا DD باشد. اما در آزمایش واقعی وقتی بارگذاری روی نمونه ای است که در امتداد عرض دستگاه تهیه شده است، بهتر است از ساختار MD-CD استفاده شود. قابل ذکر است روش پیشنهادی امکان استفاده بر روی سایر پارچه ها مانند تار-پودی و یا سایر بی-بافت ها مانند ملت بلون^۵ را نیز دارد.

در رابطه با محدودیت های مدل می توان دو نکته را مد نظر قرار داد، نخست آنکه ناپیکنواختی جرمی در ساختار لایه ای به شکلی که ارائه شد، قابل لحاظ کردن نمی باشد. دوم آن که اگرچه می توان رفتار پارچه را در جهت های دیگر نیز به عنوان لایه ای جدید در ساختار لایه ای لحاظ نمود و این امر می تواند به بهبود دقت مدل کمک کند، اما این کار باعث پیچیده تر شدن مدل و زمان طولانی آماده سازی و اجرای آن می گردد.

۴- نتیجه گیری

چهار پارچه بی بافت اسپان باند با وزن های ۶۰، ۷۰، ۹۰ و 105 g/m^2 برای این مطالعه تهیه شدند و از آزمون کشش استاندارد برای تعیین چگونگی رفتار هر پارچه هنگام اعمال نیروی متمرکز در سه جهت مختلف استفاده شد.

شبیه سازی زمانی که نمونه برداری پارچه در جهت عرض دستگاه باشد، چالش برانگیز است، با این حال، با افزایش وزن پارچه،

⁵ Melt blown

۵- مراجع

1. Tandon S., Kim S., Choi F. The torsional behaviour of singles yarns. Part II: evaluation. *J. Text. Inst.*, 86, 200-217, 1995. <https://doi.org/10.1080/00405009508631327>
2. Zhang X., Li Y., Yeung K., Miao M., Yao M. Fabric-bagging: stress distribution in isotropic and anisotropic fabrics. *J. Text. Inst.*, 91, 563-576, 2000. <https://doi.org/10.1080/00405000008659128>
3. Varshney R., Kothari V., Dhamija S. Influence of polyester fibre fineness and cross-sectional shape on lowstress characteristics of fabrics. *J. Text. Inst.*, 102, 31-40, 2011. <https://doi.org/10.1080/00405000903453661>
4. Shanbeh M., Johari M. S., Zarrebini M., Barburski M., Komisarczyk A., Urbaniak M. Effect of a weft yarn spinning system on the shear characteristics of plain woven fabrics. *Text. Res. J.*, 90, 10-23, 2020. <https://doi.org/10.1177/0040517519855315>
5. Alamdar Yazdi A. A. Further studies on fabric objective measurement (concentrated loading method). *Int. J. Clothing Sci. Technol.*, 15, 28-46, 2003. <https://doi.org/10.1108/09556220310461141>
6. Heydarian P., Vadood M., Alamdar Yazdi A. A. Modeling of bending length based on concentrated loading method. *Indian J. Fibre Text. Res.*, 45, 220-223, 2020.
7. Abaqus. Abaqus 6.10 online documentation: Dassault Systemes Simulia Corp.; 2010
8. Ascough J., Bez H., Bricis A. A simple beam element, large displacement model for the finite element simulation of cloth drape. *J. Text. Inst.*, 87, 152-165, 1996. <https://doi.org/10.1080/00405009608659063>
9. Yeung K., Li Y., Zhang X. A 3D biomechanical human model for numerical simulation of garment-body dynamic mechanical interactions during wear. *J. Text. Inst.*, 95, 59-79, 2004. <https://doi.org/10.1533/joti.2001.0050>
10. Mishra R., Militky J., Behera B., Banthia V. Modelling and simulation of 3D orthogonal fabrics for composite applications. *J. Text. Inst.*, 103, 1255-1261, 2012. <https://doi.org/10.1080/00405000.2012.675682>
11. Döbrich O., Gereke T., Hengstermann M., Cherif C. Microscale finite element model of brittle multifilament yarn failure behavior. *J. Ind. Text.*, 47, 870-882, 2018. <https://doi.org/10.1177/1528083716674908>
12. Dewangan M. K., Panigrahi S. Multiscale modelling of 3D orthogonal woven composite under ballistic impact using FEM. *Fibers Polym.*, 21, 2389-2400, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-1328-0>
13. Vadood M., Alamdar-Yazdi A. A. Modeling the spunbonded nonwoven fabric bursting strength using finite element method. *J. Text. Inst.*, 112, 837-845, 2021. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1783061>
14. Tavangarrizi F., Abghari R., Mirjalili M., Amiri H. Application of Response Surface Methodology and FEM in Optimization Fabric

- Bagging Deformation in Stenter Machine. *J. Text. Sci. Technol.*, 9, 71-90, 2020. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.21517162.1399>. 9.1.6.4
15. Yan L., Wang X., Wu H., Liu P. Damage and failure mechanisms of biaxial weft-knitted reinforced composites via meso-scale finite element modeling. *J. Ind. Text.*, 51, 1592S-1611S, 2022. <https://doi.org/10.1177/15280837211044167>
16. El Idrissi H., Seddouki A. Modelling of progressive damage in a notched carbon/epoxy composite laminate subjected to tensile loading using different assessment methods coupled with FEM. *Fibers Polym.*, 23, 3146-3162, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12221-022-0019-4>
17. Wang Z., Ren H., Cao X.-A., Mei X., Zhu G., Chen Y., et al. Compressive Failure Analysis of Thin-Walled Thermosetting Composite Structures Accounting for the Preforming Effects. *Fibers Polym.*, 25, 317-329, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00406-2>
18. Wang R., Liu W., Zhou X., Gao Y., Wu L., Lyu L. Electromagnetic wave absorption and bending properties of double-layer honeycomb 3D woven composites: experiment and simulation. *J. Text. Inst.*, 115, 995-1005, 2024. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2206085>
19. Gu H., Yan H., Shi Z., Dan R. Finite element simulation of knee joint pressure and surface displacement: relationship and influencing factors. *J. Text. Inst.*, 1-18, 2024. <https://doi.org/10.1080/00405000.2024.2426831>
20. Vadood M., Dehghan Manshadi D. Modeling the shear behavior of spunbond nonwoven fabrics using the finite element method. *J. Text. Inst.*, 1-9, 2024. <https://doi.org/10.1080/00405000.2024.2324208>
21. Vadood M., Gholami H. Finite element modeling of tensile behavior for different woven fabrics. *J. Text. Inst.*, 115, 768-780, 2024. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2275100>
22. Song W., Ma X., Ma P. Compression behavior of warp-knitted spacer fabric based on simplified finite element method. *J. Ind. Text.*, 54, 1-24, 2024. <https://doi.org/10.1177/15280837241267775>
23. Adosi B., Mirjalili S. A., Adresi M. Investigation of experimental and simulation performance of the flexural performance of cementitious composites reinforced with 3D weft knitted fabrics. *J. Text. Sci. Technol.*, 14, 1-18, 2025. <https://doi.org/10.22034/jtst.2025.496701.1485>
24. British Standards Institution. Methods for the determination of breaking load and extension of strips of woven textile fabric, Metric and inch units. BS-2576.
25. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Thickness of Nonwoven Fabrics. ASTM-D5729.
26. Bais-Singh S., Goswami B. C. Theoretical determination of the mechanical response of spun-bonded nonwovens. *J. Text. Inst.*, 86, 271-288, 1995. <https://doi.org/10.1080/00405009508631333>