

استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال در بررسی خواص کششی پارچه اسپیسر

ندا دهقان^۱، دانشجوی دکتری، پدram پیوندی^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی نساجی - دانشگاه یزد - یزد - ایران - neda.dehghan@stu.yazd.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی نساجی - دانشگاه یزد - یزد - ایران - Peivandi@yazd.ac.ir

چکیده: اهمیت درک خواص پارچه‌های سه‌بعدی اسپیسر، با توجه به کاربردهای بی‌شمار آن‌ها در صنایع مختلف، دلیلی بر توسعه روش‌های سریع و دقیق تعیین خواص است. پارچه‌های اسپیسر در کاربردهای متعدد، تحت تأثیر نیرو قرار دارند؛ بنابراین شناخت رفتار و تغییر خواص آن‌ها در مواجهه با نیرو دارای اهمیت است. هدف از مقاله حاضر، بررسی تغییر شکل پارچه اسپیسر و تعیین جابجایی‌های محلی در پارچه، تحت نیروی کششی است. از این‌رو، از روش همبستگی تصاویر دیجیتال که یک روش مرسوم در تعیین جابجایی‌ها و تغییر شکل یک سازه تحت بارگذاری خارجی است، استفاده شد. رفتار تغییر شکل ساختار پارچه اسپیسر با طرح واحد لوزی در دو جهت رج و ردیف، با استفاده از روش تجربی و در روش تئوری با استفاده از پردازش ویدئو و روش همبستگی تصاویر دیجیتال بررسی شد. با استفاده از پردازش ویدئو، تغییر شکل واحد در پارچه، توزیع جابجایی‌های محلی و میزان کرنش طولی و عرضی پارچه، تعیین و با روش تجربی مقایسه گردید. مقایسه نتایج حاصل از پردازش با نتایج تجربی نشان داد که روش پردازش ویدئو قادر به محاسبه جابجایی محلی در تمام قسمت‌های پارچه و پیش‌بینی میزان کرنش طولی و عرضی در کشش‌های مختلف با خطای کمتر از ۱۰٪ است.

واژه‌های کلیدی: همبستگی تصاویر دیجیتال، پارچه اسپیسر، جابجایی محلی، خواص کششی.

Application of Digital Image Correlation to Study the Tensile Properties of Spacer Fabric

Neda Dehghan¹, PhD Student, Pedram Payvandy², Associate Professor

1- Faculty of Textile Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran, neda.dehghan@stu.yazd.ac.ir

2- Faculty of Textile Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran, Peivandi@yazd.ac.ir

Abstract: The importance of understanding three-dimensional spacer fabrics properties, is a reason to the development of rapid and accurate methods for determining properties, due to their numerous applications in various industries. In most applications, spacer fabrics are affected by tension; therefore, knowing their behaviour in the encounter with tension is important. The purpose of this paper is to investigate on deformation of the spacer fabric and determine the local displacements in this fabric under tension. So, the digital image correlation method was used, that is a usual method of determining the displacements and deformation of a structure under external loading. Deformation behaviour of the diamond shape unit the of spacer fabrics structure at different tensile strains, based on experimental observations and theoretical analysis using video processing and digital image correlation method was investigated in the course and wale direction. The fabric unit deformation, the distribution of the local displacements and longitudinal and transverse strain of fabric were determined using video processing and compared with experimental method. Comparison of results showed that video processing method is able to calculate the local displacement in fabric and predict the longitudinal and transverse strain at different tensile strains with an error coefficient less than 10%.

Keywords: Digital image correlation (DIC), Spacer fabric, Local displacement, Tensile properties.

۱- مقدمه

شناخت خواص منسوجات، با توجه به کاربردهای بی‌شماری که در انواع صنایع دارند، دارای اهمیت است. این خواص را می‌توان به خواص ذاتی، سطحی و ظاهری، فیزیکی و شیمیایی تقسیم کرد. خواص ذاتی شامل تراکم تارپود، قطر نخ، نوع بافت و ... خواص ظاهری شامل میزان پرزینگی، ساییش، عیوب پارچه، عیوب رنگرزی، عیوب چاپ و خواص فیزیکی شامل پدیده‌هایی چون کاسه‌انداختن، آویزش، خواص کششی، خمشی، برشی، فشاری و حرارتی است. روش‌ها و استانداردهای مختلفی برای تعیین هر یک از خواص مذکور وجود دارد، از جمله روش‌های جدید که با دقت و سرعت بالا همراه است؛ می‌توان به روش پردازش تصویر و پردازش ویدئو اشاره کرد.

از جمله پدیده‌های فیزیکی منسوجات و قابل تعیین با روش پردازش تصویر، پدیده کاسه‌انداختن پارچه است [۶-۱]. در قسمت‌هایی مانند آرنج، زانو، نشیمنگاه و ... نیرویی به‌صورت مکرر و یا بلندمدت از طرف اعضای متحرک بدن، بر پارچه اعمال شده که بر اثر اعمال نیرو، پارچه دچار تغییر شکل، به‌صورت قسمتی از کره می‌شود [۱]. مشخصه‌هایی مانند: ارتفاع، حجم و شکل کاسه‌انداختن از جمله ویژگی‌های مهم در بررسی رفتار کاسه‌انداختن پارچه می‌باشند [۲]. Hasani و همکاران [۳] در مطالعه خود، از تصاویر تهیه شده از نمونه پارچه‌های تحت نیرو، ارتفاع نقطه پیک منحنی ایجادشده را با استفاده از پردازش تصویر محاسبه و آن را به‌عنوان حداکثر ارتفاع کاسه‌انداختن گزارش کردند. حجم کاسه‌انداختن، با استفاده از تکنیک آنالیز تصویر سه‌بعدی، در مطالعه‌ای توسط Azaza و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۴]. در بررسی انجام‌شده توسط Dehghani و همکاران [۵]، باهدف بررسی تأثیر لایه و آستری متصل‌شده به پارچه، ارتفاع کاسه‌انداختن باقی‌مانده با استفاده از پردازش تصویر و درصد کاسه‌انداختن باقی‌مانده با استفاده از منحنی تنش-کرنش، به دست آمد.

در بررسی انجام‌شده توسط Shafagh و همکاران [۷]، خواص خمشی پارچه، با استفاده از پردازش تصویر تحلیل شد. در این مطالعه، به‌منظور آنالیز رفتار مکانیکی نخ‌ها در حین اعمال نیروی خمشی، از تصاویر میکروسکوپی سطح مقطع نمونه‌ها استفاده و میزان کاهش مساحت سطح مقطع نخ‌ها در ساختار پارچه، بعد از خمش، با استفاده از پردازش تصویر محاسبه شد. بررسی خواص برشی منسوجات با استفاده از روش پردازش تصویر در مطالعات مختلفی انجام گرفته است [۸-۱۴]. در مطالعه انجام‌شده توسط Dridi و همکاران، تغییر شکل برشی پارچه‌های تار پودی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال^۱ (DIC) مورد بررسی قرار گرفت [۱۰]. در روش DIC، همبستگی بین دو تصویر خاکستری، مورد بررسی قرار می‌گیرد، به‌طوری که هر نقطه (x, y) در تصویر مرجع، به موقعیت جدیدی در تصویر تغییر شکل یافته، انتقال می‌یابد. با ردیابی نقاط معین در تصویر همبستگی بین تصاویر، محاسبه می‌شود. Arumugam و همکاران، رفتار برشی پارچه اسپیسر با استفاده از قاب نگه‌دارنده راه، مورد بررسی

قرار دادند [۱۲]. در طول فرآیند آزمون، جهت آنالیز و به دست آوردن جابجایی نقاط و زاویه برش نقاط انتخابی در سطح نمونه، تصاویر متوالی تهیه شدند. در این مطالعه، علاوه بر اطلاعات حاصل از روش تجربی، برنامه متلب توسعه داده‌شده با استفاده از تابع Hough transform، برای آنالیز زاویه برشی در تصاویر تهیه‌شده از جابجایی نمونه، مورد استفاده قرار گرفت. از روش Hough transform، برای آنالیز زاویه برشی در طول جابجایی نمونه در تصاویر، در اندازه‌گیری رفتار برشی داخل صفحه‌ای پارچه اسپیسر [۱۳] و تعیین استحکام برشی و استحکام کششی پارچه تار پودی [۱۴] استفاده می‌شود.

آویزش پارچه، یکی از پارامترهای فیزیکی مهم و تأثیرگذار بر ظاهر منسوجات، به شمار می‌رود. تکنیک‌های مختلفی برای محاسبه میزان آویزش پارچه، مورد استفاده قرار می‌گیرد که از جمله آن می‌توان، به روش پردازش تصویر اشاره کرد [۲۱-۱۵]. Ragab و همکاران [۱۵]، یک روش ساده و دقیق برای اندازه‌گیری آویزش پارچه، با استفاده از تکنیک پردازش تصویر، توسعه دادند. در روش پردازش تصویر، از مساحت شکل در تصاویر و دیگرام به‌دست‌آمده بعد از آویزش پارچه‌ها استفاده شد. در مطالعه انجام شده توسط Jeong و همکاران [۱۶] اثر ساختار پارچه و خواص مکانیکی بر آویزش پارچه، با استفاده از پردازش تصویر مطالعه شد.

بررسی خواص حرارتی منسوجات با پردازش تصاویر حرارتی در چندین مطالعه انجام گرفته است [۲۶-۲۲]. در پردازش تصاویر حرارتی می‌توان، مناطقی که دارای عیب هستند را با توجه به اختلاف حرارت، تشخیص داد. جهت تشخیص عیوب در منسوجات، در مطالعه انجام‌شده توسط Yildiz و همکاران، دستگاه کنترل کیفیت مجهز به هیتر مادون قرمز و دوربین حرارتی است. نتایج تجربی نشان داد که می‌توان از این روش، به‌جای استفاده از نیروی انسانی، برای تشخیص عیوب پارچه استفاده کرد [۲۴]. یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده، مبتنی بر پردازش تصاویر حرارتی، روش تقسیم‌بندی عیوب بر اساس حرارت، در منسوجات با الگوریتم همسایگی K-nearest است. در این مطالعه، عیوب پارچه شناسایی و تقسیم‌بندی می‌شوند. ماتریس Co-occurrence برای استخراج ویژگی‌های تصاویر معیوب، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقایسه نتایج کنترل کیفیت تجربی و روش پردازش تصویر نشان داد که روش پیشنهادی با دقت ۹۶ درصد، به‌صورت مؤثر عمل می‌کند [۲۵].

از دیگر پارامترهای مورد بررسی با استفاده از پردازش تصویر، خواص کششی منسوجات است [۳۲-۲۷]. Emadi و همکاران [۲۷، ۲۸]، یکنواختی نقاط اتصال حرارتی در منسوجات بی‌بافت با سطوح یکنواختی مختلف را مورد بررسی قرار دادند و یکنواختی سطوح بی‌بافت‌ها را یکی از عوامل تأثیرگذار بر خواص کششی آن‌ها، معرفی کردند. در این بررسی، پردازش تصاویر با استفاده از روش خوشه‌بندی کی-مینز^۲ انجام و یکنواختی سطح بی‌بافت‌ها با استفاده از روش quadrant محاسبه شد. در مطالعه دیگر، استحکام کششی و ازدیاد

شرایط متعدد است؛ از جمله شرایط استفاده از این منسوجات، حین اعمال نیرو است. تغییرات حداقل و یا حداکثری رفتار و خواص پارچه حین اعمال نیرو، موضوعی است که شناخت و پیش‌بینی این خواص را هنگام تولید و حین کاربرد، با استفاده از روش‌های سریع و دقیق، مهم‌تر می‌کند. با توجه به‌مرور انجام‌شده، مشاهده می‌شود که مطالعات انجام‌شده در مورد خواص کششی پارچه‌های اسپیسر محدود است. با توجه به رفتار ناهمسان‌گرد پارچه اسپیسر، تکنیک‌های سریع و مدل‌های هندسی متفاوت برای آنالیز رفتار تغییر شکل ساختار پارچه در جهت‌های مختلف کششی مورد نیاز است. در این بررسی با استفاده از روش پردازش تصویر، تغییر شکل کششی پارچه حین اعمال نیرو بررسی می‌شود. تکنیک پردازش تصویر را می‌توان برای تعیین توزیع تغییر شکل ناشی از کشش محلی مورد استفاده قرارداد. هدف از بررسی انجام‌شده، استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای اندازه‌گیری تغییر شکل محلی نقاط در پارچه اسپیسر در طول آزمون کشش است. با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، علاوه بر محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش کل، می‌توان جابه‌جایی‌های محلی نقاط تعیین‌شده در نمونه را حین آزمون کشش محاسبه کرد.

۲- تعریف مسئله

از جمله خواص فیزیکی مهم پارچه اسپیسر، خواص کششی آن است. در معرض نیرو قرار گرفتن پارچه اسپیسر، منجر به تغییر خواص فیزیکی و در نتیجه تغییر رفتار آن می‌شود؛ بنابراین شناخت و پیش‌بینی رفتار پارچه اسپیسر در مواجهه با نیرو و تعیین میزان تغییرات خواص فیزیکی، موضوعی است که باید مورد توجه قرار گیرد. منسوجات به‌عنوان یک شیء انعطاف‌پذیر، در اثر اعمال حداقل نیروها، دارای تغییرات کم و گاهی زیاد، هستند. انتخاب یک روش دقیق و سریع برای شناسایی و پیش‌بینی این تغییرات و توسعه بیشتر در سیستم اندازه‌گیری باهدف افزایش دقت و سازگاری با سیستم، یکی از اهداف اصلی این بررسی است.

۳- روش همبستگی تصاویر دیجیتال

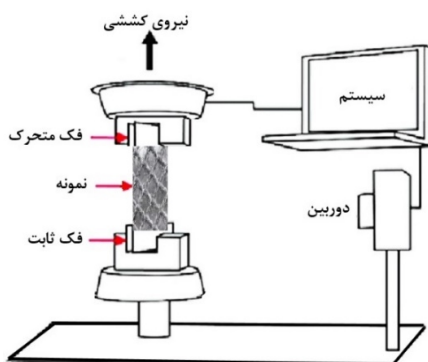
همبستگی تصویر دیجیتال (DIC)، یک روش اپتیک دقیق و غیرتماسی است که برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل یک سازه تحت بارگذاری خارجی، استفاده می‌شود [۳۸]. این سیستم، عمدتاً از یک دوربین دیجیتال و یک نرم‌افزار کامپیوتری تخصصی تشکیل شده است. دوربین برای ضبط تصاویر متوالی از سطح یک جسم، قبل و در طول دوره تغییر شکل، استفاده می‌شود. داده‌های تصویر دیجیتال به‌دست‌آمده (یک سری عکس) با پردازش، تحلیل‌شده و در نهایت، مجموعه‌ای از نقشه‌های جابه‌جایی-تغییر شکل برای کل سطح نمونه ایجاد می‌شود [۳۹]. اساس این روش، مقایسه تصاویر متوالی در طول انجام آزمون است. به‌منظور مقایسه بهتر، نقاط یا محل‌هایی از تصویر تعیین، سپس با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و ارتباط بین عکس‌ها، جابه‌جایی‌ها آن‌ها به دست می‌آید. همچنین تابع همبستگی تصاویر دیجیتال، به‌صورت ردگیری موقعیت الگوهای تعیین‌شده عکس

طول تا پارگی بی‌بافت‌ها با استفاده از پردازش تصویر و شبکه عصبی مصنوعی توسط Nohut و همکاران [۲۹]، بررسی شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی قادر به پیش‌بینی خصوصیات پارچه است. در این مطالعه با استفاده از تحلیل تصاویر دیجیتال^۲، یکنواختی سطح بی‌بافت‌ها با استفاده از روش quadrant محاسبه شد. در مطالعه انجام‌شده توسط Baghernezhad و همکاران [۳۰]، کنترل کشش در پارچه تار پودی با بررسی بی‌نظمی‌های جرمی در آن‌ها، با استفاده از روش مبتنی بر تصویر، انجام شد. از روش همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC)، برای ارزیابی توزیع کشش در پارچه در طول آزمون کشش، استفاده گردید. با استفاده از روش DIC، نمودار توزیع کشش از تصاویر نمونه مرجع و نمونه‌های تحت کشش‌های متوالی، به دست آمد. خواص مکانیکی پارچه با استفاده از روش مبتنی بر تصویر توسط Xin و همکاران [۳۲]، بررسی شد. در این مطالعه برای محاسبه جابه‌جایی نقاط مرجع قرارگرفته در سطح پارچه، تحت نیروی مشخص، از روش ردیابی مسیر نقاط، استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تکنیک مبتنی بر تصویر برای آنالیز کشش، روش مناسبی است؛ از این رو استفاده از روش پردازش تصویر برای ارزیابی رفتار مکانیکی دوبعدی تحت تنش داخل صفحه‌ای، پیشنهاد شده است.

بررسی خواص کششی پارچه اسپیسر در چندین مطالعه انجام گرفته است. Wang و همکاران، با استفاده از مشاهدات تجربی و با بررسی تغییر شکل واحد سل شش‌ضلعی در کرنش‌های کششی مختلف، دو مدل هندسی مختلف برای ساختار پارچه در جهت رج و در جهت ردیف، توسعه دادند. در نتیجه دو رابطه نیمه تجربی بین نسبت پواسون و کرنش کششی برای هر دو جهت کشش به دست آمد [۳۳]. Wang و Hu رفتار تغییر شکل کششی پارچه‌های اسپیسر حلقوی تار آگزتیک را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند. بررسی مدل نشان داد که منحنی ضریب پواسون-کرنش به‌دست‌آمده از مدل المان محدود با منحنی واقعی توافق خوبی دارد [۳۴]. Hu و Wang در مطالعه دیگر، خواص کششی و شکل‌پذیری پارچه‌های اسپیسر حلقوی تار را بررسی و نشان دادند که پارچه‌های اسپیسر حلقوی تار آگزتیک دارای مرحله تنش کم طولانی در جهت رج هستند که نشان از تمایل بیشتر آن‌ها به تغییر شکل در جهت رج است [۳۵]. Chang و Ma چند نوع پارچه اسپیسر مختلف با ساختار شش‌ضلعی را مورد بررسی قرار داده و جذب انرژی تحت تنش را از طریق انتگرال منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها، محاسبه کردند. در این مقاله روند پارگی نمونه‌ها تحت کشش، مورد بحث قرار گرفته است [۳۶]. بررسی رفتار تنشی پارچه‌های اسپیسر با استفاده از رویکرد تئوری و تجربی توسط Ghorbani و همکاران انجام و مدل مکانیکی با استفاده از روش انرژی و تئوری کاستیلیانو بر اساس ساختار هندسی و خواص مواد در پارچه به دست آمد [۳۷].

کاربرد پارچه‌های سه‌بعدی اسپیسر در صنایع متعدد، با توجه به خواص منحصر به فرد آن، دلیلی بر شناخت دقیق این منسوجات، تحت

جهت مشاهده نحوه تغییر شکل پارچه اسپیسر تحت کشش، از دوربین فیلمبرداری استفاده شد.



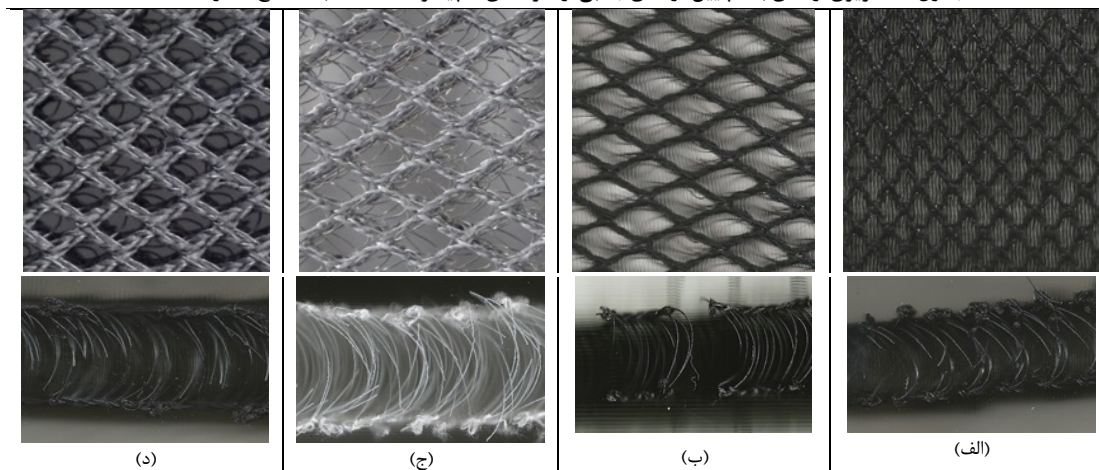
شکل ۱: آزمون کشش پارچه اسپیسر با تجهیزات تصویربرداری و پردازش

ویدئوها از نمونه‌ها در راستای رج و ردیف ضبط گردید، برای هر یک از نمونه‌ها، در هر دو جهت آزمون‌ها انجام و سه بار فیلمبرداری تکرار شد. مطابق با شکل، نمونه به دستگاه تست کشش، متصل می‌شود؛ سپس توسط یک دوربین فیلمبرداری، از نمونه تحت بار عمودی فیلمبرداری می‌شود. پس از آن، توسط الگوریتم‌های پردازش تصویر و تابع همبستگی تصاویر دیجیتال در محیط متلب، میزان تغییرات طولی و عرضی و حد انتخابی در نمونه و کرنش‌های طولی و عرضی اندازه‌گیری شد.

۴-۲-۲- روش آزمون

اساس کار تابع همبستگی تصاویر دیجیتال، ردگیری موقعیت نقاط یا محل‌های تعیین‌شده در فریم اول در فریم‌های بعدی و استخراج مختصات (x,y) آن‌ها است. اساس کار هم بر اساس تطابق میزان شدت نور خاکستری در فریم‌های متوالی است. طبق شکل ۲ در تصویر اول، مجموعه‌ای از شبکه با تعداد پیکسل معین، بر روی نمونه‌ها تعیین شد. تعداد مشخص‌های تعیین‌شده برای شبکه بر اساس تعداد محل‌های رنگی با شدت نور متفاوت، بر روی پارچه است. این تعداد را می‌توان کم یا زیاد کرد؛ این موضوع بستگی به تشخیص میزان دقت دارد.

جدول ۲: تصویری از نمای بالا (پایین) و نمای جانبی از نمونه‌های اسپیسر (الف) S1، (ب) S2، (ج) S3 و (د) S4



اول در عکس‌های بعدی و استخراج مختصات طول و عرض آن‌ها است. ترتیب کار تابع همبستگی تصاویر دیجیتال برای ردگیری موقعیت الگوی عکس اول در عکس‌های بعدی نیز، بر اساس تطابق میزان شدت نور خاکستری است. از آنجایی که اغلب استفاده از یک پیکسل برای یافتن نقطه انطباق، غیرممکن است، از یک ناحیه یا چندین پیکسل استفاده می‌شود تا فرآیند انطباق انجام پذیرد. بعد از فرآیند تغییر شکل، با یافتن ناحیه‌ای با شدت نور مشابه در تصویر بعد از تغییر شکل، جابه‌جایی مجموعه مذکور پیدا می‌شود.

۴- تجربیات

۴-۱- مواد

در این مطالعه، ۴ نمونه پارچه اسپیسر با مشخصات بیان‌شده در جدول ۱ و ۲ مورد استفاده قرار گرفت. جنس نمونه‌ها ۱۰۰ درصد پلی‌ستر و نخ‌های چندفیلامنتی برای لایه‌های دو طرف و مونوفیلامنت‌های پلی‌استر در لایه میانی موجود است.

جدول ۱: مشخصات پارچه‌های اسپیسر

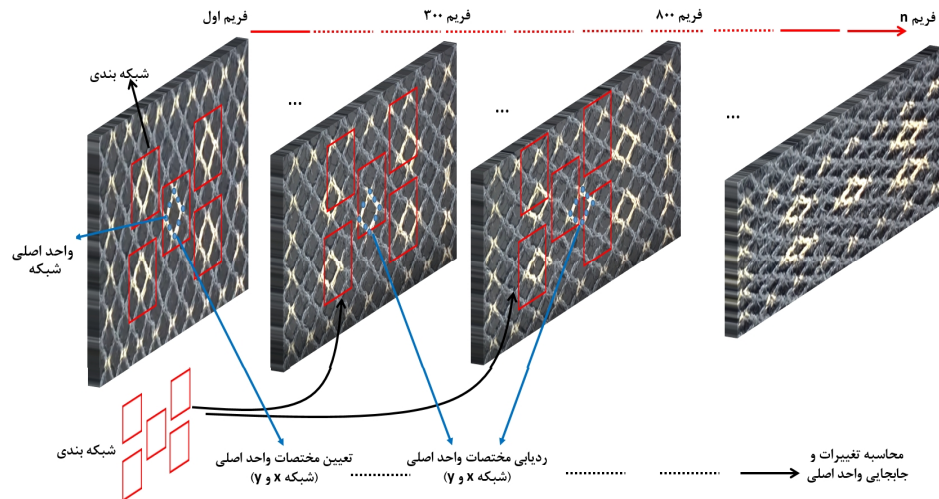
ضخامت (میلی‌متر)	تراکم منافذ در واحد سانتیمتر (ردیف)	تراکم منافذ در واحد سانتیمتر (رج)	تراکم رج (سانتیمتر)	کد نمونه
۱۰	۲	۲	۴	S1
۱۰	۲	۰/۹	۴	S2
۱۰	۲	۱	۴	S3
۱۰	۲	۱/۵	۳	S4

۴-۲- روش‌ها

۴-۲-۱- آزمون کشش

به‌منظور بررسی رفتار تغییر شکل پارچه‌های اسپیسر، کشش در دو جهت رج و ردیف با استفاده از دستگاه اینسترون و لودسل ۲KN اعمال گردید (شکل ۱). ابعاد نمونه با طول اولیه ۱۵ و عرض ۱۰ سانتیمتر انتخاب شد.

کرنش اعمالی به نمونه‌ها تا حداکثر کرنش قابل تحمل در محدوده الاستیک منحنی تنش-کرنش، با سرعت ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه است.



شکل ۲: نحوه شبکه بندی و مختصات محلی در فریم های مختلف (نمونه ۳ در جهت رج S3-W)

شده در جهت رج را نشان می دهد که دو سطح فیت شده بر روی نقاط لبه در حالت اولیه و در حداکثر کرنش (کرنش ۶۵٪) به دست آمده است، از تغییرات دو بعد اصلی لوزی، قطر اصلی و قطر فرعی، تغییرات واحدها و کرنش طولی و عرضی قابل محاسبه است و با توجه به فاصله اقلیدسی به دست آمده از هریک از نقاط در فریم های متوالی، میزان جابجایی محلی در کرنش های متفاوت محاسبه می شود.

با افزایش میزان کرنش، هر یک از واحدهای لوزی در جهت اعمال نیرو شروع به کشیده شدن می کنند و قطر اصلی و بزرگ لوزی در جهت عرض، شروع به کم شدن و قطر فرعی لوزی در جهت طول پارچه، شروع به کش آمدن و افزایش طول می کند.

با توجه به مشاهدات فرض شد که تمام واحدها، لوزی شکل و اندازه اولیه یکسانی دارند و همه واحدها دارای رفتار تغییر شکل یکسانی در طول فرایند ازدیاد طول هستند؛ بنابراین تغییرات واحد لوزی با تغییرات قطر اصلی و قطر فرعی بررسی می شود. در شکل (۴)، تغییرات واحد لوزی در فریم اول در کرنش ۵۰ درصد و در کرنش ۷۰ درصد، نشان داده شده است. مشاهدات نشان داد که واحد لوزی، دارای تغییرات تقریباً یکسان در نیمه سمت راست (تحت اثر نیرو) و نیمه سمت چپ در فک ثابت دارد؛ بنابراین فرض می شود که تغییرات واحد، وابسته به تغییرات دو قطر لوزی است. همچنین تغییرات زوایا اضلاع جانبی لوزی نیز مورد بررسی قرار گرفته است و میزان حداقلی و حداکثری آن با توجه به نوع بافت و نهایت کرنش مشخص شد.

۵- نتایج و بحث

در پردازش تصاویر دیجیتال و ردیابی محل ها و نقاط مشخص شده، ۱۲ نقطه از هر طرح واحد لوزی انتخاب و مختصات تمام نقاط در فریم های متوالی ردیابی شدند. بر این اساس، نمودارهای دوبعدی موقعیت نقاط در فریم های متوالی تعیین و پس از آن، بر روی مختصات مجموعه نقاط در هر فریم، یک سطح فیت شد که نشان از ابعاد و موقعیت طرح واحد لوزی در آن فریم دارد، سپس همین روند برای سایر فریم ها نیز تکرار

در این بررسی، برای نمونه ها، ۵ واحد اصلی در وسط نمونه انتخاب شد. پس از انتخاب پنجره الگوها در فریم اول، به عنوان مقیاس اولیه، همبستگی مجموعه الگوها در فریم های بعدی محاسبه می شود. با توجه به شدت نور متفاوت محل های تعیین شده، محلی که بیشترین مقدار همبستگی دارد، به عنوان تخمین محل نقطه در فریم بعدی در نظر گرفته می شود. در نهایت، استخراج مختصات (x,y) انجام می پذیرد. نحوه استخراج مختصات نقاط از میزان جابجایی یا تفاضل مختصات محوری جدید با مختصات الگوی فریم اول و محاسبه فاصله اقلیدسی نقاط، به دست خواهد آمد و این روند تا آخرین فریم انجام می گیرد؛ بنابراین تابع همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC)، موقعیت نقاط یا محل های معین را در تصاویر متوالی ره گیری کرده و مختصات موقعیت جدید را استخراج می نماید.

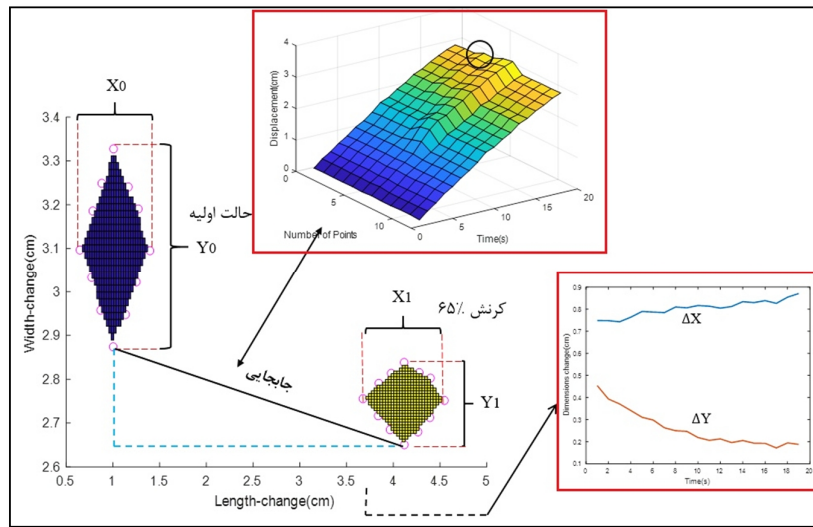
۳-۴ محاسبه پارامترها

با عملیات جداسازی فریم ها و تشخیص واحدها با شدت نور متفاوت، استخراج لبه و تعیین تعدادی نقطه با فاصله معین بر روی لبه استخراج شده، مراحل ردیابی واحدهای تعیین شده بر روی پارچه در فریم های متوالی انجام شد. پارچه های اسپیسر مورد بررسی، دارای طرح منافذ لوزی شکل در لایه اول و سوم هستند. جهت استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و ردیابی نقاط معینی از نمونه در فریم های متوالی، تعدادی از واحدهای لوزی بر روی پارچه رنگ شدند. جهت تعیین تغییرات واحدها، مساحت هریک از واحدها، به عنوان مساحت منفذ محاسبه و تغییرات ابعادی واحد لوزی، با تغییرات دو قطر لوزی قابل تعیین است. مساحت لوزی با استفاده از دو قطر بزرگ و کوچک آن و موقعیت منافذ شکل لوزی با استفاده از نقاط لبه های آن، تعیین می شود؛ بنابراین موقعیت طرح لوزی به عنوان نقاط تعیین کننده و ردیابی شونده در فریم های متوالی انتخاب شدند.

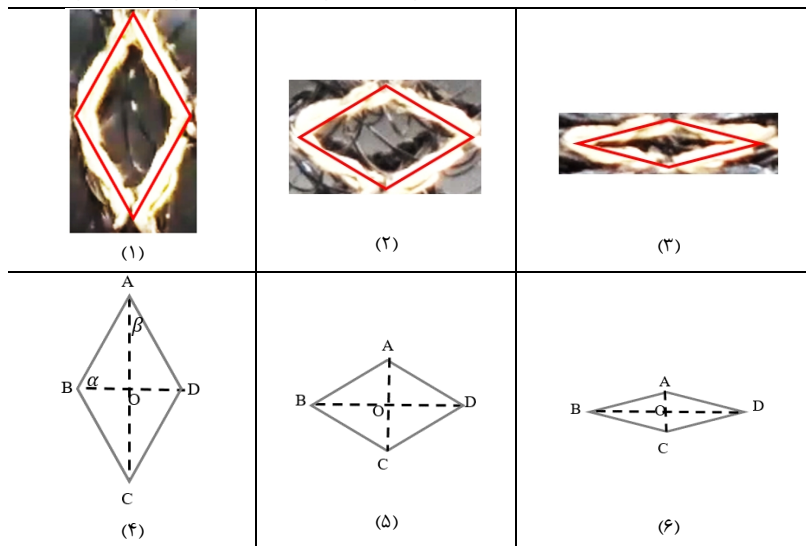
با انتخاب تعدادی از نقاط، با فواصل معین بر روی لبه استخراج شده از واحد لوزی در مرحله پیش پردازش، مختصات نقاط در هریک از فریم ها ترسیم و بهترین سطح به نقاط فیت شدند. شکل ۳، نمونه S1 کشیده

شکل لوزی به دست آمده است و نحوه حرکت یک واحد لوزی در پارچه اسپیسر با موقعیت اولیه معین، نمایش داده شده است.

شکل ۵، سطوح فیت شده به نقاط مختصاتی ردیابی شده در فریم‌های متوالی را نشان می‌دهد. با ردیابی نقاط در فریم‌ها در طول کشش و تعیین و ترسیم مختصات در شکل، بهترین سطح فیت شده به



شکل ۳: استخراج اطلاعات و جابجایی‌های محلی با توجه به ردیابی واحد اصلی



شکل ۴: تغییرات واحد لوزی در حالت (۱) اولیه، (۲) ۵۰ درصد کرنش و (۳) ۷۰ درصد کرنش، (۴)، (۵) و (۶) طرح تغییرات واحد لوزی قسمت

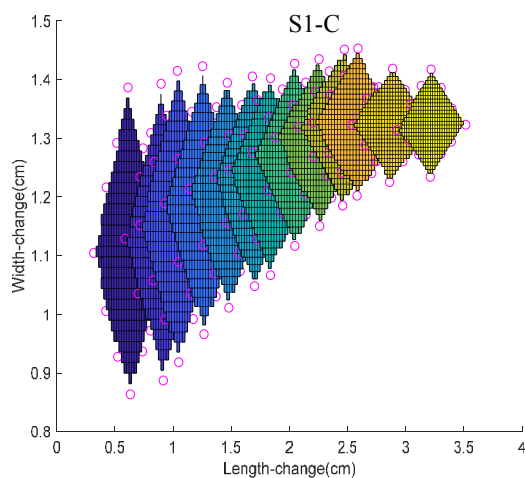
اول

افزایش طول در جهت کشش، کاهش عرض نیز دارد؛ بنابراین واحدهای مرکزی تقریباً به صورت مستقیم روبه جلو و واحدهای بالا و پایین، به دلیل کرنش عرضی همراه با حرکت روبه جلو به سمت مرکز و به سمت پایین یا بالا حرکت می‌کنند؛ بنابراین جهت محاسبه دقیق جابجایی‌های محلی از تمام مناطق واحدهای مختلف انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

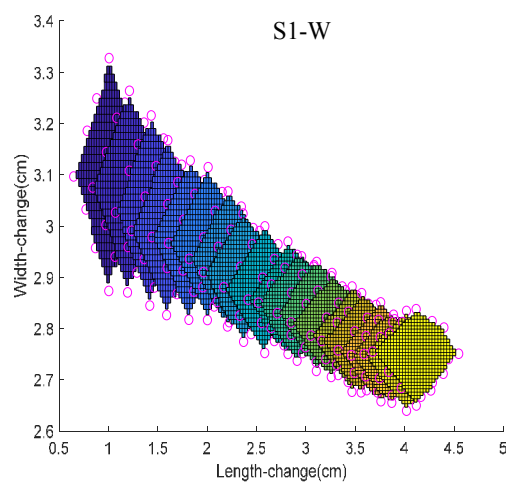
محور افقی x ، تغییرات میزان طول نمونه در راستای اعمال نیرو است و تغییرات محور عمودی y ، میزان تغییرات عرض نمونه را نشان می‌دهد که باعث تغییر در میزان عرض لوزی‌ها شده است. قابل ذکر

نمونه‌ها در راستای رج و ردیف مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفتند و بسته به موقعیت واحد در شبکه انتخاب شده، در شکل ۲ (بالا، پایین یا وسط شبکه)، تغییرات واحد انتخاب شده در فریم‌های متوالی به دست می‌آید. در شکل ۵، موقعیت یکی از واحدهای انتخابی از شبکه اولیه برای هریک از نمونه‌ها در راستای رج و ردیف نشان داده شده است. واحدهای انتخابی برای نمونه S1-C، S3-C و S4-W از پایین شبکه، S1-W، S2-C و S4-C از بالای شبکه و S2-W و S3-W از مرکز شبکه، نشان داده شده است. از آنجاکه حین اعمال نیرو به پارچه، افزایش طول و کاهش عرض پارچه، اتفاق می‌افتد؛ بنابراین، این نوع شبکه‌بندی انتخاب شده است. پارچه زمانی که تحت کشش قرار گیرد، علاوه بر

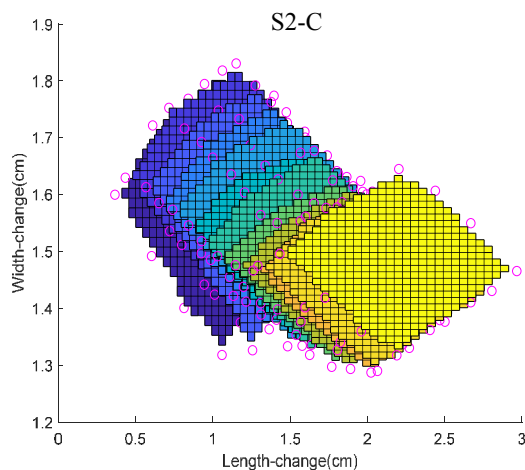
است که از هزاران فریم متوالی فیلم، از نمونه فقط تعدادی از فریم‌ها برای نمایش واضح در شکل (۵)، استفاده شده است.



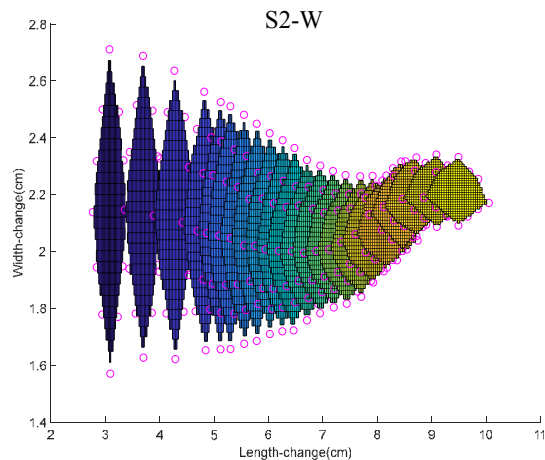
(۱)



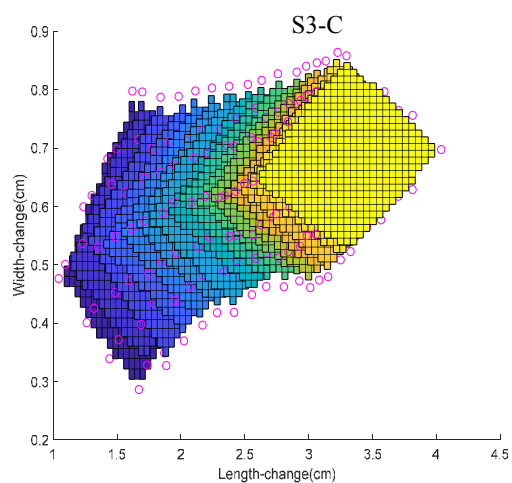
(۲)



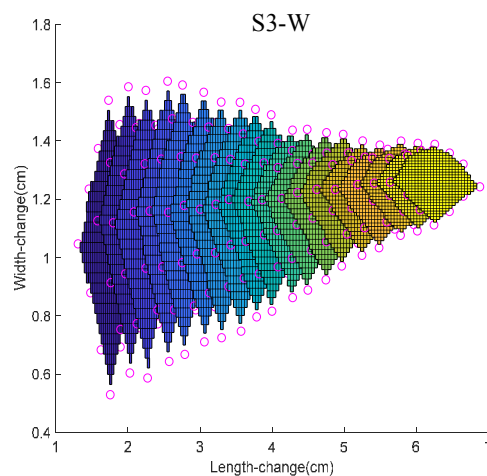
(۳)



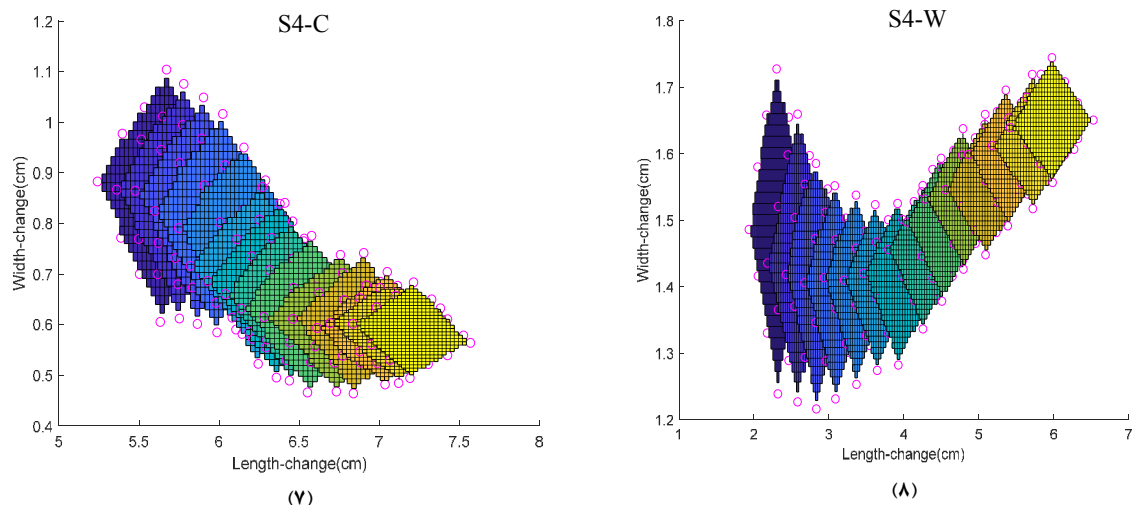
(۴)



(۵)



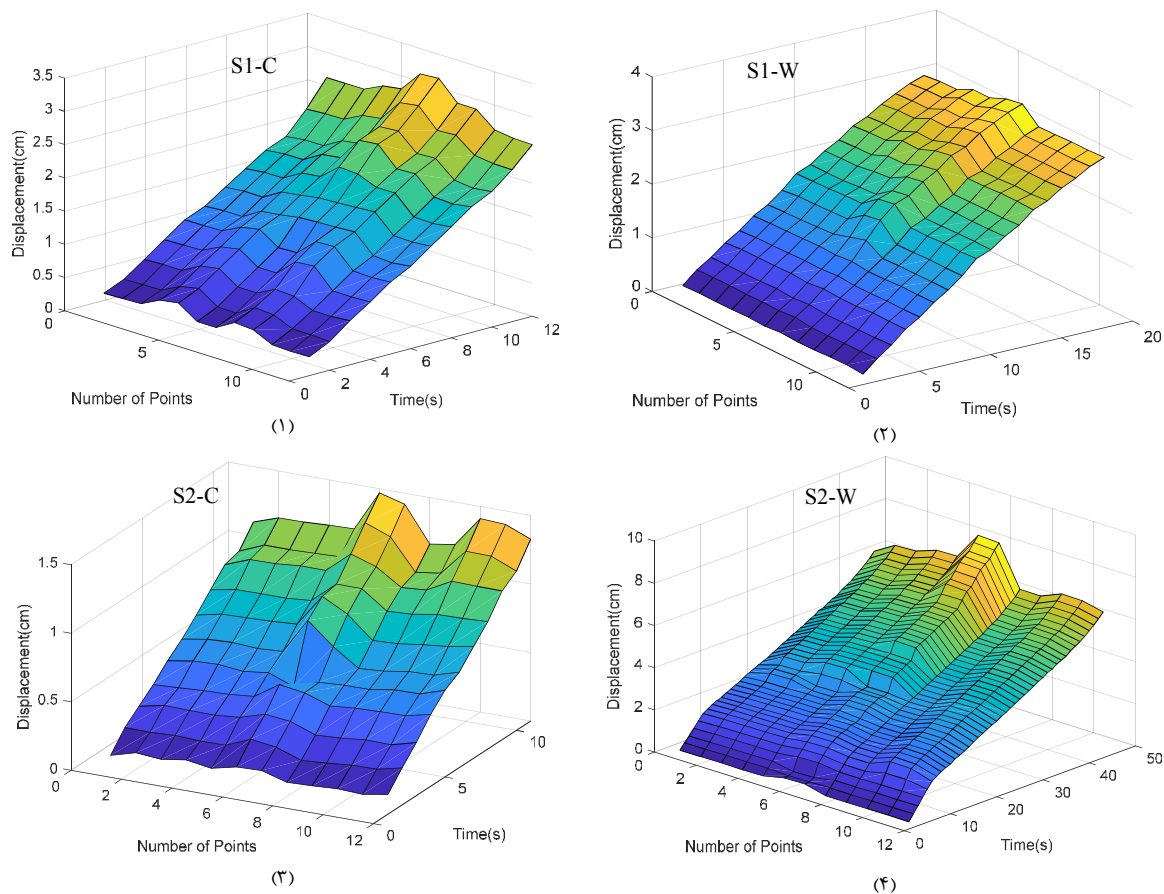
(۶)

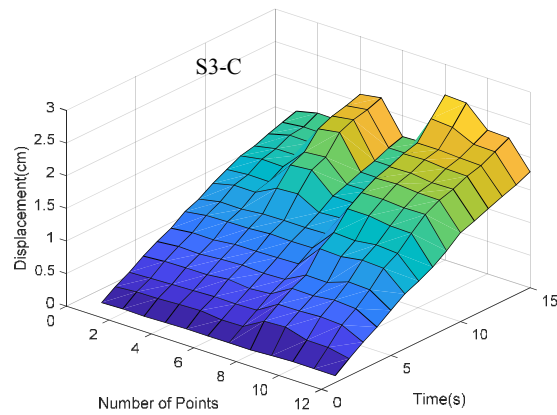


شکل ۵: تغییرات واحد لوزی ردیابی شده حین اعمال نیرو در موقعیت مختلف از شبکه اولیه در نمونه‌های مختلف

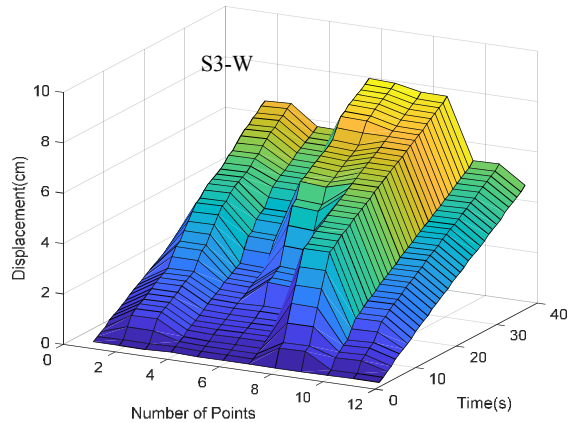
نقاط طرح واحد لوزی برای نمونه‌های اسپیسر در فریم‌های متوالی تعیین و در شکل ۶ نشان داده شده است. جابجایی نقاط برای هریک از نمونه‌ها در رج و ردیف با توجه به نوع حرکت (شکل ۵) و حداکثر کرنش قابل اعمال به نمونه است.

از نحوه حرکت واحد انتخاب شده و ردیابی آن در فریم‌های متوالی، مشاهده می‌شود که حرکت واحدها لزوماً مستقیم نبوده و بسته به موقعیت اولیه آن و مشخصات پارچه حرکت‌های متفاوتی دارند. حداکثر افزایش طول و حداکثر کاهش عرض نیز برای نمونه‌های مختلف با توجه به مشخصات پارچه متفاوت است. تغییرات و جابجایی محلی

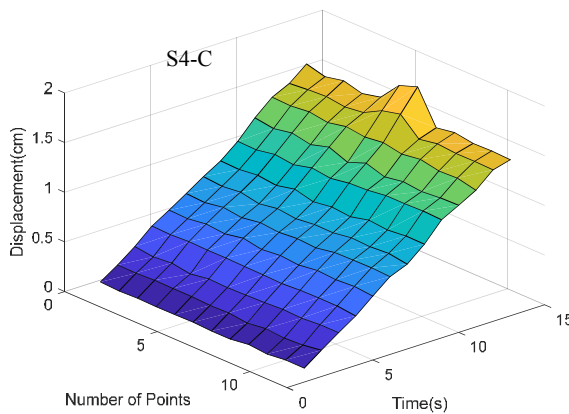




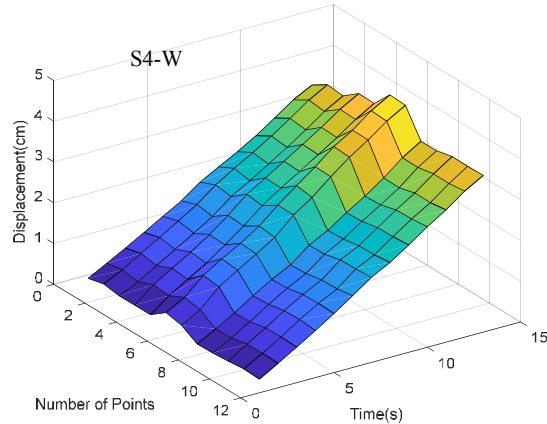
(۵)



(۶)



(۷)



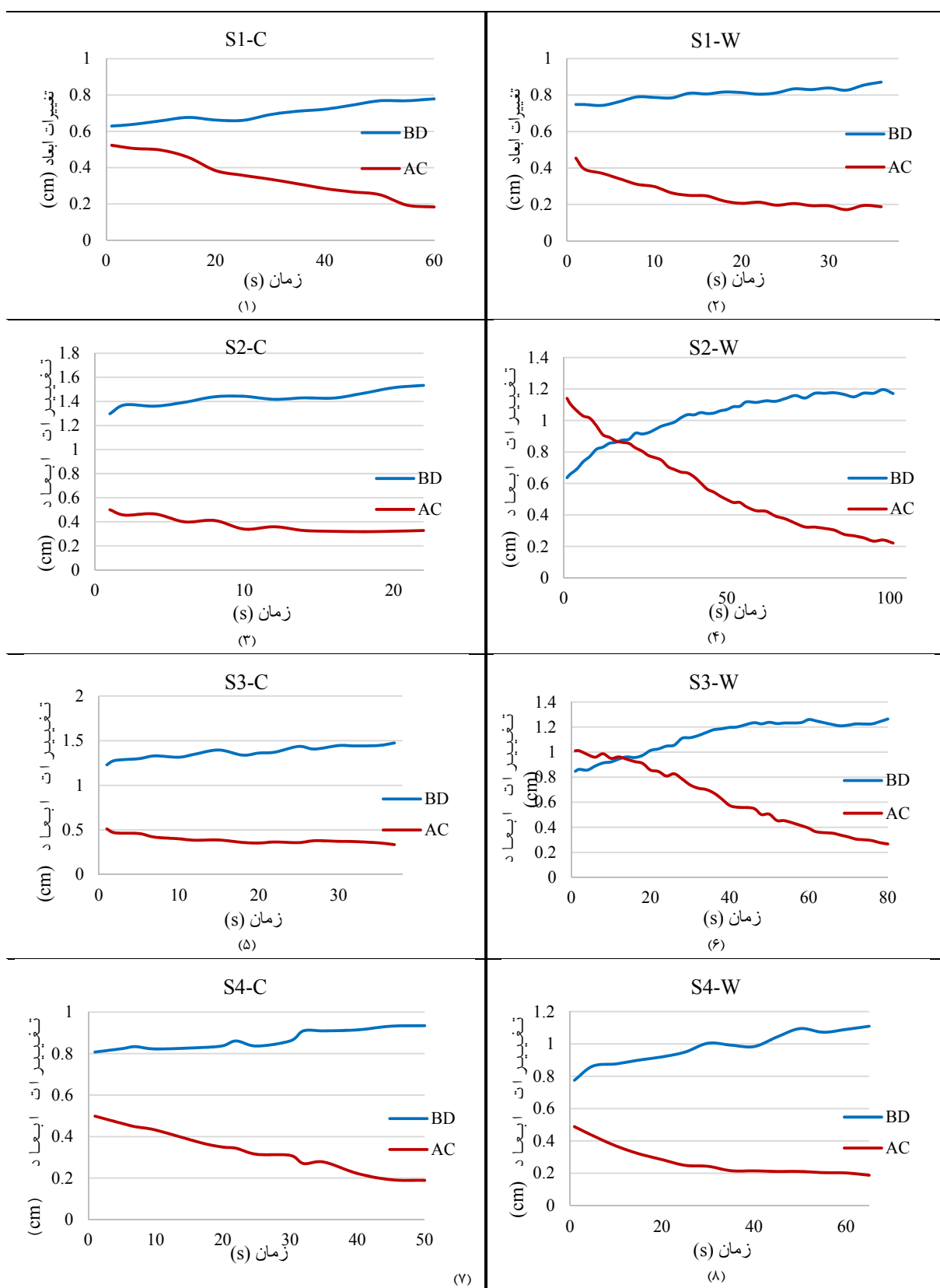
(۸)

شکل ۶: منحنی سه بعدی جابه جایی محلی نقاط در طول فرآیند کشش

حاصل می شود. هدف از این بررسی مشاهده و محاسبه میزان جابه جایی های محلی نقاط در فریم های متوالی تا حداکثر کرنش اعمالی الاستیک و بررسی کارایی روش همبستگی تصاویر دیجیتال در محاسبه تغییرات طولی و عرضی نمونه ها و مقایسه با مقادیر تجربی است. تغییرات واحد لوزی در نمونه ها که تغییرات قطرهای لوزی است به صورت میانگین در شکل (۷)، نشان داده شده است. زمان اعمال نیرو به نمونه ها، با توجه به حداکثر کرنش اعمالی است. در تمام نمونه ها با افزایش میزان کرنش، قطر AC کاهش و قطر BD با افزایش همراه است؛ اما این کاهش و افزایش برای نمونه ها، متفاوت است و در برخی کمتر و برخی بیشتر است که علت این تغییرات در افزایش، کاهش و ثابت شدن را می توان، به تراکم رج و ردیف، طول حلقه و حضور نخ های اسپیسر در لایه میانی مرتبط دانست. در ادامه در جدول ۳، مقادیر کرنش عرضی و طولی به دست آمده با استفاده از روش DIC با روش تجربی مقایسه و مقادیر اختلاف نیز به صورت در صد خطا گزارش شده است.

با توجه به جدول ۳، میانگین خطای کرنش طولی و عرضی برای همه نمونه ها، هم در جهت رج و هم ردیف، به ترتیب برابر با ۳/۴۵٪ و ۴/۰۳٪ است.

شکل ۶، تصاویر سه بعدی از جابجایی های محلی نقاط در طول فرآیند کشش را نشان می دهد، دو محور دیگر، به ترتیب تعداد نقاط و زمان اعمال نیرو به نمونه در راستای رج و ردیف است. میزان جابه جایی و شکل جابه جایی ها وابسته به ساختار پارچه و موقعیت واحد انتخاب شده در شبکه است. حداکثر جابه جایی ها در نمونه های مختلف، متفاوت است که این اختلاف ها را نیز می توان، از روند تغییرات واحد در شکل ۵، مشاهده کرد. جابه جایی ها در نمونه S1، روند یکسانی در حرکت نقاط، در فریم های متوالی نشان می دهد و جابه جایی های ناگهانی مشاهده نمی شود. تغییرات در نمونه S2 در جهت رج که موقعیت اولیه واحد، مرکز نمونه است، نقاط پایینی و سمت راست واحد دارای بیشترین جابه جایی و تغییر موقعیت ناگهانی، برای نمونه S2 تحت کشش در جهت ردیف، برای نقاط بالای واحد لوزی است. برای نمونه S3، جابه جایی محلی برای نقاط پایین شبکه نسبت به سایر نقاط دیده می شود. برای نمونه S4 نیز، روند تغییرات و میزان جابه جایی های نقاط، دارای روند یکسان است و تغییرات ناگهانی برای نمونه مشاهده نمی شود. نتایج مشاهده شده و جابه جایی محلی به دست آمده برای نمونه ها تا حداکثر کرنش اعمالی به نمونه است. قابل ذکر است که کرنش اعمالی به پارچه های اسپیسر قبل از رسیدن به مرحله تنش پلاستیک بوده و در صورت اعمال کرنش بالاتر جابجایی های متفاوتی



شکل ۷: تغییرات ابعادی واحدهای تعیین شده پس از ردیابی در فریم‌های متوالی

در دستگاه اینسترون میزان کرنش طولی و عرضی، برای این روش محاسبه می‌گردد. همان‌گونه که از نتایج مشاهده می‌شود میزان اختلاف به دست آمده برای هر دو جهت کمتر از ۱۰ درصد است و این موضوع نشان از موفقیت روش پردازش تصویر در محاسبه کرنش‌های طولی و عرضی برای پارچه‌های اسپیسر در هر زمان و هر کرنش است.

محاسبه کرنش عرضی و طولی برای نمونه‌ها به صورت تجربی، بعد از اعمال حداکثر کرنش الاستیک به نمونه، به ترتیب میزان ازدیاد طول نمونه در جهت طول و میزان کاهش عرض نمونه در جهت عرض، بر روی دستگاه اینسترون با استفاده از خط کش اندازه‌گیری شد. برای روش DIC با محاسبه تغییرات طولی و عرضی برای یک واحد و محاسبه تعداد واحدها در جهت رج و ردیف با توجه به ابعاد اولیه نمونه

جدول ۳: مقایسه کرنش‌ها در روش پردازش تصویر و روش تجربی

کد نمونه	روش ارزیابی	تغییرات طول یک واحد (cm)	تغییرات عرض یک واحد (cm)	کرنش طولی	کرنش عرضی
S1-C	DIC	۰/۱۵	۰/۳۴	۰/۵۵	۰/۷۶
	تجربی			۰/۶۰	۰/۸۰
	خطا (%)			۸/۳	۵/۰
S1-W	DIC	۰/۱۲	۰/۲۶	۰/۴۵	۰/۶۷
	تجربی			۰/۴۶	۰/۶۵
	خطا (%)			۲/۱۷	۳/۰
S2-C	DIC	۰/۲۳	۰/۱۷۲	۰/۳۲	۰/۵۰
	تجربی			۰/۳۰	۰/۵۵
	خطا (%)			۶/۶	۹/۰
S2-W	DIC	۰/۵۳	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۷۷
	تجربی			۰/۹۰	۰/۷۷
	خطا (%)			۱/۱	۰/۰
S3-C	DIC	۰/۴۱	۰/۷۴	۰/۵۷	۰/۵۳
	تجربی			۰/۶۰	۰/۵۲
	خطا (%)			۵/۰	۱/۹۲
S3-W	DIC	۰/۲۴	۰/۱۷	۰/۸۵	۰/۷۳
	تجربی			۰/۸۶	۰/۷۷
	خطا (%)			۱/۱۶	۵/۱۹
S4-C	DIC	۰/۱۲	۰/۳۰	۰/۴۳	۰/۶۴
	تجربی			۰/۴۳	۰/۶۰
	خطا (%)			۰/۰	۶/۶۶
S4-W	DIC	۰/۳۳	۰/۳۰	۰/۶۲	۰/۶۶
	تجربی			۰/۶۰	۰/۶۵
	خطا (%)			۳/۳۳	۱/۵۳

جدول ۴: مقایسه مطالعات انجام شده در زمینه بررسی خواص کششی منسوجات

مطالعات انجام شده	هدف	روش و نتایج
Wang و همکاران [۳۳]	استخراج معادله ضریب پواسون با توجه به پارامترهای هندسی نمونه‌ها با شکل واحد شش‌ضلعی	بررسی رفتار تغییر شکل نمونه‌های اسپیسر تحت نیرو و محاسبه ضریب پواسون با استفاده از مدل استخراج شده
Wang و همکاران [۳۵]	بررسی رفتار تغییر شکل پارچه‌های اسپیسر آگزتیک (ضریب پواسون منفی) تحت نیروی کششی	روش مورد استفاده، روش تجربی و اطلاعات گزارش شده بر مبنای اطلاعات به دست آمده از تغییرات طولی و عرضی نمونه بر روی دستگاه آزمون - ترسیم منحنی ارتباط کرنش کششی با ضریب پواسون
Chang و همکاران [۳۶]	محاسبه ضریب پواسون با استفاده از نمونه‌های تجربی (شکل واحد شش‌ضلعی) و محاسبه جذب انرژی (سطح زیر منحنی تنش - کرنش نمونه‌ها)	روش مورد استفاده روش تجربی و اطلاعات به دست آمده بر اساس منحنی تنش - کرنش نمونه‌ها از دستگاه آزمون است.
Ghorbani و همکاران [۳۷]	محاسبه مدول اولیه پارچه‌های اسپیسر با استفاده از روش انرژی و تئوری کاستیلیانو و بررسی تأثیر نخ اسپیسر بر مقدار مدول	روش مورد استفاده روش انرژی و پارامترهای استفاده شده در مدل با استفاده از هندسه سل واحد نمونه‌ها (شش‌ضلعی) به دست آمدند.

ضخامت نیز بسیار اندک و قابل صرف نظر است؛ بنابراین، فقط تغییر شکل لایه‌های خارجی مشاهده و تجزیه و تحلیل شد. با افزایش میزان کرنش، واحد لوزی پارچه اسپیسر در جهت رج و ردیف، شکل خود را تا حد اکثر کرنش قابل تحمل، حفظ کرده و عمده تغییرات ابعادی بر روی قطر افقی و عمودی است که باعث تغییر در میزان تخلخل و خواص فیزیکی پارچه اسپیسر می‌شود. اهمیت شناخت منسوجات با توجه به کاربردهای آن‌ها در صنایع مختلف، باعث توسعه روش‌های دقیق تعیین خواص، همچون پردازش تصویر است. نتایج این مطالعه نشان داد که روش پردازش ویدئو، به‌عنوان یک روش سریع و دقیق (با میانگین خطای کمتر از ۵ درصد)، قادر به محاسبه و پیش‌بینی جابه‌جایی‌های محلی و تغییرات ابعادی در تمام کرنش‌ها است. محاسبه این پارامتر برای منسوجات در تمام کرنش‌ها با روش تجربی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، جهت محاسبه تغییرات ابعادی و لحظه‌ای پارچه اسپیسر تحت نیرو و محاسبه تغییرات طولی و عرضی، به‌عنوان روشی مناسب پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] N. Şengöz, "Bagging in textiles", Textile Progress, vol. 36, pp. 1-64, 2004.
- [2] Y. Liu, J. Lu, J. Hu, and A. Chung, "Study on the bagging behavior of knitted fabrics by shape memory polyurethane fiber", Journal of the Textile Institute, vol. 104, no. 11, pp. 1230-1236, 2013.
- [3] H. Hasani, S. H. Zadeh and S. Behtaj, "Bagging behavior of different fabric structures knitted from blended yarns using image processing", Journal of Engineered Fibers and Fabrics, vol. 7, no. 3, 2012.
- [4] A. Azaza, B. Jaouachi, A. Douik, L. Schacher and D. Adolphe, "Evaluation of residual bagging volume using 3D image analysis technique", The Journal of The Textile Institute, vol. 106, no. 1, pp. 1-8, 2015.
- [5] N. Dehghani, A. Valipouri and S. Minapoor, "Investigating the effect of underlying fabric on the bagging behaviour of denim fabrics (RESEARCH NOTE)", International Journal of Engineering, vol. 32, no. 9, pp. 1231-1237, 2019.
- [6] حسین حسینی، ساناز حسن‌زاده و ساناز بهتاج، «رفتار کاسه‌انداختن پارچه‌های با ساختار حلقوی پودی تولیدشده از نخ‌های مخلوط با استفاده از پردازش تصویر»، هشتمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی ایران، دانشگاه یزد، اردیبهشت ۱۳۹۳.
- [7] S. D. Tohidi, A. A. Jeddı and H. Nosrati, "Analyzing of the woven fabric geometry on the bending rigidity properties", International Journal of Textile Science, vol. 2, no. 4, pp. 73-80, 2013.
- [8] L. Naujokaitytė, E. Strazdienė and J. Domskienė, "Investigation of fabric behaviour in bias extension at low loads", Fibres & Textiles in Eastern Europe, pp. 59-63, 2008.
- [9] J. Domskienė and E. Strazdienė, "Investigation of fabric shear behaviour", Fibres and Textiles in Eastern Europe, vol. 13, pp. 26-30, 2005.
- [10] S. Dridi, F. Morestin and A. Dogui, "Use of digital image correlation to analyse the shearing deformation in woven fabric", Experimental Techniques, vol. 36, pp. 46-52, 2012.

خطای گزارش‌شده به‌منظور بیان اختلاف بین نتایج پردازش تصویر با نتایج واقعی است. استفاده از داده‌های تجربی برای ارزیابی روش ارائه‌شده، یکی از روش‌های مرسوم اعتبارسنجی در اکثر مقالات به شمار می‌رود. در این صورت است که مدل یا روش پیشنهاد شده برای نمونه‌های مشابه، قابل استفاده و استناد هستند؛ به‌نحوی که بتوان بدون استفاده از آزمون‌های تجربی بر روی نمونه‌های واقعی که روشی زمان‌گیر و وابسته به توانایی و تجربه اپراتور انجام دهنده آزمون است، بتوان با استفاده از روش‌هایی چون شبیه‌سازی، مدل‌سازی و پردازش تصویر، مقادیر هدف را محاسبه و از آن‌ها برای طراحی، تولید و همچنین مشاهده خواص مواد، پیش از تولید استفاده کرد.

با توجه به مطالعات انجام‌گرفته توسط پژوهشگران، در زمینه بررسی خواص کششی پارچه اسپیسر، روش‌های مختلفی چون روش تجربی با استفاده از دستگاه، مدل هندسی با توجه به شکل و ابعاد سل واحد و مدل انرژی با توجه به نیروی اعمال‌شده و تغییر شکل حاصله بعد از اعمال نیرو، مورد مطالعه قرار گرفتند (جدول ۴).

در مقایسه بررسی حاضر با مطالعات انجام‌گرفته، می‌توان به نمونه مورد استفاده با طرح سل واحد لوزی، نوآوری در روش مورد استفاده، یعنی روش همبستگی تصاویر دیجیتال بر اساس پردازش تصویر و همچنین در قسمت تحلیل و نتایج علاوه بر محاسبه تغییرات ابعادی نهایی نمونه‌ها، تعیین جابجایی محلی هر یک از نقاط معین بر روی نمونه در هر کرنش، اشاره کرد.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به کاربردهای بی‌شمار پارچه اسپیسر، شناخت و بررسی رفتار تغییر شکل پارچه اسپیسر تحت نیروی کششی، دارای اهمیت است. پردازش تصویر، یکی از روش‌های دقیق که قادر به محاسبه کوچک‌ترین تغییرات محلی در پارچه تحت نیرو است. در این بررسی با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، میزان جابجایی محلی هر یک از نقاط پارچه تحت نیرو و همچنین تغییرات ابعادی و میزان کرنش طولی و عرضی پارچه، قابل محاسبه است. این در حالی است که محاسبه جابه‌جایی‌ها و کرنش‌ها برای تمام کشش‌ها و در هر زمان از اعمال نیرو قابل انجام است؛ اما در روش تجربی تنها امکان محاسبه کرنش طولی و عرضی نهایی وجود دارد. همچنین در صورت تغییرات کرنش و تعیین جابجایی‌های محلی نقاط داخلی پارچه با استفاده از روش پردازش ویدئو و ردیابی محل‌ها و نقاط معین از تصویر، در تصاویر متوالی فریم‌ها، می‌توان تغییرات ابعادی و همچنین ارتباط بین تغییرات و خواص را محاسبه کرد.

زمانی که پارچه اسپیسر تحت نیروی کششی قرار می‌گیرد، مونوفیل‌امنت‌ها در لایه میانی پارچه، تقریباً در جهت ضخامت جهت‌دار شده و قرار می‌گیرند (عمود بر جهت کشش). بر تغییر ضخامت پارچه تأثیر می‌گذارند و اثر آن‌ها در تغییر شکل داخل صفحه‌ای ساختار بیرونی آن، نسبتاً کم است و در نتیجه تغییرات

- [25] K. Yıldız, A. Buldu and M. Demetgul, "A thermal-based defect classification method in textile fabrics with K-nearest neighbor algorithm", *Journal of Industrial Textiles*, vol. 45, pp. 780-795, 2016.
- [26] K. Yıldız, A. Buldu and M. Demetgul, "Fault Detection of Textile Fabrics with Thermal Base Image Processing", *Conference: 7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13)*, At: Istanbul, 2015.
- [27] M. Emadi, M. A. Tavanaie and P. Payvandy, "An Investigation of Structural-Mechanical Properties of Spun-Bonded Non-Woven Using Computer Vision Method", *Journal of Textiles and Polymers*, vol. 7, no. 1, pp. 3-13, 2019.
- [28] M. Emadi, M. A. Tavanaie and P. Payvandy, "Measurement of the uniformity of thermally bonded points in polypropylene spunbonded non-wovens using image processing and its relationship with their tensile properties", *Autex Research Journal*, vol. 18, pp. 405-418, 2018.
- [29] S. Nohut, M. Tascan, O. Akgobek and T. Arici, "Estimation of areal weight, grab tensile strength, and elongation at break of PP spunbond nonwovens using digital image analysis and artificial neural networks", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 10, 2015.
- [30] S. Baghernezhad, M. Ghane and M. Moezzi, "Strain monitoring in woven fabrics with locally induced mass irregularities using an image based method", *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2016.
- [31] N. Jariyapunya and S. Baheti, "Application of image analysis method for measurement of fabric stretch deformation", in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 254, no. 14, p. 142010, 2017.
- [32] B. Xin and J. Hu, "An Image Based Method for Characterising the Mechanical Behaviours of Fabrics. Part 1, The Measurement of In-plane Tensile Behaviour", *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, pp. 72-75, 2008.
- [33] Z. Wang, H. Hu, and X. Xiao, "Deformation behaviors of three-dimensional auxetic spacer fabrics", *Textile research journal*, vol. 84, pp. 1361-1372, 2014.
- [34] Z. Wang and H. Hu, "A finite element analysis of an auxetic warp-knitted spacer fabric structure", *Textile research journal*, vol. 85, pp. 404-415, 2015.
- [35] Z. Wang and H. Hu, "Tensile and forming properties of auxetic warp-knitted spacer fabrics", *Textile research journal*, vol. 87, pp. 1925-1937, 2017.
- [36] Y. Chang and P. Ma, "Energy absorption and Poisson's ratio of warp-knitted spacer fabrics under uniaxial tension", *Textile Research Journal*, vol. 89, pp. 903-913, 2019.
- [37] V. Ghorbani, A. A. Jeddi, and H. Dabiryan, "Theoretical and experimental investigation of tensile properties of net warp-knitted spacer fabrics", *The Journal of The Textile Institute*, vol. 111, pp. 518-528, 2020.
- [38] T. Chu, W. Ranson and M. A. Sutton, "Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics", *Experimental mechanics*, vol. 25, pp. 232-244, 1985.
- [39] M. Hagara, P. Lengvarsky and J. Bocko, "Numerical verification of a full-field deformation analysis of a specimen loaded by combined loading", *Science and Education Publishing*, 2014.
- [11] R. Mishra, H. Jamshaid and J. Militky, "Investigation of mechanical properties of basalt woven fabrics by theoretical and image analysis methods", *Fibers and Polymers*, vol. 18, pp. 1369-1381, 2017.
- [12] V. Arumugama, R. Mishra, M. Tunakb, J. Militkya, D. Kremenakovaa and M. Venkatramana, "Image Processing and Experimental Techniques for Studying Intra-ply Shear Behavior of 3D Weft Knitted Spacer Fabrics", *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, vol. 9, pp. 63-76, 2016.
- [13] V. Arumugam, R. Mishra, M. Tunak, B. Tomkova and J. Militky, "Study on the in-plane shear performance of spacer fabrics in composite forming", *Materiali in Tehnologije*, vol. 52, pp. 47-50, 2018.
- [14] D. Zhu, B. Mobasher and S. RAJAN, "Experimental Study of Shear Behavior of Kevlar 49 Fabrics", in *29th Annual Technical Conference of the American Society for Composites, ASC 2014; 16th US-Japan Conference on Composite Materials; ASTM-D30 Meeting*, 2014.
- [15] A. Ragab, A. Fouda, H. El-Deeb and A. Hemdan, "A Simple Method for Measuring Fabric Drape Using Digital Image Processing", *Journal of Textile Science and Engineering*, vol. 7, no. 5, 2017.
- [16] Y. Jeong and D. Phillips, "A study of fabric-drape behaviour with image analysis. Part II: the effects of fabric structure and mechanical properties on fabric drape", *Journal of the Textile Institute*, vol. 89, pp. 70-79, 1998.
- [17] A. K. Choudhary and P. Bansal, "Drape measurement technique using manikins with the help of image analysis," In *Manikins for Textile Evaluation*, pp. 173-195. Woodhead Publishing, 2017.
- [18] Y. Jeong, "A study of fabric-drape behaviour with image analysis part I: Measurement, characterisation, and instability", *Journal of the Textile Institute*, vol. 89, pp. 59-69, 1998.
- [19] D. Robson and C. C. Long, "Drape analysis using imaging techniques", *Clothing and Textiles Research Journal*, vol. 18, pp. 1-8, 2000.
- [20] A. Giwa, E. Achukwu and M. Shebe, "Measurement of fabric drape using digital image processing", *African Journal of Natural Sciences (AJNS)* ISSN 1119-1104, vol. 13, 2015.
- [21] N. Kenkare and T. May-Plumlee, "Fabric drape measurement: A modified method using digital image processing," *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, vol. 4, pp. 1-8, 2005.
- [22] V. Rubeziene, I. Padleckiene, S. V. Zuravliova and J. Baltusnikaite, "Reduction of thermal signature using fabrics with conductive additives", *Materials Science*, vol. 19, pp. 409-414, 2013.
- [23] M. Wang, X. Li, J. Li and B. Xu, "A new approach to quantify the thermal shrinkage of fire protective clothing after flash fire exposure", *Textile Research Journal*, vol. 86, pp. 580-592, 2016.
- [24] K. Yıldız, A. Buldu, M. Demetgul and Z. Yıldız, "A novel thermal-based fabric defect detection technique", *The Journal of the Textile Institute*, vol. 106, pp. 275-283, 2015.

زیر نویس ها

¹Digital Image Correlation (DIC)

²K-means

³Digital Image Analysis (DIA)