

Mechanical Analysis of the Three-dimensional Deformation Shape Ratio of Spacer Knitted Fabrics under Uniaxial Tension

Fateme Noori, Ali Asghar Asgharian Jeddi*, and Hadi Dabiryan

Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box 159163-4311, Tehran, Iran

Received: 17 April 2021, Accepted: 24 August 2021

Abstract

Spacer fabrics are three-dimensional textiles that are composed of two layers of separate fabric by interlocking threads. The special properties of these fabrics have made them widely used in the textile industry. In this study, the deformation of warp knitted spacer fabrics as an orthotropic structure under uniaxial tension is investigated. Samples are knitted with different bonding yarn angles and thicknesses. Uniaxial tension was performed for each sample in weft and warp directions with five repetitions. Poisson's ratio measures the strain ratio of tensile and perpendicular directions, but shape ratio of three-dimensional shape measures lateral area changes to volume. The Poisson's ratio and shape ratio were calculated by measuring the square drawn on the fabrics. The results show that, in different samples, the shape ratio was more consistent with the reciprocal Maxwell's theorem. Therefore, it better describes the deformation of the fabric under uniaxial tension.

Keywords: spacer fabric, Poisson's ratio, shape ratio, uniaxial tension, deformation

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ajeddi@aut.ac.ir

تحلیل مکانیکی نسبت تغییر شکل سه‌بعدی پارچه‌های دوجداره حلقوی تار تحت کشش تک‌محوری

فاطمه نوری، علی اصغر اصغریان جدی*، هادی دبیریان

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۴۳۱۱-۱۵۹۱۶۳

دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۲

چکیده

واژه‌های کلیدی: پارچه‌های دوجداره، نسبت پواسون، نسبت تغییر شکل، کشش تک‌محوری، تغییر شکل

۱ مقدمه

پارچه‌های دوجداره (spacer fabrics) به دلیل ساختار و خواص ویژه و کاربردهایی که در نتیجه آن‌ها حاصل می‌شوند، اهمیت فراوانی دارند. پارچه‌های دوجداره سازه‌های سه‌بعدی هستند که از اتصال دو لایه پارچه جداگانه به وسیله نخ‌های اتصال مطابق شکل ۱، تشکیل می‌شوند [۱]. Cass ساختار این پارچه‌ها را به ساختارهای ساندویچی تشبیه کرده است [۲]. ارتوتروپیک به موادی گفته می‌شود که خواص نقطه‌ای در آن‌ها دارای محورهای تقارن عمود بر هم باشند [۳]. نسبت پواسون (ν) (Poisson's ratio)، مدول یانگ (Young's modulus) یا مدول کشسانی (E) (elastic modulus) و مدول برشی (G) (shear modulus) در مواد همسان‌گرد متعامد به جهت اعمال نیروی کششی، کرنش ایجاد شده در جهت عمود بر راستای اعمال تنش و جهت اعمال تنش برشی بستگی دارند [۳]. مطابق با قانون هوک، رابطه بین تنش و کرنش با ضریب مدول کشسانی، خطی است. در قانون تعمیم‌یافته هوک، رابطه تنش و کرنش با در نظر گرفتن نسبت پواسون در وجه‌های مختلف

پارچه‌های دوجداره، منسوجات سه‌بعدی هستند که از اتصال دو لایه پارچه جداگانه به وسیله نخ‌های اتصال تشکیل شده‌اند. خواص ویژه این پارچه‌ها باعث کاربردهای مختلف آن‌ها در صنعت نساجی شده است. یکی از موارد مهم و مؤثر در کاربرد این پارچه‌ها، تغییر شکل آن‌ها تحت نیروهای کششی است. در این پژوهش، به بررسی تغییر شکل این پارچه‌ها به عنوان یک ساختار همسان‌گرد متعامد تحت کشش تک‌محوری پرداخته شد. نمونه‌های مختلف با زاویه متفاوت نخ اتصال و ضخامت متفاوت بافته و آزمون کشش تک‌محوری برای هر نمونه در راستای رج و ردیف با پنج بار تکرار انجام شد. نسبت پواسون، نسبت کرنش نمونه را در دو راستای اعمال نیروی کششی و راستای عمود بر آن نشان می‌دهد، در حالی که نسبت تغییر شکل برای یک جسم سه‌بعدی، تغییرات مساحت جانبی به حجم را ارائه می‌کند. نسبت پواسون و نسبت تغییر شکل با استفاده از مربع رسم‌شده روی سطح پارچه اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از محاسبه و مقایسه نسبت پواسون و نسبت تغییر شکل نشان داد، نسبت تغییر شکل در نمونه‌های مختلف، مطابقت بیشتری در معادله اثر متقابل ماکسول دارد. از این رو، تغییر شکل و ابعاد پارچه تحت کشش را بهتر توصیف می‌کند.

استفاده شود. پیشنهاد شده است تا از نسبت تغییر شکل به جای نسبت پواسون استفاده شود [۸]. زیرا این نسبت، نه تنها به خواص مواد تشکیل دهنده سازه بستگی دارد، بلکه به هندسه آن نیز مربوط می‌شود. این نسبت، با بررسی و محاسبه تغییرات یک شکل هندسی خاص روی پارچه در حال کشش با استفاده از ضریب فشردگی آن شکل هندسی در درصد کشش‌های مختلف به دست می‌آید [۸].

از ویژگی‌های ذاتی هر شکل هندسی منظم و نامنظم، شاخص هندسی یا ضریب فشردگی (compactness factor) آن است. این شاخص توصیف‌کننده شکل‌های هندسی در بسیاری از شاخه‌های علمی است. هر شکل هندسی دوبعدی یا سه‌بعدی دارای ضریب فشردگی منحصر به فردی است، از این رو، از این شاخص برای شناسایی آن‌ها استفاده می‌شود. شاخص هندسی شکل‌های سه‌بعدی، بیانگر میزان نزدیکی آن به کره و برای شکل‌های دوبعدی میزان نزدیکی آن به دایره است. این شاخص هندسی برای یک شکل هندسی دوبعدی با مساحت A و محیط P از طریق معادله (۳) و برای یک شکل حجیم با مساحت جانبی A و حجم V ، از طریق معادله (۴) محاسبه می‌شود. نسبت تغییر شکل برای هر دو شاخص هندسی دوبعدی و سه‌بعدی از معادله (۵) محاسبه می‌شود که در آن، C_0 شاخص هندسی اولیه و C شاخص هندسی ثانویه است [۹]:

(۳)

$$C = \frac{A}{P^2}$$

(۴)

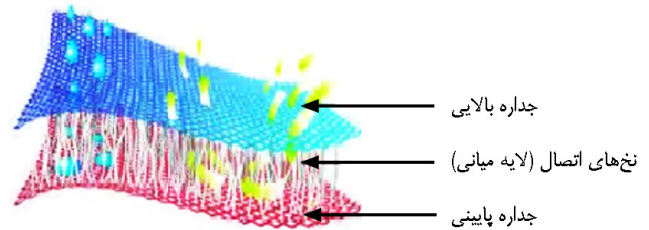
$$C = \frac{A^3}{V^2}$$

(۵)

$$K = \frac{C - C_0}{C_0}$$

۲ مروری بر پژوهش‌های پیشین

در گذشته از نسبت شکلی برای بررسی خواص ابعادی پارچه نیز استفاده شده است. برای مثال، طبق مدل ارائه شده Chamberlin [۱۰] و نیز پژوهش‌های انجام شده Munden [۱۱] نسبت مجذور طول حلقه به مساحت اشغال شده آن، در پارچه حلقوی پودی، مقدار ثابتی است. این مقدار به شرایط استراحت پارچه، جنس و ساختار نخ بستگی دارد. برای اندازه‌گیری نسبت پواسون در پارچه نیز پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. برای مثال، Hursa روش تصویربرداری از پارچه‌های تاری پودی تحت کشش تک‌محوری را بررسی کرد. دوربین از پارچه تحت کشش تک‌محوری فیلم‌برداری



شکل ۱- ساختار پارچه‌های دوجداره [۲].

جسم تعریف می‌شود [۴]. در اجسام صلب متداول اعمال نیروی کششی در یک راستا، افزون بر افزایش طول در آن جهت باعث ایجاد جمع‌شدگی و کرنش منفی در جهت عمود بر آن می‌شود. بنابراین، نسبت پواسون (ν) مثبت برای موادی تعریف می‌شود که به هنگام اعمال نیروی کششی در راستای طول دچار انقباض عرضی می‌شوند. در این مواد، نیروی فشاری طولی باعث انبساط عرضی می‌شود [۴]. در برخی از مواد اعمال کشش در راستای طول باعث انبساط عرضی و اعمال فشار در جهت طول باعث انقباض عرضی می‌شود. در این مواد، نسبت پواسون منفی (auxetic) است. نسبت پواسون به صورت نسبت کرنش عمود بر راستای اعمال نیرو به کرنش ایجادشده در جهت اعمال نیرو به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود [۵]. با توجه به اینکه در مواد همسان‌گرد متعامد، ماتریس تنش حول قطر اصلی متقارن است، معادله اثر متقابل ماکسول با معادله (۲) تعریف می‌شود. این معادله نشان می‌دهد، نسبت پواسون به مدول یانگ در دو جهت عمود برهم با هم برابر است [۶]:

(۱)

$$\nu = -\frac{\epsilon_j}{\epsilon_i} \quad (i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$$

(۲)

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$$

با توجه به تعریف نسبت

پواسون، این پرسش مطرح می‌شود، آیا در پارچه با محیط متخلخل می‌توان مانند مواد پیوسته از نسبت پواسون برای بیان تغییر شکل‌ها استفاده کرد. تجربه نشان می‌دهد، در اثر اعمال کشش در یک راستا، تغییر طول در هر دو راستای طول و عرض با انحنا و گاهی پیچ‌خوردگی همراه است. این تغییر در مرکز پارچه بیشترین جمع‌شدگی و در لبه‌های بالایی و پایینی کمترین جمع‌شدگی را حاصل می‌کند. اندازه‌گیری چنین خطوطی به عنوان تغییرات طولی و عرضی دارای خطای درخور ملاحظه‌ای است [۷، ۸]. بنابراین، به جای اندازه‌گیری نسبت پواسون به عنوان شاخص تغییر شکل در چنین سازه‌های متخلخلی، بهتر است که از شاخص دیگری

پارچه‌های دوجداره کاربردهای بسیاری در مهندسی عمران (از جمله زه‌کشی، تقویت خاک، کنترل فرسایش و غیره)، به‌عنوان جزء تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها، لباس‌های ورزشی، خودروسازی و سایر دارد. بنابراین، بررسی تغییر شکل‌های ایجادشده در آن، در اثر اعمال نیروی کششی حائز اهمیت است [۱۸، ۱۹]. در این پژوهش، برای بررسی تغییر شکل پارچه‌های دوجداره نسبت تغییر شکل سه‌بعدی محاسبه شده و برای مقایسه نسبت‌های پواسون و تغییر شکل از معادله اثر متقابل ماکسول استفاده شده است. با توجه به محدودیت‌هایی که در ارتباط با نسبت پواسون پارچه‌ها گفته شد، هدف از این مقایسه یافتن نسبتی است که تغییر شکل این نوع پارچه، تحت کشش تک‌محوری را بهتر بیان می‌کند.

۳ تجربی

پنج نمونه پارچه با ساختارهای بافت مختلف به‌وسیله ماشین راشل دو میله سوزن ($npi=12$) با ۶ میله راهنما بافته شد. در همه نمونه‌های بافته‌شده، ساختار بافت جداره‌ها یکسان بوده و تفاوت آن‌ها در طرح بافت نخ‌های اتصال است. تغییر طرح بافت نخ‌های اتصال باعث تغییر زاویه آن‌ها می‌شود. برای بافت جداره‌ها از نخ پلی‌استر با نمره ۷۵ دنیر ۱۴۴ فیلامنت و برای اتصال دوجداره از نخ پلی‌استر تک‌فیلامنت با نمره ۳۰ دنیر استفاده شد. جدول ۱ طرح بافت جداره‌ها و جدول ۲ طرح بافت نخ‌های اتصال و ضخامت تنظیم‌شده روی ماشین برای بافت پارچه‌ها را نشان می‌دهد. جدول ۳ نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص فیزیکی پارچه‌ها، با استفاده از استانداردهای موجود، پس از بافت را نشان می‌دهد. هر آزمون برای هر نمونه پارچه ۵ بار تکرار شد که میانگین نتایج در جدول ۳ ثبت شده است.

۳-۱ آزمون کشش تک‌محوری

ابعاد نمونه برای آزمون کشش، مطابق با استاندارد به‌دست‌آمده برای پارچه‌های حلقوی تار، مربعی با ابعاد $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ است [۲۰]. پنج نمونه از هر ساختار بافت پارچه در دو جهت رج و ردیف برش داده می‌شود. برای جلوگیری از پخش فیلامنت‌ها در هنگام برش که سبب نایکنواختی در لبه‌های نمونه می‌شود، از برش لیزر استفاده شده است. نایکنواختی لبه‌های پارچه سبب کاهش کیفیت و دقت در تصویربرداری از نمای جانب و خطا در اندازه‌گیری ضخامت خواهد شد. برای بررسی تغییر شکل پارچه‌ها، مربعی با ابعاد

می‌کند و اطلاعات فیلم به‌وسیله رایانه به تصاویر سیاه و سفید تبدیل می‌شود. نتایج پژوهش وی نشان داد، روش تصویربرداری از تغییر شکل پارچه می‌تواند برای محاسبه نسبت پواسون آن استفاده شود [۱۲]. Penava پژوهش‌هایی در ارتباط با اثر جنس نخ و تکمیل پارچه‌ها بر نسبت پواسون انجام داد که مشخص شد، عوامل مؤثری در اندازه‌گیری نسبت پواسون هستند [۱۳، ۱۴]. همچنین، مدل‌سازی‌های ریاضی برای محاسبه نسبت پواسون پارچه‌ها انجام شده است.

آجلی و جدی [۱۵] به ارائه یک مدل نظری برپایه شکل هندسی حلقه تحت کشش تک‌محوری، برای بررسی خواص مکانیکی و اندازه‌گیری نسبت پواسون در پارچه‌های حلقوی تار پرداختند. در این مدل‌سازی، آن‌ها حلقه‌ها را دوبعدی و در صفحه فرض کردند. این مدل‌سازی هم‌پوشانی زیادی با نتایج تجربی نشان داد. در بررسی مطالعات انجام‌شده در ارتباط با نسبت پواسون پارچه‌های دوجداره این نتیجه قابل برداشت است که بیشتر پژوهش‌های انجام‌گرفته، به ساختارهایی با نسبت پواسون منفی پرداخته است. به‌نظر می‌رسد، استفاده از ساختار سه‌بعدی پارچه‌های دوجداره برای تولید ساختاری با نسبت پواسون منفی مورد توجه پژوهشگران بوده است. برای مثال، Wang و Hu [۱۶] ساختارهای حلقوی تار با هندسه خاص را برای ایجاد اثر پواسون منفی طراحی کردند. Chang و Ma [۱۷] پژوهشی را در ارتباط با جذب انرژی و نسبت پواسون پارچه‌های دوجداره حلقوی تار تحت کشش تک‌محوری انجام دادند که طی آن، چهار نوع پارچه دوجداره حلقوی تار با نسبت پواسون منفی طراحی و تولید شد. کلانی و همکاران [۸]، نسبت‌های تغییر شکل و پواسون پارچه‌های حلقوی تار را بررسی کردند. در این پژوهش، از شاخص هندسی مخصوص اجسام دوبعدی برای محاسبه نسبت تغییر شکل و برای مقایسه نسبت پواسون و نسبت تغییر شکل از معادله اثر متقابل ماکسول استفاده شده است. برای بررسی نسبت تغییر شکل در معادله اثر متقابل به‌جای نسبت پواسون $(v_{cw}/E_c = v_{wc}/E_w)$ ، نسبت تغییر شکل $(K_{cw}/E_c = K_{wc}/E_w)$ جاگذاری شد. در این معادلات، E_w مدول یانگ در راستای ردیف، E_c مدول یانگ در راستای رج، v_{wc} نسبت پواسون کشش پارچه در راستای رج، v_{cw} نسبت پواسون کشش پارچه در راستای ردیف، K_{wc} نسبت تغییر شکل پارچه در راستای ردیف و K_{cw} نسبت تغییر شکل در راستای رج است. نتایج نشان داد، با فرض ارتوتروپ بودن ساختار این پارچه‌ها، نسبت تغییر شکل بیش از نسبت پواسون در معادله اثر متقابل ماکسول مطابقت دارد.

جدول ۱- طرح بافت جداره‌ها.

شانه	زنجیر طرح بافت	نمایش سوزنی طرح بافت
شانه اول	$1-0-1-1/1-2-1-1/1-0-1-1/$ $1-2-2-2/3-4-3-3/3-2-3-3/$ $3-4-3-3/-2-2-2//$	
شانه دوم	$3-4-3-3/3-2-3-3/3-4-3-3/$ $3-2-2-2/1-0-1-1/1-2-1-1/$ $1-0-1-1/1-2-2-2//$	
شانه پنجم	$1-0-1-1/1-2-1-1//$	
شانه ششم	$1-0-1-1/2-3-2-2//$	

روی پارچه و همچنین ضخامت پارچه در کرنش‌های مختلف فیلم‌برداری شد. برای اندازه‌گیری تغییر شکل این مربع لازم است تا تصاویر آن را در لحظات مختلف آزمون کشش به دست آورد که هر یک مربوط به کرنش خاصی است. برای فیلم‌برداری از نمای روبه‌رو، از دوربین Canon Powershot-SX30-IS استفاده شد. شکل ۴ طرحواره‌ای از نحوه قرارگیری اجزای مختلف برای فیلم‌برداری از نمای مقابل را نشان می‌دهد. برای فیلم‌برداری از ضخامت پارچه در حال کشش از دوربین میکروسکوپی Dino-Lite1.5.29.B برپایه مخصوص و در لبه کناری پارچه

۴ cm×۴ cm در مرکز نمونه، به روش مهرزنی چاپ شده است. شکل ۲ طرحواره‌ای از نمونه آماده‌شده تحت کشش را نشان می‌دهد. برای ایجاد کشش تک‌محوری در پارچه‌ها از دستگاه اینسترون مدل ۵۵۶۶ (شکل ۳) با نرخ ثابت ازدیاد طول استفاده شد. فک بالایی دستگاه با سرعت ۲۰ mm/min به طرف بالا حرکت کرده و فک پایینی دستگاه ثابت است.

۲-۳ تصویربرداری

برای محاسبه نسبت‌های پواسون و تغییر شکل از مربع چاپ‌شده

جدول ۲- طرح بافت نخ‌های اتصال.

نمونه	فاصله تنظیم شده دوجداره روی ماشین (mm)	طرح بافت شانه ۳	طرح بافت شانه ۴
S1	۴/۵		
S2	۴/۵		
S3	۴/۵		
S4	۴/۵		
S5	۷		

بررسی شد. سپس، چند سطح کرنش مشترک برای محاسبه نسبت‌های پواسون و تغییر شکل، در راستای رج و ردیف، انتخاب شد. با استفاده از فیلم‌های ضبط‌شده از نمونه‌های در حال کشش، تصاویر مربوط به هر کرنش از فیلم مدنظر استخراج شد. نسبت پواسون از معادله (۱) و نسبت تغییر شکل از معادله (۵) با استفاده از نرم‌افزارهای Photoshop و Image J محاسبه شدند. شکل ۶ نمای روبه‌رو در کشش تک‌محوری، شکل ۷ تغییرات ضخامت زیر کشش تک‌محوری در راستای رج و شکل ۸ تغییرات ضخامت زیر

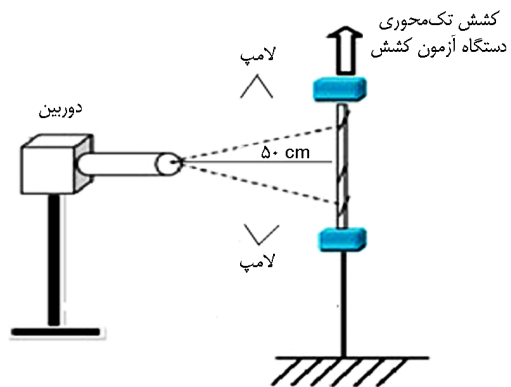
استفاده شد. شکل ۵ نحوه قرارگیری دوربین از نمای مجاور را نشان می‌دهد. این دوربین از طریق نرم‌افزار مخصوص به رایانه متصل شده و تصاویر را به‌طور مستقیم در آن پخش و ذخیره می‌کند. تمام تصاویر ضبط‌شده از نمای روبه‌رو و مجاور، در فاصله، نورپردازی و تنظیمات ثابت برای همه نمونه‌ها تهیه شده است.

۳-۳ محاسبات

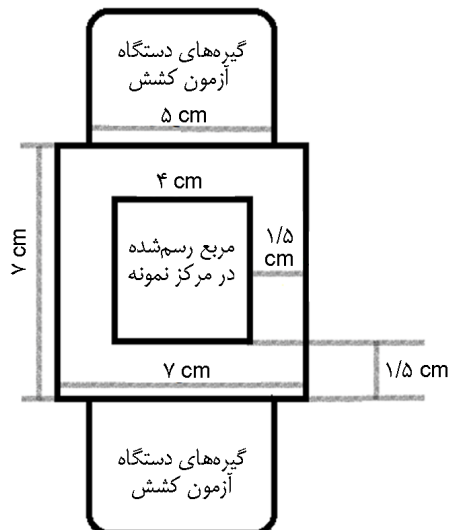
در نمودار تنش-کرنش، بخش خطی اول و مدول یانگ هر نمونه

جدول ۳- خواص فیزیکی اندازه‌گیری شده پارچه‌های مختلف.

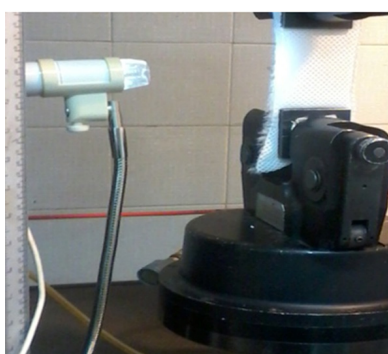
ضخامت (mm)		وزن (g/m ²)		تراکم (cm ⁻¹)		نمونه
CV%	میانگین	CV%	میانگین	Cpc	Wpc	
۱/۵	۵/۹۵	۱/۸	۳۶۰/۳۲	۱۵/۳	۹/۷	S1
۱/۲	۵/۶	۲	۳۷۴/۳۳	۱۵/۱	۹/۸	S2
۱/۷	۵/۳۵	۲/۳	۳۸۴/۵۱	۱۵/۱	۹/۷	S3
۱/۲	۵/۲	۱/۹	۴۳۹/۲۶	۱۵/۲	۹/۷	S4
۱/۸	۷/۲۵	۲/۴	۳۹۲/۱۵	۱۵/۲	۹/۷	S5



شکل ۴- طرحواره‌ای از نحوه قرارگیری اجزای مختلف برای تصویربرداری از نمای مقابل.



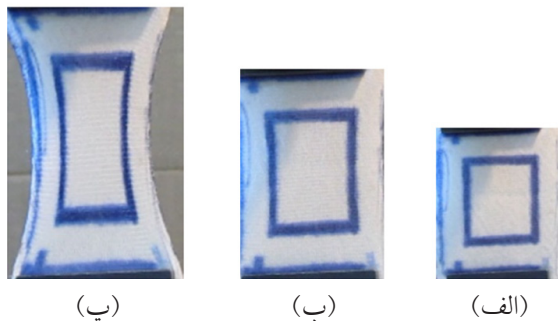
شکل ۲- طرحواره‌ای از نمونه آماده‌شده تحت کشش تک‌محوری.



شکل ۵- تصویربرداری از ضخامت پارچه دوجداره تحت کشش.



شکل ۳- دستگاه آزمون کشش، Instron مدل ۵۵۶۶.

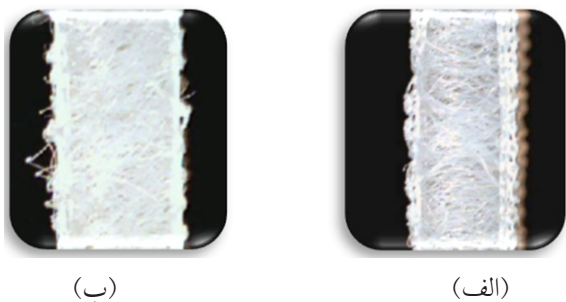


شکل ۶- تغییر شکل پارچه تحت کشش تک‌محوری در راستای رج از نمای مقابل در کرنش‌های مختلف: (الف) ۰، (ب) ۱۵٪ و (پ) ۳۰٪.

کشش تک‌محوری در راستای ردیف را نشان می‌دهند.

۴ نتایج و بحث

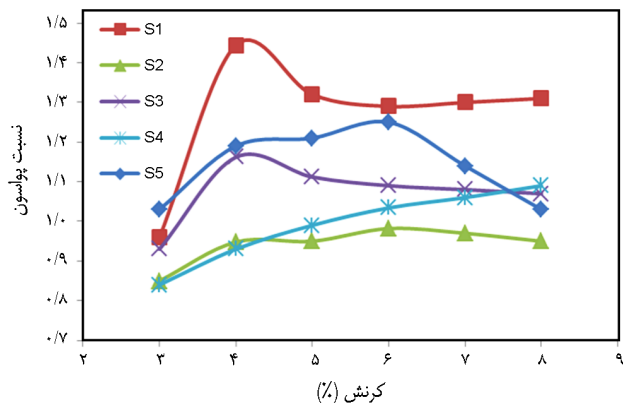
در ابتدا، شش سطح کرنش مختلف برای کشش نمونه‌ها در راستای رج و ردیف در ناحیه خطی اول انتخاب شد. جدول ۴ این کرنش‌ها را نشان می‌دهد. در ادامه به محاسبه ضریب‌های پواسون و ضریب شکل و مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداخته می‌شود.



۴-۱ محاسبه نسبت پواسون

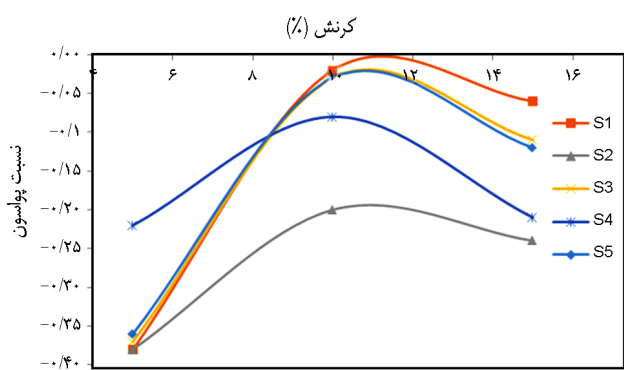
شکل ۷- تصویر راستای ضخامت پارچه تحت کشش تک‌محوری در راستای رج: (الف) پیش از کشش و (ب) پس از کشش (کرنش ۷٪).

شکل ۹ نمودار تغییرات نسبت پواسون در کرنش‌های مختلف در راستای رج و شکل ۱۰ در راستای ردیف، برای ۵ بار تکرار آزمون



شکل ۱۰- تغییرات نسبت پواسون در کرنش‌های مختلف در راستای ردیف.

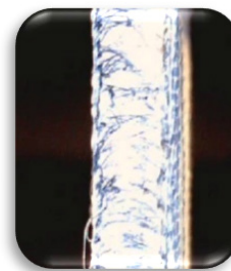
کشش تک‌محوری در راستای رج، ضخامت پارچه افزایش یافته و در واقع در راستای ضخامت، نسبت پواسون منفی است. بدین صورت که در ابتدا ضخامت پارچه تا مقدار معینی افزایش و سپس با افزایش کشش، ضخامت اندکی کاهش می‌یابد، اما هنوز از مقدار اولیه آن بیشتر است. این مورد را این گونه می‌توان توجیه کرد که با اعمال کشش تک‌محوری زاویه نخ‌های اتصال از مقدار اولیه بیشتر شده و به حالت عمودی نزدیک می‌شود. این کار، باعث ازدیاد ضخامت پارچه شده و افزایش کشش بیش از این مقدار، موجب کمایش نخ‌های اتصال می‌شود و ضخامت اندکی کاهش می‌یابد. برای نمونه‌هایی که در جهت ردیف تحت کشش تک‌محوری



شکل ۱۱- تغییرات نسبت پواسون ضخامت در کرنش‌های مختلف برای کشش در راستای رج.

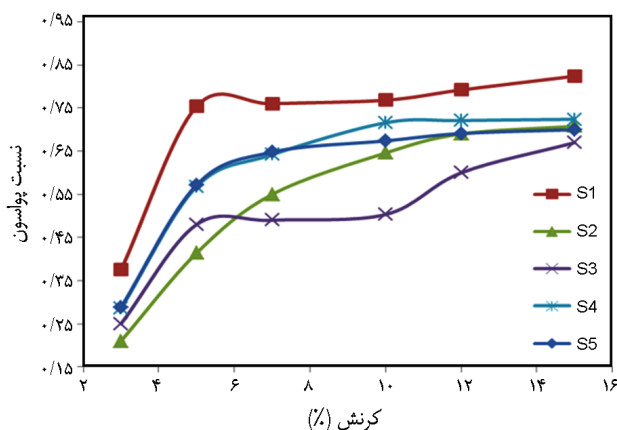


(ب)



(الف)

شکل ۸- تصویر راستای ضخامت پارچه تحت کشش تک‌محوری در راستای ردیف: (الف) پیش از کشش و (ب) پس از کشش (کرنش ۶٪).

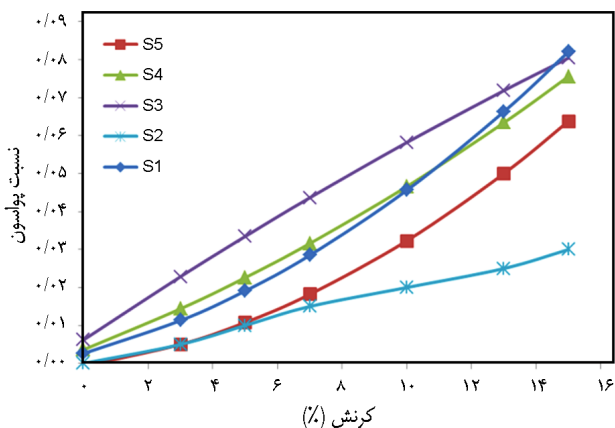


شکل ۹- تغییرات نسبت پواسون در کرنش‌های مختلف در راستای رج.

را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای نمونه‌های مختلف نسبت پواسون در کرنش‌های مختلف در راستای رج، در ناحیه خطی اول ثابت نیست و با افزایش کرنش، نسبت پواسون افزایش می‌یابد. همچنین، بررسی‌ها در راستای ردیف نشان می‌دهند که تغییرات نسبت پواسون در کرنش‌های مختلف، نه تنها متفاوت است، بلکه تغییرات آن‌ها از الگوی مشخصی پیروی نمی‌کنند. شکل ۱۱ نمودار تغییرات نسبت پواسون ضخامت با اعمال کشش محوری را در راستای رج نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، برای نمونه‌های مختلف، نسبت پواسون در راستای ضخامت در کرنش‌های مختلف یکسان نیست. همچنین با اعمال

جدول ۴- کرنش‌های منتخب در ناحیه خطی برای راستای رج و ردیف.

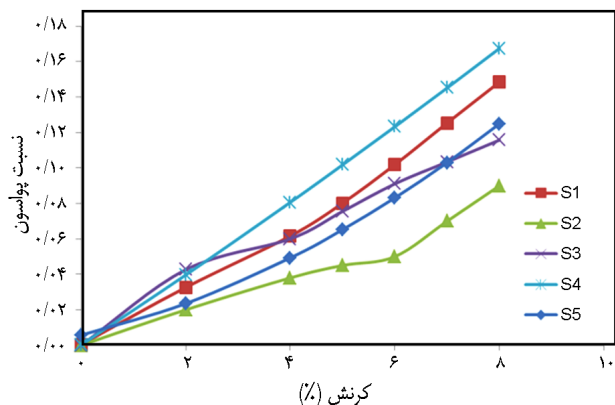
سطح						راستا
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱۵٪	۱۳٪	۱۰٪	۷٪	۵٪	۳٪	رج
۸٪	۷٪	۶٪	۵٪	۴٪	۳٪	ردیف



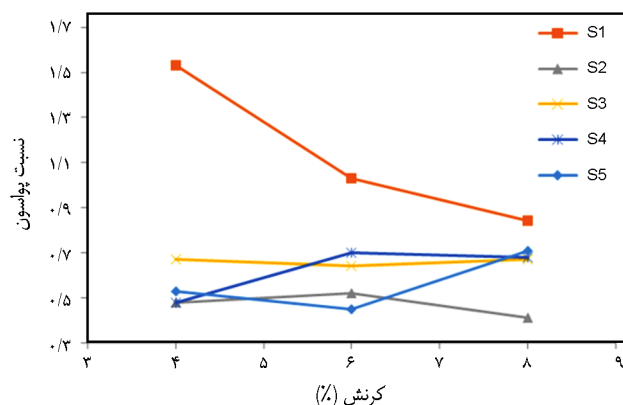
شکل ۱۳- نمودار نسبت تغییر شکل در کرنش‌های مختلف برای کشش نمونه‌ها در راستای رج.

کلیه نمونه‌ها بر اساس معادله‌های (۴) و (۵) محاسبه شده است. شکل ۱۳ نمودار نسبت تغییر شکل در کرنش‌های مختلف در راستای رج و شکل ۱۴ نمودار نسبت تغییر شکل در کرنش‌های مختلف را در راستای ردیف برای میانگین ۵ بار آزمون نشان می‌دهد. مشابه آنچه برای نسبت پواسون مشاهده شد، نسبت تغییر شکل نیز برای نمونه‌های مختلف هنگام اعمال کشش ثابت نبوده و در کرنش‌های مختلف متفاوت است. اما، برای نسبت تغییر شکل مشاهده می‌شود، این تغییرات در کرنش‌های مختلف دارای روند مشخصی است و با افزایش کرنش، مقدار نسبت تغییر شکل در راستای رج و ردیف افزایش می‌یابد. مطابق با نمودارهای شکل‌های ۱۳ و ۱۴ شاخص هندسی را می‌توان به صورت تابعی از کرنش تعریف کرد و از طریق شکل حاصل از اعمال یک نیروی کششی به میزان کرنش آن پی برد یا با اعمال یک تنش کششی و کرنش، شاخص هندسی و نسبت تغییر شکل آن را محاسبه کرد.

برای بررسی عوامل مؤثر بر نسبت تغییر شکل پارچه‌ها از آزمون



شکل ۱۴- نمودار نسبت تغییر شکل در کرنش‌های مختلف برای کشش نمونه‌ها در راستای ردیف.



شکل ۱۲- تغییرات نسبت پواسون ضخامت در کرنش‌های مختلف برای کشش در راستای ردیف.

قرار گرفته‌اند، اثر پواسون در راستای ضخامت بررسی شده است. با توجه به این موارد، زمانی که کشش در راستای ردیف اعمال می‌شود، ضخامت پارچه کاهش می‌یابد و با افزایش کشش، ضخامت کمتر می‌شود. از شکل ۱۲ مشخص است که تغییرات ضریب پواسون در کرنش‌های مختلف اگرچه برای S1 روند کاهشی دارد، اما برای سایر نمونه‌ها در تغییرات ضخامت روند مشخصی مشاهده نمی‌شود. در نتیجه، نسبت پواسون راستای ضخامت برای نمونه‌هایی که در جهت ردیف تحت کشش قرار می‌گیرند، به‌طور کلی مثبت است.

برای بررسی عوامل مؤثر بر مقدار نسبت پواسون از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد. نتایج این آزمون نشان داد، جهت اعمال کشش تک‌محوری (رج و ردیف)، کرنش و ساختار بافت پارچه عوامل اثرگذار بر محاسبه نسبت پواسون هستند. با توجه به نتیجه آزمون گروه‌بندی دانکن، ضخامت اولیه پارچه و زاویه نخ اتصال، به‌دلیل آنکه در گروه‌های جداگانه‌ای قرار گرفته‌اند، عامل معناداری در محاسبه نسبت پواسون هستند. همچنین، نتایج این گروه‌بندی نشان می‌دهد، کرنش عامل مؤثری در محاسبه نسبت پواسون است و با افزایش میزان کرنش در ناحیه خطی اول، این تأثیر کاهش می‌یابد. از این مورد می‌توان نتیجه گرفت، در ابتدای کشش، تغییرات نسبت پواسون زیاد است و با افزایش کشش به‌دلیل فشردگی ایجادشده در ساختار پارچه، جمع‌شدگی و تغییرات نسبت پواسون کاهش می‌یابد.

۲-۴ محاسبه نسبت تغییر شکل

با در نظر گرفتن تغییرات مساحت مربع رسم‌شده روی پارچه و ضخامت پارچه تحت کشش، شاخص هندسی و نسبت تغییر شکل

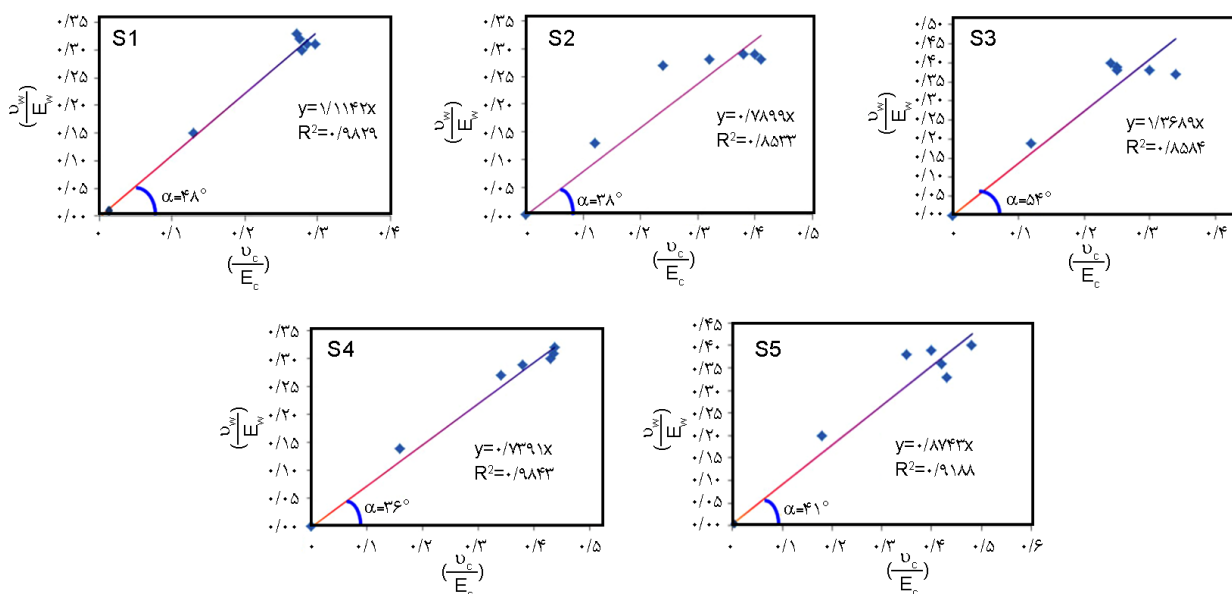
برابر نسبت پواسون به مدول یانگ در جهت رج (ν_c/E_c) رسم شد. بررسی نسبت تغییر شکل نیز با رسم نمودار نسبت تغییر شکل به مدول یانگ در جهت رج (K_c/E_c) در برابر نسبت تغییر شکل به مدول یانگ در جهت ردیف (K_w/E_w) در کرنش‌های مختلف انجام شد. لازم به ذکر است، معادله اثر متقابل زمانی برقرار است که شیب نمودارهای یادشده برابر با ۱ باشد. به عبارت دیگر، نقاط این نمودار باید روی خط 45° قرار گیرند.

شکل ۱۵ نمودارهای بررسی اثر متقابل و شکل ۱۶ نمودارهای بررسی اثر متقابل با جایگزینی نسبت تغییر شکل به جای نسبت پواسون را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. در جدول ۵ این نمودارها و ویژگی خط گذرنده از نقاط مختلف و مبدأ مختصات در آن‌ها بررسی و مقایسه شده است. در این جدول، زاویه خط گذرنده از نقاط نمودارهای مختلف و میزان اختلاف آن با زاویه 45° نشان داده شده است. مطابق با اطلاعات این جدول برای هر نمونه، نقاط نمودار نسبت تغییر شکل به مدول بیش از نقاط نمودار نسبت پواسون به مدول، به خط 45° نزدیک است. این موضوع نشانگر آن است که نسبت تغییر شکل بیش از نسبت پواسون با معادله اثر متقابل، مطابقت دارد. برای نمونه ۱ مشاهده شد، نسبت پواسون همانند نسبت تغییر شکل مطابقت زیادی با معادله اثر متقابل دارد. با توجه به اینکه در ساختار بافت آن نخ اتصال با صفر فاصله سوزن و به‌طور عمودی قرار دارد، در نتیجه وجود نخ اتصال عمودی در ساختار این پارچه‌ها، آن را به یک ساختار همسان‌گرد متعامد نزدیک‌تر می‌کند.

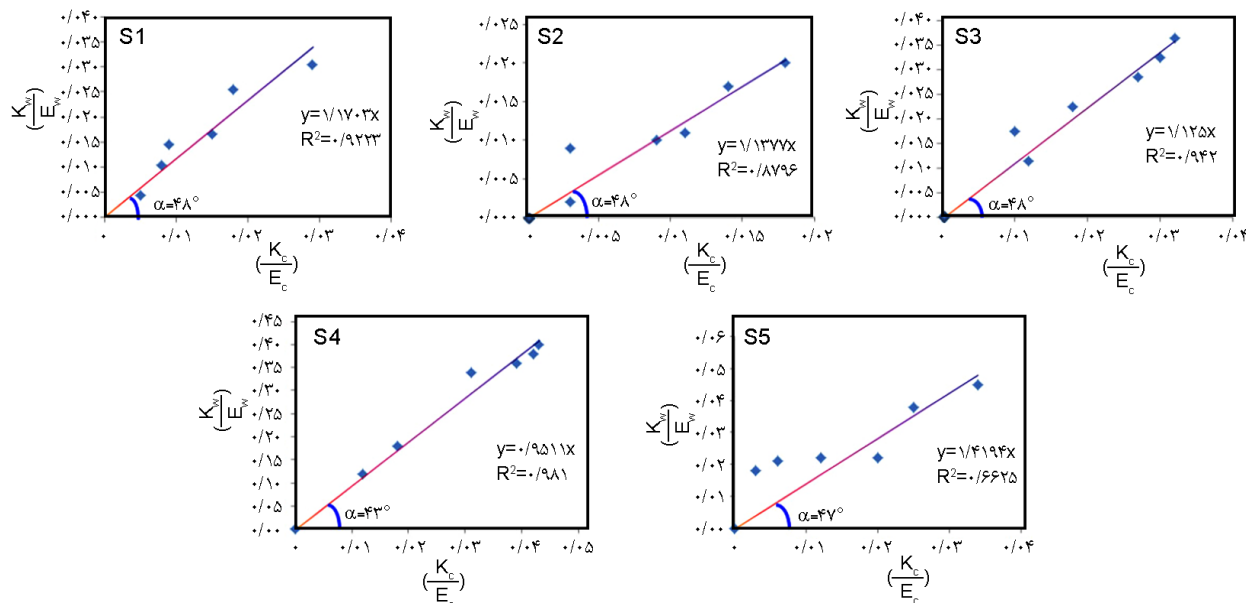
تحلیل واریانس یک‌طرفه در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد. نتایج این آزمون، مشابه آزمون انجام‌شده برای نسبت پواسون بود. نشان داده شد، راستای اعمال کشش تک‌محوری (رج و ردیف)، کرنش و ساختار بافت پارچه عوامل اثرگذار بر محاسبه نسبت تغییر شکل هستند. نتایج حاصل از گروه‌بندی دانکن نشان می‌دهد، نسبت تغییر شکل هر یک از ساختار بافت‌ها و کرنش‌های بررسی‌شده در گروه جداگانه‌ای قرار گرفته است. از این‌رو، از نظر آماری و در سطح اطمینان ۹۵٪ نسبت تغییر شکل هر کدام از نمونه‌ها با ساختار متفاوت و در کرنش‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است. به نظر می‌رسد، این مورد مؤید ویژگی شاخص هندسی باشد که برای هر شکل با ابعاد مشخص از ویژگی‌های ذاتی آن شکل هندسی است.

۳-۴ بررسی معادله اثر متقابل

با فرض اینکه پارچه دوجداره ساختاری ارتوتروپیک است، برای مقایسه نسبت پواسون و نسبت تغییر شکل و بررسی مناسب بودن نسبت تغییر شکل برای جایگزینی نسبت پواسون، این دو نسبت در معادله اثر متقابل بحث شده‌اند. با توجه به اینکه پارچه‌ها در دو راستای رج و ردیف تحت کشش تک‌محوری قرار گرفته‌اند و محاسبه دو نسبت در آن‌ها، برای بررسی نسبت‌های پواسون و تغییر شکل در معادله اثر متقابل به ترتیب از معادله‌های $\nu_c/E_c = \nu_w/E_w$ و $K_c/E_c = K_w/E_w$ استفاده می‌شود. برای بررسی نسبت پواسون، نمودار این نسبت به مدول یانگ در جهت ردیف (ν_w/E_w)



شکل ۱۵- بررسی اثر متقابل ماکسول در نمونه‌های مختلف S1, S2, S3, S4 و S5.



شکل ۱۶- بررسی اثر متقابل ماکسول با جایگزینی نسبت تغییر شکل با نسبت پواسون برای نمونه‌های مختلف S1، S2، S3، S4 و S5.

جدول ۵- مقایسه نمودارهای اثر متقابل برای نسبت پواسون و نسبت تغییر شکل.

$\frac{K_w}{E_w} = \frac{K_c}{E_c}$			$\frac{\nu_w}{E_w} = \frac{\nu_c}{E_c}$			نمونه
$ \alpha-45 $	$\alpha(^{\circ})$	ضریب همبستگی خط و نقاط (R ²)	$ \alpha-45 $	$\alpha(^{\circ})$	ضریب همبستگی خط و نقاط (R ²)	
۳	۴۸	۰/۹۲	۳	۴۸	۰/۹۸	S1
۳	۴۸	۰/۸۲	۷	۳۸	۰/۸۵	S2
۳	۴۸	۰/۹۲	۹	۵۴	۰/۸۶	S3
۲	۴۳	۰/۹۸	۹	۳۶	۰/۹۸	S4
۲	۴۷	۰/۶۶	۴	۴۱	۰/۹۲	S5

۵ نتیجه گیری

می‌گیرند، ضخامت آن‌ها در ناحیه خطی اول افزایش می‌یابد و دارای نسبت پواسون منفی در این راستا هستند. اما، تغییرات نسبت پواسون با کرنش از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. برای نمونه‌هایی که در راستای ردیف تحت کشش قرار می‌گیرند، ضخامت پارچه کاهش می‌یابد و نسبت پواسون مثبت است، ولی تغییرات آن با کرنش روند مشخصی ندارد. همچنین بررسی‌های آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ نشان داد، راستای انجام آزمون کشش تک‌محوری، ساختار بافت نخ‌های اتصال و میزان کرنش ایجادشده در پارچه عوامل مهم و مؤثری در محاسبه نسبت پواسون هستند. با محاسبه نسبت تغییر شکل برای پارچه تحت کشش تک‌محوری (در هر

نتایج بررسی نسبت پواسون در راستای رج و ردیف در این پژوهش نشان داد، نسبت پواسون برای نمونه‌های مختلف در راستای رج و ردیف ثابت نبوده و در کرنش‌های مختلف متفاوت است. تغییرات نسبت پواسون در کرنش‌های مختلف برای کشش تک‌محوری در راستای رج تقریباً روند افزایشی دارد. برای نمونه‌هایی که در راستای ردیف تحت کشش تک‌محوری قرار گرفته‌اند، روند مشخصی در تغییرات ضریب پواسون با کرنش مشاهده نشد. هنگامی که نمونه‌های مختلف در راستای رج تحت کشش قرار

بر محاسبه نسبت تغییر شکل هستند. در بررسی معادله اثر متقابل مشاهده شد، در پارچه دوجداره میزان انطباق نسبت تغییر شکل در معادله اثر متقابل بیش از نسبت پواسون است. بنابراین پیشنهاد می‌شود، برای بررسی تغییر شکل پارچه‌های دوجداره تحت کشش تک‌محوری، نسبت تغییر شکل به‌جای نسبت پواسون استفاده شود.

دو راستای رج و ردیف) مشاهده شد که نسبت تغییر شکل مانند نسبت پواسون برای پارچه ثابت نبوده و در کرنش‌های مختلف متفاوت بوده، اما تغییرات آن دارای روند مشخص افزایشی است. نتایج تحلیل آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ نشان داد، راستای انجام آزمون، ساختار بافت و کرنش ایجادشده در پارچه عوامل مؤثر

مراجع

- [1] L. Ciobanu, "Development of 3D knitted fabrics for advanced composite materials", In *Advances in Composites Materials-Ecodesign and Analysis*, IntechOpen, 2011, pp. 176-178.
- [2] F. Mokhtari, P. Mirzadeh Vaghefi, M. Shamshirsaz, and M. Latifi, "Analysis; analysis of compressibility behavior in warp knitted spacer fabrics: experiments and Van Wyk theory", *Fiber. Fabrics J. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 125-130, 2013.
- [3] Y. Li and J. Barbi, "Stable orthotropic materials", In *Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, Goslar, Germany, 2014.
- [4] F.P. Beer, E. Russell Johnston Jr., J.T. DeWolf, and D.F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, 6th ed., New York: McGraw-Hill, 2012.
- [5] H. Hu and A. Zulifqar, "Auxetic textile materials-a review", *J. Text. Eng. Fash. Technol.*, pp. 1-20, 2016. doi:10.15406/jteft.2016.01.00002
- [6] F. Kreith, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., Taylor and Francis Group, 2006.
- [7] N. Ezaz Shahabi, S. Saharkhiz, S.M. and Hosseini Varkiyani, "Effect of fabric structure and weft density on the Poisson's ratio of worsted fabric", *J. Eng. Fiber. Fabrics*, vol. 8, no. 2, pp. 63-71, 2013.
- [8] A.A. Asgharian Jeedi, H. Dabiryan, and S. Kalani, "An explanation of warp-knitted fabric deformation under uni-axial tension by a novel index as shape ratio", *J. Text. Inst.*, vol. 108, no. 4, pp. 500-506, 2016.
- [9] R.S. Monetro and E. Bribiesca, "State of the art of compactness and circularity measures", *Int. Math. Forum*, vol. 4, no. 27, pp. 1305-1335, 2009.
- [10] J. Chamberlain, "Hosiery yarns and fabrics, leicester college of technology", *Text. Res. J.*, vol. 2, pp. 107, 1926.
- [11] D. Munden, "26-the geometry and dimensional properties of plain-knit fabrics", *J. Text. Inst. Trans.*, vol. 50, pp. 448-471, 1959.
- [12] A. Hursa, T. Rulich, and S. Ercegović Ražić, "Determining psedo Poisson's ratio of woven fabric with a digital image correlation method", *Text. Res. J.*, vol. 79, no. 17, pp. 1588-1598, 2009.
- [13] P. Diana, "Influence kinds of materials on the Poisson's ratio of woven fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 75, no. 1, pp. 101-106, 2017.
- [14] S.P. Diana, P. Željko, and T. Marijana, "Influence of coating on the Poisson's ratio of woven fabrics", *Appl. Mech. Mater.*, vol. 827, pp. 27-30, 2016.
- [15] S. Ajeli and A.A. Asgharian Jeedi, "Geometrically Poisson's ratio of the polyester double-bar warp-knitted structures on the jamming point", *J. Text. Polym.*, vol. 2, no. 1, pp. 26-30, 2014.
- [16] Z. Wang and H. Hu, "3D auxetic warp-knitted spacer fabrics", *Phys. Status Solidi B*, vol. 251, no. 2, pp. 281-288, 2013.
- [17] Y. Chang and P. Ma, "Energy absorption and Poisson's ratio of warp-knitted spacer fabrics under uniaxial tension", *Text. Res. J.*, vol. 89, no. 6, pp. 1-11, 2018.
- [18] S.M. Bruer, N. Powel, and G. Smit, "Three-dimensionery knit spacer fabrics: a review of production techniques and application", *J. Text. Appar. Technol. Manag.*, vol. 4, no. 4, pp. 1-31, 2005. [18]
- [19] D. Mecit and A. Marmaral, "Application of spacer fabrics in composite production", *J. Mater. Sci.*, vol. 1, pp. 71-78, 2012.
- [20] H. Dabiryan, A.A. Asgharian Jeedi, and A. Rastgoo, "Analysis of warp knitted fabric structure. Part V: experimental study on initial modulus of warp knitted fabrics", *J. Text. Inst.*, vol. 104, no. 1, pp. 46-56, 2013.