

Simulation of Seam Puckering in Woven Fabrics with a Yarn-Level Numerical Model

Motahareh Kargar, Pedram Payvandy*, and Vajiheh Mozafary

Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University,

Postal Code 8915818411, Yazd, Iran

Received: 10 October 2021, Accepted: 18 December 2021

Abstract

Simulation of fabric behavior under different conditions is very important for optimizing the garment manufacturing process and improving garment design software programs. This study presents a numerical model for simulating and predicting seam puckering in woven fabrics. For this purpose, the yarn-level model simulation method was used. Based on this simulation technique, the behavior of the individual threads of the fabric structure and the sewing threads are modeled separately. Then their effect on each other is considered in the general model. In order to use the model in simulating the seam puckering of real samples, the effective properties of fabric structure and sewing threads, as well as sewing tension and sewing density, were measured and then applied to the model. Real and simulated samples were compared using indices defined based on the waveforms of seam wrinkling. The results showed that this model is able to simulate the degree of seam puckering of the fabric with an average error of 9.4%.

Keywords: seam puckering, numerical simulation, yarn level model, yarn simulation, elastic rod, fabric and seam structure

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

شبیه‌سازی کیس خوردگی درز در پارچه‌های تارپودی با استفاده از مدل عددی سطح نخ

مطهره کارگر، پدram پیوندی*، وجیهه مظفری

یزد، دانشگاه یزد، پردیس فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی نساجی، کد پستی ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱

دریافت: ۱۴۰۰/۷/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۷

چکیده

شبیه‌سازی رفتار پارچه در شرایط مختلف، در بهینه‌سازی فرایند تولید پوشاک و ارتقای نرم‌افزارهای طراحی لباس بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، مدل عددی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی کیس خوردگی درز در پارچه تارپودی ارائه و از روش شبیه‌سازی مدل سطح نخ استفاده شده است. براساس این فن شبیه‌سازی، رفتار تکتک نخ‌های ساختار پارچه و نخ‌های دوخت به‌طور مجزا مدل‌سازی و اثر آن‌ها بر یکدیگر در مدل کلی در نظر گرفته شده است. به‌منظور استفاده از مدل در شبیه‌سازی کیس خوردگی نمونه‌های واقعی، خواص مؤثر نخ‌های ساختار پارچه و دوخت، همچنین کشش دوزندگی و تراکم دوخت آن‌ها اندازه‌گیری و سپس در مدل اعمال شده است. نمونه‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از شاخص‌هایی مقایسه شدند که براساس شکل موج‌های حاصل از کیس خوردگی تعریف شده‌اند. نتایج نشان داد، این مدل قابلیت شبیه‌سازی درجه کیس خوردگی پارچه تارپودی را با میانگین خطای ۹/۴٪ دارد.

واژه‌های کلیدی: کیس خوردگی درز، شبیه‌سازی عددی، مدل سطح نخ، شبیه‌سازی نخ، میله کشسان، ساختار پارچه و درز

۱ مقدمه

همواره شبیه‌سازی رفتار پارچه در شرایط مختلف بسیار مورد توجه بوده است [۱، ۲]. با افزایش استفاده از طراحی رایانه‌ای و مدل‌های مجازی منسوجات در بخش‌های مختلف صنعت نساجی و پوشاک از قبیل تولید پارچه، طراحی و تولید لباس و همچنین فروش اینترنتی لباس، به اهمیت شبیه‌سازی افزوده شده است. بنابراین، نیاز به افزایش دقت و جزئیات در فن‌های شبیه‌سازی رفتار پارچه مشاهده می‌شود. از جمله رفتار پیچیده پارچه، کیس خوردگی درز است. کیس خوردگی، موج‌های کوتاه و بلندی است که در طول درز پدید می‌آیند. اگر کیس خوردگی به‌طور ناخواسته در محل درز پارچه پدید آید، باعث ایجاد ظاهری ناپسند و عیب در لباس می‌شود. شبیه‌سازی کیس خوردگی درز با توجه به ویژگی‌های پارچه و دوخت، ارزیابی درزهای لباس پیش از تولید را امکان‌پذیر می‌کند و باعث بهبود کیفیت درز در نرم‌افزارهای طراحی لباس می‌شود. از آنجا که کیس خوردگی از جمله مشکلات مهم در صنعت پوشاک بوده، مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. پژوهشگرانی همچون Chen در سال ۲۰۲۱ [۳]، Toshikj و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۴]، موسی‌زادگان و لطیفی در سال ۲۰۱۸ [۵] و Midha و

است. Kaldor و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۶]، برای نخستین بار رفتار پارچه حلقوی را با مدل سطح نخ شبیه‌سازی کردند. آنان در پژوهش خود، ابتدا مدلی برای یک رشته نخ با در نظر گرفتن نیروهای داخلی خمشی و خارجی برخورد، مقاومت در برابر فشردگی، میرایی (damping) و اصطکاک ارائه کردند. برای شبیه‌سازی رفتار پارچه به طور مستقیم بر حرکت و اثر متقابل نخ‌های تشکیل‌دهنده پارچه بر یکدیگر تمرکز کردند. Metaaphanon و همکاران [۱۷]، برای شبیه‌سازی جرخوردگی در پارچه تارپودی از فن شبیه‌سازی سطح نخ استفاده کردند. شبیه‌سازی جرخوردگی با سطح نخ این امکان را فراهم می‌کند که طی جرخوردگی هر نخ به طور مجزا بلغزد و پس از رسیدن به حد نهایی ازدیاد طول پاره شود.

Cirio و همکاران [۱۸] نیز نخ‌های تشکیل‌دهنده پارچه را به عنوان میله کشسان با در نظر گرفتن نیروی کششی و خمشی، شبیه‌سازی کردند. سپس، آن‌ها مدل پارچه حلقوی و تارپودی را براساس آن ارائه کردند. این پژوهشگران نیروی فشردگی، برشی، اصطکاک و برخورد را میان نخ‌های ساختار مدل پارچه لحاظ کردند. Htoo و همکاران [۱۹] نیز از شبیه‌سازی مجزای حلقه‌های نخ برای شبیه‌سازی ساختار پارچه حلقوی پودی استفاده کردند. آنان مدل نخ را به صورت مجموعه‌ای از سطح مقطع‌های دایره‌ای شامل نقاط جرم شبیه‌سازی کردند که با فنر به یکدیگر متصل شده‌اند. سپس با استفاده از فنرهای مختلف، خواص کششی و خمشی نخ را در مدل اعمال و از آن برای مدل‌سازی حلقه‌ای بافت پارچه استفاده کردند. به طور کلی، پارامترهای مؤثر در ایجاد کیس خوردگی درز به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول، شامل عوامل و پارامترهای دوخت از جمله نوع نخ، اندازه سوزن، نوع و تراکم دوخت و تنظیمات ماشین دوزندگی از قبیل سرعت و کشش دوخت است. گروه دوم، شامل ویژگی‌های پارچه از قبیل تراکم، جنس و بافت آن است. استفاده از فن شبیه‌سازی پارچه با مدل سطح نخ، امکان در نظر گرفتن جزئیات ویژگی‌های پارچه و پارامترهای مختلف دوخت را در یک مدل فراهم می‌کند. در این مقاله، مدل جدیدی از سطح نخ برای شبیه‌سازی کیس خوردگی درز در یک لایه پارچه تارپودی مبتنی بر پژوهش Cirio و همکاران [۱۸] ارائه شده است. مهم‌ترین مزیت استفاده از این نوع شبیه‌سازی، امکان در نظر گرفتن تعامل نخ‌های پارچه با یکدیگر و همچنین تعامل نخ‌های دوخت با یکدیگر و با نخ‌های ساختار پارچه است.

۲ تعریف مسئله

مدل درز مدنظر در این مقاله شامل دوخت لاک‌استیچ ۳۰۱ روی

Kumar در سال ۲۰۱۴ [۶]، پارامترهای اثرگذار بر کیس خوردگی را بررسی کرده‌اند. Chen در سال ۲۰۱۸ [۷]، Fernando در سال ۲۰۱۴ [۸] و موسی‌زادگان و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۹]، مطالعاتی در زمینه روش‌های اندازه‌گیری کیس خوردگی و ارزیابی ظاهر درز انجام داده‌اند. امیر و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۰، ۱۱]، مدل ریاضی براساس خواص مکانیکی پارچه برای پیش‌بینی کیس خوردگی درز ارائه کرده‌اند.

به منظور سهولت ارزیابی تأثیر خواص مکانیکی مختلف پارچه بر ظاهر درز، Inui و Yamanaka در سال ۱۹۹۸ [۱۲]، کیس خوردگی درز در یک نوار پارچه‌ای را شبیه‌سازی کردند. در این مدل، پارچه به شکل صفحه کشسان با ضخامت ناچیز مدل‌سازی و نیروهای ناشی از دوخت به خطی در مرکز مدل به عنوان خط درز اعمال شد. Hu و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۱۳]، کیس خوردگی درز حاصل از دوخت لاک‌استیچ ۳۰۱ را روی چند لایه پارچه با استفاده از مدل جرم و فنر شبیه‌سازی کردند. آنان در مدل خود خواص کششی، خمشی و برشی پارچه، اصطکاک میان لایه‌های پارچه و پارامترهای طول، عرض و ضخامت درز را در نظر گرفتند. در این مدل، از روش شبیه‌سازی ساختار پارچه ارائه‌شده توسط Provot [۱۴] و از فنرهایی در راستای ضخامت درز و طول بخیه‌ها به منظور شبیه‌سازی نیروهای کششی و فشردگی حاصل از دوخت استفاده شد.

موسی‌زادگان و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۱۵] مدل کیس خوردگی ناشی از کشش نخ دوخت را با استفاده از روش اجزای محدود ارائه کردند. در این مدل، پارچه به شکل پوسته پیوسته مدل‌سازی و نیروی حاصل از جمع‌شدگی نخ‌های دوخت به صورت نیروی فشردگی از سمت بخیه به پارچه اعمال شد. در این مدل مشابه با سایر مطالعات، نخ دوخت به طور کامل شبیه‌سازی نشد و تنها تأثیر آن در نظر گرفته شد. این پژوهشگران نتیجه‌گیری کردند، کیس خوردگی نوعی پدیده تصادفی است. همان‌طور که در نمونه‌های مشابه، کیس خوردگی‌های مشابه از نظر شکل و اندازه چین‌ها به وجود نیامده‌اند، نتایج شبیه‌سازی نیز به همین صورت است. در مطالعات پیشین، پارامترهای مربوط به دوخت و پارچه به طور کامل در نظر گرفته نشده‌اند. همچنین، پارچه به صورت صفحه در نظر گرفته شده است. بدین دلیل، امکان شبیه‌سازی برخی از رفتارهای پارچه از قبیل اصطکاک میان نخ‌های تار و پود و رفتار برشی پارچه که بر پایه تعامل نخ‌های سازنده آن با یکدیگر بوده، به طور دقیق وجود نداشته است.

از چند سال پیش، توجه پژوهشگران به شبیه‌سازی پارچه با استفاده از شبیه‌سازی مجزای نخ‌های تشکیل‌دهنده آن معطوف شده

در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار جریان شکل ۱ مشاهده می‌شود، اولین مرحله فن شبیه‌سازی استفاده‌شده، گسسته‌سازی مدل است. هدف از گسسته‌سازی، تبدیل مدل به مجموعه‌ای از نقاط است. با توجه به شرایط اولیه مدل به هر نقطه درجه آزادی حرکتی، سرعت اولیه و همچنین جرم مشخصی اختصاص داده می‌شود. حرکت نقاط مدل به مجموع نیروهای خارجی و داخلی اعمال‌شده به آن بستگی دارد. نیروهای داخلی مدل، تحت تأثیر خواص مکانیکی مدل هستند و نیروهای خارجی مطابق با نوع محیطی که برای شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود، متفاوتند. در هر مرحله (چرخه) از شبیه‌سازی، مجموع نیروهای داخلی و خارجی اعمال‌شده به تمام نقاط مدل محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از معادله نیرو، جابه‌جایی موقعیت جدید نقاط تحت تأثیر مجموع نیروهای واردشده به آن‌ها در بازه زمانی مدنظر محاسبه می‌شود. این مراحل تا رسیدن مدل به موقعیت ثابت تکرار می‌شود. از معادله (۱) برای فرمول‌بندی مدل فیزیکی استفاده شده است [۲۰]:

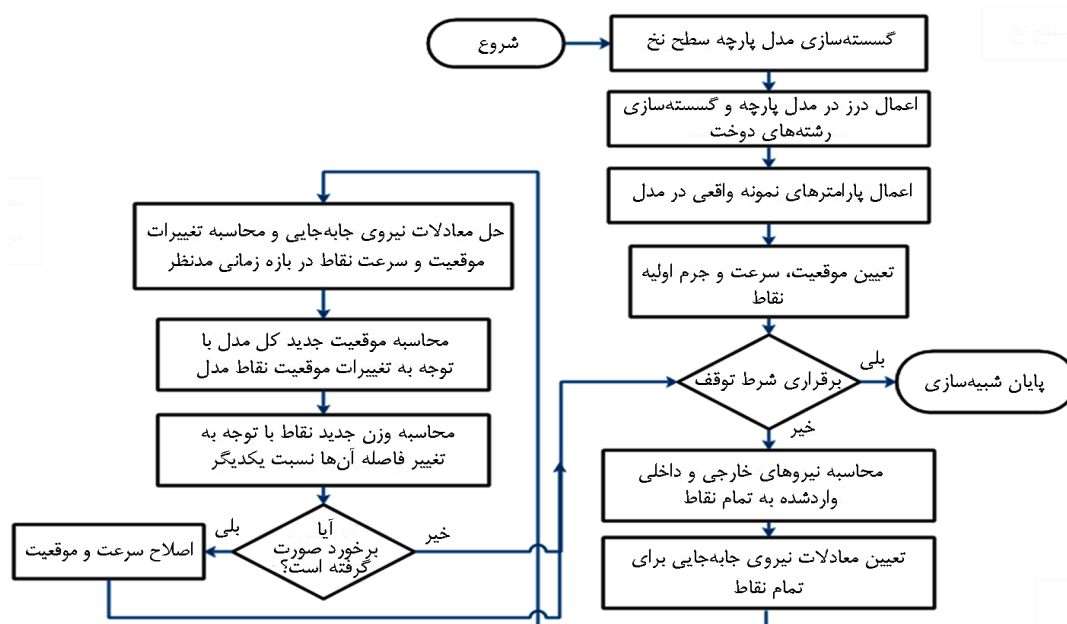
$$\ddot{x} = \text{Mas}^{-1}(F + f) \quad (1)$$

در این معادله، بردار $\ddot{x}$ به شتاب نقاط مدل و ماتریس Mas به توزیع وزنی آن‌ها اشاره دارند. بردار F به بردار نیروهای داخلی اعمال‌شده به نقاط مدل اشاره دارد و تابعی از موقعیت نقاط است.

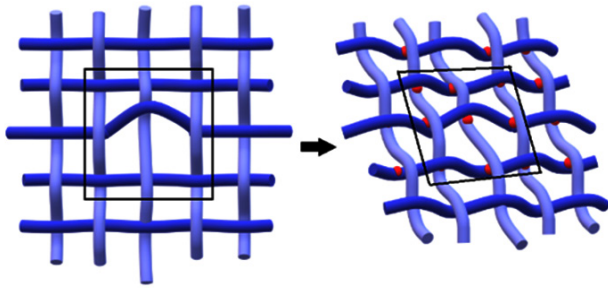
پارچه تافته یک‌لاست. یک درز شامل دو بخش پارچه و نخ‌های تشکیل‌دهنده دوخت است. در این مقاله، رفتار نخ‌های تار و پود ساختار پارچه و همچنین نخ‌های دوخت به‌طور مجزا مدل‌سازی شده‌اند. در مدل‌سازی نخ‌های ساختار پارچه و نخ‌های دوخت، رفتار کششی، خمشی، پیچشی و همچنین ویژگی‌هایی همچون وزن و ظرافت رشته‌ها در نظر گرفته شده است. رشته‌های مدل، مطابق با ساختار پارچه و درز آرایش‌یافته و نیروهای حاصل از اصطکاک و رفتار برشی و همچنین برخورد میان آن‌ها در نظر گرفته شده است. از مهم‌ترین مسائل در شبیه‌سازی پارچه با مدل سطح نخ، برخورد در نقاط تقاطع نخ‌هاست. محاسبه برخورد و پاسخ به برخورد به‌صورت مجزا برای تمام نقاط تقاطع باعث افزایش حجم محاسبات می‌شود. Cirio و همکاران [۱۸]، فن خاصی را برای مقابله با نقاط برخورد نخ‌های تار و پود در مدل پارچه شبیه‌سازی‌شده سطح نخ ارائه کردند. روش آنان براساس روش خاصی برای گسسته‌سازی نخ‌های تار و پود است. در این مقاله نیز از این روش گسسته‌سازی به‌منظور در نظر گرفتن برخورد در نقاط تقاطع استفاده می‌شود. طبق بررسی‌های انجام‌شده، تاکنون روشی مبتنی بر شبیه‌سازی سطح نخ برای شبیه‌سازی کیس‌خوردگی درز ارائه نشده است. در ادامه جزئیات مدل شرح داده شده است.

۲-۱ مدل فیزیکی

نمودار جریان مراحل کلی مدل فیزیکی استفاده‌شده در این مقاله



شکل ۱- نمودار جریان مراحل شبیه‌سازی.



شکل ۳- جابه‌جایی نقطه‌ای از رشته بود در جهت تار در مدل پارچه.

آزادی به زاویه پیچش (θ)، اختصاص داده می‌شود. سپس با توجه به روش گسسته‌سازی به‌کاررفته، به هر نقطه دو درجه آزادی برای جابه‌جایی در جهت تار و بود، لغزیدن تار و بود بر یکدیگر (K و G) نیز اختصاص داده می‌شود. K مقدار جابه‌جایی نقطه تقاطع در راستای تار و G مقدار جابه‌جایی نقطه تقاطع در راستای بود هستند. مطابق با این روش گسسته‌سازی، با جابه‌جایی نقطه تقاطع در راستای تار، نقطه گسسته‌سازی شده رشته تار در این محل نیز به همین اندازه جابه‌جا می‌شود. همچنین، با جابه‌جایی نقطه تقاطع در راستای بود، نقطه گسسته‌سازی شده رشته بود در این محل به همین اندازه جابه‌جا می‌شود.

۲-۲-۲ اعمال درز در مدل پارچه و گسسته‌سازی آن

برای اعمال درز در مدل، ابتدا مدل پارچه مطابق با شکل ۴ در راستای دوخت مجدد گسسته‌سازی می‌شود. اگر درز در جهت بود در نظر گرفته شود، گسسته‌سازی روی تارها انجام می‌شود و برعکس. در این مقاله، تمام درزها در جهت بود فرض شده است. در شکل ۴، گسسته‌سازی در یک ردیف و روی نخ‌های تار را نشان می‌دهد. نقاط گسسته‌سازی شده به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

برای در نظر گرفتن دوخت لاک‌استیچ ۳۰۱ در مدل، دو رشته به‌عنوان نخ‌های دوخت و مشابه با ساختار این نوع دوخت در مدل پارچه آرایش می‌یابند (شکل ۵). رشته‌های دوخت در دو مرحله گسسته‌سازی می‌شوند. ابتدا با توجه به تراکم پارچه در جهت درز گسسته‌سازی می‌شود و سپس نقاط گسسته‌سازی شده آن‌ها بر نقاط گسسته‌سازی شده پارچه در راستای درز منطبق می‌شوند. در مرحله دوم، رشته‌ها با توجه به محل تقاطع نخ سوزن و ماسوره در محل گره بخیه گسسته‌سازی می‌شوند. شکل ۵، واحدی از مدل پارچه و یک بخیه در نظر گرفته شده روی آن را نمایش می‌دهد. در شکل ۵، نقاط سبز رنگ به محل تقاطع رشته‌های نخ اشاره دارند که رشته‌های دوخت و تار پارچه در این نقاط گسسته‌سازی شده‌اند.

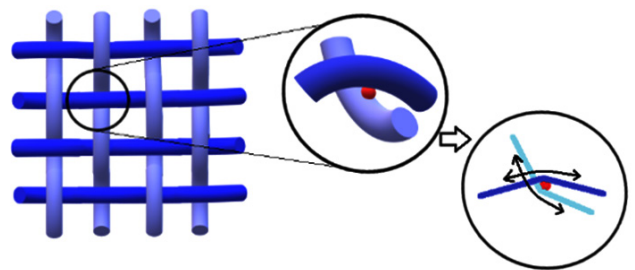
بردار f نیز نشانگر بردار نیروهای خارجی اعمال شده به نقاط مدل است. از روش حل Baraff و Witkin [۲۰] برای حل معادله (۱) استفاده شده است.

۲-۲ گسسته‌سازی مدل پارچه و درز سطح نخ

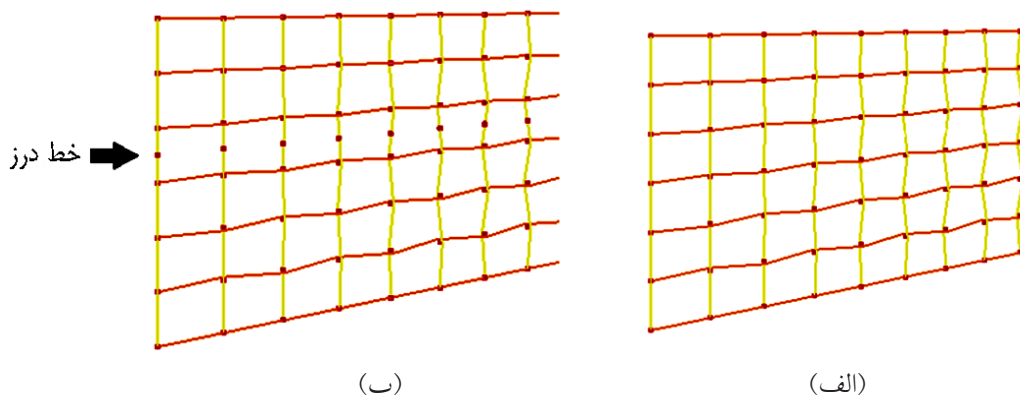
۲-۲-۱ گسسته‌سازی مدل پارچه

برای گسسته‌سازی مدل پارچه سطح نخ، ابتدا مدل رشته‌های نخ تار و بود متناسب با بافت و تراکم پارچه نسبت به یکدیگر آرایش می‌یابند و متناسب با طول و عرض پارچه تکرار می‌شوند. سپس، رشته‌های تار و بود براساس روش ارائه شده توسط Cirio و همکاران [۱۸]، گسسته‌سازی می‌شوند. براساس این روش، مدل رشته‌های تار و بود به‌طور مجزا در نقاط تقاطع بافت گسسته‌سازی می‌شوند. بنابراین، مدل در هر نقطه تقاطع بافت شامل یک نقطه از تار و یک نقطه از بود است. براساس این نوع گسسته‌سازی، این نقطه تقاطع همواره وجود داشته، اما قابلیت لغزیدن در راستای تار و بود را نیز دارد. این نقاط به‌طور نمایی در بافت تافته در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۳، به‌عنوان مثال جابه‌جاشدن یک نقطه از بود در جهت تار نشان داده شده است. پس از آرایش رشته‌های تار و بود به‌شکل ساختار پارچه، تجعد نخ‌های تار و بود نیز به مدل اعمال و میزان تجعد با توجه به قطر نخ تار و بود در نظر گرفته می‌شود.

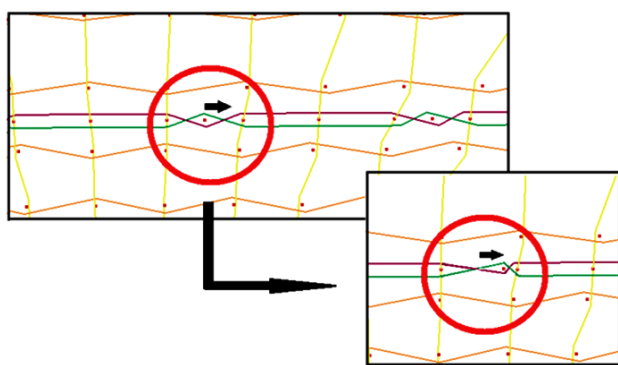
Bergou و همکاران [۲۱]، مدلی برای شبیه‌سازی میله کشسان انعطاف‌پذیر ارائه کردند. کارگر و همکاران [۲۲] در مطالعات خود، قابلیت مدل Bergou را برای شبیه‌سازی نخ ارزیابی کردند. نتایج آنان نشان داد، این مدل قابلیت شبیه‌سازی رفتار یک رشته نخ را با خطای قابل قبول دارد. در این مقاله نیز از این روش برای مدل‌سازی رشته‌های تار و بود استفاده شده است. بنابراین، مطابق با مدل آن‌ها در مرحله اول به هر نقطه سه درجه آزادی برای جابه‌جایی در فضای سه‌بعدی مختصات (x ، y و z) و یک درجه



شکل ۲- نمایی از مدل پارچه با بافت تافته با در نظر گرفتن نقاط گسسته‌سازی در نقاط تقاطع.



شکل ۴- گسسته‌سازی پارچه درزدار: (الف) مدل پارچه پیش از گسسته‌سازی در راستای دوخت و (ب) مدل پارچه پس از گسسته‌سازی در راستای دوخت.



شکل ۷- نمایی از لغزیدن و تغییر موقعیت نقطه گره در مش‌بندی پارچه درزدار.

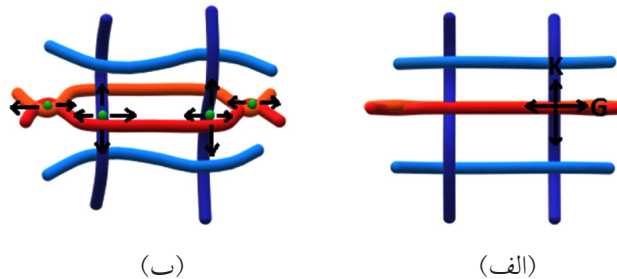
دوخت اشاره دارد. با جابه‌جایی نقطه تقاطع در راستای تار، نقطه گسسته‌سازی شده رشته تار در این محل نیز به همین میزان جابه‌جا شده و همچنین با جابه‌جایی نقطه تقاطع در راستای رشته دوخت، نقطه گسسته‌سازی شده رشته دوخت نیز در این محل به همین میزان جابه‌جا می‌شود. در این مدل، طول بخیه قرار دارند، دو درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۶، نمایی از مش‌بندی قطعه‌ای پارچه همراه با درز و شکل ۷ نمایی از نقطه گره که از حالت تعادل خارج و در راستای دوخت لغزیده و تغییر موقعیت داده است را نمایش می‌دهند.

۱-۳ نیروهای داخلی و خارجی مدل پارچه با درز

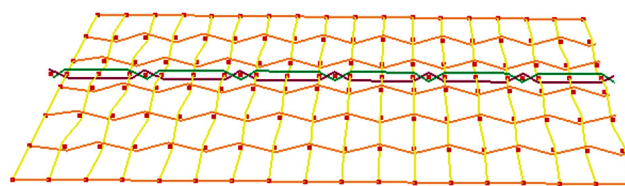
نیروهای در نظر گرفته شده در این مقاله برای مدل پارچه یک‌لا و درزدار به سه گروه دسته‌بندی می‌شوند:

- نیروهای داخلی ساختار پارچه بدون در نظر گرفتن نیروهای حاصل از درز،

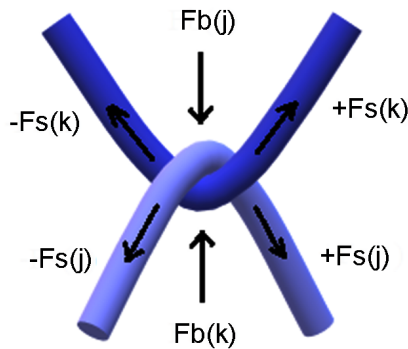


شکل ۵- نمای سه‌بعدی از یک واحد از مدل دوخت لاک‌استیج ۳۰۱ روی پارچه تافته: (الف) نما از سمت مقابل و (ب) جهت جابه‌جایی نقاط گسسته‌سازی شده نخ‌های دوخت.

از مدل میله کشسان ارائه شده توسط Bergou و همکاران [۲۱] برای مدل‌سازی رشته‌های دوخت نیز استفاده می‌شود. بنابراین، ابتدا مطابق با مدل آن‌ها برای هر نقطه، سه درجه آزادی برای جابه‌جایی در فضای سه‌بعدی مختصات (x, y, z) و یک درجه آزادی برای زاویه پیچش در نظر گرفته می‌شود. سپس، افزون بر درجه آزادی‌ها، به نقاطی که در طول بخیه قرار دارند، دو درجه آزادی دیگر (K و G) و به نقاط واقع بر گره بخیه یک درجه آزادی (G) نیز اختصاص داده می‌شود. K به میزان جابه‌جایی نقطه تقاطع در راستای تار و G به میزان جابه‌جایی نقطه تقاطع در راستای رشته



شکل ۶- مدل ارائه شده سطح نخ برای درز روی پارچه یک‌لا (فاصله گره‌ها با توجه به تراکم دوخت در مدل تنظیم می‌شوند).



شکل ۸- نیروی فشردگی در نقاط تقاطع تار و پود. F_b و F_s به ترتیب نیروی کششی و خمشی هستند.

فشردگی میان نقاط تقاطع تار و پود تحت تأثیر نیروی خمشی و کششی تار و پودها در نظر گرفته شده است (شکل ۸) و از معادله (۴) برای تقریب نیروی فشردگی در هر نقطه تقاطع استفاده می‌شود:

$$F_n = \frac{1}{2} n^T (F_{tension(j)} + F_{bend(j)} - F_{tension(k)} - F_{bend(k)}) \quad (4)$$

در این معادله، F_n ، $F_{tension(k)}$ ، $F_{tension(j)}$ ، $F_{bend(k)}$ ، $F_{bend(j)}$ و n به ترتیب نیروی فشردگی، نیروهای کششی در جهت تار و پود، نیروهای خمشی در جهت تار و پود و بردار عمود میان تار و پود هستند.

۲-۳-۲ نیروی اصطکاک در نقاط تقاطع نخ‌های تار و پود

نیروی اصطکاک با استفاده از فنر با طول صفر، میان طول اولیه و ثانویه دو نقطه متوالی از تار (پود) مدل‌سازی شده است. اگر μ به عنوان ضریب اصطکاک ایستا در نظر گرفته شود، در صورتی که نیروی حاصل از تغییر طول فنر کمتر از μF_n باشد، نیروی اصطکاک ایستا و در صورتی که بیش از μF_n باشد، نیروی اصطکاک جنبشی در نقطه تقاطع اعمال و از معادله (۵) برای محاسبه آن استفاده می‌شود [۱۸]:

$$F_{friction} = \begin{cases} -k_f(u_0 - \bar{u}_0) & \text{if stick} \\ \mu F_n & \text{if } (u_0 - \bar{u}_0) < 0 \\ 0 & \text{if } (u_0 - \bar{u}_0) = 0 \\ -\mu F_n & \text{if } (u_0 - \bar{u}_0) > 0 \end{cases} \quad \text{if slip} \quad (5)$$

که در آن، $\bar{u}_0$ و u_0 به ترتیب فاصله دو تار متوالی (دو پود متوالی) پیش از لغزش نقطه تقاطع و پس از آن بوده و k_f ضریب اصطکاک جنبشی است. ضرایب μ و k_f هر دو ۰/۳ در نظر گرفته شدند [۱۸].

- نیروهای خارجی اعمال شده به کل مدل و

- نیروهای داخلی رشته‌های دوخت و نیروهای میان آن‌ها و مدل پارچه.

نیروهای داخلی در نظر گرفته شده برای مدل پارچه بدون در نظر گرفتن نیروهای حاصل از درز، به دو گروه دسته‌بندی می‌شوند:

- نیروهای داخلی رشته‌های تار و پود (بدون در نظر گرفتن نیروهای حاصل از ساختار پارچه) و

- نیروهای ناشی از آرایش یافتن رشته‌های تار و پود به شکل ساختار پارچه.

در این مقاله، از نظریه میله کشسان گسسته ارائه شده توسط Bergou و همکاران [۲۱] برای شبیه‌سازی نخ‌های ساختار پارچه به صورت رشته استفاده شده است. بر این اساس، نیروهای داخلی کششی، خمشی و پیچشی برای مدل نخ در نظر گرفته می‌شود. روش محاسبه این نیروها به طور کامل توسط Bergou و همکاران [۲۱] شرح داده شده است. در این مقاله، ویژگی‌های مدل نخ‌های تار و پود در ناحیه کشسان در نظر گرفته شده است و از معادله‌های زیر برای محاسبه سفتی کششی (k_s)، خمشی (B) و پیچشی (β) آن‌ها استفاده می‌شود [۲۱]:

$$k_s = E\pi R^2 \quad \beta = \frac{Q\pi R^4}{2} \quad B = \frac{E\pi R^4}{4} \quad (2)$$

که در آن، E ، Q و R به ترتیب مدول یانگ، مدول برشی و شعاع نخ هستند. مدول برشی رشته نیز از معادله (۳) با استفاده از ضریب پواسون (ν) محاسبه می‌شود [۲۳]. ضریب پواسون رشته‌های نخ به طور میانگین ۰/۳ در نظر گرفته شد [۲۴]:

$$Q = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

برای شبیه‌سازی هر نمونه پارچه، مدول اولیه و شعاع نخ‌های تار و پود اندازه‌گیری می‌شود. سپس، سفتی کششی، خمشی و پیچشی آن‌ها به طور مجزا محاسبه و در مدل اعمال می‌شود. با توجه به آرایش نخ‌های تار و پود به شکل ساختار پارچه نسبت به یکدیگر، نیروهای برشی، فشردگی و اصطکاک میان رشته‌های تار و پود، همچنین برخورد میان تار و پودهای موازی در مدل پارچه در نظر گرفته شده است که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

۲-۳-۱ نیروی فشردگی در نقاط تقاطع نخ‌های تار و پود

در این مقاله، مطابق با مطالعات Cirio و همکاران [۱۸]، نیروی

رشته‌های دوخت، مدول کششی و شعاع نخ دوخت اندازه‌گیری شدند. سفتی کششی، خمشی و پیچشی آن‌ها نیز با استفاده از معادله‌های (۲) و (۳) محاسبه و در مدل اعمال شد. با توجه به ساختار درز، نیروهای برخورد میان رشته‌های موازی و اصطکاک میان نخ‌های دوخت و نخ‌های ساختار پارچه در مدل در نظر گرفته شدند که در ادامه شرح داده می‌شوند.

۲-۴-۱ نیروی اصطکاک میان رشته‌های دوخت و نخ‌های ساختار پارچه

نیروی اصطکاک میان رشته‌های دوخت و نخ‌های ساختار پارچه نیز تابعی از نیروی فشردگی میان نخ‌های ساختار پارچه و نخ‌های دوخت در نظر گرفته شده است. بدین منظور مشابه با بخش ۲-۳-۱، نیروی فشردگی میان نقاط تقاطع تحت تأثیر نیروی خمشی و کششی نخ‌های متقاطع در نظر گرفته شده و از معادله (۴)، برای تقریب نیروی فشردگی در یک نقطه تقاطع استفاده شد. با این تفاوت که $F_{tension(j)}$ ، $F_{tension(k)}$ ، $F_{bend(j)}$ و $F_{bend(k)}$ در معادله (۴) به ترتیب نشانگر نیروهای کششی در جهت نخ تار و رشته دوخت (نخ سوزن یا نخ ماسوره)، نیروهای خمشی در جهت نخ تار و رشته دوخت (نخ سوزن یا نخ ماسوره) و بردار عمود میان پارچه و رشته دوخت هستند. از معادله (۵) نیز برای محاسبه نیروی اصطکاک میان نخ‌های تار و رشته دوخت استفاده می‌شود. نیروی اصطکاک میان نخ سوزن و نخ‌های تار و همچنین رشته نخ ماسوره و نخ‌های تار به‌طور مجزا محاسبه می‌شود. از نیروی اصطکاک میان نخ ماسوره و نخ سوزن در ناحیه گره صرف‌نظر شده است.

۲-۴-۲ نیروی برخورد میان نخ‌های دوخت و نخ‌های ساختار پارچه

مطابق با مش‌بندی ارائه‌شده در شکل ۶، نقاط گره حاصل از درهم‌روی نخ سوزن و ماسوره میان ساختار مدل پارچه در نظر گرفته شده است. برای مدل‌کردن برخورد نقطه گره با دو تار (پود) مجاور آن نیز از روش پنالیتی استفاده می‌شود [۱۸]. حد مجاز فاصله رشته تار و نخ دوخت، مجموع شعاع رشته تار و شعاع نخ دوخت در نظر گرفته شده است. از معادله (۷) برای محاسبه انرژی پنالیتی بین دو نقطه گره و نقطه رشته مجاور آن استفاده می‌شود. برای مدل‌کردن برخورد میان رشته‌های دوخت در طول بخیه با نقاط پارچه که موازی و مجاور بخیه هستند نیز مطابق با معادله (۷) عمل می‌شود.

نیروی وزن و میرایی به‌عنوان نیروهای خارجی کل مدل

۲-۳-۳ نیروی برشی در نقاط تقاطع نخ‌های تار و پود

رفتار برشی پارچه بر رفتار خمشی و آویزشی آن، همچنین کیس‌خوردگی درز ایجادشده روی پارچه اثرگذار است. جابه‌جایی برشی نخ‌های تار و پود نسبت به یکدیگر باعث ایجاد اصطکاک تماسی در نقاط تقاطع می‌شود. در این مقاله، برای اعمال تأثیر جابه‌جایی برشی در مدل، از نیروی اصطکاک حاصل از تغییر زاویه میان نخ‌های تار و پود در نقاط تقاطع استفاده شده است. مشابه روش محاسبه نیروی اصطکاک لغزشی، از معادله (۶) برای محاسبه نیروی اصطکاک زاویه‌ای استفاده می‌شود. در این معادله Φ و $\bar{\Phi}$ به ترتیب اشاره به زاویه اولیه میان نخ تار و پود و زاویه پس از تغییر برشی میان نخ تار و پود در نقطه تقاطع اشاره دارند [۱۸]:

$$F_{\text{shear}} = \begin{cases} -k_{\phi}(\phi - \bar{\phi}) & \text{if stick} \\ \begin{cases} \mu_{\phi} F_n & \text{if } (\phi - \bar{\phi}) < 0 \\ 0 & \text{if } (\phi - \bar{\phi}) = 0 \\ -\mu_{\phi} F_n & \text{if } (\phi - \bar{\phi}) > 0 \end{cases} & \text{if slip} \end{cases} \quad (6)$$

۲-۳-۴ برخورد میان رشته‌های موازی تار و پود

برای مدل‌سازی برخورد رشته‌های موازی تار و پود نیز از روش ارائه‌شده توسط Cirio و همکاران [۱۸] استفاده شده است. در این روش، اگر رشته‌های مجاور از حد مشخصی به یکدیگر نزدیک‌تر شوند، انرژی پنالیتی به آن‌ها اعمال می‌شود. حد مجاز فاصله (d)، دو برابر شعاع رشته در نظر گرفته شده است. از معادله (۷) برای محاسبه انرژی پنالیتی بین دو نقطه با سفتی برخورد k_c استفاده شده است. k_1 و k_2 دو نقطه متناظر از دو رشته مجاور هستند:

$$E_{\text{Parallel-collision}} = \begin{cases} \frac{1}{2} k_c L (|k_1 - k_2| - d) & \text{if } k_1 - k_2 < d \\ 0 & \text{if } k_1 - k_2 \geq d \end{cases} \quad (7)$$

نیروی برخورد میان رشته‌های موازی نیز از منفی گرادیان معادله انرژی آن محاسبه می‌شود. سفتی برخورد، ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است [۱۸].

۲-۴-۲ نیروهای داخلی رشته‌های دوخت و نیروهای میان آن‌ها و مدل پارچه

از نظریه میله کشسان گسسته Bergou و همکاران [۲۱] برای شبیه‌سازی نخ‌های دوخت نیز استفاده شد. مطابق با این مدل، نیروهای داخلی کششی، خمشی و پیچشی برای مدل رشته‌های دوخت در نظر گرفته می‌شود. برای شبیه‌سازی نیروهای داخلی

۳-۲ مواد اولیه

مشخصات پارچه‌های استفاده‌شده در این مقاله در جدول ۱ و مشخصات نخ‌های استفاده‌شده در بافت پارچه در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳ تجربی

۳-۱ طرح آزمایش

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد، کشش دوزندگی و خواص مکانیکی و فیزیکی پارچه تأثیر زیادی بر ایجاد کیس خوردگی درز دارند [۵،۱۰]. بنابراین در این کار، آزمایش‌های تجربی به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که قابلیت مدل در شبیه‌سازی کیس خوردگی تحت تأثیر این پارامترها بررسی می‌شود. از مدل ارائه‌شده برای شبیه‌سازی کیس خوردگی درز در سه نوع پارچه تافته متفاوت استفاده شد. همچنین، برای ارزیابی قابلیت مدل در شبیه‌سازی رفتار درز ناشی از کشش‌های دوزندگی متفاوت، از سه درجه کشش دوزندگی مختلف (کم، متوسط و زیاد) برای تولید نمونه‌های واقعی استفاده شد. سپس، این مقدار کشش دوزندگی در مدل اعمال و کارایی مدل در شبیه‌سازی کیس خوردگی ناشی از کشش دوزندگی ارزیابی شد. کمترین درجه کشش دوزندگی به‌گونه‌ای تعیین شد که باعث پدیدآمدن کیس خوردگی کمی در نمونه شود. کیس خوردگی در دو مرحله، ابتدا پس از ایجاد دوخت و استراحت پارچه و در مرحله دوم پس از شست‌وشوی پارچه ایجاد می‌شود. در این مقاله، شبیه‌سازی کیس خوردگی پس از استراحت و پیش از شست‌وشوی پارچه انجام شده است.

قطر نمونه نخ‌ها با مطالعه میکروسکوپی به‌دست آمد. بدین منظور، از هر نمونه نخ تعداد پنج نمونه به‌طول ۵۰ cm تهیه و پنج نقطه به فاصله برابر از هر نمونه انتخاب شد. قطر نخ در آن نقطه اندازه‌گیری و در نهایت از میانگین مقادیر به‌دست‌آمده برای تخمین قطر نخ استفاده شد. مدول اولیه (مدول یانگ) نخ‌ها با استفاده از شیب اولیه منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها محاسبه شد. برای این کار، از دستگاه استحکام‌سنج Instron استفاده شد. طبق استاندارد ASTM D 2256 [۲۶]، از هر نمونه نخ تعداد ۱۵ نمونه با طول اولیه ۵۰ cm انتخاب و آزمایش استحکام برای آن‌ها انجام شد. نمودار نیرو-ازدیاد طول نمونه‌ها ثبت و از میانگین نتایج برای محاسبه مدول اولیه نمونه نخ استفاده شد. در شکل ۹، یک نمونه نمودار نیرو-ازدیاد طول برای نخ پود نمونه N2 نشان داده شده است.

برای دوخت تمام نمونه‌ها از ماشین راسته‌دوز Kanza مدل kz-9800-D2، سوزن دوخت شماره ۱۴ و سرعت دوزندگی ثابت استفاده شد. تمام دوخت‌ها با بخیه لاک‌استیچ ۳۰۱ و تراکم دوخت ۳ بخیه در سانتی‌متر انجام و از نخ ریسیده شده ۱۰۰٪ پلی‌استر برای دوخت نمونه‌ها استفاده شد. مشخصات نخ دوخت استفاده‌شده در جدول ۳ ارائه شده است.

تمام دوخت‌ها در جهت پود نمونه‌ها ایجاد شده و پیش از هرگونه اندازه‌گیری، نمونه‌ها بر سطحی مسطح در دمای $23 \pm 2^\circ\text{C}$ و

جدول ۱- مشخصات نمونه پارچه‌ها.

شماره نمونه	تراکم تار ($/\text{cm}$)	تراکم پودی ($/\text{cm}$)	جنس نخ تار	جنس نخ پود
N1	۳۴	۲۴	پنبه	پنبه
N2	۲۴	۱۲	پنبه-پلی‌استر	پنبه-پلی‌استر
N3	۳۲	۲۲	پلی‌استر	پلی‌استر

جدول ۲- مشخصات نخ‌های بافت پارچه.

شماره نمونه	نمره نخ (tex)		مدول اولیه نخ (cN/dtex)		قطر نخ (mm)	
	تار	پود	تار	پود	تار	پود
N1	۱۶	۱۶	۱۰/۲	۱۰/۲	۰/۱	۰/۱
N2	۲۰/۲	۳۰/۲	۴/۶	۱/۱	۰/۲	۰/۲
N3	۱۶	۲۰	۵/۸	۲/۶	۰/۱	۰/۱

جدول ۳- مشخصات نخ دوخت.

شماره نمونه	نمره نخ (Ne)	مدول اولیه نخ (cN/dtex)	قطر نخ (mm)
S1	۴۰/۲	۳/۴	۰/۲

است.

۳- اندازه‌گیری وزن، قطر و مدول کششی نخ‌های تار و پود نمونه پارچه.

۴- محاسبه ضریب کششی، خمشی، پیچشی نخ‌های تار و پود مدل براساس مشخصات اندازه‌گیری شده.

۵- اندازه‌گیری وزن، قطر و مدول کششی نخ دوخت.

۶- محاسبه ضریب کششی، خمشی و پیچشی نخ دوخت براساس مشخصات اندازه‌گیری شده.

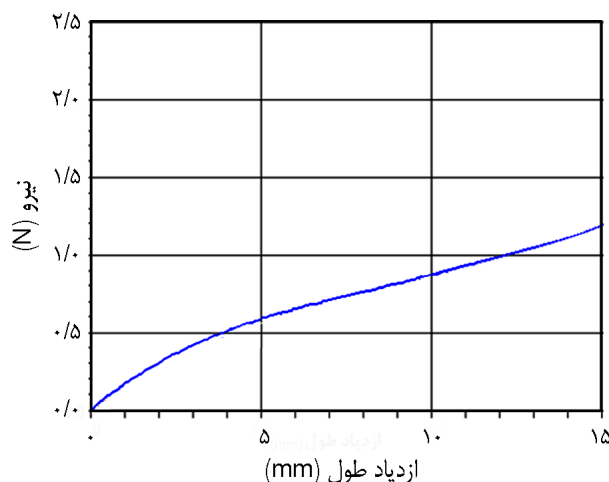
۷- تعیین تراکم دوخت: تراکم دوخت مدل نیز مشابه با نمونه‌های واقعی تنظیم شده است.

۸- اعمال مقدار کشش دوزندگی بر مدل: برای اعمال کشش دوخت به مدل شبیه‌سازی شده بدین صورت عمل می‌شود:

الف- ابتدا با حدس و خطا، حداقل کششی که با آن نمونه بدون هیچ کیس خوردگی تولید شده، تعیین و به‌عنوان حداقل کشش ثبت می‌شود. نمونه پارچه در محل درز برش داده شده و طول نخ سوزن و ماسوره اندازه‌گیری می‌شود.

ب- سپس با کشش مدنظر، نخ سوزن و ماسوره (کم، زیاد و متوسط)، نمونه مدنظر دوخت می‌شود. نمونه پارچه در محل درز برش داده شده و طول نخ سوزن و ماسوره اندازه‌گیری می‌شود.

پ- درصد اختلاف نخ‌های دوخت در حالت دوخت با کشش (کم، زیاد و متوسط)، نسبت به دوخت با حداقل کشش محاسبه می‌شود. سپس، طول اولیه بخیه‌های مدل پس از این مقدار درصد جمع‌شدگی محاسبه می‌شود. از عدد به‌دست‌آمده به‌عنوان طول



شکل ۹- نمودار نیرو-ازدیاد طول نتیجه آزمون استحکام برای نخ پود نمونه N2.

رطوبت نسبی $65 \pm 2\%$ به مدت ۲۴ h قرار داده شدند.

۳-۳ اجرای مدل شبیه‌سازی کیس خوردگی درز

برای استفاده از مدل فیزیکی ارائه شده برای شبیه‌سازی کیس خوردگی درز نمونه‌های واقعی، لازم است تا پارامترهای مدل براساس نمونه واقعی تنظیم شوند، بنابراین برای شبیه‌سازی هر نمونه مراحل زیر انجام شد:

۱- تعیین ابعاد مدل پارچه و طول رشته‌های تار و پود مدل: ابعاد مدل پارچه برابر با ابعاد نمونه واقعی است. ابعاد نمونه‌ها $10 \times 6 \text{ cm}^2$ در نظر گرفته شده است. طول رشته‌های تار و پود نیز متناسب با ابعاد پارچه بوده و از جمع‌شدگی ناشی از تجعد نخ‌ها صرف‌نظر شده است.

۲- تعیین تراکم بافت مدل: تراکم مدل مطابق با نمونه پارچه واقعی

جدول ۴- محاسبه درصد جمع‌شدگی نخ دوخت تحت کشش دوزندگی متفاوت.

شماره نمونه	نخ دوخت	طول نخ (cm) در حالت دوخت با کشش دوزندگی					درصد جمع‌شدگی نخ نسبت به دوخت با حداقل کشش (٪) با کشش دوزندگی	
		کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد	کم
N1	نخ سوزن	۱۱/۲	۱۰/۵	۹/۵	۸/۹	۶/۲	۱۵/۱	۲۰/۵
	نخ ماسوره	۱۱/۵	۱۰/۵	۹/۸	۹/۲	۸/۶	۱۴/۷	۲۰
N2	نخ سوزن	۱۱	۱۰/۵	۹/۳	۸/۹	۴/۵	۱۵/۴	۱۹/۹
	نخ ماسوره	۱۱/۳	۱۰/۵	۹/۵	۹	۷/۰	۱۵/۹	۲۰/۳
N3	نخ سوزن	۱۰/۸	۱۰/۱	۹/۲	۸/۷	۶/۴	۱۴/۸	۱۹/۴
	نخ ماسوره	۱۱	۱۰/۳	۹/۵	۹/۱	۶/۳	۱۳/۶	۱۷/۲

جدول ۵- پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی نخ تار و پود.

نمونه	تار				پود			
	فاصله نقاط (mm)	سفتی کششی (cN/dtex)	سفتی خمشی (cN/dtex)	سفتی پیچشی (cN/dtex)	فاصله نقاط (mm)	سفتی کششی (cN/dtex)	سفتی خمشی (cN/dtex)	سفتی پیچشی (cN/dtex)
N1	۰/۴۱	۰/۱۲	6e-4	3e-4	۰/۲۹	۰/۱۲	6e-4	3e-4
N2	۰/۸۳	۰/۵۷	42e-4	57e-4	۰/۴۱	۰/۱۳	1e-3	13e-4
N3	۰/۴۵	۰/۱۸	3e-4	45e-5	۰/۳۱	۰/۰۸	1e-4	2e-4

جدول ۶- پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی نخ دوخت (نخ سوزن و نخ ماسوره).

نمونه	سفتی کششی (cN/dtex)	سفتی خمشی (cN/dtex)	سفتی پیچشی (cN/dtex)
S1	۰/۴۲	32e-4	42e-4

ارائه شده است. در نمونه های ارائه شده در این جدول، کشش نخ سوزن و ماسوره متناسب با یکدیگر تغییر داده شده اند. نتایج حاصل از شبیه سازی رفتار کیس خوردگی درز در نمونه پارچه N3 تحت سه کشش مختلف نخ سوزن در جدول ۸ ارائه شده است. کشش نخ ماسوره در نمونه ارائه شده در جدول ۸، ثابت در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰، نتیجه شبیه سازی نمونه شماره N1 تحت کشش متوسط را با نمای بزرگ تر و پس از رندر کردن نشان داده است.

۴-۲ اندازه گیری خطای مدل

به دلیل آنکه شکل امواج کیس خوردگی پدیده تصادفی بوده، بنابراین برای ارزیابی دقیق مدل لازم است درجه کیس خوردگی نمونه های واقعی و شبیه سازی شده مقایسه شوند. بدین منظور از روش موسی زادگان و همکاران [۹] استفاده شد. در این روش، با استفاده از داده های سه بعدی نمونه، شاخص هایی به منظور ارزیابی درجه کیس خوردگی درز محاسبه می شوند. آن ها بیان کردند، نتایج حاصل از این روش، همبستگی زیادی با نتایج حاصل از ارزیابی کیفی مقدار کیس خوردگی مطابق با استاندارد AATCC 88B-1964 دارد. در این روش، ابتدا با استفاده از دوربین سنجش عمق، مدل سه بعدی نمونه به دست می آید. سپس، شکل خط موج های حاصل از کیس خوردگی در فواصل مشخص از پایین و بالای خط درز نمونه ذخیره می شوند. در مرحله بعد، هر خط موج با استفاده از فرایند واهم آمیخت (deconvolution)، به تعدادی منحنی گوسی تجزیه می شود. سپس برای هر خط موج، تعداد امواج و پارامترهای شکل آن ها شامل مساحت، دامنه و طول موج استخراج می شوند.

اصلی بخیه ها در محاسبات استفاده می شود. اما از آن جهت که در مش بندی اولیه طول بخیه مطابق با تراکم مدنظر تنظیم شده بود، بنابراین با اجرای شبیه سازی بخیه تمایل پیدا می کند که به طول اصلی آن بازگردد. در نتیجه، مشابه با اثر کشش و جمع شدگی نخ دوخت در نمونه واقعی، در مدل پدید می آید.

محاسبات مربوط به کشش نخ سوزن و ماسوره به طور مجزا برای هر نمونه انجام شد که نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی نخ های تار و پود نمونه پارچه ها و نخ دوخت به ترتیب در جدول های ۵ و ۶ ارائه شده است.

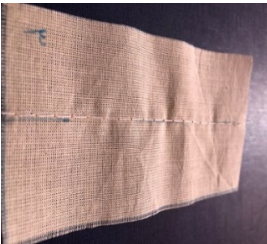
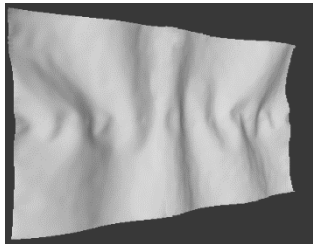
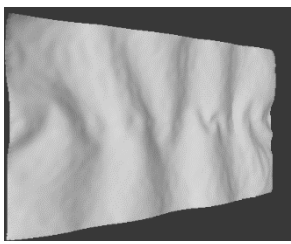
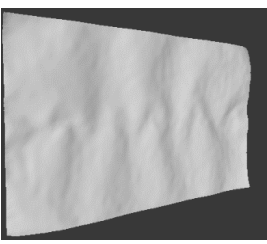
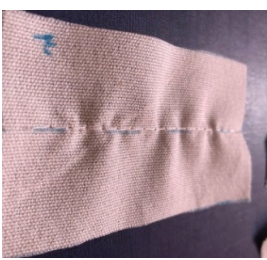
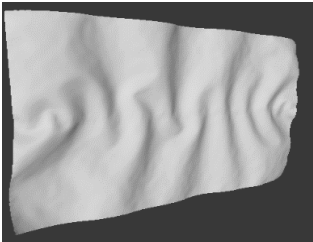
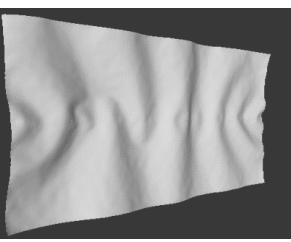
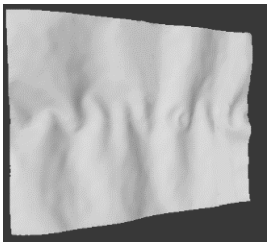
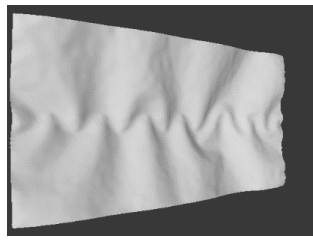
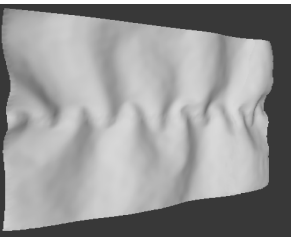
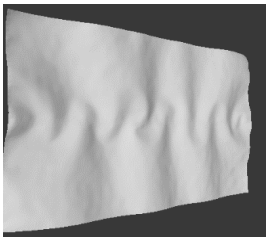
در این مقاله، تمام مباحث نظری ارائه شده با استفاده از کدنویسی به زبان C++ در محیط برنامه نویسی Visual Studio پیاده سازی شده است. از کتابخانه های OpenGL برای پیاده سازی بخش های گرافیکی، از Eigen برای پیاده سازی روش حل و از Moske برای پیاده سازی برخورد پارچه با سطح مسطح زیرین استفاده شده است. برای اجرای شبیه سازی از سامانه مجازی پرسرعت دانشکده کامپیوتر دانشگاه یزد با مشخصات CPU E5-2699 v4 @ 2.22 GHz، Ram 18 GB استفاده شده است.

۴ نتایج و بحث

۴-۱ نتایج شبیه سازی

نتایج حاصل از شبیه سازی رفتار کیس خوردگی درز در سه نمونه پارچه متفاوت و تحت سه کشش دوزندگی مختلف در جدول ۷

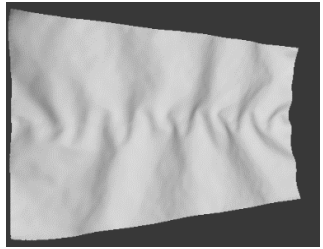
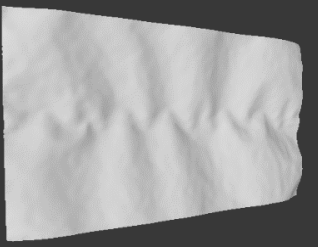
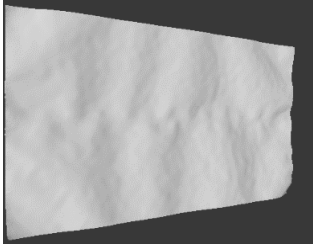
جدول ۷- نتایج حاصل از شبیه‌سازی رفتار کیس خوردگی درز در نمونه پارچه‌های تحت سه کشش متفاوت دوزندگی.

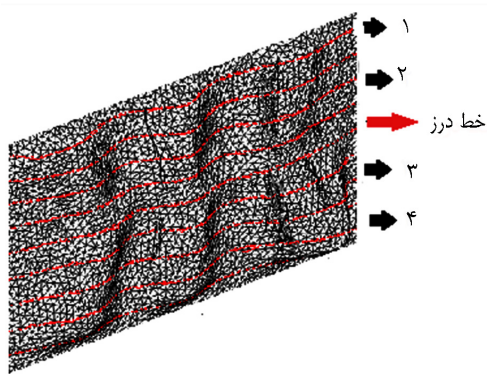
کشش دوزندگی زیاد	کشش دوزندگی متوسط	کشش دوزندگی کم	نمونه
			نمونه واقعی N1
			نمونه شبیه‌سازی شده N1
			نمونه واقعی N2
			نمونه شبیه‌سازی شده N2
			نمونه واقعی N3
			نمونه شبیه‌سازی شده N3

شبیه‌سازی شده و نمونه‌های واقعی استفاده شد. در ادامه، نحوه محاسبه این پنج شاخص شرح داده شده است.

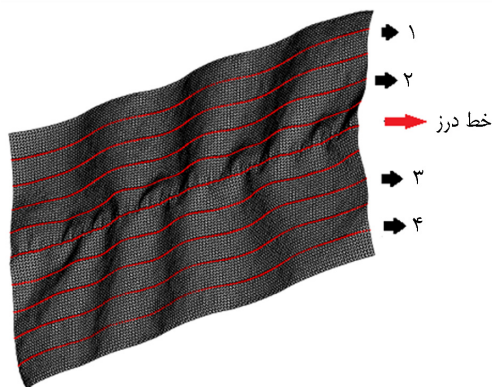
آن‌ها پنج شاخص ارزیابی براساس این پارامترها را معرفی کردند که در این کار از این پارامترها به منظور محاسبه خطا میان نتایج

جدول ۸- شبیه سازی رفتار کیس خوردگی درز در نمونه پارچه N3 تحت سه کشش مختلف نخ سوزن.

کشش زیاد	کشش متوسط	کشش کم	نمونه
			نمونه واقعی
			نمونه شبیه سازی شده



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- خط موج های حاصل از کیس خوردگی: (الف) نتیجه حاصل از اسکن سه بعدی نمونه واقعی N2 تحت کشش دوزندگی متوسط و (ب) نتیجه حاصل از شبیه سازی نمونه N2 تحت کشش دوزندگی متوسط.



شکل ۱۰- نتیجه شبیه سازی نمونه شماره N1 تحت کشش متوسط.

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{L} \quad (8)$$

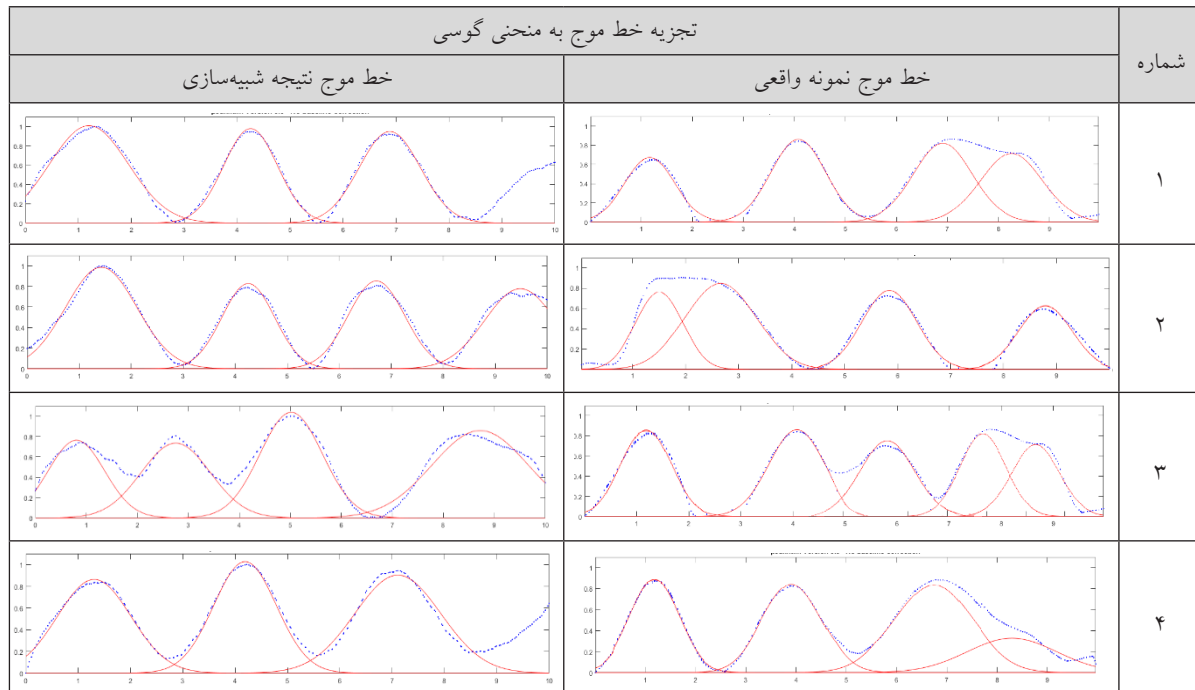
$$\bar{H}\bar{W} = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i \times w_i)}{L} \quad (9)$$

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (10)$$

$$\bar{H}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{H})}{L} \quad (11)$$

$$HW_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{H})(w_i - \bar{W})}{L} \quad (12)$$

جدول ۹- تبدیل خط موج‌های نمونه واقعی و شبیه‌سازی شده N2 به منحنی‌های گوسی. خطوط نقطه‌چین آبی خط موج اصلی نمونه و منحنی‌های قرمز رنگ منحنی گوسی حاصل از واهم‌آمیخت خط موج است.



از هر نمونه واقعی و شبیه‌سازی شده در محاسبات جذر میانگین مربعات خطا استفاده شد. به عنوان مثال، در شکل ۱۱، چهار خط موج روی نمونه واقعی و شبیه‌سازی شده N2 تحت کشش دوزندگی متوسط در یک تکرار آزمایش نشان داده شده است. جدول ۹، تبدیل این خط موج‌ها به منحنی‌های گوسی را با استفاده از فرایند واهم‌آمیخت نشان می‌دهد.

در این معادله‌ها، w_i و h_i به ترتیب مساحت زیر یک موج، طول کل نمونه، تعداد موج نمونه، دامنه و طول هر موج هستند.

برای به دست آوردن شکل سه بعدی نمونه‌های واقعی از دستگاه Kinect 360 و نرم افزار Skanect (<https://skanect.occipital.com>) استفاده شد. برای مقایسه دقیق تر میانگین شاخص‌ها، پنج تکرار

جدول ۱۰- شاخص‌های کیس‌خوردگی برای نمونه واقعی N2 تحت کشش دوزندگی متوسط و نمونه شبیه‌سازی آن.

ناحیه پایین درز						ناحیه بالای درز					شاخص
$\bar{A}$	$\overline{HW}$	$\bar{H}$	$\bar{H}_l$	HW_l	خط موج	$\bar{A}$	$\overline{HW}$	$\bar{H}$	$\bar{H}_l$	HW_l	خط موج
۰/۵۰	۰/۴۹	۰/۸۹	-۰/۴۱	۵/۸۴	۳-n	۰/۴۹	۰/۵۸	۰/۸۱	-۰/۴۱	۵/۵۴	۱-n*
۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۹۰	-۰/۴۲	۶/۹۲	۳-r	۰/۵۷	۰/۵۵	۰/۹۰	-۰/۴۱	۶/۴۳	۱-r
۱۵	۱۴	۱	۲	۱۵	مقدار خطا (%)	۱۴	۵	۱۰	۰	۱۳	مقدار خطا (%)
۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۹۱	-۰/۴۴	۵/۶۴	۴-n	۰/۵۵	۰/۵۴	۰/۷۹	-۰/۴۲	۵/۰۳	۲-n*
۰/۵۶	۰/۴۹	۰/۹۲	-۰/۴۱	۶/۳۴	۴-r	۰/۶۰	۰/۵۲	۰/۸۸	-۰/۴۱	۵/۸۴	۲-r
۱۶	۸	۱	۴	۱۱	مقدار خطا (%)	۸	۳	۱۰	۲	۱۳	مقدار خطا (%)
۱۰/۵					جزر میانگین مربعات خطا	۹/۱۴					جزر میانگین مربعات خطا

* n و r به ترتیب خط موج نمونه واقعی و شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱۱- جذر میانگین مربعات خطای حاصل از شبیه‌سازی نمونه‌ها با مدل شبیه‌سازی سطح نخ و سامانه جرم و فنر [۱۵،۲۰].

نمونه	درجه کشش دوزندگی	مدل شبیه‌سازی سطح نخ	سامانه جرم و فنر [۱۵،۲۰]
N1	کم	۷/۴	۱۵/۹
	متوسط	۸/۵	۱۴/۱
	زیاد	۸/۹	۱۷/۳
N2	کم	۷/۱	۱۵/۸
	متوسط	۹/۸	۱۷/۶
	زیاد	۱۱/۴	۱۵/۵
N3	کم	۹/۳	۱۳/۴
	متوسط	۱۰/۸	۱۶/۳
	زیاد	۱۲/۸	۱۷/۶
N3 (با درجه کشش ثابت نخ ماسوره)	کم	۶/۷	۱۳/۴
	متوسط	۸/۶	۱۶/۳
	زیاد	۱۱/۵	۱۷/۶
میانگین			۱۵/۹
			۹/۴

جدول‌های ۷ و ۸، اثر افزایش کشش دوزندگی بر افزایش درجه کیس‌خوردگی نمونه‌های واقعی واضح است. این تأثیر در نتایج حاصل از شبیه‌سازی کیس‌خوردگی نمونه‌ها نیز به‌خوبی مشاهده می‌شود. جدول ۱۱ نشان می‌دهد، روش ارائه‌شده در این مقاله قابلیت تولید نتایج نزدیک به واقعیت را دارد. همچنین دیده می‌شود، شبیه‌سازی کیس‌خوردگی درز با استفاده از فن شبیه‌سازی سطح نخ در تمام حالات نتایج بهتری نسبت به شبیه‌سازی به روش معمول جرم و فنر تولید کرده است. بنابراین، می‌توان با استفاده از این مدل میزان کیس‌خوردگی درز در پارچه‌های تار پودی را با توجه به پارامترهای دوخت (کشش دوزندگی، تراکم دوخت و خواص نخ دوخت) و خواص پارچه شبیه‌سازی و پیش‌بینی کرد. در این مقاله نوع بافت پارچه، تراکم، خواص کششی، خمشی و پیچشی و همچنین ظرافت نخ‌های ساختار پارچه در مدل در نظر گرفته شده است.

۴ نتیجه‌گیری

رفتار کیس‌خوردگی درز تحت تأثیر ویژگی‌ها و رفتار نخ‌های دوخت و نخ‌های ساختار پارچه و همچنین تعامل آن‌ها با یکدیگر

در جدول ۱۰، شاخص‌های کیس‌خوردگی برای خط موج‌های نمونه واقعی و شبیه‌سازی شده N2 تحت کشش دوزندگی متوسط گزارش و جذر میانگین مربعات خطا برای آن‌ها محاسبه شده است. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر مدل ارائه‌شده در این مقاله، نمونه پارچه‌های درزدار با استفاده از روش معمول جرم و فنر نیز شبیه‌سازی شدند. برای شبیه‌سازی نمونه‌ها به روش جرم و فنر از مش‌بندی مستطیلی شرح داده‌شده توسط مظفری و پیوندی (۲۰۱۷) استفاده شد [۲۰]. مشابه با مقاله موسی‌زادگان و همکاران [۱۵] در ناحیه درز، نیروی حاصل از جمع‌شدگی نخ‌های دوخت به‌صورت نیروی فشرده‌گی از سمت بخیه به پارچه اعمال شد. این نیروی فشرده‌گی، تابعی از نیروی کشش نخ دوخت در نظر گرفته شد. نتایج خطای حاصل از شبیه‌سازی نمونه‌ها با روش‌های یادشده در جدول ۱۱ ارائه شده است.

بررسی نتایج ارائه‌شده در جدول‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد، این روش قابلیت شبیه‌سازی موج‌های بزرگ و کوچک حاصل از کیس‌خوردگی را دارد. مشاهده می‌شود، در شرایط دوزندگی ثابت (خواص نخ دوخت، تراکم دوخت، کشش دوزندگی و پارامترهای ماشین دوزندگی ثابت) با تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی پارچه‌ها، شکل کیس‌خوردگی آن‌ها تغییر کرده است. این تغییر در نتایج شبیه‌سازی نیز مشاهده می‌شود. همچنین با مشاهده نتایج

باعث تغییر شکل و درجه کیس‌خوردگی نمونه‌های واقعی شده و این تغییرات در نمونه‌های شبیه‌سازی شده نیز مشاهده شد. نتایج نشان داد، مدل ارائه شده می‌تواند کیس‌خوردگی درز را با میانگین خطای ۹/۴٪ در نمونه‌های مختلف پیش‌بینی کند. همچنین، شبیه‌سازی رفتار کیس‌خوردگی نمونه پارچه‌ها با استفاده از روش جرم و فنر و مقایسه نتایج حاصل به منظور ارزیابی دقت مدل، نشان داد، روش ارائه شده قابلیت تولید نتایجی با ۶/۵٪ خطای کمتر نسبت به روش‌های پیشین شبیه‌سازی درز را دارد. برای بررسی بیشتر لازم است، قابلیت مدل در شبیه‌سازی انواع مختلف درز و همچنین تحت سایر پارامترهای دوزندگی نیز بررسی شود.

است. در این مقاله، از مدل شبیه‌سازی سطح نخ برای شبیه‌سازی کیس‌خوردگی درز در پارچه تارپودی استفاده شد. با استفاده از این روش شبیه‌سازی، نوع بافت پارچه، تراکم، خواص کششی، خمشی و پیچشی و همچنین ظرافت نخ‌های ساختار پارچه در مدل در نظر گرفته شد. همچنین، پارامترهای دوخت شامل نوع دوخت، کشش دوزندگی، تراکم دوخت و خواص نخ دوخت نیز در مدل اعمال شد. برای ارزیابی کارایی مدل، پارامترهای نمونه‌های واقعی در آن لحاظ و نتایج مقدار کیس‌خوردگی حاصل با نمونه‌های واقعی مقایسه شد. برای مقایسه نتایج از شاخص‌هایی استفاده شد که براساس شکل سه‌بعدی کیس‌خوردگی نمونه‌ها محاسبه شده‌اند. بررسی نتایج نشان داد، تغییر خواص پارچه و کشش دوزندگی

مراجع

- [1] V. Mozafari, P. Payvandy, and M. Rezaeian, "A novel approach for simulation of curling behavior of knitted fabric based on mass spring model", *J. Text. Inst.*, vol. 109, no. 12, pp. 1620-1641, 2018.
- [2] V. Mozafari and P. Payvandy, "Introducing and optimizing a novel mesh for simulating knitted fabric", *J. Text. Inst.*, vol. 109, no. 2, pp. 202-218, 2017.
- [3] D. Chen, "Investigation of interactions between fabric performance, sewing process parameters and seam pucker of shirt fabric", *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 16, pp. 1-11, 2021.
- [4] E. Toshikj, G. Demboski, I. Jordanov, and B. Mangovska, "Functional properties and seam puckering on cotton shirt influenced by laundering", *Tekstilec*, vol. 62, no. 1, pp. 4-11, 2019.
- [5] F. Mousazadegan and M. Latifi, "Investigating the relation of fabric's buckling behaviour and tension seam pucker formation", *J. Text. Inst.*, vol. 110, no. 4, pp. 562-74, 2018.
- [6] V.K. Midha and S. Kumar, "Effect of seam angle on seam puckering in lightweight woven fabrics", *J. Text. Inst.*, vol. 106, no. 4, pp. 395-401, 2014.
- [7] L.L. Chen, "Objective evaluation method for sewing flatness of worsted wool fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 3, pp. 120-125, 2018.
- [8] S. Fernando, "Measurement of seam puckering and influence of its causes", *IOSR J. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 01-07, 2014.
- [9] F. Mousazadegan, S. Saharkhiz, M. Latifi, and M. Mohammadi-Aghdam, "Seam pucker rating by deconvolution residual method", *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 150-170, 2013.
- [10] M. Amir, G.A.V. Leaf, and G.K. Stylios, "A model of seam pucker and its applications part I: theoretical", *J. Text. Inst.*, vol. 111, no. 1, pp. 64-67, 2019.
- [11] Ibid., "Part II: experimental", pp. 60-63.
- [12] S. Inui and T. Yamanaka, "Seam pucker simulation", *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 128-142, 1998.
- [13] J.L. Hu, L. Ma, B. George, W.S.K. Wong, and W. Zhang, "Modelling multi-layer seam puckering", *Text. Res. J.*, vol. 76, no. 9, pp. 665-673, 2016.
- [14] X. Provot, "Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior", *Proceedings of Graphics Interface '95*, Québec, Canada, pp. 147-154, 1995.
- [15] F. Mousazadegan, S. Saharkhiz, and M. Latifi, "Prediction of tension seam pucker formation by finite-element model", *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 129-140, 2012.
- [16] J.M. Kaldor, D.L. James, and S. Marschner, "Simulating knitted cloth at the yarn level", *ACM Trans. Gr.*, vol. 27, no. 3, 2008.
- [17] N. Metaaphanon, Y. Bando, B.Y. Chen, and T. Nishita, "Simulation of tearing cloth with frayed edges", *Comput. Gr. Forum*, vol. 28, no. 7, 1837-1844, 2009.
- [18] G. Cirio, J. Lopez-Moreno, D. Miraut, and M.A. Otaduy, "Yarn-level simulation of woven cloth", *ACM Trans. Gr.*, vol. 33, no. 6, pp. 1-11, 2014.
- [19] N.N. Htoo, A. Soga, L. Wakako, K. Ohta, and T. Kinari, "3-Dimension simulation for loop structure of weftknitted fabric considering mechanical properties of yarn", *J. Fiber Sci. Technol.*, vol. 73, no. 5, pp. 105-113, 2017.
- [20] D. Baraff and A. Witkin, "Large steps in cloth simulation", *SIGGRAPH '98: Proceedings of the*

- 25th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques*, Annual Conference Series, ACM, pp. 43-54, 1998.
- [21] M. Bergou, M. Wardetzky, and S. Robinson, "Discrete elastic rods", *ACM Trans. Gr.*, vol. 63, no. 1, pp. 1-12, 2008.
- [22] M. Kargar, P. Payvandy, and V. Mozafary, "A numerical structure-based method of simulating filament yarns", *J. Text. Inst.*, 2021. Doi: 10.1080/00405000.2021.2009185
- [23] A.E.H. Love, *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, 4th ed., Dover, New York, 1944.
- [24] F.K. Sadykova, "The poisson ratio of textile fibres and yarns", *Fibre Chem.*, vol. 3, pp. 180-183, 1972.
- [25] V. Mozafary and P. Payvandy, "Definition of mass spring parameters for knitted fabric simulation using the imperialist competitive algorithm", *Fibre. Text. East. Eur.*, vol. 25, no. 1, pp. 65-74, 2017.
- [26] ASTM D 2256, Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method, 2015.