

مطالعه رفتار حرارتی پارچه اسپیسر با روش‌های شبیه‌سازی عددی و پردازش تصویر حرارتی

ندا دهقان^{۱*}، پدram پیوندی^۱

هسته علمی بینایی ماشین در صنعت نساجی و پوشاک، دانشگاه یزد

* نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد،

neda.dehghan@stu.yazd.ac.ir

چکیده

شناخت خواص حرارتی پارچه اسپیسر، با توجه به کاربردهای بی‌شماری که در انواع صنایع دارد؛ دارای اهمیت است. هدف از این مطالعه، استفاده از روش شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار فلوئنت و پردازش تصویر حرارتی، جهت تعیین توزیع دما در پارچه‌های اسپیسر در طول زمان و تعیین ارتباط بین میزان انتقال حرارت و پارامترهای پارچه است. نمودار توزیع دما و نتایج حاصل از دو روش نشان داد؛ انتقال حرارت در نمونه‌ها وابسته به دانسیته پارچه‌ها، تخلخل و ضخامت است. روند تغییرات دما تا زمان به تعادل رسیدن دما در نمونه‌ها، برای هر دو حالت یکسان و حداقل اختلاف بین دمای نقاط محلی و مشخص از نمونه‌ها وجود دارد؛ در نتیجه می‌توان، روش شبیه‌سازی عددی را به صورت مؤثر، جهت تعیین توزیع دما با دقت بسیار بالا در این نوع پارچه‌ها و همچنین پیش‌بینی انتقال حرارت پیش از تولید این نوع منسوج پیشنهاد داد.

واژگان کلیدی: پارچه اسپیسر، توزیع حرارت، شبیه‌سازی، پردازش تصویر حرارتی.

Study of the thermal behavior of spacer fabric by numerical simulation and thermal image processing

Abstract

The knowledge of the thermal properties of Spacer fabric is important with regard to their vast applications in most industries. The aim of this study is to propose a numerical simulation using FLUENT software and thermal image processing to determine the spacer fabric temperature distribution and the relationship between the heat transfer and the fabric parameters. The thermal distribution of fabric and the results of image processing and numerical simulation showed that the heat transfer depended on the density, porosity and thickness of the fabrics. The simulation and image processing methods had a similar temperature variation trend and minimal difference. The results showed that the numerical simulation method can be used effectively to determine the temperature distribution and predict the heat transfer before the production of three-dimensional fabric.

Keywords: Spacer fabric, Thermal distribution, Simulation, Thermal image processing.

سیزدهمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی ایران، ۴-۲۰ آبان ۱۴۰۲
13th National Textile Engineering Conference (24-26 October, 2023)

۱- مقدمه

پارچه اسپیسر، یک منسوج سه بعدی، با دولایه بیرونی مشابه یا متفاوت با یکدیگر و یک لایه میانی، شامل نخ‌های فاصله دهنده است؛ که دولایه بیرونی را به یکدیگر متصل می‌سازد. ساختمان سه بعدی این نوع پارچه‌ها و همچنین فضای خالی بین دو سطح پارچه، یک ساختار ویژه را برای پارچه‌های سه بعدی فراهم می‌کند؛ که کاربردهای متنوعی را جهت استفاده در پوشاک ورزشی، پزشکی، تشک‌ها، لباس‌های محافظ، صنایع اتومبیل‌سازی، کامپوزیت‌ها و ... فراهم کرده است. مطالعه خواص گرمایی منسوجاتی مانند پارچه اسپیسر، جهت تعیین تأثیر پارامترهای ساختاری منسوج، شرایط آزمایش و محیط بر خواص گرمایی، با روش‌های تجربی با استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاهی [۱،۲]، روش‌های وابسته به هندسه پارچه مانند مدل‌سازی تحلیلی یا عددی [۳،۴] و یا با استفاده از روش پردازش تصویر با اهدافی چون تعیین رسانایی یا مقاومت گرمایی [۵]، انجام می‌شود. شبیه‌سازی عددی یک روش سریع و دقیق برای پیش‌بینی عملکرد انتقال حرارت در منسوجاتی چون پارچه اسپیسر است. در مطالعات انجام‌گرفته در زمینه بررسی انتقال حرارت در پارچه اسپیسر، پارچه به‌صورت یک جسم متخلخل با در نظر گرفتن حجم اشغال‌شده توسط سیال و ماده پلیمری بررسی شده است [۶]. این در حالی است؛ که شکل و ساختار پارچه‌های اسپیسر متفاوت بوده و همین تفاوت در ساختار و واحد تشکیل‌دهنده ساختار را می‌توان، به‌عنوان عاملی در میزان تغییرات توزیع حرارت در این پارچه مورد بررسی قرار داد. اهمیت درک خواص منسوجات، با توجه به کاربردهای رو به رشد آن‌ها در اکثر صنایع، دلیلی بر توسعه روش‌های سریع و دقیق تعیین خواص، چون شبیه‌سازی عددی و روش پردازش تصویر است. در این مطالعه، شبیه‌سازی انتقال حرارت در پارچه‌های اسپیسر، با توجه به خصوصیات هندسی پارچه و در نظر گرفتن هوا در یک فاز جداگانه، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام و جهت ارزیابی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام‌شده از تکنیک پردازش تصاویر حرارتی نمونه‌ها که طی آزمون تجربی تصویربرداری شده است؛ استفاده شد.

۲- مواد

در این مطالعه ۴ نمونه پارچه اسپیسر با کاربرد تجاری در صنعت، با مشخصات بیان‌شده در جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفت. جنس تمام نمونه‌ها ۱۰۰ درصد پلی‌استر و مونوفیل‌منت‌های پلی‌استر با قطر ۲۲۰ میکرون و نخ‌های چندفیل‌منتی برای لایه‌های دو طرف می‌باشد. طرح لایه‌های دو طرف یکسان با طرح شش ضلعی و پارچه‌ها از نظر ضخامت، ساختار و تراکم نخ در لایه میانی، متفاوت هستند. میزان تخلخل کلی پارچه‌های اسپیسر به دلیل ماهیت سه بعدی این نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. در این رابطه ε میزان تخلخل برحسب درصد، ρ_{fabric} چگالی پارچه و ρ_{fiber} چگالی الیاف است. چگالی پارچه، به‌صورت نسبت وزن پارچه به حجم آن به دست می‌آید.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{fabric}}}{\rho_{\text{fiber}}} \quad (1)$$

جدول ۱. مشخصات نمونه پارچه‌های اسپیسر

کد نمونه	ضخامت (mm)	تخلخل (%)	دانسیته (kg/m ³)	تراکم مونوفیل‌منت‌ها به ازای هر سلول
S1	۵	۷۹/۲۱	۵۲/۶۴	۲۴
S2	۱۰	۹۱/۱۳	۵۴/۵۵	۳۶
S3	۱۰	۸۹/۹۱	۵۷/۲۰	۳۶
S4	۲۰	۷۰/۳۶	۶۸/۴۸	۳۶

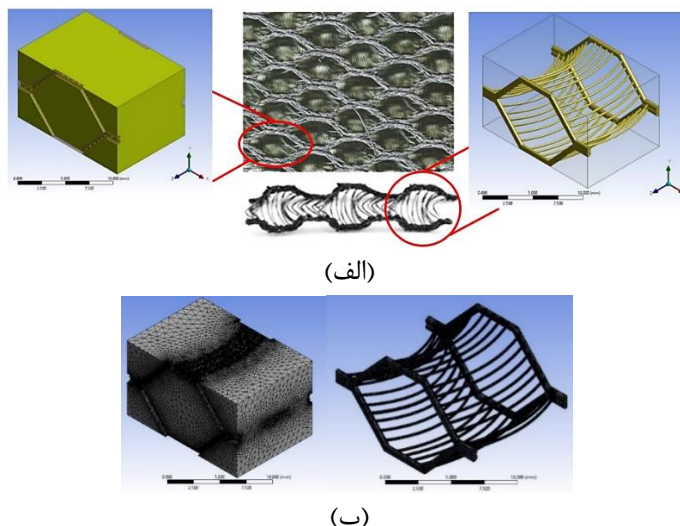
۳- روش‌ها

۳-۱- شبیه‌سازی انتقال حرارت در فلوئنت

از آنجاکه، هندسه پارچه اسپیسر، پیچیده است و شامل مونوفیل‌منت‌ها و مولتی‌فیل‌منت‌ها است؛ بنابراین یک سلول به‌عنوان کوچک‌ترین المان که شامل ویژگی‌های هندسی کل پارچه است؛ برای نشان دادن رفتار کلی پارچه تعیین شد. این سلول، شامل دولایه بیرونی و یک لایه میانی شامل مونوفیل‌منت‌ها است [۷]. به‌عنوان مثال، یک سلول از نمونه S2 که در محیط هندسه نرم‌افزار انسیس،

سیزدهمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی ایران، ۴-۲ آبان ۱۴۰۲
13th National Textile Engineering Conference (24-26 October, 2023)

طراحی شده است، در شکل ۱-الف نشان داده شده است. شبکه بندی انجام شده، بر اساس اندازه سطح و لبه های هریک از مونوفیلامنت ها و سطوح لایه بالا و پایین است. انتخاب نوع مش و تعداد مش بر اساس پارامتر کیفیت شبکه^۱ انجام گرفت. شبکه بندی انجام شده بر روی سلول واحد نمونه S2 در شکل ۱-ب نشان داده شده است.



شکل ۱. (الف) تصویر سلول واحد طراحی شده از پارچه، (ب) شبکه بندی هر یک از فازهای جامد و سیال

معادلات حاکم برای محاسبه توزیع دما در پارچه اسپیسر، در نرم افزار انسیس فلونت شامل معادلات بقای ممنتوم و بقای انرژی حرارتی است؛ که به روش اختلاف محدود حل شده و حل معادلات جریان، با الگوریتم سیمپل سی انجام گرفت. شرایط مرزی در نظر گرفته شده، برای صفحه زیرین که نمونه در تماس با صفحه داغ می باشد؛ به صورت دما ثابت، شرط مرزی در نظر گرفته شده برای چهار دیواره اطراف، به صورت شرط مرزی تقارن و شرط مرزی برای دیواره بالا که در معرض هوای محیط قرار دارد، دما ثابت برای جسم جامد و برای سیال که در معرض جریان آرام محیط، قرار دارد؛ به صورت فشار خروجی است. به منظور ساده سازی در فرایند شبیه سازی، فرضیاتی بر اساس مشاهدات هندسه و خواص پارچه های اسپیسر در نظر گرفته شد. این فرضیات عبارتند از: تمام واحدهای پارچه، شکل و اندازه اولیه یکسانی دارند و همه واحدها دارای رفتار تغییر شکل یکسانی در طول فرایند انتقال حرارت هستند. حجم الیاف در لایه بالا و پایین و در نتیجه حجم هوا در لایه بالا و پایین یکسان است. دمای سطح ورودی برای الیاف و هوا یکسان و ثابت در نظر گرفته شد. طول نمونه ها در طی آزمون ثابت و با تغییرات دما، طول و ابعاد نمونه ها تغییر نمی کند. از تشعشع در این محدوده دمایی نمونه صرف نظر شده است. سطح مقطع نخ یک دایره غیر تغییر پذیر و هدایت حرارتی یکنواخت در الیاف وجود دارد.

۳-۲- پردازش تصاویر حرارتی

به منظور اطمینان از صحت نتایج عددی و خروجی های مدل، داده های شبیه سازی باید با یک مرجع معتبر سنجیده شود. پردازش تصویر حرارتی، به عنوان یک روش دقیق و سریع در محاسبه توزیع دما، مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه جهت محاسبه دمای دقیق در هر نقطه از نمونه، با توجه به پروفایل حرارتی در تصویر و تعیین توزیع دما از الگوریتم K-means، ابتدا برای تقسیم بندی پروفایل حرارتی به تعداد خوشه معین و سپس جهت تقسیم بندی تصویر حرارتی و اختصاص دمای پروفایل خوشه بندی شده به تصویر حرارتی، استفاده شده است. تصاویر حرارتی پارچه ها، با توجه به محدوده دمایی پروفایل حرارتی به ۵۰ خوشه تقسیم بندی شدند. به این ترتیب دمای هر نقطه از تصاویر با دقت ۰/۱ درجه سانتی گراد قابل محاسبه است [۷].

۳-۳- روش آزمون

در این بررسی، نمونه های اسپیسر بر روی صفحه حرارتی با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته و با استفاده از روش یک صفحه (سرد کردن)، خواص حرارتی و تغییرات دما ثبت شد. تصاویر حرارتی از نمونه ها، با استفاده از دوربین حرارتی مدل FLIR-C2، حين

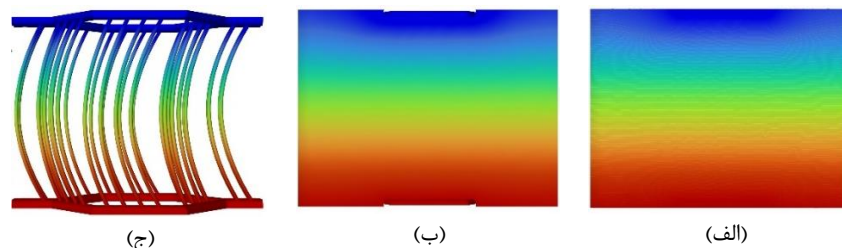
¹ Skewness

سیزدهمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی ایران، ۴-۲ آبان ۱۴۰۲
13th National Textile Engineering Conference (24-26 October, 2023)

انجام آزمون در فواصل ۵ ثانیه گرفته شد. پس از انجام آزمون، تغییرات دمای سطح نمونه و همچنین میزان توزیع دما در نمونه‌ها با استفاده از روش پردازش تصاویر حرارتی به دست آمد.

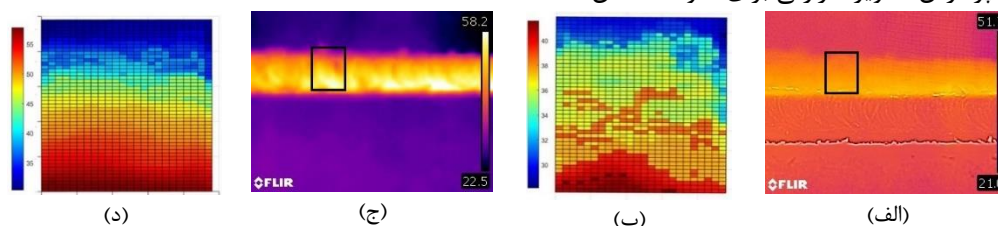
۴- نتایج

توزیع حرارتی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، برای سلول نمونه S3، در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شرایط مرزی تعیین شده، توزیع دما در قسمت جامد و سیال که به صورت کاهش گرادیان دما در جهت خلاف محور Z، از سمت تحت حرارت به جهت مخالف را نشان می‌دهد. نتایج حل عددی انتقال حرارت با استفاده از نرم‌افزار که شامل نمودار دما-زمان نمونه در مدت زمان‌های مختلف با توجه به ضخامت و رسیدن به همگرایی و تعادل دمایی در نمونه‌ها به دست آمد. گام زمانی بکار رفته برای شبیه‌سازی ۰.۵ ثانیه و زمان اجرای شبیه‌سازی برای نمونه‌ها تا ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. نتایج توزیع دمایی نمونه‌ها و همچنین دماهای حاصل از شبیه‌سازی با نتایج پردازش تصویر حرارتی به‌دست‌آمده از آزمون تجربی مقایسه شد.



شکل ۲. (الف) مجموعه سلول واحد شش ضلعی، (ب) فاز سیال و (ج) فاز جامد

تصاویر حرارتی نمونه S3 در ۱۵۰ و ۹۰۰ و توزیع حرارت در یک برش کوچک از آن تصاویر با استفاده از پردازش تصویر نیز، در شکل ۳ نشان داده شده است. حداکثر تغییرات دمایی در ثانیه‌های اول اتفاق افتاده و پس از آن تغییرات به‌کندی انجام شده تا تعادل حرارتی برقرار شود. تصویربرداری از نمونه‌ها تا رسیدن به تعادل حرارتی انجام گرفت. در شکل ۴، نتایج دمایی و توزیع به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و پردازش تصویر حرارتی برای نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۳. (الف) تصویر حرارتی در ۱۵۰، (ب) توزیع حرارتی به‌دست‌آمده از تصویر الف، (ج) تصویر حرارتی در ۹۰۰ و (د) توزیع حرارتی به‌دست‌آمده از تصویر ج

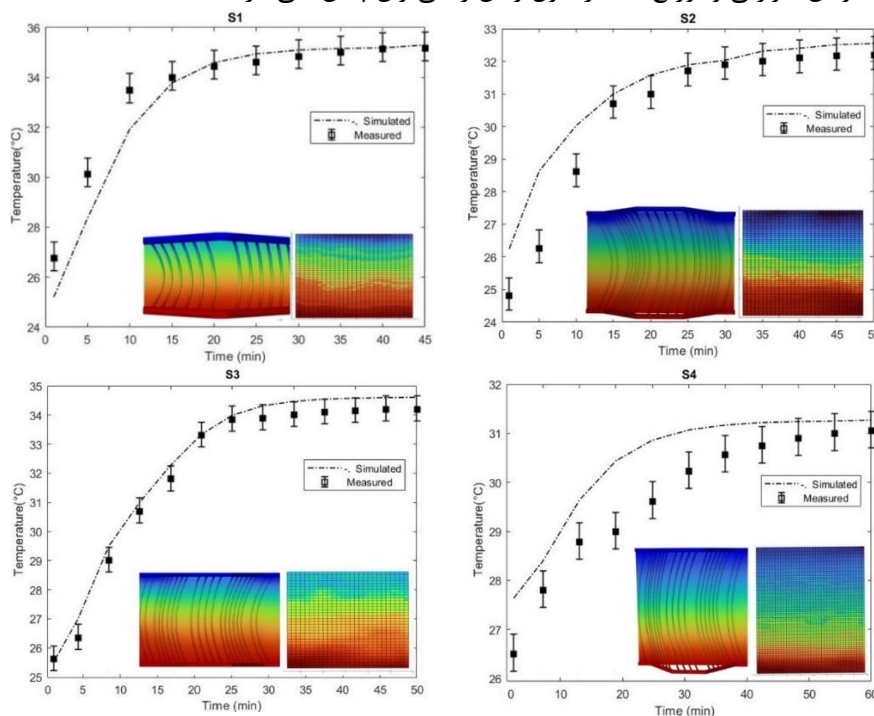
در این مقایسه، روند تغییرات دمای سطح بیرونی در تماس با دمای محیط در دو حالت شبیه‌سازی و پردازش تصاویر حرارتی آزمون تجربی، مشاهده می‌شود. مقدار خطا، با توجه به رابطه (۲) محاسبه گردید. مقدار T_e دمای محاسبه شده با روش پردازش تصویر حرارتی و T_s دمای به دست آمده با روش شبیه‌سازی است. افزایش دما در سطح بیرون از تصاویر حرارتی و همچنین سلول شبیه‌سازی شده با گذشت زمان، با حداکثر خطای ۱۲ درصد، برای همه نمونه‌ها دیده می‌شود. روند تغییرات نشان داده شده برای نمونه‌ها، با توجه به ساختار نمونه، میزان تخلخل و ضخامت نمونه، متفاوت است، به‌عنوان مثال برای نمونه S3 که دارای دانسیته بالاتر نسبت به نمونه S2، اما با ضخامت مشابه است، مقدار دمای سطح بیرونی بیشتری مشاهده می‌شود.

$$\alpha = \left(\frac{T_e - T_s}{T_e} \right) \times 100 \quad (2)$$

به‌طور کلی دانسیته بالاتر، باعث کاهش حجم هوا در نمونه، در نتیجه، به دلیل بالاتر بودن رسانایی حرارتی الیاف جامد نسبت به هوا، حرارت بیشتری به سطح نمونه منتقل می‌شود. همچنین افزایش ضخامت نیز، باعث کندی توزیع حرارت در نمونه تا رسیدن به تعادل حرارتی و همچنین کاهش دمای سطح بیرونی می‌شود. محاسبه توزیع دمای دقیق در پارچه با استفاده از شبیه‌سازی را می‌توان،

سیزدهمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی ایران، ۴-۲۰ آبان ۱۴۰۲
13th National Textile Engineering Conference (24-26 October, 2023)

برای پیش‌بینی خواص حرارتی منسوجات پیش از تولید، با توجه به نوع کاربرد استفاده نمود. با توجه به تغییر خواص، اندازه منافذ، تعداد مونوفیلامنت و... خواص حرارتی و توزیع دما در طول زمان را می‌توان پیش‌بینی کرد.



شکل ۴. نتایج دمایی و توزیع حرارتی حاصل از شبیه‌سازی و به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر حرارتی

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و پردازش تصاویر حرارتی پارچه‌های سه‌بعدی نشان داد که نمونه‌های دارای تراکم الیاف منظم‌تر و دانسیته حجمی بیشتر، دارای توزیع دمای یکنواخت‌تری هستند. توزیع حرارتی پردازش تصویر مربوط به بخشی از نمونه است، این در حالی است که در حالت شبیه‌سازی، توزیع به‌دست‌آمده مربوط به یک سلول می‌باشد و از آنجاکه در این مطالعه همین سلول به‌عنوان سلول واحد نشان‌دهنده رفتار پارچه در نظر گرفته شده است مشاهده می‌شود که توزیع به‌دست‌آمده از روش شبیه‌سازی بسیار به حالت تجربی نزدیک و با خطای حداکثر ۱۲ درصد می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که روش شبیه‌سازی به‌عنوان روشی دقیق و کاربردی برای پیش‌بینی خواص حرارتی پارچه‌های اسپیسر و همچنین به دست آوردن توزیع دما در جسم و تعیین دمای دقیق هر نقطه از آن مناسب می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] Arumugam, V., Mishra, R., Militky, J., Davies, L., & Slater, S. (2018). Thermal and water vapor transmission through porous warp knitted 3D spacer fabrics for car upholstery applications, J Text I, 109, 345-357.
- [2] Palani Rajan, T., Kandhavadi, P., & Periyasamy, A. P. (2021). Influence of porosity and yarn linear density on the thermal behaviour of polyester warp knitted spacer fabrics. Fiber. Polym, 22, 3212-3221.
- [3] Mao, N., & Russell, S. J. (2007). The thermal insulation properties of spacer fabrics with a mechanically integrated wool fiber surface. Text. Res. J, 77, 914-922.
- [4] Dehghan, N., Payvandy, P., & Talebi, S. (2022). Introducing a novel model for predicting effective thermal conductivity of spacer fabrics based on their structural parameters. J. Therm. Anal. Calorim., 147(12), 6615-6629.
- [5] Dehghan, N., & Payvandy, P. (2022). An Investigation of Parameters on Heat Transfer of Spacer Fabric Using Image Processing Method. J Mech Eng, 51, 115-124.
- [6] Mishra, R., Veerakumar, A., & Militky, J. (2016). Thermo-physiological properties of 3D spacer knitted fabrics. International Journal of Clothing Science and Technology.
- [7] Hou, X., Hu, H., & Silberschmidt, V. V. (2012). A study of computational mechanics of 3D spacer fabric: factors affecting its compression deformation. Journal of Materials Science, 47(9), 3989-3999.