

شبیه‌سازی عددی نفوذپذیری هوا در پارچه‌های تار و پودی با بافت تافته

Numerical Simulation of Air Permeability in Plain Woven Fabrics

مسعود کشه فراهانی^{*}، عبدالرسول مقسم، سیده زهرا گوهری

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قائم‌شهر، گروه مهندسی نساجی، قائم‌شهر، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۹/۲۴

چکیده

رفتار نفوذپذیری هوا خاصیت مهمی است که اثر انکارناپذیری بر استفاده از پارچه با اهداف منسوجات فنی و پوشاک می‌گذارد. ساده‌ترین شیوه برای مطالعه، آزمایش پارچه در شرایط استاندارد با استفاده از تجهیزات مناسب طراحی شده به همین منظور است. اما شبیه‌سازی این خاصیت در تولید پارچه با مقدار مشخصی نفوذپذیری هوا مسئله ضروری است. از میان شیوه‌های مختلف، روش‌های عددی به دلیل حصول نتایج دقیق بیش از سایر شیوه‌ها مفید خواهد بود. بنابراین در این پژوهش، مدل ساده سه‌بعدی از زیر و رو رفتن نخ‌های تار و پود در پارچه با بافت ساده ترسیم و رفتار نفوذپذیری هوا از آن مطابق با شرایط آزمایشگاهی شبیه‌سازی شد. پارامترهای ساختاری پارچه، مورد نیاز برای ترسیم سلول بافت بر اساس معادله‌های Peirce محاسبه شد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل عددی و روش تجربی نشان داد، امکان شبیه‌سازی نفوذپذیری هوا در پارچه‌های تار و پودی با روش عددی وجود دارد. همچنین، حداقل و حداکثر خطاهای پیش‌بینی عددی به ترتیب ۳/۴۱٪ و ۲۰/۹۲٪ بود.

مقدمه

نفوذ هوا در پارچه متأثر از نوع الیاف، سامانه ریسندگی نخ، چیدمان الیاف در نخ، جهت و مقدار تاب نخ، تراکم و وزن واحد طول نخ، نحوه درهم روی نخ‌ها، عوامل خارجی مانند عملیات تکمیل و رطوبت موجود در محیط است [۱]. نفوذ هوا در پارچه بافته‌شده از نخ رینگ بیش از نفوذ هوا در پارچه بافته‌شده از نخ چرخانه است [۲]. هنگام استفاده از نخ تار و پود با جهت تاب یکسان، نفوذپذیری هوا در پارچه افزایش می‌یابد. در پارچه تار و پودی، افزایش تاب نخ سبب افزایش نفوذ هوا در پارچه می‌شود [۳]. در این موارد، سطح مقطع منفذ واقع در برابر جریان هوا پارامتر معین‌کننده مقدار هوای عبوری از پارچه است. تراکم نخ عامل مؤثر بر ابعاد منفذ است. در پارچه با تراکم نخ زیاد

تأمین راحتی مصرف‌کننده از مهم‌ترین خواص مورد نیاز در پارچه هنگام استفاده از آن در پوشاک است. راحتی لباس نتیجه وجود شرایط متعدد از جمله انتقال‌پذیری رطوبت، گرما و جریان هواست. مقدار راحتی وابسته به عوامل بسیاری مانند ضخامت، نرمی، خواص نخ و تراکم ساختاری پارچه است. زمانی که پارچه به‌طور مستقیم با پوست در تماس است، وجود اندکی نفوذپذیری هوا برای تأمین حس راحتی کافی است. اما، در مصارف صنعتی عبور هوا از پارچه کنترل می‌شود. این مهم جز با شناسایی عوامل مؤثر و مقدار اثر هر یک بر رفتار نفوذ هوا در پارچه حاصل نخواهد شد [۱].

کلمات کلیدی

نفوذپذیری هوا، پارچه تار و پودی با بافت تافته، روش‌های عددی، معادله Peirce

*مستول مکاتبات، پیام‌نگار: msd_fara@yahoo.com

نقطه تلاقی نخ تار و پود ارائه کردند. در این روش، معادله اصلی برای محاسبه نفوذ هوا در پارچه با در نظر گرفتن هر چهار ناحیه متخلخل و معادله‌های موجود برای محاسبه هر یک نوشته شده است [۹]. مدل رگرسیون آماری روش دیگری است که در پیش‌بینی نفوذ هوا در پارچه و ایجاد ارتباط میان عوامل ساختاری چون تراکم نخ و طرح بافت با آن استفاده شده است [۱۰].

بررسی منابع علمی نشان می‌دهد، شبیه‌سازی رفتار نفوذ هوا در پارچه با استفاده از روش‌های عددی در گذشته کمتر مورد توجه پژوهشگران بوده است. در سال ۱۹۹۶ اولین شبیه‌سازی بر اساس روش عددی درباره نفوذ هوا از فیلتر بافته‌شده از تک‌رشته گزارش شد. در این مطالعه، ساده‌ترین شکل از بافت (تافته) مدنظر قرار گرفته و رفتار عبور سیال شامل تغییرات سرعت و فشار هنگام عبور سیال از منفذ نشان داده شده است [۴].

در سال ۲۰۱۱ از روش‌های عددی برای تحلیل رفتار نفوذ هوا در پارچه بافته‌شده از نخ رشته‌ای استفاده شد. پیش از رسم ساختار پارچه، از نمای جانبی پارچه با دقت زیاد عکس برداشت شد. در این پژوهش، از نرم‌افزار ویژه برای طراحی انواع طرح بافت که در اختیار همگان قرار ندارد، استفاده شد. عکس‌برداری دوبعدی بسیار دقیق پس از تهیه برش از مقطع پارچه به روش میکروتوم انجام شد. اما، مقادیر نفوذ هوا در پارچه و رفتار تغییر فشار و سرعت سیال هنگام عبور از پارچه ارائه نشده است [۱۱]. در جدیدترین مطالعه که Angelova و همکاران انجام داده‌اند، منافذ پارچه به عنوان سامانه‌ای از جت‌های آرایش‌یافته در نظر گرفته شده و رفتار نفوذ هوا در آن با توجه به شکل واقعی منافذ مدل شده است [۱۲]. پژوهش حاضر تلاش می‌کند تا با بهره‌گیری از نتایج و تجربه‌های سایر پژوهش‌ها با هدف بهبود آن، رفتار نفوذ هوا را در پارچه تار و پودی ساده شبیه‌سازی کند. سادگی، قابل فهم بودن، دقت و تکرارپذیری از نقاط قوت این مطالعه است. ترسیم سلول بافت پارچه ساده به محیط نرم‌افزار محاسبه دینامیک سیالات (computational fluid dynamic, CFD) منتقل و محاسبه‌های لازم مانند سرعت عبور سیال و ابعاد منفذ میان نخ‌ها برای محاسبه مقدار نفوذ هوا در شرایط نظری به دقت انجام شد.

تجربی

مشخصات عمومی نمونه‌های پارچه استفاده شده در این مطالعه
برای تعیین کارایی روش‌های عددی در شبیه‌سازی رفتار نفوذ هوا در

عبور هوا به‌سختی انجام می‌شود. افزایش وزن واحد طول نخ نیز سبب کاهش نفوذ هوا در پارچه و افزایش تجمع نخ در پارچه سبب افزایش ابعاد منافذ و عبور هوا از پارچه می‌شود. البته عکس این مورد نیز صادق است [۳]. بافت تافته در مقایسه با سایر طرح‌های بافت پایه مساحت کمتری را برای عبور سیال ارائه می‌کند و دارای حداقل مقدار نفوذ هواست [۴]. مقدار رطوبت نسبی با اثر بر تورم قطری الیاف بر نفوذ هوا در پارچه مؤثر است. بیشتر پارچه‌هایی که به عنوان پارچه ضدنفوذ مواد شیمیایی استفاده می‌شوند، ساختار منسجم دارند و منافذ در ساختار آن وجود ندارد. در این نوع پارچه نفوذ هوا اثرپذیری بیشتری از رطوبت دارد [۵،۶]. عملیات تکمیل با تغییر در ابعاد منافذ پارچه، تغییراتی در نفوذ هوا ایجاد می‌کند [۳،۴].

در بسیاری از موارد که تولید پارچه با مقدار مشخصی از نفوذپذیری هوا مدنظر است، شبیه‌سازی این رفتار ارزشمند و امری لازم است. بنابراین، از دیرباز پژوهشگران بر ارائه معادله‌ها یا مدل برای پیش‌بینی مقدار نفوذپذیری پارچه تمرکز کرده‌اند. مدل‌های آماری، مدل تحلیل، مدل هوش مصنوعی و مدل عددی از جمله روش‌هایی است که برای شبیه‌سازی استفاده شده است. نفوذ هوا در پارچه از منظر فشار سیال و شرایط جابه‌جایی آن به دو نوع پویا و ایستا دسته‌بندی می‌شود. نفوذپذیری پویا هنگامی که پارچه با عبور سیال یا گاز پر فشار مواجه است، همانند آنچه در کیسه هوای اتومبیل یا چتر نجات روی می‌دهد، مورد توجه قرار می‌گیرد. از این رو، پژوهشگران ضمن ارائه رابطه‌ای نوین برای محاسبه مقدار نفوذ هوا، ابزار آزمون و سنجش متناسب با این مسئله را نیز طراحی کرده‌اند. با وجود این، پژوهش‌ها بر دسته دوم بیشتر تمرکز داشته است [۶].

رفتار نفوذ هوا از پارچه تک‌لا یا چندلا در شرایط ایستا با در نظر گرفتن پارامتر تخلخل مطالعه می‌شود. Zupin و همکاران اثر برخی از عوامل بر نفوذ هوا در پارچه پنبه‌ای را با هدف افزایش دقت پیش‌بینی این خاصیت مطالعه کردند. این مطالعه بیشتر بر محاسبه شکل و اندازه سه‌بعدی حفره‌های موجود در سطح پارچه متمرکز بود [۷]. Xiao و همکاران مدلی تحلیلی از رفتار نفوذ هوا را در پارچه تار و پودی ارائه کردند. در این پژوهش، مدل سه‌بعدی کانال موجود در میان نخ‌ها بر اساس پارامترهای فاصله نخ، شکل سطح مقطع نخ و ضخامت پارچه و با استفاده از توابع پارابولیک تخمین زده شده است [۸].

Ogulata و همکاران مدلی محاسباتی از نفوذ هوا در پارچه را با در نظر گرفتن تخلخل نخ تار، نخ پود، منفذ موجود میان نخ‌ها و تخلخل در

جدول ۱- مشخصات عمومی نمونه‌های پارچه.

پارچه چهارم		پارچه سوم		پارچه دوم		پارچه اول		مشخصه پارچه
جهت پود	جهت تار	جهت پود	جهت تار	جهت پود	جهت تار	جهت پود	جهت تار	
۲۴/۸۶	۲۱/۴۰	۱۶/۷۰	۳۳/۳۰	۲۰/۵۰	۲۴/۷۰	۳۲	۲۷/۶	نمره نخ (tex)
۱۹/۸۶	۳۲/۵۳	۱۹/۰۰	۲۶/۰۰	۲۶/۵۰	۳۲/۵۳	۲۵/۳۸	۲۷/۲۱	تراکم نخ (در سانتی‌متر)
۱۲۱	۱۲۱	۱۱۸	۱۱۸	۱۲۹	۱۲۹	۱۴۴	۱۴۴	وزن در واحد سطح پارچه (g/m ²)
۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۲۸	ضخامت پارچه (mm)

۰/۶۵ لحاظ شده است [۱۴]، ρ_f چگالی لیف یا چگالی مخلوط الیاف و T_{ex} نمره نخ است. محاسبات برای نخ‌های تار و پود چهار نمونه پارچه با توجه به جنس الیاف و ضریب تخلخل نخ انجام شده است. فاصله بین دو نخ تار، برابر با معکوس تراکم تار در واحد طول (n_p) پارچه است:

$$P_1 = \frac{1}{n_e} \quad (3)$$

فاصله بین دو نخ پود، برابر با معکوس تراکم پودی در واحد طول (n_p) پارچه است:

$$P_2 = \frac{1}{n_p} \quad (4)$$

برای تعیین طول نخ قرار گرفته بین دو نخ پود یا دو نخ تار مجاور، دامنه و شدت جابه‌جایی نخ نسبت به محور پارچه (h) محاسبه می‌شود. مقدار این پارامتر وابسته به اندازه قطر نخ‌های تار و پود است و از معادله (۵) به دست می‌آید:

$$h_1 + h_2 = d_1 + d_2 = D \quad (5)$$

برای حل معادله‌های تحلیل‌کننده ساختار پارچه بر اساس معادله‌های Peirce، قطر نخ‌های تار و پود، تراکم‌های تار و پودی، نمره نخ تار و پود و مقدار تجعد نخ تار و پود در ساختار پارچه اندازه‌گیری می‌شود. با در اختیار داشتن مقدار جمع‌شدگی نخ تار و پود و نیز فاصله نخ می‌توان به سادگی ارتفاع موج نخ را محاسبه کرد:

$$h_1 = \frac{4}{3} p_2 \sqrt{c_1} \quad (6)$$

$$h_2 = \frac{4}{3} p_1 \sqrt{c_2} \quad (7)$$

c_1 تجعد نخ تار، c_2 تجعد نخ پود، h_1 جابه‌جایی نخ تار نسبت به محور پارچه (mm)، h_2 جابه‌جایی نخ پود نسبت به محور پارچه (mm)، d_1 قطر نخ تار (mm) و d_2 قطر نخ پود (mm) است. ضخامت پارچه در شرایط بسیار ساده از مدل می‌تواند برابر با حداکثر میان دو مقدار مجموع قطر نخ‌های تار و پود و جابه‌جایی نخ تار و پود نسبت به محور نخ انتخاب شود:

$$T = \text{MAX}(d_1 + h_2 \text{ and } d_2 + h_1) \quad (8)$$

که در آن T ضخامت پارچه (mm) است. طول نخ تار بین دو پود و طول نخ پود بین دو تار برابر است با:

$$l_1 = p_2(1 + c_1) \quad (9)$$

$$l_2 = p_1(1 + c_2) \quad (10)$$

پارچه تار و پودی ساده، چهار نمونه پارچه متفاوت از یکدیگر تهیه شد. نخ‌های تار و پود تشکیل‌دهنده پارچه از نوع ریسیده شده در ماشین ریسندگی رینگ (دارای تاب متداول و متناسب با نمره نخ) انتخاب شد. در مرحله اول، مشخصات عمومی نمونه‌ها شامل تراکم و نمره نخ‌های تار و پود بر اساس روش‌های متداول و استاندارد با دقت معین شد. افزون بر این، ضخامت و وزن واحد سطح نمونه‌ها نیز با استفاده از دستگاه ضخامت‌سنج Kardo Tech و ترازوی رقمی با دقت 0.001 g بر اساس استانداردهای ASTM D5736-95 و ASTM D3776-96 مشخص شد. میانگین نتایج در جدول ۱ آمده است.

تعیین مقدار نفوذ هوا به روش تجربی

برای اندازه‌گیری مقدار نفوذ هوا در شرایط آزمایشگاهی از دستگاه سنجش نفوذپذیری هوای Shirely مدل M021S استفاده شد. آزمون در بخش‌های مختلف نمونه پارچه و حداقل ده مرتبه در شرایط یکسان انجام شد. نفوذ هوا (R) بر حسب میلی‌متر بر ثانیه با استفاده از معادله (۱)، از مقادیر خوانده شده با ضریب تغییرات تقریبی 0.1% و با ضریب اطمینان 95% محاسبه شد:

$$R = \frac{q_v}{A} \times 167 \quad (1)$$

در این معادله، q_v میانگین ریاضی مقدار جریان هوا در لوله (dm/min)، A مساحت پارچه بررسی شده (cm^2) و 167 ضریب تغییر دسی‌متر به سانتی‌متر در برابر میلی‌متر بر ثانیه است. آزمون نفوذ هوا در پارچه بر اساس استاندارد ASTM D737-04 آماده‌سازی و انجام شد. اختلاف فشار در دستگاه برای پارچه‌ها در این پژوهش 100 Pa انتخاب شده است [۱۳].

مقادیر تجربی نفوذ هوا (R) بر حسب mL/s.cm^2 شامل میانگین (\bar{X}) و ضریب تغییرات ($CV\%$) در جدول ۲ آمده است.

محاسبه پارامترهای ساختار داخلی پارچه به روش Peirce

برای محاسبه قطر نظری نخ بر اساس مدل Peirce که در آن سطح مقطع نخ دایره‌ای شکل فرض می‌شود، از معادله (۲) استفاده شد:

$$\pi \times R^2 \times 10^5 \times \varphi \times \rho_f = T_{ex} \quad (2)$$

در این معادله، R شعاع نخ، φ تخلخل نخ که برای نخ پنبه‌ای برابر با

جدول ۲- مقادیر نفوذ هوا در نمونه‌های پارچه.

نمونه پارچه	\bar{X}	CV %
اول	۱۳۴	۳/۱۱
دوم	۱۹۰	۲/۶۳
سوم	۶۰/۶۸	۴/۹۴
چهارم	۱۵۱	۳/۲۷

با داشتن مقدار فر و موج می‌توان زاویه بافت را نیز محاسبه کرد:

$$\theta_1 = 106\sqrt{c_1} \quad (11)$$

$$\theta_2 = 106\sqrt{c_2} \quad (12)$$

θ_1 و θ_2 به ترتیب زاویه بافت رفتگی نخ تار و نخ پود هر دو بر حسب درجه است. افزون بر این، طول خمیدگی نخ هنگام عبور از بالای نخ دیگر نیز از معادله (۱۳) محاسبه می‌شود [۳، ۱۴]:

$$r_1 = \frac{P_1}{8 \sin \theta_1} \quad \text{و} \quad r_2 = \frac{P_2}{8 \sin \theta_2} \quad (13)$$

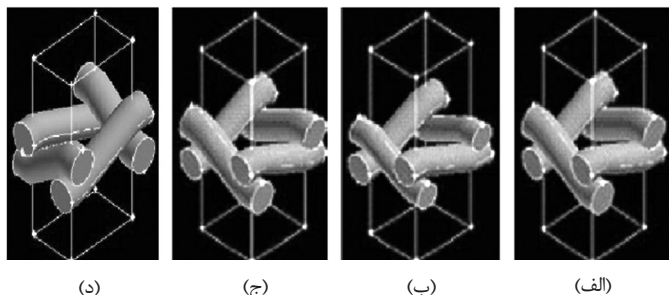
نتایج و بحث

پارامترهای معرفی‌کننده ساختار داخلی پارچه محاسبه و خلاصه آن در

جدول ۳ آمده است. مراحل اصلی فرایند شبیه‌سازی عبارت از رسم شکل اصلی سلول بافت، شبکه‌بندی در نرم‌افزار پیش‌پردازنده، تعیین شرایط مرزی، اجرای برنامه با توجه به هندسه جسم، انتقال جسم شبکه‌بندی شده از نرم‌افزار پیش‌پردازنده (Gambit) به نرم‌افزار محاسبه گر (Fluent)، بررسی شبکه ایجاد شده، انتخاب شیوه محاسبه و رابطه مناسب برای حل مسئله، انتخاب معادله‌های اساسی، تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده حل مسئله، مقداردهی اولیه به پارامترها، شروع محاسبه‌ها، ارزیابی نتایج محاسبه‌ها و در نهایت ذخیره نتایج است. در پژوهش حاضر، به دلیل پیچیدگی ساختار از نرم‌افزار Gambit (2001، V2) برای ترسیم اولیه مدل استفاده شد. پس از رسم ساختاری از سلول پارچه، اطلاعات به نرم‌افزار Fluent (2006، V6.3) برای اجرای مراحل بعدی منتقل شد. در محیط نرم‌افزار Gambit، ایجاد سلول بافت به روش گرافیکی در دو مرحله انجام شد. ابتدا شکل دوبعدی از سلول بافت رسم شد. سپس، این ترسیم به شکل سه‌بعدی تغییر وضعیت داده شد. در شکل ۱، تصویر سمت چپ نمای پودی و شکل سمت راست نمای تار سلول بافت پارچه را نشان می‌دهد.

جدول ۳ - نتایج محاسبه پارامترهای ساختاری نمونه‌های پارچه با استفاده از معادله‌های نظری معرفی شده.

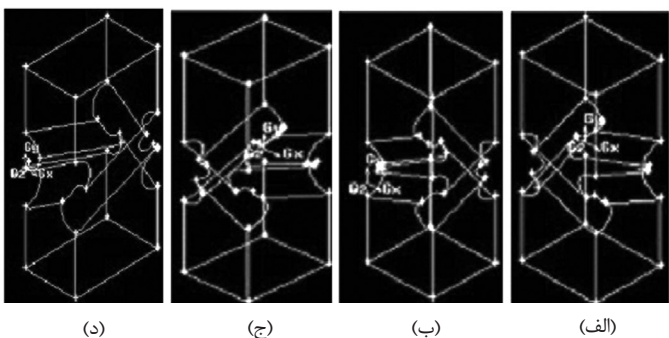
نمونه پارچه سوم	نمونه پارچه دوم	نمونه پارچه اول	مشخصه پارچه
۲۱/۴۰	۲۴/۷	۲۷/۶	نمره تار (tex)
۲۴/۸۶	۲۰/۵	۳۲	نمره پود (tex)
۳۲/۵۳	۳۲/۵۳	۲۷/۲۱	تراکم تار (در سانتی‌متر)
۱۹/۸۶	۲۶/۵	۲۵/۳۸	تراکم پود (در سانتی‌متر)
۰/۰۱۲۱	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۵۶	وزن در واحد سطح پارچه (g/cm^2)
۰/۰۲۴	۰/۰۲۵	۰/۰۲۶	ضخامت پارچه (cm)
۰/۰۱۷۲	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۵۲	قطر نخ تار (cm)
۰/۰۱۸۴	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۶۴	قطر نخ پود (cm)
۰/۰۳۰۷	۰/۰۳۰۷	۰/۰۳۶۷	فاصله بین دو نخ تار (cm)
۰/۰۵۰۳	۰/۰۳۷۷	۰/۰۳۹۴	فاصله بین دو نخ پود (cm)
۰/۰۱۰۶	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۰۲	ارتفاع موج نخ تار (cm)
۰/۰۱۰۰	۰/۰۰۸۸	۰/۰۱۱۳	ارتفاع موج نخ پود (cm)
۰/۰۵۱۵	۰/۰۳۹۸	۰/۰۴۰۸	طول نخ میان دو رشته تار متوالی (cm)
۰/۰۳۲۵	۰/۰۳۲۱	۰/۰۳۸۷	طول نخ میان دو رشته پود متوالی (cm)
۲/۵	۵/۶	۳/۸	موج‌زدگی نخ تار (/)
۶	۴/۷	۵/۴	موج‌زدگی نخ پود (/)
۱۶/۳۷	۲۵/۰۸	۲۰/۶۶	زاویه بافت تار ($^\circ$)
۲۵/۶۶	۲۲/۹۸	۲۴/۶۳	زاویه بافت پود ($^\circ$)



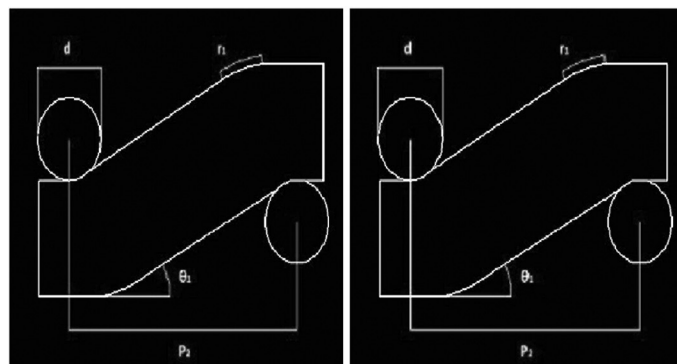
شکل ۳- نمای سلول بافت نمونه‌های پارچه پس از رسم حجمی ساختار: (الف) نمونه پارچه اول، (ب) نمونه پارچه دوم، (ج) نمونه پارچه سوم و (د) نمونه پارچه چهارم.

سلول اصلی با استفاده از نرم‌افزار Fluent انجام شد (شکل ۶). در این پژوهش، مش به شکل سلول‌های چهاروجهی، خطای محاسبه برابر 1×10^{-3} و تعداد دفعه‌های تکرار آزمون ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. تعداد مش‌ها برای حجم سلول بافت برای نمونه پارچه اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۷۸۱۱۸۳، ۵۲۹۸۸۲، ۱۲۷۰۱۹۶ و ۷۳۸۵۸۱ و ابعاد آن در چهار ساختار مساوی و برابر با 0.1002 mm^2 در نظر گرفته شد. در مدل ارائه شده ساختار نخ نامتخلخل و نفوذناپذیر در نظر گرفته شده است. در غیر این حالت فرایند شبیه‌سازی بسیار پیچیده و شاید غیرقابل حل شود. افزون بر این، نفوذناپذیری نخ به دلیل تمایل سیال به عبور از منافذ با دسترسی بیشتر توجیه‌پذیر است [۴]. شرایط مرزی معین‌کننده شرایط جریان هوا و شرایط گرمایی در مرزها، با توجه به فیزیک مسئله انتخاب، در نرم‌افزار Gambit تعریف و مقادیر اولیه هر یک برای حل مسئله در نرم‌افزار Fluent به مدل ارائه شده است.

انتخاب شرط مرزی فشار ورودی در حجم مورد بررسی، برای معرفی فشار سیال در ورودی با توجه به پارامترهای معین‌شده از مسئله انجام شد. جریان عبوری از ساختار با توجه به شرایط مسئله، تراکم‌پذیر با چگالی گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده است. در جریان تراکم‌پذیر، روابط اینترپولیک در گاز ایده‌آل برای نسبت‌دادن فشار، فشار ایستا و سرعت در مرز فشار ورودی به کار می‌رود. شرایط سیال نیز بر اساس پارامترهای هوا معرفی شده است. از آنجا که ساختار نخ به دلیل پیچیدگی حل و نیز تمایل سیال در عبور از مسیرهای در دسترس، نفوذناپذیر در نظر گرفته شده است. شرط مرزی دیوار برای جداسازی نواحی سیال از جامد و معرفی فضای نفوذناپذیر برای ساختار نخ تعریف شد. شرط مرزی سطح



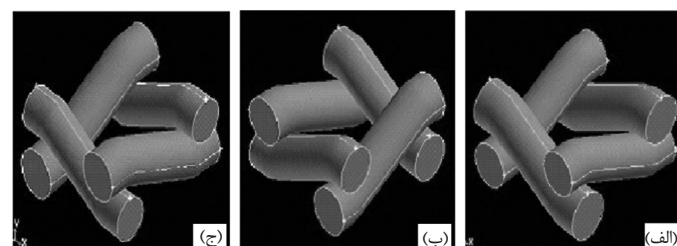
شکل ۴- نمایش حجمی منفذ موجود در سلول بافت برای عبور جریان هوا: (الف) نمونه پارچه اول، (ب) نمونه پارچه دوم، (ج) نمونه پارچه سوم و (د) نمونه پارچه چهارم.



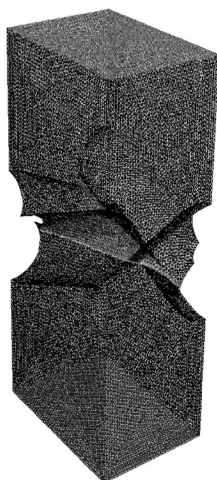
شکل ۱- نمای جانبی و دوبعدی سلول بافت نمونه پارچه سوم.

در مرحله بعد، در فضای سه‌بعدی با قراردادن سطح مقطع نخ به شکل عمود بر خط عبور داده شده از مرکز آن، سلول بافت به شکل سه‌بعدی رسم شد (شکل ۲). پس از رسم سلول بافت پارچه با بهره‌گیری از نرم‌افزار Gamebit، این تصویر سه‌بعدی برای انتقال به نرم‌افزار محاسبه‌گر ذخیره شد. از نرم‌افزار Gamebit برای ایجاد قابلیت رسم هندسه سلول و مش‌بندی ساختار و کسب اطلاعات به عنوان ورودی نرم‌افزار Fluent نیز استفاده شده است. برای شبیه‌سازی فرایند نفوذ هوا، نفوذناپذیر بودن نخ و عبور هوا فقط از منافذ میان نخ‌ها لحاظ شده است. سلول بافت رسم شده از پارچه متشکل از چهار نخ مجزاست. برای اجرای فرایند شبیه‌سازی، سلول بافت به شکل حجمی (شکل ۳) با عرض و عمق مشخص در راستای محور x و y (به ترتیب برابر با فاصله نخ‌های پود و فاصله نخ‌های تار از یکدیگر) و طولی دلخواه در راستای محور z تغییر شکل داده شد.

حجم مربوط به سلول بافت از حجم مستطیل اصلی و در برگزیده جدا شد (شکل ۴). طول در نظر گرفته شده از حجم مستطیل اصلی برای تمام حالت‌ها به یک اندازه انتخاب شد تا ابعاد مقاطع ایجاد شده در ساختار نمونه‌های پارچه برای مقایسه عبور سیال متفاوت از یکدیگر نباشد. در مرحله بعد با توجه به مختصات نقاط مختلف شکل که در محیط نرم‌افزار به دقت قابل شناسایی است، سلول بافت پارچه برای ایجاد صفحه α_p که معرف مساحت در دسترس برای عبور جریان هوا از منفذ سلول است، برش زده شد. صفحه α_p در شکل‌ها به رنگ قرمز مشخص شده است (شکل ۵). پس از مشخص شدن صفحه مسیر عبور جریان هوا، مش‌بندی سلول طراحی شده یا تقسیم ساختار رسم شده به سلول‌های بسیار ریز با شکل و ابعاد مشخص و متناسب با ماهیت



شکل ۲- نمای سه‌بعدی سلول بافت نمونه‌های پارچه پس از رسم محور مرکزی: (الف) نمونه پارچه اول مقطع نخ دایره، (ب) نمونه پارچه دوم مقطع نخ دایره و (ج) نمونه پارچه سوم مقطع نخ دایره.



شکل ۷- نمایش صفحات اصلی معرف شرط مرزی دیوارها در سلول بافت نمونه پارچه سوم.

سه نقطه از رئوس صفحه نشان‌دهنده آن با استفاده از نرم‌افزار مشخص و به یکدیگر و رأس چهارم متصل شد.

محاسبه مقدار نفوذ هوا در پارچه به روش نظری

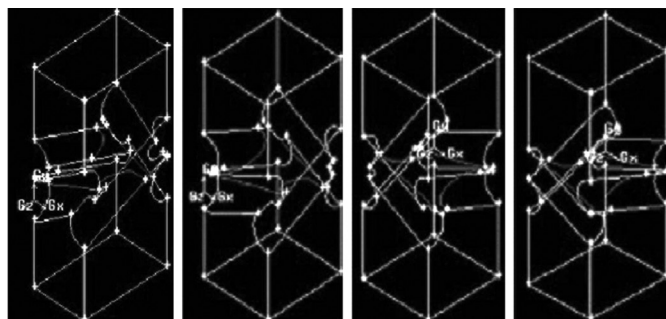
با فرض اینکه جریان عبوری از یک منفذ مستقل از سایر منافذ است، مقدار ضریب تخلیه هوا از سلول بافت در نمونه‌های پارچه به‌طور تجربی و بر اساس مقادیر پارامترهای محاسبه شده از راه شبه‌سازی فرایند عبور هوا از سلول بافت با استفاده از معادله‌های زیر معین شد:

$$C_D = \left[\frac{PU_\infty^2(1-\alpha_p^2)}{2\Delta P\alpha_p^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

C_D ضریب تخلیه، ΔP اختلاف فشار در دو سوی منفذ مدل شده از سلول بافت پارچه (Pa)، U_∞ سرعت ظاهری سیال (m/s)، ρ چگالی سیال (kg/m^3) و α_p کسر مؤثری از سطح باز در برابر جریان هواست. در این پژوهش، برای افزایش دقت، مساحت این صفحه با استفاده از نرم‌افزار گرافیکی Gambit و با توجه به معلوم بودن ابعاد سلول و مختصات رئوس سهمی آن با دقت بسیار زیاد محاسبه شده است. با توجه به اینکه مساحت پارچه آزمون شده برای تعیین مقدار نفوذ هوا در شرایط آزمایشگاهی 508 mm^2 است. بنابراین، مقدار نظری نفوذ هوا (R) نیز پس از محاسبه و تعیین تمام پارامترهای اشاره شده در معادله‌های بالا با استفاده از معادله (۱۵) مشخص شد. در این معادله عدد 10000 ضریب تبدیل است. در جدول ۴ خلاصه مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه نظری مقدار نفوذ هوا در پارچه آمده است. این مقادیر از طریق شبه‌سازی سلول بافت و به کمک حل عددی مسئله معین شده‌اند:

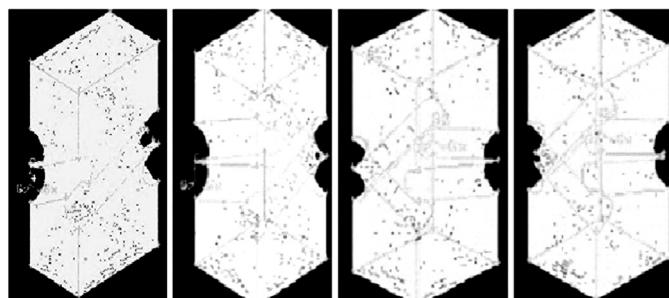
$$R = C_D \times 5.08 \times 10000 \quad (15)$$

در جدول ۵ مقادیر تجربی و نظری حاصل از شبه‌سازی و تفاوت



شکل ۵- نمایش صفحه مسیر عبور جریان هوا از منفذ موجود در سلول بافت: (الف) نمونه پارچه اول، (ب) نمونه پارچه دوم، (ج) نمونه پارچه سوم و (د) نمونه پارچه چهارم.

مشترک (interface) مربوط به صفحه‌ای است که حد فاصل بین دو حجم است، ولی هیچ ممانعتی در برابر عبور جریان ایجاد نمی‌کند. از این رو، با توجه به یکسان بودن شرایط، صفحه α_p معرف مرز سطح مشترک در نظر گرفته شد. با توجه به ترسیمه مدل شده، رنگ آبی معرف صفحه ورود جریان، رنگ قرمز صفحه خروجی جریان، رنگ سیاه کل حجم و رنگ سبز دیواره‌های حجم برای تعیین محدوده عبور سیال از سلول بافت در نظر گرفته شده است (شکل ۷). صفحه α_p در نرم‌افزار Gambit به عنوان سطح مشترک (صفحه‌ای که امکان انتقال جریان از آن وجود دارد) و در نرم‌افزار Fluent به عنوان صفحه داخلی که جریان سیال ورودی بدون هیچ تغییر در سرعت یا مقدار فشار از آن عبور می‌کند، معرفی شده است. این صفحه صرفاً برای محاسبه سرعت سیال و برای دستیابی به مقدار نفوذ هوا در ساختار پارچه معرفی شده است. چهار رأس این صفحه، در مرکز چهار سطح مقطع دو نخ قرار دارد و در واقع یک سهمی است. نبود جریان هوای اغتشاشی و عدم اعمال نیروی مکانیکی بر سلول بافت، عدم انتقال جرم در سلول بافت، جریان هوای پایا (steady flow) و آرام (laminar flow) شرط‌های دیگر انتخاب شده در این شبه‌سازی است. برای حل مسئله، حجم مورد بررسی در جهت‌های عمود و افق با نوزده مقطع مختلف و پیاپی برش زده شده است. فاصله آنها از یکدیگر در راستای افق و عمود با توجه به قطر نخ تار (به دلیل ابعاد بیشتر) برابر با $d/8$ و در جهت پودی نسبتی از فاصله نخ‌های پود با توجه به تعداد مقاطع در نظر گرفته شد. فواصل این مقاطع در جهت X و Y به ترتیب 0.026 و 0.033 mm است. برای رسم هر مقطع، مختصات



شکل ۶- مش‌بندی و تقسیم سلول بافت به قطعه‌های کوچک: (الف) نمونه پارچه اول، (ب) نمونه پارچه دوم، (ج) نمونه پارچه سوم و (د) نمونه پارچه چهارم.

جدول ۴- خلاصه نتایج محاسبه پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه نفوذ هوا در پارچه بر اساس مدل شبیه‌ساز.

نمونه پارچه چهارم	نمونه پارچه سوم	نمونه پارچه دوم	نمونه پارچه اول	پارامتر محاسبه شده
۵۰/۸	۵۰/۸	۵۰/۸	۵۰/۸	مساحت آزمون شده از نمونه پارچه (cm ²)
۲۳۷۵۷۰	۶۲۲۸۳	۳۷۱۲۳۸	۱۹۹۸۱۸	U_p
۰/۰۰۰۰۰۰۶۶۱۴۵۵۴	۰/۰۰۰۰۰۰۷۷۸	۰/۰۰۰۰۰۰۶۰۵۷۱۵۱	۰/۰۰۰۰۰۰۶۴۴۹۹۴۸	α_p
۰/۰۰۰۰۵۰۳×۰/۰۰۰۰۳۰۷	۰/۰۰۰۰۵۳×۰/۰۰۰۰۳۹	۰/۰۰۰۰۳۰۷۴×۰/۰۰۰۰۳۷۷۳	۰/۰۰۰۰۳۹۴×۰/۰۰۰۰۳۶۷۵	$L_t L_w$
$1/0.214 \times 10^{-12}$	$1/6.81 \times 10^{-12}$	$7/0.525 \times 10^{-14}$	$9/3392 \times 10^{-14}$	A_p
۱/۲۲۵	۱/۲۲۵	۱/۲۲۵	۱/۲۲۵	P
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	ΔP
$2/426612 \times 10^{-8}$	$9/44 \times 10^{-9}$	$2/6.8 \times 10^{-8}$	$1/8661 \times 10^{-8}$	U_∞
$2/871129 \times 10^{-2}$	$9/425 \times 10^{-4}$	$3/3697 \times 10^{-2}$	$2/2623 \times 10^{-2}$	C_D
۱۴۵/۸۵	۴۷/۹۸	۱۷۱/۱۸	۱۱۵	R

نتیجه‌گیری

تأمین حس راحتی هنگام استفاده از پارچه به شکل پوشاک از اهمیت زیاد برخوردار است. این حس جز با ایجاد قابلیت جابه‌جایی رطوبت، گرما و هوا در دو سوی پارچه حاصل نخواهد شد. مطالعات اولیه و تحلیل رابطه میان عوامل مختلف با سنجش عملی این ویژگی در محیط آزمایشگاه انجام می‌شد.

در سال‌های بعد، پیش‌بینی رفتار نفوذ هوا در پارچه، ارائه رابطه برای محاسبه مقدار نفوذ هوا در منسوجات و بهبود دقت گزارش‌های پیشین مدنظر قرار گرفت.

از میان روش‌های مختلف، شیوه‌های عددی قابلیت شبیه‌سازی دقیق رفتار نفوذ هوا را در پارچه دارد. از همین رو، پژوهش حاضر تلاش می‌کند تا با استفاده از این روش رفتار نفوذپذیری هوا شامل تغییر سرعت و فشار سیال حین عبور از منافذ پارچه را شبیه‌سازی کند.

چهار نمونه مختلف از پارچه با بافت تافته تهیه و مقدار نفوذ هوا در آن به روش استاندارد در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای شبیه‌سازی این رفتار، سلول بافت پارچه به‌دقت در محیط نرم‌افزار طراحی شد. تمام پارامترهای لازم برای رسم شکل از راه تحلیل ساختار داخلی پارچه با استفاده از معادله‌های Peirce محاسبه شد.

ترسیمه دوبعدی طراحی شده ابتدا به شکل سه‌بعدی و سپس در قالب حجم و کانال برای هدایت جریان هوا از آن تغییر حالت داده شد. پس از تقسیم حجم مزبور به بخش‌های بسیار کوچک، مقادیر پارامترهایی چون سطح منفذ بین نخ‌های تار و پود (محل عبور جریان هوا) و سرعت سیال حین عبور از منفذ به کمک نرم‌افزار به‌دقت محاسبه شد. با بهره‌گیری از معادله‌های محاسبه نفوذ هوا در پارچه تار و پودی و قراردادن مقادیر نظری پارامترهای محاسبه شده در آن، مقدار نفوذ هوا در نمونه‌های پارچه به روش عددی محاسبه و پیش‌بینی شد.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد، مقادیر نفوذ هوای آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده به روش عددی بسیار به یکدیگر نزدیک است. به عبارت

میان آن دو ارائه شده است. شاید با توجه به سایر پژوهش‌ها که در نشریات علمی منتشر شده‌اند، بتوان اذعان داشت که مدل عددی اتخاذ شده تا اندازه‌ای در شبیه‌سازی رفتار نفوذ هوا در پارچه موفق بوده است. محاسبات مقادیر ۲۰/۹۲ و ۳/۴۱ را به ترتیب برای بیشترین و کمترین خطا ارائه می‌کنند.

در مقایسه با سایر روش‌های پیش‌بینی نفوذ هوا در پارچه، خطا در شبیه‌سازی عددی انجام شده چندان زیاد نیست. Lu و همکاران خطای پیش‌بینی ۲۰٪ را گزارش کرده‌اند [۴].

Ogulata و همکاران در محاسبه و پیش‌بینی نفوذ هوا در پارچه به خطای بیش از ۴۰٪ نیز اشاره کرده‌اند [۹].

در مقاله دیگری از همین نویسنده مدلی برای پیش‌بینی مقدار نفوذ هوا در منسوج حلقوی ارائه شده است که در برخی موارد خطای بیش از ۲۰٪ در پیش‌بینی مشاهده می‌شود [۱۵]. از طرفی لحاظ کردن شکل بیضی برای سطح مقطع نخ در پارچه و استفاده از روابط کمپ در تحلیل ساختار داخلی پارچه خطای محاسبه نظری نفوذ هوا را بسیار کم کرده و مقدار حاصل از شبیه‌سازی و تجربی را بسیار به یکدیگر نزدیک می‌کند.

در این تحلیل که در ادامه این فعالیت علمی انجام شده و نتایج آن در آینده گزارش خواهد شد، مقدار خطای پیش‌بینی تا ۰/۲۹٪ کاهش یافته است.

جدول ۵- مقایسه نتایج تجربی و نظری (شبیه‌سازی) نفوذ هوا در نمونه‌های پارچه.

نمونه پارچه	مقدار نفوذ هوا در پارچه (mL/s.cm ²)		
	خطا	نظری	تجربی
اول	-۱۴/۱۷	۱۱۵	۱۳۴
دوم	-۹/۹۰	۱۷۱/۱۸	۱۹۰
سوم	-۲۰/۹۲	۴۷/۹۸	۶۰/۶۸
چهارم	-۳/۴۱	۱۴۵/۸۵	۱۵۱

قدردانی

از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم‌شهر برای حمایت مالی در اجرای این طرح تشکر و قدردانی می‌شود.

دیگر، این شیوه به‌خوبی و حتی برتر از سایر روش‌های تحلیلی قابلیت محاسبه مقدار نفوذ هوا را در پارچه تار و پودی ساده دارد. خطای پیش‌بینی حداکثر و حداقل ۲۰/۹۲ و ۳/۴۱٪ محاسبه شد.

مراجع

۱. طاهری اطاقسرام، اصول طراحی و محاسبه بافت پارچه، چاپ دوم، جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۰.
۲. Paek S.L., Effect of yarn type and twist factor on absorbency and hand properties of open-end and ring-spun yarn fabrics, *J. Text. Inst.*, 86, 581-589, 1995.
۳. Backer S., The relationship between the structural geometry of a textile fabric and its physical properties: Part IV: Interstice geometry and air permeability, *Text. Res. J.*, 27, 703-714, 1951.
۴. Lu W.M., Tung K.L., and Hwang K.J., Fluid flow through basic weaves of monofilament filter cloth, *Text. Res. J.*, 66, 311-323, 1996.
۵. Gibson S., Rivin D., Kendrick C., Gibson H.S., Pan N., and Chen K., Humidity-dependent air permeability of textile materials, *Text. Res. J.*, 69, 311-317, 1999.
۶. Xiao X., Zeng X., Bandara P., and Long A., Experimental study of dynamic air permeability for woven fabrics, *Text. Res. J.*, 82, 920-930, 2012.
۷. Zupin Z., Hladnik A., and Dimitrovski K., Prediction of one-layer woven fabrics air permeability using porosity parameters, *Text. Res. J.*, 82, 117-128, 2011.
۸. Xiao X., Zeng X., Long A., Lin H., Clifford M., and Saldaeva E., An analytical model for through-thickness permeability of woven fabric, *Text. Res. J.*, 82, 492-501, 2012.
۹. Ogulata R.T. and Mezarcioz S., Total porosity, theoretical analysis, and prediction of the air permeability of woven fabrics, *J. Text. Inst.*, 103, 654-661, 2012.
۱۰. Fatahi I. and Alamdar Yazdi A., Predicting air permeability from the parameters of weave structure, *Fibers Text. East Eur.*, 20, 78-81, 2012.
۱۱. Rief1 S., Glatt E., Laourine E., Aibibu D., Cherif C., and Wiegmann A., Modeling and CFD-simulation of woven textiles to determine permeability and retention properties, *AUTEX. Res. J.*, 11, 84-88, 2011.
۱۲. Angelova R.A., Stankov P., Simova I., and Kyosov M., Computational modeling and experimental validation of the air permeability of woven structures on the basis of simulation of jet systems, *Text. Res. J., First online*, 2013.
۱۳. American Society for Testing and Materials. Standard test method for air permeability of textile fabric. ASTM D737-04, 2012.
۱۴. Hearle J.W.S., Grosberg P., and Backer S., *Structural Mechanism of Fiber, Yarn and Fabric*, Wiley-Interscience, Vol 1, 1969.
۱۵. Ogulata R.T. and Mavruz S., Investigation of porosity and air permeability values of plain knitted fabrics, *Fibers Text. East Eur.*, 18, 71-75, 2012.

Numerical Simulation of Air Permeability in Plain Woven Fabrics

M. Keshe Farahani*, A.R. Moghassem, and S.Z. Gohari

Department of Textile Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran

Received 30 September 2013; Accepted 15 December 2013

Abstract

Air permeability behavior is an important property with an indisputable influence on the application of fabric for technical purpose and clothing applications. The simple method to study air permeability is testing fabric sample under standard condition using the appropriate developed testing equipments. However, simulation of this property is obligatory in the production of woven textile with prescribed air permeability. Among various approaches, numerical methods are considered useful because of the accurate results obtained. For this reason, in this paper a three-dimensional simple model of warp and weft yarns interlacing was drawn and air permeability behavior of plain woven fabrics was simulated in accordance with the experimental conditions. Fabric constructional parameters required to draw a unit cell of the fabric were calculated using Peirce's structural model for plain woven fabric. Comparing the experimental results and data derived from numerical model showed that, it is possible to simulate air permeability in plain woven fabrics by numerical approach. In addition, minimum and maximum numerical prediction errors were 3.41% and 20.92%, respectively.

Keywords

air permeability,
plain woven fabric,
numerical methods,
Peirce's equation

(*) Address Correspondence to M. Keshe Farahani, Email: msd_fara@yahoo.com