

مروری بر انتقال حرارت در منسوجات بخش دوم: مطالعات مدل سازی

Review of Heat Transfer in Textiles, Part 2: Modeling Modeling Studies

ندا دهقان^۱، پدرام پیوندی^{۱*}

۱- یزد، دانشگاه یزد، مجتمع فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵

چکیده

درک تأثیر پارامترهای ساختاری و هندسی منسوجات بر خواص فیزیکی و حرارتی آن‌ها، با روش‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی امکان‌پذیر است. مطالعات مختلفی جهت مدل‌سازی انتقال حرارت در منسوجات، به منظور تعیین نحوه توزیع حرارت در منسوج، محاسبه ضریب هدایت حرارتی و یا مقاومت حرارتی انجام شده است. از روش‌های مدل‌سازی، برای بیان ریاضی پدیده انتقال حرارت استفاده می‌شود. این روش‌ها، عمدتاً بر اساس هندسه هستند که به مدل‌سازی بر اساس روابط مقاومت‌ها، اجسام دوفازی و حل معادلات بر مبنای روش‌های تحلیلی و عددی تقسیم می‌شوند. در مطالعاتی که یک منسوج به صورت کلی یا مجموعه چند لایه، مورد بررسی است، به ترتیب قوانین اجسام دوفازی و روابط مقاومت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. حل تحلیلی در مسائل ساده یا مسائلی که بتوان آن‌ها را با تقریب‌های قابل قبولی ساده کرد، استفاده می‌شود و حل عددی، در مسائل پیچیده‌تر با روش‌های تفاضل محدود، اجزای محدود و حجم محدود انجام می‌شود. در این مطالعه، پژوهش‌های انجام شده در زمینه روش‌های مدل‌سازی جهت تعیین خواص حرارتی منسوجات مرور شده است.

ورودی می‌توان تعداد زیادی از مسائل مرتبط را حل کرد. امروزه انجام مطالعات مهم بهینه‌سازی در مهندسی، بدون استفاده از قدرت و انعطاف‌پذیری رایانه‌ها و روش‌های عددی تقریباً غیرقابل تصور است [۲]. روش‌های تجربی، مبتنی بر استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمون‌های تجربی هستند. ساختار متخلخل منسوجات و وابستگی تخلخل به تعداد زیادی از پارامترها از جمله ساختار نخ، نوع بافت پارچه، ضخامت و ...؛ درک چگونگی انتقال حرارت در این نوع ماده را تا حدودی دشوار کرده است، به گونه‌ایی که حداقل تغییرات در هر یک از پارامترها، باعث تغییر رفتار حرارتی منسوجات می‌شود.

مدل‌سازی هندسی ابزاری مناسب، جهت درک تأثیر مورفولوژی منسوجات، بر خواص حرارتی آن‌ها است،

مقدمه

در طول دهه‌های گذشته، روش‌های متنوعی جهت محاسبه خواص حرارتی، توسط پژوهشگران ارائه شده است که می‌توان روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی را نام برد [۱]. جهت حل تحلیلی یک مسئله فیزیکی، باید مسئله بیش‌از حد ساده شود و عمدتاً به مهارت ریاضی برای حل این نوع معادلات ریاضیات پیچیده، نیاز است؛ به همین دلیل حل عددی مسائل، حتی در مواردی که جواب تحلیلی در دسترس باشد، نیز یک امر معمول است. مسائل مهندسی غالباً مستلزم بررسی پارامترهای گسترده‌ای هستند تا اثر برخی متغیرها بر روی جواب تعیین شود. رایانه‌ها و روش‌های عددی برای این‌گونه محاسبات، کاملاً مناسب بوده و با اصلاح کد یا متغیرهای

کلمات کلیدی

انتقال حرارت،
مدل‌سازی هندسی،
روش تحلیلی،
روش عددی،
مدل‌های هندسی ساده

* مسئول مکاتبات، پیام نگار: peivandi@yazd.ac.ir



شکل ۱- مدل سازی ریاضی مسائل فیزیکی [۲]

تغییرات تعدادی متغیر کلیدی را به یکدیگر مرتبط می سازد. بررسی پدیده های فیزیکی عمدتاً شامل دو گام اساسی است. در گام اول تمام متغیرهای مؤثر بر پدیده شناسایی شده و تقریبات و فرضیات منطقی در نظر گرفته می شود و وابستگی بین این متغیرها بررسی می گردد. سپس قوانین و اصول فیزیکی مناسب به کار گرفته شده و مسئله به صورت ریاضی فرمول بندی می شود. در گام دوم مسئله با روش مناسب حل شده و نتایج تفسیر می گردند [۲]. در شکل ۱، حل گام به گام یک مسئله نشان داده شده است.

هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی پارامترهای کلیدی در بررسی خواص حرارتی منسوجات هستند که محاسبه این پارامترها با روش های مختلفی انجام می گیرد. با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه، در شکل ۲، تقسیم بندی روش های مختلف محاسبه خواص حرارتی منسوجات، نشان داده شده است.

مدل های هندسی پیچیده

معادلات پیچیده که بر اساس هندسه و ساختار منسوج به دست می آیند با روش های حل تحلیلی و حل عددی قابل محاسبه هستند.

حل تحلیلی معادلات انتقال حرارت

مسائل انتقال حرارت در اجسام مختلف را از طریق (۱) استخراج معادله دیفرانسیل حاکم با انجام موازنه انرژی بر روی المان حجم دیفرانسیلی، (۲) بیان شرایط مرزی و (۳) حل معادله دیفرانسیل و اعمال شرایط مرزی برای تعیین ثابت های معادله، می توان انجام داد. نتیجه این روش، یک تابع جواب برای توزیع دما در جسم است که جواب حاصل از این طریق را جواب تحلیلی مسئله می نامند. جواب تحلیلی برای مسائل ساده به راحتی محاسبه و جواب بسیار مطلوب است؛ زیرا با داشتن فرمول تحلیلی می توان دما را در هر نقطه از جسم محاسبه کرد [۲۷].

علاوه بر آن می توان، اطلاعاتی در مورد پارامترهای منسوجات، جهت رسیدن به مقادیر ویژه از خواص حرارتی که شامل مقاومت، هدایت، جذب و انتشار حرارتی است، دست یافت. در روش های مبتنی بر هندسه منسوج، می توان با در نظر گرفتن ساختار منسوج، در هم روی نخ ها در بافت، یافتن ضخامت کل پارچه [۳] و ... مقاومت یا هدایت حرارتی را تعیین کرد. مدل های هندسی در دو گروه مدل های ساده مانند مدل های مقاومتی [۴-۶] و مدل های مبتنی بر قوانین اجسام دوفازی [۷-۱۱] و مدل های پیچیده تقسیم بندی می شوند.

در مدل های هندسی ساده، از قوانین فیزیکی استفاده شده و برای مدل های پیچیده و شرایط مرزی پیچیده، کمتر کاربردی است. در این مدل ها از فرضیات ساده کننده استفاده می شود که در این صورت، مدل ها به صورت نیمه تحلیلی حل می شوند [۱۲]. در مدل های مقاومتی، مقاومت هر یک از لایه ها به صورت جداگانه با روش های تجربی تعیین و سپس با استفاده از ترکیب مدل های مقاومتی سری-موازی، مقاومت حرارتی کل، برای یک مجموعه چندلایه منسوج را، می توان محاسبه کرد [۴]. در مدل های مبتنی بر قوانین اجسام دوفازی، با توجه به دوفازی بودن منسوجات (فاز الیاف و فاز هوا) و همچنین با توجه به کسر حجمی هر یک از فازها، مقدار هدایت حرارتی مؤثر منسوج قابل تعیین است.

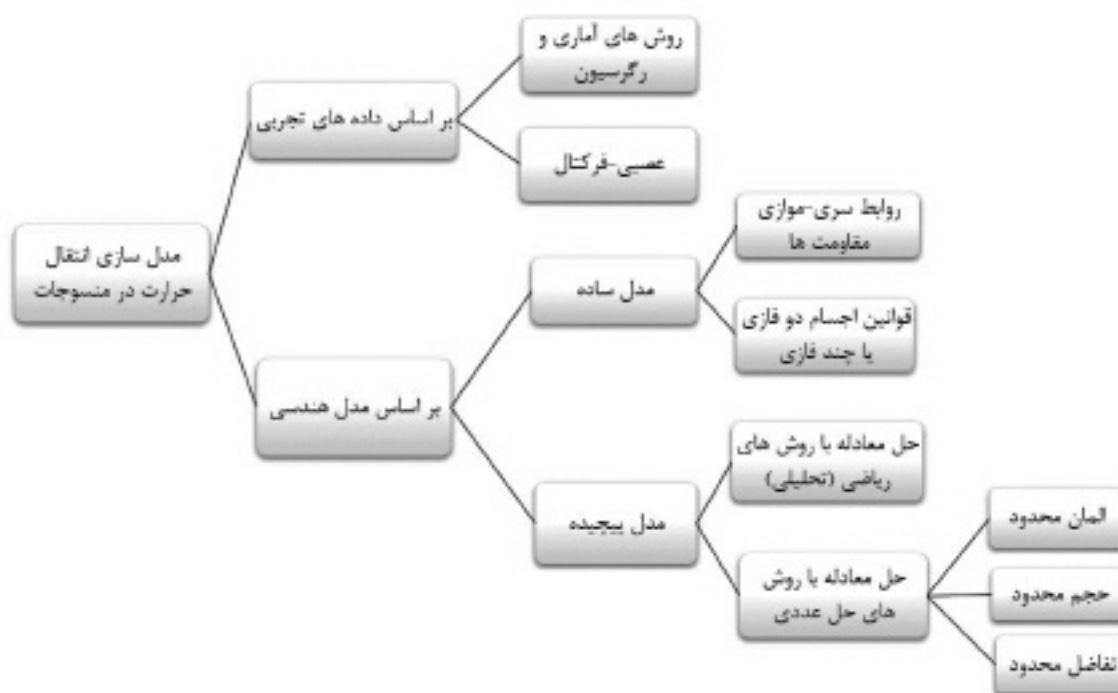
در مدل های هندسی پیچیده، با استفاده از قوانین ترمودینامیک و معادلات تعادل انرژی و استفاده از شرایط مرزی، معادلات ساده یا پیچیده انتقال حرارت در منسوجات حاصل می شوند. روش های حل تحلیلی برای حل معادلات ساده به کار می روند [۳ و ۱۳-۱۵]. روش های حل عددی بیشتر برای مدل های ریاضی پیچیده است که نیازمند یک نرم افزار جهت شبیه سازی و حل معادلات می باشند. روش های بکار رفته در حل معادلات به صورت عددی، بسته به نوع منسوج، فرضیات قابل قبول در مدل و ... متفاوت بوده که پرکاربردترین آن ها شامل المان محدود [۱۶-۱۸] و حجم محدود [۱۹-۲۱] است.

روش های تجربی مبتنی بر معادلات رگرسیون به دست آمده از نتایج تجربی و آنالیز آماری داده ها است؛ همچنین در برخی از مطالعات، آنالیز و تحلیل داده های تجربی بر اساس روش های شبکه عصبی مصنوعی و فرکتال انجام می گیرد [۲۲-۲۶]. در این بررسی پژوهش های انجام شده در زمینه انتقال حرارت انواع پارچه ها مرور شده است. مقاله شامل شش بخش اصلی می باشد؛ که به ترتیب در بخش اول، تعریف مدل سازی و تقسیم بندی مدل های هندسی، بخش دوم، مدل های هندسی با حل تحلیلی، بخش سوم، مدل سازی بر اساس روابط مقاومت ها، بخش چهارم، مدل سازی بر اساس قوانین اجسام دوفازی، بخش پنجم، مدل های هندسی با حل عددی و در بخش ششم، مدل سازی تجربی بر مبنای روش های شبکه عصبی-فرکتال بیان شده است.

تعاریف

مدل سازی

برای بیان اغلب مسائل علمی از عبارات و معادلاتی استفاده می شود که



شکل ۲- تقسیم‌بندی مدل‌سازی انتقال حرارت در منسوجات

حل عددی معادلات انتقال حرارت

روش‌های عددی یکی از روش‌های حل معادلات دیفرانسیل می‌باشند که منجر به یافتن یک حل گسسته برای دمای جسم در نقاط مشخصی از جسم می‌شوند. در روش‌های عددی، دامنه حل، توسط شبکه‌ای از نقاط، تقسیم‌بندی شده، سپس بر روی هر نقطه یا قسمت از شبکه ایجاد شده، معادله توزیع دما به صورت یک معادله جبری بر حسب دماهای مجهول برای دمای نقاط جسم به دست می‌آید. معمولاً این دستگاه معادلات جبری، طی یک فرآیند ریاضی، خطی‌سازی شده تا دستگاه معادلات جبری حاصله به یک دستگاه چند معادله چند مجهول تبدیل شود، مراحل روش‌های عددی به شرح زیر است [۲۷]:

۱. گسسته سازی دامنه حل یا مرحله تولید شبکه
۲. تبدیل معادله دیفرانسیل توزیع دما به یک دستگاه معادلات جبری بر حسب دمای نقاط جسم
۳. خطی‌سازی دستگاه معادلات جبری
۴. حل دستگاه معادلات جبری خطی برای یافتن دمای جسم در نقاط شبکه
۵. محاسبه نرخ انتقال حرارت و نمایش نتایج

روش‌های زیادی برای به دست آوردن فرمول‌بندی عددی برای مسائل هدایت حرارتی بیان شده است که مهم‌ترین آن‌ها [۲۸]:

- تفاضل محدود
- حجم محدود
- المان محدود

اساس تمامی روش‌های فوق تقریباً یکسان بوده و از جزئیات متفاوتی برای تولید شبکه و گسسته سازی معادله دیفرانسیل برخوردارند.

تفاضل محدود

یکی از کاربردهای مهم تفاضل محدود در تحلیل عددی، به خصوص در معادلات دیفرانسیلی عددی است که هدف در راه‌حل‌های عددی مرتبه‌ای و معادلات دیفرانسیلی ناکامل و عادی جزئی می‌باشد. این نظریه، مشتقات را در معادلات دیفرانسیل با تفاضلات محدودی که آن‌ها را تقریب می‌زند، جایگزین می‌کند. روش‌های نتیجه‌گیری شده، روش‌های تفاضل محدود نام می‌گیرند [۲۹].

حجم محدود

این روش که روش حجم کنترل هم نامیده می‌شود یکی از روش‌های حل عددی است که از آن در بسیاری از نرم‌افزارهای از جمله فلونت استفاده شده است. از مهم‌ترین خواص روش حجم محدود انعطاف‌پذیری این روش برای مسائل با هندسه پیچیده است. همچنین عدم نیاز به نگاشت‌ها و تبدیل مختصات متداول در روش تفاضل محدود و اطمینان از ارضای قوانین بقا از مزیت‌های اصلی روش حجم محدود است. از دیگر قابلیت‌های این روش می‌توان به حفظ فیزیک مسئله در معادلات گسسته سازی شده اشاره کرد [۲۹].

المان محدود

روش اجزاء محدود یا روش المان محدود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی است. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی که با روش‌های عددی مانند اویلر حل می‌شوند، است. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی، مسئله مهم، رسیدن به معادله ساده‌ای

جدول ۱، هر یک از مدل‌ها را با ارائه فرمول و شکل نشان می‌دهد. در معادلات بیان شده در جدول ۱، K_1 ، K_2 ، هدایت حرارتی فازهای مختلف و v_1 ، v_2 ، کسر حجمی هر یک از فازها، K_{EI} و K_{EMT} و K_p و هدایت حرارتی مؤثر با روش‌های ذکر شده در جدول ۱ است. جهت درک تأثیر پارامترهای ساختاری و هندسی منسوجات، بر خواص حرارتی آن‌ها، مطالعات مختلفی به صورت مدل‌سازی، انجام گرفته است؛ که در جدول ۲، برخی از مطالعات انجام گرفته در این زمینه خلاصه شده است.

مدل‌های هندسی - حل تحلیلی

اسماعیل و همکاران [۳] یک مدل تحلیلی برای تعیین هدایت حرارتی مؤثر پارچه تار پودی توسعه دادند. ساختار انتخاب شده برای این مطالعه پارچه ساده بود که بتوان آن را به سل‌های مشابه و برابر تقسیم کرد. در این مطالعه ضخامت هر یک از المان‌های معادل تار، پودی، المان ترکیبی (تار بالا)، المان ترکیبی (پود بالا) جهت اندازه‌گیری مقاومت حرارتی محاسبه شدند.

که از نظر عددی پایدار باشد، است. تقسیم ناحیه به نواحی کوچک‌تر دارای مزایای است از جمله: نمایش دقیق هندسه پیچیده، گنجایش ویژگی‌های متفاوت جسم، درک ویژگی‌های موضعی جسم و ... [۳۰].

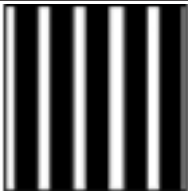
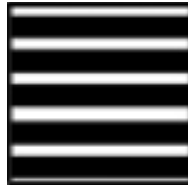
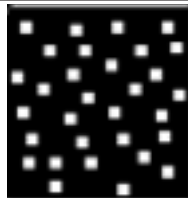
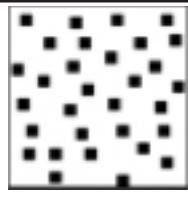

مدل‌های هندسی ساده

معادلات هندسی ساده با استفاده از قوانین فیزیکی محاسبه می‌شوند. در ادامه روش محاسبه هدایت حرارتی در اجسام دوفازی معرفی شده است.

هدایت حرارتی در اجسام دوفازی

روش‌های محاسبه هدایت حرارتی مؤثر در برخی از اجسام دوفازی یا چند فازی در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. پنج مدل محاسباتی معمول برای محاسبه هدایت حرارتی مؤثر برای اجسام متخلخل عبارت‌اند از: روش سری، موازی، دو روش ماکسول و اوشن و تئوری متوسط مؤثر. هر یک از این روش‌ها برای اجسام متخلخل مختلف با توجه به ویژگی‌های ساختاری آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۱].

جدول ۱: مدل‌های محاسباتی هدایت حرارتی در اجسام متخلخل

نام مدل	شکل	رابطه هدایت حرارتی مؤثر	رفرنس
مدل موازی		$K_p = v_1 k_1 + v_2 k_2$	
مدل سری		$K_s = \frac{k_1 k_2}{v_1 k_2 + v_2 k_1}$	
مدل ماکسول - اوشن (۱)		$K_{ME1} = \frac{k_2 v_1 + k_1 v_2 \frac{\tau k_1}{\tau k_1 + k_2}}{v_1 + v_2 \frac{\tau k_1}{\tau k_1 + k_2}}$	[۳۲ و ۳۳]
مدل ماکسول - اوشن (۲)		$K_{ME2} = \frac{k_2 v_2 + k_1 v_1 \frac{\tau k_2}{\tau k_2 + k_1}}{v_2 + v_1 \frac{\tau k_2}{\tau k_2 + k_1}}$	[۳۳ و ۳۲]
روش متوسط مؤثر		$v_1 \frac{k_1 - K_{EMT}}{k_1 + \tau K_{EMT}} + v_2 \frac{k_2 - K_{EMT}}{k_2 + \tau K_{EMT}} = \dots$	[۳۴ و ۳۵]

جدول ۲: انواع مدل‌های محاسبه خواص حرارتی در منسوجات

ردیف	نوع مدل‌سازی	مراجع
۱	مدل‌سازی هندسی-حل تحلیلی	[۳ و ۱۳-۱۵]
۲	مدل‌سازی بر اساس روابط مقاومت‌ها	[۴-۶ و ۳۷-۴۰]
۳	مدل‌سازی بر اساس ساختار و قوانین اجسام دوفازی	[۷-۱۰ و ۴۱]
۴	مدل‌سازی هندسی-حل عددی	[۱۶-۲۱ و ۴۲-۴۷]
۵	مدل‌سازی تجربی-فرکتال و شبکه عصبی	[۲۲-۲۵]

الیاف ایجاد می‌شود، در نظر گرفتند. شکل ۴، سل واحد از الیاف-هوا و تماس بین دو لیف را نشان می‌دهد. در مدل اصلاح شده، آن‌ها سل را به ۸ زیر سلول تقسیم کردند و رابطه هدایت حرارتی مؤثر الیاف و هوا به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$\lambda_{sg}^{MMC} = (m + 1) \left\{ \frac{m}{\lambda_{sg}} + \frac{0+1}{0} \frac{1}{K_a + \frac{K_s A_f}{0 \pi a_{ct}}} \right\} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، m ارتفاع سل در ترکیب هوا و لیف در واحد قطر لیف، $(0+1)$ مساحت سل هوا/لیف در واحد سطح تماس (شکل ۴)، λ_{sg} هدایت حرارتی ترکیب هوا و لیف، A پارامتر اتصال، r شعاع لیف، a_{ct} شعاع تماسی و λ_{sg}^{MMC} هدایت حرارتی مؤثر با در نظر گرفتن پارامتر اتصال است.

در بررسی انجام شده توسط مائو و روسل [۱۴] وب پشم به یک سمت از پارچه اسپیسر حلقوی متصل شده است. در مقایسه با پارچه‌های معمولی نتیجه اتصال الیاف پشم به ساختار پارچه اسپیسر به صورت قابل توجهی هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد. نکته قابل توجه در این بررسی، استفاده از اصول تئوری همانند مواد لیفی [۱۳] در رابطه با انتقال حرارت در پارچه اسپیسر است. در این مطالعه، ضریب هدایت حرارتی با توجه به آرایش یافتگی الیاف و مقاومت تماسی بین الیاف اصلاح و محاسبه شد.

فرضیات برای پارچه تار پودی با ساختار تافته در ادامه ذکر شده است: انتقال رطوبت در پارچه و هوا نادیده گرفته شده است.

۲. توزیع مواد و ویژگی‌های حرارتی برای المان‌های پارچه در همه جا یکسان فرض شده است.

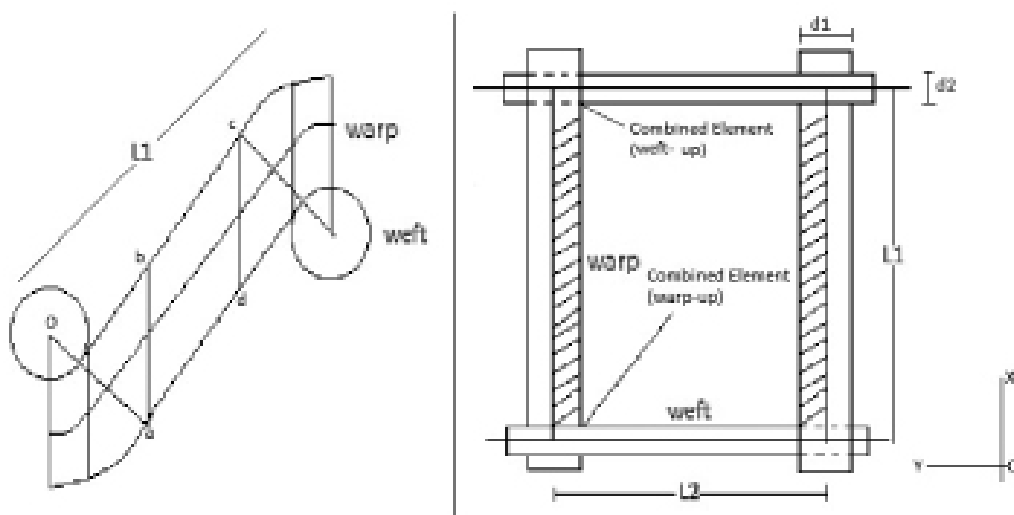
۳. انتقال حرارت یک‌بعدی در حالت پایدار، با شار حرارتی در جهت ضخامت (Z) در نظر گرفته شده است.

۴. اختلاف درجه حرارت در (فصل مشترک) فاز گاز و فاز جامد نادیده گرفته شده است. در این بررسی ضخامت کلی برای پارچه تار پودی محاسبه و مقاومت حرارتی کل در المان محاسبه می‌شود.

استارک و فریک [۱۳] یک مدل سه‌بعدی برای محاسبه هدایت حرارتی ترکیب هوا و الیاف ارائه دادند. آن‌ها رابطه هدایت حرارتی ترکیب الیاف و هوا را به صورت رابطه (۱) توسعه دادند. α نسبت هدایت حرارتی هوا (K_a) به هدایت حرارتی الیاف (K_f) که برابر با (K_a/K_f) ، ξ نسبت کسر حجم الیاف (V_f) به کسر حجمی هوا (V_a) که برابر با، (V_f/V_a) ، K_e هدایت حرارتی مؤثر و $Z = (\delta/6)$ قسمتی از الیاف آرایش یافته عمود بر جهت شار حرارتی است.

$$K_e = K_f \cdot \left(1 + \frac{\alpha - 1}{1 + \xi(1 + Z(\alpha - 1)/(\alpha + 1))} \right) \quad (1)$$

در مدل اصلاح شده آن‌ها اثر مقاومت حرارتی را که توسط تماس بین



شکل ۳: مدل سل واحد پارچه تار پودی برای محاسبه مقاومت حرارتی پارچه [۲]

سل واحد به صورت زیر محاسبه شده است:

$$R = \frac{d}{\lambda_{air}} \left[\frac{\lambda_{fiber} - a(\lambda_{fiber} - \lambda_{air})}{\lambda_{fiber} - (\lambda_{fiber} - \lambda_{air}) \left(a - \frac{\rho_{fabric}}{\rho_{fiber}} \right)} \right] \quad (4)$$

برای محاسبه مقاومت حرارتی در پارچه فرض می شود که ساختار پارچه از مجموعه ای از سل های واحد تشکیل شده است که در شکل ۵ قسمت (ب) نشان داده شده است.

$$a = d_{I-II} / d \quad D = nd \quad (5)$$

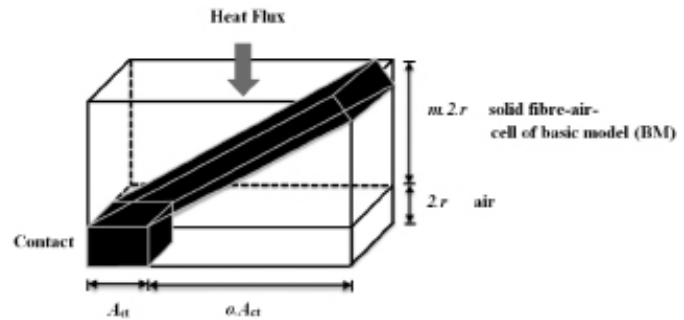
$$R_{fabric} = nR \quad (6)$$

در این روابط a پارامتر ساختاری و n تعداد سل ها است.

مدل سازی بر اساس روابط مقاومت ها

شن و همکارانش [۴] مدل سه بعدی جهت پیش بینی مقاومت حرارتی پارچه در مجموعه چند لایه پارچه، با استفاده از شبیه سازی المان محدود توسعه دادند. در این مدل انتقال حرارت در جهت عرضی و طولی محاسبه شده و ثابت های مورد استفاده، هدایت حرارتی نخ، گرمای ویژه و دانسیته جرمی است. انتقال حرارت در سطح تماس دو نخ تاروپود وجود دارد. سطح پارچه نامنظم و نقاط تماسی و غیر تماسی زیادی بین سطح پارچه و صفحات گرم و سرد وجود دارد. فرضیات مدل:

- ۱- در مدل، نقاط غیر تماسی در لایه ها نادیده گرفته شده است.
- ۲- مقاومت حرارتی پارچه بدون در نظر گرفتن جابجایی است (زیرا نفوذ هوا وجود ندارد؛ و همچنین از تشعشع اتفادیه بین الیاف و هوای به دام افتاده به دلیل اختلاف دمای کم نیز صرف نظر شده است). با داشتن مقاومت حرارتی تک لایه پارچه و لایه هوا، مقاومت حرارتی کل با مدل سری، تعیین می شود. اختلاف بین مقادیر تجربی و شبیه سازی با افزایش تعداد لایه افزایش می یابد؛ زیرا با افزایش ضخامت اتلاف حرارتی از گوشه های پارچه افزایش می یابد، در حالی که این مقدار اتلاف در



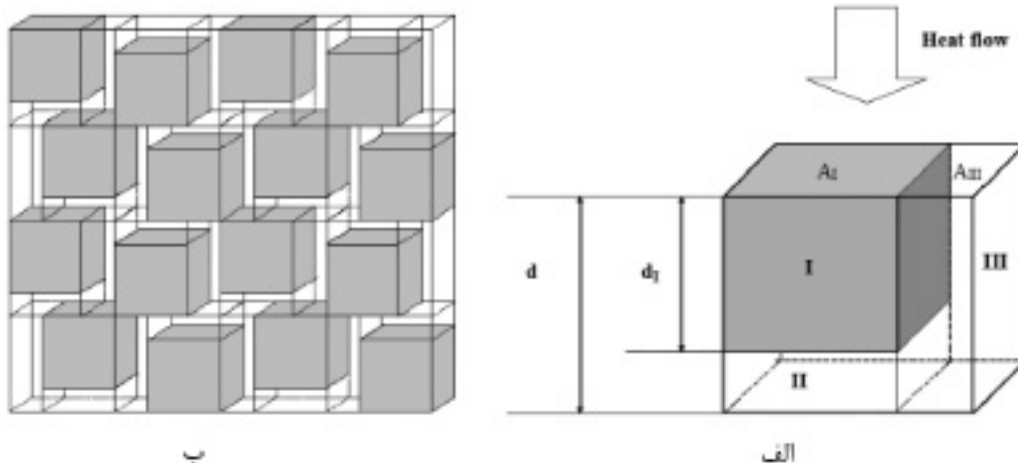
شکل ۴: مدل سل واحد الیاف- هوا برای هدایت حرارتی پارچه [۱۳]

وی و همکاران [۱۵] یک مدل ساده برای محاسبه مقاومت حرارتی پارچه های تار پودی و حلقوی با توجه به پارامترهای میکرو ساختاری ارائه دادند. مدل برای آنالیز فرایند انتقال حرارت در سل واحد پارچه ایجاد شده است. برای فرایند انتقال حرارت در پارچه، سل اصلی به سه قسمت، قابل تقسیم بندی است:

- (۱) الیاف،
- (۲) تخلخل عمود بر جهت جریان حرارت،
- (۳) تخلخل موازی با جهت جریان حرارت؛ که این قسمت ها در شکل ۵ نشان داده شده است. مقاومت حرارتی پارچه وابسته به فرایند انتقال حرارت در سل واحد است. مساحت مربوط به هر یک از قسمت ها و مقاومت حرارتی آن ها برابر است با: R_{III}, R_{II}, R_I و A_{III}, A_{II}, A_I . ضخامت در قسمت I برابر با d_I (m)، دانسیته جرمی پارچه و ρ_{fabric} (kg/m^3) الیاف، ρ_{fiber} (kg/m^3) دانسیته جرمی الیاف، λ_{air} هدایت حرارتی هوا و R ($m^2 \cdot k/W$) مقاومت حرارتی در سل واحد است. اختلاف دما بین دو طرف سل واحد برابر با ΔT (K)، d (m) ضخامت پارچه و Q شار حرارتی (W) در سل واحد برابر است با:

$$Q = Q_{I-II} + Q_{III} \quad (3)$$

با توجه به رابطه بین مقاومت حرارتی و شار حرارتی، مقاومت حرارتی در



شکل ۵: مدل میکرو ساختاری ساده شده برای پارچه، (الف) سل واحد، (ب) ساختار پارچه [۱۵]

(استوانه‌هایی) بزرگ ایجاد شده است.

- مجموعه پارچه را می‌توان با هندسه ساده از منافذ هوا و الیاف تغییر داد.
- مدل به نحوی طراحی شده است که هدایت در هوا وجود دارد و از انتقال حرارت جابجایی صرف نظر شود.
- انتقال حرارت توسط هدایت، با مدل مقاومت حرارتی به صورت سری در نظر گرفته شده است.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (8)$$

$$\frac{L}{K_T} = \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3} + \frac{L_4}{K_4} + \frac{L_5}{K_5} \quad (9)$$

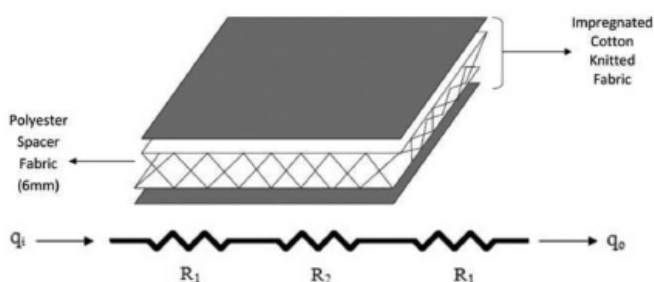
در رابطه (۸) و (۹) R_i ها برابر با مقدار مقاومت حرارتی هر یک از لایه‌ها، R_T مقاومت حرارتی کل، L_i ضخامت هر یک از لایه‌ها و K_i هدایت حرارتی هر یک از لایه‌ها است. خواص حرارتی از جمله مقاومت حرارتی در پارچه‌های اسپیسر حاوی ذرات سرامیک با استفاده از روش المان محدود [۳۶] و همچنین مدل مقاومتی [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. ضیایی و قانع [۶] در مطالعه خود به بررسی خواص عایق حرارتی پارچه اسپیسر حلقوی آغشته شده با پودر سرامیک پرداختند. در این بررسی یک مدل سری برای عایق حرارتی در مجموعه چندلایه در نظر گرفته شد. مقاومت حرارتی هر لایه در ابتدا به صورت جداگانه محاسبه، سپس مقاومت حرارتی مجموعه چندلایه با توجه به مدل سری به دست آمد. مقاومت حرارتی کل مجموعه نیز اندازه‌گیری شد. شکل ۸ شماتیک تعیین مقاومت حرارتی با استفاده از مدل را نشان داده است.

مدل سازی بر اساس ساختار و قوانین اجسام دوفازی

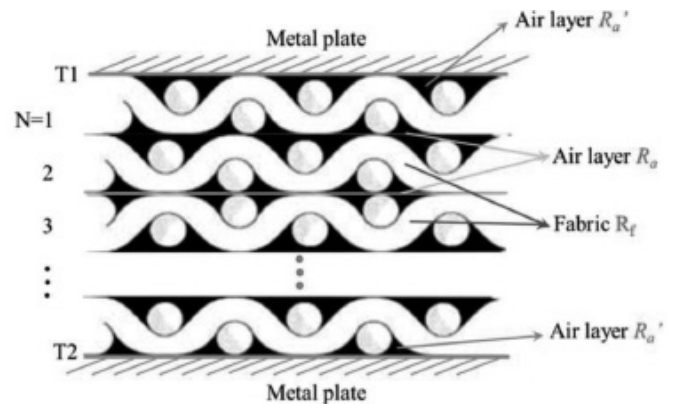
پارچه به‌عنوان یک ماده غیر همگن، شامل ماتریس غیر یکنواخت از الیاف و هوا است. حرارت می‌تواند از طریق پارچه توسط هدایت، جابجایی و تابش انتقال یابد [۴۱].

شومایستر [۷] یک رابطه برای محاسبه هدایت حرارتی مخلوط هوا و الیاف توسعه داد که فرضیات این مدل عبارت‌اند از:

- ۱- الیاف در تمام جهات دارای توزیع یکسان هستند.
- ۲- یک‌سوم از حجم الیاف به صورت موازی در جهت شار قرار گرفته و دو سوم دیگر به صورت عمود در جهت شار حرارتی قرار دارند. رابطه توسعه



شکل ۸: مدل محاسبه مقاومت حرارتی در پارچه اسپیسر به همراه عایق [۶]



شکل ۶: مدل مقاومتی برای پارچه‌های چندلایه [۴]

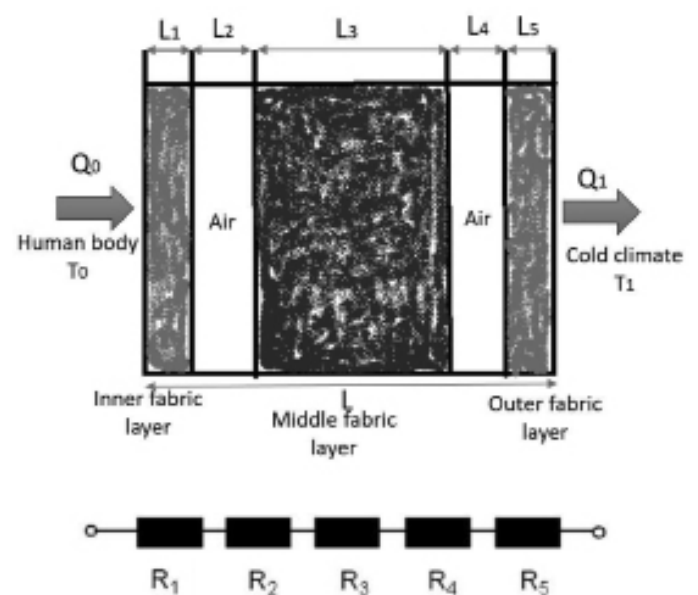
شبه‌سازی نادیده گرفته می‌شود.

$$R_N = NR_f + (N - 1)R_a + 2R_a' \quad (7)$$

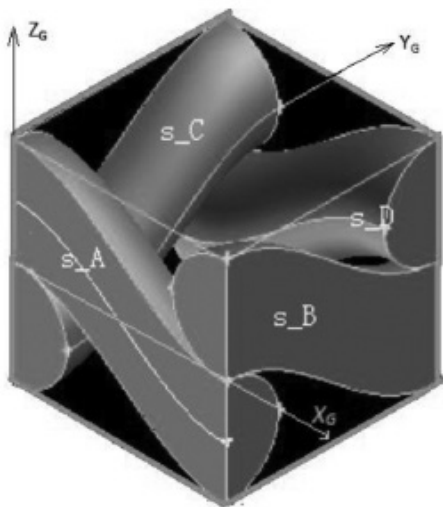
R_a' ، R_f ، R_a مقاومت حرارتی پارچه و لایه هوا و N تعداد لایه است (شکل ۶).

داس و همکاران [۵] یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی انتقال حرارت در مجموعه چندلایه با در نظر گرفتن هوا در بین لایه‌ها توسعه دادند؛ که این مدل با استفاده از معادلات کلی انتقال حرارت در جسم متخلخل توسعه یافت و با استفاده از نتایج تجربی اعتبار سنجی شد. مدل ارائه شده بر اساس معادلات ساده انتقال حرارت از طریق مواد متخلخل است. فرضیات این مدل عبارت‌اند از:

- مجموعه پارچه به‌عنوان یک سل هندسی که انتقال حرارت هدایتی از طریق نخ/الیاف اتفاق می‌افتد.
- مجموعه چندلایه به صورت یک مکعب فرض شده است که از الیاف



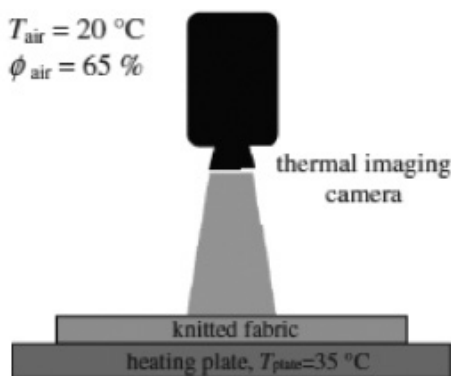
شکل ۷: مدل انتقال حرارت در مجموعه چندلایه منسوج [۵]



شکل ۱۰: مدل سل واحد برای پارچه تار پودی [۱۹]

آب برای فضای داخل نخ نوشته شد. برای فضای بین نخ‌ها (هوا)، معادله تعادل با توجه به بخار آب وجود دارد. هندسه پارچه تار پودی را می‌توان با در نظر گرفتن کوچک‌ترین المان حجمی سازنده از پارچه مشخص کرد. آن‌ها فرض کردند که سطح مقطع نخ یک دایره غیر تغییرپذیر و هدایت حرارتی یکنواخت در الیاف وجود دارد، در ادامه بیان کردند که قبل از اینکه نخ‌ها در ساختار پارچه‌ها بافته شوند، امکان پیش‌بینی چگونگی تأثیرگذاری ساختار تاروپود بر انتقال حرارت و جرم در پارچه وجود دارد که این پیش‌بینی را می‌توان به‌عنوان یک مزیت برای طراحی پارچه و طراحی لباس‌های کاربردی مدنظر قرار داد.

پوشکرز [۲۰] به بررسی خاصیت عایق حرارتی پارچه‌های حلقوی با استفاده از روش ترموگرافی و روش حجم محدود پرداختند. مطالعه انجام شده در بررسی خاصیت عایق حرارتی پارچه حلقوی به دو بخش تجربی و شبیه‌سازی تقسیم شده است. بخش تجربی در این مطالعه با استفاده از مواد واقعی و با استفاده از تصویر حرارتی انجام شدند. در قسمت شبیه‌سازی مدل سه‌بعدی هندسی ایجاد شد و شبیه‌سازی پدیده انتقال انرژی انجام گرفت. هر دو بخش تجربی و شبیه‌سازی در حالت پایدار انجام گرفته است. این مقاله به بررسی راحتی حرارتی اشاره دارد. منسوجات با



شکل ۱۱: تعیین هدایت حرارتی با کمک دوربین حرارتی [۲۰]

یافته بر اساس فرضیات بالا به‌صورت زیر معرفی شد:

$$K_e = \frac{1}{\gamma} (K_a V_a + K_f V_f) + \frac{\gamma}{\gamma} \left(\frac{K_a K_f}{K_a V_f + K_f V_a} \right) \quad (10)$$

اولین قسمت از رابطه بالا مربوط به الیاف موازی در جهت شار حرارتی و دومین قسمت ارائه شده مربوط به الیاف که به‌صورت عمود در جهت شار حرارتی آرایش یافتند. K_e هدایت حرارتی ترکیبی (مؤثر) الیاف و هوا است، سایر پارامترها در رابطه (۱) معرفی شدند. در بررسی انجام شده توسط لیزاک و همکارانش [۸] مدل دوفازی که الیاف دارای دو نوع آرایش سری و موازی هستند (شکل ۹) مورد استفاده قرار گرفت. مدل استفاده شده در این بررسی بر اساس مدل شومایستر است و در ادامه با در نظر گرفتن آرایش برای برخی از الیاف در جهت شار حرارتی ($Z=5/6$)، هدایت حرارتی کل برابر است با:

$$K_b = K_y + \frac{K_a - K_y}{1 + \frac{1-P}{P} \left[1 + Z \times \frac{K_a - K_y}{K_a + K_y} \right]} \quad (11)$$

هدایت حرارتی مؤثر با استفاده از روش فریک [۹] برای جسم متخلخل با الیاف عمود بر جریان حرارت به‌صورت رابطه (۱۲) تعیین می‌شود:

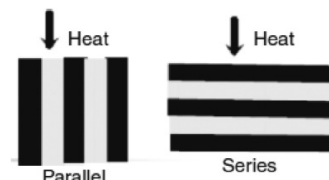
$$K_e = \left[1 - \left\{ \frac{1 - \frac{K_a}{K_f}}{\frac{\gamma \left(\frac{K_a}{K_f} \right) \left(\frac{V_f}{V_a} \right)}{1 + \frac{K_a}{K_f}}} \right\} \right] K_f \quad (12)$$

آرومگام و همکارانش [۱۰] از ترکیب مدل سری-موازی جهت پیش‌بینی مقدار هدایت حرارتی برای پارچه‌های اسپیسر استفاده کردند.

$$K_e = \frac{(K_a V_a + K_f V_f) + \left(\frac{K_a K_f}{K_a V_f + K_f V_a} \right)}{\gamma} \quad (13)$$

مدل‌های هندسی - حل عددی

ران و همکارانش [۱۹] یک مدل سه‌بعدی برای تشریح انتقال هم‌زمان حرارت و رطوبت در مواد لیفی تار پودی با در نظر گرفتن ویژگی‌های هندسی آن مواد، توسعه دادند. روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم استفاده گردید. اثر تخلخل و تراکم پارچه بر انتقال حرارت و جرم بحث شده است. مقادیر پیش‌بینی شده از تغییرات دما در پارچه با اندازه‌گیری‌های تجربی توافق خوبی را نشان می‌دهد. پارچه تار پودی شامل فضای خالی و نخ‌ها است، بنابراین دو قسمت زیر را شامل می‌شود: فضای داخل نخ‌ها و فضای بین نخ‌ها. معادلات تعادل برای آب مایع، بخار

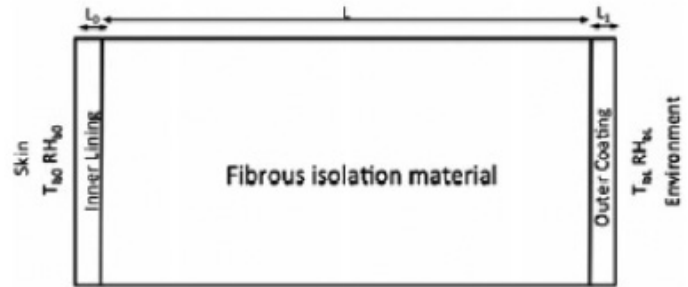


شکل ۹: مدل دوفازی، موازی و سری در جهت شار حرارتی [۸]

در بررسی دیگر توسط سیمیلی و همکاران [۱۶] روش المان محدود برای مدل کردن انتقال حرارت در پارچه حلقوی ساده پنبه‌ای استفاده شده است. برای این منظور از پنبه برای تولید پارچه ساده حلقوی استفاده شده است و از آن جوراب تهیه و بر روی یک صفحه داغ کشیده شد و توسط دو صفحه خنک احاطه شده است. نتایج مدل سازی با نتایج قسمت تجربی مقایسه شده است. همچنین از این مدل برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی مؤثر در پارچه‌هایی از الیاف جدید مانند بامبو، سویا، کیتوزان و غیره نیز می‌توان استفاده کرد. نتایج به دست آمده از روش شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و مشاهده شد که تجزیه و تحلیل با روش المان محدود نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

براسکز و همکاران [۱۷] یک مدل برای شبیه‌سازی عددی تغییرات گرما و بخار آب در بین چندلایه منسوج دارای یک لایه پارچه اسپیسر و پوست انسان برای لباس‌های نظامی و محافظتی ارائه دادند. مدل یک‌بعدی و هر لایه توسط یک المان نشان داده شده و توسط ویژگی‌هایی چون نفوذپذیری بخار آب و هوا، مقاومت حرارتی و ظرفیت گرمایی و همچنین خواص جذب بخار آب مشخص می‌شود. اغلب پارامترهای مدل به صورت تجربی و با اندازه‌گیری به روش استاندارد به دست آمدند. مدل محاسباتی قادر به پیش‌بینی دما و رطوبت در هر یک از فاصله‌های بین هر دو جفت لایه مجاور است. فرایند میعان گازها در مدل در نظر گرفته نشده و فقط نقطه شروع تعریق می‌تواند بررسی شود. در مدل المان محدود، لایه اسپیسر دارای سه گره است: دو گره مربوط به فاصله‌هایی هوایی در بالا و پایین لایه منسوج سه‌بعدی و گره سوم نشان دهنده فضای داخل لایه اسپیسر است. تغییرات جرم و حرارت، بین هوا و بخار آب در المان داخلی لایه سه‌بعدی رخ داده است. شماتیک تغییرات حرارت در چندلایه با المان محدود در شکل ۱۳ ارائه شده است.

صدیکیو همکارانش [۱۸] هدایت حرارتی پارچه‌های حلقوی را با استفاده از روش المان محدود پیش‌بینی کردند. هدایت حرارتی پارچه‌های حلقوی با استفاده از روش المان محدود و روش تجربی به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد که آرایش مواد اثر مهمی بر هدایت



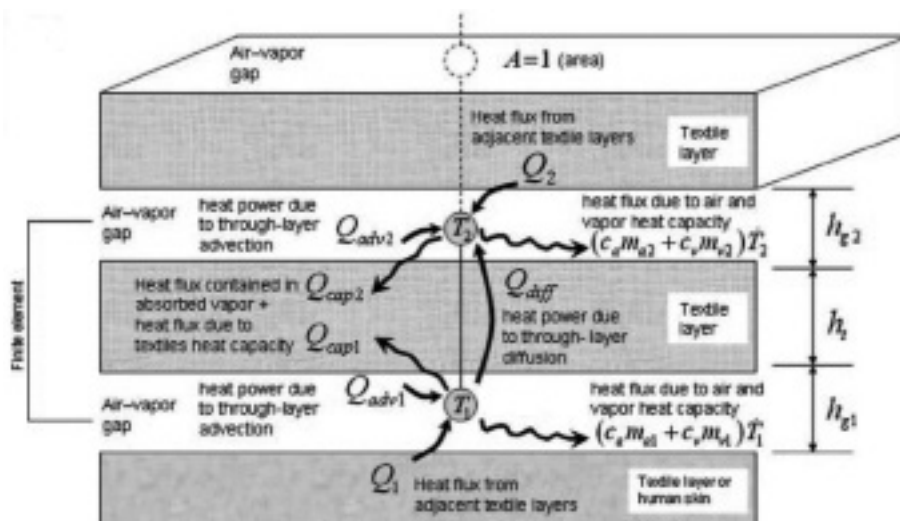
شکل ۱۲: شماتیک مجموعه چندلایه [۲۱]

ساختار هندسی قابل مقایسه و از جنس‌های مختلف برای عایق حرارتی مورد آزمایش قرار گرفتند. در بخش تجربیات، گرادیان دما در شرایط محیطی ثابت با استفاده از دوربین حرارتی محاسبه شد (شکل ۱۱). هدف از مطالعه انجام شده توسط فونتانا و همکارانش [۲۱] توسعه مدل برای شبیه‌سازی انتقال حرارت و رطوبت در یک نمونه منسوج پوشش داده شده با یک لایه به‌عنوان عایق، است. درحالی‌که این مجموعه از یک طرف با پوست انسان و از طرف دیگر با محیط بیرون در تماس است. از روش حجم محدود جهت حل مدل عددی استفاده شده است.

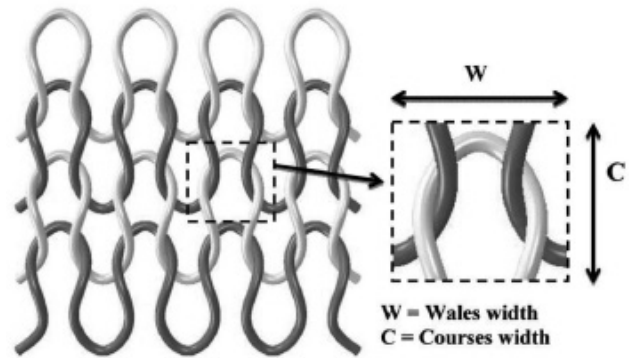
ابزار شبیه‌سازی پیشنهاد شده می‌تواند به‌عنوان روش کمکی برای آنالیز راحتی حرارتی در پیش‌بینی دما، غلظت بخار آب و رطوبت نسبی مورد استفاده قرار گیرد. به‌منظور بررسی سازگار بودن مدل با واقعیت فیزیکی، نتایج به دست آمده، با آنالیز تجربی مقایسه شد. شماتیک یک نمونه پارچه عایق لیفی با یک لایه پوشش نازک روی لبه بیرونی و یک لایه نازک آستری (لایه داخلی) در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

فرضیات برای ساده‌سازی مدل عبارت‌اند از:

- (۱) تغییر ابعاد نمونه بعد از جذب سطحی آب توسط الیاف نادیده گرفته شده است.
- (۲) مواد عایق به‌طور کامل ایزوتروپیک هستند.
- (۳) کلیه مراحل، فازها در تعادل گرمایی هستند. (۴) رطوبت در سطح الیاف در تعادل با هوای اطراف هستند.



شکل ۱۳: جریان حرارت و بخار آب در المان چندلایه [۱۷]



شکل ۱۴: مدل سل واحد از پارچه حلقوی [۱۸]

بی‌بافت‌ها معمولاً به‌عنوان عایق‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. خواص عایق حرارتی این مواد نه‌تنها وابسته به هدایت حرارتی الیاف بلکه وابسته به هوای ساکن به دام افتاده در بین الیاف نیز است. در صورتی که کسر حجمی لیف در مجموعه الیاف کم باشد این بدین معنی است که حجم هوای بیشتری وجود دارد بنابراین خواص عایق بودن پارچه افزایش می‌یابد. در بررسی انجام شده توسط صدیکی و همکاران [۴۷] منسوجات بی‌بافت، مورد استفاده و پدیده انتقال حرارت در این منسوجات آنالیز و هدایت حرارتی مؤثر و عایق حرارتی با استفاده از روش المان محدود پیش‌بینی شد. در این بررسی اثر حجم لیف و هدایت حرارتی الیاف بر انتقال حرارت کل در ساختار بی‌بافت مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل‌سازی تجربی - روش‌های فرکتال و شبکه عصبی

مجموعه [۲۲] یک مدل برای پیش‌بینی هدایت حرارتی پارچه حلقوی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه دادند. شبکه عصبی مصنوعی ابزاری برای پیش‌بینی مقدار خروجی با توجه به مجموعه داده ورودی داده شده بعد از آموزش مدل است.

قربانی و همکاران [۲۳] مدلی برای پیش‌بینی انتقال حرارت و رطوبت در پارچه اسپیسر با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی ارائه دادند. این مدل با استفاده از پارامترهایی از قبیل جرم پارچه، تخلخل و ضخامت پیش‌بینی را انجام می‌دهد. بهترین مدل با بررسی شبکه با توابع مختلف، تعداد اپوک‌ها و توپولوژی شبکه به دست آمد. فایالا و همکاران [۲۴] مدلی بر اساس شبکه عصبی جهت پیش‌بینی هدایت حرارتی در ساختارهای حلقوی که تابعی از تخلخل، نفوذپذیری هوا، وزن و هدایت الیاف است، ارائه دادند.

لی و ژو [۲۵] مدل هدایت حرارتی مؤثر فرکتال برای پارچه‌های تار پودی توسعه دادند. مدل‌های ساختاری از نخ و پارچه تافته، بر اساس ویژگی‌های فرکتال از منافذ-ماکرو، یعنی فاصله بین نخ‌ها و منافذ-میکرو، فواصل داخل نخ‌ها در نظر گرفته شده است.

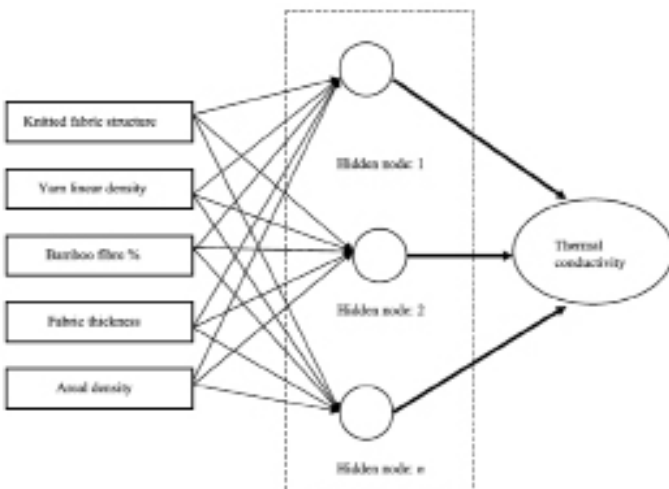
در این بررسی، ابتدا ساختار هندسی فرکتال برای نخ و پارچه تار پودی تعیین شد. سپس ابعاد فرکتال و مدل فرکتال برای هدایت حرارتی مؤثر

حرارتی مؤثر پارچه حلقوی پودی دارد. فرضیات زیر برای ارائه مدل در نظر گرفته شده است: در نظر گرفتن هوا به‌عنوان ماتریس سیال و نادیده گرفتن اثر تابش و جابجایی. شکل ۱۴ سل واحد طراحی شده با استفاده از پارامترهای هندسی واقعی، جهت آنالیز هدایت حرارتی پارچه حلقوی پودی را نشان می‌دهد.

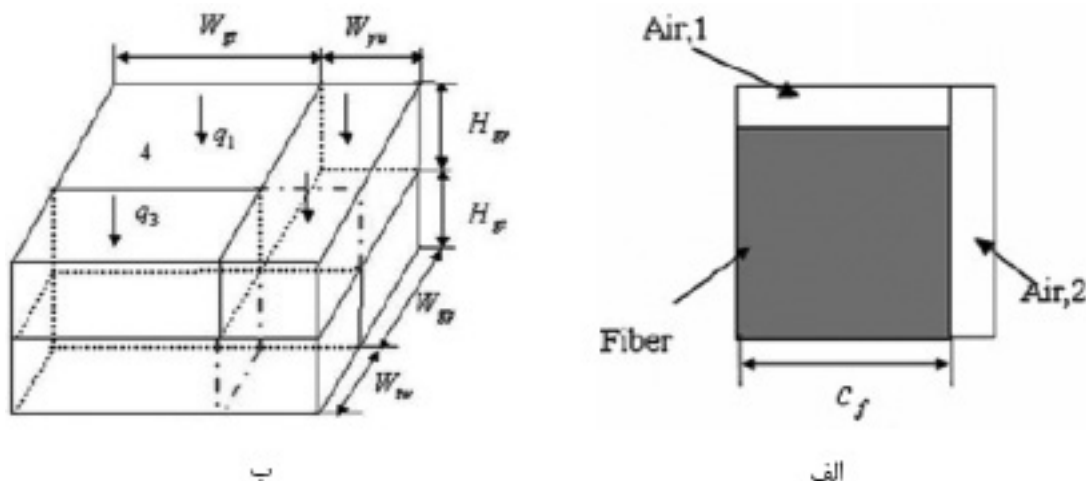
انتقال حرارت و رطوبت به‌صورت هم‌زمان در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفتند [۴۲، ۴۳]. در هر یک از مطالعات فرضیات ساده‌کننده مدل مانند تأثیر رطوبت بر حرارت، وجود یا عدم وجود جذب و چگالش از جمله مواردی است که در شبیه‌سازی مؤثر هستند [۴۳].

فان و همکاران [۴۲] یک مدل دینامیکی برای انتقال حرارت و رطوبت به‌صورت هم‌زمان برای مجموعه متخلخل پارچه که همراه با جذب و چگالش است را با استفاده از شبیه‌سازی عددی به دست آوردند. در این بررسی هدایت حرارتی قسمت‌ها در طول زمان ثابت فرض شده است. شبیه‌سازی با استفاده از روش تفاضل محدود انجام گرفت و انتقال حرارت و رطوبت گذرا تعیین گردید. از آنجا که پارچه یک جسم همگن نیست و نخ‌های تشکیل‌دهنده آن در یک زاویه خاصی در بافت به هم پیوسته‌اند و ناحیه تماس بین نخ‌ها متفاوت است بنابراین، درک و شناخت دقیق انتقال حرارت در طول نخ در پارچه دشوار است. در بررسی انجام شده توسط شن [۴۴] انتقال حرارت در پارچه ناهمگن که در آن انتقال حرارت در امتداد جهت‌های طولی و عرضی نخ به‌طور مستقل انجام می‌شود، محاسبه و روشی را برای برآورد ضرایب انتقال حرارت تماسی برای نخ پیشنهاد دادند. شبیه‌سازی با استفاده از روش المان محدود انجام و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وقتی هدایت حرارتی الیاف در جهت طول و عرض دارای تفاوت زیاد است، گرما به‌طور قابل توجهی در جهت طولی نسبت به عرضی سریع‌تر منتقل می‌شود و توزیع درجه حرارت به‌شدت تحت تأثیر انتقال حرارت در جهت طولی است [۴۴ و ۴۶].

در بررسی تأثیر پارامترهای ساختاری مختلف بر عایق حرارتی در پارچه‌های فایبرگلاس با استفاده از شبیه‌سازی عددی، پارامترهای مؤثر، ساختار بافت، تراکم تار و ظرافت نخ تعیین شد. مدل با تأثیر ترکیبی از هدایت، جابجایی و تشعشع محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش المان محدود نشان می‌دهد که افزایش تراکم تار منجر به کاهش در عملکرد انتقال حرارت شده و با افزایش ظرافت، عایق حرارتی نیز افزایش می‌یابد [۴۵].



شکل ۱۵: مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی با یک‌لایه میانی و ورودی‌های مختلف [۲۲]



شکل ۱۶: مدل ساختاری: الف: سل واحد معادل برای نخ، ب: سل واحد برای پارچه تار پودی [۲۵]

حرارتی، مقاومت حرارتی و تعیین نحوه توزیع حرارت در منسوجات، یکی از گام‌های اساسی در شناخت دقیق منسوجات و تولید منسوجات هوشمند با خواص معین است.

کاربرد هر یک از تکنیک‌های ذکر شده در روش‌های مدل‌سازی، بسته به نوع منسوج، فرضیات قابل قبول در مدل و ... است. زمانی که بررسی میکروسکوپی متغیرهای منسوجات بر خواص حرارتی مد نظر باشد، روش‌های هندسی - حل تحلیلی و هندسی - حل عددی کاربردی تر هستند و در مطالعات ماکروسکوپی که مجموعه یک منسوج یا مجموعه‌های چندلایه مورد بررسی هستند، قوانین اجسام دوفازی و روابط مقاومت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به صورت کلی، روش‌های مدل‌سازی عددی همراه با توسعه سریع تکنیک‌های حل و تجزیه و تحلیل، تکامل یافته و محبوبیت خوبی را به دست آورده‌اند؛ به نحوی که هر یک از روش‌های مدل‌سازی با در نظر گرفتن فرضیات و تقریبات ساده کننده و با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف شبیه‌سازی، نحوه عملکرد منسوجات مختلف در رویارویی با حرارت و نحوه انتقال و توزیع حرارت در آن‌ها را به صورت ساده‌تر و کاربردی‌تر نشان خواهند داد. در این مطالعه سعی بر مرور انواع مطالعات در زمینه مدل‌سازی تعیین خواص حرارتی منسوجات شده است.

انتخاب شدند. مدل هدایت حرارتی مؤثر فرکتال می‌تواند به‌عنوان تابعی از ابعاد منافذ (ابعاد فرکتال) و پارامترهای ساختاری در پارچه تار پودی بیان شود.

مطالعات انجام گرفته در زمینه انتقال حرارت به روش‌های تجربی و آنالیز نتایج حاصل از آن‌ها با روش‌های آماری در بخش اول این مقاله (مروری بر انتقال حرارت در منسوجات، مطالعات تجربی) بیان شده است.

نتیجه‌گیری

مطالعات بسیاری در زمینه تحقیقات در هر دو حوزه انتقال حرارت به روش‌های تجربی و بر اساس روش‌های مدل‌سازی انجام شده است و با توجه به کاربردهای بی‌شماری که منسوجات در انواع صنایع دارند، به نظر می‌رسد که این مطالعات ادامه خواهد یافت. باین‌حال، مطالعات مبتنی بر روش‌های تجربی، با توجه به آزمایشگاهی بودن روش و ساده‌تر بودن، توجه بیشتری را به خود جلب کرده و نقش مهمی را در شناسایی خواص حرارتی منسوجات ایفا می‌کنند؛ اما مدل‌سازی و بیان ریاضی متغیرهای مؤثر بر پدیده انتقال حرارت در منسوجات علاوه بر محاسبه هدایت

مراجع

- Bhattacharjee, D., and Kothari, V. K., Heat transfer through woven textiles. *Int. J. Heat and Mass Trans.*, 52, 2155-2160, 2009.
- سنجل، ی. الف، فجر، الف. ج. مترجمان: عالم رجیبی، ع. الف، نصرآزادانی، ع. یدالله پور، م. انتقال گرما و جرم، ویرایش چهارم. ۱۳۹۳.
- Ismail, M. I., Ammar, A. S. A., and El-Okeily, M., Heat transfer through textile fabrics: mathematical model. *Appl. math. model.*, 12, 434-440, 1988.
- Shen, H., Tu, L., Yan, X. and Sukigara, S., Obtaining the thermal resistance of air enclosed at the interface of multilayer fabrics by simulation. *Tex. Res. J.*, 89, 3178-3188, 2019.
- Das, A., Alagirusamy, R., and Kumar, P., Study of heat transfer through multilayer clothing assemblies: a theoretical prediction, *AUTEX. Res. J.*, 11, 54-60, 2011.
- Ziaei, M., and Ghane, M., Thermal insulation property of spacer fabrics integrated by ceramic powder impregnated

- fabrics. *J. Indus. Tex.*, 43, 20-33, 2013.
7. Schuhmeister, J., *Ber. K. Akad. Wien (Math.-Naturw. Klasse)*, 76, 283, 1877.
 8. Lizák, P., and Mojumdar, S. C., Influence of the material structure on the thermal conductivity of the clothing textiles. *J. Thermal. Anal. Calorimetry.*, 119, 865-869, 2015.
 9. Fricke, H., A mathematical treatment of the electric conductivity and capacity of disperse systems I. The electric conductivity of a suspension of homogeneous spheroids. *Phys. Rev.*, 24, 575, 1924.
 10. Arumugam, V., Mishra, R., Militky, J., and Salacova, J., Investigation on thermo-physiological and compression characteristics of weft-knitted 3D spacer fabrics. *J. Tex. Ins.*, 108, 1095-1105, 2017.
 11. Schuster, J., Heider, D., Sharp, K., and Glowania, M., Measuring and modeling the thermal conductivities of three-dimensionally woven fabric composites. *Mech. Composite. Mat.*, 45, 165, 2009.
 12. Ukponmwan, J.O., The thermal-insulation properties of fabrics. *Tex. Prog.*, 24, 1-57, 1993.
 13. Stark, C. and Fricke, J., Improved heat-transfer models for fibrous insulations. *Int. J. Heat and Mass. Trans.*, 36, 617-625, 1993.
 14. Mao, N., and Russell, S. J., The thermal insulation properties of spacer fabrics with a mechanically integrated wool fiber surface. *Tex. Res. J.*, 77, 914-922, 2007.
 15. Wei, J., Xu, S., Liu, H., Zheng, L., and Qian, Y., Simplified Model for Predicting Fabric Thermal Resistance According to its Microstructural Parameters. *Fibres. Tex. East. Eur.*, 23, 57-60, 2015.
 16. Cimilli, S., Nergis, F. B. U., and Candan, C., Modeling of heat transfer measurement unit for cotton plain knitted fabric using a finite element method. *Tex. Res. J.*, 78, 53-59, 2008.
 17. Barauskas, R., and Abraitene, A., A model for numerical simulation of heat and water vapor exchange in multilayer textile packages with three-dimensional spacer fabric ventilation layer. *Tex. Res. J.*, 81, 1195-1215, 2011.
 18. Siddiqui, M. O. R., and Sun, D., Automated model generation of knitted fabric for thermal conductivity prediction using finite element analysis and its applications in composites. *J. Indus. Tex.*, 45, 1038-1061, 2016.
 19. Ran, X. J., Zhu, Q. Y., and Li, Y., Investigation on heat and mass transfer in 3D woven fibrous material. *Int. J. Heat and Mass. Trans.*, 54, 3575-3586, 2011.
 20. Puszkarz, A. K., and Krucinska, I., The study of knitted fabric thermal insulation using thermography and finite volume method. *Tex. Res. J.*, 87, 643-656, 2017.
 21. Fontana, É., Donca, R., Mancusi, E., Ulson de Souza, A. A., and Guelli Ulson de Souza, S. M., Mathematical modeling and numerical simulation of heat and moisture transfer in a porous textile medium. *J. Tex. Ins.*, 107, 672-682, 2016.
 22. Majumdar, A., Modelling of thermal conductivity of knitted fabrics made of cotton-bamboo yarns using artificial neural network. *J. Tex. Ins.*, 102, 752-762, 2011.
 23. Ghorbani, E., Zarrebini, M., Hasani, H., and Shanbeh, M., Modeling the Moisture and Heat Transfer of Warp Knitted Spacer Fabrics Using Artificial Neural Network Algorithm. *Tex. Light. Indus. Sci. Tech.*, 4, 17-26, 2015.
 24. Fayala, F., Alibi, H., Benltoufa, S., and Jemni, A., Neural Network for Predicting Thermal Conductivity of Knit Materials. *J. Eng. Fabrics and Fibers.*, 3, 53-60, 2008.
 25. Zhu, F., and Li, K., Determining effective thermal conductivity of fabrics by using fractal method. *Int. J. Thermophysics.*, 31, 612-619, 2010.
 26. Shabaridharan, K., and Das, A., Modeling of thermal properties of multilayered fabrics by ANN consisting of polypropylene needle-punched nonwovens. *J. Tex. Ins.*, 105, 109-118, 2014.
 ۲۷. اینکروپرا، ف. پ، پی دویت، د، مترجمان، رستمی، ع. الف، شیرازی، م، مقدمه‌ای بر انتقال گرما، ویرایش چهارم، ۱۳۸۵.
 28. Cengel, Y. A., *Heat transfer a practical approach*. McGraw-Hill. 2003.
 ۲۹. قدیمی، پ، دینامیک سیالات محاسباتی کاربردی - جلد اول (مبنتی بر روش‌های عددی تفاضل محدود، اجزاء محدود و حجم محدود). ۱۳۹۴.
 ۳۰. معدولیت، ر، فرجی، م، روش اجزاء محدود. ۱۳۸۶.
 31. Wang, J., Carson, J.K., North, M.F. and Cleland, D.J., A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials. *Int. J. Heat Mass trans.*, 49, 3075-3083, 2006.
 32. Eucken, A., Allgemeine gesetzmäßigkeiten für das wärmeleitvermögen verschiedener stoffarten und aggregatzustände. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens.*, 11, 6-20, 1940.
 33. Maxwell, J. C., *A Treatise on Electricity and Magnetism*, third ed., Dover Publications Inc., New York, reprinted (Chapter 9), 1954.
 34. Landauer, R., The electrical resistance of binary metallic mixtures. *J. Appl. Phys.*, 23, 779-784. 1952.

35. Bottcher, C. J. F., van Belle, O. C., Bordewijk, P., Rip, A., Theory of electric polarization. Elsevier Science Ltd. 1978.
36. Barauskas, R., Sankauskaite, A., and Abraitene, A., Investigation of the thermal properties of spacer fabrics with bio-ceramic additives using the finite element model and experiment. *Tex. Res. J.*, 88, 293-311, 2018.
37. Matusiak, M., Modelling the thermal resistance of woven fabrics. *J. Tex. Ins.*, 104, 426-437. 2013.
38. Huang, J., Wu, J. and Xu, W., Coupling effects of steady-state heat and water vapor transfer through fabrics. *Tex. Res. J.*, 84, 2157-2165. 2014.
39. Kothari, V. K., & Bhattacharjee, D. Prediction of thermal resistance of woven fabrics. Part I: Mathematical model. *J. Tex. Ins.*, 99, 421-432, 2008.
40. Zhu, G., Kremenakova, D., Wang, Y., Militky, J., and Mazari, F. B., An analysis of effective thermal conductivity of heterogeneous materials. *AUTEX. Res. J.*, 14, 14-21, 2014.
41. Sun, Z. and Pan, N., Thermal conduction and moisture diffusion in fibrous materials, in *Thermal and moisture transport in fibrous materials*, Pan, N. and P.Gibson, Editors. Woodhead Publishing Ltd: North America, 439-466, 2006.
42. Fan, J., Luo, Z., and Li, Y., Heat and moisture transfer with sorption and condensation in porous clothing assemblies and numerical simulation. *Int. J. Heat and Mass. Trans.*, 43, 2989-3000, 2000.
43. Zhang, Q., and Sun, W., A numerical study of air-vapor-heat transport through textile materials with a moving interface. *J. Comput. Appl. Math.*, 236, 819-833, 2011.
44. Shen, H., Yokoyama, A., and Sukigara, S., Modeling of heterogeneous heat transfer in fabrics. *Tex. Res. J.*, 88, 1164-1172, 2018.
45. Zheng, Z., Wang, H., Zhao, X., and Zhang, N., Simulation of the effects of structural parameters of glass fiber fabric on the thermal insulation property. *Tex. Res. J.*, 88, 1954-1964, 2018.
46. Siddiqui, M. O. R., and Sun, D., Thermal analysis of conventional and performance plain woven fabrics by finite element method. *J. Indu. Tex.*, 48, 685-712, 2018.
47. Siddiqui, M. O. R., Sun, D., and Butler, I. B., Geometrical modelling and thermal analysis of nonwoven fabrics. *J. Indu. Tex.*, 48, 405-431, 2018.