

کاربرد روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی ضدآب کردن پارچه‌های پلی استری و پنبه‌ای

The application of the response surface methodology for water repellency finishing of polyester and cotton fabric

نساء احمدیار^{۱*}، احمد کاظمیان^{۲*}، مهدی ایرانپور^{۳*}

۱- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، کدپستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

۲- رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه نساجی، کدپستی ۴۱۹۹۶۱۳۷۶۹

۳- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی، کدپستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

چکیده

هدف از این پژوهش، یافتن سطوح بهینه پارامترها در فرآیند ضد آب کردن پارچه‌های پلی استر و پنبه‌ای است. بررسی مطالعات پیشین نشان داد که تاکنون از روش‌های طراحی آزمایشات در مسئله ضد آب کردن پارچه استفاده نشده است. در این پژوهش از روش سطح پاسخ استفاده می‌شود، زیرا در مقایسه با طرح‌های عاملی از کارایی بیشتری برخوردار است. عوامل تحت کنترل در این آزمایش عبارتند از دما و زمان. همچنین اهداف عبارتند از میزان ضد آب بودن، میزان نفوذپذیری هوا، استحکام و ثبات شستشویی. نمونه‌ها به محلول ماده فلئوروکربنی روکوگواردایر آغشته شد و فرآیند تکمیل در دما و زمان‌های مختلف انجام گردید. نتایج تحلیل واریانس حاکی از معنی دار بودن اثر هر دو عامل بر تمام اهداف آزمایش بود. وجود اثر متقابل عوامل در برخی موارد منجر به دستیابی به سطوح پاسخ غیر خطی شد. در این پژوهش از قابلیت بهینه‌سازی چندهدفه سطوح پاسخ در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استفاده گردید. با وزن‌دهی دلخواه به اهداف در این نرم‌افزار می‌توان سطوح بهینه عوامل را بدست آورد. استفاده موفقیت‌آمیز روش سطح پاسخ می‌تواند انگیزه‌ای برای بکارگیری این روش در سایر فرآیندها مانند رنگرزی و رنگ‌همانندی باشد.

مقدمه

با گذشت سال‌ها و با شکل‌گیری صنعت نساجی و با توجه به پیشرفتی که در زمینه‌های مختلف داشته است، تکمیل‌های گوناگونی بر روی منسوجات صورت گرفته است. این تکمیل‌ها در واقع کالا را برای مصارف صنعتی و خانگی مطلوب می‌کند. قدیمی‌ترین این تکمیل‌ها، تکمیل ضدآب است. ضدآب کردن منسوج، به دو روش پوشش‌دهی انجام می‌گیرد. در روش اول، کل سطح پارچه توسط مواد آبگریز پوشانده می‌شود. بنابراین تمام منافذ پارچه مسدود می‌گردد و از مطلوبیت منسوج در

کلمات کلیدی

فلئوروکربن،
تکمیل ضد آب،
روش سطح پاسخ،
پنبه،
پلی استر

زمینه‌های انتقال گرما و تعریق بدن می‌کاهد. تمایل انسان از نظر روانی داشتن پوستی خشک و عاری از رطوبت است، هر چند که این امر از لحاظ تکنیکی نیز حائز اهمیت است [۱].

تعرق فراوان و باقی ماندن آن بر روی پوست، یکی از دلایلی است که منجر به اختلال در کار مأمورین زبده در حین عملیات واقعی، مرگ مأمورین آتش‌نشانی در زمان انجام عملیات و یا حتی سکت قلبی در شدیدترین حالت و به سبب هیجان مضاعف شود [۲]. بنابراین باید تکمیل ضدآبی را مدنظر قرار داد که در

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: iranpour@cc.iut.ac.ir

شالو و همکاران نیز در سال ۲۰۱۸ در پژوهش خود به این موضوع پرداخته‌اند که ترکیبات شیمیایی و ماهیت تکمیل نساجی، نقش مهمی را در خواص، عملکرد و کاربرد آن منسوج دارد [۱۷].

در این پژوهش، هدف انجام تکمیل ضدآبی است که ثابت شستشویی قابل قبولی داشته و در عین حال میزان نفوذپذیری هوا و استحکام تا حد پارگی آن نیز رضایت‌بخش باشد. بنابراین هدف بهینه‌سازی همزمان مشخصه‌های مورد نظر می‌باشد. این قابلیت با معرفی نرم‌افزار دیزاین اسپرت که در ادامه مقاله آورده شده است، به میزان قابل قبولی بدست می‌آید. روش سطح پاسخ، روشی جذاب برای پژوهشگران می‌باشد، چرا که با انجام آزمایش کمتر نسبت به سایر روش‌های فاکتوریلی، جواب‌های کامل‌تری ارائه می‌دهد و حتی برای سایر نقاطی که در آن‌ها آزمایش انجام نمی‌شود نیز، پیش‌بینی خوبی ارائه می‌دهد. ژیهانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای بهینه‌سازی کربن فعال سنتز شده توسط کوپیرولیسین از پارچه‌های زائد پلی‌استری [۱۸]، علی‌پناه‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند، در اندازه‌گیری رنگ‌های خطرناک موجود در فاضلاب صنایع [۱۹]، سیمسک و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای تجزیه و تحلیل اثرات دی‌اکتیل ترفتالات بدست آمده از پلی‌اتیلن ترفتالات فاضلاب‌ها بر روی ترکیب بتنی [۲۰]، نومن و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای توسعه موضعی نانو کامپوزیت‌های چند منظوره بسیار فتوکاتالیزتی [۲۱] و شریف‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای بررسی ایزوترم و سینتیک جذب یون‌های مورد نظر از نمونه‌های آبی [۲۲] نیز، از روش سطح پاسخ در پژوهش‌های خود استفاده کرده‌اند.

با توجه به قیمت فلئوروکربن، دسترسی سخت به آن، همچنین اهمیت میزان نفوذپذیری هوا برای کالای تکمیل شده با توجه به نوع مصرفی آن در سازمان‌های نظامی، ارتش، آتشنشانی و ... در این پژوهش از روش سطح پاسخ برای تعیین مقادیر بهینه فاکتورها، استفاده شده است. زیرا در این روش جهت حصول حداکثر بازده و حداکثر ضریب اطمینان صحت آزمون، آزمایش‌های کمتر و در نتیجه زمان کمتری نیاز است و از طرف دیگر می‌توان به طور همزمان به میزان مطلوبی از مشخصه‌ها دست یافت. مطالعات بسیاری پیرامون تکمیل ضدآب قوی و یا استفاده از مواد مختلف برای این نوع تکمیل انجام شده است. اما کمتر به این موضوع توجه شده که این تکمیل قوی که در تعرق اختلال ایجاد می‌کند، برای بسیاری از مصارف، مطلوب نمی‌باشد. در این پژوهش ابتدا پارامترهای موثر در تکمیل، تعیین شد و سپس طبق طراحی آزمایشی که توسط نرم‌افزار دیزاین اسپرت انجام گرفت، ۱۳ آزمایش برای یافتن نواحی پاسخ بهینه طراحی گردید. این آزمایش‌ها برای کالای پنبه‌ای و پلی‌استر به طور جداگانه انجام گرفت. بعد از انجام آزمایش‌ها در شرایط پیشنهادی نرم‌افزار، نمونه‌ها تحت آزمون 3M (این آزمون در بخش بعدی شرح داده خواهد شد)، آزمون ثابت شستشویی، آزمون اندازه‌گیری استحکام و آزمون اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری هوا قرار گرفتند. نتایج بدست آمده به نرم‌افزار داده شد و سپس بهینه‌سازی مطلوب انجام گرفت. جداول، نمودارها و تحلیل‌های مربوط به هر کدام از کالاهای پنبه‌ای و پلی‌استر به طور جداگانه آورده شد، پس از بررسی شرایط بهینه برای هر کدام از مشخصه‌ها و برای هر کدام از دو کالا به طور جداگانه، شرایط بهینه‌سازی

عمل تعریق اختلال ایجاد نکند. در روش دوم، ابتدا لیاف و یا نخ را از مواد ضدآب می‌پوشانند و سپس منسوج را از این لیاف تهیه می‌کنند. بدیهی است که در این روش، معایب روش اول مشاهده نمی‌شود [۳].

همزمان با تکمیل ضدآب می‌توان برخی از خواص پارچه همچون بهتر و مقاوم شدن در برابر فشار، خشک شدن سریع‌تر و اتو کردن راحت‌تر و افزایش مقاومت در برابر مواد اسیدی، بازی و مواد شیمیایی دیگر را نیز بهبود داد [۴].

برای انجام تکمیل ضدآب باید از موادی استفاده کرد که قادر به کاهش انرژی سطحی کالا، آن هم کمتر از انرژی سطحی بحرانی آب باشد [۵،۶]. استفاده از مواد سیلیکونی برای انجام تکمیل ضدآب، برای منسوج زبردست نرم‌تری را ایجاد می‌کند در صورتی که برای دست یافتن به خاصیت ضدآب بیشتر به منسوج باید از مواد ضدآب بر پایه فلئوروکربن استفاده کرد. این مواد ثابت شستشویی بالاتری را نیز به کالا می‌دهند [۷]. از میان موادی که برای تکمیل ضدآب استفاده می‌شوند، مواد بر پایه فلئوروکربن، سطوحی با کمترین انرژی را نسبت به سایر تکمیل‌های دفع‌کننده ایجاد می‌کنند. به گونه‌ای که می‌توان همزمان به خاصیت دفع آب و دفع روغن برای منسوج دست یافت [۸،۹].

از مزایای کلی تکمیل‌های دفع‌کننده فلئوروکربن می‌توان به خشک شدن بسیار سریع پارچه عمل شده و نیاز کم به ماده افزودنی فعال اشاره کرد. در توسعه مواد فلئوروکربنی جدید، از طبیعت الهام گرفته‌اند و به همین دلیل است که به تکمیل‌هایی که با استفاده از این مواد انجام می‌شوند، تکمیل‌های زیست‌فرآیند می‌گویند [۸،۱۰].

پارچه‌های میکروالیاف تکمیل شده با پلیمر فلئوروکربن یک گروه مهم از منسوجات دفع‌کننده آب می‌باشد. پارچه‌های بالستیک (نظامی)، متشکل از چند لایه منسوج پارامیدی، با استفاده از مواد فلئوروکربن تکمیل شده‌اند که به دلیل محافظت در برابر گلوله، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند و چنانچه که تکمیل دفع آب روی آن‌ها صورت نگرفته باشد، با مرطوب شدن خاصیت حفاظتی خود را از دست می‌دهند [۱۱،۱۲].

تست ساده و سریعی که برای دفع آب استفاده می‌شود، آزمون قطره آب و آزمون اسپری می‌باشد. چنانچه تمایزی هر چند نامحسوس میان شاهد و نمونه مورد آزمایش مشاهده شود، باید مقاومت آب از طریق آزمون فشار هیدرواستاتیکی بررسی گردد. [۱۳].

از آنجایی که تکمیل کالای نساجی به خصوص تکمیل ضدآب بسیار حائز اهمیت است، این موضوع در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته و پژوهش‌های بسیاری پیرامون آن انجام شده است. نینا و همکاران در سال ۲۰۱۷، ایجاد پوشش لایه‌ای آبگریز را با استفاده از پلی‌لیسین و همچنین ذرات واکس طبیعی بررسی کردند [۱۳].

گاو و همکاران در سال ۲۰۱۷، موفق به ایجاد خاصیت ابرآبگریزی از طریق پیوند سیلان بدون فلئورین و دوستدار محیط‌زیست شدند [۱۴]. زاهد و همکاران در سال ۲۰۱۷، عملیات تکمیل ضدآب قوی را با استفاده از پلیمرهای دوستدار محیط زیست برای پارچه‌های پنبه‌ای بافته شده ارائه کردند [۱۵]. کومار در سال ۲۰۱۷ در مقاله خود عنوان کرد که با استفاده از فناوری نانو، سطح پارچه می‌تواند به گونه‌ای اصلاح شود تا خاصیت ضدآب، ضدروغن و ضدخاک را به طور ذاتی داشته باشد [۱۶].

همزمان مشخصه‌ها نیز تعیین گردید.

جدول ۱- آزمون 3M

| درجه آبگریزی | ترکیب مایعات تست دافع آب بر حسب درصد |
|--------------|--------------------------------------|
| W | آب ۱۰۰ |
| ۱ | الکل ۱۰ آب ۹۰ |
| ۲ | الکل ۲۰ آب ۸۰ |
| ۳ | الکل ۳۰ آب ۷۰ |
| ۴ | الکل ۴۰ آب ۶۰ |
| ۵ | الکل ۵۰ آب ۵۰ |
| ۶ | الکل ۶۰ آب ۴۰ |
| ۷ | الکل ۷۰ آب ۳۰ |
| ۸ | الکل ۸۰ آب ۲۰ |
| ۹ | الکل ۹۰ آب ۱۰ |
| ۱۰ | الکل ۱۰۰ |

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل، پارچه صد در صد پلی‌استر به وزن ۱۷۲ (g/m²) با تراکم تار ۴۵ و تراکم پود ۲۶ با بافت ساده و نمره نخ تار و پود den20، پارچه صد در صد پنبه‌ای بافت ساده، به وزن ۱۶۴ (g/m²) با تراکم تار ۲۹ و تراکم پود ۲۴ و بافت ساده و نمره نخ تار و پود den20 خام که هیچگونه عملیات تکمیل دیگری بر روی آنها صورت نگرفته است، ماده ضدآب فلئوروکربنی روکو گوارد ایر (RUCO-GUARD AIR) رودولف آلمان با وزن مخصوص ۳ g/cm³ /۹۸ در دمای ۲۰°C، آب نرم، ایزوپروپانول ساخت شرکت مرک آلمان، دترجنت غیر یونی، کربنات سدیم ساخت شرکت مرک آلمان، پودر ماشین لباسشویی خانگی مدل پاک شوما می‌باشد.

مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده

ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ مدل: EB-3305 Libror، ترازوی الکترونیکی با دقت ۰/۰۰۰۱ و مدل: AEU-210 Libror، دستگاه پد مدل CH-8156 ساخت سوئیس/ Mathis، استنتر مدل CH-8155 ساخت سوئیس/ Mathis، دستگاه اندازه‌گیری نفوذ هوا مدل SDL MO 215 ساخت کشور انگلیس، دستگاه استحکام‌سنج آزمایشگاهی (نرخ ازدیاد طول ثابت) مدل Zwick universal ساخت آلمان می‌باشد.

در ابتدا باید شستشوی پارچه‌ها به منظور رفع آلودگی‌های احتمالی پارچه و مواد افزودنی و مواد به کار رفته برای تکمیل پارچه صورت گیرد. برای شستشو پارچه‌ها در دمای ۶۴°C و به مدت نیم ساعت شستشو و در دمای ۴۰°C آبکشی گرم و پس از آن در دمای ۲۰°C آبکشی سرد انجام شد. سپس پارچه در دمای محیط، خشک گردید و برای انجام عملیات تکمیل آماده‌سازی شد. در این آزمایش نمونه‌ها به روش پد-خشک-پخت آب‌گریز می‌شوند و برای هر نوع پارچه (پنبه و پلی‌استر) و در هر دمای تثبیت نمونه‌ها آماده می‌شود. همانطور که گفته شد برای آبگریز کردن نمونه‌ها در این پژوهش، از ماده فلئوروکربنی روکو گوارد ایر استفاده شده که با استفاده از ۴۰ g/l و PH ۵-۴/۵: محلول تکمیلی آماده شده است. نمونه‌ها به محلول مورد نظر آغشته شده و با برداشت متوسط ۷۰ درصد، پد می‌شوند. بعد از پد، نمونه‌های پارچه جهت خشک کردن و تثبیت در دماهای مورد نظر قرار گرفته تا جهت انجام آزمون‌ها آماده شده باشند.

آزمون‌های پس از تکمیل با ماده فلئوروکربنی

آزمون 3M

در این آزمون، قطرات مایع نسبت‌های خاصی از آب و الکل (ایزوپروپانال) را شامل می‌شوند. این قطرات روی سطح نمونه‌ها قرار گرفته و رفتار خیس‌کنندگی آن‌ها مشاهده می‌گردد. اگر نمونه، مایع را پس از ۱۰S جذب نکند، دافعیت مناسب برای گذراندن آزمون S را کسب کرده است. سری مایعات آزمون مطابق جدول ۱ می‌باشد:

نرم و افقی قرار می‌گیرند. سپس آزمون با کمترین شماره از مایعات آزمون آغاز می‌شود. با استفاده از یک قطره‌چکان از یک ارتفاع ثابت (۲-۳ cm بالای نمونه) با دقت، سه قطره کوچک روی قسمت‌های مختلف سطح نمونه قرار داده می‌شود. اگر پس از ۱۰S، نفوذ اتفاق نیفتاد و پارچه خیس نشد و دو قطره از سه قطره به صورت کره‌ای یا نیمه کره‌ای مشاهده شدند، یعنی نمونه آزمون را گذرانیده است. آزمون با شماره‌های بالاتر از مایعات آزمون، تا زمانی که یکی از مایعات آزمون باعث خیس شوندگی شود، ادامه پیدا می‌کند. درجه بندی دافعیت آب برای آزمون 3M که به نمونه نسبت داده می‌شود، با بالاترین شماره از مایعات آزمون که در طی ۱۰S پایدار باقی می‌مانند، انتخاب می‌شود [۲۳].

آزمون ثبات شستشویی

در فرآیند تکمیل از مهمترین عوامل، بررسی ثبات شستشویی تکمیل انجام شده بر روی کالا است که برای کاربرد نهایی می‌باشد. نمونه‌های عمل شده برای مدت ۶۰ min در دمای ۶۰°C با استفاده از دترجنت ۱ g/l و به نسبت مایع به کالا ۱:۳۰ شستشو داده و سپس آبکشی گرم (۴۰°C) و آبکشی سرد (۲۰°C) صورت می‌گیرد. پس از آن نمونه‌ها در دمای محیط قرار می‌گیرند تا خشک شوند. این عمل را برای ۳ بار شستشو انجام داده و بعد از شستشو، از نمونه‌ها آزمون 3M گرفته می‌شود.

آزمون اندازه‌گیری استحکام

هدف این آزمایش، اندازه‌گیری استحکام و ازدیاد طول تا حد پارگی پارچه با استفاده از روش نرخ ثابت ازدیاد طول (۴۰ mm/min) است که توسط دستگاه استحکام‌سنج زوئیک انجام می‌شود. این آزمون مطابق استاندارد روش استریپ ASTM D 5035-90 می‌باشد که جهت اندازه‌گیری پارامترهایی از جمله: استحکام، ازدیاد طول در نقطه پارگی، درصد ازدیاد طول و کار تا حد پارگی به کار می‌رود. در این پروژه، نمونه‌ها در جهت

جدول ۲- آزمایش‌های پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار و نتایج بدست آمده برای کالای پنبه‌ای

| شماره آزمایش | متغیرهای آزمایش | | شاخص‌های کیفیت پارچه | | | |
|--------------|-----------------|-------------------|----------------------|------|------|------------------|
| | دما (°C) (A) | زمان (min) (B) | نفوذپذیری (mm/s) | ضدآب | ثبات | استحکام (kgF) |
| ۱ | ۱۱۵ | ۳/۵ | ۲۸۰/۴ | ۹ | ۵ | ۲۱/۸ |
| ۲ | ۱۴۰ | ۵ | ۲۷۸/۵ | ۱۰ | ۶ | ۱۹/۷ |
| ۳ | ۱۱۵ | ۳/۵ | ۲۸۵/۶ | ۹ | ۵ | ۲۲/۱ |
| ۴ | ۱۱۵ | ۳/۵ | ۲۸۲/۳ | ۹ | ۵ | ۲۲/۵ |
| ۵ | ۱۱۵ | ۳/۵ | ۲۸۱/۷ | ۱۰ | ۶ | ۲۰/۳ |
| ۶ | ۱۴۰ | ۳/۵ | ۲۷۳/۹ | ۹ | ۵ | ۲۱/۲ |
| ۷ | ۹۰ | ۳/۵ | ۲۹۱/۱ | ۸ | ۱ | ۲۳/۴ |
| ۸ | ۱۱۵ | ۳/۵ | ۲۷۹ | ۹ | ۵ | ۲۲/۵ |
| ۹ | ۱۴۰ | ۲ | ۲۷۸/۲ | ۱۰ | ۵ | ۱۸/۹ |
| ۱۰ | ۱۱۵ | ۵ | ۲۷۹/۶ | ۱۰ | ۵ | ۲۱/۵ |
| ۱۱ | ۹۰ | ۲ | ۲۹۰/۴ | ۸ | ۱ | ۲۴ |
| ۱۲ | ۱۱۵ | ۲ | ۲۸۴/۸ | ۹ | ۴ | ۲۳/۱ |
| ۱۳ | ۹۰ | ۵ | ۲۸۶/۱ | ۹ | ۱ | ۲۳/۶ |

می‌توان به کاهش تعداد آزمایشات لازم جهت ارزیابی پارامترهای متعدد و برهمکنش بین آن پارامترها اشاره کرد و چنانچه پاسخ، تحت تاثیر چند پارامتر باشد، استفاده از این روش مناسب است [۲۶-۲۸]. از دیگر مزیت‌های این روش می‌توان قابلیت انجام آنالیز واریانس، جهت تعیین فرمول نهایی حذف و تعیین شرایط بهینه را نام برد [۲۹]. روش‌های سطح پاسخ به زیرشاخه‌هایی تقسیم می‌شوند که روش باکس بنکن و مرکب مرکزی در این بین بیشترین کاربرد را دارند [۳۰]. گرچه برای دو متغیر، بازدهی و بهره‌وری طرح سه فاکتوریل با طرح‌هایی مثل طرح مرکب مرکزی قابل قیاس است، اما با در نظر گرفتن معایبی که استفاده از فلتوروکربن به دنبال دارد و با توجه اهمیت تعداد آزمایشات، انتخاب ما طرح مرکب مرکزی بود.

در سال‌های اخیر استفاده از روش سطح پاسخ در زمینه نساجی بخصوص برای حذف رنگ‌ها از پساب قابل توجه بوده است. به عنوان مثال مقبول و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز به منظور حذف همزمان چند رنگ‌زا از این روش استفاده کردند [۳۱]. اما کمتر به این موضوع توجه شده است که شاید بتوان از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی سایر سطوح در نساجی نیز بهره برد. در تکمیل ضدآب کالای پارچه‌ای در آزمایشگاه، مسئول آزمایش هر بار می‌بایست یکی از عوامل تأثیرگذار بر مشخصه مورد نظر را به عنوان پارامتر مستقل در نظر بگیرد، تأثیر آن را بر روی پارامتر وابسته ارزیابی کند و در نهایت مقدار بهینه آن را تعیین کند. با انجام این آزمایش‌ها در واقع از اثرات متقابل پارامترها صرف نظر می‌شود. حال آنکه در دنیای واقعی نمی‌توان از این تأثیر چشم‌پوشی کرد. علاوه بر آن چنانچه در یک آزمایش بهینه‌سازی همزمان چند مشخصه مدنظر باشد، انجام آزمایش‌ها به صورت تجربی، بسیار زمان بر

تاری مورد آزمایش قرار گرفتند. عرض و طول نوار پارچه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته برای این آزمون، به ترتیب ۲/۵ و ۲۲ cm است. استحکام تا حد پارگی برای کالای پنبه‌ای ۱۹ kgF و برای کالای پلی‌استر ۴۳ kgF بدست آمد [۲۴].

آزمون اندازه‌گیری نفوذپذیری هوا

میزان نفوذپذیری هوا به داخل نمونه‌ها با دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری هوا اندازه گرفته می‌شود. بر اساس استاندارد BS9237-1995، واحد نفوذ هوا برحسب (mm/s) می‌باشد که در مواردی که این عدد بزرگ باشد، برحسب (m/s) بیان خواهد شد. درجه نفوذپذیری هوا که با حرف R نمایش داده می‌شود، توسط رابطه ۱ قابل حصول است. A در این رابطه نشان‌دهنده سطح مقطع پارچه می‌باشد. در این تست ۱۰ قسمت مختلف پارچه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین آن‌ها اعلام شد [۲۵].

(۱)

$$R(\text{mm/s}) = (\text{lit/min}) / (A(\text{cm}^2)) * 167$$

طرح آزمایش RSM

طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل آماری

یکی از پرکاربردترین مدل‌های آماری مورد استفاده در طراحی آزمایشات، روش سطح پاسخ است که روشی کم‌هزینه، موثر و کارآمد برای بهینه‌کردن فرآیندهای مختلف می‌باشد. روش‌شناسی سطح پاسخ توسط باکس و همکاران وی در دهه پنجاه توسعه پیدا کرده است. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری می‌باشد که برای بهینه‌سازی بسیاری از فرآیندهای مختلف به کار رفته و از مزیت اصلی این روش

خواهد بود. چه بسا که با توجه به هزینه مواد به کار رفته در آزمایش، این امر مقرون به صرفه هم نمی‌باشد. ما در این پژوهش سعی کردیم تا با استفاده از متدولوژی سطح پاسخ، مقادیر بهینه متغیرهای موثر در تکمیل ضدآب را تعیین کنیم و همزمان به یک کالای ضدآب با ثبات شستشویی بالا و استحکام و نفوذپذیری هوای مطلوب برسیم. هر چند که هدف اصلی استفاده از روش سطح پاسخ، ایجاد یک رابطه بین پارامترهای مستقل و وابسته است، اما نمی‌توان این موضوع را نادیده گرفت که روش سطح پاسخ باعث می‌شود تا تعداد آزمایش‌ها به طور چشم‌گیری کاهش پیدا کند. بنابراین طبق طرح‌ریزی که بر اساس مدل سطح پاسخ انجام شد، این تعداد به ۱۳ آزمایش کاهش یافت که با توجه به گران بودن و در دسترس نبودن ماده فلئوروکربنی استفاده از این روش از لحاظ صرفه اقتصادی و همچنین کاهش زمان انجام آزمایش‌ها بسیار درخور توجه است.

طراحی آزمایش برای کالای پنبه‌ای توسط نرم‌افزار
پس از انجام آزمایش در شرایط طراحی شده توسط نرم‌افزار، آزمون‌های مورد نظر بر روی کالای پنبه‌ای انجام گرفت. نتایج حاصل در جدول ۲ آورده شده است؛

همچنین نرم‌افزار قادر به تشخیص روابط ما بین هر کدام از پارامترها و مشخصه‌ها به طور جداگانه است. این روابط به شرح زیر است:
معادله پیشنهاد شده برای تعیین تاثیر متغیرهای دما و زمان بر میزان نفوذپذیری کالای پنبه‌ای از نوع خطی می‌باشد:

$$+314,37521 - 0,24667 * \text{temp} - 1,02222 * \text{time} \quad (2)$$

این در حالی است که رابطه بدست آمده میان متغیرهای دما و زمان با میزان دفع آب کالای پنبه‌ای از نوع درجه دوم و به فرم زیر می‌باشد:

$$+1,2513 + 0,101 * \text{temp} - 0,19119 * \text{time} - 6,6666E-003 * \text{temp} * \text{time} - 1,93103E-004 * \text{temp}^2 + 0,16858 * \text{time}^2 \quad (3)$$

رابطه میان متغیرها و ثبات شستشویی برای کالای پنبه‌ای، با توجه به آنچه که نمودار برآورد کرده، از نوع درجه دوم می‌باشد؛

$$-35,1136 + 0,5775 * \text{temp} + 0,6356 * \text{time} + 6,6666E-003 * \text{temp} * \text{time} - 2,2069E-003 * \text{temp}^2 - 0,16858 * \text{time}^2 \quad (4)$$

بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل اثر متغیرها بر روی مشخصه‌های مورد بحث در مورد کالای پنبه‌ای و پلی‌استر

نرم‌افزار دیزاین اکسپرت آزمایش‌ها را طراحی می‌کند و براساس جدول تحلیلی واریانس ANOVA نمودار تاثیر عامل، پاسخ سطح و برهم‌کنش بین عامل‌ها را مشخص و رسم می‌کند. متغیرها در این پژوهش، دما (۹۰-۱۴۰°C) و زمان (۵-۲ min) در نظر گرفته شده است.

در واقع بازه‌های دما و زمان با توجه به مقاومت حرارتی دو کالای پنبه

جدول ۳- آزمایش‌های پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار برای کالای پلی‌استر و نتایج آن

| شماره آزمایش | متغیرهای آزمایش | | شاخص‌های کیفیت پارچه | | | |
|--------------|-----------------|-------------------|----------------------|------|------|------------------|
| | دما (°C) (A) | زمان (min) (B) | نفوذپذیری (mm/s) | ضدآب | ثبات | استحکام (kgF) |
| ۱ | ۱۱۵ | ۳/۵ | ۱۷/۲ | ۱۰ | ۵ | ۴۳/۳ |
| ۲ | ۱۴۰ | ۵ | ۱۵/۵ | ۱۰ | ۷ | ۴۱/۹ |
| ۳ | ۱۱۵ | ۳/۵ | ۱۸/۱ | ۱۰ | ۵ | ۴۴/۱ |
| ۴ | ۱۱۵ | ۳/۵ | ۱۷/۴ | ۱۰ | ۵ | ۴۲/۸ |
| ۵ | ۱۱۵ | ۳/۵ | ۱۶/۹ | ۱۰ | ۵ | ۴۵/۵ |
| ۶ | ۱۴۰ | ۳/۵ | ۱۴/۹ | ۱۰ | ۷ | ۴۳/۱ |
| ۷ | ۹۰ | ۳/۵ | ۱۹/۳ | ۹ | ۱ | ۴۵/۸ |
| ۸ | ۱۱۵ | ۳/۵ | ۱۷/۵ | ۱۰ | ۵ | ۴۳/۵ |
| ۹ | ۱۴۰ | ۲ | ۱۶/۱ | ۱۰ | ۷ | ۴۲/۲ |
| ۱۰ | ۱۱۵ | ۵ | ۱۷/۸ | ۱۰ | ۶ | ۴۳/۷ |
| ۱۱ | ۹۰ | ۲ | ۱۸/۸ | ۸ | ۱ | ۴۶/۶ |
| ۱۲ | ۱۱۵ | ۲ | ۱۹/۲ | ۹ | ۴ | ۴۴/۳ |
| ۱۳ | ۹۰ | ۵ | ۱۶/۷ | ۱۰ | ۲ | ۴۷/۱ |

جدول ۴- مقادیر F-value و p-value برای کالای پنبه‌ای

| شاخص‌های کیفیت پارچه | | |
|----------------------|----------------|----------------------|
| F-value | P-value | |
| ۲۱,۶۰ | ۰/۰۰۰۲ | نفوذپذیری هوا (mm/s) |
| ۳۶,۵۹ | کمتر از ۰,۰۰۰۱ | ضد آب |
| ۲۷۶,۸۵ | کمتر از ۰,۰۰۰۱ | ثبات شستشویی |
| ۲۹,۵۶ | کمتر از ۰,۰۰۰۱ | استحکام (kgF) |

۴- آنالیز واریانس

آنالیز واریانس مدل مربوط به کالای پنبه‌ای

داده‌های ANOVA دقت هر یک از مدل‌های پیشنهادی را تایید می‌کند. پارامتر F معیاری از انحراف داده‌ها از مقدار میانگین می‌باشد و به طور کلی برای مدلی که نتیجه‌های آزمایش را به درستی پیش‌بینی می‌کند، مقدار کم و مقدار F زیاد می‌باشد. که در مدل‌های پیشنهادی نرم‌افزار، مقدار کمتر از ۰,۰۵، برای p، معنی‌دار بودن مدل را تضمین می‌کند. مثلاً در مورد نفوذپذیری کالای پنبه‌ای می‌توان گفت که نتایج بدست آمده از مدل، ۰,۰۲ درصد ممکن است که شانسی رخ داده باشد و چون این شرط برای هر کدام از مشخصه‌ها برقرار است، در نتیجه می‌توان اطمینان داشت که مدل ارائه شده توسط نمودار، معنی‌دار می‌باشد. در جدول ۴، مقادیر F-value و p-value برای کالای پنبه‌ای در رابطه با هر کدام از مشخصه‌ها آورده شده است. داده‌های آماری همچون ضریب تغییرات، انحراف معیار، میانگین، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده نیز در جدول ۵ و برای هر یک از مشخصه‌ها عنوان شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر بالای ضریب تعیین، نشان دهنده این است که متغیرهای دما و زمان به خوبی می‌توانند تغییرات موجود در مشخصه‌ها را توضیح دهند.

نمودار شکل ۱، نشان دهنده عدم وجود برهمکنش میان متغیرهای دما و زمان در میزان نفوذپذیری هوا برای کالای پنبه‌ای می‌باشد. بیشترین میزان نفوذپذیری در کالای پنبه‌ای، در دمای ۹۰°C و مدت زمان min ۳/۵ مشاهده می‌شود. علت این موضوع تثبیت کمتری است که برای کالا در دماهای پایین‌تر اتفاق می‌افتد، در نتیجه پوشش ضعیف‌تری روی کالا صورت می‌گیرد و باعث می‌شود که منافذ پارچه، هوای بیشتری را از خود عبور دهند. در این نمودار، متغیرهای دما و زمان روی محورهای

در آخر نیز رابطه بین متغیرهای دما و زمان با مشخصه استحکام، که به صورت خطی بدست آمد، به فرم زیر می‌باشد؛

$$+31,63564 - 0,080667 * temp - 0,13333 * time \quad (5)$$

طراحی آزمایش برای کالای پلی‌استر توسط نرم‌افزار

همانند کالای پنبه‌ای، آزمایش‌های پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار، برای کالای پلی‌استر نیز به طور جداگانه انجام شد. نمونه‌های تکمیل شده پلی‌استری تحت آزمون‌های عنوان شده قرار گرفته و نتایج مربوط به این آزمون‌ها در جدول ۳ آورده شد. روابط میان دو متغیر با هر کدام از مشخصه‌ها برای کالای پلی‌استر نیز توسط نرم‌افزار بدست آمد. روابط عنوان شده به قرار زیر است؛

نفوذپذیری کالای پلی‌استر، با دما رابطه‌ای معکوس دارد، در صورتی که رابطه آن با زمان به صورت مستقیم می‌باشد. این رابطه خطی را می‌توان به حالت زیر نوشت:

$$+25,26846 - 0,072000 * temp + 0,100000 * time \quad (6)$$

رابطه میان متغیرهای زمان و دما با مشخصه ضدآب بودن کالای پلی‌استر، از نوع درجه دوم می‌باشد؛

$$-5,78276 + 0,1618 * temp + 2,67126 * time - 0,01333 * temp * time - 4,13793E-004 * temp^2 - 0,11494 * time^2 \quad (7)$$

ثبات شستشویی کالای پلی‌استر نیز با متغیرهای دما و زمان، رابطه‌ای خطی دارد و ضریب مثبت برای هر دو متغیر، نشان دهنده رابطه مستقیم آن‌ها با مشخصه موردنظر می‌باشد؛

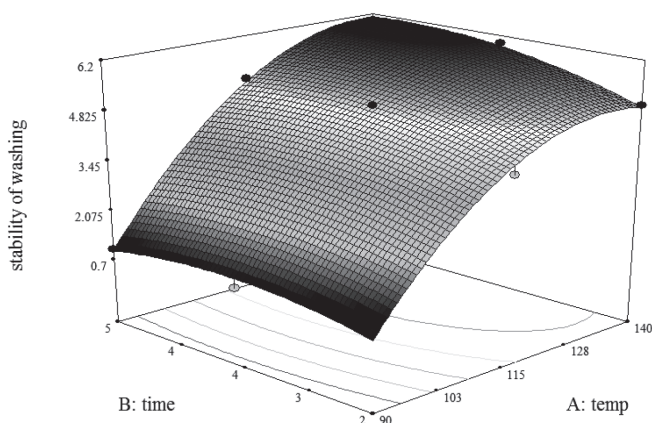
$$-7,50855 + 0,100000 * temp + 0,22222 * time \quad (8)$$

استحکام کالای پلی‌استر با دما و زمان رابطه معکوس دارد. این رابطه خطی به شرح زیر است:

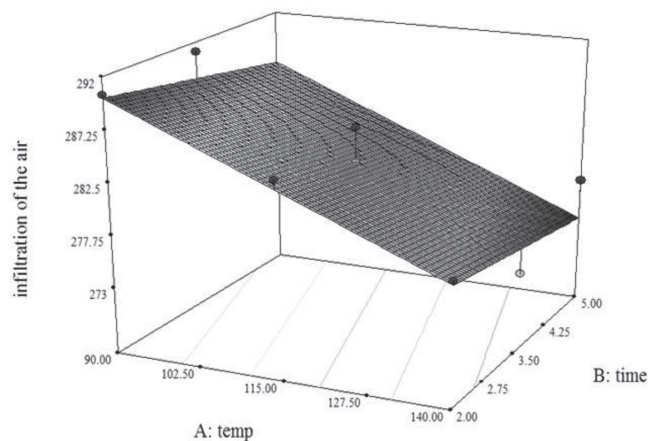
$$+52,73940 - 0,082000 * temp - 0,044444 * time \quad (9)$$

جدول ۵- داده‌های آماری ANOVA برای کالای پنبه‌ای

| شماره آزمایش | متغیرهای آزمایش | | | | | | شاخص‌های کیفیت پارچه | | |
|---------------|-----------------|---------|------|--------|-----------|---------------|----------------------|----------------|--|
| | Mean | Std.Dev | %C.V | PRESS | R-Squared | Adj R-Squared | Pred R-Squared | Adeq Precision | |
| نفوذپذیری هوا | ۲۸۲/۴۳ | ۲/۳۷ | ۰/۸۴ | ۱۰۰/۱۶ | ۰/۸۱۲۰ | ۰/۷۷۴۴ | ۰/۶۶۴۳ | ۱۳/۵۳۵ | |
| ضدآب | ۹/۱۵ | ۰/۱۷ | ۱/۸۹ | ۱/۹۹ | ۰/۹۶۳۱ | ۰/۹۳۶۸ | ۰/۶۵۰۳ | ۱۹/۸۴۰ | |
| ثبات شستشویی | ۴/۱۵ | ۰/۱۷ | ۴/۱۷ | ۱/۹۹ | ۰/۹۹۵۰ | ۰/۹۹۱۴ | ۰/۹۵۲۳ | ۴۵/۳۴۹ | |
| استحکام | ۲۱/۵۹ | ۰/۶۵ | ۲/۹۵ | ۸/۱۴ | ۰/۸۵۵۳ | ۰/۸۲۶۴ | ۰/۷۱۷۴ | ۱۴/۲۹۶ | |



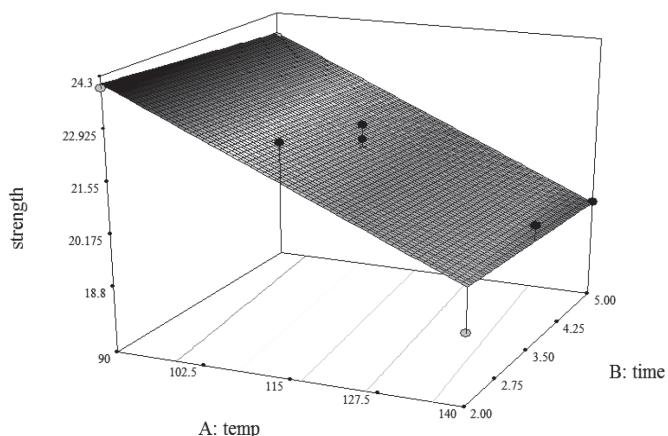
شکل ۳: نمای سه بعدی برهمکنش میان متغیرهای دما (°C) و زمان (min) در ثبات شستشویی کالای پنبه‌ای



شکل ۱- نمای سه بعدی برهمکنش میان متغیرهای دما (°C) و زمان (min) در نفوذپذیری کالای پنبه‌ای

با توجه به نمودار شکل ۳ در دمای پایین، نمونه پنبه‌ای پس از شستشو خاصیت ضدآب خود را تقریباً از دست می‌دهد. علت این امر را می‌توان ناشی از تغییر آرایش‌یافتگی زنجیره‌های پرفلئورینه و پایین بودن ثبات شستشویی این ماده در دماهای پایین تکمیل عنوان کرد. البته باید این نکته را هم در نظر داشت که این ماده قبل از شستشو به خوبی توانسته در دماهای پایین، خاصیت دفع‌کنندگی به منسوج دهد. اما چون در این دماها، انرژی کافی جهت پیوند زنجیره‌های فلئوروکربنی با الیاف تامین نشده است، ثبات شستشویی خوبی نیز مشاهده نمی‌گردد. در صورتی که در دماهای بالا، این انرژی به خوبی تامین شده و ماده به صورت کاملاً موثر روی کالا تثبیت می‌شود و در نتیجه کالا از ثبات شستشویی خوبی نیز برخوردار می‌باشد.

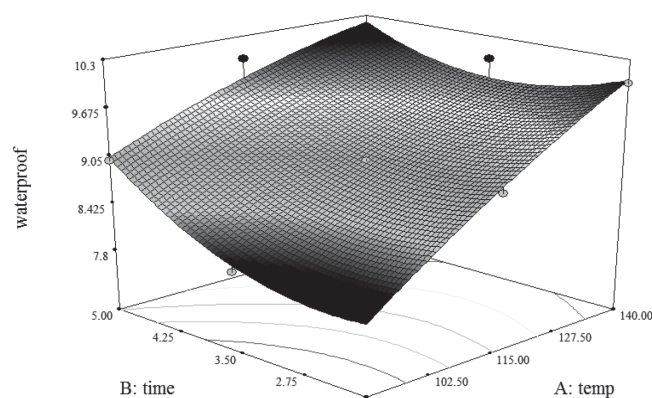
شکل ۴ نشان می‌دهد که در دماهای بالا به صورت مستقل از زمان، میزان استحکام کالای پنبه‌ای کاهش می‌یابد. در دماهای بالا، اتصالات عرضی کالای پنبه‌ای ضعیف شده و زنجیره‌های الیاف با نیروی کمتری کنار یکدیگر باقی می‌مانند و در نتیجه نیاز به نیروی کمتری برای پارگی دارند. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در دمای ۱۴۰°C، ظاهر پنبه نیز دچار تغییر گردیده و رنگ آن زرد می‌شود.



شکل ۴: نمای سه بعدی برهمکنش میان متغیرهای دما (°C) و زمان (min) در استحکام تا حد پارگی کالای پنبه‌ای

افقی قرار گرفته‌اند و محور عمودی معرف میزان نفوذپذیری هوا می‌باشد. البته رابطه میان متغیرهای دما و زمان با میزان نفوذپذیری هوا برای کالای پنبه‌ای، پیش از این نیز با توجه به رابطه (۲) که توسط نرم‌افزار ارائه شده، قابل تشخیص بود. این موضوع در مورد سایر شکل‌های ۲ تا ۸ نیز صدق می‌کند.

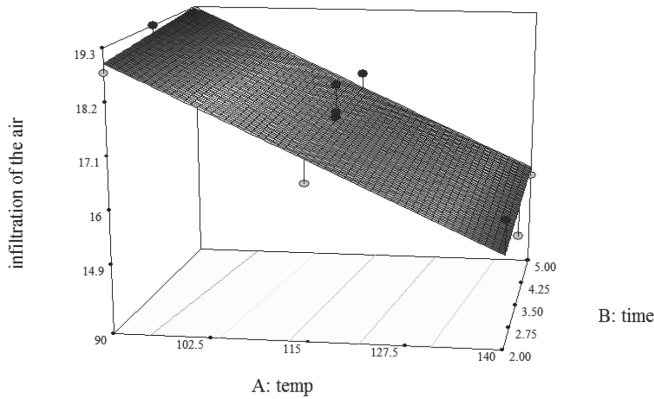
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، برهمکنش میان دو متغیر در ضدآب شدن کالای پنبه‌ای، بیان‌کننده این موضوع است که دمای بالا (۱۴۰°C) چه در مدت زمان کوتاه (۲ min) و چه در مدت زمان طولانی‌تر (۵ min) خاصیت ضدآب خوبی به کالا می‌دهد. این در حالی است که با کم شدن دمای تثبیت و بالابردن زمان نیز می‌توان تقریباً به همان خاصیت ضدآب مطلوب دست یافت. همانطور که مشاهده می‌شود، بهترین تثبیت در دمای ۱۴۰°C، در زمان‌های مختلف رخ داده است. در دمای پایین‌تر ۱۱۵°C نیز تقریباً نتیجه مشابه مشاهده می‌گردد. چنانچه دمای تثبیت تا ۹۰°C کاهش یابد، اما کالا را در مدت زمان بیشتری تحت عملیات تثبیت قرار دهیم، نتیجه مشابه دمای بالاتر ۱۱۵°C خواهد بود. در این نمودار متغیرهای دما و زمان روی محور افقی قرار گرفته‌اند و ضدآب بودن را روی محور عمودی می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۲: نمای سه بعدی برهمکنش میان متغیرهای دما (°C) و زمان (min) در ضدآب شدن کالای پنبه‌ای

جدول ۶: مقادیر F-value و p-value برای کالای پلی‌استر

| شاخص‌های کیفیت پارچه | | |
|----------------------|----------------|----------------------|
| F-value | P-value | |
| ۴۴،۹۸ | کمتر از ۰،۰۰۰۱ | نفوذپذیری هوا (mm/s) |
| ۳۷،۳۳ | کمتر از ۰،۰۰۰۱ | ضد آب |
| ۸۹،۱۳ | کمتر از ۰،۰۰۰۱ | ثبات شستشویی |
| ۱۸،۰۰ | ۰،۰۰۰۵ | استحکام (kgF) |



شکل ۵: نمای سه بعدی برهمکنش بین دما (°C) و زمان (min) در نفوذپذیری کالای پلی‌استر

۳/۵ min بدست آمد. قابل ذکر است که در این شکل محورهای افقی، نشان دهنده پارامترهای زمان و دما می‌باشند و مشخصه میزان نفوذپذیری هوا روی محور عمودی قرار گرفته است.

برخلاف نفوذپذیری هوا برای کالای پلی‌استر، همانطور که در نمودار شکل ۶ مشاهده می‌شود، برای ضدآب شدن کالای پلی‌استر می‌توان مشاهده کرد که میان پارامترهای دما و زمان، برهمکنش وجود دارد. در مورد کالای پنبه‌ای، یک خاصیت دافع آب خوب در دماهای بالا و یا دماهای پایین با مدت زمان بالا رخ می‌داد. در صورتی که کالای پلی‌استر، حتی در دماهای پایین نیز توانسته میزان دفع آب خوبی بدست آورد. چنان که از روی نتایج آزمایش مشاهده می‌شود، برای کالای پلی‌استر، نتیجه تکمیل در دمای ۹۰°C و مدت زمان ۳/۵ min، مشابه نتیجه تکمیل در دمای ۱۱۵°C در مدت زمان ۲ min خواهد بود. با توجه به شکل ۷،

آنالیز واریانس مدل مربوط به کالای پلی‌استر

مقادیر F-value و p-value در جدول ۶ نیز، نشان دهنده معنی‌داری مدل برای کالای پلی‌استر می‌باشد. در مورد مشخصه‌های نفوذپذیری هوا، ضدآب بودن و ثبات شستشویی، ۰،۰۱ درصد احتمال این وجود دارد که نتیجه بدست آمده شانسی باشد. در مورد استحکام تا حد پارگی نیز این احتمال تنها ۰،۰۵ درصد می‌باشد. داده‌های آماری مربوط به کالای پلی‌استر را می‌توان در جدول ۷ مشاهده کرد. با توجه به مقادیر ضرایب تعیین بدست آمده از مدل برای کالای پلی‌استر، در می‌یابیم که متغیرهای دما و زمان به خوبی می‌توانند تغییرات این مشخصه‌ها را توضیح دهند.

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که همانند کالای پنبه‌ای، در نفوذپذیری هوا برای کالای پلی‌استر نیز، برهمکنشی میان پارامترهای دما و زمان وجود ندارد. این مفهوم از خطوط موازی در شکل ۵، به راحتی قابل مشاهده است. علاوه بر آن، در رابطه با میزان نفوذپذیری هوا نیز باید گفت که کالای پلی‌استر نیز رفتاری مشابه با کالای پنبه‌ای از خود نشان می‌دهد. چرا که بیشترین میزان نفوذپذیری در دمای ۹۰°C و مدت زمان

جدول ۷: داده‌های ANOVA برای کالای پلی‌استر

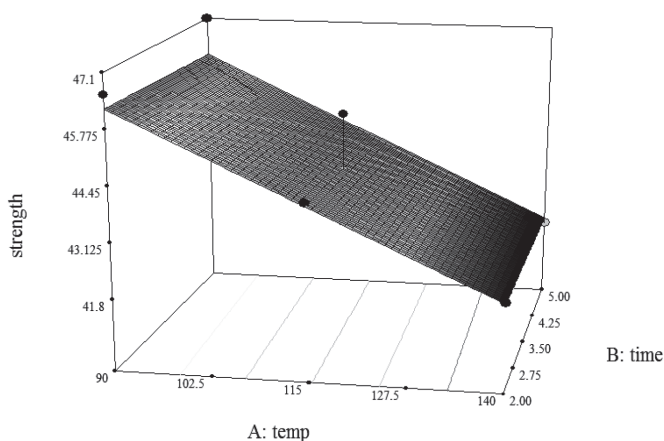
| Adeq Precision | Pred R-Squared | Adj R-Squared | R-Squared | PRESS | %C.V | Mean | Std.Dev | |
|----------------|----------------|---------------|-----------|-------|------|-------|---------|---------------|
| ۱۷،۴۰۵ | ۰،۸۱۶۵ | ۰،۸۸۰۰ | ۰،۹۰۰۰ | ۳،۹۹ | ۲،۶۹ | ۱۷،۳۴ | ۰،۴۷ | نفوذپذیری هوا |
| ۲۱،۱۸۴ | ۰،۷۵۳۶ | ۰،۹۳۸۰ | ۰،۹۶۳۸ | ۱،۱۸ | ۱،۶۲ | ۹،۶۹ | ۰،۱۶ | ضدآب |
| ۲۵،۴۹۳ | ۰،۸۹۰۴ | ۰،۹۳۶۳ | ۰،۹۴۶۹ | ۴،۴۲ | ۹،۷۰ | ۴،۷۷ | ۰،۴۶ | ثبات شستشویی |
| ۱۰،۵۲۵ | ۰،۶۶۵۹ | ۰،۷۳۹۲ | ۰،۷۸۲۶ | ۱۰،۷۸ | ۱،۹۰ | ۴۴،۱۵ | ۰،۸۴ | استحکام |

جدول ۸: بهینه‌سازی مشخصات مورد مطالعه برای کالای پنبه‌ای، توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت

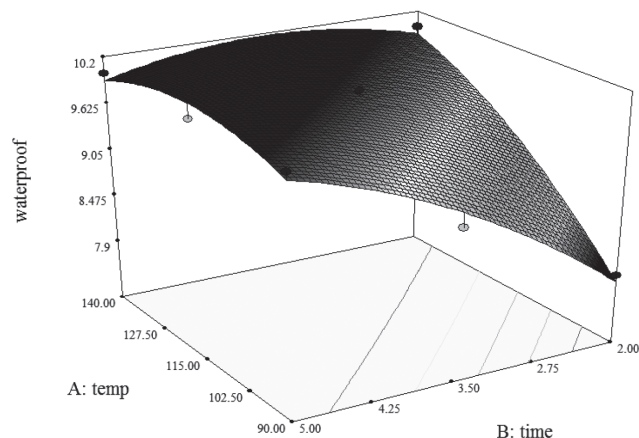
| هدف | درجه اهمیت | محدوده جدید | محدوده اولیه | |
|---------|------------|-------------|--------------|---------------------------|
| - | - | همان محدوده | ۹۰-۱۴۰ | دما (°C) |
| - | - | همان محدوده | ۲-۵ | زمان (min) |
| ماکزیمم | ۱+ | ۲۷۳/۹-۲۸۵ | ۲۷۳/۹-۲۹۱/۱ | نفوذپذیری هوا (mm/s) |
| ماکزیمم | ۵+ | همان محدوده | ۸-۱۰ | خاصیت ضدآب |
| ماکزیمم | ۵+ | ۱-۵ | ۱-۶ | ثبات شستشویی |
| ماکزیمم | ۱+ | ۱۸/۹-۲۱ | ۱۸/۹-۲۴ | استحکام تا حد پارگی (kgF) |

پس از شستشو تضعیف شده و از خاصیت ضدآب کالای پلی‌استر کاسته می‌شود. اما در دماهای بالایی مثل 115°C و 140°C ، یک تکمیل پایدار و دائمی روی منسوج ایجاد می‌شود. دلیل این امر، دریافت انرژی کافی برای تشکیل پیوند بین زنجیره‌های فلتور و کربن و الیاف در دماهای بالا می‌باشد. شکل ۸، گواه عدم برهمکنش میان متغیرهای زمان و دما در استحکام

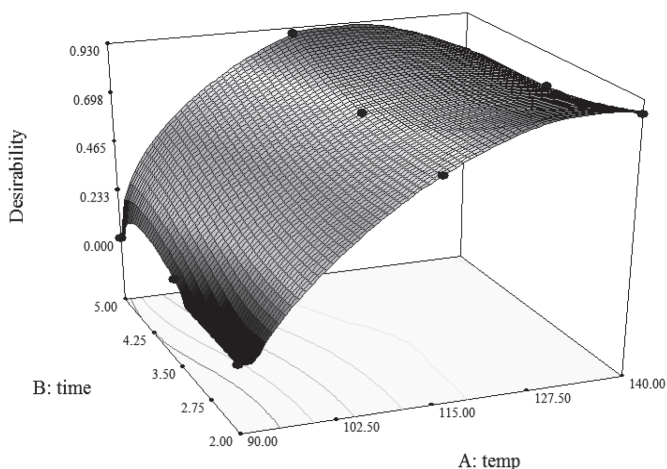
درمی‌یابیم که در تعیین ثبات شستشویی کالای پلی‌استر، برهمکنشی میان متغیرهای دما و زمان وجود ندارد. یعنی هر کدام از این پارامترها به طور مستقل بر ثبات شستشویی کالا اثر می‌گذارند. همانطور که از نمودار مشخص است، رابطه‌ای مستقیم بین پارامترهای دما و زمان و مشخصه ثبات شستشویی وجود دارد. تشبیتی که در دماهای پایین صورت گرفته،



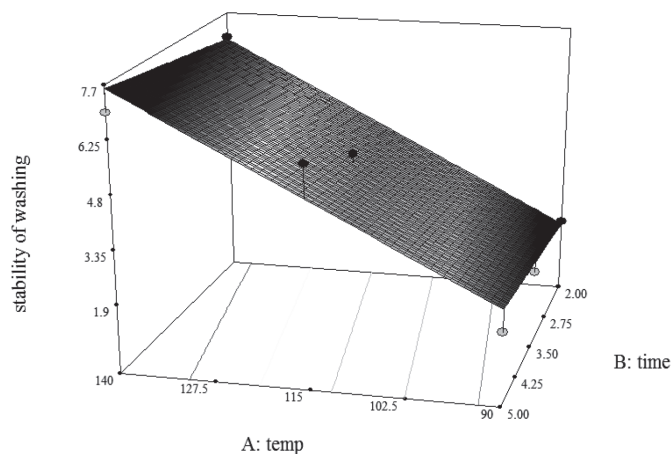
شکل ۸: نمای سه بعدی برهمکنش میان متغیرهای دما ($^{\circ}\text{C}$) و زمان (min) در استحکام تا حد پارگی کالای پلی‌استر



شکل ۶: نمای سه بعدی برهمکنش میان متغیرهای دما ($^{\circ}\text{C}$) و زمان (min) در ضدآب شدن کالای پلی‌استر



شکل ۹: نمای سه بعدی برهمکنش میان متغیرهای دما ($^{\circ}\text{C}$) و زمان (min) جهت رسیدن به شرایط مطلوب برای کالای پنبه‌ای



شکل ۷: نمای سه بعدی برهمکنش میان متغیرهای دما ($^{\circ}\text{C}$) و زمان (min) در ثبات شستشویی کالای پلی‌استر

جدول ۹: طرح‌های پیشنهادی توسط نرم‌افزار جهت بدست آوردن شرایط مطلوب برای کالای پنبه‌ای

| امکان | استحکام تا حد پارگی (kgF) | ثبات شستشویی | ضدآب | نفوذپذیری هوا (mm/s) | زمان | دما ($^{\circ}\text{C}$) | |
|-------|---------------------------|--------------|---------|----------------------|------|----------------------------|---|
| ۰/۹۲۱ | ۲۱ | ۵/۶۴۳۸۱ | ۹/۹۳۳۱۵ | ۲۷۸/۷۸۱ | ۵/۰۰ | ۱۲۳/۵۸ | ۱ |
| ۰/۹۲۰ | ۲۱/۰۸۴۳ | ۵/۵۷۳۰۵ | ۹/۹۱۲۰۳ | ۲۷۹/۰۳۸ | ۵/۰۰ | ۱۲۲/۵۴ | ۲ |
| ۰/۸۹۰ | ۲۰/۵۲۳۴ | ۵/۰۳۸۸۳ | ۹/۸۵۰۲۳ | ۲۷۹/۱۶۷ | ۲/۰۰ | ۱۳۴/۴۵ | ۳ |
| ۰/۸۹۰ | ۲۰/۵۵۶۳ | ۵/۰۳۹۴۹ | ۹/۸۳۵۵۹ | ۲۷۹/۲۶۷ | ۲/۰۰ | ۱۳۴/۰۴ | ۴ |
| ۰/۸۸۴ | ۲۰/۹۰۶۷ | ۵/۰۰۰۹۵ | ۹/۶۷۵۶۴ | ۲۸۰/۳۳۹ | ۲/۰۰ | ۱۲۹/۷۰ | ۵ |

جدول ۱۰: بهینه‌سازی مشخصات مورد مطالعه برای کالای پلی‌استر، توسط نرم‌افزار دیزاین‌اکسپرت

| هدف | درجه اهمیت | محدوده جدید | محدوده اولیه | دما (°C) |
|---------|------------|-------------|--------------|---------------------------|
| - | - | همان محدوده | ۹۰-۱۴۰ | زمان (min) |
| - | - | همان محدوده | ۲-۵ | نفوذپذیری هوا (mm/s) |
| ماکزیمم | ۱+ | همان محدوده | ۱۴/۹-۱۹/۳ | خاصیت ضدآب |
| ماکزیمم | ۵+ | ۸-۹/۵ | ۸-۱۰ | ثبات شستشویی |
| ماکزیمم | ۳+ | ۲-۶ | ۲-۷ | استحکام تا حد پارگی (kgF) |
| ماکزیمم | ۱+ | همان محدوده | ۴۱/۹-۴۷/۱ | |

نتایج مختلف و مطلوبی بدست آورد. اعداد پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار، با توجه به هدف ما، کاملاً منطقی به نظر می‌رسد. آزمایش‌هایی که ما را به نتایج مدنظر می‌رساند، در جدول ۹ آورده شده است.

با توجه به تنظیمات اعمال شده در جدول ۸، برای یک بهینه‌سازی کلی، برهمکنش میان پارامترها متفاوت از آنچه که تاکنون برای بهینه‌سازی هر یک از مشخصه‌ها به صورت جداگانه شده، می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود، و به عنوان بهترین حالت توسط نرم‌افزار پیشنهاد شده، تنظیمی که ما را به نتیجه مطلوب برساند، دمای °C ۱۲۳/۵۸ و مدت زمان min ۵ عنوان شده است. در این تنظیم، یک خاصیت ضدآب ماکزیمم همراه با ثبات شستشویی بالا بدست می‌آید و علاوه بر آن، استحکام تا حد پارگی پارچه و میزان نفوذپذیری کالا نیز در حد مطلوبی باقی می‌ماند. سایر آزمایش‌ها نیز با امکان کمتری نسبت به پیشنهاد اول، ما را به نتیجه دلخواه می‌رسانند. این برهمکنش‌ها از نمودار موجود در شکل ۹ قابل مشاهده است.

بهینه‌سازی همزمان مشخصه‌های کالای پلی‌استر

همانند کالای پنبه‌ای، برای بهینه‌سازی همزمان مشخصه‌های پلی‌استر نیز، تنظیمات را به گونه‌ای اعمال کردیم که یک خاصیت ضدآب ماکزیمم با ثبات شستشویی بالا و میزان نفوذپذیری هوا و استحکام تا حد پارگی مطلوبی داشته باشیم. هدف، درجه اهمیت، و تعیین محدوده‌ها، در جدول ۱۰ آورده شده است. با توجه به تشخیص نمودار، آنچه که مدنظر ماست، با انجام آزمایش‌هایی که در جدول ۱۱ آورده شده، قابل دستیابی می‌باشد. برهمکنش میان متغیرهای دما و زمان برای بهینه‌سازی همزمان این چهار مشخصه در شکل ۱۰ آورده شده است. طبق پیشنهاد نرم‌افزار، با انجام آزمایش در دمای °C ۱۲۰/۸۸ و مدت زمان min ۵، به نتایج دلخواه

تأحد پارگی کالای پلی‌استر می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، رابطه میان این متغیرها با استحکام تا حد پارگی کالا، معکوس می‌باشد. بیشترین استحکام در دمای °C ۹۰ و مدت زمان min ۵ رخ داده است. این در حالی است که استحکام کالای پلی‌استر در دمای °C ۱۴۰ و مدت زمان min ۵ به ۴۱/۹ kgF، یعنی کمترین مقدار خود کاهش یافته است.

بهینه‌سازی همزمان مشخصه‌های مورد مطالعه، توسط نرم‌افزار دیزاین‌اکسپرت

هدف از انجام این آزمایش، تکمیل ضدآب کالای پنبه‌ای و پلی‌استر می‌باشد. اما باید در نظر داشت که کالا پس از تکمیل، از ثبات شستشویی بالایی نیز برخوردار باشد، آن هم در شرایطی که میزان نفوذپذیری هوا و استحکام تا حد پارگی نیز برای کالا در محدوده قابل قبولی باشد. یکی از مزایای نرم‌افزار دیزاین‌اکسپرت قابلیت بهینه‌سازی توأم این مشخصه‌ها می‌باشد. تنظیم نرم‌افزار بستگی به مصرف‌نهایی ما از کالای تکمیل شده دارد. چنانچه هر یک از مشخصه‌ها با در نظر گرفتن نوع مصرف‌نهایی آن برای ما اهمیت بیشتری داشته باشد، می‌توان بهینه‌سازی را به آن سمت سوق داد. در این قسمت، برای هر کدام از کالاهای پنبه‌ای و پلی‌استر، شرایط بهینه‌سازی را در نرم‌افزار، به گونه‌ای دلخواه طراحی کردیم. نتایج حاصل از این طراحی در ادامه گزارش شده است.

بهینه‌سازی همزمان مشخصه‌های کالای پنبه‌ای

جدول ۸، تنظیماتی که برای کالای پنبه‌ای در نرم‌افزار اعمال کردیم را نشان می‌دهد. بدیهی است که این طراحی تنها یک نمونه از چندین حالت ممکن می‌باشد و صرفاً بسته به هدف از انجام آزمایش، می‌توان

جدول ۱۱: طرح‌های پیشنهادی توسط نرم‌افزار جهت بدست آوردن شرایط مطلوب برای کالای پلی‌استر

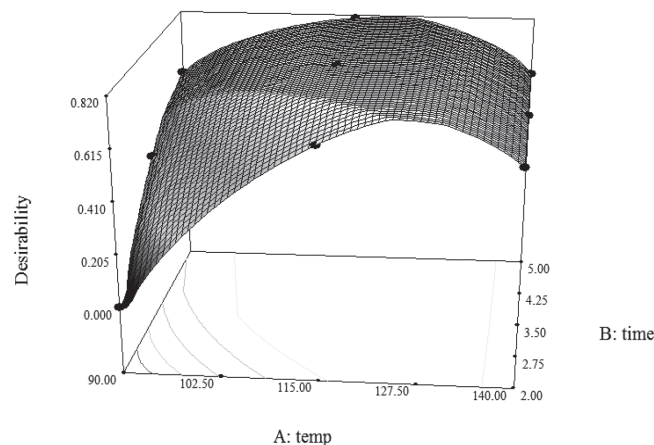
| امکان | استحکام تا حد پارگی (kgF) | ثبات شستشویی | ضدآب | نفوذپذیری هوا (mm/s) | زمان | دما (°C) |
|-------|---------------------------|--------------|---------|----------------------|------|----------|
| ۰/۸۱۳ | ۴۳/۶۰۵۴ | ۵/۶۹۱۳۹ | ۱۰/۱۵۸۱ | ۱۷/۰۶۵۴ | ۵/۰۰ | ۱۲۰/۸۸ |
| ۰/۸۱۳ | ۴۳/۶۲۲۵ | ۵/۶۷۱۳۶ | ۱۰/۱۵۹۱ | ۱۷/۰۸۰۴ | ۵/۰۰ | ۱۲۰/۶۷ |
| ۰/۸۱۳ | ۴۳/۵۸۳۷ | ۵/۶۴۰۴۸ | ۱۰/۱۵۶۸ | ۱۷/۰۴۶۳ | ۵/۰۰ | ۱۲۰/۱۴ |
| ۰/۸۱۳ | ۴۳/۵۶۳۱ | ۵/۶۲۱۲۳ | ۱۰/۱۵۵۵ | ۱۷/۰۲۸۳ | ۵/۰۰ | ۱۲۰/۳۹ |
| ۰/۸۱۳ | ۴۳/۶۶۱۸ | ۵/۸۴۱۱۵ | ۱۰/۱۶۱۳ | ۱۶/۱۱۵ | ۵/۰۰ | ۱۲۲/۱۹ |

به عنوان ویژگی قابل توجه برای آن، مطرح می‌شود. به طور کلی، زمانی که یک تکمیل ضدآب روی کالا صورت می‌گیرد، مشخصه‌هایی از پارچه، همچون میزان نفوذپذیری هوا و استحکام تا حد پارگی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در مطالعات انجام شده، کمتر به این موضوع پرداخته شده است که تکمیل در چه شرایطی یک میزان مطلوب از این مشخصه‌ها را به طور همزمان به همراه خواهد داشت. یعنی تکمیلی که کالا را دافع آب کند، اما در نفوذپذیری هوا و تنفس پوست اختلال ایجاد نکند، استحکام تا حد پارگی مطلوب داشته باشد و در نهایت، ثبات شستشویی خوبی هم داشته باشد. نکته دیگری که بسیار حائز اهمیت است و سعی شد که در این پژوهش مورد توجه قرار گیرد، تأثیر همزمان پارامترها بر روی یک مشخصه است. طراحی مرکب مرکزی استفاده شده در این پژوهش، توسط لوکاس در سال ۱۹۸۹، باکس و جونز در سال ۱۹۸۹ مورد بحث قرار گرفته است و در واقع یکی از دستاوردهای اقتصادی و انعطاف‌پذیر مدل‌سازی به حساب می‌آید [۳۲، ۳۳].

با توجه به آنچه که عنوان شد، طراحی مرکب مرکزی توانست تأثیر همزمان پارامترهای موثر در تکمیل ضدآب مانند دما و زمان را به خوبی تحلیل کند و از سویی در روند پاسخ به تحلیل‌ها از کم‌ترین تعداد آزمایش‌ها استفاده کند. تحلیل نرم‌افزاری نیز از صحت بالایی برخوردار بوده و توانسته تأثیر پارامترهای گوناگون را به خوبی بیان کند. تکمیل ضدآب تنها یک نمونه از ده‌ها آزمایشی است که در نساجی نیازمند بهینه‌سازی می‌باشد. با توجه به نتیجه مطلوبی که از روش طراحی آزمایش برای تکمیل ضدآب بدست آمد، انتظار می‌رود که استفاده از این روش در بسیاری از آزمایش‌های دیگر همچون رنگ‌رزی، رنگ همانندی و ... در نساجی نیز نتیجه مطلوبی بدست بدهد.

مراجع

- Hall, J. E., Guyton and Hall textbook of medical physiology, 13th edition, Elsevier Health Sciences, Philadelphia, 2010.
- Holcombe, B. V., Hoschke, B. N., Do test methods yield meaningful performance specifications? ASTM special technical publication, 900, 327-339, 1986.
- Singha, K., A review on coating & lamination in textiles: processes and applications. American Journal of Polymer Science, 2(3), 39-49, 2012.
- Lewin, M., Preston, J., Handbook of fiber science and technology: high technology fibers, 1st edition, Vol III, Part A, Marcel Dekker Inc., New York, 1985.
- Singh, O., Stain removal characteristics of fabrics and stain resistance/release finishing: a review, Textile dyer & printer, 20(25), 24-27, 1987.
- Schindler, W. D., Hauser, P. J., Chemical finishing of textiles, Elsevier, New York, 2004.
- Wallitzer, T., Scotchgard faserschutz: ein bewahrtes produkt und die neusten anforderungen, Textilveredlung, 33(11-12), 1998.
- Duschek, G., TEXTILVEREDLUNG-Emissionsame und APEO-freie Fluorcarbon-Ausrüstung, Melliand Textilberichte-International Textile Reports-German Edition, 82(7-8), 604-608, 2001.
- Lammermann, D., Fluorocarbons in textile finishing, Melliand Textilber, 72(11), 949, 1991.
- Rath, H., Lehrbuch der Textilchemie: einschl. der textil chemischen Technologie, Springer-Verlag, Berlin, 2013.
- Grottenmüller, R., Fluorocarbons-An Innovative Aid to the Finishing of Textiles, Melliand Int, 4, 278, 1998.
- Forsman, N., Lozhechnikova, A., Khakalo, A., Johansson, L. S., Vartiainen, J., Österberg, M., Layer-by-layer assembled hydrophobic coatings for cellulose nanofibril films and tex-



شکل ۱۰: نمای سه بعدی برهمکنش میان متغیرهای دما (°C) و زمان (min) جهت رسیدن به شرایط مطلوب برای کالای پلی‌استر

می‌رسیم. سایر دماها و زمان‌هایی که این نتایج مطلوب را بدست می‌دهند، در جدول ۱۱ آورده شده است.

نتیجه‌گیری

امروزه با توجه به طیف وسیع مصارف منسوجات و استفاده از آن در مکان‌ها و شرایط بخصوص، ویژگی‌های منسوج از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از این ویژگی‌ها دافع آب بودن است که اگر از آن در سازمان‌هایی همچون آتش‌نشانی، ارتش و ... استفاده شود، میزان نفوذپذیری هوا نیز

- tiles, made of polylysine and natural wax particles, Carbohydrate polymers, 173, 392-402, 2017.
13. Gao, S., Huang, J., Li, S., Liu, H., Li, F., Li, Y., Chen, G., Lai, Y., Facile construction of robust fluorine-free superhydrophobic TiO₂@ fabrics with excellent anti-fouling, water-oil separation and UV-protective properties, Materials & Design, 128, 1-8, 2017.
 14. Zahid, M., Heredia-Guerrero, J.A., Athanassiou, A., Bayer, I.S., Robust water repellent treatment for woven cotton fabrics with eco-friendly polymers, Chemical Engineering Journal, 319, 321-332, 2017.
 15. Choudhury, A. K. R., Principles of Textile Finishing, Woodhead Publishing, Cambridge, 2017.
 16. Shao, Y., Izquierdo, V., Dolez, P., Advanced chemical testing of textiles, in Advanced Characterization and Testing of Textiles, Elsevier, New York, 2018.
 17. Yuan, Z., Xu, Z., Zhang, D., Chen, W., Zhang, T., Huang, Y., Gu, L., Deng, H., Tian, D., Box-Behnken design approach towards optimization of activated carbon synthesized by coprolysis of waste polyester textiles and MgCl₂, Applied Surface Science, 427, 340-348, 2018.
 18. Dil, E. A., Ghaedi, M., Asfaram, A., Mehrabi, F., Bazrafshan, A. A., Optimization of process parameters for determination of trace Hazardous dyes from industrial wastewaters based on nanostructures materials under ultrasound energy. Ultrasonics sonochemistry, 40, 238-248, 2018.
 19. Şimşek, B., Uygunoğlu, T., Korucu, H., Kocakerim, M. M., Analysis of the effects of dioctyl terephthalate obtained from polyethylene terephthalate wastes on concrete mortar: A response surface methodology based desirability function approach application, Journal of Cleaner Production, 170, 437-445, 2018.
 20. Noman, M. T., Wiener, J., Saskova, J., Ashraf, M. A., Vikova, M., Jamshaid, H., Kejzlar, P., In-situ development of highly photocatalytic multifunctional nanocomposites by ultrasonic acoustic method. Ultrasonics sonochemistry, 40, 41-56, 2018.
 21. Sharifpour, E., Khafri, H.Z., Ghaedi, M., Asfaram, A., Janesar, R., Isotherms and kinetic study of ultrasound-assisted adsorption of malachite green and Pb²⁺ ions from aqueous samples by copper sulfide nanorods loaded on activated carbon: experimental design optimization, Ultrasonics sonochemistry, 40, 373-382, 2018.
 22. Raheel, M., Dai, G., Chemical resistance and structural integrity of protective glove materials, Journal of Environmental Science & Health Part A, 32(2), 567-579, 1997.
 23. International Organization for Standardization. Determination of the permeability of fabrics to air. ISO 9237:1995.
 24. Fang, X., Purdy, M., Williams, S., Sasser, K., Compositions and methods for treating a textile using such compositions, U.S. Patent No. 7244371, 2007.
 25. Box, G. E., Hunter J. S., Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces, The Annals of Mathematical Statistics, 28(1), 195-241, 1957.
 26. [26]. Song, Y., Du, B., Zhou, T., Han, B., Yu, F., Yang, R., Hu, X., Ni, Y., Li, Q., Optimization of extraction process by response surface methodology and preliminary structural analysis of polysaccharides from defatted peanut (*Arachis hypogaea*) cakes, Carbohydrate research, 346(2), 305-310, 2011.
 27. Ma, T., Wang, Q., Wu, H., Optimization of extraction conditions for improving solubility of peanut protein concentrates by response surface methodology, LWT-Food Science and Technology, 43(9), 1450-1455, 2010.
 28. Zolgharnein, J., Shahmoradi, A., Ghasemi, J. B., Comparative study of Box-Behnken, central composite, and Doehlert matrix for multivariate optimization of Pb (II) adsorption onto Robinia tree leaves, Journal of Chemometrics, 27(1-2), 12-20, 2013.
 29. Piepel, G. F., Anderson, C. M., Redgate, P. E., Response surface designs for irregularly-shaped regions (Parts 1, 2, and 3), Proceedings of the Section on Physical and Engineering Sciences, American Statistical Association Alexandria, 1993.
 30. Maqbool, Z., Hussain, S., Ahmad, T., Nadeem, H., Imran, M., Khalid, A., Abid, M., Martin-Laurent, F., Use of RSM modeling for optimizing decolorization of simulated textile wastewater by *Pseudomonas aeruginosa* strain ZM130 capable of simultaneous removal of reactive dyes and hexavalent chromium, Environmental Science and Pollution Research, 23(11), 11224-11239, 2016.
 31. Box, G., Jones, S., Designing products that are robust to the environment, Total Quality Management, 3(3), 265-282, 1992.
 32. Lucas, J. M., How to achieve a robust process using response surface methodology, Journal of Quality Technology, 26(4), 248-260, 1994.

The application of the response surface methodology for water repellency finishing of polyester and cotton fabric

Nesa Ahmadyar^{1,2}, Ahmad Kazemian^{1,3} and Mehdi Iranpoor^{1,*}

1. Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, 8415683111

2. Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, 4199613769

3. Textile Engineering Department, Isfahan University of Technology, 8415683111

Abstract

The aim of this research is to find optimum conditions for water repellency finishing of polyester and cotton fabrics. In this paper, the response surface methodology is employed for the design of experiments and optimization. Temperature and duration of the finishing process were considered as the main factors affecting the process. The objectives were to obtain a high level of water repellency, air permeability, tensile strength, and wash-fastness tolerance at the same time. The samples were immersed in the solution of RUCO-GUARD® fluorocarbon and the finishing process was carried out at various temperatures and durations. The analysis of variance (ANOVA) showed that these parameters significantly affected all of the objectives. Further, the interaction of two factors was significant in some cases which resulted in nonlinear surfaces. By choosing some arbitrary degrees of importance for the objectives in the multi-objective optimization module of Design expert software, the optimal levels of factors were found. The successful application of the response surface methodology is promising for optimization of other textile applications such as dyeing and color matching to name a few.

Keywords

Water repellency finishing,
Response surface method-
ology,
Carbon fluorine,
cotton,
polyester

(*) Address Correspondence to M. iranpoor, Email: iranpoor@cc.iut.ac.ir