پژوهش‌های مدیریت عمومی
سال ششم ، شماره بیست و یکم ، پاییز ۱۳۹۲
صفحه ۱۴۰-۱۲۳

ارائه مدلی مفهومی برای بهینه سازی فرایند تولید پیوسته با بهره‌گیری از رویکرد تلفیقی روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری

دکتر جمشید صالحی صدقیانی *
دکتر مقصود امیری **
دکترمحسن مظلوم فارسیباف ***
رضا عباسی ****

چکیده

در فرآیندهای صنعتی عوامل متعددی با سطوح مختلف وجود دارند که هر کدام ممکن است بر روی مشخصات محصول نهایی تأثیرگذار باشند. در این مقاله به موضوع بهینه‌سازی پارامترهای فرایند تولید پیوسته و محدودیت‌های موجود در انتخاب تعداد این پارامترها و عوامل اثرگذار پرداخته و مدلی مفهومی به همراه گام‌های مختلف آن با استفاده از رویکرد تلفیقی روش سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده است. به عنوان مطالعه موردی، فرایند تولید پلی اتیلن ترفتالات با ۵ مشخصه کیفی به عنوان متغیرهای پاسخ و ۹ متغیر اثرگذار مورد مدلسازی قرار گرفته است. روش پیشنهادی این امکان را فراهم می نماید که در شرایطی که تغییراتی در برنامه تولید بوجود می‌آید که منجر به کاهش یا افزایش میزان تولید محصول گردد، بتوان در ضمن رعایت حدود استاندارد متغیرهای پاسخ (مشخصه‌های کیفی محصول)، نسبت به مشخص نمودن مقادیر متغیرهای اثرگذار (که همان تنظیمات فرایند تولید می باشند) اقدام نمود.

واژه‌های کلیدی: **تولید پیوسته، روش سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های فراابتکاری**

---

* استاد دانشگاه علامه طباطبایی
** دانشیار دانشگاه علامه طباطبایی
*** استادیار، وزارت نفت
**** نویسنده مسئول- دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی دانشگاه علامه طباطبایی

مقدمه

هر فرآیند دارای مجموعه‌ای از عوامل تأثیرگذار و مجموعه‌ای از عوامل خروجی است که باید مطابق خواست و انتظاری باشد که از آن می‌رود. اگر فرآیندی دارای j ورودی (متغیرهای قابل کنترل ورودی) و دارای k متغیر اثرگذار قابل کنترل حین فرایند باشد و این عوامل همان عواملی هستند که تغییرات خاص و قابل کنترل را باعث می‌شوند، همچنین اگر تعداد q عامل اغتشاش وجود داشته باشد که این عوامل منجر به تغییر غیر قابل کنترل یا عمومی می‌شوند و همچنین با فرض وجود m نتیجه (پاسخ) که همان خروجی‌های فرآیند و در واقع متغیرهایی هستند که با تغییر در عوامل قابل کنترل سعی در تنظیم آنها (در جهت مطلوب) می‌شود این متغیرها در اهداف کنترل کیفیت، مشخصه‌های کیفی نامیده می‌شوند*(Castilo, 2007)* .

در فرآیندهای صنعتی عوامل ورودی متعددی با سطوح مختلف وجود دارند که هر کدام ممکن است بر روی مشخصات محصول نهایی تأثیرگذار باشند. هنگامیکه فاکتورها و روابط زیادی روی متغیر پاسخ تأثیر داشته باشند روش سطح پاسخ[1] یکی از ابزارهای موثر برای بهینه کردن فرایند می‌باشد*(Montgomery, 2005)*.

یافتن بهترین ترکیب از عوامل مربوط به فرایند تولید، یعنی مشخصه‌های قابل کنترل ورودی و حین فرایند، که منجر به خروجی بهینه محصول در یک فرایند تولید پیوسته شود، مساله تحقیق حاضر است. در این مقاله، ضمن بررسی مشکلاتی که در تحلیل آماری به علت افزایش در تعداد متغیرها و عوامل اثرگذار و همچنین ویژگی‌های فرایند تولید پیوسته که محدودیت‌هایی را به جهت تفکیک و تجزیه مواجه می‌سازد، به ارائه روشی همراه با پیاده سازی آن در فرایند تولید پلی اتیلن ترِفتالات[2] (PET) چرداخته شده است. لذا این مقاله به دنبال پاسخگویی به این سوال می‌باشد که در زمان‌هایی که فرایند تولید محصول پلی اتیلن ترفتالات (PET) در ظرفیت‌های مختلف نیازمند راه‌اندازی و فعالیت می‌باشد، مشخصه‌های قابل کنترل ورودی و حین فرایند (از قبیل مقادیر مواد اولیه و مشخصه‌های دما، فشار و زمان) در چه سطحی باید تنظیم گردند؟

1- Response Surface Methodology (RSM)
2 -Polyethylene Terephthalate (PET)

بیان مساله

زمانی که تعداد فاکتورها یا پارامترها (متغیرهای اثرگذار) بر روی مشخصه‌های کیفی (متغیرهای پاسخ) در یک فرایند تولید پیوسته، زیاد باشد یعنی شاید حتی کمی بیش از ۵ الی ۶ عامل اثرگذار مهم داشته باشیم، دیگر اجرای آزمایش طراحی شده به راحتی امکان‌پذیر نمی‌باشد. مثلا اگر قصد طراحی آزمایش جهت بررسی تنها ۸ عامل یا متغیر بر روی متغیر(های) پاسخ در یک فرایند تولید پیوسته داشته باشیم، در حالت یک دوم غیربلوکی طرح مرکب مرکزی نیازمند انجام ۱۵۴ و در حالت بلوکی نیازمند ۱۶۰ اجرا، هستیم. اگر تعداد عوامل مورد بررسی به ۱۰ مورد برسد، تعداد آزمایشات مورد نیاز در طرح مرکب مرکزی غیر بلوکی و آنهم در حالت یک هشتم (که جزء حداقل‌ترین‌ها از لحاظ اجراست) نیازمند ۱۵۸ اجرا و در حالت بلوکی نیازمند ۱۶۰ اجرا می‌باشیم. همین مورد در طرح باکس- بنکن در هر دو حالت بلوکی و غیربلوکی نیازمند ۱۷۰ اجرا است.

انجام این تعداد آزمایش در یک فرایند تولید پیوسته، بسیار سخت و بعضاً غیرممکن است. در مواقعی که تعداد عوامل اثرگذار مهم به بیش از ۱۰ مورد برسد، حتی در مرحله طراحی آزمایش نیز با مشکل مواجه‌ایم.

به عنوان مثال، در تولید پلی اتیلن ترفتالات (PET) و در فرایند تولید چیپس، چهار راکتور اصلی به صورت سری قرار گرفته‌اند که شامل راکتور استریفیکاسیون[1] اولیه و ثانویه و پلی کاندنسیشن[2] راکتور پِرپُلی[3] و راکتور نهایی[4] می‌باشند. به منظور کنترل متغیرها و پارامترهای اثرگذار بر مشخصه‌های کیفی PET ، مانند چگالی ذاتی (IV)، کربُکسید (COOH)، دی اتیلن گِلایکول(DEG)، اسید ایزوفِتالیک (IPA) و رنگ (Color) و... ، باید بیش از ۱۰۰پارامتر و عامل در جریان تولید به صورت منظم و دوره‌ای مورد اندازه‌گیری و ثبت قرار گرفته و از میان آنها درحدود۳۰ متغیر (پارامتر) مهم‌تر بوده و نهایتاً در حدود۹ متغیر در زمانهایی که تغییراتی در برنامه تولید بوجود آید که منجر به کاهش یا افزایش میزان تولید محصول گردد، در اولویت تغییر و تنظیم مجدد هستند. پارامترهایی از قبیل نسبت مولاریته، مدت زمان اقامت در راکتور اولیه، دمای راکتور اولیه، مدت زمان اقامت در راکتور ثانویه، دمای راکتور ثانویه، میزان خلا در راکتورPP، میزان خلا در راکتور نهایی.

1- ESTRIFICATION
2 -POLYCONDENSATION
3 -Pre Poly Reactor (PP Reactor)
4 -Finisher Reactor

مدلسازی فرایند PET به منظور بهینه سازی آن، با استفاده از روش RSM و طرح غیربلوکی یک چهارم مرکب مرکزی، نیازمند انجام ۱۵۶ آزمایش برای ۹ عامل اثرگذار است، که کاری غیرعملیاتی و غیراقتصادی است.

شاید ساده‌ترین راه حل مواجهه با چنین مشکلی، نادیده گرفتن و کاستن از تعداد عوامل اثرگذار در RSM و درنتیجه دستیابی به تعداد آزمایشات کمتر در مرحله طراحی و امکان پذیر نمودن اجرای آزمایشات باشد. ولی واضح است که با حذف این عوامل، دقت تبیین مدلسازی مزبور کاهش یافته و در مواردی مدلی بدون توجیه رضایت بخش حاصل می‌گردد.

یک راه حل دیگر، تجزیه و تفکیک فرایند به چند بخش و مرحله و انجام بهینه سازی برای هر مرحله به صورت مجزا می باشد. اینکار نیز مشکلاتی دارد که مهم ترین آن کاهش دقت ناشی از تفکیک به علت ماهیت یکپارچگی فرایند تولید پیوسته است. مثلا اگر با تفکیک یک فرایند یکپارچه و پیوسته به ۳ بخش مجزا از هم و انجام آزمون آنالیز واریانس و با فرض پذیرش خطا در سطح ۵ درصد برای هر مرحله، میزان سطح خطای کل که از ضرب خطای ۳ مرحله بدست می آید برابر با ۷۵ درصد می‌شود که این سطح از خطا موجب می‌گردد نتیجه تحقیق برای کل فرایند قابل تعمیم و استناد نباشد.

از سوی دیگر در برخی فرایندهای پیوسته، با توجه به اینکه تنها متغیر(های) پاسخ در خروجی و انتهای فرایند قابل دستیابی و بررسی هستند، فلذا امکان تفکیک و تجزیه آن فرایند به چند بخش و مرحله در حین فرایند وجود ندارد.

با عنایت به توضیحات فوق، سوال اصلی تحقیق حاضر این است که چگونه می توان به بهترین ترکیب از عوامل مربوط به فرایند تولید، یعنی مشخصه‌های قابل کنترل ورودی و حین فرایند را که منجر به خروجی بهینه محصول در یک فرایند تولید پیوسته شود، دست یافت؟ برای حل این مشکلات در یک فرایند تولید پیوسته، در این مقاله ضمن ارائه مدلی مفهومی، در مطالعه‌ای موردی به بررسی فرایند پلی اتیلن ترفتالات (PET) پرداخته شده است.

پیشینه تحقیق

متدولوژی سطح پاسخ روش موثری است که با کمترین منابع و داده‌های کمی با طرح آزمایشی مناسب همزمان بهینه چندین متغیر را تعیین می‌کند مزیت اصلی RSM کاهش

تعداد تکرارهای آزمایشات برای ارزیابی پارامترهای چندگانه و روابط متقابل آنهاست *(Khuri et al., 1996)*. طراحی آزمایش یکی از ارکان اصلی متدولوژی سطح پاسخ است. هنگامی‌که فاکتورها و روابط زیادی روی متغیر پاسخ تأثیر داشته باشند متدولوژی سطح پاسخ (RSM) یکی از ابزارهای موثر برای بهینه کردن فرایند می‌باشد *(Montgomery, 2005)*.

به عنوان مثال در پژوهشی با بکارگیری طرح باکس-بنکن اقدام به طراحی آزمایش به منظور بررسی اثر متغیرهای فرآیند مانند غلظت قلیایی، دما و زمان بر ظرفیت نگهداری آب از هیدرولیز قلیایی الیاف الکتروریسی شده، نموده و همچنین از شبکه عصبی مصنوعی جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی استفاده گردیده است *(Giri Dev et al., 2009)*. همچنین در پژهشی دیگر با استفاده از طرح مرکب مرکزی که یکی از طرح‌های پرکاربرد طراحی آزمایشات است به همراه شبکه عصبی مصنوعی به بررسی پلیمریزاسیون مرتبط با پلی استایرن برای خواص مکانیکی (استحکام کششی و کاهش سایش) با بررسی چهار عامل اثرگذار پرداخته شده است *(Sresungsuwan & Hansupalak, 2013)*.

در تحقیقی دیگر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به ارائه یک مدل برای بررسی اثرات چهار پارامتر بر روی نانو الیاف قطر متوسط پلی اتیلن پرداخته شده و با آزمون‌های آماری مقادیر پیش بینی شده از نانوالیاف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (*Mirzaei et al., 2012*). در پژوهشی دیگر اقدام به بکارگیری روش سطح پاسخ برای بررسی گرمادهی الکتریکی قالب و با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی[1] که برای آزمایش فاکتوریل مورد استفاده قرار می‌گیرد، شده است. جهت بررسی ۳ متغیر پاسخ از ۳ پارامتر (متغیر) توضیحی یا اثرگذار برای به دست آوردن مقادیر استفاده نموده و سه مدل برای پیش بینی متغیرهای وابسته بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیون ایجاد گردیده است. این مدل سطح پاسخ به همراه الگوریتم ازدحام ذرات موثر[2] برای طراحی بهینه‌سازی سیستم گرمایش الکتریکی قالب بخصوصی ارائه شده است *(Wang et al., 2011)*. در موردی دیگر پیشنهاد شده است به منظور مدل‌سازی فرآیندهای قابل اعتماد در زمینه تولید یکپارچه کامپیوتری[3] و زمانی که اطلاعات در مورد رابطه میان پارامترهای مختلف تولید

1- Central Composite Design (CCD)
2 -Effective Particle Swarm Algorithm
3 -Computer Integrated Manufacturing (CIM)

وجود ندارد، از شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان مدل فرایند استفاده شود. به همین منظور یک مدل شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر الگوریتم ژنتیکی برای فرایندهای گردشی[1] در صنعت تولید پیشنهاد شده است *(Venkatesan et al., 2009)*.

روش تحقیق

با توجه به اینکه این پژوهش درصدد طراحی و اجرای مدل مفهومی -ریاضی مناسب برای بهینه‌سازی فرآیند تولیدی که متأثر از چندین متغیر می‌باشد، می‌باشد لذا روش تحقیق از نظر هدف کاربردی- توسعه‌ای، از نظر جمع‌آوری اطلاعات تجربی- میدانی و از نظر تحلیل اطلاعات تحلیل‌های توصیفی- تبیینی ریاضی است. همچنین فرآیند تولید محصول پلی اتیلن ترفتالات (PET) که یکی از تولیدات کلیدی در صنعت پتروشیمی به حساب می‌آید و در تولید الیاف پیوسته، نخ صنعتی، منسوجات، بطری‌های مایعات، ظروف غذایی و دارویی و ... کاربرد بسیاری دارد، قلمرو مکانی تحقیق حاضر است که در بازه زمانی ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۱ انجام گرفت.

با انجام مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه با کارشناسان تولید اقدام به شناسایی متغیرهای اثـرگذار و مشخصه‌های کیفی محصول پلی اتیلن ترفتالات (PET) گردید و داده‌های مربـوط به مشخصه‌های قابل کنترل ورودی و حین فرایند و مشخصه‌های نهایی محصول پلی اتیلن ترفتالات (PET) از خط تولید ثبت و جمع آوری شد.

در این مقاله ۹ عامل مورد بررسی قرار گرفته است ازاینرو طرح غیربلوکی یک هشتم مرکب مرکزی[2] که شامل ۱۵۶ اجراست بکارگرفته شد.

به منظور تولید داده‌های مورد نیاز مطابق طرح آزمایش فوق، اقدام به طراحی مدل شبیه‌سازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی[3] و الگوریتم‌های فراابتکاری[4] گردید.

در تمام مراحل فوق به علت پیچیدگی‌های موجود، از نرم‌افزارهای متناسب طراحی آزمایشات، رگرسیون، شبکه عصبی و الگوریتم‌های فراابتکاری از قبیل MINITAB MATLAB و SPSS استفاده شد.

1 -Turning Process
2 -Central Composite quarter (CCD) - Unblocked
3 -Artificial Neural Network (ANN)
4 -Met heuristics Algorithms

مدل مفهومی پیشنهادی

برای پاسخ به سوالات تحقیق و به منظور بهینه‌سازی فرآیند تولید پیوسته، مدل مفهومی با بهره‌گیری از رویکرد تلفیقی روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری طی گام‌های زیر پیشنهاد می‌گردد:

۱-شناسایی و انتخاب مشخصه‌های کیفی (متغیرهای پاسخ) و همچنین متغیرهای تأثیرگذار قابل کنترل (متغیرهای ورودی) محصول مورد نظر

۲-جمع‌آوری داده‌های واقعی، معتبر و متنوع مربوط به متغیرهای پاسخ و متغیرهای تأثیرگذار

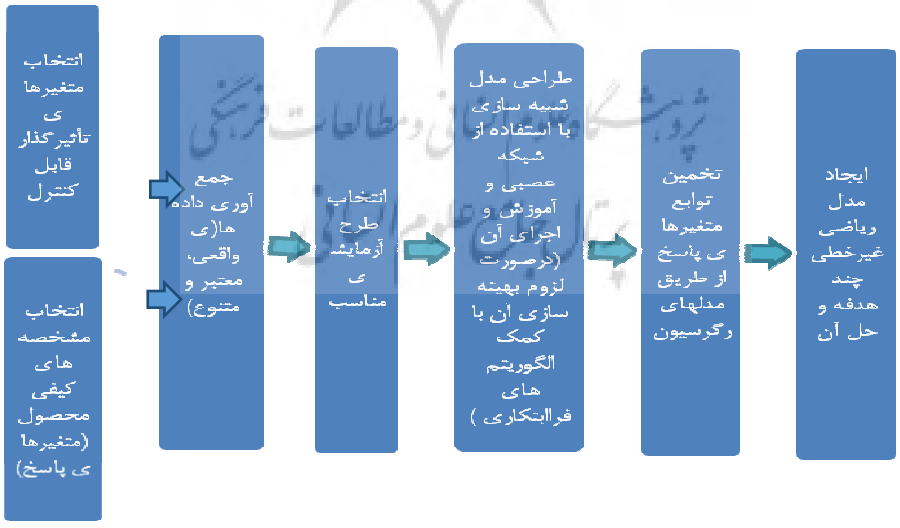
۳-انتخاب طرح آزمایش مناسب (از قبیل طرح مرکب مرکزی، باکس- بنکن و ...)

۴-طراحی مدل شبیه‌سازی با استفاده از شبکه عصبی و آموزش آن با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده و درصورت لزوم بهینه سازی آن با کمک الگوریتم‌های فراابتکاری

۵-شبیه سازی و تولید داده‌های مورد نیاز در آنالیز آماری مطابق طرح آزمایش منتخب با استفاده از مدل شبکه عصبی طراحی شده

۶-انجام آزمون آماری و تخمین توابع متغیرهای پاسخ از طریق مدلهای رگرسیون

۷-ایجاد مدل ریاضی غیرخطی چند هدفه با توجه به قیود و محدودیت‌های مشخصه های کیفی (متغیرهای پاسخ) و حل مدل



شکل ۱: مدل مفهومی پیشنهادی

یافته ها

همانگونه که اشاره شد فرایند تولید PET در بخش تولید چیپس از چهار ایستگاه اصلی (راکتور) که به صورت سری قرار گرفته‌اند تشکیل شده است و در دسته‌بندی سیستم‌های تولیدی در زمره سیستم‌های تولیدی پیوسته[1] قرار می‌گیرد.

در این نوع سیستمهای تولیدی معمولاً یک نوع یا انواع محدودی از مواد اولیه از یک سری ماشین‌آلات و ایستگاه‌های تولیدی بطور زنجیره‌ای عبور نموده، و پس از ایجاد تغییراتی در مواد اولیه که اغلب شامل تغییرات شرایط شیمیائی و فیزیکی می باشد، به یک یا چند محصول محدود تبدیل می‌شوند.

جهت مدلسازی فرایند PET و از بین متغیرهای پاسخ (مشخصه‌های کیفی)، با نظر کارشناسان، پنج متغیر چگالی ذاتی (IV)، کربُکسیل (COOH)، دی اتیلن گِلایکول(DEG)، ایزوفِتالیک اسید (IPA) و رنگ (Color) انتخاب گردید. همچنین از میان ۱۳۰ پارامتری که در جریان تولید به صورت منظم و دوره‌ای مورد اندازه‌گیری و ثبت قرار می گیرند درحدود ۳۰ متغیر (پارامتر) مهم‌تر تحت کنترل قرار داشته و از این میان با نظر کارشناسان به ترتیب اولویت ، ۹ متغیر اصلی که بیشترین اثر فلذا حساسیت را در تنظیمات کنترلی بالاخص در زمانهای تغییر ظرفیت تولید دارا می‌باشند، انتخاب گردید. این متغیرهای اثرگذار شامل: نسبت مولاریته (A)، مدت زمان اقامت در راکتور اولیه (B)، دمای راکتور اولیه (C)، مدت زمان اقامت در راکتور ثانویه (D)، دمای راکتور ثانویه (E)، میزان خلا در راکتور PP (F) ، دمای HTM در راکتور PP (G) ، میزان خلا در راکتور نهایی (H) و دمای ۴۰۴ در راکتور نهایی (J) می باشند. همچنین از آنجائیکه هریک از متغیرهای پاسخ که مشخصه های کیفی محصول تولیدی‌اند و الزاماً باید در دامنه استانداردشان قرار داشته باشند، فلذا مدلسازی از نوع چندهدفه غیرخطی می‌باشد.

از بین الگوریتم‌های فراابتکاری که خود در زمره روش‌های تقریبی بهینه‌سازی ترکیبی قرار می‌گیرند، و از میان الگوریتم ژنتیک[2]، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات[3] و الگوریتم رقابت استعماری[4] که از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت[5] هستند و با

1-Continuous Production Systems
2 -Genetic Algorithm (GA)
3 -Particles Swarm Optimization (PSO)
4 -Imperialist Competitive Algorithm (ICA)
5 -Population-Based Met heuristics

توجه به معیار حداقل مربع خطا[1] (MSE)، الگوریتم ازدحام ذرات –که با توجه به شرایط این تحقیق خطای کمتری را ارائه می‌داد – جهت بهینه‌سازی مدل شبکه عصبی طراحی شده انتخاب گردید.

پس از آموزش[2] شبکه پرسپترون سه لایه طراحی شده با داده‌های واقعی کد شده فرآیند تولید PET ، اقدام به شبیه‌سازی و تولید داده‌های مورد نیاز روش سطح پاسخ (RSM) مطابق با طرح آزمایش منتخب، گردید. علت کد کردن داده‌ها اینست که به جهت وجود پیوستگی بین مراحل متوالی یک فرایند تولید پیوسته - به گونه‌ای که خروجی یک مرحله از تولید، عینا ورودی مرحله بعدی متصل به خود است - ، لذا بین متغیرهای اثرگذار (مستقل) همبستگی وجود دارد. زمانی متغیرهای مستقل همبستگی دارند و بین متغیرهای مستقل، وابستگی خطی مشاهده می‌شود گفته می‌شود که همبستگی درونی (داخلی)[3] یا هم راستایی چندگانه (چند همخطی)[4] وجود دارد، درچنین مواردی استنتاج بر مبنای مدل رگرسیون می‌تواند گمراه کننده باشد *(رضایی و همکاران، ۱۳۸۷)*. شاخص عامل تورم واریانس[5] (VIF)، که از تقسیم عدد یک بر مقدار شاخص تولرانس[6] حاصل می شود، نشان دهنده مهم در چگونگی وضعیت هم خطی بین متغیرهاست. هرچه مقدار VIF بیشتر باشد، باعث می شود که واریانس ضرایب رگرسیونی افزایش یافته و درنتیجه مدل رگرسیون کمترین مربعات برای پیش‌بینی نامناسب باشد. مقدار شاخص VIF بزرگتر از عدد ۲ ، نشانگر میزان هم خطی بیشتر است. میزان این شاخص برای بیشتر متغیرهای مستقل تحقیق، بسیار بیشتر از ۱۰ را نشان می‌دهد و این میزان بسیار بزرگتر از عدد ۲ است، بنابراین وجود هم خطی بالایی را تایید می‌کند. شاخص مقادیر ویژه[7] نیز یک دیگر از نشانگرهای مورد استفاده است و نشان می‌دهد هرچه مقدار آن برای متغیرهای مساله به صفر نـزدیک باشد، همبستگی زیادی بین آنها وجود دارد و تغییرات کوچک در مقادیر داده‌ها به تغییرات بزرگ در برآورد ضرایب معادله رگرسیونی منجر می‌شود. در تحقیق حاضر اکثر متغیرهای مستقلی که وارد معادله رگرسیون شده‌اند مقدار صفر و یا نزدیک به

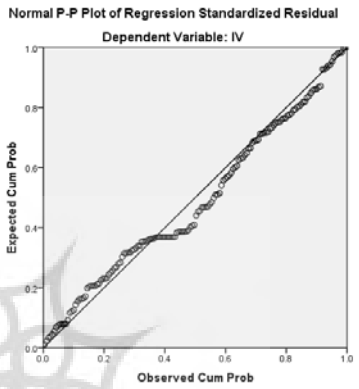
1- Mean-squared error (MSE)
2 -Training
3 -Internal Correlation
4 -Multicollinearity
5-Variance Inflation Factor (VIF)
6 -Tolerance
7 -Eigenvalue

صفر را برای شاخص مقادیر ویژه اختیار نموده‌اند که این نشان‌دهنده همبستگی زیاد بین متغیرهای مساله است. شاخص وضعیت[1] نیز وجود یا عدم وجود هم خطی بین متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد، نشان از نبود هم خطی بین متغیرهای مستقل دارد اما موقعی که مقدار آن بزرگتر از ۱۵ باشد، نشان‌دهنده احتمال وجود هم خطی بین متغیرهای مستقل است و زمانی‌که مقدار این شاخص بزرکتر از ۳۰ باشد، بیانگر وجود مشکل جدی در وضعیت هم خطی است و در این صورت نمی‌توان از رگرسیون معمولی و متداول استفاده نمود. اکثر قریب به اتفاق مقادیر شاخص وضعیت عددی بزرگتر از ۳۰ دارند که در چند مورد حتی این مقدار دهها و صدها برابر بزرگتر را نشان می‌دهد و این به وضوح گویای وجود هم خطی بین متغیرهای مستقل تحقیق است *(منصورفر، ۱۳۸۷)*. یکی از راه‌های مقابله با چند همخطی، تعریف دوباره متغیرهای رگرسیونی یا همان تغییر متغیر از طریق کد کردن داده‌ها است *(رضایی و همکاران، ۱۳۸۷)*.

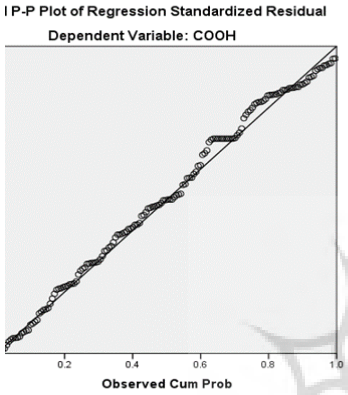
سپس به منظور پیش‌بینی و انتخاب متغیرهای اثرگذار بر متغیرهای پاسخ از روش رگرسیون گام به گام[2] و به تفکیک هر متغیر پاسخ استفاده گردید. این روش، متغیرها را یک به یک وارد مدل می‌کند به اینصورت که ابتدا متغیری که بیشترین همبستگی با متغیر وابسته (پاسخ) دارد را انتخاب می‌کند. دومین متغیری که وارد تحلیل می‌شود متغیری است که پس از تفکیک متغیر مقدم بر آن، موجب بیشترین افزایش در مقدار ضریب تعیین[3] (R^2) می‌شود. در این روش، ورود متغیرها به مدل را تا زمانی انجام داده که سطح معنی داری به ۹۵ درصد برسد، یعنی سطح خطا ۵ درصد گردد، سپس عملیات متوقف می‌شود (حبیب پور، ۱۳۹۱). به تفکیک برای همه متغیرهای پاسخ مورد تحقیق، ضرایب تأثیر رگرسیونی استاندارد نشده[4] (B) و ضرایب تأثیر رگرسیونی استاندارد شده[5] (β) و همچنین آماره آزمون t و سطح معنی‌داری محاسبه محاسبه شده‌اند. از ضرایب B برای تعیین اهمیت نسبی متغیرهای مستقل در پیش‌بینی تغییرات متغیر وابسته و از ضرایب β برای تعیین میزان اثر خالص و استاندارد متغیرهای مستقل (مجزا از تأثیر سایر متغیرهای

1- Condition Index
2 -Stepwise Method
3 -R-squared
4 -Unstandardized Coefficients
5 -Standardized Coefficients

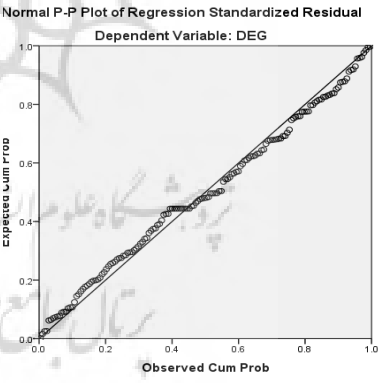
مستقل) بر روی متغیر وابسته استفاده می‌شود. برای بررسی پذیره نرمال بودن، از رسم نمودار احتمال نرمال مانده‌ها[1] که شیوه‌ای مفید در این خصوص است، بکار گرفته شد. در صورتی که توزیع زیربنایی خطا نرمال باشد ، این نمودار شبیه یک خط مستقیم است .



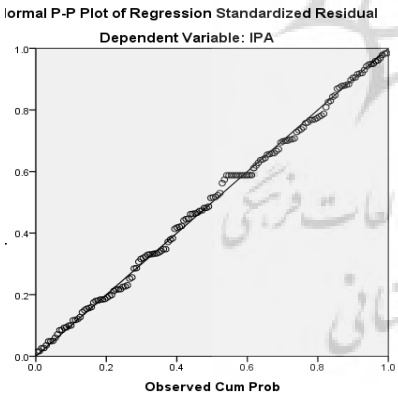
شکل ۲: نمودار احتمال نرمال مانده برای متغیر IV



شکل ۳:نمودار احتمال نرمال مانده برای متغیر COOH



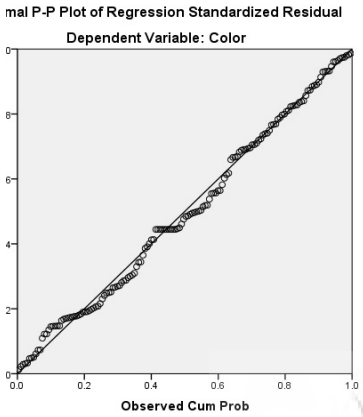
شکل ۴: نمودار احتمال نرمال مانده برای متغیر DEG



شکل ۵: نمودار احتمال نرمال مانده برای متغیر IPA

1- Residual

با توجه به شکل‌های ۲ تا ۶ احتمال نرمال مانده‌ها برای مدل برازانده شده برای متغیرهای پاسخ تحقیق، مشاهده می‌شود که تقریبا ۱۰۰درصد نمونه‌ها بین ۳± انحراف معیار هستند و توزیع تجمعی نرمال در آنها تقریبا به شکل خط مستقیم است. بنابراین نتیجه می‌شود که مانده‌ها، استاندارد و دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس یکسان هستند. همچنین نتیجه می‌شود که مدل برازش شده دارای کفایت کافی برای توصیف داده‌ها می‌باشد .



شکل ٦: نمودار احتمال نرمال مانده برای متغیر Color

همانگونه که در جدول ۱ ارائه گردیده، با توجه به مقدار ضریب تعیین تعدیل شده[1] برای متغیرهای پاسخ، مجموعه متغیرهای ورودی حاضر در هر معادله رگرسیون به تفکیک توانسته‌اند ۷۶/۵ درصد از تغییرات اولین متغیر پاسخ یعنی IV، ۶۶/۵ درصد از تغییرات دومین متغیر پاسخ (COOH)، ۹۵/۵ درصد از تغییرات سومین متغیر پاسخ (DEG)، ۸۹/۵ درصد از تغییرات چهارمین متغیر پاسخ (IPA) و ۸۶/۲ درصد از تغییرات پنجمین متغیر پاسخ که رنگ (Color) است را تبیین کنند. همچنین از آنجائیکه مقدار آماره آزمون دوربین – واتسون به دست آمده برای تمامی ۵ متغیر پاسخ بین ۱/۵ الی ۲/۵ قرار دارد لذا عدم همبستگی بین خطاها نیز تایید می‌شود.

جدول ۱: خلاصه آزمون های آماری برای تبیین متغیرهای وابسته (پاسخ)

Durbin-Watson	Std. Error of the Estimate	Adjusted R Square	R Square	R	Dependent Variable
1.672	.003	.765	.786	.887[a]	IV
2.158	2.11	.665	.689	.830[b]	COOH
2.077	.030	.955	.962	.981[c]	DEG
1.710	.028	.895	.905	.951[d]	IPA
1.846	.366	.862	.873	.934[e]	Color

a. Predictors: (Constant), A, D, C, J, H, G, HH, B, GH, BH, EH, DF, G, DG

1- Adjusted R Square

b. Predictors: (Constant), D, F, J, C, E, H, BB, A, AB, AE, AA
c. Predictors: (Constant), F, A, C, B, AA, H, AG, AB, E, AD, AC, AJ, G, J, F, BB, D, HH, DG, BJ, BH, BG, JJ, AH
d. Predictors: (Constant), F, E, G, B, A, C, D, DF, CD, FG, DE, AC,AD,H, CE
e. Predictors: (Constant), D, E, B, A, G, F, H, C, AD, J, FG, FJ

روابط ریاضی ۱ تا ۵ ، به ترتیب مدل مرتبه دوم برازانده شده برای متغیرهای پاسخ IV، COOH، DEG، IPA وColor بر طبق متغیرهای کد شده و با استفاده از نرم افزار SPSS نشان می‌دهند:

$\hat{Y}_1 = .624 - .004\ A - .001\ B - .003\ C - .003\ D + .001\ G + .002\ H - .002\ J + .001\ BH + .001\ EH - .001\ GH + .002\ HH$ رابطه ریاضی(۱)

$\hat{Y}_2 = 29.659 + .586\ A - .982\ C - 1.929\ D + .721\ E + 1.423\ F - .666\ H + 1.132\ J - .561\ AB + .51\ AE - .904\ AA - .938\ BB$ رابطه ریاضی (۲)

$\hat{Y}_3 = 1.358 + .062\ A - .043\ B - .044\ C + .01\ D - .031\ E + .069\ F - .021\ G + .041\ H - .018\ J + .036\ AB - .023\ AC - .024\ AD - .016\ AF - .006\ AH - .022\ AJ + 006\ BG - .007\ BH - .008\ BJ - .008\ DG + .067\ AA + .017\ BB + .013\ HH + .012\ JJ$
رابطه ریاضی (۳)

$\hat{Y}_4 = 1.627 - .021\ A - .021\ B - .016\ C - .015\ D + .039\ E + .052\ F + .039\ G + .005\ H - .006\ AC - .005\ AD - .011\ CD + .005\ CE + .007\ DE + .012\ DF + .009\ FG$
رابطه ریاضی (۴)

$\hat{Y}_5 = 80.579 - .326\ A + .349\ B - .114\ C - .544\ D + .482\ E + .248\ F + .288\ G + .153\ H - .091\ J + .107\ AD - .016\ AF - .072\ FG - .069\ FJ$ رابطه ریاضی (۵)

با توجه به معادلات توابع انطباق[1] داده شده $\hat{Y}_1$ الی $\hat{Y}_5$ ، مدلسازی ریاضی فرایند مورد تحقیق و با توجه الزامات استاندارد مشخصه‌های کیفی یا متغیرهای پاسخ (که به صورت محدودیت‌هایی در مدلسازی گنجانیده شده است)، به صورت زیر می‌باشد:

$Z: \quad \hat{Y}_1, \hat{Y}_2, \hat{Y}_3, \hat{Y}_4, \hat{Y}_5$
St. رابطه ریاضی (۶)

1- Fit

$$.6 \leq \hat{Y}1 \leq .65 \quad (1)$$
$$23 \leq \hat{Y}2 \leq 33 \quad (2)$$
$$1.5 \leq \hat{Y}3 \leq 2.5 \quad (3)$$
$$1.5 \leq \hat{Y}4 \leq 2 \quad (4)$$
$$70 \leq \hat{Y}5 \quad (5)$$

از آنجائی‌که متغیرهای پاسخ که همان مشخصه‌های کیفی محصول تولیدی اند، الزاما باید در دامنه استانداردشان قرار داشته باشند، فلذا مدلسازی از نوع چند هدفه غیرخطی می‌باشد.

ثابت‌های محدودیت‌های مدل، الزامات استاندارد مشخصه‌های کیفی متغیرهای پاسخ (متغیر چگالی ذاتی (IV)، کربُکسیل (COOH)، دی اتیلن گِلایکول(DEG)، ایزوفِتالیک اسید (IPA) و رنگ (Color)) می باشند.

به منظور ایجاد مدل برنامه‌ریزی آرمانی[1] ، از آنجایی‌که محدودیت‌های ۱ تا ۴ رابطه ریاضی (۶) الزام استانداردی هستند، ضمن آنکه دستیابی به مقادیری بیش از مقدار تعیین شده و یا کمتر از آن نامطلوب بوده، مقدار وسط دامنه نقطه مطلوب دستیابی می باشد. در این حالت محدودیت های متناظر با آرمان، شامل هر دو متغیر انحراف از آرمان مثبت و منفی $d_i^+, d_i^- \ (i = 1,2,3,4)$ می‌باشند و آن بخش از تابع هدف نیز به عنوان حداقل کردن همزمان این متغیرهای انحراف از آرمان تعریف می‌گردد. در مورد محدودیت ۵، از آنجاییکه حداکثرسازی مقدار، جزء الزامات استانداردی است، فلذا مقدار کران پایین در محدودیت لحاظ گردید و همچنین d_5^- در تابع هدف کمینه‌سازی وارد گردید.

در نتیجه مدل برنامه‌ریزی آرمانی تحقیق حاضر (۸)، بر اساس معادلات توابع انطباق[2] داده شده $\hat{Y}_1$الی $\hat{Y}_5$ به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min } d_1^+ + d_1^- + d_2^+ + d_2^- + d_3^+ + d_3^- + d_4^+ + d_4^- + d_5^-$$

St.

$$\hat{Y}_1 + d_1^- - d_1^+ = \frac{(.6+.65)}{2}$$

رابطه ریاضی (۷)

$$\hat{Y}_2 + d_2^- - d_2^+ = \frac{(23+33)}{2}$$
$$\hat{Y}_3 + d_3^- - d_3^+ = \frac{(1.5+2.5)}{2}$$

1-Goal Programing Model
2-Fit

$$\hat{Y}_4 + d_4^- - d_4^+ = \frac{(1.5+2)}{2}$$
$$\hat{Y}_5 + d_5^- - d_5^+ = 70$$
$$.6 \leq \hat{Y}_1 \leq .65$$
$$23 \leq \hat{Y}_2 \leq 33$$
$$1.5 \leq \hat{Y}_3 \leq 2.5$$
$$1.5 \leq \hat{Y}_4 \leq 2$$
$$70 \leq \hat{Y}_5$$
$$-1 \leq A, B, \ldots, GJ, HJ, AA, BB, \ldots, HH, JJ \leq 1$$

مدل فوق این امکان را می‌دهد که در ظرفیت های مختلف تولیدی و با تعیین مقدار متغیر A یا همان مقدار چگالی نسبت مولاریته اولیه، مقادیر سایر متغیرهای اثرگذار (که همان تنظیمات فرایند تولید می‌باشند) در ظرفیت‌های مختلف تولیدی ضمن رعایت حدود استاندارد متغیرهای پاسخ (مشخصه‌های کیفی محصول)، مشخص گردند.

نتیجه گیری

در این مقاله به موضوع بهینه‌سازی پارامترهای فرایند تولید پیوسته و محدودیت‌های موجود در انتخاب تعداد این پارامترها (عوامل اثرگذار) پرداخته و مدلی مفهومی به همراه گام‌های مختلف آن با استفاده از رویکرد تلفیقی روش سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شد. به عنوان مثال نیز، جهت بهینه‌سازی فرایند تولید پلی اتیلن تِرفتالات (PET) در ظرفیت های مختلف تولید اقدام به مدلسازی ریاضی ۵ مشخصه کیفی مهم شامل چگالی ذاتی (IV)، کربُکسیل (COOH)، دی اتیلن گِلایکول(DEG)، اسید ایزوفِتالیک (IPA) و رنگ (Color) گردید. به همین منظور، از ۹ پارامتر (متغیر قابل کنترل) اثرگذار فرایند تولید نسبت مولاریته (A)، مدت زمان اقامت در راکتور اولیه (B)، دمای راکتور اولیه (C)، مدت زمان اقامت در راکتور ثانویه (D)، دمای راکتور ثانویه (E)، میزان خلا در راکتور PP (F) ، دمای HTM در راکتور PP (G) ، میزان خلا در راکتور نهایی (H) و دمای ۴۰۴ در راکتور نهایی (J) استفاده شد.

در شرایطی که تغییراتی در برنامه تولید بوجود آید که منجر به کاهش یا افزایش میزان تولید محصول گردد، با مشخص کردن مقدار متغیر نسبت مولاریته مواد اولیه(A)، مقادیر سایر متغیرهای اثرگذار (که همان تنظیمات فرایند تولید می‌باشند) ضمن رعایت حدود استاندارد متغیرهای پاسخ (مشخصه‌های کیفی محصول) بدست خواهد آمد. البته با انتخاب و وارد کردن متغیرهای اثرگذار دیگر و همچنین ایجاد تنوع بخشی بیشتر در داده‌ها

می‌توان به مدل ریاضی باکفایت‌تری در تبیین متغیرهای پاسخ دست یافت. همچنین پیشنهاد می‌گردد نتایج بدست آمده را با روش رگرسیون ریج[1] - که برآوردگری اریب با واریانس کوچکتر در مقایسه با روش رگرسیون حداقل مربعات می‌باشد – مورد مقایسه و تحلیل قرار گیرد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1-Ridge Regression

منابع فارسی

۱-امیری، مقصود و مرتضی موسی خانی و حسین شیخی و محمد اسماعیل بابائی (۱۳۸۸)، « رگرسیون خطی کاربردی همراه با نرم‌افزار SAS »، قزوین، مرکز انتشارات علمی دانشگاه آزاد اسلامی قزوین.

۲-حبیب‌پور، کرم و رضا صفری شالی (۱۳۹۱)، « راهنمای جامع کاربرد SPSS در تحقیقات پیمایشی (تحلیل داده‌های کمی) »، تهران، نشر لویه.

۳-رضائی، عبدالمجید و افشین سلطانی (۱۳۸۷)، « مقدمه‌ای بر تحلیل رگرسیون کاربردی »، اصفهان، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.

۴-منصورفر، کریم (۱۳۸۸)، « روش‌های پیشرفته آماری همراه با برنامه‌های کامپیوتری »، تهران، موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

منابع انگلیسی

1-Castilo, D. (2007). Process Optimization: a Statistical Method. Springer.

2-Giri Dev, V., Rengaswami, J. R. V., Senthilkumar, M., Gupta, D., Ramakrishna, S. (2009) Prediction of water retention capacity of hydrolyzed electrospun polyacrylonitrile fibers using statistical model and artificial neural network. Journal of Applied Polymer Science, Volume 113.

3-Khuri, A. I., Cornell, J. A. (1996). Response Surfaces, New York: Dekker.

4-Montgomery, D.C. (2005). Design and Analysis of Experiments, New York: John Wiley & Sons.

5-Mirzaei, E., Amani, A., Sarkar, S., Saber, R., Mohammadyani, D., Faridi-Majidi, R. (2012). Artificial neural networks modeling of electrospinning of polyethylene oxide from aqueous acid acetic solution. Journal of Applied Polymer Science, Volume 125.

6-Sresungsuwan, N., Hansupalak, N. (2013). Prediction of mechanical properties of compatibilized styrene/natural-rubber blend by using reaction conditions: Central composite design vs. artificial neural networks. Journal of Applied Polymer Science, Volume 127.

7-Venkatesan, D., Kannan, K., Saravanan, R. (2009). A genetic algorithm-based artificial neural network model for the optimization of machining processes. Neural Computing and Applications, Volume 18.

8-Wang, G., Zhao, G., Guan, Y. (2011). Research on optimum heating system design for rapid thermal response mold with electric heating based on response surface methodology and particle swarm optimization. Journal of Applied Polymer Science, Volume 119.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی