بهینه‌سازی مقاوم فرآیند تولید ماست تغلیظ شده‌ی تقلیدی بر پایه‌ی روش‌های موجود در طراحی آزمایش‌ها و تصمیم‌گیری چند معیاره

رضا برادران کاظم زاده [۱ *]، علی سلماس نیا [۲]، بهنوش کوهستانی [۳]

۱- دانشیار بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۸۹/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۰/۸/۳)

چکیده

تنظیم بهینه‌ی متغیرهای کنترلی در جهت بهبود عملکرد فرآیندهای تولیدی یکی از مسائل مهم در صنایع غذایی محسوب می‌شود. در طی سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای بهینه‌سازی فرآیندهای صنایع غذایی ارائه شده است. با این حال روش‌های موجود عمدتاً به منظور بهینه‌سازی مسائل تک‌هدفه توسعه یافته‌اند. این در حالی است که در بیشتر فرآیندهای تولیدی بیش از یک مشخصه کیفی مدنظر می‌باشد که لازم است به طور همزمان بهینه شوند. هدف از این مطالعه بهینه‌سازی فرآیند تولید ماست تغلیظ شده تقلیدی است. در این ارتباط، سه تابع هدف ماده جامد کل(مربوط به بافت محصول)، اسیدیته (مربوط به طعم محصول) و هزینه واحد محصول در نظر گرفته شده‌اند و یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه بر اساس مفاهیم طراحی آزمایش‌ها، روش سطح پاسخ و نسبت سیگنال به اختلال ارائه شده است. روش پیشنهادی نه تنها مجموع انحراف اهداف از مقادیر مطلوبشان را به حداقل ممکن می‌رساند بلکه واریانس توابع هدف و بیشینه‌ی انحراف آنها از مقادیر مطلوبشان را نیز کمینه می‌کند و قابلیت استفاده برای حل مسایل با هر دو نوع متغیرهای تصمیم گسسته و پیوسته را دارد.

کلید واژگان: بهینه سازی چندهدفه، طراحی آزمایش‌ها، نسبت سیگنال به اختلال، روش سطح پاسخ، ماست تغلیظ شده‌ی تقلیدی

* مسئول مکاتبات: rkazem@modares.ac.ir

www.SID.ir
Archive of SID

۱- مقدمه

امروزه رشد و توسعه‌ی جوامع و پیشرفت علوم و صنایع غذایی، سبب پیدایش عادت‌ها و سبک‌های نوین غذایی شده است، به گونه‌ای که نیاز به تنوع محصولات و پیدایش فرآورده‌های جدید غذایی به شکل روزافزونی احساس می‌شود. از طرفی سازمان‌ها ناگزیرند به منظور اطمینان از بقای خود در بازار و رقابت با سایر تولیدکنندگان، ضمن کاهش هزینه‌های تولید، محصولاتی با کیفیت بالا را تولید کنند.به همین دلیل استفاده از ابزارهایی که بتواند آنها را در دستیابی به این هدف و بهینه‌سازی فرایندهای مرتبط با تولید محصولات غذایی یاری کند روز به روز اهمیت بیشتری می‌یابد.

هر روش بهینه‌سازی دربرگیرنده‌ی شرایط معین قابل تغییری است که معمولاً متغیرهای تصمیم[۱] نامیده می‌شوند و هدف آن کمینه یا بیشینه کردن معیار(های) از پیش تعیین شده‌ای است که اصطلاحاً تابع هدف نامیده می‌شوند. بنابراین بهینه‌سازی یک فرآیند به معنای پیدا کردن مقادیری از متغیرهای تصمیم است که با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود، توابع هدف را به مقادیر مطلوب آنها نزدیک می‌کند.نکته مهمی که در رابطه با روش‌های بهینه‌سازی باید به آن توجه کرد این است که یک فرآیند بهینه‌سازی باید کارا و سیستماتیک باشد، بنابراین روش‌هایی از جمله سعی و خطا[۲]، جستجوی کامل[۳] و رویکرد یک متغیر در یک زمان[۴]را نمی‌توان بهینه‌سازی نامید.

مدل‌های ریاضی ارائه شده برای بهینه‌سازی فرآیندهای غذایی اغلب به دلیل غیرخطی بودن، جزء مسائل چند نمایی[۵] محسوب می‌شوند، به این معنا که فضای حل این مسائل دارای چندین نقطه‌ی اکسترمم است که غالب آنها بهینه‌های محلی بوده و احتمالاً تنها یکی از آنها بهینه‌ی سراسری است. اکثر روش‌هایی که در ادبیات برای حل مسائل غیرخطی ارائه شده است، روش‌های تکرارشونده[۶] و مبتنی بر شیب[۷]هستند. این دسته از روش‌ها به دلیل داشتن ماهیت محلی غالباً به سمت یک جواب محلی که معمولاً نزدیک‌ترین نقطه‌ی بیشینه (کمینه) به نقطه‌ی شروع است همگرا می‌شوند و توانایی یافتن جواب بهینه‌ی سراسری را ندارند. به همین دلیل به منظور کسب اطمینان از جواب‌های حاصله باید از روش‌های بهینه‌سازی کلی[۸] (GO)استفاده کرد. روش های GO موجود را می‌توان به دو دسته‌ی روش‌های قطعی و روش‌های تصادفی تقسیم‌بندی کرد. اگرچه روش‌های قطعی دستیابی به جواب بهینه کلی را تضمین می‌کنند، ولی در برخی از مسائل امکان حل آنها در زمان محدود و منطقی وجود ندارد و علی‌رغم اینکه روش‌هایی مانند انشعاب و تحدید[۹] دارای خاصیت همگرایی هستند، زمان حل آنها با بزرگ شدن اندازه‌ی مسئله به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در مقابل، بسیاری از روش‌های تصادفی که بسیاری از آنها بر پایه‌ی پدیده‌های فیزیکی و بیولوژیکی به وجود آمده‌اند، قادرند در زمان‌هایی نسبتاً کوتاه به جواب‌هایی با کیفیت مناسب (نزدیک به جواب بهینه) دست یابند، اما تضمینی برای رسیدن به بهینه‌ی کلی وجود ندارد که از آن جمله می‌توان به روش‌هایی همچون تبرید شبیه‌سازی شده[۱۰](SA)، کلونی مورچگان[۱۱]، جستجوی ممنوعه[۱۲](TS) و الگوریتم ژنتیک[۱۳](GA) اشاره کرد. از میان روش‌های موجود الگوریتم ژنتیک در حوزه‌ی وسیعی از مسائل مورد استفاده قرار گرفته است و در سالیان اخیر کاربرد آن در کنترل بهینه‌ی سیستم‌های تولیدی غذایی و کشاورزی از جمله بهینه‌سازی عملیات حرارتی میوه‌ها در طول زمان ذخیره سازی [۱] و کنترل بهینه‌ی فرآیند ذخیره‌سازی میوه [۲] به طور گسترده‌ای مشاهده می‌شود. GA یک تکنیک بهینه‌سازی ترکیبی است که با استفاده از شبیه‌سازی فرآیندهای مبتنی بر ژنتیک، عموماً به منظور یافتن مقدار بهینه‌ی توابع هدف پیچیده و غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در طول سالیان گذشته، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی[۱۴](ANN) نیز به عنوان ابزاری برای مدل‌سازی

1. Decision variables
2. Trial-and-Error
3. Exhaustive search
4. One-variable-at-a-time
5. Multimodal
6. Iterative
7. Gradient-based
8. Global optimization
9. Branch &Bound
10. Simulated annealing
11. Ant colony
12. Tabu search
13. Genetic algorithm
14. Artificial neural networks

Archive of SID

www.SID.ir

فرآیندهای غذایی مورد استفاده قرار گرفته است.تورسیلا و همکاراندر سال ۲۰۰۷ [۳] از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش بینی دو پارامتر موردعلاقه در فرایندهای غذایی تحت فشار بالا[1](HP) یعنی بیشینه یا کمینه‌ی دما بعد از تحت فشار قرار دادن و زمان موردنیاز برای تعادل مجدد حرارتی استفاده کردند. همچنین از ANN به منظور بهینه‌سازی در فرایندهای غذایی گوناگونی همچون تکنولوژی های خشک کردن [۴] تخمیر [۵] رئولوژی غذایی [۶] و فرایندهای حرارتی [۷] نیز استفاده شده است. اگرچه روش‌های مبتنی بر ANN قادرند مقادیر بهینه‌ی پارامترها را تعیین کنند، اما اطلاعاتی در مورد ارتباط بین فاکتورهای کنترلی و متغیرهای پاسخ در طول فرآیند بهینه‌سازی ارائه نمی‌کنند.

ترکیب شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک رویکرد دیگری است که در ادبیات مورد توجه قرار گرفته است. چن و راماسوامی در سال ۲۰۰۲ [۴] با استفاده از این رویکرد به بهینه‌سازی فرآیند حرارتی دمای متغیر محفظه[2](VRT) پرداختند. فرآیند مذکور به عنوان یکی از تکنولوژی‌های مهم در بهبود کیفیت غذاهای کنسروی و کاهش زمان فرآیند، در طول سالیان گذشته توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

نکته قابل توجه در روش‌های بهینه‌سازی موجود در صنایع غذایی این است که غالب این روش‌ها به منظور بهینه‌سازی تنها یک مشخصه (تابع هدف) توسعه یافته‌اند، حال آنکه بنگو و همکاراندر سال ۲۰۰۳ [۸] در یک بررسی کلی بر روی روش‌های نوین بهینه‌سازی در فرایندهای غذایی به این نکته اشاره می‌کند که به منظور فرموله کردن و حل مسائل بهینه‌سازی، لازم است کارهای تحقیقاتی بیشتری در زمینه‌ی بهینه‌سازی مسائل چندهدفه در فرآیندهای غذایی صورت گیرد. چراکه در بسیاری از مسائل دنیای واقعی مربوط به این حوزه، بهینه‌سازی همزمان چند تابع هدف (برای مثال کیفیت محصول، هزینه‌های عملیاتی، بودجه سرمایه‌گذاری و...) موردنظر است و معمولاً این اهداف در تضاد با یکدیگر هستند که از آن جمله می‌توان به فرایند تولید ماست تغلیظ شده‌ی تقلیدی[3] اشاره کرد که توسط دو مشخصه‌ی کیفی اسیدیته وماده جامد کل[4](TS) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین هزینه‌ی تولید محصول نیز مشخصه‌ی سومی است که می‌تواند بر روی تصمیم‌گیری در مورد شرایط فرآیند فوق اثرگذار باشد. در نتیجه بهینه‌سازی این مسائل با استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی تک‌هدفه‌ی موجود، اغلب منجر به جواب‌هایی می‌شود که در آن برخی از اهداف بسیار دور از مقادیر بهینه‌شان قرار می‌گیرند.

تاکنون رویکردهای متنوعی برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه ارائه شده است که می‌توان آنها را به سه دسته تقسیم‌بندی نمود. دسته اول شامل رویکردهایی می‌شود که با ترسیم خطوط کانتور هر یک از توابع هدف، ناحیه‌ای از فضای شدنی را پیدا می‌کنند که تمام اهداف به یک حداقل از سطح مطلوبیت می‌رسند. این ایده اولین بار توسط میرز و مونتگومری در سال ۲۰۰۲مطرح شد[۹]. این رویکردها زمانی قابل کاربرد هستند که مسئله شامل تعداد محدودی متغیرهای تصمیم باشد. در دسته دوم مهمترین هدف از نظر تصمیم گیرنده به عنوان تابع هدف انتخاب می‌شود و سایر اهداف به عنوان محدودیت در مدل وارد می‌شوند. اما در بسیاری از فرآیندها انتخاب مهمترین هدف به سهولت انجام نمی‌شود. دسته سوم رویکردهایی را شامل می‌شود که با تعریف یک رویکرد تجمیع، مسئله چندهدفه را به مسئله تک هدفه تبدیل می‌کنند. از معروفترین رویکردهای این دسته می‌توان به روش تابع مطلوبیت[5] [۱۰]، تابع زیان[6] [۱۱]، تصمیم گیری چندمعیاره[7] [۱۲] و... اشاره نمود. تفکر اصلی در رویکردهای مبتنی بر تابع مطلوبیت، بهینه‌سازی میانگین اهداف است. در این رویکرد به هر یک از توابع هدف عددی بین صفر و یک به عنوان میزان مطلوبیت تخصیص داده می‌شود. مهم‌ترین مزیت این روش آن است که به قرار گرفتن تمامی اهداف در ناحیه‌ی مطلوب متناظرشان تاکید می‌کند و به علت ساده بودن به کرات در مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. اما این رویکرد ساختار واریانس-کوواریانس اهداف را در فرآیند بهینه‌سازی دخیل نمی‌کند. بنابراین، اگر اهداف همبسته باشند یا تفاوت سطح واریانس روی ناحیه ی

1. High-pressure
2. Variable retort temperature
3.Wheyless

4. Total solid
5. Desirability function
6. Loss function
7. Multi criteria decision making

www.SID.ir

آزمایشی معنادار باشد، غفلت از چنین اطلاعاتی ممکن است به یک جواب غیرمنطقی منجر شود.

از طرف دیگر رویکردهای مبتنی بر تابع زیان اگرچه در فرآیند بهینه‌سازی ساختار واریانس-کوواریانس اهداف را در نظرمی‌گیرند، اما هیچ تضمینی برای قرارگرفتن تمام اهداف در ناحیه مطلوب متناظرشان ارائه نمی‌کنند. در روش‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری‌های چندگانه نیز از روش‌هایی همچون VIKOR و TOPSIS استفاده می‌شود.با این حال یکی از محدودیت‌های این دسته از روش‌ها (به جز روش VIKOR) این است که ترکیب بهینه‌ی سطوح فاکتورها اغلب منجر به جواب‌هایی می‌شود که در آن یک یا چند هدف بسیار دور از مقادیر بهینه‌شان قرار می‌گیرند.

در این مطالعه ما به کمک روش‌های موجود در طراحی آزمایش‌ها و تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، روشی ساده اما موثر را به منظور بهینه‌سازی فرآیند تولید ماست تغلیظ شده‌ی تقلیدی که شامل ۶ متغیر تصمیم اثرگذار و ۳ تابع هدف است پیشنهاد می‌کنیم. این رویکرد اولاً اطمینان حاصل می‌کند که مشخصه‌های کیفی (اهداف) با تغییرپذیری اندک حول مقادیر هدف متناظرشان قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر به طور همزمان میانگین و واریانس توابع هدف را در نظر می‌گیرد. ثانیاً قادر است ضمن کمینه کردن مجموع انحراف‌ها، بیشینه‌ی انحراف توابع هدف از مقادیر بهینه را نیز کمینه کند. اما مزیت اصلی رویکرد پیشنهادی، قابلیت استفاده‌ی آن برای مسائلی است که از هر دو دسته متغیرهای گسسته و پیوسته به طور همزمان برخوردار هستند. این مسئله در حیطه‌ی مسائل چند هدفه بوده و با توجه به عدم توجه کافی به این حوزه، یعنی بهینه‌سازی به کمک روش‌های سیستماتیک طراحی آزمایش‌ها در صنایع غذایی، این مطالعه می‌تواند راهگشایی به منظور انجام مطالعات بیشتری در این زمینه باشد. در ادامه و در بخش ۲ ابتدا به معرفی فرآیند پرداخته و سپس در بخش ۳ به معرفی متغیرها و پارامترهای موجود در مسئله و روش پیشنهادی پرداخته شده است. در بخش ۴ مثال عددی بیان شده است. بخش ۵ نیز به نتیجه‌گیری تخصیص یافته است.

۲- معرفی فرآیند

بی‌شک یکی از مهم‌ترین مراحل در انجام آزمایش به منظور ایجاد بهبود در یک فرآیند، درک و بیان واضحی از مسئله‌ی موجود است. این موضوع ممکن است بسیار بدیهی باشد ولی غالباً در عمل رسیدن به این نتیجه که مسئله‌ی موجود، نیاز به آزمایش دارد، نه تنها کار ساده‌ای نیست بلکه بیان مسئله به نحو شفاف و قابل قبول برای عموم نیز می‌تواند کاری بسیار دشوار باشد، به همین منظور تهیه و ارائه کلیه نظرات در مورد اهداف یک آزمایش، امری ضروری محسوب می‌شود. محصولی که ما در این مطالعه به بررسی آن پرداخته و سعی کرده‌ایم با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش و مسائل چندهدفه به بهینه‌سازی فرآیند مربوط به آن بپردازیم، ماست چکیده‌ی تغلیظ شده‌ی تقلیدیاز محصولات جدید صنایع لبنی بوده که تولید آن علاوه بر دربرداشتن جنبه‌های اقتصادی برای واحد تولیدی به لحاظ کیفی نیز دارای مزایای بیشتری نسبت به روش‌های قدیمی تولید است. در تولید این محصول استفاده از پروتئین‌های سرمی[1] برای افزایش قوام و بهبود خواص فیزیکی محصول (بافت) جایگزین روش‌های آبگیری قدیمی شده است. جهت تولید محصول فوق، شیر پس از انجام آزمون‌های فیزیکی وشیمیایی مندرج در استاندارد، دریافت و وارد مرحله‌ی نگهداری سرد[2] یاهمان آب‌گیری[3] می‌شود. در این مرحله پروتئین‌های سرمی و شیر خشک به میزان مورد نظر به شیر سرد افزوده شده و پس از طی زمان لازم وارد مرحله نگهداری گرم[4] می‌شود. در این مرحله نیز شیر طبق برنامه‌ی تولید، زمان لازم را طی نموده و پس از کاهش دما تا مرحله گرمخانه‌گذاری[5]، کشت آغازگر[6] تهیه شده به شیر اضافه شده و مرحله گرمخانه‌گذاری تا حصول اسیدیته و بافت مناسب آغاز می‌شود. پس از ایجاد بافت و آرومای مناسب، ماست حاصل تا دمای بسته‌بندی (۱۰-۸ درجه سانتی‌گراد) خنک شده و سپس جهت بسته‌بندی وارد دستگاه پرکن می‌شود.

1.Whey protein
2. Cold holding
3. Hydration
4.Warm holding
5. Incubation
6. Starter

Archive of SID

www.SID.ir

به طور کلی در مشورت‌هایی که با مسئولین فنی یکی از واحدهای تولیدکننده‌ی این محصول صورت گرفت مشخص شد که محصول فوق با ۲ مشخصه‌ی TS و اسیدیته مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که مولفه‌ی اول تاثیر بر خصوصیات فیزیکی محصول نظیر بافت[1] و مولفه‌ی دوم تاثیر برطعم[2] محصول دارد. اندازه‌گیری این دو مولفه توسط روش‌های ساده‌ی آزمایشگاهی امکان‌پذیر است. از آنجایی که همواره یکی از دغدغه‌های اصلی تولیدکنندگان هزینه های مربوط به تولید محصول نیز هست، متغیر سومی به نام قیمت تمام شده واحد محصول نیز معرفی شد تا بتوان همزمان با در نظر گرفتن دو مشخصه‌ی کیفیت و هزینه، سطوح بهینه‌ی فاکتورهای اثرگذار را تعیین نمود.

۳- روش پیشنهادی

در این بخش برای بهینه‌سازی فرآیند معرفی شده در بخش ۲، یک رویکرد بهینه‌سازی چنده دفه ارائه شده است. به همین منظور ابتدا در بخش ۱،۳ به معرفی متغیرها و پارامترها پرداخته شده است. سپس، در بخش ۲،۳ به تفصیل به توضیح روش پیشنهادی می‌پردازیم.

روش فوق به طور کلی دارای سه فاز اصلی است. در فاز اول به جمع آوری داده‌های موردنیاز می‌پردازیم، در فاز دوم روش تجمیع اهداف به تفصیل شرح داده می‌شود و در نهایت فاز سوم مربوط به تعیین سطوح بهینه‌ی متغیرهای تصمیم مسئله به تفکیک پیوسته، گسسته یا ترکیبی است.

۳-۱- معرفی متغیرها و پارامترهای مورد استفاده

در این بخش پیش از معرفی روش پیشنهادی، ابتدا به معرفی متغیرها و پارامترهای مورد استفاده در طول روش حل می‌پردازیم.

SN_{ij}	نسبت سیگنال به اختلال[3] تابع هدف **j**ام در **i** امین آزمایش
y_{ijk}	مقدار تابع هدف **j**ام در آزمایش **i**ام و تکرار **k**ام
X_i	متغیر تصمیم **i**ام
μ_j	میانگین تابع هدف **j**ام
σ_j	انحراف استاندارد تابع هدف **j**ام
NSN_{ij}	مقدار نرمالایز شده SN_{ij}
A^+	مجموعه‌ی جواب‌های ایده‌آل
A^-	مجموعه‌ی جواب‌های ایده‌آل منفی
NSN_j^+	جواب ایده‌آل برای تابع هدف **j**ام
NSN_j^-	جواب ایده‌آل منفی برای تابع هدف **j**ام
S_i	معیار سودمندی[4] در آزمایش **i**ام
R_i	معیار ضرر[5] در آزمایش **i**ام
w_j	وزن تابع هدف **j**
Q_i	شاخص ویکور در آزمایش **i**
v	وزن منفعت گروهی
S^+	کمینه S_i
S^-	بیشینه S_i
R^+	کمینه R_i
R^-	بیشینه R_i
I | i=1,. . .,m	مجموعه‌ی آزمایش‌ها
J | j=1, . . .,n	مجموعه‌ی توابع هدف
K | k=1, . . .,r	مجموعه‌ی تکرار آزمایش‌ها
F | f=1, . . .,p	مجموعه متغیرهای تصمیم
L | l=1, . . . ,s	مجموعه سطوح فاکتورها

1.Texture
2. Flavour
3. Signal-to-Noise
4. Utility measure
5. Regret measure

Archive of SID
www.SID.ir

۳-۲- روش بهینه سازی

رویکرد پیشنهادی از سه فاز: (۱) جمع‌آوری داده، (۲) تجمیع اهداف و (۳) تعیین سطوح بهینه‌ی متغیرهای تصمیم تشکیل شده است. در فاز۱، داده‌های مورد نیاز برای محاسبه‌ی نسبت‌های سیگنال به اختلال متناظر با اهداف جمع‌آوری می‌شود. سپس در فاز ۲ اهداف به گونه‌ای تجمیع می‌شوند که علاوه بر مجموع، بیشینه‌ی انحراف آن‌ها از مقادیر مطلوبشان نیز در نظر گرفته شود. نهایتاً، در فاز ۳ شیوه انتخاب سطوح بهینه متغیرهای تصمیم به تفکیک نوع (گسسته یا پیوسته) ارائه می‌شود

۳-۲-۱- فاز اول- جمع آوری داده

هدف از فاز ۱، تعیین متغیرهای ورودی اثرگذار بر روی توابع هدف، سطوح در نظر گرفته شده برای آنها، تعیین طرح آزمایش و اجرای آن است.

۳-۲-۱-۱- تعیین متغیرهای ورودی، سطوح و دامنه ها

پس از تعیین توابع هدف مهم که در حقیقت بیان‌کننده‌ی مسئله‌ای است که قصد بهینه‌سازی آن را داریم، اولین مرحله، تعیین متغیرهای تصمیمی است که دارای اهمیت بوده و به طور بالقوه قابلیت تاثیرگذاری بر روی توابع هدف را دارند. عامل‌های بالقوه‌ی طراحی عبارتند از عامل‌هایی که آزمایشگر قصد دارد آنها را در حین آزمایش تغییر دهد. این کار از طریق مشورت‌هایی که با افراد متخصص وصاحب نظر در این زمینه صورت می‌گیرد میسر می‌شود. مطابق با دانش ما رویکردهای موجود بر مبنای نوع متغیرهای تصمیم به دو دسته‌ی کلی قابل تقسیم هستند. دسته‌ی اول روش‌هایی که تنها برای مسائل با متغیرهای تصمیم گسسته قابل استفاده هستند و دسته‌ی دوم رویکردهایی که قابلیت حل مسائل با متغیرهای تصمیم پیوسته را دارند. یکی از مزیت‌های روش پیشنهادی نسبت به روش‌های مشابه، در نظر گرفتن هر دو نوع متغیرهای (گسسته و پیوسته) می‌باشد. بنابراین اولین قدم در رویکرد پیشنهادی تعیین نوع فاکتورهای کنترلی موجود در مسئله می‌باشد که در این صورت ۳ حالت زیر متصور است:

الف)تمام متغیرها از نوع گسسته هستند یا به عبارت دیگر تعداد سطوح در نظرگرفته شده برای هر یک از متغیرها مشخص و محدود است.

ب) تمام متغیرها از نوع پیوسته هستند یا به عبارت دیگر سطوح در نظر گرفته شده برای تمام متغیرها نامحدود است.

ج) متغیرهای موجود در مسئله ترکیبی از حالت‌های الف و ب هستند.

از سوی دیگر بعد از انتخاب عامل‌های طراحی توسط آزمایشگر نیاز است تا دامنه‌ی تغییرات همراه با سطوح معینی از این عامل‌ها جهت انجام آزمایش‌های موردنظر تعیین شود و این کار از طریق مشورت با افراد متخصص و صاحب‌نظر در زمینه‌ی آن فرآیند خاص صورت می‌پذیرد. در مورد فاکتورهای گسسته لازم است تمامی سطوح موجود، مورد مطالعه قرار گیرند و در فاکتورهای پیوسته، سطوح بالا و پایین (کمترین و بیشترین مقدار ممکن برای متغیر) که توسط فرد متخصص تعیین می‌گردد، منظور می‌شود. در فرآیند فوق که در مجموع از ۶ فاکتور تشکیل شده است، ۲ متغیر (نوع شیر خشک و نوع کشت آغازگر) از نوع گسسته بوده که به ترتیب دارای ۴ و ۲ سطح هستند و سایر متغیرها (دمای گرمخانه‌گذاری، درصد پروتئین‌های سرمی، زمان نگه‌داری سرد و زمان نگه‌داری گرم) به صورت پیوسته تغییر می‌کنند.

۳-۲-۱-۲- انجام آزمایش

در این مرحله بر اساس طرح انتخابی، به اجرای آزمایش‌ها می‌پردازیم. در این مطالعه ما برای هر یک از اهداف TSو اسیدیته با ۳ تکرار به جمع‌آوری داده پرداختیم و برای متغیر هزینه به دلیل عدم تغییرپذیری تنها از ۱ تکرار استفاده کردیم. در زمان انجام آزمایش ضروری است که نظارت دقیقی بر مراحل انجام آزمایش به عمل آید تا اطمینان حاصل شود که تمام مراحل آزمایش طبق برنامه پیش می‌رود. ایجاد خطا در این مرحله باعث بی‌اعتبار شدن نتایج آزمایش خواهد شد.

۳-۲-۲- فاز دوم- تجمیع اهداف

داده‌های حاصل از آزمایش باید به وسیله‌ی روش‌های آماری و ریاضی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد تا اعتبار

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج از لحاظ علمی تایید شود و تصمیم‌گیری بر اساس قضاوت شخصی انجام نشود. همان طور که قبلاً گفته شد به منظور بهبود در فرآیند تولید ماست تغلیظ شده‌ی تقلیدیبه دنبال بهینه‌سازی همزمان سه تابع هدف TS، اسیدیته و هزینه‌ی واحد محصول هستیم. در این بخش رویکردی را برای تجمیع اهداف فوق ارائه می‌کنیم که از

(۲) یک طرف میانگین توابع هدف را به مقادیر مطلوب آنها نزدیک می‌کند و از طرف دیگر واریانس آنها را به حداقل ممکن می‌رساند. بعلاوه روش پیشنهادی ضمن کمینه کردن

(۳) مجموع انحرافات، بیشینه‌ی انحراف توابع هدف از مقادیر مطلوبشان را نیز حداقل می‌کند. با این کار اطمینان حاصل می‌کنیم که هیچ یک از توابع هدف دور از مقادیر بهینه‌شان نخواهند بود. جزئیات روش تجمیع در ادامه آورده شده است.

۳-۲-۲-۱- محاسبه نسبت سیگنال به اختلال (SN)

گام نخست در تجمیع توابع هدف، تبدیل هر یک از آنها به نسبت سیگنال به اختلال است. نسبتSNیک معیار عملکرد آماری است که توسط تاگوچی ارائه شده است. این نسبت به طور همزمان میانگین و واریانس تابع هدف را در نظر می‌گیرد و تضمین می‌کند که واریانس هدف را کمینه کند و از آن به عنوان طراحی مقاوم[1] نام برده می‌شود. هدف اصلی در طراحی مقاوم، اجرای آزمایش‌هایی با استفاده از آرایه‌های متعامد و بهینه کردن طراحی با استفاده از بیشینه کردن معیار عملکرد نسبت سیگنال به اختلال است و جواب‌هایی را تولید می‌کند که تا حدودی نسبت به تغییرات محیطی غیرحساس هستند. بر همین اساس توابع هدف را می‌توان به سه گروه اصلی زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱- توابعی که کمتر بودنشان مطلوب است، پیوسته و غیرمنفی بوده و مقدار ایده‌آل آنها صفر است.

۲- توابعی که داری یک مقدار هدف هستند، پیوسته و غیرمنفی بوده و مقدار مطلوب آنها عددی غیر صفر و محدود است.

۳- توابعی که بیشتر بودنشان مطلوب است و می‌توان آنها را با معکوس کردن به متغیرهای دسته اول تبدیل کرد.

1. Robust

نحوه‌ی محاسبه نسبت سیگنال به اختلال برای هر یک از انواع توابع هدف، به ترتیب به صورت زیر است.

$$SN_{ij} = -10\, log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{r} y_{i=k}^{2}\right) \quad (۱)$$

$$SN_{ij} = 10\, log_{10}\frac{\mu_j^2}{\sigma_j^2} \quad (۲)$$

$$SN_{ij} = -10\, log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{r} -\left(\frac{1}{y_{i=k}^{2}}-\right)\right) \quad (۳)$$

در فرآیند مورد بررسی دو هدف TSواسیدیته از نوع ۳ و متغیر هزینه از نوع ۱ هستند. بر همین اساس نسبت SNهر یک از توابع هدف بر اساس روابط مناسب آنها محاسبه می‌شود. از آنجایی که روش تاگوچی تنها برای مسائل تک‌هدفه قابل استفاده است، این مطالعه، استفاده از شاخص VIKORرا برای تجمیع نسبت‌های سیگنال به اختلال متناظر اهداف موردنظر پیشنهاد می‌کند.

۳-۲-۲-۲- محاسبه‌ی شاخص تجمیع

اگرچه روش‌های زیادی برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه پیشنهاد شده است اما غالب آنها واریانس انحراف توابع هدف از مقادیر بهینه‌شان رادر نظر نمی‌گیرند. در نتیجه علی‌رغم کوچک بودن میانگین انحراف توابع هدف از مقادیر مطلوبشان، این روش‌ها ممکن است منجر به جواب‌هایی شوند که در آنها انحراف برخی از توابع هدف بسیار بزرگ بوده و برای مهندسین قابل قبول نباشد[۱۳]. به منظور رفع این مشکل، این تحقیق با الهام از رویکرد VIKORتوابع هدف را به شرح زیر تجمیع می‌کند.

a) محاسبه ی نسبت SNنرمالایز شده

در این گام به منظور بی‌واحد کردن اهداف با استفاده از نرم۲ آنها را به کمک رابطه (۴) نرمالایز می‌کنیم.

$$NSN_{ij} = \frac{SN_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} SN_{ij}^2}} \quad (۴)$$

b) تعیین جواب‌های ایده‌آل (A^+) و ایده‌آل منفی (A^-)

Archive of SID
www.SID.ir

از آنجایی که صرف‌نظر از نوع هدف، به دنبال حداکثر کردن شاخص SN هستیم، در نتیجه مجموعه‌ی جواب‌های ایده‌آل و ایده‌آل منفی که به ترتیب نشان‌دهنده‌بیشینه و کمینه‌ی مقادیر NSN_{ij} همه ی آزمایش‌ها هستند، به کمک روابط (۵) و (۶)تعیین می شوند.

$$A^+ = \{(\max NSN_{ij} \mid j \in J) \mid i = 1,2,\ldots,m\} = \{NSN_1^+, NSN_2^+, \ldots, NSN_j^+, \ldots, NSN_n^+\} \quad (۵)$$

$$A^- = \{(\min NSN_{ij} \mid j \in J) \mid i = 1,2,\ldots,m\} = \{NSN_1^-, NSN_2^-, \ldots, NSN_j^-, \ldots, NSN_n^-\} \quad (۶)$$

c) محاسبه‌ی معیار سودمندی(S_i) و معیارضرر(R_i)

در این گام با استفاده از روابط (۷) و(۸) به ترتیب مجموع انحرافات نسبت‌های SN از مقادیر مطلوبشان و بیشینه‌ی این انحرافات را به ازای هر یک از اجراهای آزمایش محاسبه می‌کنیم.

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_j \left(NSN_j^+ - NSN_{ij}\right)}{NSN_j^+ - NSN_j^-} \quad (۷)$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{w_j \left(NSN_j^+ - NSN_{ij}\right)}{NSN_j^+ - NSN_j^-}\right] \quad (۸)$$

در این فرآیند اهمیت هر سه تابع هدف، یکسان فرض شده است که البته با نظر مشاورین مربوط به واحد تولیدی مورد بررسی تعیین گردیده و ممکن است واحدهای تولیدی دیگر با توجه به شرایط کاری خود، وزن‌های متفاوتی را در نظر بگیرند و نتیجتاً به نتایج متفاوتی نیز دست یابند.

d) محاسبه ی شاخص تجمیع

$$Q_i = v\left[\frac{S_i - S^+}{S^- - S^+}\right] + (1-v)\left[\frac{R_i - R^+}{R^- - R^+}\right] \quad (۹)$$

در این آزمایش مقدار v برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۳- فاز سوم- تعیین سطوح بهینه‌ی فاکتورها

در این مرحله لازم است با توجه به مقادیر به دست آمده برای شاخص تجمیع، به تعیین سطوح بهینه‌ی فاکتورها بپردازیم. روش‌هایی که ما در این مرحله برای بهینه‌سازی ارائه می‌کنیم به تفکیک نوع متغیرهای تصمیم (فاکتورهای کنترلی) هستند. بنابراین همان‌طور که در فاز ۱ نیز توضیح داده شد لازم است ابتدا تعیین شود که متغیرهای تصمیم فرآیند از کدام نوع هستند. در فرآیند مورد بررسی که ترکیبی از متغیرهای گسسته و پیوسته است، روش‌های بهینه‌سازی به تفکیک ارائه خواهند شد.

۳-۲-۳-۱- تعیین سطوح بهینه‌ی متغیرهای تصمیم گسسته

در این قسمت و برای تعیین سطوح بهینه‌ی فاکتورهای گسسته که شامل دو متغیر شیر خشک و کشت آغازگر است، میانگین شاخص تجمیع را به ازای سطوح مختلف این عوامل محاسبه می‌کنیم. روش کار به این صورت است که برای مثال در مورد کشت آغازگر که شامل دو سطح است، میانگین شاخص تجمیع را به ازای تمام آزمایشاتی که در آنها کشت آغازگر از نوع اول(Bulk)است و هم چنین میانگین را زمانی که کشت آغازگر از نوع دوم(Direct)است، محاسبه می‌کنیم. این کار را در مورد شیر خشک که شامل ۴ سطح است (نوع ۱تا نوع ۴) نیز به طور مشابه انجام می‌دهیم. با توجه به اینکه هدف، حداقل کردن شاخص تجمیع است، لذا سطحی به عنوان سطح بهینه انتخاب می‌شود که دارای کمترین مقدار شاخص تجمیع باشد.

۳-۲-۳-۲- تعیین سطوح بهینه متغیرهای تصمیم پیوسته

در اغلب آزمایش ها نتایج حاصل به صورت یک مدل تجربی و یا به عبارت دیگر مدلی که رابطه بین تابع هدف و عامل‌های مهم طراحی را بر اساس داده‌های حاصل بیان می‌کند، ارائه می‌شود. در همین راستا و به منظور تعیین سطوح بهینه‌ی متغیرهای تصمیم پیوسته، از متدولوژی سطح پاسخ در فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است. متدولوژی فوق مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که برای مدل کردن و تحلیل مسائل مهندسی به کار می‌رود. در این روش، هدف اصلی، بهینه کردن سطح پاسخی است که تحت تاثیر عوامل کنترلی گوناگونی است.

Archive of SID

www.SID.ir

متدولوژی سطح پاسخ همچنین ارتباط میان متغیرهای ورودی قابل کنترل با سطح پاسخ به دست آمده را به شکل کمی بیان می‌کند. طراحی فرآیندروش سطح پاسخ را می‌توان در قالب مراحل زیر خلاصه کرد[۱۴]:

i طراحی مجموعه‌ای از آزمایشات به منظور اندازه‌گیری‌های قابل اطمینانی از تابع هدف مورد نظر

ii توسعه ی یک مدل ریاضی مناسب

iii یافتن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم که سطح پاسخ را کمینه یا بیشینه می‌کنند.

iv نشان دادن اثرات اصلی و متقابل از طریق نمودارهای دوبعدی و سه‌بعدی

در روش پیشنهادی با توجه به اینکه با یک مسئله‌ی چندهدفه روبرو هستیم، با محاسبه‌ی شاخص تجمیعدر حقیقت قادریم هر سه تابع هدف را به یک معیار تبدیل کرده و آن را به عنوان متغیر پاسخ در نظر بگیریم و از متدولوژی سطح پاسخ به منظور بهینه‌سازی آن استفاده کنیم.

در حقیقت در این مرحله با یک رابطه‌ی تجربی روبرو هستیم که در آن متغیر وابسته همان شاخص تجمیع است و هدف حداقل کردن آن است. متغیرهای مستقل در این رابطه نیز همان متغیرهای تصمیم پیوسته هستند. روش متداول برای بهینه‌سازی رابطه فوق استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی مانندLingo است.

در ادامه و در شکل۱نمودار مربوط به روش پیشنهادی آورده شده است.

۴-۱- مثال عددی

همان‌طور که در قسمت‌های پیشین نیز اشاره شد هدف اصلی ما بهینه‌سازی فرآیند تولید ماست تغلیظ شده‌ی تقلیدی بوده که دارای ۳ تابع هدف است. بنابراین مسئله فوق دردسته‌ی مسائل چندهدفه قرار می‌گیرد که به همین منظورروشی برای بهینه‌سازی فرآیند فوق و تعیین سطوح بهینه متغیرهای تصمیم در قسمت قبل ارائه شد و اکنون در این بخش نتایج عددی حاصل بر اساس قدم های مطرح شده در بخش ۳ با جزئیات کامل بیان می شود.

-تعیین متغیرهای ورودی، سطوح و دامنه ها

به طور کلی ۶ متغیر تصمیم اثرگذار در این فرآیند شناخته شده است که به دنبال بررسی اثرگذاری آنها بر روی توابع هدفهستیم کهاز میان آنها دو متغیر X_1 و X_3 به صورت گسسته تغییر می‌کنند و ۴ متغیر باقی‌مانده به شکل پیوسته هستند.فاکتورهای کنترلی به همراه سطوح در نظر گرفته شده برای آنها در جدول ۱ آمده است.

-انتخاب طرح آزمایش

طرح آزمایش زیر یک طرح 2^4 بوده که بر روی عوامل گسسته بلوک‌بندی شده و مجموعاً از ۱۶ آزمایش تشکیل شده است. اعداد ۱- و ۱ در جدول زیر به ترتیب نشان دهنده‌ی سطح پایین و بالای متغیرهای پیوسته هستند که این مقادیردر جدول ۲ تعریف شده است.این جدول هم‌چنین نشان‌دهنده‌ی مقادیر به دست آمده برای توابع هدف در زمان

انجام آزمایش نیز هست.ایجاد طرح فوق با استفاده از نرم‌افزار MINITAB15 صورت گرفته است.

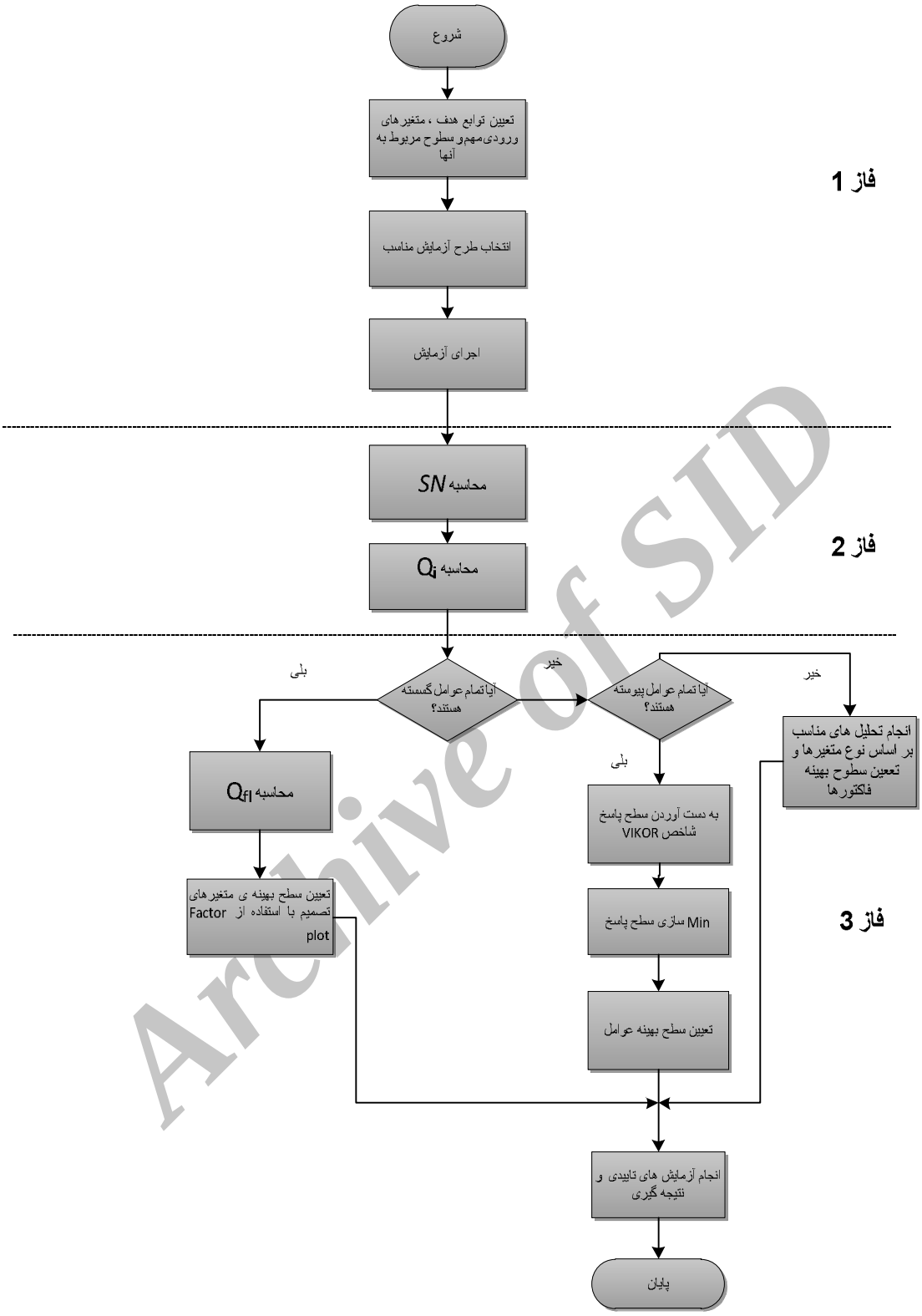
تفاوت سطوح مختلف شیرخشک در میزان درصد آب پنیر آنها می‌باشد .

استارتر نوع Direct به صورت مستقیم قابل استفاده است، اما نوع Bulkپیش از استفاده نیاز به فرآوری دارد.

جدول ۱ فاکتورهای کنترلی و سطوح در نظر گرفته شده در آزمایش

متغیر	فاکتور کنترلی	سطح ۱	سطح۲	سطح۳	سطح۴
X_1	نوع شیر خشک[1]	نوع ۱	نوع۲	نوع۳	نوع۴
X_2	دمای گرمخانه‌گذاری	۴۲°C	۴۷°C	-	-
X_3	نوع کشت آغازگر[2]	Bulk	Direct	-	-
X_4	درصد پروتئین سرمی افزوده شده	۱،۵درصد	۴درصد	-	-
X_5	زمان نگه‌داری سرد	۴۵دقیقه	۶۰ دقیقه	-	-
X_6	زمان نگه‌داری گرم	۳۰ دقیقه	۴۵ دقیقه	-	-

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱ نمودار روش پیشنهادی در بهینه سازی فرآیند چندهدفه

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲ طرح آزمایش

Blocks		Incubation temp.	Whey protein	Cold holding time	Warm holding time	TS1	TS2	TS3	Acidity 1	Acidity 2	Acidity3	Cost
Milk powder	Starter											
Tip1	Bulk	1	-1	1	-1	14.63	14.55	14.68	140	139	138	806
Tip1	Bulk	-1	1	-1	1	15.89	15.9	15.77	138	136	138	826
Tip1	Direct	-1	-1	1	-1	16.05	16.11	15.98	128	125	129	1271
Tip1	Direct	1	1	-1	1	15.99	16.07	15.87	136	135	135	1291
Tip2	Bulk	-1	1	1	-1	15.53	15.47	15.66	132	130	133	1085
Tip2	Bulk	1	-1	-1	1	13.78	13.66	13.81	130	128	130	1105
Tip2	Direct	1	1	1	-1	15.42	15.33	15.56	128	127	125	960
Tip2	Direct	-1	-1	-1	1	15.33	15.21	15.41	119	118	120	980
Tip3	Bulk	-1	1	-1	-1	14.62	14.53	14.61	125	124	124	960
Tip3	Bulk	1	-1	1	1	14.23	14.15	14.31	135	135	137	980
Tip3	Direct	1	1	-1	-1	14.19	14.05	14.28	126	125	124	1065
Tip3	Direct	-1	-1	1	1	15.62	15.69	15.53	124	123	122	1085
Tip4	Bulk	1	-1	-1	-1	13.06	13.08	13.15	120	119	121	1189
Tip4	Bulk	-1	1	1	1	15.19	15.37	15.21	127	127	128	1209
Tip4	Direct	-1	-1	-1	-1	13.35	13.41	13.21	115	114	115	784
Tip4	Direct	1	1	1	1	14.99	15.08	14.89	130	131	129	804

محاسبه ی نسبت سیگنال به اختلال(SN) برای هر یک از توابع هدف

در این بخش با استفاده از تعاریف ارائه شده در بخش ۱,۲,۲,۳به محاسبه ی نسبت سیگنال به اختلال پرداخته‌ایم که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. محاسبه SN برای تابع هدف هزینه با استفاده از رابطه‌ی۱ و برای توابع TSواسیدیته با استفاده از رابطه ۳ صورت گرفته است. این محاسبات به راحتی با استفاده از نرم‌افزارهای Excel یا MINITAB15 قابل انجام هستند.

-محاسبه ی شاخص تجمیع(Q)

در این مرحله با استفاده از روابط ارائه شده در بخش ۲,۲,۲,۳ به محاسبه‌ی شاخص تجمیع برای هر یک از اجراهای آزمایش می‌پردازیم که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. این شاخص معیاری برای تصمیم گیری در مورد سطوح بهینه‌ی متغیرهای تصمیم خواهد بود.

-تعیین سطوح بهینه متغیرهای گسسته

به منظور تعیین سطوح بهینه ی دو متغیر X_1 ،X_3 با استفاده از معیار به دست آمده از مرحله ی قبل، متوسط شاخص تجمیع را به ازای هر یک از سطوح در نظر گرفته شده برای این عوامل محاسبه کرده‌ایم و با رسم نمودار فاکتوری[1]مربوط به هر یک از آنها و استفاده از این موضوع که کوچکتر بودن شاخص VIKORمطلوب تر است، سطح بهینه ی این فاکتورها را تعیین نمودیم. این مقادیر در جداول ۵ و ۶ به صورت پررنگ نشان داده شده اند. نمودارهای مربوط به این دو عامل نیز در شکل های ۲ و ۳ آورده شده است.

1. Factor plot

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳ محاسبه نسبت SN برای توابع هدف

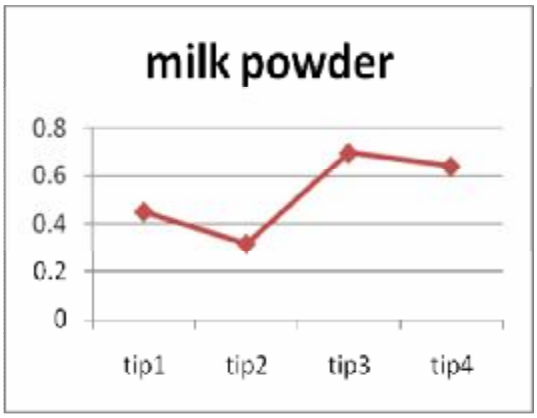
Experiment	SN_{TS}	$SN_{Acidity}$	SN_{Cost}
1	23.1887	41.3870	-58.1267
2	23.5003	41.6782	-58.3396
3	23.9433	42.2979	-62.0829
4	24.2336	42.5174	-62.2185
5	23.6481	42.1891	-60.7086
6	24.0514	42.4303	-60.8672
7	22.7169	41.8679	-59.6454
8	23.3159	41.9360	-59.8245
9	23.2469	40.9316	-59.6454
10	23.6483	41.0856	-59.8245
11	22.4351	42.2193	-60.5470
12	22.8995	42.8598	-60.7086
13	22.9573	41.5569	-61.5036
14	23.3007	41.8904	-61.6485
15	22.3410	42.5198	-57.8863
16	22.6469	42.2999	-58.1051

جدول ۴ محاسبه شاخص ویکور

Experiment	(Q_i)
1	0.25798442
2	0.00000000
3	0.735129533
4	0.69674267
5	0.486734268
6	0.702702896
7	0.391351095
8	0.657480445
9	0.523910622
10	0.469665342
11	0.611327852
12	0.557240799
13	0.999999972
14	0.71014311
15	0.855984416
16	0.242874776

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۲ نمودار شاخص ویکور به ازای سطوح مختلف milk powder

شکل۳ نمودار شاخص ویکور به ازای سطوح مختلف Starter

جدول ۵ شاخص ویکور به ازای سطوح مختلف شیر خشک

Milk powder	Q_{1i}
Tip1	0.451385001
Tip2	0.317284615
Tip3	0.69712436
Tip4	0.640973261

جدول۶ شاخص ویکور به ازای سطوح مختلف کشت آغازگر

Starter	Q_{3i}
Bulk	0.407142112
Direct	0.646241507

تعیین سطوح بهینه‌ی فاکتورهای پیوسته

برای تعیین سطوح بهینه‌ی فاکتورهای پیوسته، از متدولوژی سطح پاسخ برای تخمین شاخص تجمیع بر حسب متغیرهای تصمیم پیوسته استفاده کردیم. انجام محاسبات فوق به راحتی با استفاده از نرم افزار MINITAB15 قابل انجام است. در این قسمت اثر عوامل اصلی[1] و هم چنین اثر متقابل[2] میان عوامل در نظر گرفته می‌شود و از میان آنها، عواملی که دارای اثر معنادار هستند(p-value آنها از یک مقدار پیش فرض کوچکتر است) انتخاب می‌شوند و به این ترتیب رابطه (۱۰) به دست می‌آید که در آن متغیرهای X_i به دلیل کد کردن، مقادیر ۱- تا ۱ را می‌پذیرند. به منظور بهینه‌سازی رابطه فوق از نرم افزار Lingo 8 استفاده کردیم که نتایج آن در جدول ۷ آورده شده است. نمودارهای مربوط به اثرات اصلی و اثرات متقابل که در شکل های ۵ و ۶ آمده است نیز نشان‌دهنده‌ی میزان اثرگذاری متغیرهای مربوطه هستند. خروجی مربوط به نرم افزار نیز در شکل ۴ آورده شده است.

جدول۷ مقادیر بهینه متغیرهای پیوسته

متغیر تصمیم	مقدار کد شده	مقدار واقعی
X_3	1	47°c
X_4	0	2.75%
X_5	1	60 min
X_6	0	37.5 min

1. Main effect
2. Intraction effect

Archive of SID
www.SID.ir

Session

Estimated Effects and Coefficients for vicor (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.5562	0.04244	13.11	0.000
ankobasion temp.	-0.0192	-0.0096	0.04244	-0.23	0.828
whey protein	-0.1966	-0.0983	0.04244	-2.32	0.060
cold holding time	-0.1496	-0.0748	0.04244	-1.76	0.128
warm holding time	-0.1032	-0.0516	0.04244	-1.22	0.270
ankobasion temp.*whey protein	0.0746	0.0373	0.04244	0.88	0.413
ankobasion temp.*cold holding time	-0.2626	-0.1313	0.04244	-3.09	0.021
ankobasion temp.*warm holding time	0.0660	0.0330	0.04244	0.78	0.466
whey protein*cold holding time	0.1494	0.0747	0.04244	1.76	0.129
cold holding time*warm holding time	0.1304	0.0652	0.04244	1.54	0.175

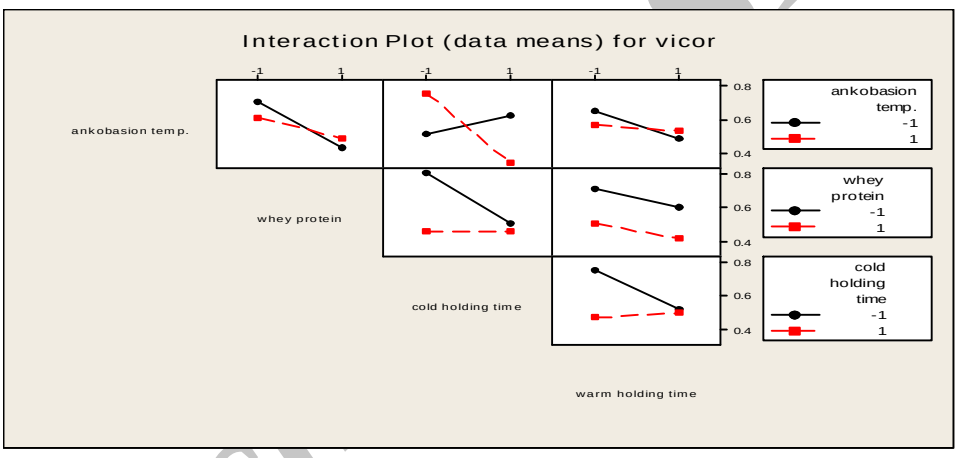
S = 0.169768 R-Sq = 81.49% R-Sq(adj) = 53.72%

Analysis of Variance for vicor (coded units)

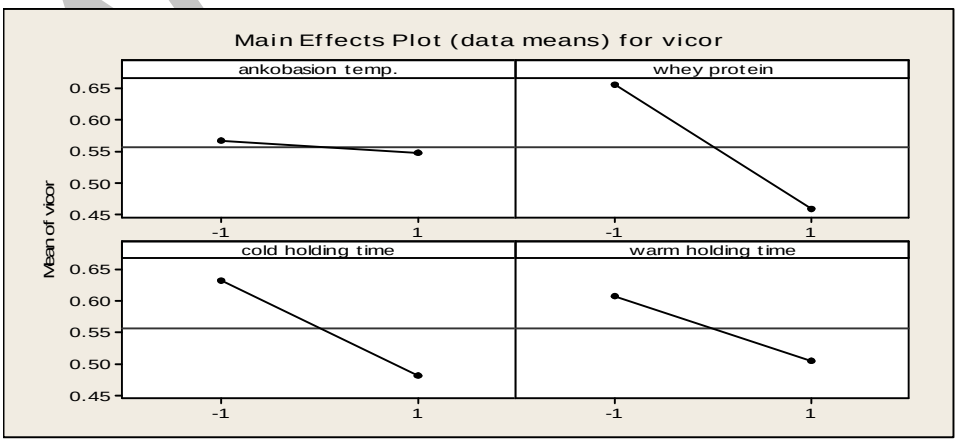
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	0.2883	0.2883	0.07208	2.50	0.152
2-Way Interactions	5	0.4728	0.4728	0.09457	3.28	0.090
Residual Error	6	0.1729	0.1729	0.02882		
Total	15	0.9341				

شکل ۴ خروجی نرم افزار مربوط به اثرگذاری متغیرهای پیوسته

$$\hat{Q} = 0.5562 - 0.0983X_4 - 0.0748X_5 - 0.0516X_6 + 0.0373X_4X_5 - 0.1313X_5X_6 + 0.0330X_6X_5 + 0.0747X_4X_6 + 0.0652X_5X_6$$



شکل ۵ نمودار اثرات اصلی



شکل ۶ نمودار اثرات متقابل

www.SID.ir

با توجه به بخش های قبل، مقادیر بهینه ی به دست آمده برای فاکتورهای کنترلی به همراه سطوح فعلی آنها در جدول ۸ آمده است. به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده، یک آزمایش تاییدی با شرایط بهینه ی به دست آمده از روش پیشنهادی صورت گرفت. مقایسه ی شرایط فعلی فرآیند و شرایط بهینه ی به دست آمده از روش فوق بر حسب میانگین متغیرهای پاسخ و نیز نسبت SN در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۸ سطوح بهینه و فعلی متغیرهای تصمیم

تابع هدف	شرایط بهینه		شرایط فعلی	
	میانگین مقدار تابع هدف	SN Ratio	میانگین مقدار تابع هدف	SN Ratio
TS	133.34	23.8771	127.66	23.1887
Acidity	15.63	42.3663	14.44	42.1203
Cost	1175	-62.1102	981	-59.8334

جدول ۹ مقایسه شرایط فعلی با شرایط بهینه

کد	فاکتور کنترلی	سطح بهینه	سطح فعلی
X_1	نوع شیر خشک	Tip2	Tip1
X_2	دمای گرمخانه گذاری	47°	47
X_3	نوع استارتر	direct	bulk
X_4	درصد پروتئین‌های سرمی افزوده شده	2.75%	3%
X_5	زمان نگه داری سرد	60min	45min
X_6	زمان نگه داری گرم	37.5 min	30min

نتایج به دست آمده از جدول ۹ نشان می‌دهد که با تغییر شرایط فعلی فرایند، اگرچه هزینه تولید واحد محصول حدود ۲۰۰ ریال افزایش می‌یابد ولی بهبود قابل‌توجهی در مقادیر دو تابع هدف دیگر ایجاد می‌شود و با توجه به اینکه یکی از مشکلات اصلی مربوط به تولید این محصول بالا بردن میزان اسیدیته و TSبه طور همزمان است و برخی از عوامل دارای اثر غیر همسو بر روی این دو هدف هستند (مانند نوع کشت آغازگر)، لذا انتخاب سطحی از فاکتورها که بتواند به طور همزمان هر دو مشخصه را افزایش دهد و در عین حال هزینه های تولید نیز در حد انتظار باقی بماند، می‌تواند برای واحد تولیدی ارزشمند باشد.

۳-۲- آنالیز حساسیت نتایج به دست آمده

در این قسمت لازم است به دو نکته‌ی مهم اشاره شود. اول اینکه در تمامی مراحل حل این مسئله، اهمیت نسبی توابع هدف به طور یکسان در نظر گرفته شده است، حال آنکه هر واحد تولیدی می‌تواند بسته به شرایط خود، وزن‌های متفاوتی را برای هر یک از سه تابع هدف در نظر بگیرد و به نتایج متفاوتی نیز دست یابد. به همین منظور ما همین مسئله را به ازای W_iهای مختلفی که در آنها وزن برخی از توابع هدف بیشتر از بقیه است حل نمودیم که نتایج نهایی آن ها در جدول ۱۰ آورده شده است. همان طور که انتظار می‌رود هزینه‌های تولید به ازای اهمیت بیشتر به مشخصه های کیفی، افزایش می‌یابد. از طرفی از آنجایی که دو مشخصه کیفی مورد بررسی نیز در مواردی با یکدیگر ناسازگار هستند، اهمیت بیشتر به یکی می تواند از کیفیت

Archive of SID
www.SID.ir

دیگری بکاهد. نکته‌ی دوم اینکه در این فرآیند خصوصیات شیر دریافتی نظیرمواد جامد بدون چربی[1](SNF)، شمارش کلی[2]، چگالی، نقطه‌ی انجماد، درصد آب و سایر ویژگی‌های شیمیایی شیر می‌تواند بر روی نتایج به‌دست آمده اثرگذار باشد. اما از آنجایی که این عوامل تحت کنترل کارخانه نیستند و به وسیله مراکز توزیع شیر و دامداران کنترل می‌شوند می‌توان آنها را به عنوان عوامل ایجاد خطای تصادفی در نظر گرفت که ما در روش پیشنهادی با استفاده از نسبت SN سعی کردیم اثر این عوامل را به حداقل برسانیم. بهتر است به هنگام انجام آزمایش، نوع شیر مصرفی برای تمامی آزمایش‌ها یکسان باشد تا نتایج معتبری حاصل شود.

۵- نتیجه گیری

در طی سال‌های اخیر روش‌های متعددی به منظور حلمسائل صنایع غذایی معرفی شده ولی بیشتر این رویکردها بر پایه شرایط قطعی و تک‌هدفه هستند. با توجه به اینکه امروزه بخش عمده‌ای از محصولات و فرآیندهای صنعتی به وسیله چندین مشخصه کیفی توصیف می‌شوند، از این رو یک روش بهینه‌سازی چندهدفه‌ی مقاوم بر اساس طراحی آزمایش‌ها و نسبت سیگنال به اختلال تاگوچی ارائه شده است که از مزایا و ویژگی‌های زیر برخوردار است:

۱. برخلاف سایر رویکردهای موجود، قابلیت حل مسائل با هر دو دسته متغیرهای تصمیم گسسته و پیوسته را دارد.

۲. انحراف استاندارد توابع هدف به عنوان یک دسته از اهداف جدید به مدل وارد شده تا تأثیر فاکتورهای اختلال در فرآیند به حداقل ممکن برسد.

۳. رویکرد پیشنهادی علاوه بر حداقل کردن مجموع انحراف اهداف از مقادیر مطلوبشان، کمینه کردن حداکثر این مقادیر را نیز مورد توجه قرار می‌دهد.

۴. اهمیت نسبی اهداف در نظر گرفته می‌شود.

به منظور نمایش ویژگی‌های رویکرد ارائه شده، در این مطالعه به بهینه‌سازی فرآیند تولید ماست تغلیظ شده‌ی تقلیدیپرداخته شده است. در این ارتباط مطابق با نظر کارشناسان سه تابع هدف TS (مربوط به بافت محصول) ، اسیدیته (مربوط به طعم محصول) و هزینه به ازای واحد محصول با اهیت نسبی یکسان در نظر گرفته شده است. به منظور اطمینان از کارایی روش فوق نتیجه‌ی به‌دست آمده را با شرایط فعلی کارخانه بر اساس مقادیر تابع هدف و نسبت سیگنال به مخاطره مقایسه نمودیم.

مقایسه شرایط موجود و شرایط بهینه نشان‌دهنده‌ی بهبود دو مشخصه کیفی TS و اسیدیتهاست، اما متغیر هزینه در حالت بهینه افزایش یافته است که با توجه به اهمیت هر یک از توابع هدف، می‌توان گفت در مجموع شرایط فرآیندی بهبود یافته است.

به عنوان تحقیقات آتی، بسط مدل ارائه شده دردو جهت مناسب به نظر می‌رسد.

۱- در مدل پیشنهادی وزن اهداف باید پیش از آغاز فرآیند بهینه‌سازی توسط افراد تصمیم گیرنده مشخص شود و همانطور که در جدول ۱۰ نیز قابل رویت است، مقادیر آن‌ها تأثیر چشم‌گیری در مقادیر بهینه‌ی توابع هدف دارد. حال آنکهبرای دست‌یابی به مقادیر واقعی وزن اهداف، استفاده ازیک روش تعاملی[3] منطقی‌تر به نظر می‌رسد.

۲- از آنجایی که وجود همبستگی میان توابع اهداف محتمل است، در نظر گرفتن آن در فرآیند بهینه‌سازی مطلوب به نظر می‌رسد.

۶- تشکر و سپاسگزاری

از خانم مهندس بهناز کوهستانی، کارشناس صنایع غذایی و مسئول فنی کارخانه لبنی که در انجام این تحقیق و جمع‌آوری داده های موردنیاز و اطلاعات فنی، همکاری و مساعدت‌های لازم را به عمل آوردند تشکر و قدردانی می‌شود.

1. Solid- Not- Fat
2. Total Count
3. Interactive Approach

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۱۰ مقایسه ی میانگین توابع هدف به ازای وزن های مختلف

آزمایش	وزن توابع هدف			میانگین توابع هدف		
	W_{TS}	$W_{Acidity}$	W_{Cost}	TS	Acidity	Cost(Rial)
۱	۱/۴	۱/۴	۱/۲	۱۴/۹۸	۱۳۱	۸۲۰
۲	۱/۲	۱/۴	۱/۴	۱۵/۸۷	۱۲۵	۱۲۰۵
۳	۱/۴	۱/۲	۱/۴	۱۴/۵۳	۱۳۷	۱۰۵۰
۴	۲/۵	۲/۵	۱/۵	۱۵/۵۵	۱۳۵	۱۲۶۵

۶- منابع

[1]Morimoto, T., Purwanto, W., Suzuki, J., and Hashimoto, Y. 1997b.*Optimization of heat treatment for fruit during storage using neural networks and genetic algorithms*. Computers and Electronics in Agriculture, 19: 87-101.

[2]Morimoto, T., Baerdemaeker, J. De, and Hashimoto, Y. 1997a.*An intelligent approach for optimal control of fruit-storage process using neural networks and genetic algorithms*. Computers and Electronics in Agriculture, 18: 205-224.

[3] Torrecilla, J.S., Otero, L. and Sanz, P.D. 2007. *Optimization of an artificial neural network for thermal/pressure food processing:Evaluation of training algorithms*. camputers and Electronics in Agriculture, 56: 101-110.

[4]Chen, C.R. and Ramaswamy, H.S. 2002. *Modeling and optimization of variable retort temperature (VRT) thermal processing using coupled neural networks and genetic algorithms*. Journal of Food Engineering, 53: 209-220.

[5] Aires-De-Sousa, J.1996. *Verifying wine origin: A neural network approach.* American Journal of Ecology and Viticulture, 47: 410-414.

[6] Ruan, R., Almaer, S. and Zhang, J.1995. *Prediction of dough rheological properties using neural networks*. Cereal Chem, 72: 308-311.

[7] Afaghi, M., Ramaswamy, H.S. and Prasher, S. O. 2000.*Artificial neural network models as alternatives to thermal process calculation methods*. In Food SIM'2000, First International Conference on Simulation in Food and Bio Industries. pp. 20-22.

[8] Banga, R. Julio, Balsa-Canto,E., Moles,C.G. and Alonso,A.A.2003**.** *Improving food processing using modern optimization methods*, Trends in food science & Technology, 14: 131-144.

[9] Myers, R.H. and Montgomery, D.C. 2002. *Response Surface Methodology:Process and Product Optimization using Designed Experiments*. 2nd ed. USA : Wiley,

[10]Derringer,G. and Suich,R.1980. *Simultaneous optimization of several response variables*. Journal of Quality Technology, 12: 214-219.

[11]Vining, G.G.1998. *A compromise approach to multiresponse optimization.* Journal of Quality Technology, 30: 309-313.

[12]Opricovic, S. and Tzeng, G.H.2007. *Extended VIKOR method in comparison with outranking methods.*, European Journal of Operation Research, 178: 514-529.

[13] Tong,L.I., Chen,C.C. and Wang,C.H.2007. *Optimization of multi-response processes using the VIKOR method.*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 31: 1049-1057.

[14]Raissi, S. and Eslami Farsani, R. 2009. *Statistical Process Optimization Through Multi-Response Surface Methodology.*, World Academy of Science, Engineering and Technology, 51.

Archive of SID
www.SID.ir

Robust optimization of whey less yoghurt process based on design of experiments and multi-criteria decision making

Baradaran kazemzadeh, R. [1 *], Salmasnia, A. [2], Kouhestani, B. [3]

1. Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Tarbiat Modares University
2. Ph.D Student of Industrial Engineering Department, Tarbiat Modares University
3. M.Sc. Student of Industrial Engineering Department, Tarbiat Modares University

(Received: 89/12/23 Accepted: 90/8/3)

One of the most important researches areas in food industry is setting parameters in an optimal level to improve process functions. A literature research in food science and technology databases reveals that in recent years many optimization methods have been developed to improve food processing. However, most of these methods have only dealt with a single objective problem. In many situations the quality of a manufactured product is often evaluated by several quality characteristics and multiple objectives must be optimized simultaneously. In this article we propose a method that integrates design of experiments, response surface technique and Signal-to-Noise (SN) ratio concept for optimization of a kind of yoghurt, called Whey Less, with three objectives: TS, Acidity and cost per unit. The proposed method considers both the mean and the variation of quality losses associated with several objectives, and ensures a small variation in quality losses among the objective functions, along with a small overall average loss. Moreover, this method can be used for both kinds of decision variables (discrete and continuous) and its implementation is easy.

Key words: Multi-objective optimization, Design of experiment, Signal to noise ratio, Response surface methodology, Whey Less yoghourt.

Archive of SID

* Corresponding Author E-Mail address: rkazem@modares.ac.ir

www.SID.ir