

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

رضا برادران کاظم زاده<sup>۱\*</sup>، علی سلماس نیا<sup>۲</sup>، بهنوش کوهستانی<sup>۳</sup>

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:** بهینه‌سازی چندهدفه، طراحی آزمایش‌ها، نسبت سیگنال به اختلال، روش سطح پاسخ، ماست تغلیظ شده‌ی تقلیدی

\* مسئول مکاتبات: rkazem@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

امروزه رشد و توسعه‌ی جوامع و پیشرفت علوم و صنایع غذایی، سبب پیدایش عادات‌ها 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup>، جستجوی کامل<sup>۳</sup> و رویکرد یک متغیر در یک زمان<sup>۴</sup> را نمی‌توان بهینه‌سازی نامید.

مدل‌های ریاضی ارائه شده برای بهینه‌سازی فرآیندهای غذایی اغلب به دلیل غیرخطی بودن، جزء مسائل چند نمایی<sup>۵</sup> 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<sup>۶</sup> و مبتنی بر شیب<sup>۷</sup> 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<sup>۸</sup> (GO) استفاده کرد. روش‌های 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<sup>۹</sup> 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<sup>۱۰</sup> (SA)، کلونی مورچگان<sup>۱۱</sup>، جستجوی ممنوعه<sup>۱۲</sup> (TS) و الگوریتم ژنتیک<sup>۱۳</sup> (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 ذخیره‌سازی<sup>۱۴</sup> و کنترل بهینه‌ی فرآیند ذخیره‌سازی میوه<sup>۱۵</sup> 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<sup>۱۶</sup> (ANN) نیز به عنوان ابزاری برای مدل‌سازی

8. Global optimization

9. Branch &amp; Bound

10. Simulated annealing

11. Ant colony

12. Tabu search

13. Genetic algorithm

14. Artificial neural networks

1. Decision variables

2. Trial-and-Error

3. Exhaustive search

4. One-variable-at-a-time

5. Multimodal

6. Iterative

7. Gradient-based

مشخصه‌ی کیفی اسیدیته و ماده جامد کل<sup>۴</sup> (TS) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین هزینه‌ی تولید محصول نیز مشخصه‌ی سوم 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 موننگومری در سال ۲۰۰۲ مطرح شد<sup>[۹]</sup>. این رویکردها زمانی قابل کاربرد هستند که مسئله شامل تعداد محدودی متغیرهای تصمیم باشد. در دسته دوم مهمترین هدف از نظر تصمیم‌گیرنده به عنوان تابع هدف انتخاب می‌شود و سایر اهداف به عنوان محدودیت در مدل وارد می‌شوند. اما در بسیاری از فرایندها 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<sup>۵</sup> [۱۰]، تابع زیان<sup>۶</sup> [۱۱]، تصمیم‌گیری چندمعیاره<sup>۷</sup> [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 ناحیه‌ی

فرایندهای غذایی مورد استفاده قرار گرفته است. تورسیلا و همکاراندر سال ۲۰۰۷ [۳] از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی دو پارامتر موردعلاقه در فرایندهای غذایی تحت فشار بالا<sup>۱</sup> (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 تکنولوژی‌های 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<sup>۲</sup> (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 زمینه بهینه‌سازی مسائل چندهدفه در فرایندهای 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<sup>۳</sup> اشاره کرد که توسط دو

4. Total solid

5. Desirability function

6. Loss function

7. Multi criteria decision making

1. High-pressure

2. Variable retort temperature

3. Wheyless

## 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<sup>۱</sup> 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 و شیمیایی مندرج در استاندارد، دریافت و وارد مرحله‌ی نگهداری سرد یا همان آبگیری<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> می‌شود. در این مرحله نیز شیر طبق برنامه‌ی تولید، زمان لازم را طی نموده و پس از کاهش دما تا مرحله گرمخانه‌گذاری<sup>۴</sup>، کشت آغازگر<sup>۵</sup> تهیه شده به شیر اضافه شده و مرحله گرمخانه‌گذاری تا حصول اسیدیته و بافت مناسب آغاز می‌شود. پس از ایجاد بافت و آروماتی مناسب، ماست حاصل تا دمای بسته‌بندی (۸-۱۰) درجه سانتی‌گراد خنک شده و سپس جهت بسته‌بندی وارد دستگاه پرکن می‌شود.

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-کواریانس اهداف را در نظر می‌گیرند، 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 تصمیم‌اثرگذار 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 چندهدفه 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.

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

### ۳- روش پیشنهادی

در این بخش برای بهینه‌سازی فرآیند معرفی شده در بخش ۲، یک رویکرد بهینه‌سازی چندده 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.

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 اسیدیتته مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که مولفه‌ی اول تاثیر بر خصوصیات فیزیکی محصول نظیر بافت<sup>۱</sup> و مولفه‌ی دوم تاثیر بر طعم<sup>۲</sup> محصول دارد. اندازه‌گیری این دو مولفه توسط روش‌های ساده‌ی آزمایشگاهی امکان‌پذیر است. از آنجایی که همواره یکی از دغدغه‌های اصلی تولیدکنندگان هزینه‌های 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.

$SN_{ij}$   
 $y_{ijk}$   
 $X_i$   
 $\mu_j$   
 $\sigma_j$   
 $NSN_{ij}$   
 $A^+$   
 $A^-$   
 $NSN_j^+$   
 $NSN_j^-$   
 $S_i$   
 $R_i$   
 $w_j$   
 $Q_i$   
 $v$   
 $S^+$   
 $S^-$   
 $R^+$   
 $R^-$   
 $I \mid i=1, \dots, m$   
 $J \mid j=1, \dots, n$   
 $K \mid k=1, \dots, r$   
 $F \mid f=1, \dots, p$   
 $L \mid l=1, \dots, s$

نسبت سیگنال به اختلال<sup>۱</sup> تابع هدف  $\lambda_m$  در  $I$  امین آزمایش  
 مقدار تابع هدف  $\lambda_m$  در آزمایش  $\lambda_m$  و تکرار  $k$  ام  
 متغیر تصمیم  $\lambda_m$   
 میانگین تابع هدف  $\lambda_m$   
 انحراف استاندارد تابع هدف  $\lambda_m$   
 مقدار نرمالایز شده  $SN_{ij}$   
 مجموعه‌ی جواب‌های ایده‌آل  
 مجموعه‌ی جواب‌های ایده‌آل منفی  
 جواب ایده‌آل برای تابع هدف  $\lambda_m$   
 جواب ایده‌آل منفی برای تابع هدف  $\lambda_m$   
 معیار سودمندی<sup>۲</sup> در آزمایش  $\lambda_m$   
 معیار ضرر<sup>۳</sup> در آزمایش  $\lambda_m$   
 وزن تابع هدف  $j$   
 شاخص ویکور در آزمایش  $i$   
 وزن منفعت گروهی  
 کمینه  $S_i$   
 بیشینه  $S_i$   
 کمینه  $R_i$   
 بیشینه  $R_i$   
 مجموعه‌ی آزمایش‌ها  
 مجموعه‌ی توابع هدف  
 مجموعه‌ی تکرار آزمایش‌ها  
 مجموعه متغیرهای تصمیم  
 مجموعه سطوح فاکتورها

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

### 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 فاز ۱، 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 و صاحب 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 نظر گرفته 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 TS و 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

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

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

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

$$SN_{ij} = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^r \left[ \frac{1}{y_{i-k}^2} \right] \right) \quad (3)$$

در فرآیند مورد بررسی دو هدف TS و اسیدیت از نوع ۳ و متغیر هزینه از نوع ۱ هستند. بر همین اساس نسبت SN هر 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 VIKOR را برای تجمیع نسبت‌های سیگنال به اختلال متناظر اهداف موردنظر پیشنهاد می‌کند.

#### ۲-۲-۲-۳- محاسبه‌ی شاخص تجمیع

اگرچه روش‌های زیادی برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه پیشنهاد شده است اما غالب آنها واریانس انحراف توابع هدف از مقادیر بهینه‌شان را در 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 VIKOR توابع هدف را به شرح زیر تجمیع می‌کند.

(a) محاسبه‌ی نسبت SN نرمالایز شده

در این گام به منظور بی‌واحد کردن اهداف با استفاده از نرم ۲ آنها را به کمک رابطه (۴) نرمالایز می‌کنیم.

$$NSN_{ij} = \frac{SN_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m SN_{ij}^2}} \quad (4)$$

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

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، اسیدیت و هزینه‌ی واحد محصول هستیم. در این بخش رویکردی را برای تجمیع اهداف فوق ارائه می‌کنیم که از 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 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. نسبت SN یک 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<sup>۱</sup> 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.

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

در این مرحله لازم است با توجه به مقادیر به دست آمده برای شاخص تجمع، به تعیین سطوح بهینه‌ی فاکتورها پردازیم. 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 تجمع 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 تجمع 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 ۱ تا نوع ۴) نیز به طور مشابه انجام می‌دهیم. با توجه به اینکه هدف، حداقل کردن شاخص تجمع است، لذا سطحی به عنوان سطح بهینه انتخاب می‌شود که دارای کمترین مقدار شاخص تجمع باشد.

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

در اغلب آزمایش‌ها 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.

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 نشان‌دهنده بیشینه و کمینه‌ی مقادیر  $NSN_{ij}$  همه‌ی آزمایش‌ها هستند، به کمک روابط (۵) و (۶) تعیین می‌شوند.

$$A^+ = \{(\max_{j \in J} NSN_{ij} | i = 1, 2, \dots, m)\} = \{NSN_1^+, NSN_2^+, \dots, NSN_j^+, \dots, NSN_n^+\} \quad (5)$$

$$A^- = \{(\min_{j \in J} NSN_{ij} | i = 1, 2, \dots, m)\} = \{NSN_1^-, NSN_2^-, \dots, NSN_j^-, \dots, NSN_n^-\} \quad (6)$$

### (c) محاسبه‌ی معیار سودمندی ( $S_i$ ) و

### معیار ضرر ( $R_i$ )

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.

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_j (NSN_j^+ - NSN_{ij})}{NSN_j^+ - NSN_j^-} \quad (7)$$

$$R_i = \max_j \left[ \frac{w_j (NSN_j^+ - NSN_{ij})}{NSN_j^+ - NSN_j^-} \right] \quad (8)$$

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) محاسبه‌ی شاخص تجمع

$$Q_i = v \left[ \frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} \right] + (1 - v) \left[ \frac{R_i - R^+}{R^- - R^+} \right] \quad (9)$$

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

تقلیدی بوده که دارای ۳ تابع هدف است. بنابراین مسئله فوق در دسته‌ی مسائل چندهدفه قرار می‌گیرد که به همین منظور روشی 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 می‌شود.

#### -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 هدف هستیم کهاز میان آنها دو متغیر  $X_1$  و  $X_2$  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 مقادیر در 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 MINITAB 15 صورت گرفته است.

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

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

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 توسعه‌ی 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 تجمیعی در 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 تجمیعی 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 مانند Lingo است.

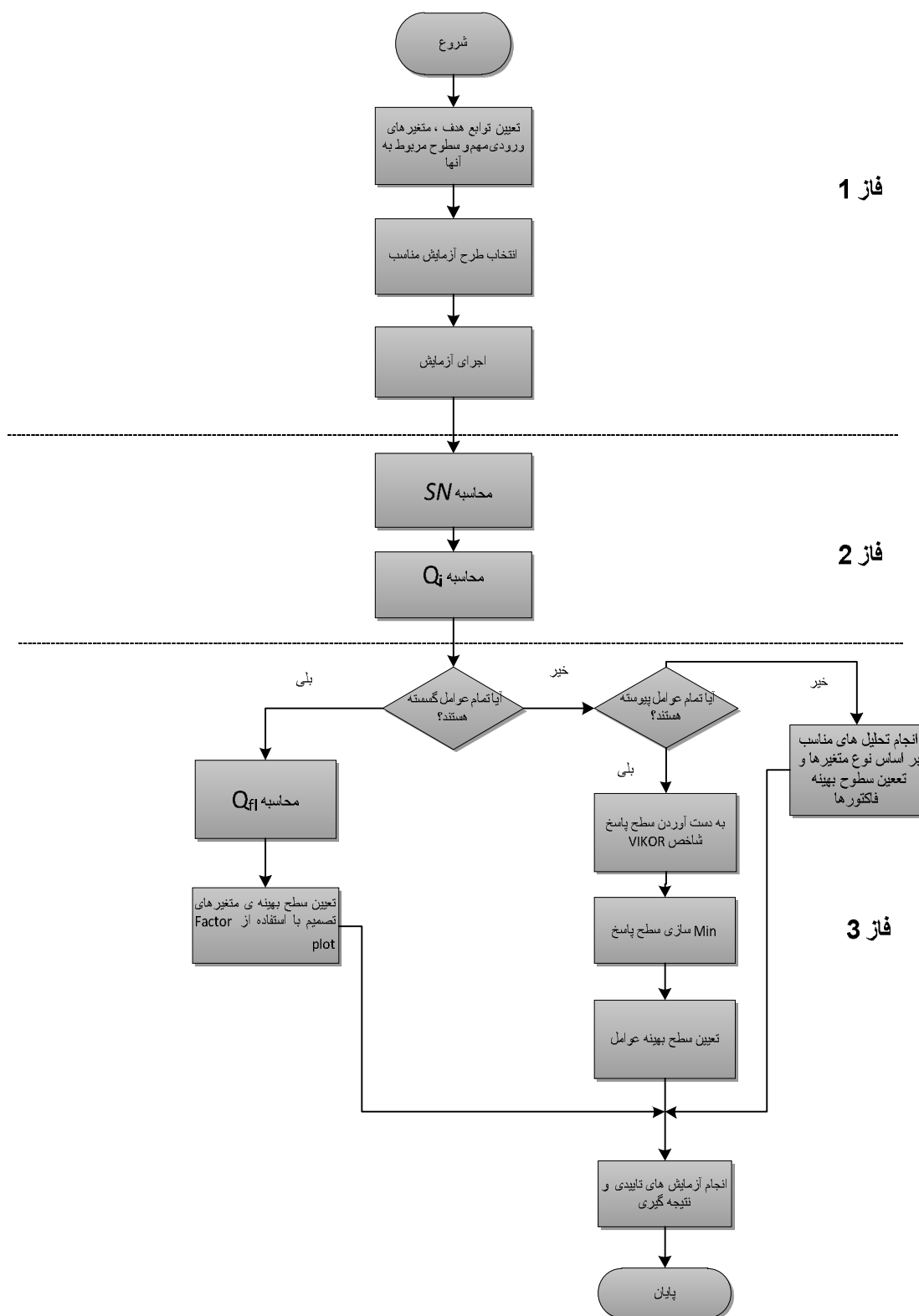
در ادامه و در شکل ۱ نمودار مربوط به روش پیشنهادی آورده شده است.

#### ۴-۱- مثال عددی

همان‌طور که در قسمت‌های پیشین نیز اشاره شد هدف اصلی ما بهینه‌سازی فرآیند تولید ماست تغلیظ شده‌ی

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

| متغیر | فاکتور کنترلی                | سطح ۱    | سطح ۲    | سطح ۳ | سطح ۴ |
|-------|------------------------------|----------|----------|-------|-------|
| $X_1$ | نوع شیر خشک <sup>۱</sup>     | نوع ۱    | نوع ۲    | نوع ۳ | نوع ۴ |
| $X_2$ | دمای گرمخانه‌گذاری           | ۲۲°C     | ۴۷°C     | -     | -     |
| $X_3$ | نوع کشت آغازگر <sup>۲</sup>  | Bulk     | Direct   | -     | -     |
| $X_4$ | درصد پروتئین سرمی افزوده شده | ۱٫۵ درصد | ۴ درصد   | -     | -     |
| $X_5$ | زمان نگهداری سرد             | ۴۵ دقیقه | ۶۰ دقیقه | -     | -     |
| $X_6$ | زمان نگهداری گرم             | ۳۰ دقیقه | ۴۵ دقیقه | -     | -     |



شکل ۱ نمودار روش پیشنهادی در بهینه‌سازی فرآیند چندهدفه

جدول ۲ طرح آزمایش

| Blocks      |         | Incubation temp. | Whey protein | Cold holding time | Warm holding time | TS1   | TS2   | TS3   | Acidit y <sub>1</sub> | Acidit y <sub>2</sub> | Acidit y <sub>3</sub> | 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  |

## -تعیین سطوح بهینه متغیرهای گسسته

به منظور تعیین سطوح بهینه ی دو متغیر  $X_1$  و  $X_2$  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 کرده ایم و با رسم نمودار فاکتوری<sup>۱</sup> مربوط به هر یک از آنها و استفاده از این موضوع که کوچکتر بودن شاخص VIKOR مطلوب 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.

## 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،۳ به محاسبه ی نسبت سیگنال به اختلال پرداخته ایم که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. محاسبه SN برای تابع هدف هزینه با استفاده از رابطه ی ۱ و برای توابع TS و اسیدیته با استفاده از رابطه ۳ صورت گرفته است. این محاسبات به راحتی با استفاده از نرم افزارهای Excel یا MINITAB15 قابل انجام هستند.

## -محاسبه ی شاخص تجمیع (Q)

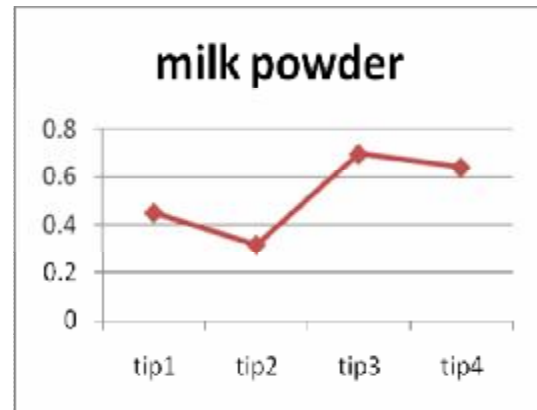
در این مرحله با استفاده از روابط ارائه شده در بخش ۲،۳ به محاسبه ی شاخص تجمیع برای هر یک از اجراهای آزمایش می پردازیم که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. این شاخص معیاری برای تصمیم گیری در مورد سطوح بهینه ی متغیرهای تصمیم خواهد بود.

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 |



شکل ۳ نمودار شاخص ویکور به ازای سطوح مختلف Starter

شکل ۲ نمودار شاخص ویکور به ازای سطوح مختلف milk powder

جدول ۶ شاخص ویکور به ازای سطوح مختلف کشت آغازگر

| Starter | $Q_{a1}$    |
|---------|-------------|
| Bulk    | 0.407142112 |
| Direct  | 0.646241507 |

جدول ۵ شاخص ویکور به ازای سطوح مختلف شیر خشک

| Milk powder | $Q_{11}$    |
|-------------|-------------|
| Tip1        | 0.451385001 |
| Tip2        | 0.317284615 |
| Tip3        | 0.69712436  |
| Tip4        | 0.640973261 |

شده است. نمودارهای مربوط به اثرات اصلی و اثرات متقابل که در شکل های ۵ و ۶ آمده است نیز نشان دهنده میزبان اثرگذاری متغیرهای مربوطه هستند. خروجی مربوط به نرم افزار نیز در شکل ۴ آورده شده است.

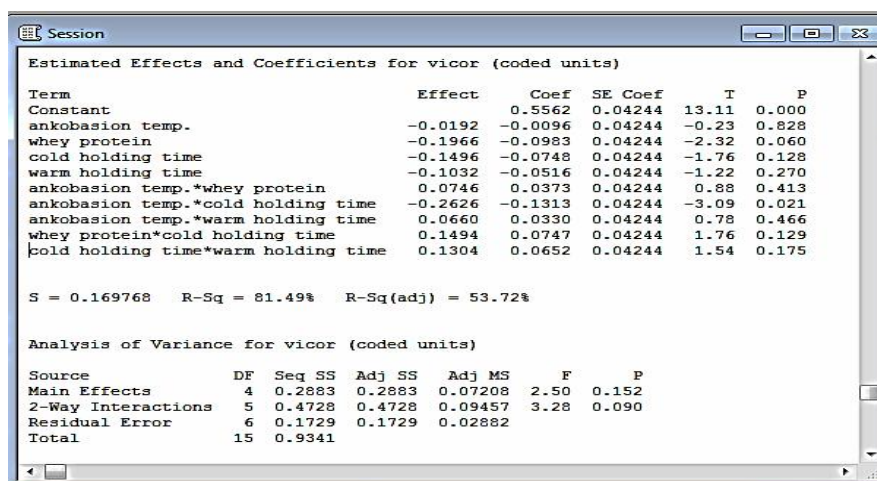
جدول ۷ مقادیر بهینه متغیرهای پیوسته

| متغیر تصمیم | مقدار کد شده | مقدار واقعی |
|-------------|--------------|-------------|
| $X_2$       | 1            | 47°C        |
| $X_4$       | 0            | 2.75%       |
| $X_5$       | 1            | 60 min      |
| $X_6$       | 0            | 37.5 min    |

#### تعیین سطوح بهینه فاکتورهای پیوسته

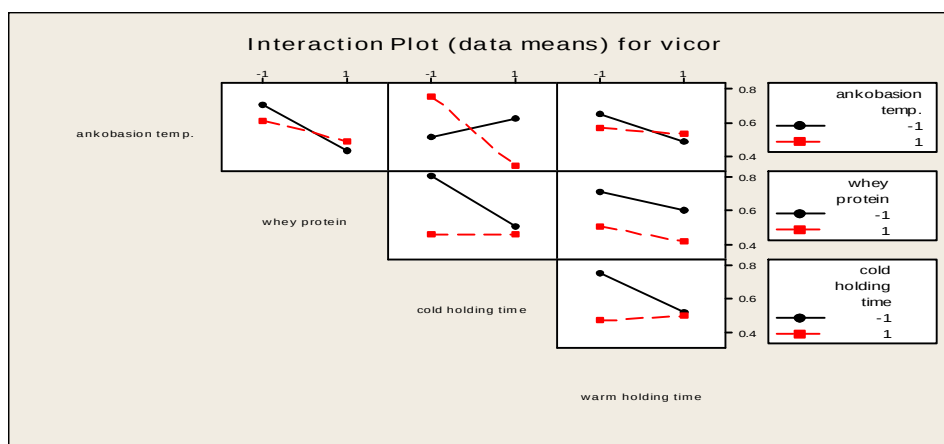
برای تعیین سطوح بهینه فاکتورهای پیوسته، از متدولوژی سطح پاسخ برای تخمین شاخص تجمع بر حسب متغیرهای تصمیم پیوسته استفاده کردیم. انجام محاسبات فوق به راحتی با استفاده از نرم افزار MINITAB15 قابل انجام است. در این قسمت اثر عوامل اصلی<sup>۱</sup> و هم چنین اثر متقابل<sup>۲</sup> میان عوامل در نظر گرفته می شود و از میان آنها، عواملی که دارای اثر معنادار هستند (p-value آنها از یک مقدار پیش فرض کوچکتر است) انتخاب می شوند و به این ترتیب رابطه (۱۰) به دست می آید که در آن متغیرهای  $X_i$  به دلیل کد کردن، مقادیر -۱ تا ۱ را می پذیرند. به منظور بهینه سازی رابطه فوق از نرم افزار Lingo 8 استفاده کردیم که نتایج آن در جدول ۷ آورده

1. Main effect
2. Intraction effect

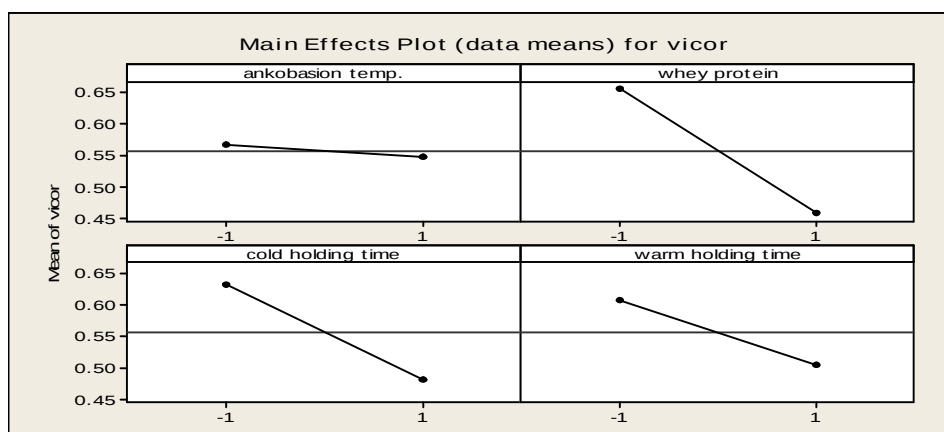


شکل ۴ خروجی نرم افزار مربوط به اثرگذاری متغیرهای پیوسته

$$\hat{Q} = 0.5562 - 0.0983X_4 - 0.0748X_5 - 0.0516X_6 + 0.0373X_4X_2 - 0.1313X_5X_2 + 0.0330X_6X_2 + 0.0747X_4X_5 + 0.0652X_5X_6$$



شکل ۵ نمودار اثرات اصلی



شکل ۶ نمودار اثرات متقابل

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 پروتئین های سرمی افزوده شده | 2.75%     | 3%       |
| $X_5$ | زمان نگه داری سرد                | 60min     | 45min    |
| $X_6$ | زمان نگه داری گرم                | 37.5 min  | 30min    |

### ۳-۲- آنالیز حساسیت نتایج به دست آمده

در این قسمت لازم است به دو نکته ی 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 می تواند بسته به شرایط خود، وزن های 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  $W_i$  های 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 می رود هزینه های تولید به ازای اهمیت بیشتر به مشخصه های کیفی، افزایش می یابد. 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

نتایج به دست آمده از جدول ۹ نشان می دهد که با تغییر شرایط فعلی فرایند، اگرچه هزینه تولید واحد محصول حدود ۲۰۰ ریال افزایش می یابد ولی بهبود قابل توجهی در مقادیر دو تابع هدف دیگر ایجاد می شود و با توجه به اینکه یکی از مشکلات اصلی مربوط به تولید این محصول بالا بردن میزان اسیدیته و TS به 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، می تواند برای واحد تولیدی ارزشمند باشد.

دیگری بکاهد. نکته‌ی دوم اینکه در این فرآیند خصوصیات شیر دریافتی نظیر مواد جامد بدون چربی (SNF)، شمارش کلی<sup>۲</sup>، 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 حل مسائل 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

تقلیدپرداخته 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 اهمیت 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 اسیدیته است، 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 در دو 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 آنکه برای دست‌یابی به مقادیر واقعی وزن اهداف، استفاده از یک روش تعاملی<sup>۳</sup> 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 داده‌های مورد نیاز 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

جدول ۱۰ مقایسه ی میانگین توابع هدف به ازای وزن های مختلف

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

## ۶- منابع

- 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*. 2<sup>nd</sup> 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.
- [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*. computers 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

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

Baradaran kazemzadeh, R.<sup>1\*</sup>, Salmasnia, A.<sup>2</sup>, Kouhestani, B.<sup>3</sup>

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 yoghurt.

---

\* Corresponding Author E-Mail address: [rkazem@modares.ac.ir](mailto:rkazem@modares.ac.ir)