مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال هفدهم، شماره اول (پیاپی ۶۴)، بهار ۹۹ ، ص ص ۲۳-۱
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

کاربرد برنامه‌ریزی فیزیکی خطی در بهینه‌سازی گسترش عملکرد کیفیت فازی

احمدرضا رئوفیان[۱]، عادل آذر[۲*]، سید حمید خداداد حسینی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مدیریت و اقتصاد، گروه مدیریت صنعتی، تهران، ایران
۲- استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مدیریت و اقتصاد، گروه مدیریت صنعتی، تهران، ایران
۳- استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مدیریت و اقتصاد، گروه مدیریت بازرگانی، تهران، ایران

رسید مقاله: ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۸
پذیرش مقاله: ۵ بهمن ۱۳۹۸

چکیده

گسترش عملکرد کیفیت یک سیستم توسعه محصول و مدیریت کیفیت مشتری‌مدار برای دستیابی به حداکثر رضایت مشتری است. به‌کارگیری گسترش عملکرد کیفیت مستلزم تعیین روابط بین خواسته‌های مشتری و نیازمندی‌های فنی، و همچنین همبستگی بین نیازمندی‌های فنی است که توسط یک تیم بین وظیفه‌ای انجام می‌شود. چنین داده‌هایی ماهیت مبهم و فازی دارند و افراد قضاوت‌های متفاوتی درباره این روابط دارند. در این پژوهش برای مواجهه با ماهیت فازی در فرآیند طراحی محصول استفاده از یک روش تصمیم‌گیری گروهی فازی در گسترش عملکرد کیفیت پیشنهاد شده است. همچنین یک چارچوب ترکیبی از گسترش عملکرد کیفیت و برنامه‌ریزی فیزیکی خطی برای تعیین سطح برآورد بهینه هر یک از نیازمندی‌های فنی محصول و حداکثر کردن رضایت مشتری کل ارایه شده است. در نهایت، چارچوب ارایه شده برای یک محصول خاص در شرکت مجتمع صنعتی اسفراین که تولیدکننده قطعات سنگین فولادی می‌باشد، به‌کار گرفته شده است. نتایج حاصل از حل مدل، سطح برآورد بهینه‌ی هر کدام از نیازمندی‌های فنی و همچنین میزان بودجه اختصاص یافته به هر کدام از آنها را نشان می‌دهد به‌گونه‌ای که سطح رضایت مشتری از محصول تولید شده بر مبنای چهار خواسته‌ی مشتری در دامنه‌های ایده‌آل و مطلوب قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: گسترش عملکرد کیفیت، خانه کیفیت، عملگر ارزش مورد انتظار فازی، برنامه‌ریزی فیزیکی خطی، اعداد فازی مثلثی

۱ مقدمه

اخیرا رقابت‌پذیری جهانی تبدیل به بزرگ‌ترین دغدغه شرکت‌های تولیدی و خدماتی شده است که به‌دنبال سطوح بالاتر کیفیت برای محصولات و خدماتشان و بهبود مستمر برای مواجهه با سرعت مضاعف توسعه و تغییر

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: azara@modares.ac.ir

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

هستند [۱]. با افزایش رقابت در بازار، شرکت‌های بسیاری جهت بالا بردن سهم بازارشان اقدام به شنیدن صدای مشتریان کرده‌اند [۲]. صرف نظر از اینکه شرکت‌ها چه محصولات یا خدماتی ارایه می‌کنند بدون شک رضایت مشتریان یک عامل مهم در دستیابی به سهم بازار و ارتقای رقابت پذیری در عرصه جهانی است [۳]. مشتری‌مداری باید اساس برنامه‌های راهبردی سازمان در طول فرآیند تولید باشد. بنابراین، عبارت "مشتری پادشاه است" تبدیل به شعار هر شرکت موفقیت محوری شده است [۴]. در راستای دستیابی به فروش و سود بالاتر در بازارهای بزرگ‌تر و توسعه بلند مدت، محصولات مقرون به صرفه‌تر بیشتری با کیفیت بالا طراحی و تولید می‌شوند تا انتظارات متنوع مشتریان را برآورده کنند [۵].

شرکت‌های تولیدی می‌توانند از رقبایشان پیشی بگیرند اگر توانایی فراهم کردن محصولات و خدمات با کیفیتی داشته باشند که منجر به رضایت مشتری می‌شود و همچنین بتوانند به تقاضای بازار به‌طور منعطف پاسخ دهند. در عین حال، این ایده مقبولیت بیشتری یافته است که مشتریان تمایل به پرداخت بیشتر برای محصولاتی دارند که مطابق ترجیحات، نیازها، و انتظاراتشان باشد [۶]. سفارشی‌سازی در مقایسه با استانداردسازی محبوبیت فزاینده‌ای پیدا کرده است زیرا سفارشی‌سازی این امکان را به مشتری می‌دهد که محصولاتی منطبق بر نیازهایش تعریف کند [۷]. گسترش عملکرد کیفیت[1] (QFD) سیستمی است که تضمین می‌کند نیازهای مشتری در فرآیند توسعه محصول مدنظر قرار می‌گیرد. گسترش عملکرد کیفیت ابزاری برای منطبق کردن نیازهای مشتری با مشخصه‌های محصول فراهم می‌کند و یک روش ساختاریافته برای توسعه محصول کیفیت محور ارایه می‌دهد [۸].

صنعت فولاد جزء صنایع مادر و استراتژیک محسوب می‌شود و محصولات این صنعت در بخش‌های مختلف دیگر (از قبیل خودروسازی و ابزار آلات و ماشین‌های کشاورزی و ...) مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا کیفیت محصولات این صنعت به‌شدت حایز اهمیت است. از آنجایی‌که تولید در این صنعت بر اساس سفارش مشتری انجام می‌شود؛ بنابراین محصولات تولیدی این بخش از صنعت باید مطابق خواسته مشتریان و منطبق بر نیازهای آنها باشد. لذا کاربرد QFD به‌عنوان ابزاری مفید برای تولید محصولات منطبق بر خواسته مشتریان در صنایع فولادی می‌تواند راهگشا باشد.

لای و همکارانش [۹] برنامه‌ریزی فیزیکی خطی[2] (LPP) را برای بهینه‌سازی گسترش عملکرد کیفیت با داده‌های قطعی پیشنهاد کردند و روش پیشنهادی را با ارایه یک مثال ساده تشریح نمودند. از آنجایی‌که به‌کارگیری گسترش عملکرد کیفیت مستلزم تعیین روابط بین خواسته‌های مشتری و نیازمندی‌های فنی، و همچنین همبستگی بین نیازمندی‌های فنی است، اظهار نظر درباره‌ی این روابط و همبستگی‌ها از طریق داده‌های کلامی مانند "ارتباط ضعیف"، "ارتباط قوی"، و یا "ارتباط خیلی قوی" که برای افراد در مقایسه با اعداد، ملموس‌تر و قابل درک‌تر هستند با سهولت بیشتر و قابلیت اعتماد بالاتر امکان‌پذیر است. چنین داده‌هایی ماهیت مبهم و فازی دارند و افراد قضاوت‌های متفاوتی درباره این روابط دارند. در این پژوهش برای مواجهه با ماهیت فازی در فرآیند

[1] Quality Function Deployment
[2] Linear Physical Programming

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

طراحی محصول یک روش تصمیم‌گیری گروهی فازی پیشنهاد شده است و برای نرمال‌سازی خانه کیفیت از ترکیب مدل چن و ونگ [۱۰] و عملگر ارزش مورد انتظار فازی استفاده شده است. همچنین یک چارچوب ترکیبی از گسترش عملکرد کیفیت و برنامه‌ریزی فیزیکی خطی برای تعیین سطح برآورد بهینه هر یک از نیازمندی‌های فنی محصول و حداکثر کردن رضایت مشتری کل ارایه شده است.

در ادامه مقاله، در بخش دوم پیشینه گسترش عملکرد کیفیت و برنامه‌ریزی فیزیکی خطی مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس در بخش سوم روش تحقیق به تفصیل تشریح می‌شود. در بخش چهارم، چارچوب ارایه شده را برای یکی از قطعات فولادی شرکت مجتمع صنعتی اسفراین به‌عنوان مطالعه موردی به‌کار می‌گیریم و در پایان، نتایج پژوهش بیان می‌گردد.

۲ مرور ادبیات

گسترش عملکرد کیفیت یک رویکرد مشتری محور برای طراحی/بهبود محصول و خدمت است که نیازمندی‌های مشتری را به نیازمندی‌های کیفیت در راستای رسیدن به یک محصول یا خدمت نهایی ترجمه می‌کند. این رویکرد به تیم‌های تحقیق و طراحی کمک می‌کند تا محصولات و خدماتی طراحی کنند که انتظارات مشتریان را برآورده می‌سازد یا حتی فراتر می‌رود [۱۱]. کاربرد QFD در طراحی محصول می‌تواند قابلیت اعتماد و درآمدها را بهبود ببخشد و همچنین هزینه و زمان طراحی را کاهش دهد [۱۲]. از این‌رو، QFD در صنایع مختلفی مثل ارتباطات، سیستم‌های نرم افزاری، حمل و نقل، الکترونیک، آموزش و پژوهش، تولید، خدمات، فناوری اطلاعات، و کشتی‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳]. برای مثال وود و همکاران از گسترش عملکرد کیفیت برای طراحی بیمارستان سبز استفاده کردند [۱۴] و چن گسترش عملکرد کیفیت را برای طراحی محصول در صنعت نیمه‌هادی مورد استفاده قرار داد [۱۵].

برنامه‌ریزی خطی یکی از نخستین روش‌هایی است که برای بهینه‌سازی QFD مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعات آسکین و داوسون [۱۶]، و موسکوویتز و کیم [۱۷] اشاره کرد. چن و کو [۱۸] از برنامه‌ریزی خطی فازی در بهینه‌سازی QFD بهره بردند. همچنین ژو [۱۹] از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و جوس [۲۰] از بهینه‌سازی پارامتری min-max در اجرای QFD استفاده کرده‌اند. چادوری و قوآدوس [۲۱] نیز از یک مدل بهینه‌سازی صفر و یک چند مرحله‌ای برای بهینه‌سازی QFD بهره برده‌اند. یکی دیگر از روش‌های محبوب در بهینه‌سازی QFD، برنامه‌ریزی آرمانی است. در این مورد می‌توان به مطالعات کارساک و همکارانش [۲۲]، هان و همکارانش [۲۳]، و چن و ونگ [۲۴] اشاره کرد. چن و همکارانش [۲۵] نیز برنامه‌ریزی آرمانی فازی را برای بهینه‌سازی QFD مورد استفاده قرار دادند. مطالعات دیگری نیز با تمرکز بر کاربرد برنامه‌ریزی ریاضی جهت بهینه‌سازی مشخصه‌های فنی انجام شده است. در این زمینه می‌توان به مطالعات صورت گرفته توسط داوسون و آسکین [۲۶]، و بلهه و کوسیاک [۲۷] اشاره کرد. در پژوهش دیگری لای و همکارانش [۲۸] از برنامه‌ریزی پویا برای بهینه‌سازی QFD بهره جسته‌اند.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

همه روش‌های فوق یک مسأله چند هدفه را به یک مسأله تک هدفه تبدیل می‌کنند و سپس یک جواب رضایت‌بخش برای مسأله تک هدفه به‌دست می‌آورند. از این‌رو، تیم طراحی باید در ابتدا به هر هدف وزنی اختصاص دهد. این اوزان دارای اهمیت هستند و باید بر حسب توصیف مساله بهینه‌سازی، مناسب باشند. لای و همکارانش [۹] برای بهینه‌سازی گسترش عملکرد کیفیت با داده‌های قطعی، برنامه‌ریزی فیزیکی خطی را مورد استفاده قرار داده‌اند.

روش برنامه‌ریزی فیزیکی در شکل غیرخطی (کلی) توسط پروفسور آکیل مسیک [۲۹] در سال ۱۹۹۶ توسعه یافت و در ابتدا در بهینه‌سازی طراحی مهندسی مورد استفاده قرار گرفت. مسیک [۳۰] و [۳۱]، مسیک و هاتیس [۳۲]، ویلسون و همکارانش [۳۳]، کواچ و همکارانش [۳۴]، و مسیک و اسماعیل-یحیی [۳۵] برنامه‌ریزی فیزیکی را در شکل غیرخطی مورد استفاده قرار داده‌اند. تیان و ژوو [۳۶] برنامه‌ریزی فیزیکی و الگوریتم ژنتیک را برای تخصیص افزونگی در سیستم‌های چند حالته به‌کار بردند. رینوسو- مزا و همکاران [۳۷] برنامه‌ریزی فیزیکی را در یک بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی مورد استفاده قرار دادند و شکل خطی آن نیز در زمینه‌های گوناگونی به‌کار رفته است. ماریا و همکارانش [۳۸] در برنامه‌ریزی تولید، ملاکرینودیس و همکارانش [۳۹] برای مکان‌یابی مجدد یک تسهیلات تولیدی، ملاکرینودیس و همکارانش [۴۰] برای بهینه‌سازی یک شبکه توزیع، و مک آلیستر و همکارانش [۴۱] در بهینه‌سازی مشارکتی برای بهینه‌سازی طراحی چند موضوعی چند هدفه، برنامه‌ریزی فیزیکی خطی را به‌کار برده‌اند. لی و همکارانش [۴۲] نیز از برنامه‌ریزی فیزیکی خطی با اوزان پویا در بهینه‌سازی مشارکتی چند هدفه بهره بردند.

در پژوهش حاضر، از برنامه‌ریزی فیزیکی خطی(LPP) که رویکرد نسبتاً جدیدی است و فرآیند بهینه‌سازی را تسهیل می‌کند، برای فرموله کردن و حل مسأله طراحی در QFD استفاده شده است. در این پژوهش استفاده از مدل برنامه‌ریزی فیزیکی خطی به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری ترجیح داده شده است زیرا تمام مسایل بهینه‌سازی چند هدفه به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم با تعیین اوزان عددی درگیر هستند و در اینجا چالش، چگونگی تعیین اوزان درست در طول فرآیند طراحی است بدین دلیل که اوزان معتبر در یک فضای طراحی خاص ممکن است در یک همسایگی دیگر معتبر نباشند. تیم طراحی باید قادر به تعیین اوزان درست به شیوه‌ای منعطف و ساده باشد که هم به‌صورت محلی و هم سراسری دارای اعتبار باشد. در بیشتر روش‌های سنتی، اوزان ثابت هستند. این امر ممکن است در بعضی موارد منجر به انحراف شود. برنامه‌ریزی فیزیکی خطی یک روش متفاوت و سیستماتیک برای به‌دست آوردن اوزان به‌صورت محلی و سراسری ارایه می‌دهد. به‌علاوه، رویه به‌دست آوردن اوزان را با فرآیند بهینه‌سازی برای به‌دست آوردن جواب بهینه، ادغام می‌کند. و همچنین در قیاس با سایر روش‌ها، به‌دست آوردن داده‌های مورد استفاده در LPP نسبتاً آسان‌تر است.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

۳ روش تحقیق

الگوریتم تصمیم در این پژوهش، تعیین سطح برآورد هر یک از نیازمندی‌های فنی[1] (TRs) محصول با تمرکز بر فرآیند طراحی و اهداف از پیش تعیین شده می‌باشد. در یک نگاه کلی، الگوریتم پیشنهادی شامل دو قسمت کلی می‌شود. مرحله اول، جمع‌آوری اطلاعات کافی برای LPP از طریق تکمیل خانه کیفیت[2] (HOQ) را دربرمی‌گیرد. سپس در مرحله دوم با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی فیزیکی خطی و نتایج به‌دست آمده از مرحله اول مدل‌سازی ریاضی انجام می‌شود.

پس از شناسایی محصول مورد مطالعه نوبت به شناسایی خواسته‌های مشتری می‌رسد. در اینجا پس از جمع‌آوری برخی اطلاعات کلی از طریق روش کتابخانه‌ای، با مراجعه به کتابخانه‌ها، نشریات علمی داخلی و خارجی، جستجو در پایگاه‌های اطلاعاتی اینترنتی، و با بررسی اسناد و مدارک شرکت و همچنین بررسی شکایات مشتریان، و در نهایت با نظر اعضای تیم QFD فهرستی از خواسته‌های مشتری تهیه می‌شود. سپس نیازمندی‌های فنی شناسایی می‌شوند هر یک از این نیازمندی‌های فنی مستقیماً بر یک یا تعدادی از خواسته‌های مشتری تأثیر گذاشته و باید در قالبی قابل اندازه‌گیری و عملی بیان شود. داده‌های ورودی در فرآیند QFD بر مبنای ارزیابی‌های فردی که تصمیم‌گیرندگان یا متخصصان با تکیه بر دانش حرفه‌ای، تجربه، و اطلاعات در دسترس انجام می‌دهند، حاصل می‌شود. ارزیابی‌های افراد از مفاهیم، همیشه ذهنی و غیر دقیق هستند و افراد از عبارات زبانی برای بیان قضاوت‌هایشان استفاده می‌کنند که باعث ایجاد یک محیط تصمیم‌گیری فازی می‌شود [۴۳]. در محیط فازی برای تعریف خانه کیفیت، اطلاعات کسب شده را می‌توان به‌صورت یک متغیر زبانی بیان کرد. بنابراین برای تعیین نوع ارتباط بین نیازمندی‌های فنی و خواسته‌های مشتری می‌توان از یک متغیر زبانی تحت عنوان "ارتباط" استفاده کرد [۴۴]. سپس این داده‌های کلامی به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند و با استفاده از عملگر ارزش فازی مورد انتظار ترکیب می‌شوند. و در نهایت مدل برنامه‌ریزی فیزیکی خطی توسعه داده می‌شود.

به‌طور خلاصه الگوریتم پیشنهادی تحقیق گام‌های زیر را دربرمی‌گیرد.

گام ۱) شناسایی خواسته‌های مشتری و نیازمندی‌های فنی مؤثر بر آن‌ها و تعیین روابط میان آن‌ها

گام ۲) تعیین ماتریس وابستگی داخلی نیازمندی‌های فنی

گام ۳) نرمالسازی روابط خانه کیفیت با α-برش‌های مختلف

گام ۴) ترکیب نتایج به‌دست آمده از α-برش‌های مختلف به‌وسیله عملگر ارزش مورد انتظار فازی

گام ۵) تعیین اینکه هر کدام از خواسته‌های مشتری به کدامیک از کلاس‌های چهار گانه تعلق دارد و تعیین سطوح رضایت متفاوت برای هر خواسته مشتری

گام ۶) برآورد شاخص هزینه برای هر یک از نیازمندی‌های فنی

گام ۷) ساختن توابع کلاس و محاسبه اوزان LPP

[1] Technical Requirements
[2] House of Quality

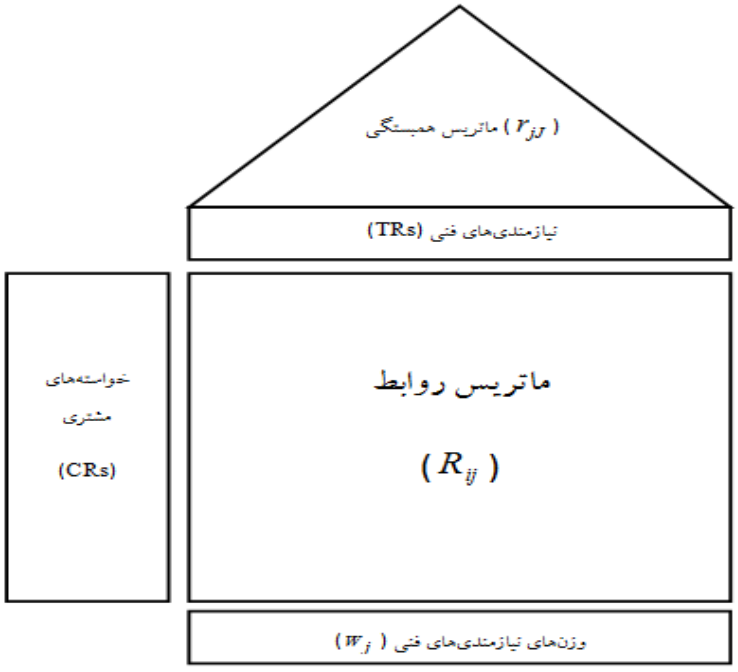
[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

گام ۸) فرموله کردن و حل مدل ریاضی برنامه‌ریزی فیزیکی برای تعیین سطح برآورد هر یک از نیازمندی‌های فنی.

۳-۱ گسترش عمکرد کیفیت

مفهوم QFD در دهه ۱۹۶۰ در ژاپن ظهور یافت. بعد از جنگ جهانی دوم، شرکت‌های ژاپنی که قبلا اقدام به کپی‌برداری از محصولات می‌کردند تغییر رویه دادند و رو به تولید محصولات جدید آوردند. QFD در چنین محیطی به‌عنوان یک مفهوم برای توسعه محصولات جدید معرفی شد. تعریف زیر که اهداف QFD را خلاصه می‌کند به درک بهتر این مفهوم کمک می‌کند: "QFD یک روش ساختاریافته برای برنامه‌ریزی و توسعه محصول است که تیم توسعه محصول را قادر می‌سازد نیازهای مشتری را به‌شکلی واضح شناسایی نماید و سپس هر کدام از قابلیت‌های محصول یا خدمت را به‌طور سیستماتیک بر حسب تاثیری که در برآورد آن نیازها دارد ارزیابی کند" [۴۵]. ثابت شده است که QFD مزایای بسیاری دارد مثل افزایش رضایت مشتری، کاهش هزینه توسعه محصول، کاهش زمان رسید به بازار، و افزایش تیم‌های کاری چند وظیفه‌ای در فرآیند توسعه محصول [۴۶]. QFD یک روش جامع و نظام‌مند است که امکان انتقال نیازمندی‌های مشتری را به مشخصه‌های فنی محصول به‌منظور افزایش رضایت مشتری فراهم می‌کند [۴۳]. خانه کیفیت (HOQ) مهم‌ترین ابزار QFD است که شامل ماتریس روابط بین نیازمندی‌های مشتری[1] (CRs) و مشخصه‌های فنی (TRs)، و همچنین اوزان اهمیت نیازمندی‌های مشتری و ماتریس همبستگی مشخصه‌های فنی می‌شود [۱۳]. در شکل ۱، R_{ij} روابط بین CR_i و TR_j را نشان می‌دهد و r_{jJ} نمایانگر رابطه بین TR_j و TR_J است.



شکل ۱. خانه کیفیت

[1] Customer Requirements

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

در این پژوهش میزان ارتباط بین خواسته‌های مشتری و نیازمندی‌های فنی بر اساس مفاهیم "بدون ارتباط"، "ارتباط ضعیف"، "ارتباط متوسط"، "ارتباط قوی"، "ارتباط خیلی قوی" طبقه‌بندی می‌شوند. این عبارات کیفی به اعداد فازی مثلثی (۰,۰,۰/۳)، (۰,۰/۲۵,۰/۵)، (۰/۳,۰/۵,۰/۷)، (۰/۵,۰/۷۵,۱) و (۰/۷,۱,۱) ترجمه می‌شوند [۴۴]. همچنین میزان همبستگی نیازمندی‌های فنی بر اساس مفاهیم "تأثیر منفی و قوی"، "تأثیر منفی"، "تأثیر مثبت"، "تأثیر مثبت و قوی" طبقه‌بندی می‌شوند. این داده‌های کلامی به اعداد فازی مثلثی (۰,۰,۰/۳)، (۰,۰/۳,۰/۵)، (۰/۵,۰/۷,۱) و (۰/۷,۱,۱) تبدیل می‌شوند [۴۷].

هر یک از کارشناسان تیم QFD با اتکا به تجربه و دانش فنی ارتباط بین خواسته‌های مشتری و نیازمندی‌های فنی، و همبستگی بین نیازمندی‌های فنی را بر اساس واژه‌های کلامی مذکور ارزیابی می‌کند سپس این ارزیابی‌ها از طریق روابط زیر ادغام می‌شوند.

$$R_{ij} = \frac{1}{h} \otimes \left(R_{ij1} \oplus R_{ij2} \oplus ... \oplus R_{ijh} \right) \qquad (۱\text{-الف})$$

$$r_{ij} = \frac{1}{h} \otimes \left(r_{ij1} \oplus r_{ij2} \oplus ... \oplus r_{ijh} \right) \qquad (۱\text{-ب})$$

به‌طوری‌که $i = 1,2,...,I$ تعداد خواسته‌های مشتری، $j = 1,2,...,J$ تعداد نیازمندی‌های فنی و h تعداد کارشناسان را نمایش می‌دهد.

میزان ارتباط در ماتریس خانه کیفیت می‌بایست نرمال شود تا نمایش با معنی‌تری از مشخصه‌های فنی را ارایه کند. به‌واسطه نرمال کردن میزان ارتباطات، سهم هر خواسته مشتری در وزن هر مشخصه فنی مرتبط با آن در قسمت ماتریس ارتباطات توزیع می‌شود. به‌عبارت دیگر R_{ij} را می‌توان میزان مشارکت مشخصه فنی j ام در جهت دستیابی به خواسته مشتری i ام تعبیر کرد. همچنین برخی از مشخصه‌های فنی با یکدیگر همبسته‌اند. بنابراین لازم است که این ارتباطات و همبستگی بین مشخصه‌های فنی در فرآیند تصمیم‌گیری در جهت کسب رضایت‌مندی مشتری، لحاظ شود. برای در نظر گرفتن همبستگی بین مشخصات فنی، واسرمن [۴۸] فرمول زیر را برای نرمالسازی روابط بین خواسته‌های مشتری و مشخصات فنی پیشنهاد کرد.

$$R'_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^{J} R_{il} r_{lj}}{\sum_{j=1}^{J} \sum_{l=1}^{J} R_{il} r_{lj}} \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که R'_{ij} رابطه نرمال شده بین CR_i و TR_j، $(i = 1,2,...,I)$؛ $(j = 1,2,...,J)$ است. در پژوهش‌های صورت گرفته معمولا از مقیاس‌های ۱-۳-۹ یا ۱-۵-۹ برای نمایش ارتباط ضعیف، متوسط و قوی بین CRs و TRs، و همچنین بین خود TRs استفاده شده است. اما از آنجایی‌که ارزیابی‌ها در مورد شدت این روابط معمولا ذهنی و بر پایه قضاوت است محققان برای منعکس کردن ماهیت غیردقیق و فازی و بهبود نتایج QFD از نظریه مجموعه‌های فازی استفاده نموده‌اند و روش‌ها و مدل‌های فازی مختلفی توسعه داده‌اند.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

$$\tilde{R}_{ij}^{'} = \frac{\sum_{l=1}^{J} \tilde{R}_{il}\tilde{r}_{lj}}{\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{J} \tilde{R}_{il}\tilde{r}_{lj}} \quad (۳)$$

به‌طوری‌که $\tilde{R}_{il}$ و $\tilde{r}_{lj}$ اعداد فازی در بازه $[0,1]$ هستند و $\tilde{R}_{ij}^{'}$ رابطه فازی نرمال شده بین i امین خواسته مشتری و j امین نیازمندی فنی را نشان می‌دهد.

در واقع، یک مجموعه فازی می‌تواند توسط آلفا برش‌هایش نشان داده شود. α- برش مجموعه فازی $\tilde{R}_{il}$، $\alpha \in [0,1]$ می‌تواند توسط حدود پایین و بالایش $\left[\left(R_{il}\right)_{\alpha}^{L}, \left(R_{il}\right)_{\alpha}^{U} \right]$ نشان داده شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\left(R_{il}\right)_{\alpha}^{L} = \inf_{x\in[0,1]} \left\{ x / \mu_{\tilde{R}_{il}}(x) \geq \alpha \right\} \quad (۴\text{-الف})$$

$$\left(R_{il}\right)_{\alpha}^{U} = \sup_{x\in[0,1]} \left\{ x / \mu_{\tilde{R}_{il}}(x) \geq \alpha \right\} \quad (۴\text{-ب})$$

که $\mu_{\tilde{R}_{il}}(x)$ درجه عضویت x در مجموعه فازی $\tilde{R}_{il}$ است. بر مبنای α- برش‌ها و اصل گسترش، تابع عضویت رابطه نرمال شده فازی می‌تواند توسط حدود پایین و بالای هر α- برش $\tilde{R}_{il}$ و $\tilde{r}_{lj}$ تعریف شود.

به‌علاوه، چن و ونگ [۱۰] یک فرمول اصلاح شده برای نمایش دقیق‌تر رابطه نرمال شده فازی پیشنهاد کردند که حدود پایین و بالای تابع عضویت در هر α- برش به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$m\left(R_{ij}^{'}\right)_{\alpha}^{L} = \frac{\sum_{l=1}^{J}\left(R_{il}\right)_{\alpha}^{L}\left(r_{lj}\right)_{\alpha}^{L}}{\sum_{\substack{m=1\\ m\neq j}}^{J}\sum_{l=1}^{J}\left(R_{il}\right)_{\alpha}^{U}\left(r_{lm}\right)_{\alpha}^{U} + \sum_{l=1}^{J}\left(R_{il}\right)_{\alpha}^{L}\left(r_{lj}\right)_{\alpha}^{L}} \quad (۵\text{-الف})$$

$$m\left(R_{ij}^{'}\right)_{\alpha}^{U} = \frac{\sum_{l=1}^{J}\left(R_{il}\right)_{\alpha}^{U}\left(r_{lj}\right)_{\alpha}^{U}}{\sum_{\substack{m=1\\ m\neq j}}^{J}\sum_{l=1}^{J}\left(R_{il}\right)_{\alpha}^{L}\left(r_{lm}\right)_{\alpha}^{L} + \sum_{l=1}^{J}\left(R_{il}\right)_{\alpha}^{U}\left(r_{lj}\right)_{\alpha}^{U}} \quad (۵\text{-ب})$$

در این پژوهش برای ترکیب نتایج حاصله از رابطه (۵) برای α- برش‌های مختلف از عملگر ارزش مورد انتظار فازی استفاده می‌شود. عملگر ارزش مورد انتظار فازی توسط لیو و لیو [۴۹] ارایه گردید. چن و همکارانش [۴۴] نیز از ترکیب میانگین موزون فازی و عملگر ارزش مورد انتظار فازی برای رتبه‌بندی نیازمندی‌های فنی در QFD بهره جستند.

$$E\left(R_{ij}^{'}\right) = \frac{1}{2L}\sum_{f=1}^{L}\left(\left(R_{ij}\right)_{\alpha f}^{L} + \left(R_{ij}\right)_{\alpha f}^{U}\right) \quad (۶)$$

به‌طوری‌که L تعداد α- برش‌ها و $(i = 1,2,...,I)$؛ $(j = 1,2,...,J)$ است.

در بیشتر موارد، بهبود در یک نیازمندی فنی باعث افزایش هزینه خواهد شد. $X_j\ (j = 1,2,...,n)$ به‌عنوان ارزش نیازمندی فنی j تعریف می‌شود. ارزش هر نیازمندی فنی می‌تواند از یک مجموعه از ارزش‌های ممکن

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

انتخاب شود $\max\{X_j\}$، ارزش ماکزیمم است. سپس ارزش نرمالسازی شده ویژگی فنی j به‌صورت زیر تعریف می‌شود که در واقع سطح برآورد نیازمندی فنی j ام را نشان می‌دهد.

$$x_j = \frac{X_j}{\max\{X_j\}}, \; j = ۱, ۲, ..., n \qquad (۷)$$

و فرض می‌شود هنگامی‌که c_j در نیازمندی فنی j سرمایه‌گذاری شود، می‌تواند به بالاترین ارزش $\max\{X_j\}$ برسد. اما به‌علت وجود محدودیت‌ها، تمام نیازمندی‌های فنی نمی‌توانند به ارزش ماکزیمم برسند. بنابراین، تابع هزینه به‌صورت $c_j \times x_j$ ساخته می‌شود که یک تابع خطی صعودی است و میزان سرمایه‌گذاری مورد نیاز در نیازمندی فنی j ام برای رسیدن به ارزش x_j را نشان می‌دهد.

۳-۲ برنامه‌ریزی فیزیکی خطی

LPP یک روش بهینه‌سازی چند هدفه است که یک تابع هدف تجمعی[1] از معیارها به سبک برنامه‌ریزی آرمانی ارشمیدسی قطعه قطعه[2]، توسعه می‌دهد [۳۹]. در رویه برنامه‌ریزی فیزیکی، تصمیم‌گیرنده اولویت‌هایش را در مورد هر معیار با استفاده از چهار کلاس مختلف بیان می‌کند یعنی تصمیم‌گیرنده تعیین می‌کند هر کدام از معیارها به کدامیک از کلاس‌های چهارگانه تعلق دارد. هر کلاس شامل دو مورد سخت و نرم می‌شود [۳۸]. برنامه‌ریزی فیزیکی به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد که اولویت‌هایش برای هر معیار را به‌طور مشخص‌تر و دقیق‌تر بیان کند نسبت به چارچوب برنامه‌ریزی ریاضی مرسوم که تنها از عبارات حداقل کردن، حداکثر کردن، بیشتر از، کمتر از، یا برابر با، استفاده می‌کند. و همچنین محدودیت‌های یک چنین چارچوب فرموله کردن مساله را با به‌کارگیری یک واژه‌نامه جدید منعطف و وسیع، برطرف می‌کند. واژه‌نامه برنامه‌ریزی فیزیکی عباراتی را دربر می‌گیرد که درجات متفاوت مطلوبیت را از طریق شش دامنه برای کلاس‌های 1S و 2S، ده دامنه برای کلاس 3S، و یازده دامنه برای کلاس 4S مشخص می‌کند [۵۰]. شکل ۲ مفهوم کیفی و کمی کلاس‌های نرم را نمایش می‌دهد. ارزش معیار iام، g_i، روی محور افقی است و تابعی که باید برای آن معیار حداقل شود، z_i، روی محور عمودی قرار دارد و تابع کلاس[3] نامیده می‌شود. مقدار پایین‌تر تابع کلاس بهتر از مقدار بالاتر آن است و مقدار ایده‌آل تابع کلاس، صفر است. توابع کلاس اجزای سازنده تابع هدف تجمعی را تشکیل می‌دهند [۳۸].

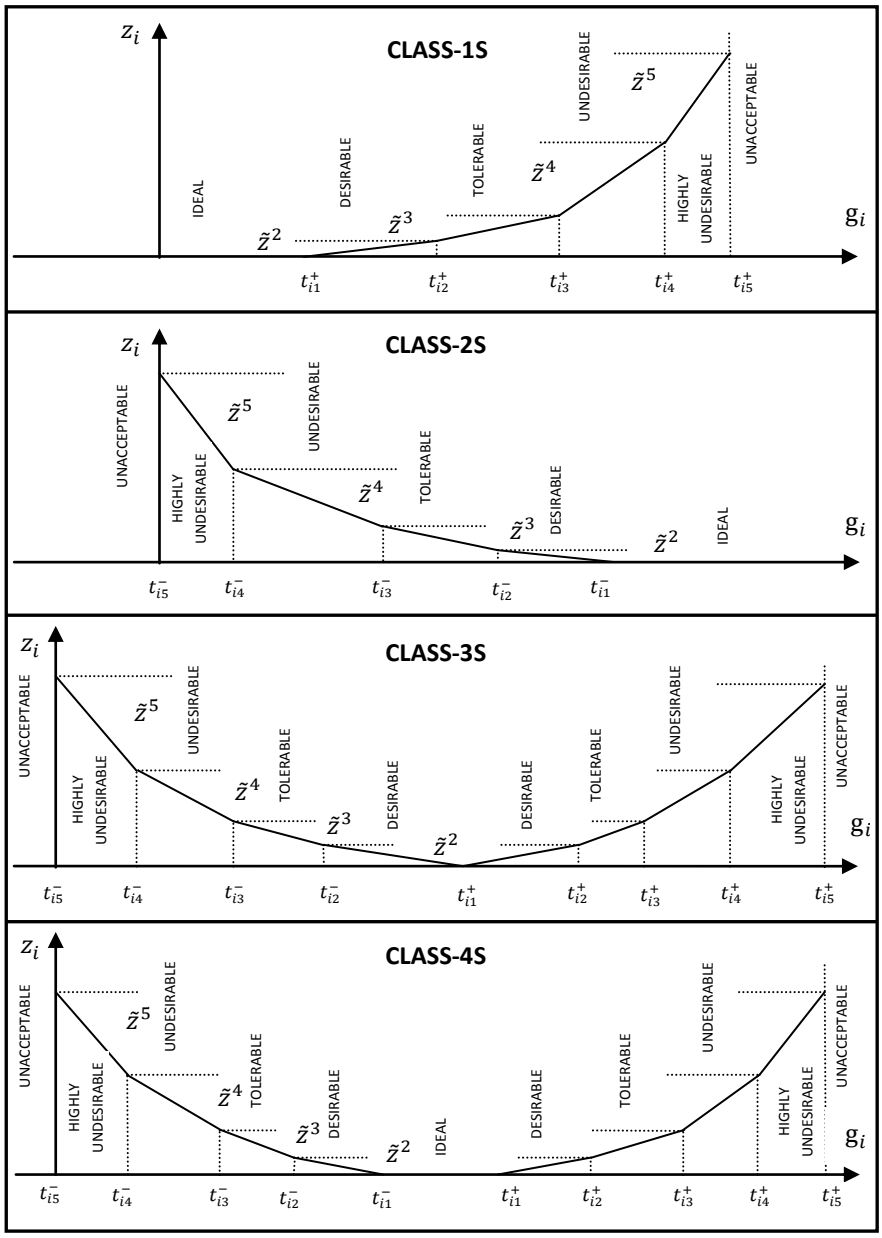
این کلاس‌ها در حالت نرم به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

Class-1S Smaller-Is-Better, i.e. minimization
Class-2S Larger-Is-Better, i.e. maximization
Class-3S Value-Is-Better
Class-4S Range-Is-Better

[1] Aggregate objective function
[2] Piecewise Archimedian Goal Programming
[3] Class function

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]



شکل ۲. دامنه‌های توابع کلاس

کلاس 1S را در شکل ۱ در نظر بگیرید، دامنه‌های این کلاس به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

دامنه ایده‌آل[1] (دامنه-۱ ؛ $g_i \le t_{i1}^+$): دامنه‌ای که روی آن هر ارزش معیار، ایده‌آل است (بیش‌ترین مطلوبیت ممکن). هر دو نقطه روی این دامنه دارای ارزش برابر برای تصمیم‌گیرنده است.

دامنه مطلوب[2] (دامنه-۲ ؛ $t_{i1}^+ \le g_i \le t_{i2}^+$): یک دامنه پذیرفتنی که مطلوب است.

دامنه قابل تحمل[3] (دامنه-۳ ؛ $t_{i2}^+ \le g_i \le t_{i3}^+$): یک دامنه پذیرفتنی که قابل تحمل است.

دامنه نامطلوب[1] (دامنه-۴ ؛ $t_{i3}^+ \le g_i \le t_{i4}^+$): این دامنه درحالی‌که پذیرفتنی است نامطلوب است.

[1] Ideal range
[2] Desirable range
[3] Tolerable range

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

دامنه به‌شدت نامطلوب[۲] (دامنه-۵؛ $t_{i۴}^{+} \le g_i \le t_{i۵}^{+}$): این دامنه پذیرفتنی ولی به‌شدت نامطلوب است.

دامنه غیرقابل قبول[۳] (دامنه-۶؛ $g_i \le t_{i۵}^{+}$): این دامنه ارزش‌های ناپذیرفتنی را دربر می‌گیرد.

مرزهای دامنه‌ها/سطوح هدف $t_{i۱}^{+}$ تا $t_{i۵}^{+}$ به‌طور فیزیکی ارزش‌های معناداری هستند که توسط تصمیم‌گیرنده برای کمی کردن اولویت مربوط به معیار iام تعیین می‌شوند دامنه‌ها برای سایر کلاس‌ها و سطوح هدف مرتبط با آنها در حالتی مشابه کلاس 1S تعریف می‌شوند [۴۰]. ویژگی‌های مطلوب توابع کلاس جهت فراهم کردن چارچوب نظری برای محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین آنها عبارتند از:

۱. تابع کلاس غیرمنفی، پیوسته، قطعه قطعه خطی و محدب است.

۲. مقدار تابع کلاس، z_i ، در یک سطح هدف معین در تمام کلاس‌ها یکسان است.

۳. اندازه سیر عمودی تابع کلاس سرتاسر هر دامنه باید قاعده- OVO[۴] را رعایت کند.

ویژگی‌های غیرمنفی، پیوسته و قطعه قطعه خطی بودن واضح است. اما در بحث توابع کلاس ویژگی تحدب بدین معنی است که به‌عنوان مثال، هزینه حرکت سرتاسر دامنه نامطلوب، صرف نظر از سطوح هدف انتخاب شده توسط تصمیم‌گیرنده همیشه بیشتر از هزینه حرکت سرتاسر دامنه قابل تحمل است. ویژگی دوم به این معنی است که با حرکت سرتاسر یک دامنه مشخص (برای مثال، دامنه-۴ نامطلوب)، میزان تغییر در تابع کلاس صرف نظر از معیار مورد بررسی، همیشه یکسان خواهد بود (برای دامنه مذکور، $\tilde{z}^{۴}$). این رفتار تابع کلاس در سطوح هدف یک مشخصه مهم است که باعث می‌شود هر نوع دامنه‌ای مقدار/جریمه یکسانی برای معیارهای مختلف داشته باشد و همچنین یک تاثیر نرمال‌ساز نیز دارد. برای مثال، رفتار دو معیار متفاوت را روی دامنه نامطلوب در نظر بگیرید. معیار اول بین ۵۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ تغییر می‌کند در حالی‌که معیار دوم بین ۱/۹و ۴/۲ متغیر است از آنجایی‌که هر دو معیار در دامنه نامطلوب قرار دارند توابع کلاس مربوطه در طول آن دامنه به میزان یکسان ($\tilde{z}^{۴}$) تغییر خواهند کرد. ویژگی سوم مستلزم توضیح مفصل‌تری است. برای یک معیار مشخص، هنگامی‌که تصمیم‌گیرنده تعیین می‌کند که معیار به کدام کلاس تعلق دارد و سطوح هدف را مشخص می‌کند (یعنی t_{is}^{+}, t_{is}^{-})، بیان اولویت درون معیاری[۵] کامل است. با وجود این، از آنجایی‌که تصمیمات در یک محیط چند هدفه اتخاذ می‌شوند باید یک اولویت بین معیاری[۶] ضمنی یا صریح نیز وجود داشته باشد. برنامه‌ریزی فیزیکی تحت یک قاعده ابتکاری بین معیاری ضمنی عمل می‌کند که قاعده یک معیار در برابر سایر معیارها (قاعده- OVO) نامیده می‌شود.

قاعده- OVO متضمن اولویت بین معیاری زیر برای هر معیار نرم، g_i ، است. اگر دو گزینه زیر تحت بررسی باشند،

گزینه ۱: "بهبود کامل g_i سرتاسر یک دامنه معین (به‌عنوان مثال، دامنه-۳)"؛ و

گزینه ۲: "کاهش کامل تمام معیارهای دیگر سرتاسر دامنه بهتر بعدی (یعنی، دامنه-۲)"؛

---

[1] Undesirable range
[2] Highly undesirable range
[3] Unacceptable range
[4] One vs. others criteria-rule
[5] Intra-criteria
[6] Inter-criteria

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

گزینه ۱ به گزینه ۲ ترجیح داده خواهد شد. یعنی همیشه اول معیار بدتر بهبود می‌یابد. اساساً، این فلسفه یک ماهیت ترتیبی ضمنی دارد که بدین طریق حداقل‌سازی معیار بدتر به‌طور خودکار در اولویت قرار می‌گیرد [۲۹].

۳-۲-۱ روابط ریاضی

حال می‌توان برخی از روابط ریاضی را که از ویژگی‌های تابع کلاس ذکر شده منتج می‌شود، توسعه داد. ویژگی دوم که در بخش قبل بحث شد با رابطه زیر بیان می‌شود؛

$$z^s \equiv z_i\left(t_{is}^+\right) \equiv z_i\left(t_{is}^-\right) \forall i; \left(2 \le s \le 5\right); z^1 \equiv 0 \qquad (8)$$

که s و i به ترتیب یک دامنه عمومی و شماره معیار را نشان می‌دهند.

هنگامی‌که یک معیار سرتاسر یک دامنه معین حرکت می‌کند، تغییر در z_i همیشه به‌صورت زیر اتفاق می‌افتد؛

$$\tilde{z}^s \equiv z^s - z^{s-1}; \left(2 \le s \le 5\right); z^1 \equiv 0 \qquad (9)$$

برای اجرای قاعده-OVO، رابطه زیر به‌کار می‌رود؛

$$\tilde{z}^s > \left(n_{sc} - 1\right)\tilde{z}^{s-1}\left(3 \le s \le 5\right); \left(n_{sc} > 1\right) \qquad (10)$$

یا به‌طور هم‌ارز؛

$$\tilde{z}^s = \beta\left(n_{sc} - 1\right)\tilde{z}^{s-1}\left(3 \le s \le 5\right); n_{sc} > 1; \beta > 1 \qquad (11)$$

که n_{sc} تعداد معیارهای soft، و β پارامتر تحدب را نمایش می‌دهد. رابطه (۱۱) تحدب تابع کلاس را تضمین نمی‌کند، تحدب به سطوح هدف انتخاب شده توسط تصمیم‌گیرنده نیز بستگی دارد. برای به‌کارگیری رابطه (۱۱)، باید یک ارزش به $\tilde{z}^2$ اختصاص داده شود. در عمل، یک عدد مثبت (فرض کنید، ۰/۱) تخصیص خواهد یافت.

دوباره ویژگی تحدب را در نظر بگیرید؛

$$\tilde{t}_{is}^+ = t_{is}^+ - t_{i(s-1)}^+; \tilde{t}_{is}^- = t_{is}^- - t_{i(s-1)}^-; \left(2 \le s \le 5\right) \qquad (12)$$

که طول دامنه s ام معیار i ام است. با استفاده از این کمیت، اندازه شیب تابع کلاس برای معیار i ام از رابطه زیر به‌دست می‌آید؛

$$w_{is}^+ = \frac{\tilde{z}^s}{\tilde{t}_{is}^+}; w_{is}^- = \frac{\tilde{z}^s}{\tilde{t}_{is}^-}; \left(2 \le s \le 5\right) \qquad (13)$$

باید تأکید کرد که شیب‌ها از یک دامنه به دامنه دیگر و از یک معیار به معیار دیگر تغییر می‌کند. یک‌بار که شیب‌ها محاسبه می‌شوند، ویژگی تحدب می‌تواند با رابطه زیر مورد بررسی قرار گیرد؛

$$\tilde{w}_{\min} = \min_{i,s}\left\{\tilde{w}_{is}^+, \tilde{w}_{is}^-\right\} > 0; \begin{cases}(2 \le s \le 5)\\ i : softcriteria\end{cases} \qquad (14)$$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

که؛

$$\tilde{w}_{is}^{+} = w_{is}^{+} - w_{i(s-1)}^{+}; \tilde{w}_{is}^{-} = w_{is}^{-} - w_{i(s-1)}^{-}; w_{i1}^{-} = w_{i1}^{+} = 0 \begin{cases} (2 \le s \le 5) \\ i : softcriteria \end{cases} \quad (15)$$

کمیت‌های $\tilde{w}_{is}^{+}$ و $\tilde{w}_{is}^{-}$ عیناً اوزانی هستند که در مدل LPP استفاده می‌شوند. در واقع، رابطه (۱۴) بیان می‌کند مادامی‌که تمام این اوزان مثبت هستند تابع کلاس، محدب و قطعه قطعه خطی خواهد بود. نکته مهم این است که تحدب می‌تواند همیشه با افزایش اندازه پارامتر تحدب β تأمین شود.

۳-۲-۲ الگوریتم تعیین وزن برنامه‌ریزی فیزیکی خطی

با استفاده از روابط بالا، می‌توان یک الگوریتم ساده برای محاسبه اوزانی که در مدل LPP استفاده می‌شوند، تعریف کرد. همان‌طوری‌که خواهیم دید، این اوزان با شیب‌های تابع کلاس ارتباط دارند. الگوریتم تعیین وزن برنامه‌ریزی فیزیکی خطی به‌صورت زیر خلاصه می‌شود. در الگوریتم ارایه شده پارامتر تحدب β برای تمام معیارها، ثابت فرض شده است. این پارامتر می‌تواند از یک معیار به معیار دیگر تغییر کند. یکی از مزایای احتمالی تغییر پارامتر β، کوچک‌تر شدن ارزش ماکزیمم تابع کلاس است که موجب شرطی‌سازی عددی مطلوب‌تری می‌شود. همچنین در این الگوریتم، افزایش β در حلقه الگوریتم وزن‌دهی، ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. این مقدار مناسب تا اندازه‌ای به کدگذاری LP به‌کار رفته بستگی دارد [۵۰].

STEP # Action (‘i’ values correspond to soft criteria)

1 Initialize:

$\beta = 1/1; w_{i1}^{+} = 0, w_{i1}^{-} = 0; \tilde{z}^{2} =$ small positive number (say, ۰/۱)

$i = 0; s = 1, n_{sc} =$ # of soft criteria

2 Set $i = i + 1$

3 Set $s = s + 1$

evaluate, in sequence,

$$\tilde{z}^{s}, \tilde{t}_{is}^{+}, \tilde{t}_{is}^{-}, w_{is}^{+}, w_{is}^{-}, \tilde{w}_{is}^{+}, \tilde{w}_{is}^{-}, \tilde{w}_{\min}$$

If $\tilde{w}_{\min}$ is less than some chosen small positive number (say, ۰/۰۱)

Then increase β , and go to step 2.

4 If $s \neq 5$, go to step 3.

5 If $i \neq n_{sc}$, go to step 2.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

۳-۲-۳ تعریف مدل برنامه‌ریزی فیزیکی خطی

بر اساس ویژگی‌ها و روابط فوق الذکر، برنامه‌ریزی فیزیکی وزن‌ها را تعیین می‌کند ($\tilde{w}_{is}^{-}, \tilde{w}_{is}^{+}$) که شیب‌های توابع جریمه را نمایش می‌دهند و تابع هدف تجمعی (که باید حداقل شود) به‌صورت مجموع موزون از انحرافات سرتاسر تمام دامنه‌ها ($s = ۲,...,۵$) و معیارها ($i = ۱,...,n_{sc}$) ساخته می‌شود. مدل کلی LPP به‌صورت زیر است، در این فرمول، متغیرهای d_{is}^{+} و d_{is}^{-} انحرافات مثبت و منفی تابع هدف $g_i(x)$ از سطوح هدف $t_{i,(s-۱)}^{+}$ و $t_{i,(s-۱)}^{-}$ را نشان می‌دهد و $g_i(x)$ یک تابع خطی از x است [۴۰].

$$\min_{d_{is}^{-}, d_{is}^{+}, x} J = \sum_{i=۱}^{n_{sc}} \sum_{s=۲}^{۵} \left(\tilde{w}_{is}^{-} d_{is}^{-} + \tilde{w}_{is}^{+} d_{is}^{+} \right)$$

s.t.

$$g_i - d_{is}^{+} \le t_{i,s-۱}^{+}; d_{is}^{+} \ge ۰; g_i \le t_{i۵}^{+}; \text{(for all } i \text{ in classes 1S, 3S, 4S; } i = ۱,...,n_{sc}; s = ۲,...,۵) \quad (۱۶)$$

$$g_i + d_{is}^{-} \ge t_{i,s-۱}^{-}; d_{is}^{-} \ge ۰; g_i \ge t_{i۵}^{-}; \text{(for all } i \text{ in classes 2S, 3S, 4S; } i = ۱,...,n_{sc}; s = ۲,...,۵)$$

$$x_{\min} \le x \le x_{\max}$$

جهت کاربرد LPP باید مشخص شود که هر کدام از خواسته‌های مشتری در قالب کدام یک از چهار کلاس قرار می‌گیرد. سطح رضایت مشتری از هر خواسته توسط شش دامنه با درجات مطلوبیت متفاوت تعیین می‌شود، این دامنه‌ها ابتدا بر حسب واحدهای اندازه‌گیری واقعی تعیین می‌شود سپس به بازه (۱-۰) نرمالایز می‌شود. به‌طور کلی، قاعده خاصی برای چگونگی تعریف دامنه‌ها وجود ندارد، و نهایتاً دامنه‌ها با نظر اعضای تیم QFD تعیین می‌شوند.

فرموله کردن مدل LPP، در دو مرحله صورت می‌گیرد. نخست، طبق سطوح رضایت مشتری تعریف شده، توابع کلاس ساخته می‌شود و برای به‌دست آوردن اوزان از الگوریتم تعیین وزن برنامه‌ریزی فیزیکی خطی استفاده می‌شود. سپس، مدل ریاضی توسعه داده می‌شود.

٤ مطالعه موردی

چارچوب ارایه شده برای یک محصول خاص در شرکت مجتمع صنعتی اسفراین که تولیدکننده قطعات سنگین فولادی می‌باشد، به‌کار گرفته شده است. محصول مورد مطالعه قطعه فولادی با جنس (1.0570)~S355J2G3 و مطابق استاندارد EN 10250 است. یک تیم پنج نفره متشکل از کارشناسان واحدهای تحقیق و توسعه، کنترل کیفیت، تولید، تحقیقات بازار و امور مشتریان به‌عنوان اعضای تیم QFD تحقیق حاضر در شرکت مورد مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. در ابتدا، فهرستی نسبتاً طولانی از ویژگی‌های فولاد تهیه شد. در مرحله بعد، با توجه به سفارش مشتری و نظر اعضای تیم QFD و نظر به اینکه برخی از این ویژگی‌ها با یکدیگر همپوشانی داشتند، مهم‌ترین ویژگی‌ها شناسایی شدند. جدول ۱ این ویژگی‌ها را نشان می‌دهد.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

جدول ۱. خواسته‌های مشتری

CR_1	CR_2	CR_3	CR_4
سختی سطح	سختی مغز	استحکام کششی	استحکام تسلیم

و جدول ۲ نیازمندی‌های فنی مؤثر بر این ویژگی‌ها را نمایش می‌دهد.

جدول ۲. نیازمندی‌های فنی

درصد کربن	TR_1	درصد نیکل	TR_5
درصد سیلیسیم	TR_2	درصد مولیبدن	TR_6
درصد منگنز	TR_3	درصد مس	TR_7
درصد کروم	TR_4	درصد آلومینیوم	TR_8

میزان ارتباط نیازمندی‌های فنی با خواسته‌های مشتری و همچنین میزان تأثیر نیازمندی‌های فنی بر یکدیگر با بحث و مصاحبه با کارشناسان تیم QFD به‌دست آمده است. سپس با استفاده از روابطی که قبلاً به آن اشاره شد، اعداد فازی با یکدیگر ادغام و روابط خانه کیفیت نرمالسازی شده است. جدول ۳ روابط نرمالسازی شده فازی را برای α- برش‌های مختلف نمایش می‌دهد. این داده‌ها با استفاده از رابطه (۶) ترکیب شده‌اند و نتایج حاصل شده در جدول ۴ آمده است. سپس از طریق مباحثه با کارشناسان تیم QFD و همچنین با مراجعه به برگه سفارش مشتری مشخص شد که ویژگی‌های سختی سطح و سختی مغز در کلاس 4S، و ویژگی‌های استحکام کششی و استحکام تسلیم در کلاس 2S قرار می‌گیرند. در سفارش مشتری برای هر کدام از این ویژگی‌ها، مقدار حداقل و حداکثر تعیین شده بود یعنی برای هر خواسته تنها یک دامنه تعریف شده بود. به همین دلیل، از طریق مصاحبه با اعضای تیم QFD، مطابق دامنه‌های برنامه‌ریزی فیزیکی، دامنه‌های دیگری درون دامنه‌های قبلی، تعریف شد. جدول ۵ سطوح متفاوت مطلوبیت برای هر خواسته را از دیدگاه مشتری نشان می‌دهد. و سپس دامنه‌های تعریف شده به بازه (۱-۰) نرمالسازی گردید. جدول ۶ سطوح مطلوبیت نرمالسازی شده را نمایش می‌دهد. پس از تعیین سطوح مطلوبیت، می‌توان توابع کلاس را برای هر یک از خواسته‌های مشتری تعریف کرد و وزن‌ها را که در واقع همان شیب توابع کلاس در دامنه‌های متفاوت می‌باشد، محاسبه کرد. جدول ۷ نمایان‌گر اوزان محاسبه شده می‌باشد. همچنین برآورد تیم QFD از شاخص هزینه‌ی نیازمندی فنی j ام برای رسیدن به ارزش x_j، با توجه به نرخ‌های بازار عناصر مختلف به‌صورت جدول ۸ است.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

جدول ۳. روابط نرمال‌سازی شده فازی

	TR_1		TR_2		TR_3		TR_4		TR_5		TR_6		TR_7		TR_8	
α=۰/۰	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
CR_1	۰/۰۳۸۱	۰/۳۰۹	۰/۰۲۰۴	۰/۲۹۳۵	۰/۰۲۳۸	۰/۲۷۳۴	۰/۰۶۱۷	۰/۴۳۱۳	۰/۰۵۹۵	۰/۴۳۶۲	۰/۰۶۲۴	۰/۴۴۰۱	۰/۰۱۴۵	۰/۲۰۸۵	۰/۰۲۴۸	۰/۲۹۴۴
CR_2	۰/۰۳۹۸	۰/۳۲۷۴	۰/۰۱۴۴	۰/۲۹۲۹	۰/۰۲۴۱	۰/۲۸۷۷	۰/۰۵۸۳	۰/۴۴۵۴	۰/۰۵۴۵	۰/۴۵۳۸	۰/۰۶۱۳	۰/۴۵۷۱	۰/۰۱۴۴	۰/۲۲۰۱	۰/۰۲۳۲	۰/۳۰۵۶
CR_3	۰/۰۲۵۶	۰/۲۴۸۸	۰/۰۳۸۴	۰/۳۰۵۶	۰/۰۳۱۹	۰/۲۷۲۳	۰/۰۵۲۶	۰/۳۷	۰/۰۶۶۶	۰/۴۲۳۵	۰/۰۵۸	۰/۳۹۰۶	۰/۰۳۰۴	۰/۲۲۴	۰/۰۳۳۱	۰/۲۸۶۶
CR_4	۰/۰۳۱۹	۰/۲۷۰۱	۰/۰۴۴	۰/۳۴۹۴	۰/۰۳۷۵	۰/۳۱۱۵	۰/۰۳۷۸	۰/۳۵۳۵	۰/۰۵۷۸	۰/۴۳۳۹	۰/۰۴۶۲	۰/۳۸۵۵	۰/۰۲۹۷	۰/۲۴۱۹	۰/۰۳۲۴	۰/۳۱۲۴
α=۰/۱	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
CR_1	۰/۰۴۳۱	۰/۲۷۹۸	۰/۰۲۷۴	۰/۲۶۲۳	۰/۰۲۷۶	۰/۲۴۴۴	۰/۰۶۹۷	۰/۳۹۷۲	۰/۰۷۶	۰/۴۱۱۵	۰/۰۷۰۵	۰/۴۰۵۴	۰/۰۱۷۴	۰/۱۸۴۸	۰/۰۲۹۳	۰/۲۶۴۵
CR_2	۰/۰۴۴۸	۰/۲۹۵۸	۰/۰۱۸۴	۰/۲۶۰۷	۰/۰۲۷۹	۰/۲۵۶۷	۰/۰۶۶۴	۰/۴۰۹۴	۰/۰۶۲۸	۰/۴۱۷	۰/۰۶۹۵	۰/۴۲۰۴	۰/۰۱۷۴	۰/۱۹۴۶	۰/۰۲۷۷	۰/۲۷۳۸
CR_3	۰/۰۲۹۴	۰/۲۲۶۶	۰/۰۴۰۷	۰/۲۷۷۶	۰/۰۳۶۱	۰/۲۴۸۶	۰/۰۵۹۴	۰/۳۴۳۸	۰/۰۷۴۷	۰/۳۹۵	۰/۰۶۵۳	۰/۳۶۳۱	۰/۰۳۴	۰/۲۰۳۷	۰/۰۳۷۸	۰/۲۶۲۵
CR_4	۰/۰۳۵۳	۰/۲۵۰۷	۰/۰۴۷۶	۰/۳۱۷۷	۰/۰۴۰۶	۰/۲۸۲	۰/۰۴۲۸	۰/۳۳۸۲	۰/۰۶۳	۰/۴۰۰۳	۰/۰۵۱۵	۰/۳۶۶۶	۰/۰۳۲	۰/۲۱۷۷	۰/۰۴۰۹	۰/۲۸۳۱
α=۰/۳	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
CR_1	۰/۰۵۴۶	۰/۲۰۳۸	۰/۰۳۴۴	۰/۱۸۵۲	۰/۰۳۶۸	۰/۱۷۲۸	۰/۰۸۸۱	۰/۲۹۹۸	۰/۰۹۹۹	۰/۳۱۸	۰/۰۸۹۲	۰/۳۰۶۳	۰/۰۶۱۴	۰/۱۳۸۱	۰/۰۵۰۱	۰/۱۹۲۵
CR_2	۰/۰۵۶۶	۰/۲۱۲	۰/۰۲۷۹	۰/۱۸۰۵	۰/۰۳۷۶	۰/۱۷۹۲	۰/۰۸۵	۰/۳۰۴۹	۰/۰۹۵۳	۰/۳۱۷۹	۰/۰۸۸۵	۰/۳۱۳۵	۰/۰۶۳۳	۰/۱۴۴	۰/۰۴۹۱	۰/۱۹۶۲
CR_3	۰/۰۳۸۴	۰/۱۸۵۲	۰/۰۵۱۵	۰/۲۲۸	۰/۰۴۶	۰/۲۰۳۸	۰/۰۷۵۲	۰/۲۹۱۵	۰/۰۹۳۲	۰/۳۳۸۲	۰/۰۸۲	۰/۳۰۸۹	۰/۰۴۲۳	۰/۱۶۷۸	۰/۰۴۷۸	۰/۲۱۶۵
CR_4	۰/۰۴۴۹	۰/۲۰۴۲	۰/۰۶۰۲	۰/۲۶۱۸	۰/۰۵۱۳	۰/۲۳۰۴	۰/۰۵۷۵	۰/۲۸۱۲	۰/۰۸۱۱	۰/۳۳۸۲	۰/۰۶۷۶	۰/۳۰۷	۰/۰۴۰۱	۰/۱۷۶۳	۰/۰۴۷۴	۰/۲۳۱۵
α=۰/۵	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
CR_1	۰/۰۶۸۶	۰/۱۸۹۴	۰/۰۴۶۳	۰/۱۶۴۵	۰/۰۴۷۹	۰/۱۵۵۱	۰/۱۱۰۱	۰/۲۸۳۳	۰/۱۰۹۷	۰/۲۹۱۶	۰/۱۱۱۴	۰/۲۸۸۷	۰/۰۳۲۲	۰/۱۱۳۵	۰/۰۵۲۲	۰/۱۷۰۲
CR_2	۰/۰۷۱	۰/۱۹۸۹	۰/۰۳۹۷	۰/۱۵۹۶	۰/۰۴۹۱	۰/۱۶۱۷	۰/۱۰۷۴	۰/۲۸۸۳	۰/۱۰۴۵	۰/۲۹۱۲	۰/۱۱۱	۰/۲۹۶۱	۰/۰۳۲۷	۰/۱۱۸۳	۰/۰۵۰۸	۰/۱۷۳۴
CR_3	۰/۰۴۹۵	۰/۱۵۰۸	۰/۰۶۴۴	۰/۱۸۶	۰/۰۵۷۷	۰/۱۶۶۴	۰/۰۹۴	۰/۲۴۵۹	۰/۱۱۵	۰/۲۸۷۵	۰/۱۰۱۹	۰/۲۶۱۴	۰/۰۵۲۱	۰/۱۳۸۴	۰/۰۶۱۷	۰/۱۷۷۷
CR_4	۰/۰۵۶۸	۰/۱۶۶۳	۰/۰۷۵۵	۰/۲۱۴۷	۰/۰۶۴۳	۰/۱۸۷۵	۰/۰۷۵۵	۰/۲۳۲	۰/۱۰۲۷	۰/۲۸۳۲	۰/۰۸۷۱	۰/۲۵۴۹	۰/۰۴۹۹	۰/۱۴۲۹	۰/۰۶۱۱	۰/۱۸۸۱
α=۰/۷	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
CR_1	۰/۰۸۵۶	۰/۱۵۶۳	۰/۰۶۰۶	۰/۱۲۸۹	۰/۰۶۱۲	۰/۱۲۳	۰/۱۳۶	۰/۲۳۸۴	۰/۱۳۶۳	۰/۲۴۳۵	۰/۱۳۷۵	۰/۲۴۲۳	۰/۰۴۱۹	۰/۰۸۸۶	۰/۰۶۷۱	۰/۱۳۵۴
CR_2	۰/۰۸۸۵	۰/۱۶۲۷	۰/۰۵۴۱	۰/۱۲۳۳	۰/۰۶۲۹	۰/۱۲۷۹	۰/۱۳۳۹	۰/۲۴۰۸	۰/۱۳۱۲	۰/۲۴۱۲	۰/۱۳۷۸	۰/۲۴۷۱	۰/۰۴۲۹	۰/۰۹۱۹	۰/۰۶۵۹	۰/۱۳۶۸
CR_3	۰/۰۶۶۸	۰/۱۰۶۷	۰/۰۸۵۹	۰/۱۴۹۵	۰/۰۷۶۹	۰/۱۳۰۱	۰/۱۲۳۱	۰/۱۸۸۳	۰/۱۴۹۲	۰/۲۲۹۵	۰/۱۳۲۶	۰/۲۰۲۷	۰/۰۶۸۶	۰/۱۱۴۲	۰/۰۸۲۶	۰/۱۴۰۵
CR_4	۰/۰۷۱۴	۰/۱۳۵۶	۰/۰۹۴	۰/۱۷۶۷	۰/۰۷۹۹	۰/۱۵۱۹	۰/۰۹۷۱	۰/۱۸۹۹	۰/۱۲۸۱	۰/۲۳۵۴	۰/۱۱۰۳	۰/۲۰۹۸	۰/۰۶۱۶	۰/۱۱۵۷	۰/۰۷۷۵	۰/۱۵۱۹
α=۰/۹	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
CR_1	۰/۱۰۶	۰/۱۲۹۶	۰/۰۷۷۹	۰/۱۰۰۳	۰/۰۷۷۱	۰/۰۹۷۴	۰/۱۶۶۴	۰/۲۰۰۷	۰/۱۶۵۶	۰/۲۰۲۴	۰/۱۶۸۱	۰/۲۰۳	۰/۰۵۳۶	۰/۰۶۸۸	۰/۰۸۴۸	۰/۱۰۷۲
CR_2	۰/۱۰۹۸	۰/۱۳۴۲	۰/۰۷۱۶	۰/۰۹۴	۰/۰۷۹۷	۰/۱۰۰۸	۰/۱۶۵۳	۰/۲۰۰۶	۰/۱۶۲۵	۰/۱۹۸۸	۰/۱۶۹۳	۰/۲۰۵۴	۰/۰۵۵۱	۰/۰۷۱	۰/۰۸۴۱	۰/۱۰۷۱
CR_3	۰/۰۷۹۴	۰/۰۹۹۳	۰/۰۹۸۴	۰/۱۲۲	۰/۰۸۸۶	۰/۱۰۹۶	۰/۱۴۲۸	۰/۱۷۳۱	۰/۱۶۸۹	۰/۲۰۴۳	۰/۱۵۱۹	۰/۱۸۴۵	۰/۰۷۷۶	۰/۰۹۴۴	۰/۰۹۵۴	۰/۱۱۸۱
CR_4	۰/۰۸۹۵	۰/۱۱۱	۰/۱۱۶۳	۰/۱۴۳۴	۰/۰۹۸۸	۰/۱۲۲۷	۰/۱۲۳۴	۰/۱۵۴۵	۰/۱۵۷۵	۰/۱۹۴۱	۰/۱۳۷۵	۰/۱۷۱۵	۰/۰۷۶	۰/۰۹۳۹	۰/۰۹۷۴	۰/۱۳۹۱
α=۱	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
CR_1	۰/۱۱۷۸	۰/۱۱۷۸	۰/۰۸۷۹	۰/۰۸۷۹	۰/۰۸۶۳	۰/۰۸۶۳	۰/۱۸۳۵	۰/۱۸۳۵	۰/۱۸۴۲	۰/۱۸۴۲	۰/۱۸۵۱	۰/۱۸۵۱	۰/۰۶۰۳	۰/۰۶۰۳	۰/۰۹۴۸	۰/۰۹۴۸
CR_2	۰/۱۲۲	۰/۱۲۲	۰/۰۸۱۸	۰/۰۸۱۸	۰/۰۸۹۴	۰/۰۸۹۴	۰/۱۸۲۹	۰/۱۸۲۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸۷	۰/۱۸۷	۰/۰۶۲۲	۰/۰۶۲۲	۰/۰۹۴۵	۰/۰۹۴۵
CR_3	۰/۰۸۸۹	۰/۰۸۸۹	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۰/۰۹۸۱	۰/۰۹۸۱	۰/۱۵۷۶	۰/۱۵۷۶	۰/۱۸۶۶	۰/۱۸۶۶	۰/۱۶۸۳	۰/۱۶۸۳	۰/۰۸۵۵	۰/۰۸۵۵	۰/۱۰۵۸	۰/۱۰۵۸
CR_4	۰/۰۹۶۵	۰/۰۹۶۵	۰/۱۲۹۴	۰/۱۲۹۴	۰/۱۱۰۴	۰/۱۱۰۴	۰/۱۳۸۳	۰/۱۳۸۳	۰/۱۷۶۶	۰/۱۷۶۶	۰/۱۵۴۴	۰/۱۵۴۴	۰/۰۸۴۸	۰/۰۸۴۸	۰/۱۰۹۵	۰/۱۰۹۵

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

جدول ٤. ضرایب متغیرهای تصمیم در توابع کلاس

	TR_1	TR_2	TR_3	TR_4	TR_5	TR_6	TR_7	TR_8
CR_1	۰/۱۳۵۷	۰/۱۱۲۷	۰/۱۰۸۱	۰/۲۰۳۵	۰/۲۰۸۵	۰/۲۰۶۸	۰/۰۸۱۷	۰/۱۱۸۷
CR_2	۰/۱۴۱۸	۰/۱۰۷۲	۰/۱۱۲۴	۰/۲۰۵۱	۰/۲۰۶۵	۰/۲۱۰۸	۰/۰۸۵۰	۰/۱۲۰۲
CR_3	۰/۱۰۶۰	۰/۱۳۳۵	۰/۱۱۸۹	۰/۱۷۶۸	۰/۲۰۸۵	۰/۱۸۸۵	۰/۱۰۱۳	۰/۱۲۶۵
CR_4	۰/۱۱۸۶	۰/۱۵۲۳	۰/۱۳۴۲	۰/۱۶۱۴	۰/۲۰۲۰	۰/۱۷۸۹	۰/۱۰۳۴	۰/۱۳۴۴

جدول ۵. سطوح مطلوبیت از دیدگاه مشتری

	ایده‌آل	مطلوب	قابل تحمل	نامطلوب	به‌شدت نامطلوب	غیر قابل قبول
سختی سطح ($\frac{kg}{mm^2}$)	۱۶۰-۱۷۵	۱۴۵ -۱۶۰	۱۳۰ -۱۴۵	۱۲۰ -۱۳۰	۱۱۰ -۱۲۰	<۱۱۰
		۱۷۵ -۱۸۵	۱۸۵ -۱۹۵	۱۹۵ -۲۰۰	۲۰۰ -۲۱۰	>۲۱۰
سختی مغز ($\frac{kg}{mm^2}$)	۱۴۵ -۱۵۵	۱۳۵ -۱۴۵	۱۲۰ -۱۳۵	۱۱۰ -۱۲۰	۹۵ -۱۱۰	<۹۵
		۱۵۵ -۱۷۰	۱۷۰ -۱۸۰	۱۸۰ -۱۹۰	۱۹۰ -۲۱۰	>۲۱۰
استحکام کششی ($\frac{N}{mm^2}$)	۵۰۰ <	۴۷۵ -۵۰۰	۴۶۰ -۴۷۵	۴۵۰ -۴۶۰	۴۳۰ -۴۵۰	<۴۳۰
استحکام تسلیم ($\frac{N}{mm^2}$)	۳۲۰ <	۳۰۰ -۳۲۰	۲۹۰ -۳۰۰	۲۷۰ -۲۹۰	۲۶۰ -۲۷۰	<۲۶۰

جدول ٦. سطوح مطلوبیت نرمالسازی شده

	t_{i5}^-	t_{i4}^-	t_{i3}^-	t_{i2}^-	t_{i1}^-	t_{i1}^+	t_{i2}^+	t_{i3}^+	t_{i4}^+	t_{i5}^+
$i=1$	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳۵	۰/۵	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۹	۱
$i=2$	۰	۰/۱۳	۰/۲۱۷	۰/۳۴۷	۰/۴۳۴	۰/۵۲۱	۰/۶۵۱	۰/۷۳۸	۰/۸۲۵	۱
$i=3$	۰	۰/۲۸۶	۰/۴۲۹	۰/۶۴۳	۱					
$i=4$	۰	۰/۱۶۷	۰/۵	۰/۶۶۷	۱					

جدول ۷. اوزان مدل برنامه‌ریزی فیزیکی خطی

	$\tilde{w}_{i2}^-$	$\tilde{w}_{i3}^-$	$\tilde{w}_{i4}^-$	$\tilde{w}_{i5}^-$	$\tilde{w}_{i2}^+$	$\tilde{w}_{i3}^+$	$\tilde{w}_{i4}^+$	$\tilde{w}_{i5}^+$
$i=1$	۰/۶۶۶	۱/۵۳۴	۸/۶۹	۲۵/۰۴۷	۱	۲/۳	۱۸/۴۸	۱۴/۱۵۷
$i=2$	۱/۱۴۹	۱/۳۸۹	۹/۹۸۲	۱۵/۱۲۴	۰/۷۶۹	۳/۰۲۴	۸/۷۲۸	۸/۰۱۵
$i=3$	۰/۲۸	۱/۲۶	۶/۰۷۵	۴/۹۵				
$i=4$	۰/۳	۱/۶۷۶	۱/۲۹۴	۱۸/۲۵				

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

جدول ۸. شاخص هزینه

عنصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	کروم	نیکل	مولیبدن	مس	آلومینیوم
شاخص هزینه (c_j)	۳	۲۰	۱۱۳	۲۹	۱۶۵	۷۱	۲۷	۱۰

با توجه به سفارش مشتری برای عناصر منگنز و آلومینیوم به‌ترتیب حداقل سطح برآورد ۰/۸ و ۰/۱ تعیین و مقرر شده است که مجموع سطح برآورد عناصر کروم، نیکل و مولیبدن نیز از ۲/۱ فراتر نرود. به‌علاوه، طبق نظر متخصصان تیم QFD در آلیاژ تولید شده حداقل سطح برآورد ۰/۰۵ بایستی برای تمام عناصر رعایت شود. در نهایت، با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها و با توجه به مدل کلی ارایه شده در بخش ۳-۲-۳ مدل برنامه‌ریزی فیزیکی خطی به‌صورت زیر می‌باشد. تابع هدف این مدل به‌صورت مجموع موزون انحرافات از سطوح هدف می‌باشد که باید حداقل شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این مدل دارای سه نوع متغیر می‌باشد، متغیر مربوط به سطح برآورد هر یک از مشخصه‌های فنی (x_j)، متغیر هدف (g_i) که به‌صورت متغیر وابسته به متغیرهای سطح برآورد تعریف شده‌اند و متغیر انحراف (d_{is}^-, d_{is}^+) که نشان دهنده میزان انحراف چهار متغیر هدف از سطوح هدف تعریف شده در مدل است. همچنین مدل دربرگیرنده سه نوع محدودیت می‌باشد، محدودیت‌های هدف که به ازای هر یک از دامنه‌ها یک محدودیت تعریف می‌شود و محدودیت‌های سیستمی که شامل محدودیت بودجه، محدودیت‌های حداقل سطح برآورد و محدودیت‌های کوچک‌تر مساوی یک بودن سطح برآورد نیازمندی‌های فنی می‌شود.

1. Piecewise linear Archimedean aggregate function

$$\min J = ۰/۶۶۶ d_{۱۲}^- + ۱/۵۳۴ d_{۱۳}^- + ۸/۶۹ d_{۱۴}^- + ۲۵/۰۴۷ d_{۱۵}^- + d_{۱۲}^+ + ۲/۳ d_{۱۳}^+ + ۱۸/۴۸ d_{۱۴}^+ + ۱۴/۱۵۷ d_{۱۵}^+ + ۱/۱۴۹ d_{۲۲}^-$$
$$+ ۱/۳۸۹ d_{۲۳}^- + ۹/۹۸۲ d_{۲۴}^- + ۱۵/۱۲۴ d_{۲۵}^- + ۰/۷۶۹ d_{۲۲}^+ + ۳/۰۲۴ d_{۲۳}^+ + ۸/۷۲۸ d_{۲۴}^+ + ۸/۰۱۵ d_{۲۵}^+ + ۰/۲۸ d_{۳۲}^- + ۱/۲۶ d_{۳۳}^-$$
$$+ ۶/۰۷۵ d_{۳۴}^- + ۴/۹۵ d_{۳۵}^- + ۰/۳ d_{۴۲}^- + ۱/۶۷۶ d_{۴۳}^- + ۱/۲۹۴ d_{۴۴}^- + ۱۸/۲۵ d_{۴۵}^-$$

s.t.

2. Criteria

2.1. Class 4S criteria

$$g_۱ = ۰/۱۳۵۷ x_۱ + ۰/۱۱۲۷ x_۲ + ۰/۱۰۸۱ x_۳ + ۰/۲۰۳۵ x_۴ + ۰/۲۰۸۵ x_۵ + ۰/۲۰۶۸ x_۶ + ۰/۰۸۱۷ x_۷ + ۰/۱۱۸۷ x_۸$$
$$g_۲ = ۰/۱۴۱۸ x_۱ + ۰/۱۰۷۲ x_۲ + ۰/۱۱۲۴ x_۳ + ۰/۲۰۵۱ x_۴ + ۰/۲۰۶۵ x_۵ + ۰/۲۱۰۸ x_۶ + ۰/۰۸۵۰ x_۷ + ۰/۱۲۰۲ x_۸$$

2.2. Class 2S criteria

$$g_۳ = ۰/۱۰۶۰ x_۱ + ۰/۱۳۳۵ x_۲ + ۰/۱۱۸۹ x_۳ + ۰/۱۷۶۸ x_۴ + ۰/۲۰۸۵ x_۵ + ۰/۱۸۸۵ x_۶ + ۰/۱۰۱۳ x_۷ + ۰/۱۲۶۵ x_۸$$
$$g_۴ = ۰/۱۱۸۶ x_۱ + ۰/۱۵۲۳ x_۲ + ۰/۱۳۴۲ x_۳ + ۰/۱۶۱۴ x_۴ + ۰/۲۰۲۰ x_۵ + ۰/۱۷۸۹ x_۶ + ۰/۱۰۳۴ x_۷ + ۰/۱۳۴۴ x_۸$$

3. Goal Constraints

$$g_۱ - d_{۱۲}^+ \le ۰/۶۵ \qquad g_۱ + d_{۱۲}^- \ge ۰/۵$$
$$g_۱ - d_{۱۳}^+ \le ۰/۷۵ \qquad g_۱ + d_{۱۳}^- \ge ۰/۳۵$$
$$g_۱ - d_{۱۴}^+ \le ۰/۸۵ \qquad g_۱ + d_{۱۴}^- \ge ۰/۲$$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

$g_1 - d_{15}^+ \le ۰/۹$ $\quad g_1 + d_{15}^- \ge ۰/۱$

$g_2 - d_{22}^+ \le ۰/۵۲۱$ $\quad g_2 + d_{22}^- \ge ۰/۴۳۴$

$g_2 - d_{23}^+ \le ۰/۶۵۱$ $\quad g_2 + d_{23}^- \ge ۰/۳۴۷$

$g_2 - d_{24}^+ \le ۰/۷۳۸$ $\quad g_2 + d_{24}^- \ge ۰/۲۱۷$

$g_2 - d_{25}^+ \le ۰/۸۲۵$ $\quad g_2 + d_{25}^- \ge ۰/۱۳$

$g_3 + d_{32}^- \ge ۱$

$g_3 + d_{33}^- \ge ۰/۶۴۳$

$g_3 + d_{34}^- \ge ۰/۴۲۹$

$g_3 + d_{35}^- \ge ۰/۲۸۶$

$g_4 + d_{42}^- \ge ۱$

$g_4 + d_{43}^- \ge ۰/۶۶۷$

$g_4 + d_{44}^- \ge ۰/۵$

$g_4 + d_{45}^- \ge ۰/۱۶۷$

4. Systemic Constraints

$۳x_1 + ۲۰x_2 + ۱۱۳x_3 + ۲۹x_4 + ۱۶۵x_5 + ۷۱x_6 + ۲۷x_7 + ۱۰x_8 \le ۲۶۰$

$x_4 + x_5 + x_6 \le ۲/۱$

$x_8 \ge ۰/۱$

$x_3 \ge ۰/۸$

$۰/۰۵ \le x_j \quad ; j = ۱,۲,۴,۵,۶,۷$

$x_j \le ۱ \quad ; j = ۱,۲,\ldots,۸$

$d_{is}^+ , d_{is}^- \ge ۰ \quad ; i = ۱,\ldots,۴ \; ; s = ۲,\ldots,۵$

پس از حل مدل با نرم افزار LINGO 14.0 نتایج سطح برآورد نیازمندی‌های فنی که در واقع درصد عناصر آلیاژی در محصول فولادی است و همچنین میزان بودجه تخصیص یافته به هر کدام از نیازمندی‌های فنی مطابق جدول ۹ به‌دست آمد. جدول ۱۰ نشان می‌دهد که سطح رضایت مشتری بر مبنای چهار خواسته‌ی مشتری در دامنه‌های ایده‌آل و مطلوب قرار گرفته است که رضایت مشتری از محصول تولید شده را تضمین می‌نماید.

در الگوریتم LPP، ضریب β و مقدار $\tilde{z}^2$ به‌طور دلخواه انتخاب می‌شوند به‌صورتی‌که β به‌عنوان پارامتر تحدب باید مقداری بیشتر از یک بگیرد و $\tilde{z}^2$ نیز یک عدد مثبت کوچک باشد. در این پژوهش، اوزان با فرض $\beta = ۱/۱$ و $\tilde{z}^2 = ۰/۱$ تولید شدند و نتایج ارایه شده با این مفروضات حاصل شده است. در اینجا این سوال مطرح می‌شود که ممکن است نتایج تحت تأثیر این مقادیر قرار بگیرد. برای پاسخ به این سوال یک بار اوزان با فرض $\beta = ۱/۱$ و $\tilde{z}^2 = ۱$، و بار دیگر با فرض $\beta = ۵$ و $\tilde{z}^2 = ۰/۱$ محاسبه شد و مدل بر اساس اوزان جدید اجرا شد، در هر دو حالت نتایج کاملاً مشابه نتایجی بود که قبلاً به‌دست آمده بود.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

جدول ۹. سطح برآورد نیازمندی‌های فنی و تخصیص بودجه

	کربن	سیلیسیم	منگنز	کروم	نیکل	مولیبدن	مس	آلومینیوم
سطح برآورد	۰/۰۵	۱	۱	۰/۲۷۸۴۲۹۷	۰/۴۷۴۰۹۴۲	۰/۰۵	۱	۱
بودجه تخصیص یافته	۰/۱۵	۲۰	۱۱۳	۸/۰۷۴۴۶۱۳	۷۸/۲۲۵۵۴۳	۳/۵۵	۲۷	۱۰

جدول ۱۰. سطح رضایت مشتری

خواسته‌های مشتری	سطح رضایت	دامنه
سختی سطح (g_1)	۰/۵۹۳۸۳۴۱	دامنه ایده‌آل
سختی مغز (g_2)	۰/۵۹۷۴۳۶۴	دامنه مطلوب
استحکام کششی (g_3)	۰/۶۴۳	مرز دامنه قابل تحمل و دامنه مطلوب
استحکام تسلیم (g_4)	۰/۶۷۹۸۸۰۶	دامنه مطلوب

۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق از رویکرد برنامه‌ریزی فیزیکی خطی که رویکرد نسبتاً جدیدی است و برتری‌هایی نسبت به رویکردهای پیشین دارد، برای فرموله کردن و حل مسأله طراحی در QFD استفاده شده است. و همچنین برای مواجهه با ماهیت فازی در فرآیند طراحی محصول، یک روش تصمیم‌گیری گروهی فازی در تکمیل خانه کیفیت پیشنهاد شده است بر خلاف روش‌های سنتی که از مقیاس‌های کمی برای این منظور استفاده می‌کردند. به‌کارگیری این روش دارای دو مزیت اساسی است نخست، به‌کارگیری واژه‌های کلامی جهت جمع‌آوری داده‌هایی که ماهیت فازی دارند، این امکان را به اعضای تیم QFD می‌دهد که با آزادی عمل و انعطاف‌پذیری بیشتری ارزیابی‌های خود از روابط خانه کیفیت را انجام دهند. دوم، از آنجایی‌که قضاوت‌های افراد از روابط، متفاوت است به‌کارگیری این روش امکان رسیدن به ارزیابی دقیق‌تری از روابط خانه کیفیت را فراهم می‌کند. همچنین برای حفظ ماهیت فازی داده‌ها در نرمال‌سازی روابط خانه کیفیت از مدل چن و ونگ [۱۰] و عملگر ارزش فازی مورد انتظار استفاده شده است.

در به‌کارگیری QFD برای طراحی محصول، از روش‌های مختلفی جهت تعیین وزن خواسته‌های مشتری استفاده می‌شود که در همه این روش‌ها به هر خواسته مشتری فقط یک وزن اختصاص می‌یابد که در برخی موارد ممکن است غیر واقع‌بینانه باشد. ترکیب برنامه‌ریزی فیزیکی خطی با QFD یک مزیت اساسی نسبت به سایر روش‌ها دارد و آن این‌است که نیاز به تعیین وزن به‌طور مستقیم را برطرف می‌کند چرا که این اوزان در فرآیند ساخت مدل برنامه‌ریزی فیزیکی خطی تولید می‌شوند. به‌علاوه، به‌دلیل اینکه برای هر خواسته مشتری در دامنه‌های متفاوت وزن‌های متفاوتی تولید می‌شود به واقعیت نزدیک‌تر است. همچنین در مدل ارایه شده، بودجه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در فاز طراحی محصول مدنظر قرار گرفته است. و امکان وارد کردن هر محدودیت سیستمی دیگری به مدل با توجه به محصول مورد مطالعه و سیاست‌های شرکت، وجود دارد.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

منابع

[1] Cordeiro, E. C., Barbosa, G. F., & Trabasso, L. G. (2016). A customized QFD (quality function deployment) applied to management of automation projects. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87(5), 2427-2436.

[2] Yu, L., Wang, L., & Bao, Y. (2018). Technical attributes ratings in fuzzy QFD by integrating interval-valued intuitionistic fuzzy sets and Choquet integral. Soft Computing, 22(6), 2015-2024.

[3] Liu, Y., Han, Y., Zhou, J., Chen, Y., & Zhong, S. (2017). Establishing the relationship matrix in QFD based on fuzzy regression models with optimized h values. Soft Computing.

[4] Kowalska, M., Pazdzior, M., & Krzton-Maziopa, A. (2018). Implementation of QFD method in quality analysis of confectionery products. Journal of Intelligent Manufacturing, 29(2), 439-447.

[5] Miao, Y., Liu, Y., & Chen, Y. (2015). Determination of Target Values of Engineering Characteristics in QFD Using Uncertain Programming. Journal of Uncertainty Analysis and Applications, 3(1), 16.

[6] Li, L., Liu, F., & Li, C. (2014). Customer satisfaction evaluation method for customized product development using Entropy weight and Analytic Hierarchy Process. Computers & Industrial Engineering, 77, 80-87.

[7] Kasiri, L. A., Guan Cheng, K. T., Sambasivan, M., & Sidin, S. M. (2017). Integration of standardization and customization: Impact on service quality, customer satisfaction, and loyalty. Journal of Retailing and Consumer Services, 35, 91-97.

[8] Zhang, X. (2017). User selection for collaboration in product development based on QFD and DEA approach. Journal of Intelligent Manufacturing.

[9] Lai, X., Xie, M., & Tan, K. C. (2006). QFD optimization using linear physical programming. Engineering Optimization, 38(5), 593-607.

[10] Chen, L.-H., & Weng, M. C. (2003). A fuzzy model for exploiting quality function deployment. Mathematical and Computer Modelling, 38(5), 559-570.

[11] Yang, Q., Chin, K.-S., & Li, Y.-L. (2018). A quality function deployment-based framework for the risk management of hazardous material transportation process. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 52, 81-92.

[12] Zhang, X., Zhang, S., Zhang, L., Xue, J., Sa, R., & Liu, H. (2019). Identification of product's design characteristics for remanufacturing using failure modes feedback and quality function deployment. Journal of Cleaner Production, 239, 117967.

[13] Büyüközkan, G., & Güleryüz, S. (2015). Extending Fuzzy QFD Methodology with GDM Approaches: An Application for IT Planning in Collaborative Product Development. International Journal of Fuzzy Systems, 17(4), 544-558.

[14] Wood, L. C., Wang, C., Abdul-Rahman, H., & Jamal Abdul-Nasir, N. S. (2016). Green hospital design: integrating quality function deployment and end-user demands. Journal of Cleaner Production, 112, 903-913.

[15] Chen, C.-C. (2010). Application of quality function deployment in the semiconductor industry: A case study. Computers & Industrial Engineering, 58(4), 672-679.

[16] Askin, R. G., & Dawson, D. W. (2000). Maximizing customer satisfaction by optimal specification of engineering characteristics. IIE Transactions, 32(1), 9-20.

[17] Moskowitz, H., & Kim, K. J. (1997). QFD optimizer: A novice friendly quality function deployment decision support system for optimizing product designs. Computers & Industrial Engineering, 32(3), 641-655.

[18] Chen, L.-H., & Ko, W.-C. (2010). Fuzzy linear programming models for NPD using a four-phase QFD activity process based on the means-end chain concept. European Journal of Operational Research, 201(2), 619-632.

[19] Zhou, M. (1998). Fuzzy logic and optimization models for implementing QFD. Computers & Industrial Engineering, 35(1), 237-240.

[20] Joos, H. D. (1999). A methodology for multi-objective design assessment and flight control synthesis tuning. Aerospace Science and Technology, 3(3), 161-176.

[21] Chowdhury, Md. M. H., Quaddus, M. A. (2016). A multi-phased QFD based optimization approach to sustainable service design. International Journal of Ptoduction Economics, 171(2), 165-178.

[22] Karsak, E. E., Sozer, S., & Alptekin, S. E. (2003). Product planning in quality function deployment using a combined analytic network process and goal programming approach. Computers & Industrial Engineering, 44(1), 171-190.

[23] Han, S. B., Chen, S. K., Ebrahimpour, M., & Sodhi, M. S. (2001). A conceptual QFD planning model. International Journal of Quality & Reliability Management, 18(8), 796-812.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

[24] Chen, L.-H., & Weng, M. C. (2006). An evaluation approach to engineering design in QFD processes using fuzzy goal programming models. European Journal of Operational Research, 172(1), 230-248.
[25] Chen, L.-H., Ko, W.-C., & Yeh, F.-T. (2017). Approach based on fuzzy goal programing and quality function deployment for new product planning. European Journal of Operational Research, 259(2), 654-663.
[26] Dawson, D. W., & Askin, R. G. (1999). Optimal new product design using quality function deployment with empirical value functions. Quality and Reliability Engineering International, 15(1), 17-32.
[27] Belhe, U., & Kusiak, A. (1996). The house of quality in a design process. International Journal of Production Research, 34(8), 2119-2131.
[28] Lai, X., Xie, M., & Tan, K. C. (2005). Dynamic programming for QFD optimization. Quality and Reliability Engineering International, 21(8), 769-780.
[29] Messac, A. (1996). Physical programming - Effective optimization for computational design. AIAA Journal, 34(1), 149-158.
[30] Messac, A. (1998). Control-structure integrated design with closed-form design metrics using physical programming. AIAA Journal, 36(5), 855-864.
[31] Messac, A. (2000). From dubious construction of objective functions to the application of physical programming. AIAA Journal, 38(1), 155-163.
[32] Messac, A., & Hattis, P. D. (1996). Physical programming design optimization for high speed civil transport. Journal of Aircraft, 33(2), 446-449.
[33] Wilson, B. H., Erin, C., & Messac, A. (1999). Optimal design of a vibration isolation mount using physical programming. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 121(2), 171-178.
[34] Kovach, J., Cho, B. R., & Antony, J. (2008). Development of an experiment-based robust design paradigm for multiple quality characteristics using physical programming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 35(11), 1100-1112.
[35] Messac, A., & Ismail-Yahaya, A. (2002). Multiobjective robust design using physical programming. Structural and Multidisciplinary Optimization, 23(5), 357-371.
[36] Tian, Z., & Zuo, M. J. (2006). Redundancy allocation for multi-state systems using physical programming and genetic algorithms. Reliability Engineering & System Safety, 91(9), 1049-1056.
[37] Reynoso-Meza, G., Sanchis, J., Blasco, X., & García-Nieto, S. (2014). Physical programming for preference driven evolutionary multi-objective optimization. Applied Soft Computing, 24, 341-362.
[38] Maria, A., Mattson, C., Ismail-Yahaya, A., & Messac, A. (2003). Linear physical programming for production planning optimization. Engineering Optimization, 35(1), 19-37.
[39] Melachrinoudis, E., Min, H., & Messac, A. (2000). The relocation of a manufacturing/distribution facility from supply chain perspectives : a physical programming approach. Multi-criteria applications, 10, 15-39.
[40] Melachrinoudis, E., Messac, A., & Min, H. (2005). Consolidating a warehouse network. International Journal of Production Economics, 97(1), 1-17.
[41] McAllister, C. D., Simpson, T. W., Hacker, K., Lewis, K., & Messac, A. (2005). Integrating linear physical programming within collaborative optimization for multiobjective multidisciplinary design optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, 29(3), 178-189.
[42] Li, H., Ma, M., & Zhang, W. (2016). Multi-objective collaborative optimization using linear physical programming with dynamic weight. Journal of Mechanical Science and Technology, 30(2), 763-770.
[43] Liu, J., Chen, Y., Zhou, J., & Yi, X. (2016). An Exact Expected Value-Based Method to Prioritize Engineering Characteristics in Fuzzy Quality Function Deployment. International Journal of Fuzzy Systems, 18(4), 630-646.
[44] Chen, Y., Fung, R. Y. K., & Tang, J. (2006). Rating technical attributes in fuzzy QFD by integrating fuzzy weighted average method and fuzzy expected value operator. European Journal of Operational Research, 174(3), 1553-1566.
[45] Venkata Subbaiah, K., Yeshwanth Sai, K., & Suresh, C. (2016). QFD–ANP Approach for the Conceptual Design of Research Vessels: A Case Study. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 97(4), 539-546.
[46] Zheng, P., Xu, X., & Xie, S. Q. (2016). A weighted interval rough number based method to determine relative importance ratings of customer requirements in QFD product planning. Journal of Intelligent Manufacturing.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]

[47] Bottani, E., & Rizzi, A. (2006). Strategic management of logistics service: A fuzzy QFD approach. International Journal of Production Economics, 103(2), 585-599.
[48] Wasserman, G. S. (1993). On how to prioritize design requirements during the QFD planning process. IIE Transactions, 25(3), 59-65.
[49] Liu, B., & Liu, Y. K. (2002). Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 10(4), 445-450.
[50] Messac, A., Gupta, S. M., & Akbulut, B. (1996). Linear physical programming: A new approach to multiple objective optimization. Transactions on Operational Research, 8, 39-59.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.1.8.4]