

بهینه‌سازی هزینه، زمان و کیفیت در فرایند تولید مرغ گوشتی با تلفیق الگوریتم ژنتیک (NRGA-II) و منطق فازی

عرفان خسروانی مقدم^۱، محمد شریفی^{۲*}، شاهین رفیعی^۳، پیام حاتمی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی و فناوری

کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع

طبیعی دانشگاه تهران،

۳. استاد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی

دانشگاه تهران

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد، فیزیولوژی دام، گروه علوم دامی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و

منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۲/۵)

چکیده

از مسائل بسیار مهم در مدیریت تولید، انتخاب بهترین گزینه برای انجام هر کدام از فعالیت‌های تولید به نحوی است که هزینه و زمان کمترین مقدار و بالاترین کیفیت ممکن را داشته باشد. با توجه به تعداد زیاد فعالیت‌ها و گزینه‌های انتخابی برای هر فعالیت، معمولاً این انتخاب جواب منحصر به فردی ندارد و می‌توان با استفاده از تابع مطلوبیت و اختصاص دادن وزن‌هایی به زمان و هزینه و کیفیت، بهترین جواب را از بین جواب‌های به دست آمده انتخاب کرد. از آنجا که در دنیای واقعی عدم قطعیت وجود دارد، پس برای رسیدن به مدیریت دقیق بایستی به عدم قطعیت نیز توجه شود. در این مقاله یک مدل ریاضی فازی برای شبکه‌ای از فعالیت‌ها پیشنهاد می‌شود، تا از میان شیوه‌های ممکن و موازنه معیارهای آنها، بهترین شیوه اجرا برای هر فعالیت مشخص شود. بدین منظور از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب برای حل این مسئله استفاده و بهترین شیوه‌های انجام هر فعالیت برای تولید مرغ گوشتی از تخم مرغ تا کشتار ارائه شد و مقدار زمان، هزینه و کیفیت به ترتیب ۱۷۹۳/۸ ساعت و ۹۱۱/۹۹ میلیون تومان و ۴۸ درصد محاسبه شد.

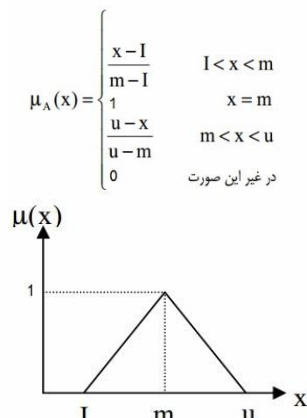
کلیدواژه‌گان: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چندهدفه، جواب پارتو، مرغ گوشتی، منطق فازی.

مقدمه

طی دهه‌های گذشته، با توجه به اهمیت گوشت مرغ و بالابودن هزینه تولید به دلیل ضریب تبدیل غذایی بالا در ایران در مقایسه با کشورهای توسعه یافته، مدیریت و کنترل دقیقی در هر دوره تولیدی لازم است. تولید، مبتنی بر سه نهاده اصلی زمین، نیروی کار، و سرمایه است، اما بدون عنصر چهارم یعنی نهاده مدیریت، تولید اتفاقی و برحسب تصادف خواهد بود. کارایی چه از نظر اقتصادی و چه از نظر فیزیکی به مهارت مدیر در ترکیب این منابع به شیوه‌های مناسب و اثربخش، متکی است. با توجه به فضای رقابتی کسب و کار و محدودیت منابع، بایستی برای دستیابی به اهداف به مدیریت بیشتر توجه شود که از این اهداف می‌توان به افزایش کیفیت، کاهش مدت زمان و

هزینه‌های اجرایی اشاره کرد. حال سؤال این است که چگونه می‌توان به چنین اهدافی دست یافت؟ چالش اصلی پیش روی مدیران، انتخاب رویکردی مناسب برای یافتن ترکیب‌های بهینه زمان، هزینه، و کیفیت تولید است. به طور کلی روش‌های گوناگون بهینه‌سازی زمان و هزینه به سه دسته ابتکاری، ریاضی و فراابتکاری تقسیم می‌شوند. از روش‌های ابتکاری می‌توان مدل شیب هزینه مؤثر زیمنس (Simens, 1971)، روش فوندال (Fondahel, 1961)، و روش سختی مصلحی (Moslehi, 1993) اشاره کرد. از روش‌های ریاضی می‌توان روش برنامه‌ریزی خطی پاگنونی (Pagnoni, 1990)، روش برنامه‌ریزی عدد صحیح پترسون و هابر (Patterson & Huber, 1974)، و روش برنامه‌ریزی ترکیبی خطی لئو و همکاران (Leu et al., 2005) را نام برد. در این راستا همچنین محققانی بر مبنای الگوریتم ژنتیک (Feng, 1997) تلاش‌هایی را در زمینه ارائه راه‌حل‌های

۱۹ و ۲۱ کارگر انجام داد. با توجه به تعداد کارگر، میزان زمان، هزینه و کیفیت کار برای مقدار کار ثابت تغییر می‌کند. جابه‌جایی مرغ‌های بسته‌بندی شده را نیز می‌توان با سه مدل ماشین گوناگون که در دسترس است و از نظر کیفیت و هزینه متفاوت هستند، انجام داد. همچنین در قسمت‌هایی که به ضدعفونی کردن نیاز است، از مواد ضدعفونی‌کننده گوناگون که هزینه و کیفیت متفاوتی دارند، می‌توان استفاده کرد.



شکل ۱. نحوه نمایش اعداد فازی مثلثی

با توجه به این موضوع تعداد حالات تکمیل این فرایند تولید مرغ گوشتی دارای m^n حالت است که در آن m ، تعداد شیوه انجام هر فعالیت و n ، تعداد فعالیت‌هاست. از این رو بایستی بهترین حالت ممکن را که شامل کمترین هزینه، زمان، و بیشترین کیفیت است پیدا کرد. همچنین شبکه و روابط بین فعالیت‌ها (شکل ۲) و نام هر یک از فعالیت‌ها (جدول ۱) آمده است.

جدول ۱. شماره و نام فعالیت‌ها در فرایند تولید

شماره فعالیت	نام فعالیت
۱	خرید تخم مرغ مادر و چیدن در سینی‌های ستر و ضدعفونی
۲	قرارگیری تخم مرغ‌ها در دستگاه ستر و هچر
۳	شمارش جوجه و بسته‌بندی
۴	شستشوی سینی‌های هچر
۵	شستشو و ضدعفونی سالن مرغداری
۶	خرید جوجه و انتقال جوجه‌ها از جوجه‌کشی به سالن‌های مرغداری
۷	پرورش جوجه‌ها
۸	بارگیری مرغ‌ها از سالن‌های مرغداری
۹	خرید و انتقال مرغ از مرغداری به کشتارگاه
۱۰	سرزنی-پرکنی و تخلیه اندرون‌ها
۱۱	شستشوی مرغ‌ها
۱۲	پابندزنی و اتاق سرد
۱۳	بسته‌بندی مرغ و وزن‌کشی
۱۴	خرید مرغ از کشتارگاه و انتقال به مرکز فروش

بهینه مطلق، انجام دادند. البته در تمامی تحقیقات به علت پیچیدگی کار، توجهی به عدم قطعیت‌های موجود در ماهیت مسئله نشده و مسائل در فضای قطعی انجام گرفته است، اما در پروژه‌های واقعی عوامل زمان و هزینه همواره دستخوش تغییرات زیادی هستند. از این رو برای برطرف کردن این مشکل، موازنه دوهدفه زمان-هزینه را در فضای عدم قطعیت مطالعه کردند (Feng et al., 2000; Azaron et al., 2005). به تدریج محققان به این نتیجه رسیدند که تولید در یک زمان مناسب و با کمترین هزینه، بدون در نظر گرفتن کیفیت اجرا، معقول نیست و به دنبال راهکارهایی برای حل این مسئله بودند. تجربه موفق الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری در حل مسئله بهینه‌سازی زمان-هزینه باعث شد تا محققان تمرکز خود را برای حل مسئله بهینه‌سازی سه‌معیاره زمان، هزینه، و کیفیت به این الگوریتم معطوف کنند. محققانی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک (Rayes et al., 2005) و نسخه جدید توسعه داده شده‌ای از الگوریتم ژنتیک به نام PGA Fast (Iranmanesh et al., 2008) و با نرم‌افزار الگوریتم ژنتیک به نام "سامانه بهینه‌سازی چندهدفه منابع اجرایی خودکار ۱۰" (Razek et al., 2010) مسئله بهینه‌سازی سه‌بعدی زمان، هزینه و کیفیت را حل کردند. در تحقیقات فوق اهداف به صورت قطعی در نظر گرفته شده است در صورتی که در دنیای پیچیده واقعی همه این موارد مبهم و غیرواقعی است. از این رو تئوری منطق فازی برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها در طول فرایند حل مسئله به کار گرفته شده است و از طریق آن می‌توان هزینه و زمان و کیفیت را به گونه‌ای بهینه‌سازی و تعیین کرد که بسیار نزدیک به واقعیت باشد. در این پژوهش سعی بر آن شد که از بین روش‌های گوناگون اجرای هر فعالیت در طول فرایند تولید، بهترین روش با توجه به شرایط مؤثر بر تولید انتخاب شود و بتوان تولید مرغ گوشتی را با کمترین هزینه و زمان و بالاترین کیفیت ممکن به سرانجام رساند.

مواد و روش‌ها

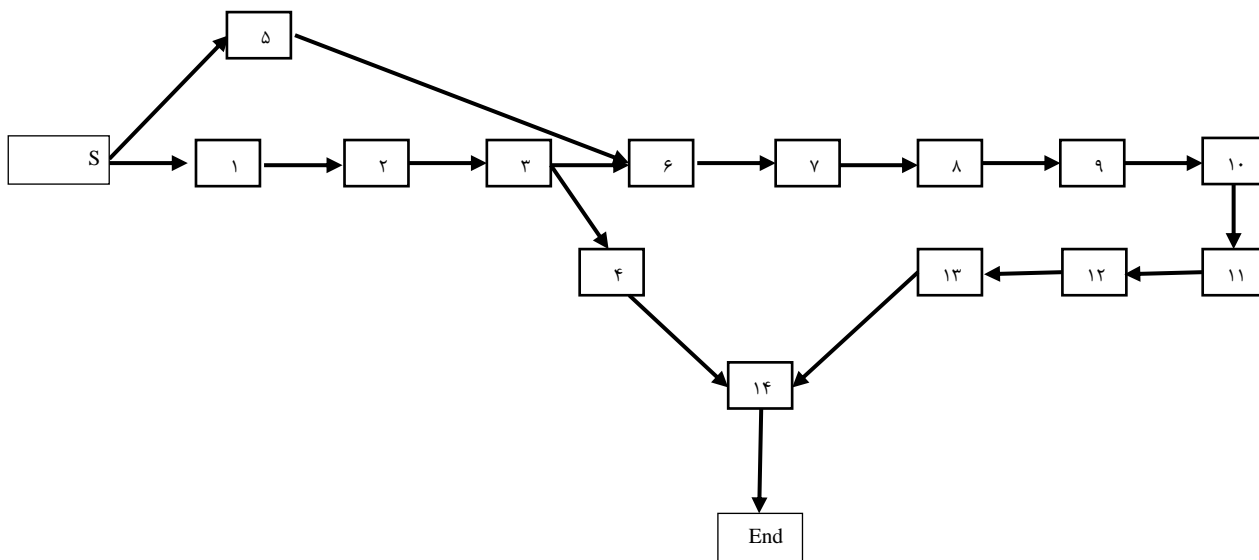
تعریف مسئله

در این تحقیق فرایند تولید مرغ گوشتی در بروجرد برای سی هزار جوجه از جوجه‌کشی تا کشتار در چهارده فعالیت خلاصه شده است که هر فعالیت با توجه به شرایط اجرای آن فعالیت به طور متوسط دارای چهار شیوه متفاوت اجرایی است و هر شیوه خود دارای زمان، هزینه، و کیفیت به صورت اعداد فازی مثلثی جداگانه است (شکل ۱). برای مثال فعالیت سرزنی و پرکنی (فعالیت شماره ۱۰) را می‌توان در مجموع با ۱۵ و ۱۷ و

ترسیم شبکه

نمایش تصویری ارتباط مابین فعالیت‌ها از نظر تقدم و تأخر آنها نسبت به یکدیگر است. برای رسم شبکه از روش شبکه گره‌ای استفاده شد که در این روش، فعالیت داخل گره (AON)^۱ نوشته می‌شود و بردار نشان‌گر تقدم و تأخر فعالیت‌هاست (شکل ۲).

ترسیم شبکه روشی برای نمایش فعالیت‌ها و تقدم و تأخر آنهاست. پس از مشخص شدن فعالیت‌ها، پایه و مبنای اصلی برای برنامه‌ریزی و کنترل، شبکه است. شبکه فعالیت‌ها در واقع



شکل ۲. شبکه گره‌ای فعالیت‌ها در فرآیند تولید مرغ گوشتی

عدد مربوط به زمان و هزینه و کیفیت هر کدام جداگانه و به ترتیب فعالیت‌ها درون سه ماتریس جدید جایگذاری می‌شوند. در ادامه سه ماتریس زمان و هزینه و کیفیت را در بعد دوم جمع می‌بندند و هر ماتریس سه عدد را که شامل بدترین و محتمل‌ترین و خوشبینانه‌ترین زمان و هزینه و کیفیت کل فرآیند تولید است، به دست می‌آورد. شایان ذکر است که چون ماتریس کیفیت دارای اعداد نسبی بین صفر تا یک است بایستی پس از جمع‌بستن بر ۱۴ نیز تقسیم شود. سه عدد به دست آمده به صورت اعداد فازی مثلثی معرفی می‌شوند و از طریق روش مرکز ثقل، سه عدد را به یک عدد تبدیل می‌کنند و به عنوان خروجی تابع هدف معرفی می‌شوند.

الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله

در این تحقیق، موازنه زمان، هزینه، و کیفیت اجرا با استفاده از ریاضیات منطق فازی و الگوریتم ژنتیک^۲ (NRGA-II) انجام گرفت و کدنویسی الگوریتم در نرم‌افزار متلب صورت پذیرفت. در ابتدا کروموزوم‌هایی با ۱۴ متغیر به اندازه جمعیت اولیه (جدول ۲) تولید می‌شود به طوری که هر متغیر موجود در کروموزوم یک عدد صحیح تصادفی بین یک و تعداد شیوه‌های

بررسی و مدل‌سازی تابع هدف

همان‌طور که در شکل ۲ نمایان است شبکه تقریباً به صورت خطی است، بنابراین طولانی‌ترین مسیر، مسیر بحرانی است که از نظر زمانی بیشترین مدت را برای اتمام فرآیند تولید به خود اختصاص می‌دهد (مسیرهای ۱، ۲، ۳، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴)؛ از این رو برای محاسبات زمانی در الگوریتم، مقدار زمان فعالیت ۴ و ۵، صفر در نظر گرفته می‌شود (این دو فعالیت به طور موازی با فعالیت‌های دیگر انجام می‌شود). در این پژوهش برای معرفی داده‌های جمع‌آوری شده به نرم‌افزار از آرایه‌های سلولی استفاده شد. بدین‌گونه که در هر روش سه هزینه و سه زمان و سه کیفیت در درون یک سلول معرفی می‌شود و سلول‌ها هم به صورت ماتریس دوبعدی که سطرهای ماتریس شامل تعداد فعالیت‌ها و ستون‌های ماتریس شامل روش‌های هر فعالیت است، معرفی می‌شوند. سپس با توجه به شماره فعالیت و شماره روش انجام هر فعالیت، سلول مورد نظر از ماتریس تشکیل شده انتخاب می‌شود. تابع هدف در این مقاله به گونه‌ای تعریف شده است که دارای ۱۴ عدد ورودی است. اعداد ورودی به ترتیب فعالیت‌ها، شامل شماره روش انتخابی هر فعالیت که همان شماره ستون برای هر سطر از ماتریس اولیه است، هستند. بدین ترتیب سلول‌های مورد نظر پس از فراخوانی شدن و سه

1. Activity On Node
2. Non-dominated Ranking Genetic Algorithm-II

d_i فاصله ازدحامی عضو نام است.

پس از انتخاب والدین، برای تلفیق آنها از سه روش تک نقطه، دونقطه، و یکنواخت استفاده می شود؛ بدین گونه که برای هر روش تلفیق، احتمال ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۷ به ترتیب در نظر گرفته و با استفاده از چرخه رولت یکی از این سه روش انتخاب می شود.

در ادامه الگوریتم به میزان درصد جهش به طور تصادفی عضوهایی از مجموعه کروموزوم های موجود در پارتو انتخاب می شوند و جهش روی آنها صورت می گیرد. بدین گونه که در هر کروموزوم انتخابی با توجه به نرخ جهش تعدادی از فعالیت های موجود در کروموزوم به طور تصادفی انتخاب می شوند و شیوه انجام هر فعالیت انتخابی با در نظر داشتن محدودیت شیوه های آن فعالیت، تغییر می کند.

در قدم بعدی زمان، هزینه، و کیفیت برای اعضای جدیدی که از تلفیق و جهش به دست آمده اند، محاسبه می شود و این اعضای جدید به اعضای جمعیت قبلی اضافه می شوند. پس از آن دوباره کل کروموزوم ها رتبه بندی و فاصله ازدحامی آنها محاسبه می شود. سپس براساس رتبه بندی (از کمتر به بیشتر) و فاصله ازدحامی (از بیشتر به کمتر)، کروموزوم ها مرتب می شوند. بعد از این به اندازه جمعیت اولیه از جمعیت مرتب شده موجود ذخیره و بقیه حذف می شوند. باید توجه کرد که رتبه بندی و فاصله ازدحامی دو صفت نسبی هستند و با هر تغییری در کروموزوم ها بایستی دوباره محاسبه شوند. بنابراین پس از حذف، دوباره رتبه بندی و فاصله ازدحامی محاسبه و جمعیت دوباره براساس رتبه و فاصله ازدحامی مرتب می شوند. در آخر اعضای دارای رتبه یک، اعضای پارتو را تشکیل می دهند.

هرکدام از اعضای پارتو حالتی از حالات ممکن برای انجام پروسه تولید مرغ گوشتی است. در این مرحله با توجه به ضرایبی که برای هزینه، زمان، و کیفیت در نظر گرفته شده است (ضرایب با توجه به اهمیت فاکتورهای زمان، هزینه، و کیفیت برای هر مدیر می تواند متفاوت باشد)، بهترین حالت موجود از مجموعه جواب پارتو انتخاب می شود.

این روند تکرار می شود تا زمانی که دیگر تغییر شایان ملاحظه ای در تابع مطلوبیت طبق ضرایب فاکتورها رخ ندهد.

در این تحقیق وزن نسبی معیارهای زمان، هزینه، و کیفیت به ترتیب $WT=0/34$ و $WC=0/34$ و $WQ=0/3$ در نظر گرفته شد و طبق رابطه ۵ مطلوبیت برای هر جواب محاسبه شد.

$$U=(WT \times T)+(WC \times C)+(WQ \times 1/Q) \quad (\text{رابطه ۵})$$

هر فعالیت اختیار کند؛ سپس با توجه به شیوه های انتخابی هر فعالیت زمان، هزینه، و کیفیت هر شیوه به صورت فازی با یکدیگر جمع می شوند. پس از آن هر کروموزوم دارای یک زمان فازی، هزینه فازی، و کیفیت فازی است. در این مرحله غیرفازی سازی با روش مرکز ثقل برای زمان، هزینه، و کیفیت هر کروموزوم انجام می شود. با مشخص شدن جواب برای هر کروموزوم بایستی کروموزوم ها را رتبه بندی^۱ کرد. کروموزوم هایی که رتبه یک دارند مجموعه جواب پارتو نامیده می شوند. در مرحله بعد بایستی از بین مجموعه کروموزوم های موجود در پارتو والدین را انتخاب کرد. برای انتخاب والدین ابتدا با توجه به تعداد رتبه بندی، برای هر رتبه طبق رابطه ۱ احتمالی تعریف می شود، به طوری که با بیشتر شدن رتبه احتمال انتخاب آن رتبه کمتر شود.

$$P=EXP(-R) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه R: رتبه است.

در ادامه با استفاده از چرخه رولت^۲ یکی از رتبه ها انتخاب می شود. پس از آن برای انتخاب یکی از اعضای رتبه انتخاب شده بایستی فاصله ازدحامی (رابطه های ۲ و ۳) تمامی اعضا محاسبه شود.

$$d_i^j = \frac{f_{i-1}^j + f_{i+1}^j}{f_{\max}^j - f_{\min}^j} \quad (\text{رابطه ۲})$$

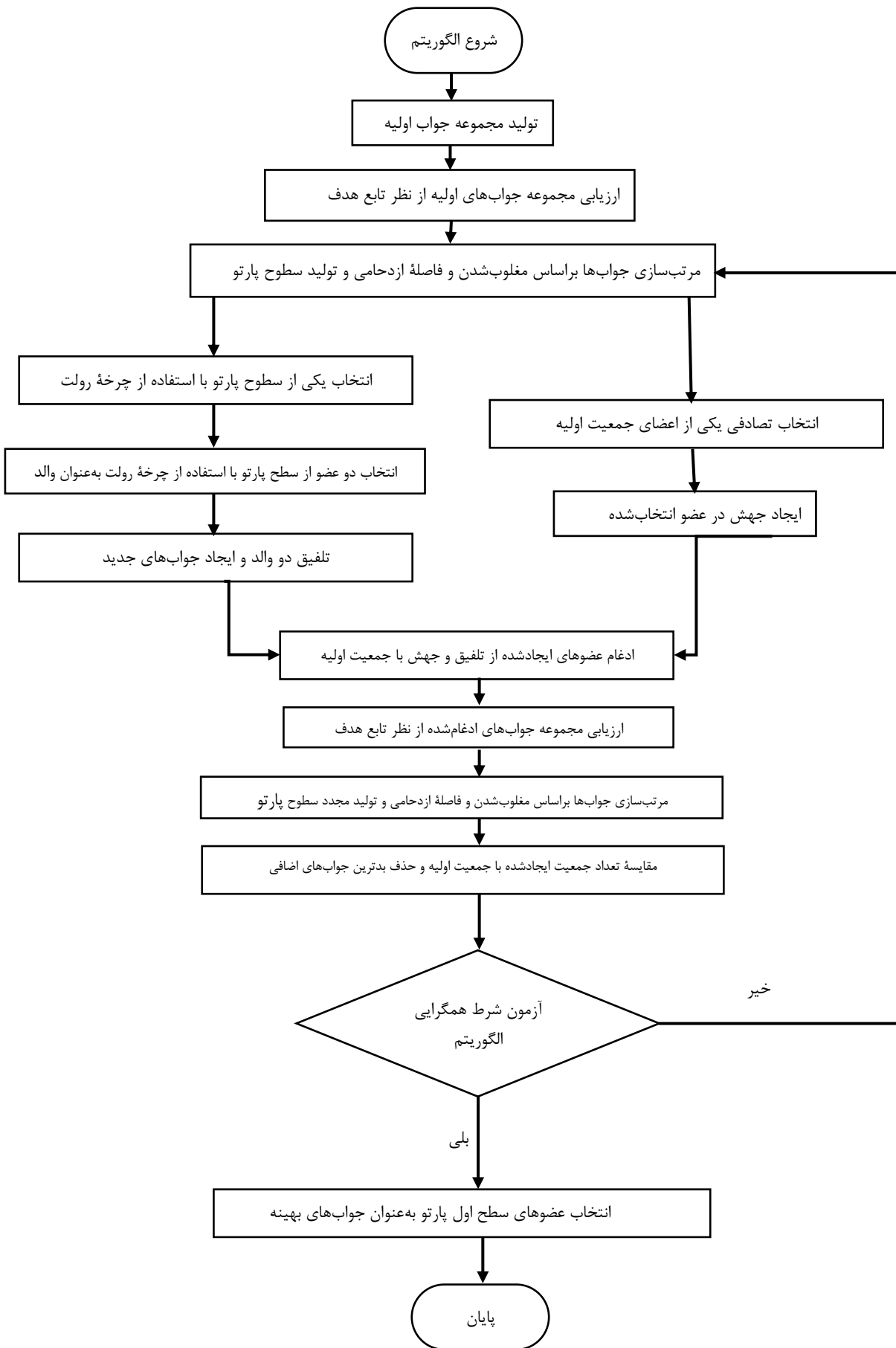
$$d_i = \sum_{j=1}^D d_i^j \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این روابط: d_i^j فاصله ازدحامی عضو نام در بُعد j ام، f_{i+1}^j فاصله عضو نام از عضو $i+1$ در بُعد j ام، f_{i-1}^j فاصله عضو نام از عضو $i-1$ در بُعد j ام، f_{\max}^j بزرگ ترین عضو بُعد j ام، f_{\min}^j کوچک ترین عضو بُعد j ام، و d_i فاصله ازدحامی عضو نام است.

هرچه این فاصله بیشتر باشد، یعنی آن عضو در مکان خلوت تری از سطح پارتو قرار گرفته است و ارزش بیشتری در مقایسه با بقیه اعضا دارد. با توجه به مطالب گفته شده برای انتخاب یک عضو از رتبه منتخب، ابتدا با توجه به فاصله ازدحامی برای هر عضو طبق رابطه ۴ احتمالی تعریف می شود به طوری که هرچه فاصله ازدحامی بیشتر شود احتمال انتخاب بالاتر می رود و سپس بار دیگر از چرخه رولت استفاده عضوی برای والد انتخاب می شود.

$$P=EXP(d_i) \quad (\text{رابطه ۴})$$

1. zRank
2. Roulette



در این رابطه: Q کیفیت غیرفازی شده، T زمان غیرفازی شده، C هزینه غیرفازی شده، U تابع مطلوبیت، WC ضریب وزنی هزینه، WQ ضریب وزنی کیفیت، و WT ضریب وزنی زمان هستند. با توجه به رابطه ۶ می‌توان دریافت که کیفیت به طور معکوس با هزینه و زمان جمع شده است. بنابراین هر جواب از مجموعه جواب پارتو که طبق رابطه ۶ دارای کمترین مقدار باشد، جواب بهینه مسئله است.

جدول ۲. پارامترهای لازم برای الگوریتم

مقدار	پارامترهای الگوریتم
۵۰	اندازه جمعیت اولیه
۴۰	درصد جهش
۷۰	درصد تلفیق
۰/۰۲	نرخ جهش برای هر کروموزوم

یکی از این پارامترها اندازه جمعیت هر نسل است که با بزرگتر شدن آن به دلیل وسیع تر شدن فضای جستجو احتمال پیدا کردن جواب نزدیک به بهینه مطلق افزایش می‌یابد ولی باعث افزایش زمان محاسباتی و کاهش کارایی الگوریتم می‌شود. در این الگوریتم تعداد جمعیت اولیه ۵۰ در نظر گرفته و تعداد مراجع الگوریتم به تابع هدف از رابطه ۶ محاسبه شد.

$$NFE = N_{pop} + (NCross + NMutation) \times Iteration$$

(رابطه ۶) $NFE = 1450$

در این رابطه: NFE تعداد مراجع الگوریتم به تابع هدف، NCross تعداد اعضای که به عنوان والد انتخاب می‌شوند، NMutation تعداد اعضای که جهش روی آنها صورت می‌گیرد، Npop تعداد جمعیت اولیه، و Iteration تعداد تکرار الگوریتم هستند.

نتایج و بحث

پس از اجرای الگوریتم، تعداد اعضای مجموعه جواب پارتو با افزایش تکرار روند صعودی داشت تا آنجا که تعداد اعضای پارتو با تعداد جمعیت اولیه یکسان شد. این بدان معناست که الگوریتم به تدریج جواب‌هایی را کشف کرده است که براساس سه تابع هدف، هیچ‌یک از جواب‌ها یکدیگر را مغلوب نمی‌کنند. از بین تمامی جواب‌های پارتو مسئله، می‌توان یکی از جواب‌ها را بسته به ضرایب تعریف شده برای تابع مطلوبیت، مطابق رابطه ۶ انتخاب کرد. با توجه به ضرایبی که در این مسئله برای تابع مطلوبیت در نظر گرفته شد، میزان تابع مطلوبیت برای هر یک از جواب‌های پارتو محاسبه شد و در هر تکرار کمترین مقدار

تابع مطلوبیت، به عنوان جواب بهینه در هر تکرار انتخاب شد. مجموعه جواب پارتو در تکرار آخر در جدول ۳ ارائه شده است و همان‌طور که نمایان است، کمترین مقدار تابع مطلوبیت متعلق به جواب دوم مجموعه جواب پارتو است. در نتیجه فعالیت‌ها را باید با توجه به شیوه‌ای که برای هر فعالیت در جواب دوم مجموعه جواب پارتو معرفی شده است، اجرا کرد تا نتیجه مطلوب در تولید مرغ گوشتی با توجه به اهداف مورد نظر حاصل شود. این گونه بهینه‌سازی فقط در دو پروژه صنعتی تا به حال به کار گرفته شده است (Mungle et al., 2013; Ebrahimnezhad et al., 2013) و در این مقاله برای اولین بار در زمینه کشاورزی و پروسه تولید مرغ گوشتی به کار گرفته شد. نتایج دو پژوهش اشاره شده، نیز نشان داد که هر قدر میزان تخمین حالت‌های خوش‌بینانه و بدبینانه و محتمل بازه گسترده‌تری داشته باشد، جواب نهایی الگوریتم نیز میزان زمان و هزینه بیشتر و کیفیت کمتر و در نهایت تابع مطلوبیت مقدار عددی بیشتری دارد.

شکل ۳ وضعیت مجموعه جواب پارتو را نشان می‌دهد. در این نمودار بیشتر جواب‌ها در قسمت مرکزی کشف شده‌اند، همچنین مشاهده می‌شود که الگوریتم توانسته است با محاسبه فاصله ازدحامی، جواب‌هایی را در ناحیه‌های خلوت نمودار کشف کند و این جواب‌ها را در مجموعه جواب پارتو مسئله حفظ کند. با توجه به جواب‌ها می‌توان دید که هر چه کیفیت افزایش یافته است، هزینه نیز روند صعودی داشته است ولی با افزایش زمان، کیفیت روند صعودی نداشته است؛ بنابراین کیفیت وابستگی بیشتری به هزینه دارد.

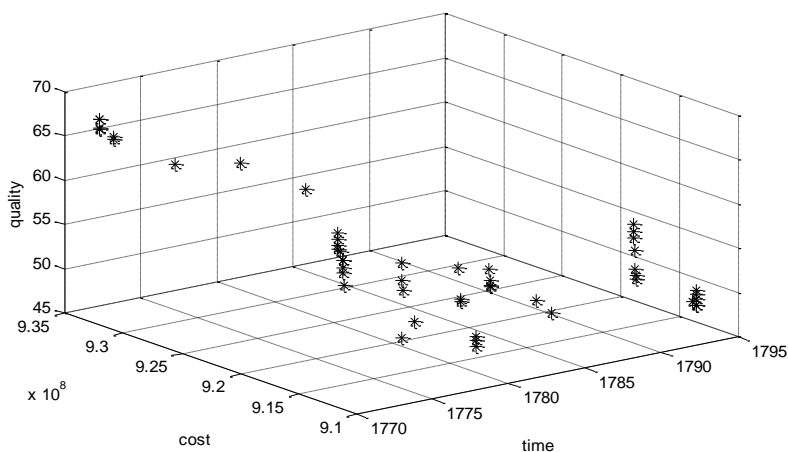
در شکل ۴ نیز روند پیداشدن جواب بهینه توسط الگوریتم مشاهده می‌شود. واضح است که الگوریتم پس از گذراندن تقریباً ۲۵ تکرار به مقدار ثابتی رسیده است. این نشان‌دهنده کارایی الگوریتم است که در تعداد تکرار کم توانسته است به حد قابل قبولی از پاسخ همگرا شود.

همان‌طور که ذکر شد، در این پژوهش از اعداد فازی استفاده شد که علت این امر تفاوت در میزان تجربه مدیران، نوسانات قیمت بازار، وجود بیماری‌ها، و در کل عوامل غیرقابل پیش‌بینی در پروسه تولید است. بدیهی است که هر چه میزان تجربه مدیران بیشتر و نوسانات بازار کمتر باشد، محدوده قیمت و زمان، که برای هر روش از فعالیت‌ها تخمین زده می‌شود، کمتر و دقیق‌تر است و جواب به‌دست‌آمده از الگوریتم کارایی بیشتری پیدا می‌کند.

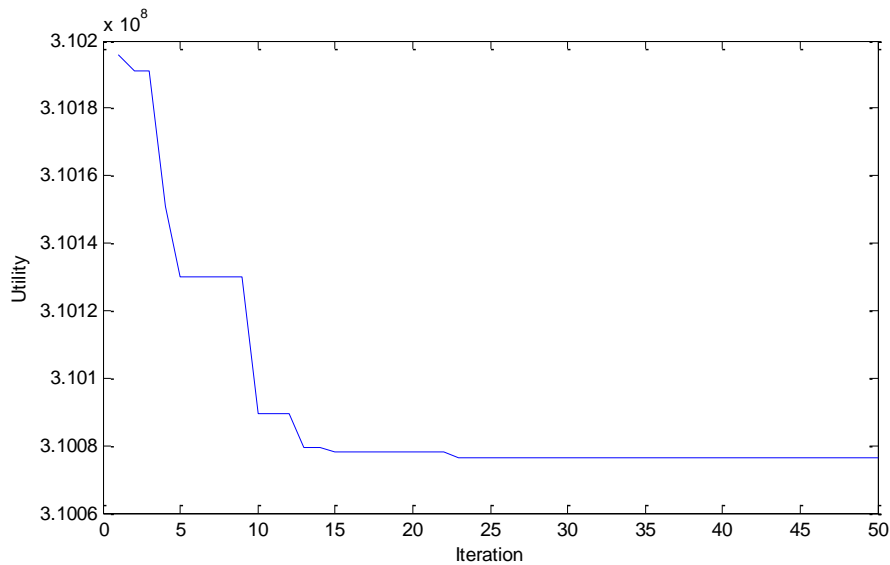
جدول ۳. خروجی‌های الگوریتم

شماره جواب پارتو	شیوه انتخابی برای هر فعالیت										زمان (ساعت)	هزینه (میلیون تومان)	کیفیت	میزان تابع مطلوبیت				
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰								
۱	۵	۵	۵	۴	۴	۵	۴	۴	۱	۵	۱	۴	۵	۱	۱۷۷۱	۹۳۳/۲۸	۰/۶۷۳۸	۳۱۷۳۱۵۸۰۲/۶
۲	۵	۱	۵	۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۱۷۹۳/۸	۹۱۱/۹۹	۰/۴۸۱	۳۱۰۰۷۷۳۱۰/۵
۳	۵	۵	۵	۴	۴	۵	۴	۴	۱	۵	۱	۴	۵	۱	۱۷۷۱	۹۳۳/۲۸	۰/۶۷۳۸	۳۱۷۳۱۵۸۰۲/۶
۴	۵	۱	۵	۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۴	۳	۱۷۹۳/۸	۹۱۲	۰/۴۹۳۹	۳۱۰۰۸۰۶۱۰/۵
۵	۴	۵	۵	۴	۴	۵	۲	۴	۱	۴	۱	۳	۵	۱	۱۷۷۴/۷	۹۲۰/۵۱	۰/۶۳۹۳	۳۱۲۹۷۴۰۰/۲۹
۶	۵	۱	۵	۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۱۷۹۳/۸	۹۱۱/۹۹	۰/۴۸۱	۳۱۰۰۷۷۳۱۰/۵
۷	۵	۵	۵	۴	۴	۵	۱	۴	۱	۵	۱	۴	۵	۳	۱۷۷۱	۹۱۲/۹۵	۰/۶۳۸۱	۳۱۰۴۰۳۶۰۲/۶
⋮																		

* کمترین مقدار مطلوبیت



شکل ۳. وضعیت جواب‌های پارتو در نمودار سه‌بعدی هزینه، زمان و کیفیت



شکل ۴. روند رسیدن به جواب بهینه طی تکرارهای گوناگون الگوریتم

نتیجه گیری

در این مقاله برای حل مسئله موازنه معیارهای زمان، هزینه، و کیفیت از یک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه فازی بهره‌برداری شد.
 - الگوریتم کارایی مناسبی داشت و توانست در تعداد تکرار کم به جواب بهینه همگرا شود.
 - با توجه به ضرایب وزنی تابع مطلوبیت مقدار زمان، هزینه و کیفیت به ترتیب ۱۷۹۳/۸ ساعت و ۹۱۱/۹۹ میلیون تومان و ۴۸ درصد محاسبه شد.
 - ضرایب وزنی موجود در تابع مطلوبیت، می‌تواند با توجه به نظر هر مدیر تغییر کند و اهداف هر مدیریتی را برآورده سازد.

معرفی نمادها

C: هزینه غیرفازی شده

d_i: فاصله ازدحامی

d_{ij}: فاصله ازدحامی عضو λ_m در بُعد λ_m

f_{i+1}^j: فاصله عضو λ_m از عضو i+1 در بُعد λ_m

f_{i-1}^j: فاصله عضو λ_m از عضو i-1 در بُعد λ_m

f_{max}^j: بزرگ‌ترین عضو بُعد λ_m

f_{min}^j: کوچک‌ترین عضو بُعد λ_m

Iteration: تعداد تکرار الگوریتم

NCross: تعداد اعضای که به‌عنوان والد انتخاب می‌شوند.

NFE: تعداد مراجعه الگوریتم به تابع هدف

NMutation: تعداد اعضای که جهش روی آنها صورت می‌گیرد.

Npop: تعداد جمعیت اولیه

Q: کیفیت غیرفازی شده

Rank: رتبه

T: زمان غیرفازی شده

U: تابع مطلوبیت

WC: ضریب وزنی هزینه

WQ: ضریب وزنی کیفیت

WT: ضریب وزنی زمان

REFERENCES

- Abdel Razek, R.H., Diab, A.M., Hafez, S.M., Aziz, R.F. (2010). Time-cost-quality trade-off software by using simplified genetic algorithm for typical repetitive construction projects. *World Academy of Science Engineering and Technology*, 61(1), 312-321.
- Azaron, A., Perkgoz, C., Sakawa, M. (2005). A genetic algorithm approach for the time-cost trade-off in PERT networks. *Applied Mathematics and Computation*, 168(1), 1317-1339.
- Ebrahimnezhad, S., Ahmadi, V., Javanshir, H. (2013). Time-cost-quality trade-off in a CPM network using fuzzy logic and genetic algorithm, *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, 24(3), 361-376.
- El-Rayes, K., Kandil, A. (2005). Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction, *Journal Of Computing in Civil Engineering*, 131(4), 477-486.
- Feng, C. (1997). Using GA to solve construction time cost trade off problem. *Journal Of Computing in Civil Engineering*, 11(3), 184-189.
- Feng, C.W., Liu, L., Burns, S.A. (2000). Stochastic construction time-cost trade-off analysis. *Journal Of Computing in Civil Engineering*, 14(2), 117-126.

- Fondahel, J.W. (1961). A non-computer approach to the critical path method for the construction industry Technical Report, Department of Civil Engineering, The construction Institute, Stanford University.
- Iranmanesh, H., Skandari, M.R., Allahverdiloo, M. (2008). Finding pareto optimal front for the multi-mode time, cost quality trade-off in project scheduling, *International Journal of Computer and Information Engineering*, 2(2), 118-122.
- Leu, L., Burns S., & Feng C. (2005). Construction time- cost trade-off analysis using LP/IP hybrid model, *Journal Of Construction Engineering Management*, 121(4), 446-454.
- Moselhi, O. (1993). Schedule compression using the direct stiffness method, *Canadian Journal Civil Engineering*, 20(1), 65-72.
- Mungle, S., Benyoucef, L., Son, Y. J., & Tiwari, M. K. (2013). A fuzzy clustering-based genetic algorithm approach for time-cost-quality trade-off problems: A case study of highway construction project. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(8), 1953-1966.
- Pagnoni, A. (1990). Project engineering: computer oriented planning and operational decision making, Springer, Berlin.
- Patterson, J.H., Huber, D.(1974). A horizon varying, zeroone approach to project scheduling, *Management Science J.*, 20(6), 990-998.
- Simens, N. (1971). A simple CPM time cost trade off algorithm, *Management Science J.*, 17(6), 354-363.