International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2016)
June 2016, Volume 27, Number 1
pp. 25-35

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

FLOW SHOP SCHEDULING WITH LIMITED BUFFERS AND DETERIORATING JOBS IN AN UNCERTAIN ENVIRONMENT BY INTEGRATION OF FUZZY SIMULATION AND GENETIC ALGORITHM

Mostafa Jannatipour, Babak Shirazi & Iraj Mahdavi*

Mostafa Jannatipour, *MSc of Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology.*
Babak Shirazi, *Assistance Professor Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology.*
Iraj Mahdavi, *Associate Professor Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology.*

Keywords

Fuzzy simulation,
Genetic algorithm,
Just-in-time scheduling,
Flow shop,
Limited buffer,
Job deterioration

ABSTRACT

In most of the flow shop scheduling problem studies, the capacity of buffers between each two successive machines are assumed infinite. Processing times are also considered constant and deterministic. These assumptions obviously suggest a significant gap between theory and real-world production problems. In this study, the problem of flow shop scheduling with limited buffers and linear job deterioration is investigated. This problem is considered in an uncertain environment, and fuzzy theory is applied to describe this situation. For this problem, a fuzzy mixed integer nonlinear program is formulated to minimize the weighted sum of the fuzzy earliness and fuzzy tardiness penalties. To solve this model, a novel integrating approach based on fuzzy simulation and genetic algorithm is proposed. Finally, Numerical results are presented to evaluate the performance of this approach for a set of random test problems with different structures. The computational results demonstrate effectiveness of the proposed approach.

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیــــریت تولیــد

شمـــاره ۱، جلـــد ۲۷، بهار ۱۳۹۵

صفحـــــه ۳۵-۲۶

IJIE نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

زمانبندی جریان کارگاهی با فرض محدودیت بافر و زوال‌پذیری کارها در فضای عدم قطعیت با رویکرد یکپارچه شبیه‌سازی فازی و الگوریتم ژنتیک

مصطفی جنتی‌پور، بابک شیرازی و ایرج مهدوی*

کلمات کلیدی

شبیه سازی فازی،
الگوریتم ژنتیک،
زمانبندی بهنگام،
جریان کارگاهی،
بافر محدود،
زوال‌پذیری کارها

چکیده:

در اکثر مطالعات زمانبندی جریان کارگاهی، ظرفیت بافر بین ماشین‌ها، بینهایت و زمان‌های پردازش به صورت قطعی و ثابت در نظر گرفته شده، که این امر موجب تفاوت چشمگیری بین مسایل تئوریک و محیط واقعی تولید می‌گردد. در این مطالعه، مسئله‌ی زمانبندی جریان کارگاهی با فرض محدودیت بافر و امکان بلوکه شدن ماشین‌ها مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، کارها زوال‌پذیر فرض شده و زمان‌های پردازش، متغیر و تابعی خطی از زمان آغاز عملیات در نظر گرفته شده است. این مسئله در فضای عدم قطعیت بررسی شده و برای توصیف این فضا از تئوری فازی استفاده شده است. تابع هدف دو معیاره‌ی مورد نظر، کمینه سازی مجموع وزنی زودکردها و دیرکردها است، که این مسئله در دسته‌ی مسایل پیچیده‌ی تولید بهنگام جای می‌گیرد. برای این مسئله، یک مدل ریاضی غیرخطی فازی ارائه شده و برای حل آن، رویکرد یکپارچه‌ی شبیه سازی فازی و الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است. در نهایت بمنظور ارزیابی عملکرد رویکرد یکپارچه‌ی پیشنهادی، به حل مسایل نمونه عددی در اندازه‌های مختلف پرداخته شده است. کیفیت حل و زمان محاسباتی، حاکی از کارایی بسیارخوب رویکرد پیشنهادی است.

۱. مقدمه

در بسیاری از سیستم‌های تولیدی، تکمیل یک کار، نیازمند طی چندین مرحله‌ی عملیاتی به صورت متوالی است، که این سیستم‌ها اصطلاحا جریان کارگاهی (Flow Shop) نامیده می‌شوند. در این مطالعه یک سیستم جریان کارگاهی جایگشتی (permutation flow Shop) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین مفهوم که در این سیستم، هر کاری که روی ماشین اول زودتر پردازش شود، روی ماشین‌های بعدی نیز زودتر پردازش می شود.

تاریخ وصول: ۹۲/۱۰/۱۶

تاریخ تصویب: ۹۲/۱۱/۲۹

مصطفی جنتی‌پور، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، mjp_eng@ymail.com

بابک شیرازی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، shirazi_b@yahoo.com

***نویسنده مسئول مقاله: ایرج مهدوی،** دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، irajarash@rediffmail.com

به عبارت دیگر هیچ کاری مانند j وجود ندارد که پردازش آن روی ماشین اول بعد از i باشد ولی پردازش آن روی ماشین دوم و ماشین‌های پس از آن قبل از i صورت پذیرد [۱]. در بسیاری از مطالعات جریان کارگاهی، ظرفیت بافرها به صورت نامحدود فرض می‌شود. اما در شرایط واقعی تولید و در بسیاری از صنایع، ظرفیت بافرهای موجود بین ماشین‌های متوالی محدود است. پاپادیمیتریو و کنلاکیس [۲] نشان دادند که مسئله‌ی جریان کارگاهی دو ماشینه با فرض محدودیت بافر با هدف کمینه‌سازی ماکزیمم زمان تکمیل کارها، جزء مسایل NP-hard است. به همین دلیل در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان به توسعه‌ی الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مسئله پرداخته‌اند. نورمن [۳] جریان کارگاهی با فرض محدودیت بافر و زمان‌های آماده سازی وابسته به توالی را بررسی کرده است. اسموتنیکی [۴] یک الگوریتم جستجوی ممنوع جدید برای حل مسئله‌ی جریان کارگاهی دو ماشینه با فرض محدودیت بافر و با هدف کمینه سازی ماکزیمم زمان تکمیل کارها

ارائه داده است. نویکی [۵] الگوریتم جستجوی ممنوع اسموتنیکی را برای حل مسایل جریان کارگاهی با تعداد ماشین‌های دلخواه توسعه داده است. لیو و همکاران [۶] یک الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات ترکیبی برای حل مسئله‌ی جریان کارگاهی با فرض محدودیت بافر و با هدف کمینه‌سازی ماکزیمم زمان تکمیل کارها ارائه داده‌اند. در مطالعه‌ی کی‌پن و همکاران [۷]، نویسندگان یک الگوریتم جستجوی هارمونیک برای حل مسئله‌ی جریان کارگاهی با فرض بافر محدود و با هدف کمینه‌سازی ماکزیمم زمان تکمیل کارها ارائه داده‌اند.

در زمینه‌ی زمانبندی بهنگام، مطالعات نسبتا زیادی انجام گرفته است. نوعاً دو دسته ی کلی از توابع هدف در مسائل زمانبندی قابل بکارگیری است. دسته ی اول شامل توابع هدف مبتنی بر زمان تکمیل هستند، که در آن‌ها زمان مورد نیاز جهت تکمیل کارها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، در حالی که در دسته دوم، توابع هدف مبتنی بر موعد تحویل هستند، که در این دسته معیار ارزیابی یک زمانبندی، عملکرد آن زمانبندی در برآورده سازی موعد مقرر تحویل کار به مشتری است [۸]. زمانبندی بهنگام، نوعی مسئله‌ی دو معیاره با هدف کمینه‌سازی مجموع وزنی زودکردها و دیرکردها است. بیکر و اسکودر [۹] اولین تحلیل و آنالیز را بر روی مسایل زودکرد/دیرکرد انجام داده‌اند. مطالعات اخیر بر روی این موضوع توسط محققانی چون لاوف و ورنر [۱۰] به چاپ رسیده است. تعداد زیادی از مطالعات زودکرد/دیرکرد در مسایل تک ماشینه بررسی شده و در محیط جریان کارگاهی بسیار کمتر به آن پرداخته شده است. راژندران و الیکه [۱۱] تعدادی قاعده‌ی روانه کردن کارها بر روی ماشین‌ها با هدف مینیمم کردن مجموع زودکردها و دیرکردها در محیط جریان کارگاهی با ماشین‌های گلوگاهی ارائه کرده‌اند. شابتای [۱۲] ماکزیمم سازی تعداد قطعات تولید شده‌ی به موقع در محیط جریان کارگاهی را مورد کنکاش قرار داده است.

در بسیاری از مطالعات، زمان پردازش قطعات به صورت ثابت و بدون تغییر فرض می‌شود. در صورتی که در شرایط واقعی اینچنین نیست. در برخی از شرایط تولیدی، زمان پردازش قطعه‌ای که بیشتر در انتظار بماند، بیش از زمان پردازش قطعه‌ای است که کمتر در صف انتظار مانده باشد. به این پدیده، زوال پذیری گفته می‌شود. فرایند نورد داغ ورقه‌های فولادی مثال خوبی در این زمینه می‌تواند باشد. هرچه ورقه‌ی فولادی داغ، بیشتر در انتظار پردازش بماند، دمای آن پایین‌تر آمده و در مرحله‌ی بعد، زمان بیشتری باید صرف عملیات نورد شود. در این مطالعه، کارها به صورت زوال پذیر فرض شده و زمان‌های پردازش به صورت تابعی خطی از زمان آغاز عملیات فرض شده است. این موضوع اولین بار توسط گوپتا و گوپتا [۱۳] مطرح شده است. آن‌ها مسئله‌ی تک ماشینه با فرض زوال پذیری کارها را بررسی کرده اند. وو و لی [۱۴] مسئله‌ی تک ماشینه با فرض زمانبندی گروهی و با هدف کمینه سازی ماکزیمم زمان تکمیل کارها را مورد کنکاش قرار داده‌اند. اکثر مطالعات زمانبندی با فرض زوال پذیری کارها در حوزه‌ی تک ماشینه صورت گرفته است. از جمله‌ی جدیدترین این کارها می‌توان به وانگ و همکاران [۱۵]، و ژائو و همکاران [۱۶] اشاره کرد. در رابطه با مسایل زمانبندی جریان کارگاهی با فرض زوال پذیری کارها مطالعات نسبتا کمی صورت گرفته است. وو و لی [۱۷]، جریان کارگاهی دو ماشینه با فرض زوال پذیری خطی را با هدف کمینه سازی میانگین زمان تکمیل کارها مورد بررسی قرار داده اند. وانگ [۱۸]، به مطالعه‌ی جریان کارگاهی چندماشینه، بدون توقف و بدون بیکاری ماشین‌ها پرداخته است. هدف وی، کمینه‌سازی ماکزیمم زمان تکمیل کارها بوده است. لی و همکاران [۱۹] مسئله‌ی جریان کارگاهی دو ماشینه با فرض زوال‌پذیری خطی را با هدف کمینه سازی ماکزیمم زمان تکمیل کارها مورد مطالعه و بررسی قرار داده اند.

به عنوان دو مورد از جدیدترین مطالعات در این زمینه می‌توان به وانگ و همکاران [۲۰] و یانگ و وانگ [۲۱] اشاره کرد. این دو مطالعه به ترتیب به جریان کارگاهی سه ماشینه با هدف کمینه سازی ماکزیمم زمان تکمیل کارها و جریان کارگاهی دو ماشینه با هدف کمینه سازی مجموع وزنی زمان تکمیل کارها پرداخته اند.

بانک و همکاران [۲۲] به حل مسئله‌ی جریان کارگاهی دو ماشینه با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان‌های دیرکرد پرداخته‌اند. سون و همکاران [۲۳] مطالعه‌ی خود را به بررسی جریان کارگاهی چند ماشینه، بدون توقف و بدون بیکاری ماشین‌ها اختصاص داده اند.

همان طور که مشاهده می‌شود، تقریبا در تمامی مطالعات جریان کارگاهی با فرض زوال پذیری کارها، صحبتی از محدودیت بافر و بلوکه شدن ماشین‌ها به میان نیامده است. لی و همکاران [۲۴] جریان کارگاهی دو ماشینه با فرض زوال پذیری خطی کارها و بلوکه شدن ماشین‌ها را با هدف کمینه سازی ماکزیمم زمان تکمیل کارها مورد بررسی قرار داده‌اند.

در فضای واقعی تولید، بسیاری از مسایل با عدم قطعیت روبه رو است. برای حل این گونه مسایل، دو رویکرد عمده اتخاذ می‌گردد: رویکرد احتمالی و رویکرد فازی. اگر داده‌های آماری معتبر به اندازه‌ی کافی در دسترس باشد، به طوری که بتوان توزیع‌های آماری نسبتا دقیقی با توجه به آن‌ها به دست آورد، از رویکرد احتمالی برای برخورد با شرایط عدم قطعیت استفاده می‌شود. اما در بسیاری از مواقع، امکان دسترسی به داده‌های آماری کافی و معتبر وجود ندارد. در این شرایط، به جای تئوری احتمال، از تئوری امکان و نظریه‌ی فازی بهره گرفته می‌شود. در این مطالعه، برای توصیف زمان‌های پردازش، تکمیل و تحویل در فضای عدم قطعیت، اعداد و محاسبات فازی بکار گرفته می‌شود.

مسایل زمانبندی با داده‌های فازی در مطالعات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. مسئله زمانبندی با زمان‌های تحویل فازی برای اولین بار توسط ایشی و همکاران [۲۵] مطرح گشته است. در مطالعه‌ی ایشیبوچی و همکاران [۲۶]، به حل مسایل زمانبندی فازی

با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی ممنوع و شبیه‌سازی تبرید، پرداخته شده است. چنگ و همکاران [۲۷] با بکارگیری روش شاخه و حد به حل مسایل زمانبندی فازی پرداخته‌اند. جنگ و زو [۲۸] به حل مسئله‌ی تک ماشینه و جریان کارگاهی در محیط فازی پرداخته‌اند. سوفن و همکاران [۲۹] به بررسی جریان کارگاهی با هدف کمینه سازی مجموع وزنی زودکردها و دیرکردها در فضای عدم قطعیت پرداخته اند. نویسندگان برای توصیف این فضا از تئوری فازی استفاده کرده‌اند. ییمر و دمیرلی [۳۰] به بررسی مسئله‌ی جریان کارگاهی دو مرحله‌ای با استفاده از تکنولوژی گروهی در محیط فازی پرداخته‌اند. لای و وو [۳۱] مسئله‌ی جریان کارگاهی در محیط فازی را مورد بررسی قرار داده اند.

در این مسئله، زمان‌های پردازش و تحویل، فازی بوده و دو تابع هدف به صورت جداگانه مورد نظر قرار گرفته است؛ کمینه کردن ماکزیمم زمان تکمیل کارها و کمینه کردن مجموع زمان تکمیل کارها. در این مطالعه، برای محاسبه‌ی زمان‌های تکمیل فازی از نظریه‌ی امکان، التزام و اعتبار فازی استفاده شده است. وو [۳۲]، حل مسئله زودکرد/دیرکرد فازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک را مورد مطالعه قرار داده‌است.

در رابطه با مسایل زمانبندی در فضای عدم قطعیت، تحقیقات بسیار معدودی در زمینه یکپارچه سازی شبیه سازی فازی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک به چشم می‌خورد. در هونگ ژانگ و همکاران [۳۳]، نویسندگان، زمانبندی فعالیت‌های غیر قطعی را با استفاده از اعداد فازی و شبیه سازی فازی مورد بررسی قرار داده‌اند. در مطالعه‌ی پنتل و همکاران [۳۴] یک الگوریتم دو مرحله‌ای بر پایه الگوریتم ژنتیک و شبیه سازی فازی برای حل مساله زمانبندی دسته‌ای پیشنهاد شده است.

با توجه به ادبیات، می‌توان ملاحظه نمود که در زمینه زمانبندی دو معیاره‌ی بهنگام در محیط جریان کارگاهی با فرض محدودیت بافر و زوال پذیری کارها و بررسی آن در فضای عدم قطعیت، مطالعه‌ای صورت نگرفته است. به همین جهت در تحقیق پیش رو ، این مسئله مورد توجه قرار گرفته و علاوه بر مدلسازی ریاضی آن، رویکرد یکپارچه‌ی شبیه‌سازی فازی و الگوریتم ژنتیک جهت حل آن ارائه شده است.

پیکربندی این مطالعه به صورت زیر است: در بخش دوم، مساله‌ی مورد نظر به طور کامل تشریح شده و مدل ریاضی آن بیان خواهد شد. در بخش سوم به ارائه‌ی اعداد و روابط فازی مورد نیاز پرداخته خواهد شد. بخش چهارم به تشریح رویکرد یکپارچه‌ی شبیه سازی فازی و الگوریتم ژنتیک اختصاص خواهد یافت. در بخش پنجم به تولید و حل مسایل نمونه عددی تصادفی پرداخته خواهد شد. نهایتا در بخش ششم، جمع بندی و نتیجه گیری ارائه خواهد شد.

۲. تعریف و مدلسازی مسئله

در این قسمت، ابتدا به تعریف مسئله و سپس به تشریح مدل ریاضی مسئله پرداخته می‌شود.

۲-۱. تعریف مسئله

مسئله‌ی مورد نظر در این مطالعه، کمینه‌سازی مجموع وزنی زودکردها و دیرکردهای فازی در محیط جریان کارگاهی است. در این محیط m ماشین و n کار موجود است. ظرفیت بافر بین ماشین‌های متوالی، محدود بوده و امکان بلوکه شدن ماشین‌ها وجود دارد. کارها زوال‌پذیر بوده و زمان‌های پردازش به صورت متغیر و تابعی خطی از زمان آغاز عملیات فرض شده است. علاوه بر آن، زمان‌های پردازش و تحویل، غیرقطعی بوده و به صورت اعداد فازی در نظر گرفته شده‌اند. قطع عملیات و بیکاری ماشین‌ها مجاز نیست. جریان کارگاهی مورد نظر به صورت جایگشتی بوده و توالی کارها بر روی تمام ماشین‌ها ثابت می‌ماند. تمامی‌قطعات و ماشین‌ها در زمان صفر در کارگاه موجود و قابل دسترسی بوده و خرابی ماشین‌ها نادیده گرفته می‌شود.

۲-۲. مدل ریاضی

به منظور مدلسازی مسئله، نمادهای زیر تعریف می‌شود:

اندیس‌ها

i اندیس ماشین $i=1,2,3,\ldots,m$

j اندیس کار $j=1,2,3,\ldots,n$

k اندیس جایگاه کار در توالی $k=1,2,3,\ldots,n$

پارامترها

n تعداد کارها

m تعداد ماشین‌های جریان کارگاهی

ω_j جریمه‌ی زودکرد کار j

μ_j جریمه‌ی دیرکرد کار j

λ_j نرخ زوال پذیری کار j

$\tilde{p}_{i,j}$ زمان پردازش فازی کار j بر روی ماشین i

$\tilde{d}_j$ زمان تحویل فازی کار j

B_i ظرفیت بافر بین دو ماشین متوالی i و $i+1$

متغیرهای تصمیم

$\tilde{C}_{i,k}$ زمان تکمیل فازی کار نوبت kام بر روی ماشین i

$\tilde{C}_j$ زمان تکمیل نهایی فازی کار j

$\tilde{E}_j$ زودکرد فازی کار j

$\tilde{T}_j$ دیرکرد فازی کار j

x_{jk} اگر کار j به جایگاه kام توالی اختصاص یابد، ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

مدل ریاضی پیشنهادی به شکل زیر ارائه می‌شود:

$$\min \quad z=\sum_{j=1}^{n}(\omega_j \tilde{E}_j+\mu_j \tilde{T}_j) \tag{۱}$$

S.t.

$$\sum_{k=1}^{n} x_{jk}=1 \qquad \forall j \tag{۲}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jk}=1 \qquad \forall k \tag{۳}$$

$$\tilde{C}_{1,1}=\sum_{j=1}^{n}\tilde{p}_{1,j}.x_{j1} \tag{۴}$$

$$\tilde{C}_{i,1}=\tilde{C}_{i-1,1}+\sum_{j=1}^{n}\tilde{p}_{i,j}.x_{j1} \qquad i=2,3,\ldots,m \tag{۵}$$

$$\tilde{C}_{1,k}=\tilde{C}_{1,k-1}+\sum_{j=1}^{n}(\tilde{p}_{1,j}.x_{jk}) \qquad k=2,3,\ldots,B_1+1 \tag{۶}$$

$$\tilde{C}_{1,k}=\sum_{j=1}^{n}(\max(\tilde{C}_{1,k-1}+\tilde{p}_{1,j},\tilde{C}_{2,k-B_1-1}).x_{jk}) \qquad k>B_1+1 \tag{۷}$$

$$\tilde{C}_{i,k}=\sum_{j=1}^{n}((\max(\tilde{C}_{i,k-1},\tilde{C}_{i-1,k})(1+\lambda_j)+\tilde{p}_{i,j}).x_{jk}) \qquad i=2,3,\ldots,m-1,\ k=2,3,\ldots,B_i+1 \tag{۸}$$

$$\tilde{C}_{i,k}=\sum_{j=1}^{n}(\max(\max(\tilde{C}_{i,k-1},\tilde{C}_{i-1,k})(1+\lambda_j)+\tilde{p}_{i,j},\tilde{C}_{i+1,k-B_i-1}).x_{jk}) \qquad i=2,3,\ldots,m-1,\ k>B_i+1 \tag{۹}$$

$$\tilde{C}_{m,k}=\sum_{j=1}^{n}((\max(\tilde{C}_{m,k-1},\tilde{C}_{m-1,k})(1+\lambda_j)+\tilde{p}_{m,j}).x_{jk}) \qquad k=2,3,\ldots,n \tag{۱۰}$$

$$\tilde{C}_j=\sum_{k=1}^{n}(\tilde{C}_{m,k}.x_{jk}) \qquad j=1,2,\ldots,n \tag{۱۱}$$

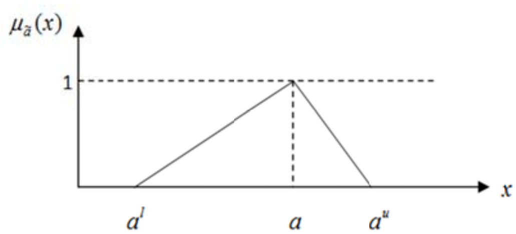
$$\tilde{E}_j=\max\{0,\tilde{d}_j-\tilde{C}_j\} \qquad j=1,2,\ldots,n \tag{۱۲}$$

$$\tilde{T}_j=\max\{0,\tilde{C}_j-\tilde{d}_j\} \qquad j=1,2,\ldots,n \tag{۱۳}$$

$$x_{jk}\in\{0,1\} \qquad \forall j,k \tag{۱۴}$$

رابطه‌ی (۱) تابع هدف را مشخص می‌کند که مجموع وزنی زودکردها و دیرکردهای فازی است. محدودیت‌های (۲) و(۳) به ترتیب نشان دهنده‌ی این است که هر کار دقیقا در یکی از جایگاه‌های توالی و در هر یک از جایگاه‌های توالی دقیقا یک کار قرار می‌گیرد. محدودیت‌های (۴) و (۵) به ترتیب، زمان تکمیل فازی کار اول بر روی ماشین اول و ماشین iام را محاسبه می‌کند. محدودیت‌های (۶) و (۷) زمان تکمیل فازی کار نوبت kام بر روی ماشین اول را با توجه به ظرفیت بافر محاسبه می‌کند. در محدودیت‌های (۸) و (۹) زمان تکمیل فازی کار نوبت kام بر روی ماشین iام با توجه به ظرفیت بافر، نرخ زوال پذیری و زمان آغاز عملیات محاسبه می‌شود. در اینجا این نکته قابل ذکر است که میزان زوال پذیری هر کار با توجه به زمان شروع عملیات (میزان زمان انتظار برای پردازش) بر روی آن مشخص می‌شود. به بیان دیگر، زمان پردازش هر کار بر روی ماشین بعدی، تابعی خطی از زمان شروع عملیات آن بر روی آن ماشین است:

(زمان شروع پردازش) $\tilde{p}_{i,j}+\lambda_j$ = زمان پردازش قطعه کاملا واضح است که هرچه زمان شروع عملیات بر روی قطعه دیرتر باشد، زمان پردازش قطعه افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، هرچه زمان انتظار قطعه برای شروع عملیات بیشتر باشد، زمان پردازش آن افزایش می‌یابد. در محدودیت‌های (۴)، (۵)، (۶) و (۷)، چون کارها برای شروع پردازش، در صف انتظار قرار نمی‌گیرند، نرخ زوال پذیری در نظر گرفته نشده است. محدودیت (۱۰) زمان تکمیل فازی کار نوبت kام بر روی ماشین آخر را با توجه به نرخ زوال پذیری و زمان آغاز عملیات محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۱) زمان تکمیل فازی نهایی کار j را پس از پشت سر گذاشتن تمامی مراحل جریان کارگاهی محاسبه می‌کند. در محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب، مقادیر زودکرد فازی و دیرکرد فازی هر کار محاسبه می‌شود. و در نهایت محدودیت (۱۴) نشان دهنده‌ی باینری بودن متغیر x_{jk} است.



شکل ۱. عدد فازی مثلثی

۳. مروری بر اعداد و روابط فازی

در این مطالعه، برای توصیف فضای عدم قطعیت، زمان‌های پردازش و تحویل قطعات، به صورت اعداد فازی در نظر گرفته می‌شوند. برای پیش‌بری زمان و محاسبه‌ی زمان‌های تکمیل در محیط فازی باید از روش‌های رتبه بندی فازی استفاده نمود. در این بخش، ابتدا به تعریف اعداد فازی و سپس به تشریح رتبه بندی این اعداد برای استفاده در شبیه سازی فازی پرداخته می‌شود.

۳-۱. اعداد فازی

زیرمجموعه‌ی فازی $\tilde{a}$ of R با استفاده از تابع $\mu_{\tilde{a}}:R\rightarrow[0,1]$ تعریف شده که به تابع عضویت معروف است . مجموعه $\tilde{a}$ $\alpha-level$ به صورت $\tilde{a}_\alpha=\{x\in R:\mu_{\tilde{a}}(x)>=\alpha\}$ و سطح صفر به صورت $\tilde{a}_0=\{x\in R:\mu_{\tilde{a}}(x)>=0\}$ تعریف

می‌گردد. اگر $\tilde{a}$ of R یک عدد فازی باشد ، $\alpha-level$ آن به صورت $\tilde{a}_\alpha=[\tilde{a}^l_\alpha,\tilde{a}^u_\alpha]$ نوشته می‌شود.

قضیه ۳-۱-۱. اگر $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$ دو عدد فازی باشند، روابط زیر را داریم:

$$(\tilde{a}\oplus\tilde{b})_\alpha=[\tilde{a}^l_\alpha+\tilde{b}^l_\alpha,\tilde{a}^u_\alpha+\tilde{b}^u_\alpha]$$

$$(\tilde{a}\Theta\tilde{b})_\alpha=[\tilde{a}^l_\alpha-\tilde{b}^u_\alpha,\tilde{a}^u_\alpha-\tilde{b}^l_\alpha]$$

$$(\widetilde{\max}\{\tilde{a},\tilde{b}\})_\alpha=[\max\{\tilde{a}^l_\alpha,\tilde{b}^l_\alpha\},\max\{\tilde{a}^u_\alpha,\tilde{b}^u_\alpha\}]$$

یکی از پرکاربردترین اعداد فازی ، عدد فازی مثلثی است که به صورت $\tilde{a}=(a^l,a,a^u)$ نمایش داده شده (شکل ۱) و تابع عضویت آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{\tilde{a}}(r)=\begin{cases}(x-a^l)/(a-a^l) & if a^l\le x\le a\\(a^u-x)/(a^u-a) & if a<x<a^u\\0 & otherwise\end{cases}$$

مجموعه $\alpha-level$ عدد فازی مثلثی به صورت زیر است:

$$\tilde{a}_\alpha=[(1-\alpha)a^l+\alpha a,(1-\alpha)a^u+\alpha a]$$

همچنین می‌توان جمع بین دو عدد فازی مثلثی را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\tilde{a}\oplus\tilde{b}=(a^l,a,a^u)\oplus(b^l,b,b^u)$$

$$=(a^l+b^l,a+b,a^u+b^u)$$

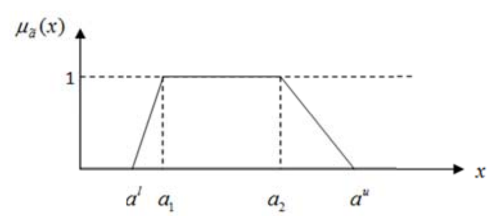
یکی دیگر از اعداد فازی پرکاربرد ، عدد فازی ذوزنقه‌ای است، که به صورت $\tilde{a}=(a^l,a_1,a_2,a^u)$ نمایش داده شده (شکل۲) و تابع عضویت آن به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mu_{\tilde{a}}(x)=\begin{cases}(x-a^l)/(a_1-a^l) & if a^l\le x\le a_1\\1 & if a_1<x\le a_2\\(a^u-x)/(a^u-a_2) & if a_2<x\le a^u\\0 & otherwise\end{cases}$$

مجموعه $\alpha-level$ عدد فازی ذوزنقه ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{a}_\alpha=[(1-\alpha)a^l+\alpha a_1,(1-\alpha)a^u+\alpha a_2]$$

در این مطالعه، زمان‌های پردازش به صورت عدد فازی مثلثی $\tilde{p}_{ij}=(p^L_{ij},p_{ij},p^U_{ij})$ و زمان‌های تحویل به صورت عدد فازی ذوزنقه‌ای $d_j=(d^L_j,d_{j1},d_{j2},d^U_j)$ در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۲. عدد فازی ذورنقه‌ای

۳-۲. رتبه بندی اعداد فازی

پیش‌بری زمان و محاسبه‌ی زمان‌های تکمیل در شبیه‌سازی فازی، نیازمند مقایسه و رتبه بندی اعداد فازی است. اگر اعداد فازی مورد نظر همپوشانی داشته باشند (شکل ۳)، این کار مشکل‌تر خواهد شد. در این مطالعه از روش رتبه‌بندی‌ترن و دوزکستین [۳۵] استفاده می‌شود. در این روش یک مرز ماکزیمم و یک مرز مینیمم به صورت (۱۵) و (۱۶) تعریف شده و مقایسه اعداد فازی با توجه به فاصله آن‌ها از این مرزها صورت می‌گیرد.

$$Min\le\inf(\bigcup_{i=1}^{I}s(a_i)) \qquad (۱۵)$$

$$Max\le\sup(\bigcup_{i=1}^{I}s(a_i)) \qquad (۱۶)$$

که $s(a_i)$ قوت اعداد فازیa_i $(i=1,\dots,I)$ است. برای محاسبه فاصله اعداد فازی از نقاط ماکزیمم و مینیمم روابط زیر تعریف می‌گردد:

$$D^2(A,M)=(\frac{a_2+a_3}{2}-M)^2+\frac{1}{2}(\frac{a_2+a_3}{2}-M)$$

$$[(a_4-a_3)-(a_2-a_1)]+\frac{1}{3}(\frac{a_3-a_2}{2})^2$$

$$+\frac{1}{6}(\frac{a_3-a_2}{2})[(a_4-a_3)+(a_2-a_1)]$$

$$+\frac{1}{9}[(a_4-a_3)^2+(a_2-a_1)^2]-\frac{1}{9}[(a_4-a_3)(a_2-a_1)]$$

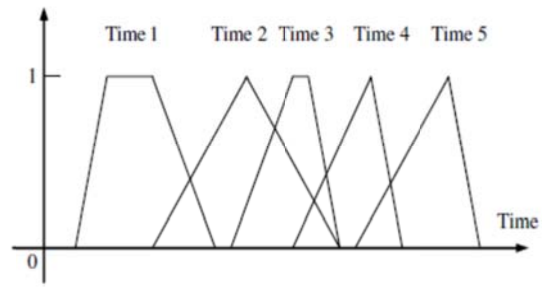
$$D_{\min}=\sqrt{D^2(A,Min)}$$

$$D_{\max}=\sqrt{D^2(A,Max)}$$

که a_1,a_2,a_3,a_4 چهار پارامتر معرف عدد فازی ذوزنقه‌ای A است. اگر در روابط فوق $a_2=a_3$ باشد، آن‌گاه این روابط را برای اعداد فازی مثلثی نیز می‌توان به کار برد.

M هم می‌تواند مرز ماکزیمم و هم مینیمم باشد. D_{max} فاصله از مرز ماکزیمم و D_{min} فاصله از مرز مینیمم است.

برای رتبه بندی و مقایسه اعداد فازی، ابتدا D_{min} محاسبه می‌گردد. عددی که D_{min} کوچکتر داشته باشد، کوچکتر و عددی که D_{min} بزرگتر داشته باشد، بزرگتر خواهد بود. در صورت تساوی D_{min} دو عدد، D_{max} محاسبه می‌شود. بر خلاف D_{min}، عددی که D_{max} کوچکتر داشته باشد، بزرگتر و عددی که D_{max} بزرگتر داشته باشد، کوچکتر خواهد بود. در صورتی که D_{max} نیز برای دو عدد برابر باشد، دو عدد فازی مساوی فرض خواهند شد.



شکل ۳. همپوشانی اعداد فازی

۴. یکپارچه‌سازی شبیه سازی فازی و الگوریتم ژنتیک

با توجه به پیچیدگی بالای مسئله و زمان بسیار طولانی حل آن توسط نرم افزارهای حل دقیق، ناگزیر به استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه هستیم. الگوریتم ژنتیک با الهام از قوانین تکامل، یکی از ابزارهای قدرتمند جستجو بشمار می‌رود. از مهمترین گام‌ها در بکارگیری این الگوریتم، شناسایی اجزای آن در ارتباط با مساله ی مورد بررسی است [۳۶]. در این بخش، گام‌های یکپارچه‌سازی شبیه‌سازی فازی و الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله شرح داده می‌شود. منظور از یکپارچه‌سازی، بکارگیری تمام محاسبات، روابط و مقایسات فازی در الگوریتم ژنتیک است. به بیانی دیگر، تابع برازش در الگوریتم ژنتیک با رویکرد شبیه‌سازی فازی محاسبه می‌شود. گام‌های الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر است:

گام ۱: تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی:

هدف حل مسئله‌ی دو معیاره‌ی تولید بهنگام، یافتن بهترین توالی انجام کارها برای رسیدن به کمترین مجموع وزنی زودکردها و دیرکردهای فازی است. در اولین گام از حل مسئله، توالی‌ها به صورت کروموزوم درآمده تا بتوان آن‌ها را در الگوریتم ژنتیک به کار گرفت. با توجه به تعداد کارها، تعدادی توالی به صورت تصادفی به عنوان جمعیت اولیه کروموزوم‌ها تولید می‌شود (شکل ۴).

۴	۷	۸	۱	۲	۶	۳	۵

شکل ۴. نمونه ای از یک کروموزوم

گام ۲: محاسبه تابع برازندگی کروموزوم‌ها با رویکرد شبیه‌سازی فازی:

پس از تولید کروموزوم‌ها، تابع برازندگی آن‌ها باید محاسبه شود. در مسئله‌ی زمانبندی جریان کارگاهی و با توجه به مدل ارائه شده، زمان تکمیل هر کار پس از گذراندن تمامی ایستگاه‌ها محاسبه می‌شود. با توجه به فازی بودن زمان‌های پردازش، باید از رتبه بندی و مقایسات فازی و پیش‌بری زمان به صورت فازی بهره گرفت و بدین‌ترتیب، مراحل انجام کارها در جریان کارگاهی که در قالب پیشامدهایی گسسته رخ می‌دهد را شبیه‌سازی نموده و زمان‌های تکمیل فازی را به دست آورد. این رویکرد به عنوان شبیه سازی فازی شناخته می‌شود. در این نوع شبیه‌سازی بر خلاف شبیه‌سازی احتمالی کلاسیک، نیازی به تکرارهای متعدد نیست، بلکه فقط با یک تکرار، زمان نهایی کل فرایند به صورت یک عدد فازی، محاسبه و ثبت می‌گردد. پس از محاسبه‌ی زمان تکمیل کارها، نوبت به محاسبه‌ی زمان‌های زودکرد و دیرکرد فازی می‌رسد که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\tilde{E}_j = \tilde{\max}\{\tilde{0}, \tilde{d}_j \Theta \tilde{C}_j\}, \tilde{T}_j = \tilde{\max}\{\tilde{0}, \tilde{C}_j \Theta \tilde{d}_j\}$$

با توجه به زمان‌های پردازش مثلثی، زمان‌های تکمیل نیز به صورت اعداد فازی مثلثی $\tilde{C}_j = (C_j^L, C_j, C_j^U)$ در خواهند آمد. برای محاسبه‌ی زودکردها و دیرکردهای فازی، $\alpha - level$ های اعداد مثلثی و ذوزنقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت، بمنظور یافتن بهترین توالی، مجموع جریمه‌های زودکرد و دیرکرد، فازی‌زدایی شده و به صورت عددی حقیقی در می‌آید. به همین منظور از روش فازی زدایی انتگرالی (۱۷) استفاده می‌شود:

$$\eta(\tilde{a}) = \frac{1}{2}\int_0^1 (\tilde{a}_\alpha^L + \tilde{a}_\alpha^U) d\alpha \qquad (۱۷)$$

در این رابطه به جای $\tilde{a}$، تابع هدف مسئله که به صورت زیر است قرار می‌گیرد:

$$\tilde{f}(\pi) \quad = \sum_{j=1}^{n} (\omega_j \tilde{E}_j + \mu_j \tilde{T}_j)$$

که در آن π یک توالی مشخص است. روابط زیر را داریم:

$$\tilde{f}_\alpha(\pi) = [(\tilde{f}(\pi))_\alpha^L, (\tilde{f}(\pi))_\alpha^U] \equiv [\tilde{f}_\alpha^L(\pi), \tilde{f}_\alpha^U(\pi)]$$
$$= [\sum_{i=1}^{n} (\omega_j . \tilde{E}_{j\alpha}^L + \mu_j . \tilde{T}_{j\alpha}^L), \sum_{i=1}^{n} (\omega_j . \tilde{E}_{j\alpha}^U + \mu_j . \tilde{T}_{j\alpha}^U)],$$

بنابر این:

$$\eta(\tilde{f}(\pi)) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} [\omega_j (\int_0^1 \max\{0, \tilde{d}_{j\alpha}^L - \tilde{C}_{j\alpha}^U\} d\alpha$$
$$+ \int_0^1 \max\{0, \tilde{d}_{j\alpha}^U - \tilde{C}_{j\alpha}^L\} d\alpha) + \mu_j (\int_0^1 \max\{0, \tilde{C}_{j\alpha}^L - \tilde{d}_{j\alpha}^U\} d\alpha$$
$$+ \int_0^1 \max\{0, \tilde{C}_{j\alpha}^U - \tilde{d}_{j\alpha}^L\} d\alpha)] \equiv \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} (\omega_j h_j + \mu_j u_j).$$

اگر به صورت شماتیک، زمان‌های تکمیل و تحویل به صورت مثلث و ذوزنقه فرض شوند، این مثلث و ذوزنقه به پنج حالت مختلف می‌توانند با هم برخورد و همپوشانی داشته باشند، (شکل ۵) و در این پنج حالت، h_j، u_j و مجموع وزنی آن‌ها محاسبه می‌شود [32]. به طور خلاصه داریم:

حالت ۱ ($C_j^U \le d_j^L$):

$$\omega_j h_j + \mu_j u_j = \frac{1}{2}\omega_j (d_j^L + d_{j1} + d_{j2} + d_j^U - C_j^L - 2C_j - C_j^U)$$

حالت ۲ ($C_j^U \ge d_j^L$ **و** $C_j \le d_{j1}$):

$$\omega_j h_j + \mu_j u_j = \frac{1}{2}\omega_j (d_j^L + d_{j1} + d_{j2} + d_j^U - C_j^L - 2C_j - C_j^U)$$
$$+ \frac{1}{2}(\omega_j + \mu_j)\frac{(C_j^U - d_j^L)^2}{C_j^U - C_j + d_{j1} - d_j^L}$$

حالت ۳ ($d_{j1} \le C_j \le d_{j2}$):

$$\omega_j h_j + \mu_j u_j = \frac{1}{2}\omega_j (d_j^U + d_{j2} - C_j^L - C_j) + \frac{1}{2}\mu_j (C_j^U + C_j - d_j^L - d_{j1})$$

حالت ۴ ($C_j \ge d_{j2}$ **و** $C_j^L \le d_j^U$):

$$\omega_j h_j + \mu_j u_j = \frac{1}{2}\mu_j (C_j^L + 2C_j + C_j^U - d_j^L - d_{j1} - d_{j2} - d_j^U)$$
$$+ \frac{1}{2}(\omega_j + \mu_j)\frac{(d_j^U - C_j^L)^2}{C_j - C_j^L + d_j^U - d_{j2}}$$

حالت ۵ ($d_j^U \le C_j^L$):

$$\omega_j h_j + \mu_j u_j = \frac{1}{2}\mu_j (C_j^L + 2C_j + C_j^U - d_j^L - d_{j1} - d_{j2} - d_j^U)$$

در نهایت، مقدار حقیقی تابع هدف با توجه به رابطه ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta(\tilde{f}(\pi)) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\omega_j h_j + \mu_j u_j$$

سپس مقدار برازندگی هر کروموزوم بر اساس رابطه (۱۸) محاسـبه شده و هدف الگوریتم، یافتن مقدار ماکزیمم آن است:

$$fitness = \frac{1}{1 + \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}\omega_j h_j + \mu_j u_j} \qquad (۱۸)$$

گام ۳: انتخاب از بین کروموزوم‌ها

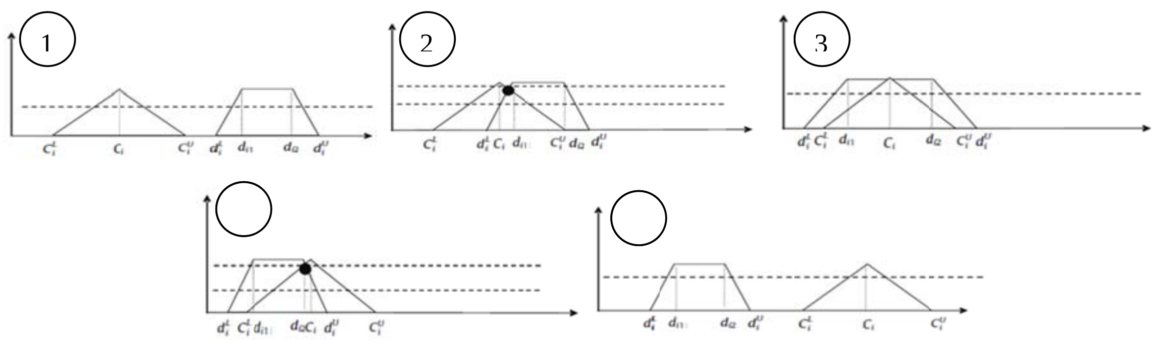
پس از محاسبه‌ی تابع برازنـدگی کرومـوزوم‌هـا، نوبـت بـه انتخـاب کروموزوم‌های والد برای تولید نسل بعد می‌رسد. در ایـن مرحلـه از تکنیک چرخ رولت استفاده می‌شود. در این روش، کروموزوم‌های بـا مقدار برازندگی بالاتر، شانس بیشتری برای انتخاب شدن به عنـوان والد دارند.

گام ۴: استفاده از عملگرهای تقاطع، جهش و نخبه‌گزینی

پس از انتخاب کروموزوم‌های والد، با استفاده از عملگرهای تقـاطع، جهش و نخبه‌گزینی، کروموزوم‌های نسل جدید تولید مـی‌شـود. در این مطالعه، از دو نوع عملگر تقاطع تک نقطه‌ای و مکـان‌محـور بـه صورت همزمان و از جهش جابجایی استفاده شده است.

گام ۵: تکرار مجدد الگوریتم

پس از تولید شدن نسل جدید کروموزوم‌هـا، مراحـل فـوق بـر روی آن‌ها تکرار می‌گردد. پس از تعداد تکرارهای مشخص، الگـوریتم بـه سمت نقطه‌ی بهینه و یا نزدیک به بهینه همگرا می‌شود.



شکل ۵. برخورد و همپوشانی اعداد فازی مثلثی و ذوزنقه ای

۵. مسایل نمونه‌ی عددی و نتایج

در این بخش، ابتدا به چگونگی تولید مسایل نمونه عددی و سـپس به حل برخی از آن‌ها با روش دقیق و رویکرد یکپارچه‌ی پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۵-۱. تولید مسایل نمونه عددی

برای تولیـد زمـان‌هـای پـردازش بـه صـورت اعـداد فـازی مثلثـی $\tilde{p}_{ij} = (p_{ij}^L, p_{ij}, p_{ij}^U)$ به صورت زیر عمل می‌شود:

$$p_{ij} \sim U[1,10],\ p_{ij}^L = 0.8 * p_{ij},\ p_{ij}^U = 1.2 * p_{ij}$$

زمان‌های تحویل نیز که به صورت اعداد فازی ذوزنقه ای $d_j = (d_j^L, d_{j1}, d_{j2}, d_j^U)$ هسـتند، بـه صـورت زیـر تولیـد می‌شوند:

$$d_{j2} = (1 + rand * (m-1)) * P_j$$

که در آن، m تعداد ماشین‌ها و rand و P_j به صورت زیر است:

$$rand \sim U[0,1],\ P_j = \sum_{i=1}^{m} p_{ij} \quad j = 1,3,...,n$$

و همچنین داریم:

$$d_j^L = 0.6 * d_{j2},\ d_{j1} = 0.8 * d_{j2},\ d_j^U = 1.2 * d_{j2}$$

جریمه‌های زودکرد و دیرکرد طبق توزیع گسسته یکنواخت [1,10] و نرخ زوال پذیری کارها با استفاده از توزیـع تصـادفی $U[0,0.1]$ تولید می‌شود.

۵-۲. مسایل نمونه عددی

در این قسمت، ابتدا به بررسی کامل یک مسئله با اندازه‌ی کوچـک وسپس به حل و بررسـی چنـدین مسـئله‌ی نمونـه بـا انـدازه‌هـای

مختلف پرداخته می‌شود. کدنویسی وپیاده‌سازی رویکرد یکپارچه‌ی شبیه‌سازی فازی و الگوریتم ژنتیک در نرم افزار MATLAB 7.6(R2008a) صورت پذیرفته است. به منظور ارزیابی این رویکرد، محاسبات فازی مدل در نرم افزار Lingo ۹ نیز نوشته شده، که البته با توجه به پیچیدگی بسیار بالای مسئله، فقط برای مسایل با اندازه‌ی کوچک کاربرد دارد.

به عنوان یک مسئله‌ی نمونه‌ی کوچک، یک جریان کارگاهی سه ماشینه با پنج کار بررسی می‌شود. ظرفیت بافر بین تمام ماشین‌های متوالی به صورت یکسان و برابر با ۱ فرض شده است. سایر اطلاعات مسئله در جدول (۱) و نتایج نهایی حل آن در جدول (۲) به نمایش درآمده است. در این جدول، زمان تکمیل نهایی فازی، حالت بهینه‌ی همپوشانی فازی زمان تکمیل و تحویل، مقدار بهینه‌ی مجموع وزنی زودکرد و دیرکرد و جایگاه در توالی بهینه برای هر کار مشخص شده است. با توجه به جدول (۲) توالی بهینه‌ی این مسئله به صورت (1,3,2,5,4) و مقدار بهینه‌ی حقیقی تابع هدف دومعیاره برابر با ۶۷۹.۰۵ است.

در جدول (۳)، نتایج حل مسایل عددی در اندازه‌های مختلف، با استفاده از رویکرد یکپارچه‌ی فرا ابتکاری و روش حل دقیق، نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، روش حل دقیق فقط برای مسایل با اندازه‌ی کوچک کاربرد دارد و برای اندازه‌ی بزرگ، استفاده از این روش بسیار زمانبر بوده و پس از گذشت چندین ساعت نیز، در مقایسه با الگوریتم ژنتیک به جواب‌های خوبی نمی‌رسد. کیفیت حل و زمان محاسباتی، حاکی از کارایی بسیارخوب الگوریتم یکپارچه‌ی پیشنهادی است.

جدول ۱. داده‌های مسئله عددی نمونه

کار	$\tilde{P}_{1j}$	$\tilde{P}_{2j}$	$\tilde{P}_{3j}$	$\tilde{d}_j$	ω_j	μ_j	λ_j
1	(1.97,2.46,2.96)	(1.66,2.07,2.96)	(4.39,5.49,6.58)	(5.04,6.72,8.40,10.09)	8	1	0.03
2	(4.61,5.76,6.91)	(1.99,2.49,2.99)	(5.13,6.42,7.70)	(30.67,40.89,51.12,61.34)	3	5	0.04
3	(7.60,9.50,11.40)	(4.33,5.42,6.50)	(4.32,5.40,6.48)	(47.20,62.94,78.68,94.41)	2	2	0.07
4	(4.64,5.80,6.95)	(3.33,4.16,4.99)	(7.56,9.45,11.34)	(32.91,43.89,54.86,65.83)	7	6	0.02
5	(2.47,3.08,3.70)	(4.32,5.40,6.48)	(5.29,6.62,7.94)	(23.39,31.18,38.98,46.78)	9	7	0.05

جدول ۲. نتایج نهایی حل مسئله عددی نمونه

کار	$\tilde{C}_j$	حالت بهینه‌ی همپوشانی فازی	$\frac{1}{2}(\omega_j h_j + \mu_j u_j) \equiv \omega_j \tilde{E}_j + \mu_j \tilde{T}_j$	جایگاه در توالی بهینه
1	(8.02,10.02,12.03)	4	10.14	1
2	(25.83,32.31,38.77)	5	97.95	3
3	(19.91,24.89,29.88)	1	183.68	2
4	(40.62,50.8,60.96)	3	207.31	5
5	(32.42,40.54,48.65)	4	179.97	4

جدول ۳. نتایج حل مسایل نمونه عددی

Problem name	Problem size (job*machine)	Global solver (Lingo)			Proposed fuzzy-GA	
		Best solution	Optimal solution	Computational time	Best solution	Computational time
P01	3*2	200.96	200.96	0:00:01	200.96	0:00:0.2
P02	3*3	296.70	296.70	0:00:02	296.70	0:00:0.2
P03	3*5	515.48	515.48	0:00:04	515.48	0:00:0.2
P04	4*2	337.67	337.67	0:00:05	337.67	0:00:0.3
P05	4*3	521.08	521.08	0:00:08	521.08	0:00:0.3
P06	4*5	974.75	974.75	0:00:11	974.75	0:00:0.3
P07	5*2	461.95	461.95	0:00:12	461.95	0:00:0.6
P08	5*3	688.99	688.99	0:00:16	688.99	0:00:0.6
P09	5*5	1668.4	1668.4	0:00:21	1668.4	0:00:0.6
P10	10*2	2944.21	-	5:00:00	2337.68	0:00:11
P11	10*3	3212.55	-	5:00:00	2733.83	0:00:11
P12	10*5	3769.32	-	5:00:00	3451.31	0:00:14
P13	30*2	-	-	10:00:00	9235.22	0:03:11
P14	30*3	-	-	10:00:00	9877.56	0:03:14
P15	30*5	-	-	10:00:00	10607.5	0:03:18
P16	50*2	-	-	20:00:00	28997.70	0:15:83
P17	50*3	-	-	20:00:00	30221.88	0:16:19
P18	50*5	-	-	20:00:00	35018.11	0:16:33

۶. جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به یکپارچه سازی شبیه سازی فازی و الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله‌ی زمانبندی دومعیاره‌ی جریـان کارگـاهی در فضـای عدم قطعیت پرداخته شد. برای توصـیف ایـن عـدم قطعیـت، تئـوری فازی به کار گرفته شد. در مسـئله‌ی مـورد مطالعـه، ظرفیـت بافرهـا محدود در نظر گرفته شده و امکان بلوکه شدن ماشین‌ها وجـود دارد. علاوه بر آن، کارها به صورت زوال پذیر فـرض شـده، بـه طـوری کـه زمان‌های پردازش، متغیر بوده و تابعی خطـی از زمـان آغـاز عملیـات است. همچنین زمان‌هـای پـردازش و تحویـل، غیرقطعـی بـوده و بـه صورت اعداد فازی در نظر گرفته شده‌اند. برای این مسئله یـک مـدل ریاضی غیرخطی فازی با هدف کمینه‌سازی مجموع وزنی زودکردها و دیرکردها ارائه شد. در نهایت برای ارزیابی چگونگی عملکـرد رویکـرد یکپارچه‌ی پیشنهادی، به حل و بررسی کامل یک مسـئله‌ی نمونـه‌ی عددی در اندازه‌ی کوچک و سپس به حل مسایل نمونه در اندازه‌هـای مختلف پرداخته شد. کیفیت حل و زمان محاسباتی، کـاملا حـاکی از کارایی بسیارخوب رویکرد یکپارچه‌ی پیشنهادی است.

به منظور تحقیقات آتی می‌توان بـه جـای زوال پـدیری خطـی، بـه فضای واقعی تولید نزدیکتر شده و زوال پذیری کارها را بـه صـورت تابعی غیرخطی از زمان آغاز عملیات در نظر گرفـت. همچنـین بـه جـای اسـتفاده از اعـداد فـازی مثلثـی و ذوزنقـه ای بـرای تعریـف پارامترهای غیر قطعی مساله، می‌توان اعداد فازی پیچیده‌تر و روش محاسبه زودکرد و دیرکرد جدیدتری را ارائه نمود.

مراجع

[1] Moslehi G, hakimian A, Abouei Ardakan M. Minimizing the number of tardy jobs in a two-machine flowshop problem with non-simultaneous job entrance, International Journal of Industrial Engineering & Production Management, 2013, Vol. 23, pp. 389-400.

[2] Papadimitriou CH, Kanellakis PC. Flow shop scheduling with limited temporary storage, Journal of Association Computing Machine, 1980, Vol. 27, pp. 533-549.

[3] Norman BA. Scheduling flowshops with finite buffers and sequence dependent setup times, Computers and Industrial Engineering, 1996, No. 1, Vol. 36, pp. 163-177.

[4] Smutnicki C. A two-machine permutation flow shop scheduling problem with buffers, OR Spectrum, 1998, Vol. 20, pp. 229-235.

[5] Nowicki E. The permutation flow shop with buffers: a tabu search approach, European Journal of Operational Research, 1999, Vol. 116, pp. 205-219.

[6] Liu B, Wang L, Jin YH. An effective hybrid PSO-based algorithm for flow shop scheduling with limited buffers, Computers and Operation Research, 2008, Vol. 35, pp. 2791-2806.

[7] Ke Pan Q, Wang L, Gao L. A chaotic harmony search algorithm for the flow shop scheduling problem with limited buffers, Applied Soft Computing, 2011, Vol. 11, pp. 5270-5280.

[8] Mokhtari H, Nakhai Kamal Abadi I, Amin-Naseri MR. Modeling and analytical solution of integrated scheduling and capacity planning problem: lower bounds and efficient branch and bound algorithm, International Journal of Industrial Engineering & Production Management, 2013, Vol. 24, pp. 117-139.

[9] Baker KR, Scudder G. Sequencing with earliness and tardiness penalties: A review, Operations Research, 1990, Vol. 38, pp. 22-36.

[10] Lauff V, Werner F. Scheduling with common due date, ear lines and tardiness penalties for multimachine problems: A survey, Mathematical and Computer Modeling, 2004, Vol. 40, pp. 637-655.

[11] Rajendran C, Alicke K. Dispatching in flowshops with bottleneck machines, Computers and Industrial Engineering, 2007, Vol. 52, pp. 89-106.

[12] Shabtay D. The just-in-time scheduling problem in a flow-shop scheduling system, European Journal of Operational Research, 2011, doi: 10.1016/j.ejor.2011.07.053.

[13] Gupta JND, Gupta SK. Single facility scheduling with nonlinear processing times, Computers & Industrial Engineering, 1988, Vol. 14, pp. 387-393.

[14] Wu CC, Lee WC. Single-machine group scheduling problems with deteriorating setup times and job processing times, International Journal of Production Economics, 2008, Vol. 115, pp. 128-133.

[15] Wang J, Wang D, Zhang G. Single-machine scheduling problems with both deteriorating jobs and learning effects, Applied Mathematical Modelling, 2010, Vol. 34, pp. 2831-2839.

[16] Zhao CL, Hsu CJ, Yang DL. Considerations of single-machine scheduling with deteriorating jobs, Applied Mathematical Modelling, 2011, Vol. 35, pp. 5134-5142.

[17] Wu CC, Lee WC. Two-machine flow shop scheduling to minimize mean flow time under linear deterioration, International Journal of Production Economics, 2006, Vol. 103, pp. 572-584.

[18] Wang JB. Flow shop scheduling problems with decreasing linear deterioration under dominant machines, Computers & Operations Research, 2007, Vol. 34, pp. 2043-2058.

[19] Lee WC, Wu CC, Chung YH, Liu HC. Minimizing the total completion time in permutation flow shop with machine-dependent job deterioration rates, Computers & Operations Research, 2009, No. 6, Vol. 36, pp. 2111-2121.

[20] Wang, L, Yan Sun, L, Hui Sun, L, Wang JB. On three-machine flow shop scheduling with deteriorating jobs, International Journal of Production Economics, 2010, Vol. 125, pp. 185-189.

[21] Yang SH, Wang JB. Minimizing total weighted completion time in a two-machine flow shop scheduling under simple linear deterioration, Applied Mathematics and Computation, 2011, Vol. 217, pp. 4819-4826.

[22] Bank M, Fatemi Ghomi SMT, Jolai F, Behnamian J. Two-machine flow shop total tardiness scheduling problem with deteriorating jobs, Applied Mathematical Modelling, 2012, doi:10.1016/j.apm.2011.12.010.

[23] Sun LH, Sun LY, Wang MZ, Wang JB. Flow shop make span minimization scheduling with deteriorating jobs under dominating machines, International Journal of Production Economics, 2012, Vol. 138, pp. 195-200.

[24] Lee WC, Shiau YR, Chen SK, Wu CC. A two-machine flow shop scheduling problem with deteriorating jobs and blocking, International Journal of Production Economics, 2010, Vol. 124, pp. 188-197.

[25] Ishii H, Tada M, Masuda T. Two scheduling problems with fuzzy duedates, Fuzzy Sets and Systems, 1992, Vol. 46, pp. 339-347.

[26] Ishibuchi H, Yamamoto N, Misaki S, Tanaka H. Local search algorithms for flow shop scheduling with fuzzy due-dates, International Journal of Production Economics, 1994, Vol. 33, pp. 53-66.

[27] Cheng J, Kise H, Matsumoto H. A branch-and bound algorithm with fuzzy inference for a permutation flowshop scheduling problem, European Journal of Operational Research, , Vol. 96, pp. 578-590.

[28] Geng ZQ, Zou YR. Using HGA to solve E/T scheduling problems with fuzzy processing time and fuzzy due date, 0-7803-7087-2/01/$10.00© 2001 IEEE.

[29] Sufen L, Yunlong Z, Xiaoying L. Earliness/Tardiness Flow-shop scheduling under uncertainty, 1082-3409/05 $20.00 © 2005 IEEE.

[30] Yimer AD, Demirli K. Fuzzy scheduling of job orders in a two-stage flow shop with batch processing machines, International Journal of Approximate Reasoning, 2009, Vol. 50, pp. 117-137.

[31] Lai PJ, Wu HC. Evaluate the fuzzy completion times in the fuzzy flow shop scheduling problems using the virus-evolutionary genetic algorithms, Applied Soft Computing, 2011, Vol. 11, pp. 4540-4550.
[

[32] Wu HC. Solving the fuzzy earliness and tardiness in scheduling problems by using Genetic algorithms, Expert Systems with Applications, 2010, Vol. 37, pp. 4860-4866.

[33] Zhang H, Tam CM, Li H. Modeling uncertain activity duration by fuzzy number and discrete-event simulation, European Journal of Operational Research, 2005, Vol. 164, pp. 715-729.

[34] Azzaro-Pantel C, Bernal-Haro L, Baudet Ph, Domenech S, Pibouleau L. A two-stage methodology for short-term batch plant scheduling: discrete-event simulation and genetic algorithm, Computers & Chemical Engineering, 1998, No. 10, Vol. 22, pp. 1461Ð1481.

[35] Tran L, Duzkstein L. Comparison of fuzzy numbers using a fuzzy distance measure, Fuzzy Sets and Systems, 2002, Vol. 130, pp. 331-341.

[36] Eydi AR, Mirakhorli A. Hybrid heuristic method based on genetic algorithm for the hub covering problem under fuzzy environment, International Journal of Industrial Engineering & Production Management, 2013, Vol. 23, pp. 161-173.