Archive of SID

پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، صص ۱-۲۷
نوع مقاله: پژوهشی

مدل‌سازی یکپارچه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید و نگهداری تعمیرات در محیط جریان کارگاهی ترکیبی

ایمان رستگار[۱]، جواد رضائیان[۲*]، ایرج مهدوی[۳]، پرویز فتاحی[۴]

۱. دانشجو دکتری، مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران
۲. دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران
۳. استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران
۴. استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴

چکیده

یکپارچه‌سازی زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تولید از تصمیمات مهم در هر سازمان تولیدی است که منجر به افزایش اثربخشی مدیریت عملیات می‌شود. تصمیمات بلندمدت برنامه‌ریزی تولید (تعیین مقدار تولید، سطح موجودی و...) و تصمیمات کوتاه مدت عملیاتی زمان‌بندی (ترتیب پردازش کارها و عملیات نت) تأثیر دوطرفه و مستقیم بر یکدیگر دارند. در این مقاله مدل ریاضی جدیدی برای تصمیم‌گیری همزمان برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌ها، زمان و دیرکرد در محیط جریان کارگاهی ترکیبی ارائه می‌شود. مفهوم نت ناکامل و در نظر گرفتن چند نوع منبع نگهداری تعمیرات در مدل پیشنهادی ارائه شده است. دو الگوریتم تکاملی فراابتکاری چندهدفه مبتنی بر الگوریتم جستجوی هماهنگی و روش حل دقیق اپسیلون-محدودیت برای حل مدل پیشنهادی ارائه شده است که فضای حل تصمیم‌گیری را به روشی مستمر جستجو می‌کنند. بدین منظور نمونه مسائلی مرتبط با مقاله پیشین ارائه شد و از سه معیار عملکردی تعداد حلهای پارتو، متوسط فاصله ایده‌آل و پراکندگی حلهای نامغلوب برای مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شد. نتایج نشان دهنده مزایا و اثربخشی روش‌های استفاده شده در تعیین جواب بهینه پارتو برای مسائل بهینه‌سازی است.

کلیدواژه‌ها: یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید، نگهداری و تعمیرات ناکامل، جریان کارگاهی ترکیبی، الگوریتم جستجوی هماهنگی

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: j.rezaeian@ustmb.ac.ir

www.SID.ir

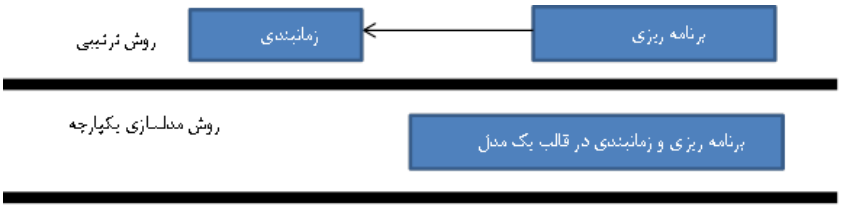
Archive of SID

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی نقش حیاتی در افزایش اثربخشی کارخانجات ایفا می‌کنند و مرتبط با دو سطح تصمیم‌گیری متفاوت می‌باشند که از نظر افق زمانی، برنامه‌ریزی تولید در افق زمانی میان‌مدت و زمان‌بندی در افق زمانی کوتاه‌مدت، برنامه‌ریزی و اجرا می‌شوند. ارتباط این دو سطح تصمیم‌گیری بدین صورت است که زمان‌بندی به مقدار تولید محاسبه شده در سطح برنامه‌ریزی تولید وابسته است. از طرف دیگر، محدودیت‌های اتخاذ شده زمان‌بندی، منجر به تغییر تصمیمات در برنامه‌ریزی تولید می‌گردد. بنابراین همزمان درنظر گرفتن زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تولید برای اثربخشی مدیریت عملیات مؤثر است، به صورتی که تصمیمات تاکتیکی برنامه‌ریزی تولید شامل مقدار تولید، سطح موجودی و غیره بر روی تصمیم عملیاتی زمان‌بندی که شامل چگونگی ترتیب پردازش کارها و عملیات نت است، تأثیرگذار است. روش‌های همزمان در نظر گرفتن تصمیمات برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مطابق با شکل ۱ به دو دسته کلی تقسیم می‌شود. رویکرد سنتی، همزمان در نظر گرفتن به صورت متوالی است. بدین صورت که دو مدل به صورت مستقل بدون آنکه اطلاعات سطح دوم با اطلاعات سطح اول ارتباط داشته باشند، حل می‌شوند. در نوع دوم، کل مسئله در قالب یک مدل با یک تابع هدف و مجموعه کلی محدودیت‌ها در نظر گرفته می‌شود. یکی از چالش‌های مهم تولید، عملکرد مناسب دستگاه‌های تولید می‌باشد که در تصمیم‌گیری‌های سطح دوم مؤثر است. دستگاه‌ها ممکن است به دلایل تعمیرات دوره‌ای، نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه یا خرابی تصادفی در دسترس نباشند [۱]. بنابراین درنظرگیری همزمان زمان‌بندی پردازش کارها و عملیات نت در سیستم‌های تولید مهم است. در این تحقیق مسئله یکپارچه‌سازی زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تولید چند محصول در چند دوره در محیط کارگاه جریانی انعطاف‌پذیر و با فرض وجود محدودیت‌های زمان آماده‌سازی وابسته به توالی و در دسترس‌پذیری دستگاه‌ها با دو هدف حداقل کردن مجموع کل هزینه‌ها و حداکثر زمان تکمیل و دیرکرد بررسی می‌شود. هدف از مطالعه و تشریح مسئله فوق به‌کارگیری استراتژی‌های مناسب برنامه‌ریزی تولید، سیاست نگهداری تعمیرات است که در یک دوره مشخص زمانی (سالیانه) مجموع هزینه‌ها کمینه شود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- روش‌های همزمان در نظر گرفتن برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید

۲- مرور ادبیات

اولین تحقیقی که دو مسئله برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی را به طور همزمان در نظر گرفت، تحقیق واگنر و ویدین است که در آن از روش برنامه‌ریزی پویا برای مسئله اندازه انباشته تک ماشین بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت استفاده کردند. بعد از این پژوهش، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شد. رمضانیان و سعیدی [۲] مسئله یکپارچه اندازه انباشته و زمان‌بندی در محیط جریان کارگاهی جایگشتی با محدودیت‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و ظرفیت محدود ماشین‌ها ارائه کردند. برای حل مدل از دو روش ابتکاری بر اساس برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در چارچوب پیچش زمانی استفاده شد. اوریتا [۳] مسئله یکپارچه اندازه انباشته و زمان‌بندی را در محیط کارکارگاهی در نظر گرفتند. در مقاله رمضانیان و همکاران [۴] مسئله همزمان اندازه انباشته و زمان‌بندی در محیط جریان کارگاهی در شرایط چند دوره‌ای و چند محصولی با محدودیت ظرفیت ماشین ارائه شد. مسئله در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شد. برای حل مدل پیشنهادی، از روش ابتکاری پیچش زمانی و بهینه‌سازی انبوه ذرات استفاده شد.

در تعدادی از پژوهش‌ها فرض عدم دردسترس‌پذیری ماشین‌ها در محیط تولید در نظر گرفته شد. ناجید و همکاران [۵] فرض پنجره زمانی تقاضا و هزینه کمبود را به مدل ارائه شده در [۶] اضافه کرد. نورالفتح و چاتلت [۷] مسئله برنامه‌ریزی مشابه برای سیستم تولید تشکیل شده از مجموعه‌ای از ماشین‌های موازی بررسی کردند که در آن وابستگی اقتصادی ماشین‌ها و خرابی‌های دلیل مشترک در نظر گرفته شد. رمضانیان و همکاران [۸] مدل برنامه‌ریزی ریاضی مختلط برای مسئله زمان‌بندی و اندازه انباشته چندین محصول در چند دوره در حالتی که آرایش ماشین‌ها به‌صورت جریان کارگاهی ظرفیت‌دار است با محدودیت‌های دردسترس‌پذیری ماشین‌ها و زمان آماده‌سازی وابسته به توالی ارائه کردند. دو نوع فعالیت نت در نظر گرفته شد. در نوع اول زمان شروع فعالیت‌های نت ثابت است. در نوع دوم نت باید در

www.SID.ir

Archive of SID

یک بازه زمانی (پنجره زمانی) اجرا شود. فیتوحی و نورالفتح [۹] مدل [۱۰] را به حالت چند حالته توسعه دادند. روش‌های دقیق و الگوریتم‌های ابتکاری برای حل مدل پیشنهادی مقاله [۶] توسط یالوی و همکاران [۱۱] پیشنهاد شد که برای مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ از کارایی بالایی برخوردار هستند.

ولوسویچ و همکاران [۱۲] مدل جدیدی برای تعیین برنامه بهینه تولید برای یک توالی ثابت عملیات روی ماشین آلات ارائه کردند که با در نظر گرفتن هزینه و زمان آماده‌سازی، مجموع هزینه‌های تولید، موجودی و آماده‌سازی بهینه شوند. آن‌ها برای حل مدل از روش حل آزادسازی لاگرانژی استفاده کردند. آن و هان [۱۳] مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای بهینه‌سازی یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی روی خطوط همزمان مونتاژ اتومبیل ارائه کردند. روش آزادسازی لاگرانژین برای حل آن توسعه دادند. در نتیجه مدل پیشنهادی به زیر مسائل برنامه‌ریزی، زمان‌بندی تقسیم شد. زیر مسئله زمان‌بندی با الگوریتم جدید پیشنهادی حل شد.

مدل یکپارچه جدیدی برای مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در پایانه‌های بندر عظیم کشتیرانی توسط منزس و همکاران [۱۴] ارائه شد که از روش حل دقیق شاخه و قیمت استفاده شد. چو و جونگ [۱۵] تصمیمات سلسله‌مراتبی در مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در محیط جریان کارگاهی چندهدفه پیشنهاد دادند. اهداف این مدل شامل حداکثرسازی توان عملیاتی و حداقل‌سازی حداکثرزمان تکمیل[1] درنظر گرفته شد. مهدیه و همکاران [۱۶] مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مسئله همزمان اندازه انباشته محدود و زمان‌بندی ارائه کردند که در آن زمان و هزینه‌های آماده‌سازی به‌صورت وابسته به توالی و غیرمثلثی است. مدل پیشنهادی ابتدا به صورت تک ماشین و در ادامه در محیط‌های ماشین‌های موازی و خطوط جریان منعطف‌پذیر ارائه شد. هو و هو [۱۷] مسئله همزمان اندازه انباشته و زمان‌بندی احتمالی با تقاضای غیرقطعی درنظر گرفتند. آن‌ها یک کارخانه تولیدی در صنعت خودرو در نظر گرفتند و مدل برنامه‌ریزی احتمالی چندمرحله‌ای برای به حداقل رساندن هزینه‌های کلی سیستم شامل هزینه تولید، آماده‌سازی، موجودی و کمبود توسعه دادند.

بهولسه و پاوار [۱۸] در مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی، مسئله تخصیص عملیات را در مرحله زمان‌بندی توسعه دادند و فرض زمان انتظار را در مدلشان درنظر گرفتند. برای حل مسئله ارائه شده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی استفاده کردند. مدل یکپارچه ساخت سلولی، زمان‌بندی گروهی، تولید و نت پیشگیرانه در یک سیستم تولید سلولی پویا توسط

www.SID.ir

Archive of SID

عالمیان و همکاران [۱۹] ارائه شد. مسئله نت در این مدل، زمان اجرای نت کامل غیر دوره‌ای را در قالب عملیات نت اصلاحی تعیین می‌کند. برای حل مدل از روش تجزیه بندرز در نرم‌افزار گمز استفاده شد. هان و همکاران [۲۰] مدل ریاضی دو سطحی یکپارچه مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در سیستم تولید توسعه دادند. که از روش بهینه‌سازی گروهی ذرات[۲] (PSO) برای حل مسئله در سطح برنامه‌ریزی تولید و از روش ابتکاری جدید برای حل مسئله در سطح زمان‌بندی تحت شرایط فازی تولید استفاده کردند.

نتیجه‌ای که از مرور ادبیات و مطالعه دقیق مقالات می‌توان گرفت و به‌عنوان شکاف تحقیق بیان کرد به شرح زیر است:

(۱) رویکرد جدید یکپارچه‌سازی مسائل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی عملیات با در نظر گرفتن محدودیت دردسترس‌پذیری ماشین‌ها و قالب دستگاه

(۲) در نظر گرفتن چند نوع روش نت روی چند نوع منبع تولید (ماشین و قالب) در یک محیط تولید جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، استراتژی‌های جدیدی است که برای بهینه کردن برنامه‌ریزی نت و جلوگیری از توقف تولید به‌کار گرفته می‌شود.

(۳) استفاده از سیاست نت ناکامل برای تعمیر عنصر بعد از روی دادن خرابی

۳- بیان مسئله و برنامه‌ریزی ریاضی

در این بخش، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی در یک سیستم تولید چند محصولی چند دوره‌ای در محیط جریان کارگاهی ترکیبی با محدودیت نت ارائه می‌شود. این مسئله شامل تعیین مقادیر تولید و تعیین توالی کارها روی یک مجموعه متوالی از ایستگاه‌های کاری است که حداقل یکی از ایستگاه‌ها دارای بیش از یک ماشین است. مسئله جریان کارگاهی ترکیبی بر اساس ایستگاه‌های کاری بدین صورت است که در هر ایستگاه s که $s \in O$ مجموعه‌ای از M_s ماشین وجود دارد که مجموعه‌ای از n کار مستقل روی ماشین‌ها پردازش می‌شوند. هر کار j که $j \in J$ زمان پردازش و زمان تحویل مشخص دارد.

مفروضات، پارامترها، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های پردازش کارها در این مقاله مطابق با موارد زیر است:

- کارها و ماشین‌ها در زمان صفر در دسترس هستند. هر کار مستقل از کار دیگر و هر ماشین مستقل از ماشین دیگر پردازش می‌کند. هر ماشین دارای ظرفیت تولید مشخصی است.

www.SID.ir

Archive of SID

- مسئله به‌صورت چند محصولی و چند دوره‌ای است. هر محصول دارای زمان موعد تحویل مشخصی است.
- هر محصول به وسیله قالب‌هایی که مرتبط با آن محصول است، قابل پردازش است. انقطاع عملیات پردازش مجاز است.
- یک عملیات در یک لحظه، توسط بیش از یک ماشین پردازش نمی‌شود و هر ماشین فقط یک عملیات را در یک لحظه تکمیل می‌کند.
- زمان آماده‌سازی کارها وابسته به توالی پردازش قطعات است. بنابراین توالی پردازش کارها (زمان‌بندی) مهم است. پردازش کارها به‌صورت دسته‌ای متوالی[۳] انجام می‌شود. زمان حمل کارها در حین عملیات بین ماشین‌ها مجاز نیست.
- هنگامی که یک فعالیت نت روی ماشین یا قالب‌ها انجام می‌شود، عملیات پردازش کار روی آن ماشین انجام نمی‌شود.
- مقدار بافر بین ماشین‌ها برای انبارش کارهای حین عملیات که به عملیات نت مواجه می‌شوند، نامحدود است.
- برای ماشین‌ها دو سیاست برنامه‌ریزی نت فرض می‌شود. اولین سیاست، سیاست نت پیشگیرانه است که در آن روی ماشین‌ها عملیات نگهداری انجام می‌شود که نوع فعالیت تعمیراتی به‌صورت ناکامل است. دومین سیاست، شامل تعمیر کامل برای هر ماشین بعد از روی دادن خرابی است.
- برای قالب‌ها سیاست نت به‌صورت تعویض پیشگیرانه است که در آن هر گاه مدت زمان استفاده از قالب به حدی رسید، آنگاه قالب با قالب جدید تعویض می‌گردد.
- پارامترهای مسئله به صورت قطعی است.
- انقطاع مجاز است بدین صورت که عملیات در حال پردازش متوقف می‌شود.

شاخص‌ها

کار	i, j
جایگشت توالی کار حین فرایند	K
ایستگاه	S
ماشین	M
دوره تولید	T

www.SID.ir

Archive of SID

متغیرها

x_{tsjm}	اگر کار j روی ماشین m در ایستگاه s در دوره t پردازش شود برابر با یک است در غیر این صورت برابر با صفر
$y_{ikjk'm}$	اگر موقعیت k کار i قبل از موقعیت k' کار j روی ماشین m پردازش شود برابر با یک است در غیر این صورت برابر با صفر
h_{sm}	اگر نت ناکامل روی ماشین m در ایستگاه s انجام شود برابر با یک است در غیر این صورت صفر
g_{sm}	اگر نت کامل روی ماشین m در ایستگاه s انجام شود برابر با یک است در غیر این صورت صفر
Q_{tj}	مقدار محصول j که در دوره t تولید می‌شود
RFI_{sm}	قابلیت اطمینان نت ناکامل ماشین m در ایستگاه s
RFP_{sm}	قابلیت اطمینان نت کامل ماشین m در ایستگاه s
$\mathrm{Re}\,l_{sm}$	قابلیت اطمینان ماشین m در ایستگاه s
b_{tj}	مقدار کمبود محصول j در دوره t
I_{tj}	مقدار موجودی محصول j در دوره t
$c_t^{\max}$	حداکثر زمان تکمیل محصول j در دوره t
c_{tj}^{late}	مقدار تأخیر محصول j در دوره t

پارامترها

D_{tj}	تقاضای محصول j در دوره t
dd_{tj}	موعد تحویل محصول j در دوره t
cost_{RFPsm}	هزینه نت کامل ماشین m در ایستگاه s
HC_{tj}	هزینه نگه‌داری محصول j در دوره t
BC_{tj}	هزینه کمبود محصول j در دوره t
PC_{tj}	هزینه تولید محصول j در دوره t
cost_{RFIsm}	هزینه نت ناکامل ماشین m در ایستگاه s

www.SID.ir

Archive of SID

P_{jms}	زمان پردازش محصول j روی ماشین m در ایستگاهs
pp'_{jkms}	زمان پردازش موقعیت k کار j روی ماشین m در ایستگاه s
$st_{sjkjk'm}$	زمان آماده‌سازی وابسته به توالی تغییر از موقعیت k'کار j به موقعیت k کار i روی ماشین m
zp_{sm}	مدت زمان نت کامل ماشین m در ایستگاه s
zi_{sm}	مدت زمان نت ناکامل ماشین m در ایستگاه s
zm_{sjm}	زمان تعویض قالب مربوط به محصول j در ماشین m در ایستگاه s
zs_{jm}	حداکثر زمان استفاده از قالب j روی ماشین m
M	عدد خیلی بزرگ
zt_{sm}	زمان تعویض ماشین m روی ایستگاه s
pro_{sm}	احتمال خرابی ماشین m در ایستگاه s
$UBRFI_{sm}$	کران بالای قابلیت اطمینان نت ناکامل ماشین m در ایستگاه s
$LBRFP_{sm}$	کران پایین قابلیت اطمینان نت کامل ماشین m در ایستگاه s
$UBRFI_{sm}$	کران بالای قابلیت اطمینان نت ناکامل ماشین m در ایستگاه s
$LBRFP_{sm}$	کران پایین قابلیت اطمینان نت کامل ماشین m در ایستگاه s
$capC^{\max}$	ظرفیت حداکثر زمان تولید کل دوره‌ها

فرمول‌بندی ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسئله تحت مطالعه به‌صورت زیر است:

$$\min F_1 = \sum c_t^{\max} + \sum_t \sum_j c_{t,j}^{late}$$

$$\min F_2 = \sum_s \sum_m \cos t_{RFPsm} \times RFP_{sm} + \sum_s \sum_m \cos t_{RFIsm} \times RFI_{sm} + \sum_t \sum_j PC_{tj} \times Q_{tj} +$$

$$\sum_t \sum_j HC_{tj} \times I_{tj} + \sum_t \sum_j BC_{tj} \times B_{tj}$$

(۱)

Subject to:

$$C_{tsjkm} \geq h_{sm} \times 0.5 \times pro_{sm} \times zt_{sm} + pp'_{jkms} + st_{sjkjk'm}$$

$$+ \sum_{s' \leq 1} \sum_{m'} zp_{s'm'} \times g_{s'm'} + zi_{s'm'} \times h_{s'm'} - M \times (1 - y_{tsikjkm}) \qquad (۲)$$

$$\forall s = 1,\ j = i, m \leq M(s),$$

$$K = 1, t, s, i, j$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$C_{tsjk'm} \geq C_{tsikm} + pp'_{jk'ms} + st_{sjkjk'm} - M(1 - y_{tsikjk'm})$$

(۳)

$\forall K' = 2, K = 1, j = i,$
$m \leq M(s),$
t, s, i, j

$$C_{ts'jkm} \geq st_{s'ikjkm} + CPP_{ts'm} + h_{s'm} \times 0.5 \times pro_{sm} \times zt_{sm}$$
$$+ pp'_{jkms'} - M(1 - y_{ts'ikjkm})$$

(٤)

$\forall S' \succ 1, j = i,$
$m \leq M(s), K = 1$

$$C_{ts'jk'm} \geq C_{ts'-1j} + pp'_{jk'ms'} + st_{s'ikjk'm} - M(1 - y_{ts'ikjk'm})$$

(٥)

$\forall j \neq i, m \leq M(s'),$
t, s', i, j, k, k'

$$CC_{tsj} \geq C_{tsjkm} \quad \forall t, s, i, j, k, m$$

(٦)

$$CPP_{tsm} \geq \sum_{s'} \sum zp_{s'm'} \times g_{s'm'} + zi_{s'm'} \times h_{s'm'}$$
$$\forall t, s \succ 1, m$$

(۷)

$$+ \sum_{m''} zp_{sm''} \times g_{sm''} + zi_{sm''} . h_{sm''}$$

$$CPP_{tsm} \geq CC_{t(s-1)j} + zp_{sm} \times g_{sm'}$$
$$+ zi_{sm} \times h_{sm} - M(1 - y_{tsjkjkm}) \quad \forall k = 1, t, s \succ 1, m, j$$

(۸)

$$LBRFP_{sm} \leq RFP_{sm} \leq UBRFP_{sm} \quad \forall s, m$$

(۹)

$$LBRFI_{sm} \leq RFI_{sm} \leq UBRFI_{sm} \quad \forall s, m$$

(۱۰)

$$\mathrm{Re}\, l_{sm} \leq RFP_{sm} - M(g_{sm} - 1) \quad \forall s, m$$

(۱۱)

$$h_{sm} + g_{sm} = 1 \quad \forall s, m$$

(۱۲)

$$\sum_{m \leq M(s)} X_{tsjm} = 1 \quad \forall t, s, j$$

(۱۳)

$$y_{tsikjk'm} = 0 \quad \forall K \succ K', m \leq M(s),$$
$$t, s, i, k, k', j, m$$

(۱٤)

$$\sum_{i} \sum_{k=1} y_{tsikikm} = 1 \ \forall, m \leq M(s), t, s, m$$

(۱۵)

www.SID.ir

Archive of SID

$$\sum_j \sum_{k^l} y_{tsikjk^l m} \le 2 \quad \begin{matrix} \forall t,s,i,k,m, \\ m \le M(s), k = 1 \end{matrix} \tag{۱۶}$$

$$y_{tsikikm} = 0 \quad \begin{matrix} \forall K = 2, m \le M(s), \\ t,s,i,k,m \end{matrix} \tag{۱۷}$$

$$\sum_i \sum_k y_{tsikjk^l m} = X_{tsjm} \quad \begin{matrix} \forall m \le M(s), \\ t,s,k^{/},j,m \end{matrix} \tag{۱۸}$$

$$\sum_i \sum_k y_{tsjk^l ikm} \le X_{tsjm} \quad \begin{matrix} \forall m \le M(s), \\ t,s,k^{/},k,j,m \end{matrix} \tag{۱۹}$$

$$\sum_j \sum_{k^l} y_{tsikjk^l m} \le 1 \quad \begin{matrix} \forall m \le M(s), k = 1, \\ t,s,k^{/},k,j,m \end{matrix} \tag{۲۰}$$

$$PP_{jkms} \ge 1 \ \forall k = 1,s,m,j \tag{۲۱}$$

$$\sum_k PP_{jkms} = P_{jms} Q_{tj} \ \forall t,s,m,j \tag{۲۲}$$

$$PP^l_{jkms} = PP_{jkms} + zm_{sjm} \tag{۲۳}$$

$$PP^{/}{}_{jkms} = PP_{jkms} \tag{۲۴}$$

$$PP_{jkms} \le zs_{jm} \tag{۲۵}$$

$$CC^{\max}_{tj} \ge C_{tsjkm} \tag{۲۶}$$

$$C^{\max}{}_t \ge CC^{\max}_{tj} \tag{۲۷}$$

$$C^{late}{}_{tj} \ge CC^{\max}_{tj} - dd_{tj} \tag{۲۸}$$

$$\mathrm{Re}\, l^{/}_{sm} = \mathrm{Re}\, l^{i}_{sm} (1 - r_2^{\sum_j X_{tsjm}}) \tag{۲۹}$$

$$I_{tj} - B_{tj} = Q_{tj} - D_{tj} - B_{(t-1)j} + I_{(t-1)j} \tag{۳۰}$$

$$C^{\max}_t \le capC^{\max} \tag{۳۱}$$

تابع هدف اول (F_1) حداقل کردن حداکثر زمان تکمیل کل کارها است. تابع هدف دوم (F_2) حداقل کردن هزینه‌های نت کامل و ناکامل، تولید، موجودی و کمبود است. با اجرای محدودیت‌های ۲ تا ۸ زمان تکمیل کارها تعیین می‌شود. محدودیت دوم زمان تکمیل اولین کار در اولین ماشین تعیین می‌شود. محدودیت سوم زمان تکمیل کار را زمانی که تنها یک ماشین در ایستگاه وجود داشته باشد، تعیین می‌کند. محدودیت چهارم، زمان تکمیل یک کار را زمانی که از یک ایستگاه به ایستگاه بعدی وارد می‌شود، مشخص می‌کند. محدودیت‌های ۹ و ۱۰، تضمین می‌کنند که قابلیت اطمینان نت کامل و قابلیت اطمینان نت ناکامل هر ماشین مطابق حدود

www.SID.ir

Archive of SID

بالا و حدود پایین از قبل مشخص شده تعیین می‌شوند. محدودیت ۱۲ نشان می‌دهد که نت کامل و نت ناکامل به‌طور همزمان روی ماشین اجرا نمی‌شوند. محدودیت‌های ۱۳ تا ۲۰، توالی کارها در محیط تولید جریان کارگاهی ترکیبی تعیین می‌کند. محدودیت ۱۳ تضمین می‌کند که هر کار روی حداکثر یک ماشین در یک زمان پردازش می‌شود. محدودیت ۱۴ نشان می‌دهد که بخش(جز) دوم هر کار نمی‌تواند قبل از اتمام بخش اول شروع شود. محدودیت‌های ۲۱ تا ۲۵ زمان تکمیل کار j روی ماشین m در ایستگاه s را محاسبه می‌کنند. محدودیت‌های ۲۶ الی ۲۸ تأخیر هر کار را مشخص می‌کند. محدودیت ۲۹ قابلیت اطمینان نهایی ماشین‌ها با فرض حجم کارهایی که روی ماشین پردازش می‌شوند، مشخص می‌کنند.

۴- روش حل

مسئله تولید و برنامه ریزی یکپارچه چند هدفه پیشنهادی، مسئله‌ای چالش‌برانگیز است که برای تأمین جبهه مناسب پارتو به یک روش راه حل مؤثر نیاز دارد [۲۰]. از آنجایی که اثبات شده مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی NP-hard است[۲۱]، مدل پیشنهادی در این مقاله که متغیرها و پارامترهای بیشتری نسبت به مسئله جریان کارگاهی ساده دارد، دارای پیچیدگی در حل است به‌طوری که حل مسئله با روش‌های حل دقیق حتی برای مسائل با ابعاد کوچک بسیار زمان‌بر است. از این رو با توجه به ماهیت روش‌های فراابتکاری، توسعه این روش‌ها در حل مدل پیشنهادی مؤثر است [۲۲]. در این مقاله با توسعه روش حل جدیدی مبتنی بر الگوریتم جستجوی هماهنگی، این مدل چند هدفه به کمک روش جستجوی هماهنگی چندهدفه پیشنهادی حل می‌شود و نتایج آن با الگوریتم فراابتکاری جستجوی هماهنگی ساده چندهدفه مقایسه می‌گردد. روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه معمولاً از مفهوم "نامغلوب" برای مقایسه راه‌حل‌ها استفاده می‌کنند. در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، به جای به‌دست آوردن یک راه حل بهینه منحصربه‌فرد، اغلب مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه با کیفیت خوب، یعنی "راه‌حل‌های بهینه پارتو" استخراج می‌شود. راه‌حل‌های پارتو در یک مسئله چند هدفه مجموعه‌ای از نقاط نامغلوب است که بر همه راه‌حل‌های دیگر تسلط دارد و اغلب به‌عنوان جبهه پارتو شناخته می‌شوند.

۴-۱- روش اپسیلون محدودیت

برای حل مسائل با ابعاد کوچک از روش‌های حل دقیق استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین روش‌های حل دقیق، روش اپسیلون محدودیت است که اغلب برای حل مسائل چند هدفه به کار

www.SID.ir

Archive of SID

گرفته می‌شود.

در این روش در هر مرحله، یکی از هدف‌ها بهینه شده و دیگر اهداف به‌عنوان محدودیت با حد بالای اپسیلون ($\in$) در نظر گرفته می‌شوند. در واقع این روش مسئله بهینه‌سازی چند هدفه را به یک مسئله تک هدفه تبدیل می‌کند.

$$\min\ f_1(x) \qquad x \in X \tag{۳۲}$$

$$f_2(x) \le \varepsilon_2$$

$$\dots \tag{۳۳}$$

$$f_n(x) \le \varepsilon_n$$

مراحل روش اپسیلون محدودیت شامل موارد زیر است:

۱- در هر مرحله یکی از توابع هدف به‌عنوان هدف اصلی انتخاب شده و مسئله با این هدف حل و مقدار بهینه برای این تابع هدف به‌دست می‌آید.

۲- سایر توابع هدف، اهداف فرعی می‌شوند و فواصل بین مقادیر بهینه اهداف فرعی به یک عدد از پیش تعیین شده تقسیم می‌شود و جدولی برای این مقادیر یعنی $\varepsilon_2,\dots,\varepsilon_n$ ترسیم می‌شود.

۳- در هر مرحله، تابع هدف اصلی با هر مقدار بروز شده $\varepsilon_2,\dots,\varepsilon_n$ حل می‌شود. در نتیجه حلهای پارتو بدست می‌آید[۲۳].

۲-۴- روش جستجوی هماهنگی

الگوریتم جستجوی هماهنگی[۴] (HS) یکی از ساده‌ترین روش‌های فراابتکاری است که در فرایند جستجوی جواب شدنی بهینه در مسائل بهینه‌سازی، از فرایند نواختن همزمان گروه ارکستر موزیک الهام گرفته شده است. این روش حل را ابتدا گیم در سال ۲۰۰۱ میلادی ارائه کرد [۲۴]. HS مانند ژنتیک، جزء الگوریتم‌های بهبود دهنده است. به‌عبارت دیگر، با نسلی از بردارهای حل شروع و برای ایجاد نسل‌های جدید از فرایند انتخاب استفاده می‌شود. اما بر خلاف الگوریتم ژنتیک (که در آن از دو کروموزم برای تولید کروموزوم یا بردار حل جدید استفاده می‌شود) در این روش از همه بردارهای حل موجود در حافظه برای تولید حل جدید استفاده می‌شود. این ویژگی انعطاف الگوریتم را در جستجوی فضاهای بهتر حل افزایش می‌دهد. از ویژگی‌های

www.SID.ir

Archive of SID

الگوریتم HS این است که در مدت زمان مناسب فضاهای حل با محدوده عملکرد بهتری را شناسایی می‌کند. این ویژگی در صورتی که مسئله مورد مطالعه از بهینگی محلی برخوردار باشد، دچار مشکل می‌شود و در بهینگی محلی متوقف شده و نمی‌تواند به بهینگی سراسری برسد. دلیل این مشکل عدم کارایی مناسب الگوریتم در اجرای جستجوی محلی در مسائل بهینه‌سازی گسسته است [۲۵]. به‌منظور رفع این مشکل و تطبیق روش حل با مسئله، محققان با تغییر در پارامترها و عملگرهای الگوریتم، انواع مختلفی از این الگوریتم ارائه کردند تا دقت حل و نرخ همگرایی افزایش یابد.

- **ساختار روش حل**

در این الگوریتم هر حل یک هارمونی نامیده می‌شود و با یک بردار N بعدی نمایش داده می‌شود. این الگوریتم سه فاز اصلی دارد: ۱- نسل اولیه (مقداردهی اولیه) ۲- بهبود بردار حل جدید ۳- به روز کردن حافظه الگوریتم.

- **شرح روش حل**

گام‌های الگوریتم فوق عبارت‌اند از:

گام اول: تعیین مقادیر اولیه پارامترهای الگوریتم. گام دوم: تعیین مقادیر ابتدایی حافظه هارمونی. گام سوم: تولید بردار حل جدید. گام چهارم: به روز کردن حافظه هارمونی. گام پنجم :تست قاعده توقف.

۱. ابتدا پارامترهای الگوریتم تعیین می‌گردد. پارامترهای الگوریتم HS شامل اندازه حافظه هارمونی[۵] (*HMS*) (تعداد بردارهای حل در حافظه)، نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی[۶] (*HMCR*)، نرخ تطبیق گام[۷] (*PAR*)، فاصله پهنای باند[۸] (*BW*) و تعداد بهبودها[۹] (*NI*) (شرط توقف این روش حل) هستند.

۲. جمعیتی از بردارهای حل مطابق **Error! Reference source not found.** در ماتریس حافظه الگوریتم HS شامل *HMS* بردار حل به صورت تصادفی ثبت می‌گردد. مؤلفه‌های هر بردار حل باید در محدوده آن قرار داشته باشد.

۳. در این مرحله بردار حل جدید تولید می‌شود. روند ایجاد هر مؤلفه مطابق با سه قاعده است. قاعده اول، قاعده در نظرگرفتن حافظه است. در این قاعده اگر مقدار rand (مقداری تصادفی بین صفر و یک از تابع توزیع احتمال یکنواخت است) از *HMCR* کوچک‌تر باشد، مقدار مؤلفه i–ام حل جدید از مؤلفه i–ام یکی از حل‌های موجود در حافظه به صورت تصادفی مقداردهی می‌شود. در غیر این صورت مطابق با قاعده سوم (انتخاب تصادفی[۱۰]) مقدار مؤلفه به صورت تصادفی از

www.SID.ir

Archive of SID

محدوده مشخص آن مؤلفه مقداردهی می‌شود. از قاعده دوم الگوریتم (تطبیق گام[۱۱]) زمانی که قاعده اول اجرا شد استفاده می‌شود که مطابق با آن تغییری متناسب با مقدار *BW* در مقدار مؤلفه حل جدید درصورتی که مقدار rand از *PAR* کوچک‌تر باشد، ایجاد می‌شود.

٤. اگر مقدار تابع هدف حاصل از بردار حل جدید از مقدار تابع هدف بدترین حل موجود در حافظه بهتر بود، جایگزین آن در حافظه هارمونی می‌گردد (حافظه به روز می‌شود).

٥. فرایند بالا ادامه می‌یابد تا شرط توقف (تعداد بردارهای جدید ایجاد شده) حاصل گردد.

۱-۲-۴- الگوریتم جستجوی هماهنگی چند هدفه[۷] (MOHS)

گام‌های روش جستجوی هماهنگی چند هدفه به شرح زیر است:

۱. تنظیم مقادیر اولیه مسئله و پارامترهای الگوریتم

۲. ایجاد حافظه الگوریتم و تخصیص مقادیر اولیه به آن

۳. تعیین مقادیر توابع هدف به هر بردار حل در حافظه الگوریتم

٤. تعیین حل جدید با استفاده از قواعد ایجاد حل جدید که در بخشهای قبل توضیح داده شد.

٥. به روز کردن حافظه الگوریتم و انتخاب بهترین حافظه الگوریتم با ترکیب بردار حل‌های موجود در حافظه. به روز کردن حافظه در الگوریتم جستجوی هماهنگی چند هدفه متفاوت با به روز کردن حافظه در روش جستجوی هماهنگی ساده است. یک حافظه جدید الگوریتم با قواعد ایجاد حل توضیح داده شده در بالا ایجاد شده و با حافظه الگوریتم موجود به اندازه ۲*HMS بردار حل در اختیار داریم که در این صورت حافظه یکپارچه ساخته شده است. در این مطالعه، از رویکرد رتبه‌بندی و مرتب‌سازی غیرمغلوب پیشنهاد شده توسط دب و همکاران [۲۶] برای یافتن روش بهینه پارتو روی این حافظه یکپارچه استفاده می‌شود. هنگامی که رتبه‌بندی به بردارهای حل در حافظه یکپارچه اختصاص می‌یابد، با استفاده از معیار فاصله ازدحام، رتبه‌بندی متنوع به بردارهای حل اختصاص می‌یابد که جبهه نامغلوب هستند. فاصله ازدحام نشانه‌ای از تراکم بردارهای حل است که یک بردار حل خاص را احاطه کرده است. اندازه‌گیری فاصله ازدحام عموماً براساس میانگین فاصله دو بردار حل در دو طرف بردار حل، در امتداد هر یک از اهداف است. در نهایت بهترین حافظه الگوریتم که اندازه آن *HMS* بردار حل است، از حافظه هماهنگی یکپارچه شده با توجه به رتبه‌بندی آن‌ها برای ایجاد حل جدید در نسل بعدی ایجاد می‌شوند. برای انتخاب دقیق به تعداد *HMS* بردار حل از آخرین جبهه نامغلوب و پرکردن حافظه الگوریتم، عملگر مقایسه‌ای ازدحامی مورد نیاز است.

www.SID.ir

Archive of SID

٦. گام‌های ۴ و ۵ تا ارضای شرایط توقف ادامه پیدا می‌کنند. حل‌های نامغلوب نهایی موجود در حافظه الگوریتم، جواب‌های بهینه پارتو هستند.

۳-۴- الگوریتم جستجوی هماهنگی چندهدفه پیشنهادی[۸] (IMOHS)

این الگوریتم بعد از تحقیقات گسترده بر روی روش‌های مرور شده در ادبیات موضوع روش HS ارائه شد. در این روش، نوآوری‌های جدید در قسمت تنظیم پارامترها و تغییراتی در روند مقدار پارامترهای *HMCR* و *PAR* در طول تکرارهای الگوریتم ارائه شده است. در جستجوی حل‌های بهینه روشی کاراتر است که در ابتدای جستجو، تنوع کل فضای حل را در نظر بگیرد، یعنی کل فضای حل را شناسایی کند و بیشتر به سمت فضاهایی که با احتمال بیشتری بهینگی در آن قرار دارد، حرکت کند. سپس با دو نوع بهینگی ممکن است مواجه شود: بهینگی محلی[۹] و بهینگی سراسری[۱۰]

در صورتی که الگوریتم در دام بهینگی محلی قرار بگیرد، می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های جستجوی محلی از آن منطقه به صورتی جدا شود. در این صورت، حل‌ها با سرعت بالاتری به مقدار هدف می‌رسند. مطابق با توضیحات ارائه شده در این بخش، الگوریتم HS این امکان را دارد که در زمان مناسبی محدوده‌های عملکردی بالا در فضای حل را شناسایی کند اما در اجرای جستجوی محلی در مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی، کارا نیست که در این مواقع در بهینگی محلی قرار می‌گیرد. یکی از تکنیک‌های مورد استفاده جهت غلبه بر این مشکل، روش فاز شروع مجدد است. این روش سبب افزایش پراکندگی فضای حل می‌شود.

اگر الگوریتم بعد از طی تکرارهایی بهترین مقدار بهبود نیابد به صورت زیر عمل می‌کند:

گام۱. حافظه هارمونی بر اساس بهترین مقدار تابع هدف به صورت افزایشی مرتب می‌شود.

گام۲. به اندازه درصد درنظرگیری فاز شروع مجدد[۱۶] حل‌های اول لیست حافظه مرتب شده بدون تغییر باقی می‌مانند، سپس برای حافظه باقیمانده، نیمی را با استفاده از عملگر جهش تک نقطه‌ای روی درصد فاز شروع مجدد تولید شده[۱۷] حافظه انتخابی و نیمی دیگر را بر اساس محدوده مؤلفه‌های هر حل به طور تصادفی ایجاد می‌کند.

۱-۳-۴- تنظیم پارامترها در الگوریتم جستجوی هماهنگی پیشنهادی

در الگوریتم جستجوی هماهنگی پیشنهادی تعدادی پارامتر شامل تعداد بردارهای حافظه

www.SID.ir

Archive of SID

الگوریتم (hms)، حداقل نرخ تنظیم گام (PAR_{min})، حداکثر نرخ تنظیم گام (PAR_{max})، حداقل نرخ در نظرگرفتن حافظه ($hmcr_{min}$) و حداکثر نرخ در نظرگرفتن حافظه (($hmcr_{max}$) است که باید با مقادیر مناسب تنظیم شوند. منظور از تنظیم پارامتر، انتخاب بهترین مقدار برای پارامترها به نحوی است که عملکرد الگوریتم در سطح بهینه قرار گیرد. در الگوریتم پیشنهادی، دو نوع تنظیم پارامتر وجود دارد که شامل تنظیم پویا و تنظیم ترتیبی به روش تاگوچی است.

- **تنظیم پویا**

پارامترهای PAR و $HMCR$ به‌صورت پویا در طول فرایند جستجو که با فرمول‌های ریاضی ۳۴ و ۳۵ ارائه شده، به صورت خطی تغییر می‌کنند.

$$PAR(t) = PAR_{\max} - \frac{PAR_{\max} - PAR_{\min}}{T} \times t \quad (۳۴)$$

$$HMCR(t) = HMCR_{\min} + \frac{HMCR_{\max} - HMCR_{\min}}{T} \times t \quad (۳۵)$$

- **تنظیم پارامترها با روش تاگوچی**

ترکیب مناسب پارامترها در کیفیت جواب نهایی الگوریتم تأثیر فراوانی دارد. از این رو، به‌منظور مشخص کردن پارامترهای بهتر، بهترین ترکیب پنج پارامتر محاسبه شود. با توجه به سطوح بهینه هر پارامتر که ۳ سطح است در مجموع 3^5 یا ۲۴۳ ترکیب پارامتر جهت هر اجرای مسئله وجود دارد که با توجه به تعداد ده نمونه مسئله و تکرار سه مرتبه از هر آزمایش، کل آزمایش‌ها برابر با ۲۴۳*۱۰*۳ می‌شود که معین کردن بهترین ترکیب با این تعداد ۷۲۹۰ آزمایش، مستلزم صرف زمان بسیار زیاد و نامعقول است. لذا، از تکنیک طراحی آزمایش تاگوچی استفاده می‌شود.

۴-۴- معیارهای عملکردی

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های چند هدفه فراابتکاری لازم است که معیارهایی تعریف شود [۲۷]. به‌عبارت دیگر، به‌منظور مقایسه نتایج بدست آمده توسط الگوریتم‌ها، برخی از معیارهای مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری توسط توکلی مقدم و همکاران [۲۸] ارائه شده است. در این مقاله، سه معیار عملکرد در نظر گرفته شده است.

- تعداد حل‌های پارتو[۱۷](NPS): این معیار تعداد حل‌های بهینه پارتو در هر الگوریتم را نشان می‌دهد. هر چه تعداد NPS در یک الگوریتم بیشتر باشد، کارایی بهتر الگوریتم را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

- متوسط فاصله ایده‌آل[۱۸] (MID): میانگین فاصله جواب‌های پارتو از مبدأ مختصات (صفر) با این معیار محاسبه می‌شود. اگر این شاخص در هر الگوریتم کمتر باشد، اثربخشی آن الگوریتم بیشتر خواهد بود.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i}{n} \quad (۳۶)$$

$$c_i = \sqrt{f_{1i}^2 + f_{2i}^2} \quad (۳۷)$$

f_{1i}: تابع هدف اول f_{2i} : تابع هدف دوم

- معیار پراکندگی[۱۹] (SNS): یکنواختی نقاط پخش شده در مجموعه جواب‌ها با این معیار اندازه‌گیری می‌شود. این معیار توسط اسکات ارائه شده است. برای هر الگوریتم کمتر باشد، آن الگوریتم بهتر خواهد بود:

$$y = \left[\frac{1}{N-1} \times \sum_{i=1}^{N} \left(MID - c_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۳۸)$$

۵-۴- نمونه مسائل

به‌منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد دو الگوریتم فراابتکاری، ده نمونه مسئله با اندازه‌های متفاوت در تعداد کار، ماشین، ایستگاه و دوره در نظر گرفته شده است. جدول ۱ ابعاد نمونه‌ها را نشان می‌دهد. پارامترها به‌طور تصادفی با توجه به محدوده پارامترهای تعریف شده در جدول ۲ تولید می‌شوند. مسائل نمونه‌ای بر اساس مقاله [۸] طراحی شده‌اند. برای از بین بردن عوامل تصادفی، هر مسئله سه بار به طور مستقل اجرا می‌شود. مستقل بودن هر تکرار به این معنی است که پس از هر بار اجرا، نتایج کاملاً مستقل بوده و هیچ ارتباطی با یکدیگر ندارند.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- ابعاد نمونه هر مسئله

			شماره مسئله									
			۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
اندیس‌ها	i, j	تعداد کارها	۲	۳	۴	۵	۶	۶	۷	۷	۱۰	۱۵
	s	تعداد ایستگاه‌ها	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۴	۶
	M	تعداد ماشین‌ها	۳	۲۰	۴۰	۵۰	۸۰	۱۰	۱۲۰	۱۵۰	۲۰۰	۵۰۰
	T	تعداد دوره‌ها	۱	۲	۳	۳	۳	۵	۵	۵	۵	۵

جدول ۲- حدود پارامترها برای تولید اعداد تصادفی

پارامتر	حدود مقادیر پارامتر	پارامتر	حدود مقادیر پارامتر	پارامتر	حدود مقادیر پارامتر
D_{tj}	$\sim U[1,5]$	BC_{tj}	$\tilde{U}[4000,5000]$	zm_{sjm}	$\sim U[1,6]$
dd_{tj}	$\sim U[400,800]$	PC_{tj}	$\sim U[12,40]$	zs_{jm}	$\sim U[1,5]$
$\cos t_{RFPsm}$	$\tilde{U}[12000,13000]$	$\cos t_{RFIsm}$	$\tilde{U}[8000,12000]$	zt_{sm}	$\sim U[2,4]$
HC_{tj}	$\sim U[20,24]$	P_{jms}	$\sim U[20,35]$	pro_{sm}	$\tilde{U}[0.4,.09]$
pp'_{jkms}	$\sim U[20,35]$	zp_{sm}	$\sim U[1,5]$	$UBRFI_{sm}$	$\tilde{U}[0.8,0.85]$
$st_{sjkjk'm}$	$\sim U[10,15]$	zi_{sm}	$\sim U[1,5]$	$LBRFP_{sm}$	$\tilde{U}[0.6,0.7]$
$UBRFP_{sm}$	$\sim U[0.8,0.9]$	$LBRFI_{sm}$	$\sim U[0.5,0.65]$	$capC^{\max}$	۱۰۰۰

۶-۴- نحوه نمایش حل

یکی از مهمترین تصمیم‌ها در طراحی روش فراابتکاری این است که حل‌های مسئله به چه صورت نمایش داده شوند و چگونه به حل‌های واقعی ساختار مسئله تبدیل شود. نمایش جواب باید به شکلی باشد که موجب کاهش هزینه‌ها و زمان استفاده از الگوریتم شود. در این مسئله هر حل به صورت یک بردار ۴ بخشی تشکیل شده است. بخش اول در ارتباط با بخش توالی کارها روی ماشین‌ها است. بخش دوم مرتبط با توالی ماشین‌ها است. بخش سوم کروموزوم

www.SID.ir

Archive of SID

توالی ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد و بخش آخر توالی بخش‌های هر کار را نشان می‌دهد. هر مؤلفه بر اساس مقادیر تصادفی در بازه [۰,۱] به دست می‌آید.

Job(i)						Machine(m)			Stage(s)		Job(j)					
۰/۳	۰/۲	۰/۵	۰/۸	۰/۱	۰/٤	۰/۱	۰/۸	۰/٤	۰/٦	۰/۱	۰.٦	۰/٤	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۵

شکل ۲- نحوه نمایش حل

با قاعده موقعیت بزرگترین مقدار[۲۰] (LPV) به جایگشت از کارها تبدیل می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است.

Job(i)						Machine(m)			Stage(s)		Job(j)					
٤	۳	٦	۱	۲	۵	۲	۳	۱	۱	۲	۱	٦	۲	٤	۳	۵

شکل ۳- نحوه نمایش حل بعد از بکارگیری قاعده LPV

۷-۴- تعیین پارامترهای بهینه الگوریتم با روش تاگوچی

به‌منظور حل مسئله پیشنهادی، دو الگوریتم فراابتکاری شامل MOHS و IMOHS با هم مقایسه می‌شوند. برای هر کدام از این الگوریتم‌ها، با استفاده از آزمایش‌های مقدماتی پارامترهای مناسبی انتخاب شده‌اند، که در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. سپس با استفاده از روش تاگوچی بهترین پارامتر و بهترین ترکیب از پارامترها و عملگرها انتخاب می‌شوند.

جدول ۳- فاکتورها و سطوح کاندید در الگوریتم جستجوی هماهنگی چندهدفه پیشنهادی (IMOHS)

اندازه حافظه الگوریتم	HMS	HMS(۱) : ۵ HMS(۲) : ۱۰ HMS(۳) : ۱۵
حداقل نرخ در نظرگیری حافظه الگوریتم	$HMCR_{min}$	$HMCR_{min}$(۱) : ۲۰% $HMCR_{min}$(۲) : ۵۰%
حداکثر نرخ در نظرگیری حافظه الگوریتم	$_{max}HMCR$	$HMCR_{max}$(۱) : ۸۰% $HMCR_{max}$(۲) : ۹۹%
حداقل نرخ تنظیم گام	PAR_{min}	PAR_{min}(۱) : ۲۰%

www.SID.ir

Archive of SID

PAR_{min}(۲) : ۴۰%		
PAR_{max}(۱) :۵۰% PAR_{max} (۲) :۹۰%	PAR_{max}	حداکثر نرخ تنظیم گام

جدول ۴- فاکتورها و سطوح کاندید در الگوریتم جستجوی هماهنگی چند هدفه (MOHS)

HMS(۱) : ۵ HMS(۲) : ۱۰ HMS(۳) : ۱۵	HMS	اندازه حافظه الگوریتم
HMCR(۱) : ۵۰% HMCR(۲) : ۸۰% HMCR(۳) : ۹۹%	HMCR	نرخ در نظرگیری حافظه الگوریتم
PAR(۱) : ۱۰% PAR(۲) :۵۰% PAR(۳) : ۹۰%	PAR	نرخ تنظیم گام
BW(۱) : ۰.۲ BW(۲) : ۰.۵ BW(۳) : ۰.۹۹	BW	پهنای باند

۱-۷-۴- انتخاب بهترین فاکتورها

در هر اجرای آزمایش مقدار تابع هدف به‌دست آمده باید مطابق روش تاگوچی به نسبت سیگنال به نویز که در حکم متغیر پاسخ است، تبدیل شود و مطابق تغییرات آن تحلیل صورت گیرد. از آنجا که هدف هر اجرا حداقل کردن تابع هدف است، لذا نوع سیگنال به نویز زیر انتخاب می‌شود.

$$S/N_s = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \qquad (۳۹)$$

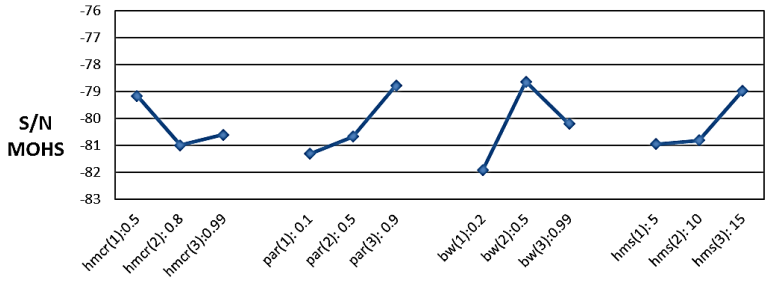
در روش تاگوچی نسبت S/N در حکم متغیر نسبت است که تابع هدف در هر اجرا به این نسبت تبدیل می‌شود تا بر طبق آن تصمیم‌گیری شود. در این پژوهش با توجه به نسبت S/N_s انتخاب شده مناسب ماهیت مسائل این پژوهش، کمترین نسبت S/N_s برای هر فاکتور در هر الگوریتم، به‌عنوان فاکتور بهینه انتخاب می‌شود.

www.SID.ir

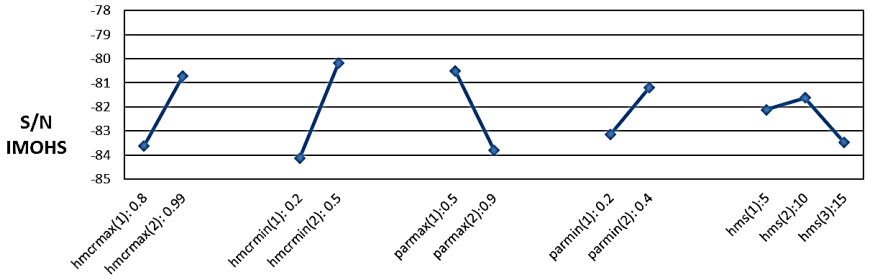
Archive of SID

۲-۷-۴- انتخاب فاکتورهای بهینه الگوریتم‌های حل

بعد از اجرای آزمایش‌ها، نتایج حاصل از الگوریتم‌ها به روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی جهت تنظیم پارامترها، به صورت نسبت S/Ns در شکلهای ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴- نمودارمیانگین نسبت S/N برای هر سطح از فاکتورالگوریتم MOHS در حل مدل



شکل ۵- نمودارمیانگین نسبت S/N برای هر سطح از فاکتورالگوریتم IMOHS در حل مدل

با توجه به شکل‌های بالا، بهترین فاکتورها در جدول ۵ جهت اجرای نهایی الگوریتم‌ها برای حل مدل نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵- پارامترهای بهینه الگوریتم‌های حل با روش تاگوچی

	اندازه حافظه الگوریتم	نرخ در نظرگیری حافظه الگوریتم		نرخ تنظیم گام		پهنای باند	
		حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
MOHS	۵	۰,۸		۰,۱		۰,۲	
IMOHS	۱۵	۰,۸	۰,۲	۰,۹	۰,۲	-	

۵- نتایج محاسباتی

برای ارزیابی عملکرد روشهای فراابتکاری در مقابل روش حل دقیق، روش اپسیلون محدودیت برای حل نمونه مسائل توسعه داده می‌شود. به همین منظور، تعدادی از نمونه مسائل با ابعاد کوچک که در بخش قبل تعریف شده برای مقایسه روش‌های فرابتکاری و اپسیلون محدودیت استفاده می‌شود. جدول نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.

جدول ۶- حل نمونه مسائل کوچک با روش حل دقیق و فراابتکاری

نمونه مسئله	اپسیلون محدودیت				MOHS				IMOHS			
	NPS	MID	SNS	T(s)	NPS	MID	SNS	T(s)	NPS	MID	SNS	T(s)
۱	۲	۶۸۸۱	۷۱۶	۴.۴	۲	۶۸۸۱	۷۱۶	۲.۹	۲	۶۸۸۱	۷۱۶	۲.۶
۲	-	-	-	-	۷	۵۱۲۳۵	۴۲۰۵	۸	۱۲	۴۹۸۵۶	۴۱۵۸	۹
۳	-	-	-	-	۱۲	۶۳۴۷۹	۵۱۲۸۴	۱۸	۹	۶۰۱۲۵	۳۶۵۴۲	۲۱

همان‌طور که در جدول نشان داده شده، روش اپسیلون، حل بهینه را در اولین نمونه مسئله به‌دست می‌آورد. با افزایش ابعاد مسئله و افزایش پیچیدگی مسئله، روش حل دقیق اپسیلون بعد از حدود ۳۲۴۰۰۰۰۰ ثانیه به جواب نمی‌رسد. از آنجا که مسئله NP-hard است بنابراین، برای حل مسئله با اندازه بزرگ از الگوریتم‌هایی که می‌توانند مدل را در زمان مناسب و هزینه کمتر حل کنند، پیشنهاد می‌شوند. ابتدا، با استفاده از مقادیر بهینه پارامتر به دست آمده با روش تاگوچی، مسائل نمونه‌ای تولید شده توسط هر الگوریتم چندین بار حل می‌شود. سپس، از معیارهای مقایسه الگوریتم‌های پیشنهادی برای مقایسه نتایج به‌دست آمده توسط الگوریتم‌ها استفاده می‌شود. در نمونه مسائل ایجاد شده جهت انجام آزمایش‌ها با تغییر ابعاد مانند تعداد کارها و ماشین‌ها به دلیل متفاوت شدن و غیر یکسان شدن مقیاس مقدار توابع هدف، از درصد انحراف نسبی[۲۱](RPD) در رابطه جهت مقایسه الگوریتم‌ها استفاده شده است [۲۹].

www.SID.ir

Archive of SID

$$RPD = \frac{ALG_{sol} - Min_{sol}}{Min_{sol}} \times 100 \qquad (۴۰)$$

که ALG_{sol} جواب حاصل از الگوریتم و Min_{sol} کمینه مقدار جواب‌هاست. در این نسبت، هرچه RPD کمتر باشد، کیفیت جواب و عملکرد الگوریتم بهتر است. بعد از خلاصه‌کردن نتایج RPD عملکرد الگوریتم‌ها در قالب نمودار و جدول نیز رسم شده است.

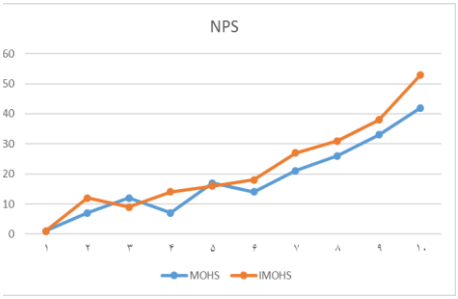
جدول ۷- نتایج نرمالایز شده برای نمونه مسائل مختلف

	MOHS			IMOHS		
نمونه مسئله	MID	NPS	SNS	MID	NPS	SNS
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰.۰۵۳۶	۰.۰۵۱۴	۰.۱۱۲۴	۰.۰۲۶۳	۰	۰.۰۹۴۲
۳	۰.۰۷۸۵	۰.۰۸۴۶	۰.۱۴۱۲	۰.۰۶۵۲	۰	۰.۰۵۹۲
۴	۰.۰۶۶۵	۰.۱۰۲۵	۰.۱۱۳۹	۰.۰۷۴۷	۰	۰.۱۴۴۳
۵	۰۱۱۵۲	۰.۰۴۸۵	۰.۱۸۵۴	۰.۱۵۴۷	۰	۰.۱۲۳۷
۶	۰.۰۷۱۱	۰.۰۲۵۴	۰.۱۵۷۴	۰.۰۲۶۲	۰	۰.۲۱۴۷
۷	۰.۰۹۴۵	۰.۰۱۰۷	۰.۲۱۷۳	۰.۰۷۵۱	۰	۰.۰۵۸۹
۸	۰.۱۳۴۲	۰.۰۱۶۵	۰.۲۲۱	۰.۷۴۶۹	۰	۰.۱۴۱۸
۹	۰.۲۶۵۲	۰.۰۳۱۴	۰.۲۲۴۵	۰.۱۸۶۷	۰	۰.۱۶۸۵
۱۰	۰.۲۱۶۹	۰.۰۱۲۵	۰.۱۹۲۳	۰.۱۶۲۵	۰	۰.۲۴۵۷

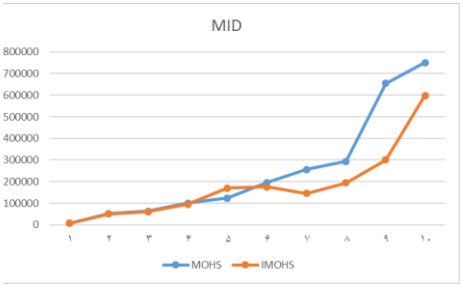
همان‌طور که قبلاً ذکر شد، معیار SNS مهم‌ترین معیار مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه است. در حالی که، در ۶۰٪ از کل نمونه مسائل، IMOHS عملکرد بهتری در معیار تنوع دارد. متریک MID الگوریتم IMOHS در ۹۰٪ نمونه مسائل از MOHS بهتر است. در همه نمونه مسائل، IMOPSO در تعداد جواب‌های پارتو عملکرد بهتری دارد. شکل‌های ۶ تا ۸ مقایسه الگوریتم‌ها با در نظر گرفتن معیارهای عملکردی را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

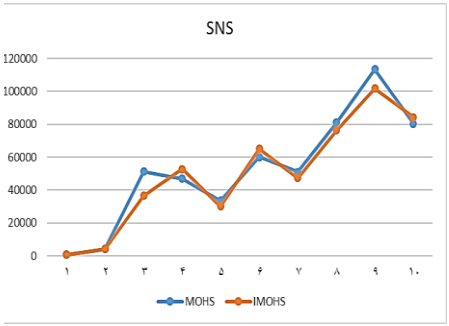


شکل ۶- مقایسه روش‌های فرابتکاری با روش معیار عملکردی NPS

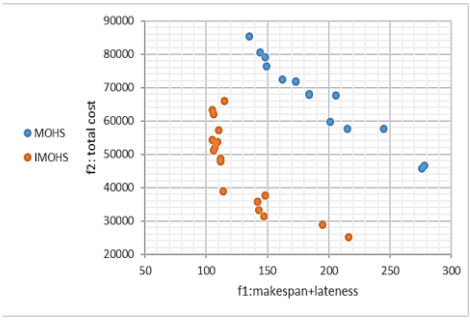


شکل ۷- مقایسه روش‌های فرابتکاری با روش معیار عملکردی MID

شکل ۹ جبهه‌های پارتو حاصل از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل نمونه مسئله شماره ۶ را نشان می‌دهد. در آنها ۱۶ راه‌حل برای IMOHS و ۱۳ راه‌حل برای MOHS وجود دارد. برای جلوگیری از شکل‌های اضافه، نمونه مسئله شماره ۶ انتخاب شده است. جبهه‌های پارتو از راه‌حل‌های بهینه در شکل ۹، تنوع مناسبی از راه‌حل‌های تولید شده برای MOHS و IMOHS را نشان می‌دهد.



شکل ۸- مقایسه روش‌های فرابتکاری با روش عملکردی SNS



شکل ۹- جبهه جواب‌های پارتو روش‌های فراابتکاری در نمونه مسئله شماره ۶

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل جدیدی برای یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی ارائه شد. در مدل پیشنهادی، محدودیت‌های نگهداری و تعمیرات برای به‌دست آوردن برنامه‌ریزی مناسب و

www.SID.ir

Archive of SID

شدنی فعالیت‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات در نظر گرفته شده است. این مسئله در صنایعی که با نگهداری و تعمیرات چندمنظوره سروکار دارند، قابل استفاده است. از این رو علاوه بر ماشین‌ها به‌عنوان منبع اصلی نگهداری، قالب‌ها نیز به‌عنوان منبع دیگری در نظر گرفته شدند. مدل ارائه شده با روش اپسیلون محدودیت با نرم‌افزار GAMS در نمونه مسائل با ابعاد کوچک حل شد. در حالی که با بکارگیری این روش، زمان محاسباتی برای مسائل با ابعاد بزرگ مسئله افزایش یافت. بنابراین، الگوریتم چند هدفه فراابتکاری برای حل مدل پیشنهاد داده شد. از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترها و یافتن بهترین مقدار برای هر پارامتر استفاده شده است. نمونه مسائلی به‌طور تصادفی برای مقایسه و ارزیابی دو الگوریتم تولید شد. برای مقایسه نتایج به‌دست آمده از نظر معیارهای عملکردی مختلف، از دو الگوریتم چند هدفه یعنی الگوریتم MOHS و IMOHS نیز استفاده شده است. معیارهای عملکردی شامل سه معیار MID، NPS و SNS است. در مجموع، با در نظر گرفتن این معیارها، روش IMOHS از الگوریتم MOHS در اکثر نمونه مسائل بهتر عمل کرد. از لحاظ معیار NPS، در همه نمونه مسائل، از لحاظ معیار MID در نود در صد موارد و از لحاظ معیار SNS در شصت درصد موارد روش IMOHS نسبت به روش MOHS برتری دارد.

به‌عنوان ایده برای تحقیقات آینده، می‌توان تابع هدف دیگری را نیز برای پوشش مسائل دنیای واقعی به تابع هدف فعلی اضافه کرد. در نظر گرفتن ویژگی عدم قطعیت مسائل دنیای واقعی، برای این منظور قابل توجه است. توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری جدید و همچنین مدل‌سازی مسئله در محیط کارکارگاهی می‌تواند توسط محققان علاقه‌مند در این زمینه مورد توجه قرار گیرد.

۷- پی‌نوشت‌ها

۱. Makespan
۲. Particle swarm optimization
۳. Serial-Batch
٤. Harmony search
٥. Harmony memory size
٦. Harmony memory consideration rate
۷. Pitch adjustment rate
۸. Band width
۹. Number of Improvisation
۱۰. Random Selection
۱۱. Pitch Adjustment
۱۲. Multi objective harmony search
۱۳. Improved multi objective harmony search
۱٤. Local Optimum
۱٥. Global Optimum
۱٦. Restart phase consideration rate
۱۷. Regenerate Restart phase rate
۱۷. Number of Pareto Solutions
۱۸. Mean Ideal Distance
۱۹. Spread of Non-Dominance

www.SID.ir

Archive of SID

Solution
۲۰. Largest Position Value
۲۱. Relative Percent Difference

۸- منابع

[۱] parsaei M, nili ahmadabadi M. *Prioritizing Maintenance Strategies with a Combination Approach DEMATEL-ANP-COPRAS in Auto Parts Manufacturing Industry Case Study: Milad Company of Qom*, Journal of Modern Research in Decision Making, ,Volume: ۱ Issue: ۲, ۲۰۱۸- ۲۹:۵۰.

[۲] Ramezanian, R., M. Saidi-Mehrabad, and E. Teimoury, *A mathematical model for integrating lot-sizing and scheduling problem in capacitated flow shop environments.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, ۲۰۱۳. ٦٦(۱-٤): p. ۳٤۷-۳٦۱.

[۳] Gómez Urrutia, E.D., R. Aggoune, and S. Dauzère-Pérès, *Solving the integrated lot-sizing and job-shop scheduling problem.* International Journal of Production Research, ۲۰۱٤. ٥۲(۱۷): p. ٥۲۳٦-٥۲٥٤.

[٤] Ramezanian, R., S.F. Sanami, and M.S. Nikabadi, *A simultaneous planning of production and scheduling operations in flexible flow shops: case study of tile industry.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, ۲۰۱٦: p. ۱-۱٥.

[٥] Najid, N.M., M. Alaoui-Selsouli, and A. Mohafid, *An integrated production and maintenance planning model with time windows and shortage cost.* International journal of production research, ۲۰۱۱. ٤۹(۸): p. ۲۲٦٥-۲۲۸۳.

[٦] Aghezzaf, E.-H. and N.M. Najid, *Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems.* Information Sciences, ۲۰۰۸. ۱۷۸(۱۷): p. ۳۳۸۲-۳۳۹۲.

[۷] Nourelfath, M. and E. Châtelet, *Integrating production, inventory and maintenance planning for a parallel system with dependent components.* Reliability Engineering & System Safety, ۲۰۱۲. ۱۰۱: p. ٥۹-٦٦.

[۸] Ramezanian, R., M. Saidi-Mehrabad, and P. Fattahi, *MIP formulation and heuristics for multi-stage capacitated lot-sizing and scheduling problem with availability constraints.* Journal of Manufacturing Systems, ۲۰۱۳. ۳۲(۲): p. ۳۹۲-٤۰۱.

[۹] Fitouhi, M.-C. and M. Nourelfath, *Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for multi-state systems.* Reliability Engineering & System Safety, ۲۰۱٤. ۱۲۱: p. ۱۷٥-۱۸٦.

[۱۰] Aghezzaf, E.H., M.A. Jamali, and D. Ait-Kadi, *An integrated production and preventive maintenance planning model.* European journal of operational research, ۲۰۰۷. ۱۸۱(۲): p. ٦۷۹-٦۸٥.

[۱۱] Yalaoui, A., K. Chaabi, and F. Yalaoui, *Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems.* Information Sciences, ۲۰۱٤. ۲۷۸: p. ۸٤۱-۸٦۱.

[۱۲] Wolosewicz, C., S. Dauzère-Pérès, and R. Aggoune, *A Lagrangian heuristic for an integrated lot-sizing and fixed scheduling problem.* European Journal of Operational Research, ۲۰۱٥. ۲٤٤(۱): p. ۳-۱۲.

[۱۳] An, Y.-W. and H.-S. Yan, *Lagrangean relaxation approach to joint optimization for production planning and scheduling of synchronous assembly lines.* International Journal of Production Research, ۲۰۱٦. ٥٤(۲۲): p. ٦۷۱۸-٦۷۳٥.

[۱٤] Menezes, G.C., G.R. Mateus, and M.G. Ravetti, *A branch and price algorithm to solve the integrated production planning and scheduling in bulk ports.* European Journal of

www.SID.ir

Archive of SID

Operational Research, ۲۰۱۷. ۲۵۸(۳): p. ۹۲٦-۹۳۷.

[۱۵] Cho, H.-M. and I.-J. Jeong, *A two-level method of production planning and scheduling for bi-objective reentrant hybrid flow shops.* Computers & industrial engineering, ۲۰۱۷. ۱۰٦: p. ۱۷٤-۱۸۱.

[۱٦] Mahdieh, M., A. Clark, and M. Bijari, *A novel flexible model for lot sizing and scheduling with non-triangular, period overlapping and carryover setups in different machine configurations.* Flexible Services and Manufacturing Journal, ۲۰۱۸. ۳۰(٤): p. ۸۸٤-۹۲۳.

[۱۷] Hu, Z. and G. Hu, *A multi-stage stochastic programming for lot-sizing and scheduling under demand uncertainty.* Computers & Industrial Engineering, ۲۰۱۸. ۱۱۹: p. ۱۵۷-۱٦٦.

[۱۸] Bhosale, K. and P. Pawar, *Material flow optimisation of flexible manufacturing system using real coded genetic algorithm (RCGA).* Materials Today: Proceedings, ۲۰۱۸. ۵(:(۲p. ۷۱٦۰-۷۱٦۷.

[۱۹] Alimian, M., V. Ghezavati, and R. Tavakkoli-Moghaddam, *New integration of preventive maintenance and production planning with cell formation and group scheduling for dynamic cellular manufacturing systems.* Journal of Manufacturing Systems, ۲۰۲۰. ۵٦: p. ۳٤۱-۳۵۸.

[۲۰] Han, J., et al., *Integrated production planning and scheduling under uncertainty: A fuzzy bi-level decision-making approach.* Knowledge-based systems, ۲۰۲۰. ۲۰۱: p. ۱۰٦۰۵٦.

[۲۱] Naderi, B. and R. Ruiz, *The distributed permutation flowshop scheduling problem.* Computers & Operations Research, ۲۰۱۰. ۳۷(٤): p. ۷۵٤-۷٦۸.

[۲۲] Khodabandeh M, Hejazi Taghanaki S.R. Rasti-Barzoki M. *A Heuristic Method to Minimize Total Weighted Number of Tardy Jobs and Transportation Costs for an Integrated Production and Distribution Problem with VRP*, Journal of Modern Research in Decision Making,Volume: ۳ Issue: ۳, ۲۰۱۸- ۵۵:۷۸

[۲۳] Zhang, Z., Q. Tang, and M. Chica, *Maintenance costs and makespan minimization for assembly permutation flow shop scheduling by considering preventive and corrective maintenance.* Journal of Manufacturing Systems, ۲۰۲۱. ۵۹: p. ۵٤۹-۵٦٤.

[۲٤] Geem, Z.W., J.H. Kim, and G.V. Loganathan, *A new heuristic optimization algorithm: harmony search.* simulation, ۲۰۰۱. ۷٦(۲): p. ٦۰-٦۸.

[۲۵] Mahdavi, M., M. Fesanghary, and E. Damangir, *An improved harmony search algorithm for solving optimization problems.* Applied mathematics and computation, ۲۰۰۷. ۱۸۸(۲): p. ۱۵٦۷-۱۵۷۹.

[۲٦] Deb, K., et al. *A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II.* in *International conference on parallel problem solving from nature*. ۲۰۰۰. Springer.

[۲۷] Omid A, Azar A. Nayeri M. D. Mghbel A. *Developing a network Data Envelopment Analysis approach to compare the environmental efficiency of active industries in Tehran*, Management Research in Iran, Volume: ۳ Issue: ۲۵, ۲۰۲۱- ۱۹۳:۲۱٦.

[۲۸] Tavakkoli-Moghaddam, R., A. Rahimi-Vahed, and A.H. Mirzaei, *A hybrid multi-objective immune algorithm for a flow shop scheduling problem with bi-objectives: weighted mean completion time and weighted mean tardiness.* Information Sciences, ۲۰۰۷. ۱۷۷(۲۲): p. ۵۰۷۲-۵۰۹۰.

[۲۹] Olfat, L. T*otal Tardiness Minimization in Flow Shop with Intermediate Due Dates*, Management Research in Iran, Volume: ۲ Issue: ۳, ۲۰۱۸- ۲۵:٤۷.

www.SID.ir