

زمانبندی یکپارچه تولید سفارشات در محیط تولیدی تک ماشینه و حمل هوایی با در نظر گرفتن پروازهای چارتر و پنجره زمانی تحویل با استفاده از دو الگوریتم فرا ابتکاری کارا

مژگان موسوی^۱، مصطفی حاجی آقائی کشتلی^{۲*}، رضا توکلی مقدم^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، مازندران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، مازندران، ایران

۳- استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

رسید مقاله: ۳ مهر ۱۳۹۵

پذیرش مقاله: ۲۰ فروردین ۱۳۹۶

چکیده

یکی از مهم ترین مسایل در مدیریت زنجیره تامین، یکپارچه سازی زنجیره تامین برای کاهش هزینه های کل زنجیره است. در این مقاله، مدل ریاضیاتی از نوع برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط متشکل از دو سطح از زنجیره تامین شامل کارگاه تولیدی و مراکز توزیع بررسی شده است. هدف تعیین توالی سفارشات در محیط تولیدی تک ماشینه و تخصیص سفارشات به پروازها می باشد به طوری که هزینه های تولید، حمل و نقل و نیز جریمه های دیرکرد و زودکرد تولید و تحویل کمینه گردد. همچنین در مدل ارائه شده کارخانه می تواند برخی از سفارش هایی را که از پرواز برنامه ریزی شده ی خود جا مانده اند از طریق پرواز اختصاصی با هزینه ی حمل بیش تر، تأمین کند. به دلیل پیچیدگی ذاتی مسایل بهینه سازی ترکیبی به ویژه زمانبندی تولید، دو روش فراابتکاری کارا شامل شیشه سازی تبرید و بهینه سازی ازدحام ذرات گسسته توسعه داده شد. همچنین به دلیل تاثیر مقدار پارامترهای هر یک از الگوریتم ها بر کیفیت جواب به دست آمده، مقادیر مناسب داده های مورد نیاز، با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی به دست می آید. در انتها، الگوریتم های پیشنهادی، با دو معیار کیفیت جواب به دست آمده و زمان رسیدن به جواب بهینه مورد مقایسه قرار گرفتند.

کلمات کلیدی: زمانبندی یکپارچه تولید-توزیع، زمانبندی تک ماشینه، حمل و نقل هوایی، طراحی آزمایش های تاگوچی، الگوریتم های فراابتکاری.

۱ مقدمه

محیط کسب و کار برای بنگاه های اقتصادی رقابتی است. توانایی رقابت در بنگاه های تولیدی ارتباط مستقیم با قابلیت پاسخگویی به تغییرات سریع در بازار دارد. آن ها می کوشند تا این قابلیت ها را از طریق یکپارچگی تمام

*عهده دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: mostafahaji@mazust.ac.ir

فرآیندهای موثر در زنجیره و مفاهیمی مانند تولید به موقع^۱ به دست آورند. محققان بسیاری در توسعه برخی از روش‌ها و اصطلاحات زمانبندی تولید و حمل، زنجیره تأمین و یکپارچگی بین اعضای زنجیره تأمین مشارکت داشته‌اند (پوندور و چن [۱]، لی و همکاران [۲]).

این مقاله به مسأله زمانبندی یکپارچه^۲ تولید و حمل با هدف کمینه کردن کل هزینه‌ها می‌پردازد. مسأله زمانبندی تولید و توزیع به صورت یک زمانبندی چند معیاره بررسی می‌شود. معیارها، شامل حداقل کردن هزینه‌های تولید، حمل و نقل، زودکرد و دیرکرد است. مسأله زمانبندی یکپارچه تولید و توزیع، یک مسأله چندجمله‌ای غیرقطعی سخت^۳ است. به سبب پیچیدگی ذاتی مسایل بهینه‌سازی ترکیبی و به خصوص مسایل زمانبندی تولید، استفاده از روش‌های ابتکاری برای حل آن‌ها، راهکاری مناسب در تولید جواب‌های قابل قبول و بهینه است؛ زیرا با افزایش ابعاد مسأله، روش‌های سنتی تعیین جواب بهینه، به دلیل زمان بر بودن، کارایی ندارند.

گسترش روز افزون توسعه صنعت حمل و نقل هوایی در دهه اخیر در جهان، به عنوان یکی از مهم‌ترین محورهای توسعه و رشد کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه مطرح است. بر طبق آمار سازمان بین‌المللی هوایی^۴ شاخص درآمد-تن-کیلومتر^۵ در سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۹ رشد ۴ برابری نسبت به دوره مشابه خود در گذشته داشته است. از دلایل این امر دستیابی به مزیت رقابتی با هدف کسب سهم بیش تر بازار، کاهش نرخ فاشدشدن برای کالاهای فاسدشدنی، عرضه کالاهای تندمصرف که نیازمندی به آن‌ها زیاد است و کاهش ریسک پذیری برای به صاحبان برخی مشاغل مانند کالاهای شکستنی (کالاهای پزشکی) که به دلیل ناهمواری برخی جاده‌های بین‌الملل و طولانی تر بودن مسیر انتخاب حمل هوایی برای آن‌ها جذابیت بیش تری دارد. اگرچه حمل هوایی نسبت به سایر روشهای حمل و نقل پر هزینه است؛ ولی با توجه به کم کردن هزینه جریمه تحویل (دیرکرد و زودکرد) می‌تواند مقرون به صرفه باشد. از آنجا که هدف به حداقل رساندن هزینه کل است، تعادل بین تمام هزینه‌های رخ داده در یک محصول برای انتخاب بهترین استراتژی مدنظر می‌باشد.

در مسأله مفروض، یک کارگاه تولیدی، محصولات تولیدی خود را از طریق حمل هوایی، به توزیع کنندگان (مشتریان) ارسال می‌دارد. محصولات طبق یک توالی معین در کارگاه، تولید می‌شوند. هواپیماهایی با هزینه‌ها و ظرفیت‌های متفاوت طبق زمانبندی از پیش تعیین شده، از مسیرهای مختلف سیر می‌کنند. برای برآوردن تقاضاهای مختلف توزیع کنندگان (مشتریان)، محصولات تولیدی به پروازهای مختلف، تخصیص داده می‌شود. انتخاب هر توالی و هر تخصیص منجر به هزینه‌های متفاوتی برای کل سیستم می‌گردد. این هزینه شامل هزینه‌های زودکرد و دیرکرد می‌باشد. هزینه‌های زودکرد و دیرکرد، در هر دو زمان حرکت پرواز و تحویل به مشتری، رخ می‌دهند. محصولاتی که زودتر از زمان حرکت پرواز، تولید می‌شوند، باعث تحمیل هزینه‌ی زودکرد حرکت می‌شوند. این هزینه شامل، هزینه‌ی ذخیره کردن سفارشات در کارگاه تولیدی و یا هزینه انتظار و انبارش محصول

¹ Just in time

² Integrated Scheduling

³ NP-Hard

⁴ International Civil Aviation Organization (ICAO)

⁵ RTK

در فرودگاه است. محموله‌هایی که پرواز زمانبندی شده‌شان را از دست می‌دهند، دچار هزینه دیرکرد حرکت خواهند شد که باعث تحمیل هزینه حمل بیشتری می‌شود. باید با توجه به موعد تحویل سفارشات به مشتریان و همچنین زمانبندی حرکت پروازها، توالی انجام و تولید سفارش‌ها را در کارگاه تولیدی طوری تعیین نمود تا مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد حرکت و تحویل کمینه گردد.

۲ پیشینه تحقیق

در مسأله زمانبندی هماهنگ تولید و حمل هوایی، پژوهش‌های اندکی وجود دارد. لی و همکاران [۳] نخستین محققانی بودند که مسأله همزمانی زمانبندی تک ماشین و حمل و هوایی با یک مقصد را، بررسی کردند. در این کار، کل مسأله به دو زیر مسأله زمانبندی حمل و نقل هوایی و زمانبندی تک ماشین تقسیم شده است. آن‌ها این مسأله را فرموله کرده و سپس یک الگوریتم ابتکاری رو به عقب^۱ برای زمانبندی تک ماشین ارائه کردند. لی و همکاران [۴] کارشان را با در نظر گرفتن چند مقصد در مسأله حمل هوایی گسترش دادند. آن‌ها همچنین یک روش ابتکاری رو به جلو و یک روش ابتکاری رو به عقب برای محیط تک ماشین پیشنهاد کردند. لی و همکاران [۵] نشان دادند که مسأله تخصیص حمل هوایی دارای ساختار مسایل حمل منظم است، در حالی که مسأله زمانبندی تک ماشین، چند جمله‌ای غیر قطعی سخت است و آن را با یک روش ابتکاری حل کردند. لی و همکاران [۶] مسأله هماهنگی تولید و حمل را با فرض تک ماشین بودن زیر مسأله‌ی تولید حل نمودند. ایشان چندین روش برای حل مسأله‌ی تولید، ارائه و دو زیر مسأله‌ی تولید و حمل را بطور جداگانه حل کردند. در ادامه لی و همکاران [۲] کار خود را با در نظر گرفتن ماشین‌های موازی در تولید توسعه دادند و ادعا کردند که این مسأله در حوزه‌ی صنایع الکترونیک و تولید کامپیوتر کاربرد دارد. آن‌ها مسأله را به دو زیر مسأله شامل زیر مسأله‌ی تولید، با فرض ماشین‌های موازی و تابع هدف جریمه‌های زودکرد پروازها، و زیر مسأله‌ی حمل هوایی، با تابع هدف هزینه‌های زودکرد و دیرکرد تحویل تقسیم نمودند. ایشان همچنین نشان دادند که مسأله زمانبندی ماشین‌های موازی غیر چند جمله‌ای کامل است و یک الگوریتم ابتکاری بر پایه شبیه‌سازی تبرید برای حل آن ارائه کردند. زندیه و ملاعلیزاده زواردهی [۷] به ارائه‌ی چندین مدل هماهنگی تولید و حمل هوایی با در نظر گرفتن هزینه‌های دیرکرد و زودکرد در حمل و تحویل پرداختند. همچنین زندیه و ملاعلیزاده زواردهی [۸] مدل هماهنگی تولید و حمل هوایی را با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری حل و نتیجه‌ی آن‌ها را نیز مقایسه نمودند. رستمیان دلاور و همکاران [۹] به مسأله هماهنگی تولید و حمل هوایی با در نظر گرفتن پروازهای اختصاصی برای کارهایی که به پروازهای عادی نرسیده‌اند، پرداختند. طهماسبی بیرجندی و همکاران [۱۰] مسأله‌ی یکپارچه‌ی تولید و حمل هوایی را در مدیریت زنجیره تامین مطالعه کردند. آن‌ها فرضیات و محدودیت‌های مختلفی از جمله پنجره‌ی زمانی تحویل، مجاز بودن دیرکرد تحویل و مجاز نبودن آن را در مدلشان در نظر گرفتند. سپس با توجه به فرضیات و سیاست‌های ذکر شده، مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی مختلفی را ارائه کردند تا هزینه‌ی کل زنجیره تامین شامل هزینه‌های توزیع، تولید، جریمه‌های دیرکرد و زودکرد تحویل را کمینه نمایند. مرتضوی و همکاران

^۱ Backward

[۱۱] کار رستیمان دلاور و همکاران [۹] را با ارایه یک الگوریتم جدید بر پایه الگوریتم رقابت استعماری ادامه دادند. همچنین در بحث ریلی، حاجی آقائی کشتلی و همکاران [۱۲] مساله هماهنگی تولید و حمل ریلی را با فرض مقاصد و ظرفیت‌های مختلف برای قطارها و همچنین هزینه حمل متفاوت، با استفاده از یک روش ابتکاری و دو الگوریتم فراابتکاری حل کردند. حاجی آقائی کشتلی و امین نیری [۱۳] همان مساله را با الگوریتم ژنتیک و کشتل مجددا حل کردند و نتایج را بررسی نمودند.

۳ مدل ریاضیاتی و محدودیت‌ها

در این بخش مدل ریاضی برای زمانبندی یکپارچه تولید و حمل هوایی در زنجیره تامین دو سطحی ارائه می‌شود. فرض‌های در نظر گرفته شده برای مساله مفروض عبارتند از:

- ۱- کارگاه تولیدی تک ماشین در نظر گرفته شد و پروازهای متعدد با شاخص‌های متفاوت وجود دارد.
 - ۲- زمان و هزینه فرایند بارگیری و اداری برای هر پرواز، در زمان و هزینه حمل پروازها قرارداد دارد.
 - ۳- زمان حمل محلی در زمان حمل پروازها دیده شده است.
 - ۴- هنگامی که سفارش‌ها به طور کامل تولید شدند، حمل محلی می‌تواند آن‌ها را تا فرودگاه انتقال دهد.
 - ۵- سفارش‌هایی که از پرواز زمانبندی شده‌ی خود جا مانده اند توسط حمل اختصاصی منتقل می‌شوند.
 - ۶- همه سفارش‌های پذیرفته شده باید به طور کامل مورد پردازش قرار گیرند.
- نمادگذاری‌های ذیل برای فرموله نمودن مدل استفاده شده است:

• اندیس‌ها

جدول ۱. نمادهای مساله

تعریف نماد	مقادیر	نماد	تعریف نماد	مقادیر	نماد
شاخص سفارش یا کار	$i = 1, \dots, N$	i, i'	شاخص مقصد	$k = 1, \dots, K$	k
شاخص پرواز	$f = 1, \dots, F$	f, f'	موقعیت یا توالی سفارش i	$p = 1, \dots, N$	p, p'

• پارامترهای مساله

جدول ۲. پارامترهای مساله

پارامترهای مساله	نماد	مقادیر
تعداد سفارشات	N	۲۰, ۳۰, ۴۰, ۵۰, ۶۰, ۷۰, ۸۰, ۹۰, ۱۰۰
تعداد پروازها	F	۴, ۶, ۸, ۱۰, ۱۲, ۱۶, ۱۸, ۲۰
تعداد مقاصد	K	۲, ۲, ۳, ۳, ۳, ۴, ۴, ۴, ۵
مقدار سفارشات A_m	Q_i	$Uniform [50, 200]$
زمان مجاز برای تحویل سفارش A_m	d_i	$Uniform [1, 6] \times (Q_i \times (p_i + t_i))$
هزینه جریمه زودکرد تحویل سفارش A_m (واحد در ساعت)	a_i	$Uniform [3, 5]$
هزینه جریمه زودکرد تولید سفارش A_m (واحد در ساعت)	a_i	$Uniform [2, 4]$

$Uniform [5, 8]$	b_i	هزینه جریمه دیرکرد تحویل سفارش i (واحد در ساعت)
$Uniform [1, k]$	Des_i	مقصد نهایی سفارش i ام
$Uniform [1, k]$	Des_f	مقصد نهایی پرواز معمولی f ام
$Uniform [24 \times (FN_f - 1) / TF_k, 24 \times FN_f / TF_k]$	D_f	زمان حرکت پرواز معمولی f در فرودگاه داخلی
$Uniform [200, 800]$	Cap_f	ظرفیت قابل دسترس پرواز معمولی f
$Uniform [60 + 20 \cdot Des_f, 80 + 20 \cdot Des_f]$	TC_f	هزینه‌های حمل هر واحد با پرواز معمولی f
$Uniform [150 + 20 \cdot Des_f, 200 + 20 \cdot Des_f]$	b'_i	هزینه‌های حمل هر واحد با پرواز اختصاصی
$Uniform [2, 10]$	t_f	مدت زمان هر پرواز تا رسیدن به مقصد
$D_f + t_f$	A_f	زمان ورود پرواز معمولی f در مقصد
$D_i - t_i$	MD_i	ماکزیمم زمان پرواز اختصاصی سفارش i
$p_i = Uniform [0, 5, 1, 5] / (\sum Q_i p'_i) \times Uniform [1, 2, 2] / 24$	p_i	زمان لازم برای پردازش سفارش i ام (واحد در ساعت)
	LN	یک عدد مثبت بزرگ

• متغیرهای تصمیم

جدول ۳. متغیرهای مساله

تعریف	متغیرهای تصمیم	تعریف	متغیرهای تصمیم
زمان تکمیل سفارش i	c_i	مقدار قسمتی از سفارش i که به ظرفیت نرمال پرواز f اختصاص می‌یابد	q_{if}
اگر سفارش i ام در موقعیت p باشد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است	u_{ip}	مقدار قسمتی از سفارش i که ظرفیت خاص پرواز f اختصاص می‌یابد	q'_i

• مدل ریاضیاتی

در این بخش، مدل برنامه ریزی ریاضی جهت یکپارچه سازی تولید و حمل هوایی با دیرکرد تحویل مجاز، وجود پروازهای اختصاصی و بدون در نظر گرفتن بیکاری عمدی، پایه گذاری شده بر روی مدل رستیمان دلاور و همکاران [۹] به عنوان مدل پایه در این پژوهش در نظر گرفته می‌شود.

$$\min \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^F \left(\left(\frac{\min \left(0, c_i - D_f - \frac{1}{LN} \right)}{c_i - D_f - \frac{1}{LN}} \right) \left((TC_f * q_{if}) + (\alpha'_i * (D_f - c_i) * q_{if}) \right) \right. \\ \left. + \left(\left(\alpha_i * \max \left(0, d_i - A_f \right) * q_{if} \right) + \left(b_i * \max \left(0, A_f i - d_i \right) * q_{if} \right) \right) \right)$$

$$+ \left(\left(\left(\frac{\min \left(0, c_i - D_f - \frac{1}{LN} \right)}{c_i - D_f - \frac{1}{LN}} \right) \right) \left((b'_i \times q_{if}) + (\min(\alpha'_i, \alpha_i) \times \max(0, MD_i - c_i) \times q_{if}) \right) \right. \\ \left. + (b_i \times \max(0, c_i - MD_i) \times q_{if}) \right) + \sum_{i=1}^N \left((b'_i \times q'_i) + (\min(\alpha'_i, \alpha_i) \times \max(0, MD_i - c_i) \times q'_i) \right) \quad (1)$$

$$+ (b_i \times \max(0, C_i - MD_i) \times q_i)$$

S.t.

$$q_{if} \times (Des_i - Des_f) = 0 \quad i = 1, \dots, N; f = 1, \dots, F \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{if} \leq Cap_f \quad f = 1, \dots, F \quad (3)$$

$$\sum_{f=1}^F q_{if} + q'_i = Q_i \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$\sum_{p=1}^N u_{ip} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N u_{ip} = 1 \quad p = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$\sum_{p=1}^N \left(u_{ip} \left(p_i Q_i + \sum_{p'=1}^{p-1} \sum_{i'=1}^N u_{i'p'} (p_i, Q_{i'}) \right) \right) = c_i \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$u_{ip} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, N; p = 1, \dots, N \quad (8)$$

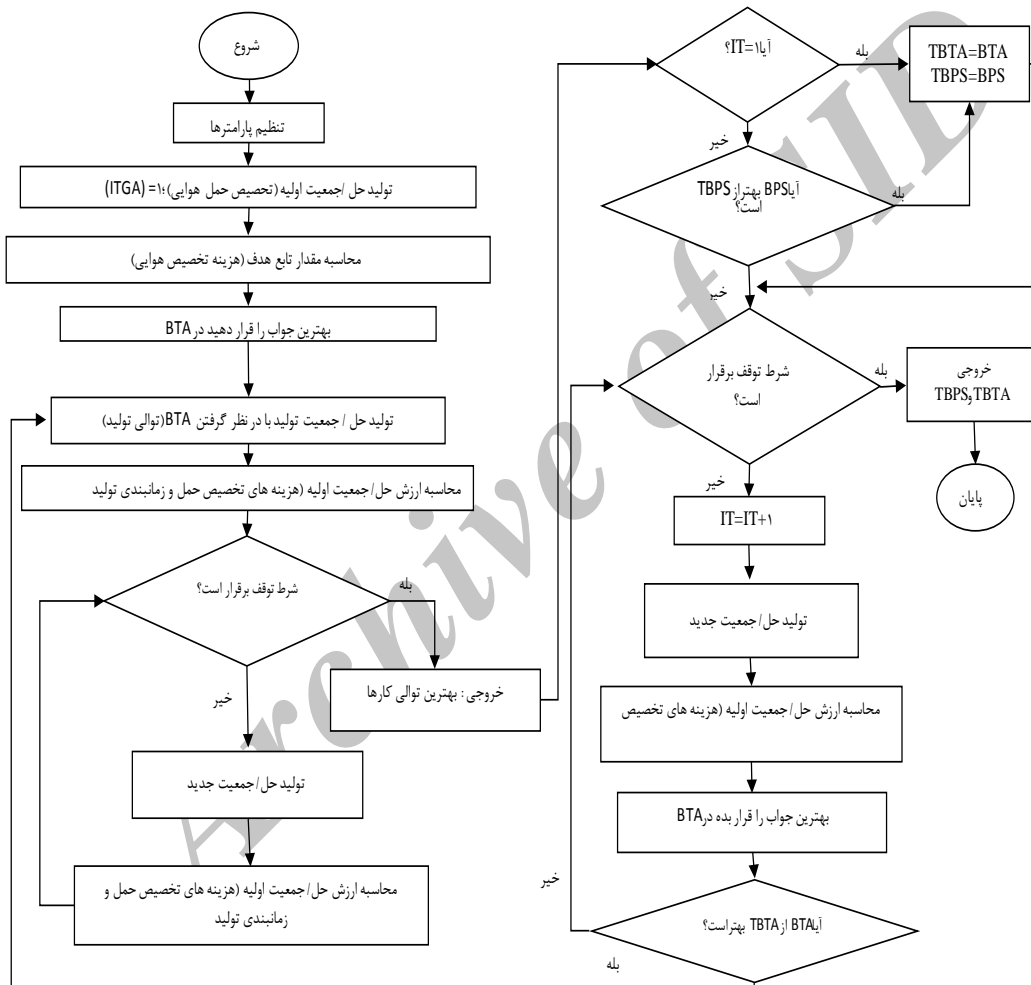
$$q_{if} = \text{Non-negative integer variables} \quad (9)$$

$$q'_i = \text{Non-negative integer variables} \quad (10)$$

در مدل ریاضیاتی هر دو تخصیص حمل و نقل و برنامه ریزی تولید را در نظر گرفته شده است (سفرهای تخصیص یافته به پرواز عادی و پرواز چارتر، تعیین توالی و نیز زمان اتمام سفارشات). با توجه به زمان اتمام تولید، برخی از سفارشات ممکن است به پرواز اختصاص داده خود نرسد و باید توسط پرواز چارتر حمل گردد؛ لذا تابع هدف شامل سه بخش است. بخش اول هزینه کل تولید و تحویل سفارش هایی را نشان می دهد که به پرواز عادی اختصاص داده شده اند و می توانند به پرواز خود برسند. مجموعه محدودیت (۲) تضمین می کند که سفارش i و پرواز عادی F مقاصد یکسان داشته باشند. محدودیت (۳) تضمین می کند که مقادیر تخصیصی به پرواز F از ظرفیت پرواز F کم تر باشد. محدودیت (۴) تضمین می کند که سفارش i به طور کامل اختصاص داده شده است. مجموعه محدودیت (۵) و (۶) بیان می کنند که هر کار باید به یک موقعیت اختصاص داده شود، و هر موقعیت توسط یک کار تحت پوشش است. محدودیت (۷) زمان اتمام کارها را محاسبه می کند.

۴ توسعه الگوریتم‌های حل

در این مقاله، با توجه به مدل ریاضی، یک جریان بازگشتی برای الگوریتم‌های پیشنهادی در نظر گرفته شد. بدین صورت که در ابتدا یک تخصیص حمل و نقل بهینه توسط یک الگوریتم به دست می‌آید و سپس با داشتن این تخصیص در ذهن، الگوریتم فراابتکاری دیگری برای رسیدن به یک توالی تولید و زمان اتمام سفارش‌ها اعمال می‌شود. گردش بین حمل و نقل و زمانبندی تولید تا زمانی که الگوریتم شرط توقف را ملاقات کند ادامه می‌یابد. شرط توقف رسیدن به تعداد گردش ۱۰ بین دو الگوریتم می‌باشد. نمودار پایه الگوریتم‌ها در شکل یک آورده شده است.



شکل ۱. نمودار الگوریتم‌های بازگشتی

الف- الگوریتم شبیه سازی تبرید (SA)

در سال ۱۹۵۳ یک روش جدید جهت ساخت جامدات با کیفیت عالی ابداع شد. ایده شبیه سازی تبرید از مقاله‌ای که توسط متروپولیس^۱ و همکارانش در سال ۱۹۵۳ منتشر شد، گرفته شده است. شبیه سازی تبرید یک الگوریتم جستجوی محلی یا یک روش فوق ابتکاری^۲ می‌باشد که قادر است خود را از دام بهینه موضعی رها کند. راحتی به کارگیری، همگرایی و استفاده از حرکات خاصی جهت دوری از قرارگیری در دام بهینه موضعی از جمله خصوصیات هستند که باعث شده اند تا این روش در دو دهه اخیر مورد توجه قرار گیرد.

• رویه کلی شبیه سازی تبرید در بهینه سازی

۱- تعریف تابع هدف و تنظیم پارامترهای الگوریتم.

تعریف دمای اولیه T_0 و مقدار اولیه $X^{(0)}$.

تعریف دمای نهایی T_f و تعداد تکرار N .

۲- تا زمانی که $n < N, T < T_f$

جابه جایی تصادفی به مکان جدید (انجام تغییراتی در جواب جاری برای جستجوی تصادفی):

$$x_{n+1} = x_n + Rand$$

$$\Delta f = f_{n+1}(x_{n+1}) - f_n(x_n)$$

۳- اگر جواب جدید بهتر باشد (در مسایل کمینه سازی $\Delta f < 0$)

جواب جدید پذیرفته می‌شود و $x_n = x_{n+1}$

در غیر این صورت

یک عدد تصادفی r تولید می‌شود

$$\text{اگر } p = \exp\left[-\frac{\Delta f}{T}\right] > r \text{ جواب جدید پذیرفته می‌شود}$$

اتمام حلقه

بروز کردن X^* و f^* .

$$n = n + 1$$

اتمام حلقه

پارامتر r یک عدد تصادفی است که با استفاده از تصادف یکنواخت بین ۰ و ۱ تولید می‌شود. Δf اختلاف بین مقادیر تابع هزینه جواب جاری و همسایگی جدید و T دمای جاری می‌باشد. این دما که مقداری مثبت است با پیشرفت الگوریتم مطابق رویه خنک سازی از یک مقدار نسبتاً بالا به یک مقدار نزدیک به صفر حرکت می‌کند و بنابراین در مراحل اولیه شبیه سازی تبرید حرکت‌های بدتر کننده جواب پذیرفته می‌شوند؛ اما در مراحل پایانی احتمال پذیرش جواب‌های بهبود دهنده بیش تر است (برزین پور و صفاریان [۲۰]).

¹ Metropolis

² Meta-heuristic

• طراحی نحوه ی نمایش جواب اولیه

بدیهی است که مبنای هر رویکرد فراابتکاری، نحوه نمایش جواب می باشد. این موضوع شدیداً به ماهیت مساله مورد بررسی؛ یعنی تعداد و بعد متغیرهای تصمیم گیری و محدودیت های مدل وابسته است.

➤ نمایش جواب اولیه حمل و نقل

هر سفارش می تواند به هر پرواز معمولی در دسترس که مقصد شان یکسان است تخصیص یابد؛ لذا ماتریس تخصیص را به k زیر ماتریس که k تعداد مقاصد موجود می باشد، تقسیم می کنیم. در هر زیر ماتریس سفارش ها و پروازها شماره مقصد یکسانی دارند. همه فرآیندهای الگوریتم در هر زیر ماتریس به صورت جدا به کار برده می شوند. برای مثال در شکل (۴-۱۳) سفارش دو، دارای مقصد دو است، پس می تواند توسط پروازهای یک و چهار منتقل شود. نحوه نمایش جواب اولیه ی تخصیص حمل و نقل در شکل دو نشان داده شده است.

	Des _i	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲
Des _f	i	۱	۴	۵	۷	۲	۳	۶
	F							
۱	۲	۹	۴	۹	۹			
۱	۳	۶	۷	۱۵	۵			
۲	۱					۱۵	۸	۶
۲	۴					۳	۵	۷

شکل ۲. زیر ماتریس تخصیص حمل و نقل

➤ نمایش جواب اولیه توالی تولید سفارشات

جهت نمایش جواب اولیه برای بخش زمانبندی و تعیین توالی کارها از کروموزوم های سطری استفاده شد.

• تولید جواب اولیه

یکی از مراحل اصلی در الگوریتم های فراابتکاری ایجاد جواب و یا جمعیت اولیه است که مستقیماً بر روی کیفیت نتایج اثر می گذارد (حاجی آقایی کشتلی و امین نیری [۱۳]).

روش تولید جواب اولیه حمل و نقل هوایی: روش های گوشه ای شمال غربی، روش کم ترین

هزینه و تولید تصادفی برای تولید یک جواب اولیه حمل و نقل در نظر گرفته شده است.

روش تولید جواب اولیه زمانبندی تولید: از چهار روش اولیه زمانبندی شناخته شده برای تولید

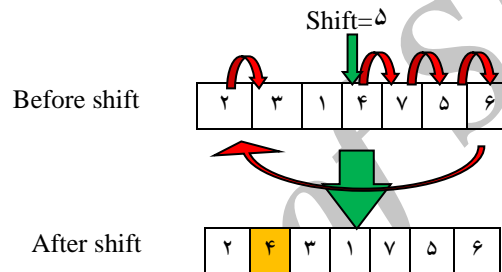
جواب های اولیه در بخش تولید استفاده شده است. این روش ها عبارت اند از (حاجی آقایی کشتلی و

همکاران [۱۲]) کوتاه‌ترین زمان پردازش 1 (SPT)، طولانی‌ترین زمان پردازش 2 (LPT) نزدیک‌ترین زمان تحویل 3 (EDD) و تولید تصادفی.

• ایجاد جواب همسایه

نکته مهم دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد نحوه انتخاب همسایگی است. این موضوع تابع شرایط مساله است و تأثیر بسزایی در عملکرد مناسب الگوریتم دارد. جهت ایجاد همسایگی به صورت زیر عمل گردید:

➤ **روش انتخاب همسایگی زمانبندی تولید:** برای ایجاد همسایگی جدید در زمانبندی تولید از عملگر تعویض^۴ استفاده شده است. در این عملگر، یک کروموزم به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و به یک مقدار معین تصادفی، جا به جا می‌شود. دیگر کروموزم‌ها هم متناسب با این تغییر حرکت می‌کنند. شکل ۳ این عملگر را نشان می‌دهد.



شکل ۳. عملگر جهش برای برنامه ریزی تولید

➤ **روش انتخاب همسایگی حمل و نقل هوایی:** روش ویگناس و میشالیویچ^۵ [۱۴] جهت جستجوی همسایگی در بخش حمل و نقل به کار برده شد. ابتدا اعداد از پیش تعریف شده برای هر ردیف (p) و ستون (q) در مساله طراحی شده و تعدادی از سطر و ستون‌ها مشخص شده با شماره را به صورت تصادفی انتخاب کردیم.

گام اول: ایجاد یک زیر ماتریس با استفاده از شماره از پیش تعریف شده P ($2 < p < F-1$) و q ($2 < q < n-1$). انتخاب تصادفی سطر $\{i1, \dots, ip\}$ و ستونی $\{j1, \dots, jq\}$ برای ایجاد یک زیر ماتریس $(p \times q)$.

گام دوم: مقدار این عنصر در نقطه تقاطع انتخاب شده ردیف i و ستون j از ماتریس پدر و مادر را در موقعیت یکسان در زیر ماتریس جدید ایجاد شده کپی کنید.

گام سوم: تخصیص مجدد مقادیر زیر ماتریس به طور تصادفی به گونه ای که مجموع هر سطر و ستون نسبت به تخصیص مجدد قبلی یکسان بماند.

گام چهارم: جایگزینی عناصر مربوطه از ماتریس پدر و مادر با عناصر جدید از زیر ماتریس اختصاص یافته.

¹ Shortest Processing Time

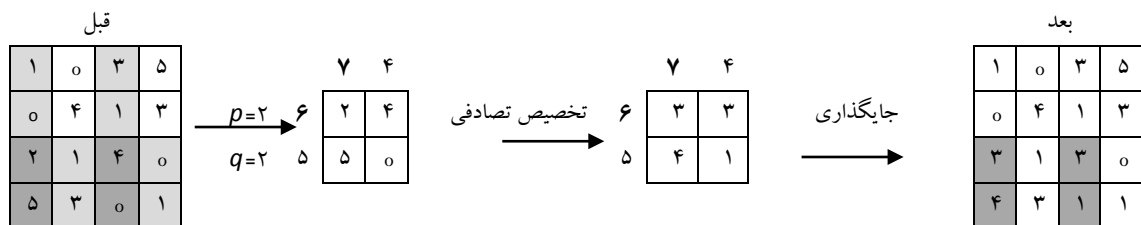
² Latest Processing Time

³ Earliest Due Date

⁴ Shift Operator

⁵ Vignaux and Michalewicz

برای نمونه، در شکل ۴، دو ردیف تصادفی (۳ و ۴) و ستون (۱ و ۳) را برای تولید زیر ماتریس مشخص می‌کنیم.



شکل ۴. عملگر جستجوی همسایگی برای حمل و نقل

• پارامترهای الگوریتم

پارامترهای شبیه سازی تیرید نرخ خنک کنندگی (r) و دمای اولیه (T_0) هستند. همچنین، سه نوع رویه خنک کنندگی برای انتخاب بهترین روش از کاهش دما در بخش تنظیم پارامترها در نظر گرفته شده است. این روش‌ها به شرح جدول ۴ می‌باشند:

جدول ۴. رویه‌های خنک کنندگی

ارزش	قاعده ی خنک سازی
$T_{i+1} = T_i \times r$	قاعده هندسی
$T_i = T_0 - i \times r$	قاعده خطی
$T_{i+1} = r(T_i) \times T_i$	قاعده هندسی وابسته به دما

ب) الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات^۱ گسسته پیشنهادی

از آنجایی که تابع هزینه مساله مورد بررسی در این پژوهش گسسته است، از الگوریتم ازدحام ذرات گسسته یا به اختصار DPSO که توسط کوان در سال ۲۰۰۸ [۱۵] پیشنهاد شد، به عنوان یک روش حل بهره بردیم. در این روش هر ذره X_i^{t-1} دارای شش خاصیت موقعیت، مقدار تابع هدف متناظر با آن موقعیت، بهترین موقعیت تجربه شده شخصی، مقدار تابع هدف متناظر با آن، بهترین موقعیت تجربه شده جمعی و مقدار تابع هدف متناظر با آن می‌باشد. این ذرات با احتمال w تحت عملگر جهش F_1 قرار می‌گیرد. سپس با احتمال C_1 تحت عملگر F_2 به سمت بهترین تجربه شخصی P_i^t حرکت می‌کند. در نهایت با احتمال C_2 تحت عملگر F_3 به سمت بهترین تجربه ی جمعی G^t حرکت می‌کند. موقعیت ذره در تکرار t به صورت ذیل به روز رسانی می‌شود (پانا و همکاران ۲۰۰۸):

$$X_i^t = C_2 \otimes F_3 \left(C_1 \otimes F_2 \left(w \otimes F_1 \left(X_i^{t-1} \right), P_i^{t-1} \right), G^{t-1} \right)$$

مزیت اصلی این روش بر استراتژی‌های بهینه‌سازی دیگر این است که، تعداد فراوان ذرات ازدحام کننده، باعث انعطاف روش در برابر مشکل پاسخ بهینه محلی می‌گردد و دارای سرعت همگرایی نسبتاً خوبی است.

¹ Discrete Particle Swarm Optimization

• رویه کلی الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات گسسته

قدم‌های کلی روش اخیر به شرح زیر است:

تعریف تابع هدف و تنظیم پارمترهای الگوریتم
 تعریف بردارهای مکان x_i برای n ذره اولیه.
 تنظیم پارمترهای w , C_1 و C_2 .

پیدا کردن مقدار g^* از طریق محاسبه $\{f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)\}$ در $t = 0$

در حالی که شرط توقف برقرار نیست
 $t = t + 1$ (تعداد شمارنده تکرار مساله است).

به ازای همه n ذره و در همه p بعد مساله
 تولید عدد تصادفی R_1
 اگر $(R_1 < w)$

جهش یافتن ذرات تحت عملگر F_1 ، $[x_i^t = w \otimes F_1(x_i^t)]$
 تولید عدد تصادفی R_2
 اگر $(R_2 < C_1)$

حرکت به سمت بهترین تجربه شخصی P_i^t تحت عملگر F_2 ، $[x_i^t = C_1 \otimes F_2(x_i^t, P_i^t)]$
 تولید عدد تصادفی R_3
 اگر $R_3 < C_2$

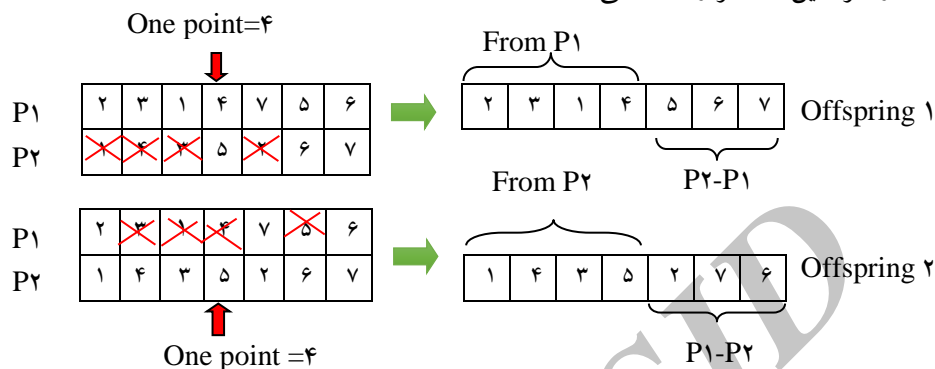
حرکت به سمت بهترین تجربه گروهی G^t تحت عملگر F_3 ، $[x_i^t = C_2 \otimes F_3(x_i^t, G^t)]$
 محاسبه تابع هدف به ازای هر مکان جدید x_i^t یافتن بهترین جواب جاری هر ذره x_i^*
 اتمام حلقه
 اتمام حلقه
 اتمام حلقه

یافتن بهترین جواب الگوریتم g^*
 اتمام حلقه و نمایش خروجی‌ها.

• اپراتورهای جهش و حرکت

پس از تولید جمعیت اولیه به وسیله تخصیص موقعیت و سرعت، ارزش هر ذره توسط تابع هدف محاسبه می‌گردد. برای عملگر جهش یا F_1 در حمل و نقل هوایی از عملگر شرح داده شده در بخش انتخاب همسایگی حمل در تبرید استفاده گردید. برای عملگر جهش یا F_2 در زمانبندی تولید از عملگر تعویض استفاده گردید. برای عملگرهای F_3 و F_4 در زمانبندی تولید از عملگر شرح داده شده در بخش الف استفاده گردید. برای عملگرهای F_5 و F_6 در حمل و نقل هوایی از عملگر شرح داده شده در بخش ب استفاده گردید.

الف) عملگر جایگشت تقاطع تک نقطه در زمانبندی تولید (عملگر F_2 و F_3): یک نقطه به صورت تصادفی انتخاب و در سمت چپ این نقطه از والد ۱ به طور مستقیم به فرزند ۱ انتقال می‌یابد. بقیه ژن‌های فرزند ۱ با کم کردن والد ۲ از والد ۱ با همان روند تکمیل، به همین ترتیب فرزندان ۲ نیز تولید می‌شود. شکل ۵ نحوه ی کار کرد این عملگر را نشان می‌دهد.



شکل ۵. عملگر تقاطع برای برنامه ریزی تولید

ب) عملگر تقاطع استفاده شده در حمل و نقل هوایی (عملگر F_2 و F_3):

در این بخش عملگر تقاطع اریه شده توسط ویگناس و میشایلوویچ^۱ [۱۴] برای تولید فرزندان به کار برده شد. برای جزئیات بیش تر می‌توانید مقاله جن و چنگک [۱۶] و نیز ویگناس و میشایلوویچ [۱۴] را مطالعه کنید. رویه استفاده از عملگر تقاطع در حمل و نقل هوایی به صورت زیر و شکل ۶ می‌باشد:

مرحله اول: انتخاب دو والد x_1 و x_2 با استفاده از مکانیزم انتخاب چرخ.

مرحله دو: ایجاد دو ماتریس موقت D و R به صورت زیر:

$$d_{ij} = \left\lfloor \left(\frac{x_{ij}^1 + x_{ij}^2}{2} \right) \right\rfloor, \quad r_{ij} = (x_{ij}^1 + x_{ij}^2) \bmod 2$$

مرحله سوم: تقسیم ماتریس R به دو ماتریس، R^1 و R^2 به طوریکه:

$$R = R^1 + R^2$$

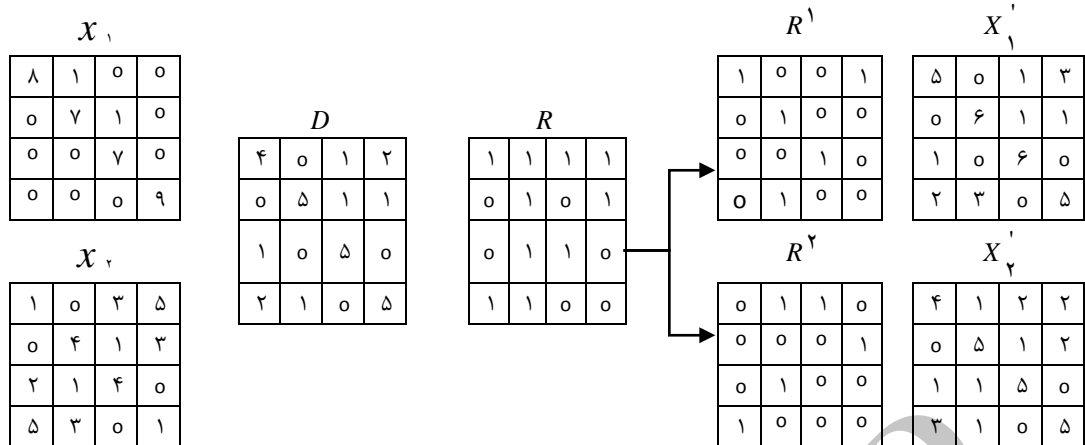
$$\sum_{j=1}^n r_{ij}^1 = \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n r_{ij}, \quad i = 1, \dots, F$$

$$\sum_{i=1}^F r_{ij}^1 = \sum_{i=1}^F r_{ij}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^F r_{ij}, \quad j = 1, \dots, n$$

مرحله چهارم: سپس دو فرزند، X_1' و X_2' به صورت زیر تولید می‌شود:

$$X_1' = D + R^1, \quad X_2' = D + R^2$$

¹ Vignaux and Michalewicz



شکل ۶. عملگر تقاطع برای حمل و نقل

• پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات گسسته

پارامترهای اندازه جمعیت ذرات^۱، احتمال‌های حرکت (C_1 و C_2) و احتمال جهش (w) می‌باشند. مقادیر اندازه جمعیت ۳۰ در نظر گرفته شد. احتمال‌های C_1 و C_2 و w توسط طراحی آزمایش‌های تاکوچی انتخاب می‌گردند.

۵ تولید داده‌های آزمایشی، تنظیم پارامترها و تحلیل نتایج

برای ارزیابی و مقایسه عملکرد روش‌های فرا ابتکاری توسعه داده شده در این تحقیق، از یک طرح برای تولید داده‌های آزمایشی استفاده می‌شود. برای ایجاد مسایل آزمایشی از نماد $--j--F--d$ مطابق با مقاله لی و همکاران [۲] استفاده می‌شود که j معرف تعداد کارها، F معرف تعداد پروازها و d معرف تعداد مقاصد می‌باشد. تعداد کارها در هر مساله به صورت $5 \times F$ در نظر گرفته شده است. جدول ۵ ابعاد مسایل آزمایشی شده در سطح متوسط و بزرگ را نشان می‌دهد.

جدول ۵. ابعاد مسایل آزمایشی تولیدی

ردیف	تعداد کار	تعداد پرواز	تعداد مقصد	مساله	ابعاد (حاصل ضرب سه عامل)
۱	۲۰	۴	۲	۲۰.j۴f۲d	۱۶۰
۲	۳۰	۶	۲	۳۰.j۶f۲d	۳۶۰
۳	۴۰	۸	۳	۴۰.j۸f۳d	۹۶۰
۴	۵۰	۱۰	۳	۵۰.j۱۰f۳d	۱۵۰۰
۵	۶۰	۱۲	۳	۶۰.j۱۲f۳d	۲۱۶۰
۶	۷۰	۱۴	۴	۷۰.j۱۴f۴d	۳۹۲۰
۷	۸۰	۱۶	۴	۸۰.j۱۶f۴d	۵۱۲۰
۸	۹۰	۱۸	۴	۹۰.j۱۸f۴d	۶۴۸۰
۹	۱۰۰	۲۰	۵	۱۰۰.j۲۰f۵d	۱۰۰۰۰

^۱ Particle Size

زمان حرکت هر پرواز از یک توزیع یکنواخت مطابق با مقصدش تولید شده است. تعداد کل پروازهایی که مقصد یکسانی دارند با TF_k نشان داده شده است. به پروازهای متناظر یک شماره پرواز اختصاص یافته که از ۱ تا TF_k می باشد. زمان حرکت هر پرواز از توزیع یکنواخت در بازه $[24 \times FN_f / TF_k, 24 \times (FN_f - 1) / TF_k]$ تولید می شود. همچنین دیگر داده‌های مورد نیاز برای طرح آزمایش در جدول (۲-۳) نشان داده شده است. مابقی فرضیات و پارامترها همانند مقاله پایه رستیمان دلاور و همکاران [۹] است.

• تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی با طراحی آزمایش تاگوچی

روش تاگوچی انحراف‌های ممکن از مقدار هدف را همراه با تابع زیان مدل بندی می کند. دکتر تاگوچی از کاربرد طرح‌ها یا آرایه‌های متعامد برای اختصاص فاکتورهای انتخاب شده، جانبداری می کند. در مدل مورد بررسی در این تحقیق از آنجا که درصد کمینه کردن هزینه‌های زنجیره تامین هستیم، از معیار «هر چه کوچکتر، بهتر» جهت بررسی کیفیت جواب استفاده می شود. فاکتورها و سطوح تعریف شده برای دو الگوریتم در جداول ۶ آمده است.

جدول ۶. فاکتورها و سطوح مربوط به آن در الگوریتم‌های ازدحام ذرات گسسته و شبیه سازی تبرید

فاکتورها	نمادهای SA	سطوح	فاکتورها	نمادهای DPSO	سطوح
شیوه تولید جواب اولیه حمل و نقل	A	A(۱) - تصادفی			A(۱)-۰/۲
		A(۲) - گوشه ی شمال غربی - کمترین هزینه	w	A	A(۲)-۰/۳
		۱.LPT			A(۳)-۰/۳۵
شیوه تولید جواب اولیه زمانبندی تولید	B	۲.SPT	C _۱	B	B(۱)-۰/۵
		۳.EDD			B(۲)-۰/۵۵
		C(۱)-۰/۷			B(۳)-۰/۶
نرخ خنک سازی دما	C	C(۲)-۰/۷۵	C _۲	C	C(۱)-۰/۴
		C(۳)-۰/۸			C(۲)-۰/۴۵
		D(۱)-۷۰۰			C(۳)-۰/۵
دمای اولیه	D	D(۲)-۸۰۰			
		D(۳)-۹۰۰			
		E(۱)-هندسی			
شیوه ی خنک سازی دما	E	E(۲)-خطی			
		E(۳)-هندسی وابسته به دما			

تعداد مسایل DPSO = ۳^۳

تعداد مسایل SA = ۳^۵

در الگوریتم شبیه سازی تبرید پنج فاکتور سه سطحی و در الگوریتم ازدحام ذرات گسسته سه فاکتور سه سطحی طراحی شده است. در نتیجه کل آزمایش‌ها (کل ترکیبات) برای نه مساله آزمایشی تولید شده برابر ۲۴۳۰ (۹×۳×۳)

برای کاهش تعداد آزمایش ها تا سطح قابل قبول، تنها گروه کمی از کلیه ترکیبات ممکن از فاکتورها و سطوح انتخاب می شوند. با توجه به فاکتورها و سطوح مختلف تعیین شده برای هر الگوریتم، آرایه های متعادل مناسب توسط نرم افزار مینی تب تولید شدند. آرایه $L_{۲۷}$ برای الگوریتم SA و $L_۹$ برای DPSO استفاده گردید.

• محاسبه درصد انحراف نسبی^۱ و نرخ سیگنال به اغتشاش^۲

جهت انتخاب بهترین پارامتر از دو معیار درصد انحراف نسبی و نرخ سیگنال به اغتشاش استفاده گردید که در ادامه به توضیح این معیار می پردازیم.

درصد انحراف نسبی یا به اختصار RPD، معیاری برای بی مقیاس سازی داده ها می باشد، که به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$RPD = \frac{A \lg_{sol} - Min_{sol}}{Min_{sol}} \times 100$$

که $A \lg_{sol}$ جواب به دست آمده توسط الگوریتم ها و Min_{sol} بهترین جواب به دست آمده برای مسایل نمونه توسط الگوریتم ها است. با استفاده از جداول تاگوچی، تعداد آزمایش ها از ۲۴۳۰ به ۳۴۲ آزمایش ($۲۹ \times ۹ + ۹ \times ۹$) کاهش می یابد. دلیل استفاده از RPD نرمالیزه کردن خروجی ها جهت مقایسه بایکدیگر می باشد. هر چقدر مقدار میانگین RPD کم تر باشد، جواب بهینه تر است.

نرخ سیگنال به اغتشاش^۳ یا به اختصار نرخ S/N که توسط تاگوچی توسعه داده شد، توضیح می دهد چرا این نوع طراحی پارامتر یک طراحی استوار است. (آل عمر [۱۷]، فادکه [۱۸]، نادری و همکاران [۱۹]). سیگنال، متغیر پاسخ و اغتشاش، انحراف استاندارد را نمایش می دهد. بنابراین، نرخ S/N نشان دهنده ی درصد انحراف در متغیر پاسخ است. هدف بیشینه کردن این نرخ است. در روش تاگوچی نرخ S/N برای تابع هدف مینیم سازی بدین شرح است (فادکه [۱۸]، نادری و همکاران [۱۹]):

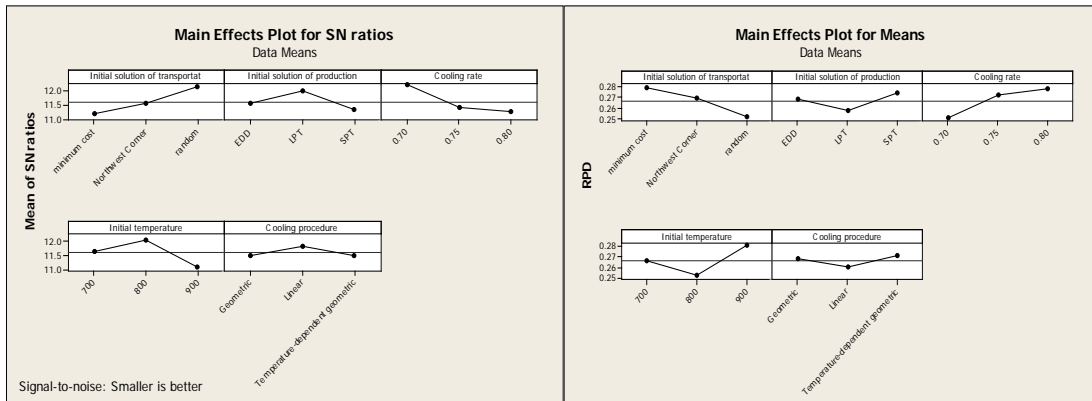
$$S/N \text{ ratio} = -10 \cdot \log_{10}(\text{objective function})^2$$

نمودارهای RPD و نرخ S/N برای دو الگوریتم در شکل های ۷ و ۸ قابل مشاهده است.

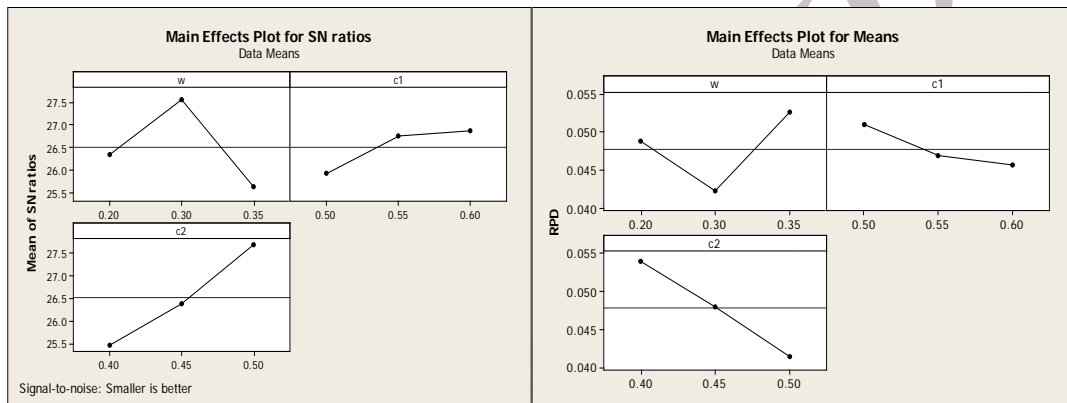
¹ Relative Percentage Deviation

² signal-to-noise

³ signal-to-noise



شکل ۷. نرخ S/N و مقدار RPD به ازای پارامترهای متفاوت الگوریتم SA



شکل ۸. نرخ S/N و مقدار RPD به ازای پارامترهای متفاوت الگوریتم DPSO

با بررسی مقادیر RPD و نرخ S/N برای پارامترهای مختلف الگوریتم‌ها، بهترین مقدار پارامترها به صورت جدول ۷ انتخاب می‌گردد.

جدول ۷. بهترین مقدار پارامترها

الگوریتم ازدحام ذرات گسسته		الگوریتم شبیه سازی تبرید	
مقدار بهینه	فاکتور	مقدار بهینه	فاکتور
۰/۳	A	تصادفی	A
		LPT	B
۰/۶	B	۰/۷	C
		۸۰۰	D
۰/۵	C	خطی	E

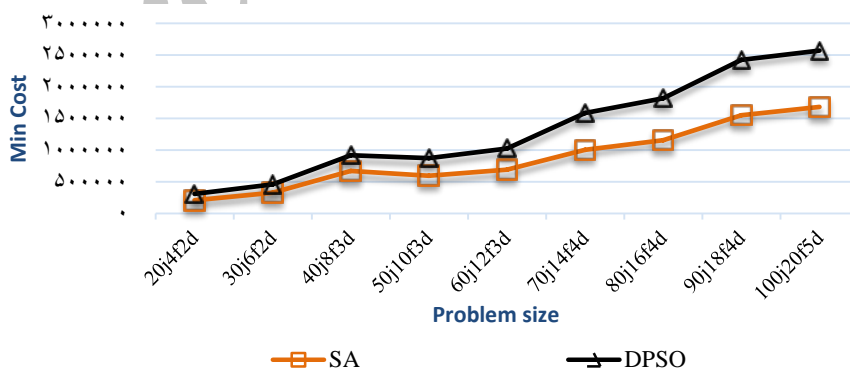
• تحلیل و مقایسه ی نتایج حاصل از حل دو الگوریتم

جهت مقایسه الگوریتم‌ها به بررسی کارایی و اثر بخشی روش‌های فرا ابتکاری می‌پردازیم. مقدار تابع هدف را به عنوان معیاری از اثربخشی و اولین زمان رسیدن به بهترین مقدارین تابع هدف را به عنوان معیاری که بیان کننده کارایی می‌باشد در نظر می‌گیریم و الگوریتم‌ها را به طور جداگانه بر روی نه مساله اجرا و مقایسه می‌نماییم.

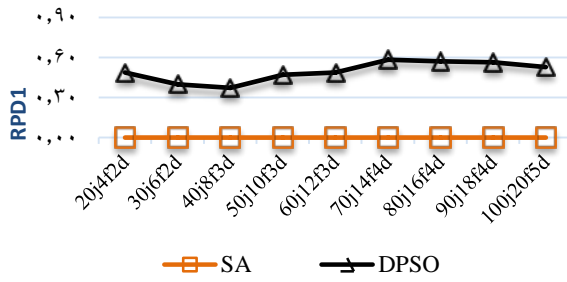
با توجه به اینکه از الگوریتم‌های رفت و برگشتی در این پژوهش استفاده کردیم هر الگوریتم ده بار بین بهینه سازی حمل و نقل هوایی و زمانبندی تولید در گردش است؛ لذا دو نوع انحراف نسبی (RPD_1 و RPD_2) در این پژوهش در نظر گرفتیم. RPD_1 در واقع انحراف نسبی بین بهترین جواب الگوریتم‌ها را در هر مساله نشان می‌دهد. RPD_2 در صد انحراف نسبی ده پاسخ به دست آمده از ده گردش الگوریتم نسبت به بهترین جواب آن الگوریتم در زیر مساله مفروض را در اختیار می‌دهد که معیاری برای تعیین قابلیت اطمینان الگوریتم می‌باشد. پس از اجرای الگوریتم‌ها، مقدار تابع هدف و درصد انحراف نسبی الگوریتم‌ها نسبت به بهترین جواب برای هر یک از نه الگوریتم محاسبه شده که نتایج آن در جدول ۸ و شکل‌های ۹ الی ۱۳ آمده است.

جدول ۸. جواب‌های حل مسایل انتخابی

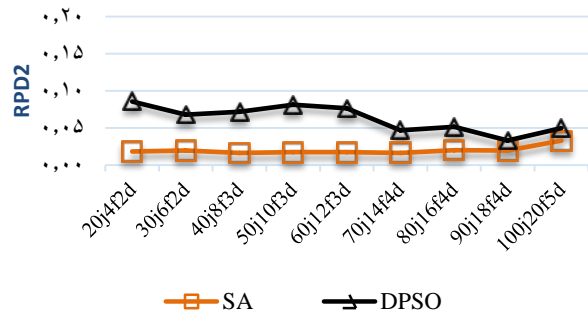
SA				DPSO				تعداد کار	تعداد پرواز	تعداد مقصد	
RPD_2	RPD_1	زمان اصابت	مقدار تابع هدف	RPD_2	RPD_1	زمان اصابت	مقدار تابع هدف				
۰/۰۱۹	۰	۰/۳۱	۲۰۷۲۳۹	۰/۰۸۶	۰/۴۹	۱۶/۷۱	۳۰۸۱۳۱	۲	۴	۲۰	۱
۰/۰۲۰	۰	۰/۴۶	۳۲۷۱۰۸	۰/۰۶۸	۰/۴۰	۲۴/۴۹	۴۵۷۷۲۵	۲	۶	۳۰	۲
۰/۰۱۷	۰	۰/۵۹	۶۶۸۷۶۷	۰/۰۷۲	۰/۳۷	۳۲/۸۴	۹۱۷۹۹۷	۳	۸	۴۰	۳
۰/۰۱۸	۰	۰/۷۴	۵۹۳۲۱۴	۰/۰۸۱	۰/۴۷	۴۰/۰۲	۸۷۱۹۸۳	۳	۱۰	۵۰	۴
۰/۰۱۸	۰	۰/۸۸	۶۹۰۶۷۶	۰/۰۷۷	۰/۴۹	۴۹/۰۰	۱۰۲۶۷۵۷	۳	۱۲	۶۰	۵
۰/۰۱۷	۰	۰/۹۹	۱۰۰۲۹۲۷	۰/۰۴۷	۰/۵۸	۵۱/۵۳	۱۵۸۱۷۵۳	۴	۱۴	۷۰	۶
۰/۰۲۰	۰	۱/۱۸	۱۱۵۸۸۸۶	۰/۰۵۱	۰/۵۷	۶۳/۲۳	۱۸۲۰۸۲۷	۴	۱۶	۸۰	۷
۰/۰۲۰	۰	۱/۳۴	۱۵۵۲۳۳۲	۰/۰۳۳	۰/۵۶	۷۵/۴۴	۲۴۲۷۸۰۵	۴	۱۸	۹۰	۸
۰/۰۳۳	۰	۱/۴۷	۱۶۸۱۶۶۱	۰/۰۵۰	۰/۵۲۹	۸۰/۹۴	۲۵۷۱۳۴۳	۵	۲۰	۱۰۰	۹



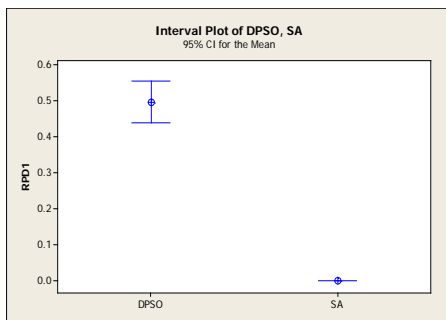
شکل ۹. مقایسه مقدار بهینه تابع هدف در دو الگوریتم



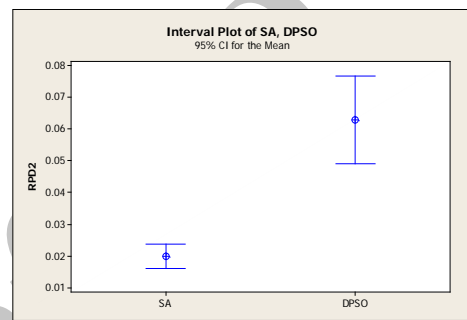
شکل ۱۱. مقایسه درصد انحراف نسبی الگوریتم‌ها RPD_1



شکل ۱۰. مقایسه درصد انحراف نسبی الگوریتم‌ها RPD_2



شکل ۱۳. فاصله اطمینان ۹۵٪ برای RPD_1 تابع هدف



شکل ۱۲. فاصله اطمینان ۹۵٪ برای RPD_2 تابع هدف

جهت انجام مقایسات، متوسط درصد انحراف نسبی یک و دو برای هر یک از الگوریتم‌ها محاسبه شد. نتایج در جدول ۹ آمده است.

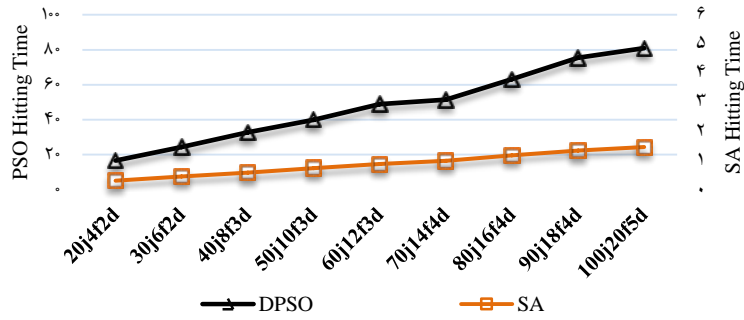
جدول ۹. متوسط RPD الگوریتم‌ها برای تابع هدف در مسایل متوسط

الگوریتم	SA	DPSO
متوسط درصد انحراف نسبی (RPD_1)	۰	۰/۵۰
متوسط درصد انحراف نسبی (RPD_2)	۰/۰۲	۰/۶۲

با توجه به نتایج جدول ۹ الگوریتم SA اثربخشی بهتری نسبت به DPSO دارد چرا که جواب بهینه بهتری ارائه می‌دهد. از سویی با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۳ الگوریتم SA با مقدار متوسط RPD_2 کم تر قابلیت اطمینان بیش تری در سطح اطمینان ۹۵٪ نسبت به الگوریتم DPSO دارد.

برای محاسبه ی سرعت الگوریتم‌های توسعه داده شده، از مفهوم زمان اصابت استفاده شد. زمان اصابت، اولین زمان رسیدن یا اصابت به حالت بهینه است. در شکل ۱۴ مقایسه زمان اصابت برای دو الگوریتم پیشنهادی قابل مشاهده است.

¹ Hitting Time

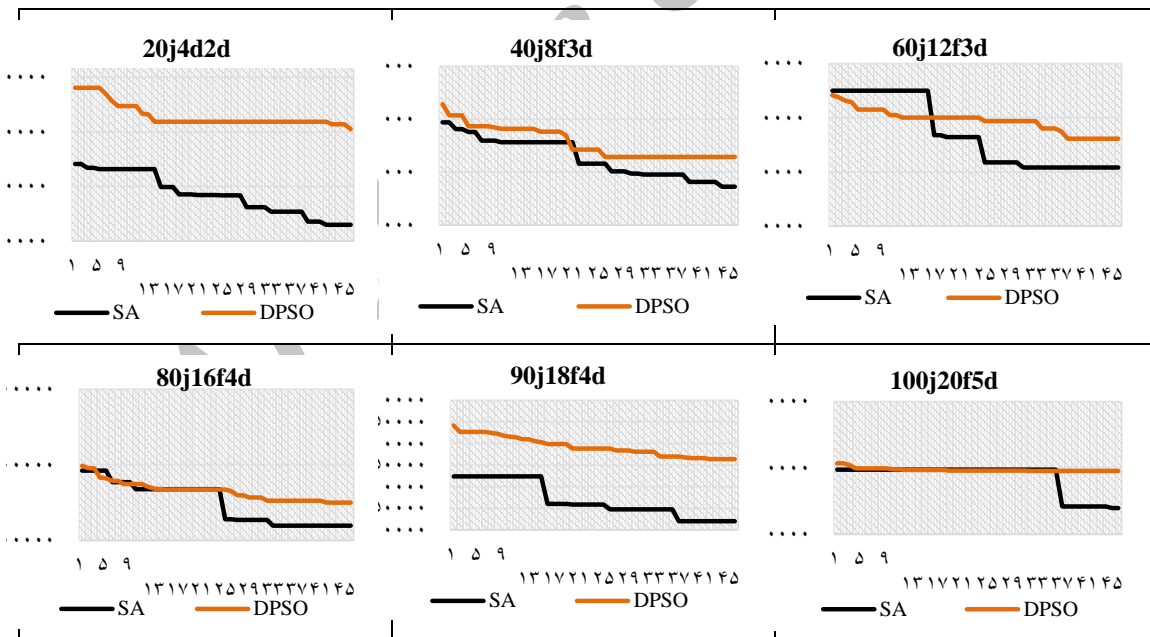


شکل ۱۴. مقایسه زمان اصابت الگوریتم‌های پیشنهادی

با توجه به شکل ۱۵ زمان اصابت الگوریتم SA کمتر از الگوریتم DPSO بوده است. می‌توان این گونه استنباط نمود که این الگوریتم دارای سرعت بالاتری در رسیدن به جواب بهینه می‌باشد و کارایی بالاتری نسبت به الگوریتم DPSO دارد.

• بررسی همگرایی الگوریتم‌های پیشنهادی

همگرایی الگوریتم‌ها به ازای شش مسأله تولیدی انتخابی در شکل ۱۵ نشان داده شده است



شکل ۱۵. بررسی همگرایی دو الگوریتم پیشنهادی

۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله عملکرد دو روش فراابتکاری SA و DPSO را برای حل مسأله زمانبندی هماهنگ تولید و حمل هوایی مورد بررسی قرار دادیم. برای این منظور از یک طرح برای تولید داده استفاده کردیم. در ادامه به علت

تاثیر مقدار پارامترهای یک الگوریتم در کیفیت جواب‌های به دست آمده به تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها بر مبنای طراحی آزمایش تاگوچی پرداخته شد. با توجه به مقدار بهینه پارامترها دو الگوریتم برای نه مساله تولیدی اجرا گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم SA عملکرد بهتری نسبت به DPSO دارد؛ زیرا بهترین مقدار تابع هدف را با قابلیت اطمینان مورد قبول و در کم‌ترین زمان در اختیار می‌گذارد. در نتیجه از منظر کارایی و اثربخشی بهتر از الگوریتم DPSO می‌باشد.

محورهای متعددی برای تحقیقات بعدی می‌توان برشمرد که بعضی از مهم‌ترین آن‌ها در نظر گرفتن زمان‌های توقف برای ماشین‌آلات به صورت تصادفی و یا برنامه‌ریزی شده، در نظر گرفتن انواع دیگر حمل‌مانند حمل ریلی و آبی، در نظر گرفتن انواع مدل‌های تخفیف مانند تخفیف تدریجی و تخفیف افزایشی برای هزینه حمل محصولات، و توسعه این مساله در دیگر محیط‌های زمانبندی تولید مانند ماشین‌های موازی و جریان کارگاهی می‌باشد.

منابع

- [۲۰] برزین‌پور، ف.، صفاریان، م.، تیموری، ا.، (۱۳۹۳). الگوریتم فراابتکاری برای حل مدل برنامه ریزی چند هدفه مکانیابی و تخصیص سه سطحی در لجستیک امداد، مجله ی تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، ۱۱ (۲) ، ص ۵۰-۲۷.
- [1] Pundoor, G., and Chen, Z.-L., (2005). Scheduling a production-distribution system to optimize the tradeoff between delivery tardiness & total distribution cost, *Naval Research Logistics*, 52, 571-589.
- [2] Li, K. P., Sivakumar, A. I., and Ganesan, V. K., (2008). Complexities & algorithms for synchronized scheduling of parallel machine assembly & air transportation in consumer electronic supply chain, *European Journal of Operational Research*, 187, 442-455.
- [3] Li, K. P., Sivakumar, A. I., Mathirajan, M., and Ganesan, V. K., (2004). Solution methodology for synchronizing assembly manufacturing & air transportation of consumer electronics supply chain, *International Journal of Business*, 9, 361-380.
- [4] Li, C. L., Vairaktarakis, G., and Lee, C. Y., (2005a). Machine scheduling with deliveries to multiple customer locations, *European Journal of Operation Research*, 164, 39-51.
- [5] Li, K. P., Ganesan, V. K., and Sivakumar, A. I., (2006a). Scheduling of single stage assembly with air transportation in a consumer electronic supply chain, *Computers & Industrial Engineering*, 51, 264-278.
- [6] Li, K. P., Ganesan, V. K., and Sivakumar, A. I., (2006b). Methodologies for synchronized scheduling of assembly & air transportation in a consumer electronic supply chain, *International Journal of Logistic System & Management*, 2, 52-67.
- [7] Zandieh, M., and Molla-Alizadeh-Zavardehi, S., (2008). Synchronized production & distribution scheduling with due window, *Journal of Applied Sciences*, 8, 2752-2757.
- [8] Zandieh, M., and Molla-Alizadeh-Zavardehi, S., (2009). Synchronizing production & air transportation scheduling using mathematical programming models, *Journal of Computational & Applied Mathematics*, 230, 546-558.
- [9] Rostamian Delavar, M., Hajiaghaei-Keshteli, M., and M., Molla-Alizadeh-Zavardehi, S., (2010). Genetic algorithms for coordinated scheduling of production & air transportation, *Expert Systems with Applications*, 37, 8255-8266.
- [10] Tahmasbi-birgani, E. Najafi, R., and Soltani, A., Mahmoodi-Rad, S. Molla-Alizadeh-Zavardehi., (2012). Coordinated scheduling of production and air transportation in supply chain management, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, ISSN 2250-2459, Volume 2, Issue 10.
- [11] Mortazavi, A., Arshadi Khamseh, B., and Naderi, B., (2015). A novel chaotic imperialist competitive algorithm for production and air transportation scheduling problems, *Neural Computing & Application*, 26, 1709-1723.

- [12]Hajiaghaei-Keshteli, M., Aminnayeri, M., and Fatemi Ghomi, S. M. T., (2014). Integrated Scheduling of Production and Rail Transportation, *Computers and Industrial Engineering*, 74, 240–256.
- [13]Hajiaghaei-Keshteli, M., and Aminnayeri, M., (2014). Solving the Integrated Scheduling of Production and Rail Transportation Problem by Keshtel Algorithm, *Applied Soft Computing*, 25, 184–203.
- [14]Michalewicz, Z., and Vignaux, G.A., and Hobbs, M., (1991). A nonstandard genetic algorithm for the nonlinear transportation problem, *Inform Journal on Computing*, 3, 307-316.
- [15]Quan-Ke, P., M.Fatih, T., Yun-Chia, L., (2008). A discrete particle swarm optimization algorithm for the no-wait flowshop scheduling problem, *Computers & Operations Research* 35 2807 – 2839.
- [16]Gen, M. and Cheng, R., (1997). *Genetic algorithms and engineering design*, NY: John Wiley and Sons.
- [17]Al-Aomar, R., (2006). Incorporating robustness into genetic algorithm search of stochastic simulation outputs. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14, 201-223.
- [18]Phadke, M.S., (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. NJ: Prentice-Hall.
- [19]Naderi, B., Zandieh, M., Ghoshe Balagh, A.K. and Roshanaei, V., (2009). An improved simulated annealing for hybrid flowshops with sequence-dependent setup and transportation times to minimize total completion time and total tardiness. *Expert Systems with Applications*, 36, 9625-9633.

Archive of SID