International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2012)

September 2012, Volume 23, Number 2
pp. 149-160

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

Modelling a Novel Multi-Objective Open-Shop Scheduling Problem and Solving by a Scatter Search Method

N. Amiri, R. Tavakkoli-Moghaddam*, Y. Gholipour-Kanani & S.A. Toarbi

Nafiseh Amiri, *Department of Industrial Engineering, Research & Science Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*
Reza Tavakkoli-Moghaddam, *Department of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*
Yosouf Gholipour-Kanani, *Faculty of Management, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.*
Seyed Ali Torabi, *Department of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*

Keywords

Open shop scheduling problems, Tardiness and earliness time, Makespan, Setup cost, NSGA-II, Multi-objective scatter search

ABSTRACT

This paper proposes a novel, multi-objective integer programming model for an open-shop scheduling problem (OSSP). Three objectives are to minimize the makespan, total job tardiness and earliness, and total jobs setup cost. Due the complexity to solve such a hard problem, we develop a meta-heuristic algorithm based on multi-objective scatter search (MOSS), and a number of test problems are solved by this proposed algorithm. Finally, to prove its efficiency, the related results are compared with the results obtained by the well-known multi-objective evolutionary algorithm, called NSGA-II. The results confirm the efficiency and the effectiveness of our proposed MOSS to provide good solutions, especially for medium and large-sized problems.

* **Corresponding author. Reza Tavakkoli-Moghaddam**
Email: *tavakoli@ut.ac.ir*

نشـــريه بين المللـــي مهنــدسي صنـــايع و مديـــريت توليــد

شمـ ـاره ۲، جلـ ـد ۲۳، شهريـ ـور ۱۳۹۱

صفحـ ـ ـه ۱۶۰-۱۵۰

نشريه بين المللي مهندسي صنايع و مديريت توليد
دانشگاه علم و صنعت ايران

ISSN: 2008-4870

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

مدل‌سازي يک مسأله زمان‌بندي کارگاه باز چند هدفه جديد و حل آن با استفاده از روش جستجوي پراکنده

نفيسه اميري، رضا توکلي مقدم*، يوسف قلي‌پورکنعاني و سيدعلي ترابي

کلمات کليدي

مسايل زمان‌بندي کارگاه باز،
زمان ديرکرد و زودکرد،
حداکثر زمان تکميل کارها،
هزينه راه‌اندازي،
جستجوي پراکنده چند هدفه،
NSGA-II

چکيده:

در اين مقاله، يک مدل رياضي چندهدفه جديدي براي زمان‌بندي توليد در محيط کارگاه باز ارايه مي‌شود. اهداف مدل پيشنهادي شامل حداقل نمودن حداکثر زمان تکميل کارها، مجموع زمان ديرکرد و زودکرد کارها و مجموع هزينه راه‌اندازي کارها است. مسأله مورد نظر با توجه به ماهيت پيچيده آن در زمره مسايل NP-hard قرار مي گيرد، بنابراين يک الگوريتم فراابتکاري چندهدفه بر مبناي روش جستجوي پراکنده براي حل آن ارايه می شود و مسايل متنوعی با ابعاد مختلف مورد حل قرار می‌گيرد. در نهايت براي اثبات کارايی روش پيشنهادي، نتايج حاصل از آن با جواب‌هاي توليد شده توسط يك روش تكاملي چندهدفه معروف به NSGA-II مقايسه می‌شوند. نتايج مربوطه نشان دهنده کارايي روش پيشنهادي در توليد جواب‌هاي با کيفيت، متنوع و داراي پراکندگي بالا است.

۱. مقدمه

زمان‌بندي عمل تعيين اولويت‌ها و يا مرتب نمودن فعاليت‌ها براي برآورده نمودن الزامات مشخص، محدوديت‌ها و يا اهداف است [۱]. زمان‌بندي يک فرآيند تصميم‌گيري است که در تنظيمات حمل‌ونقل و توزيع و ساير انواع صنايع توليدي و خدماتي بکار مي‌آيد [۲]. يک برنامه زمان‌بندي کارا منجر به بهره برداري مؤثر از ظرفيتهاي توليد، کاهش زمان تکميل کارها و در نهايت افزايش سوددهي واحدهاي توليدي مي‌گردد [۳]. يک مسأله زمان‌بندي در محيط کارگاه باز با مجموعه‌اي از فعاليت‌ها مواجه است که در انجام آن‌ها لزومي به رعايت ترتيب خاصي وجود ندارد. بنابراين فضاي حل در مسايل زمان‌بندي کارگاه باز به‌طور قابل ملاحظه‌اي از فضاي جواب مسايل زمان‌بندي ديگر نظير زمانبندي گردش کاري و توليد کارگاهي بزرگتر است که البته محققان تاکنون توجه کمتري نسبت به اين مسايل داشته‌اند [۳].

در يک مسأله زمان‌بندي در محيط کارگاه باز m ماشين و n کار در نظر گرفته مي شوند که هر کار حداکثر مي‌تواند شامل m عمليات باشد. هر عمليات بايستي بر روي يک ماشين با زمان پردازش معين انجام شود. مسأله توليد کارگاه باز مشابه مسأله توليد کارگاهي بوده ولي با اين تفاوت که ممکن است کارها بر روي يک ماشين با هر توالي دلخواهي پردازش شود. بنابراين در اين مسايل توالي وابسته به عمليات وجود ندارد.

شا و سو [۴] الگوريتمي را بر مبناي الگوريتم بهينه‌سازي ذرات انبوه در محيط کارگاه باز ارايه نمودند. اندرسون و همکاران [۵] الگوريتمي بر مبناي شبيه‌سازي تبريد و الگوريتم ژنتيک براي

تاريخ وصول: ۸۹/۴/۱۹

تاريخ تصويب: ۹۰/۳/۲۹

نفيسه اميري، دانش آموخته کارشناسي ارشد گروه مهندسي صنايع، دانشکده فني و مهندسي، واحد علوم تحقيقات، دانشگاه آزاد اسلامي، nafiseh_amiri@yahoo.com

*نويسنده مسئول مقاله: دکتر رضا توکلي مقدم، استاد گروه مهندسي صنايع، پرديس دانشکده هاي فني، دانشگاه تهران، tavakoli@ut.ac.ir

يوسف قلي پورکنعاني، مربی گروه مديريت، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامي، gholipourkanani@yahoo.com

سيدعلي ترابي، دانشيار گروه مهندسي صنايع، پرديس دانشکده هاي فني، دانشگاه تهران، satorabi@ut.ac.ir

کمينه‌سازي ميانگين زمان جريان ساخت در مسأله زمانبندي کارگاه باز ارايه نمودند. چن و همکاران [۶] به بررسي توالي‌هاي انبوه براي مسأله زمانبندي کارگاهي باز با فرض وجود زمان‌هاي ترخيص پرداختند. لو و يه [۷] الگوريتم ژنتيکي را بر مبناي روش‌هاي ابتکاري براي مسأله زمان‌بندي کارگاه باز ارايه نمودند. آنها فرض نمودند که زمان‌هاي آماده‌سازي و پردازش و تخليه مجزا از يکديگر مي‌باشند. معياري که آنها براي کمينه‌سازي انتخاب نمودند، ديرکرد کل کارها مي‌باشد. بلام [۸] بر روي ترکيب الگوريتم بهينه‌سازي مورچگان و جستجوي پرتو کار نموده و کاربرد آن را بر روي الگوريتم زمان‌بندي کارگاه باز مورد بررسي قرار داده است. لياو و همکاران [۹] زمان‌بندي دو ماشينه در محيط کارگاه باز را در حالت بدون توقف مورد بررسي قرار دادند. لياو [۱۰] الگوريتم را بر مبناي جستجوي ممنوع براي حل مسأله زمان‌بندي کارگاه باز دو ماشينه با فرض مجاز بودن انقطاع کارها ارايه کرد. تابع هدف کمينه‌سازي نيز ديرکرد کل مي‌باشد.

کنونف و سويريدنکو [۱۱] روش تقريبي را براي کمينه‌سازي حداکثر زمان تکميل کارها در محيط کارگاه باز با فرض موعد زمان ترخيص ارائه کردند. بريت، اشميت و استروسويچ [۱۲] مسأله زمان بندي کارگاه باز را در حالت دو ماشينه با محدوديت دسترسي مورد بررسي قرار دادند. لياو [۱۳] الگوريتم ژنتيک ترکيبي را براي مساله زمان‌بندي کارگاه باز ارايه کرده است و سپس الگوريتم ژنتيک را با جستجوي ممنوع ترکيب نموده و کاربرد آن را بر روي مسأله کارگاه باز مورد بررسي قرار داده است. کراوچنکو [۱۴] به مطالعه کمينه‌سازي تعداد کارهاي همراه با ديرکرد در محيط کارگاه باز زمان واحد پرداخت. لياو [۱۵] يک روش تقريبي براي يافتن کمترين مقدار حداکثر زمان تکميل کارها در يک مسأله کارگاه باز با فرض غير مجاز بودن انقطاع ارايه کرد.

لياو [۱۶] مساله زمان‌بندي کارگاه باز را در حالت عدم وجود انقطاع مورد بررسي قرار داد. وي الگوريتم شبيه‌سازي تبريدي را براي کمينه سازي حداکثر زمان تکميل کارها ارايه کرده است. سراج و توکلي مقدم [۱۷] يک الگوريتم جستجوي ممنوع چندهدفه جديد که بر مبناي رويکرد تصميم گيري چندهدفه فازي است، را براي حل مسأله کارگاه باز دوهدفه ارايه نمودند.

در اين مقاله، مسأله زمان‌بندي در محيط کارگاه باز مورد بررسي قرار مي‌گيرد. با توجه به اينکه در دنياي واقعي تصميم‌گيرنده در بسياري از مواقع نيازمند است تصميم خود را نه تنها بر اساس يک هدف بلکه بر اساس مجموعه‌اي از اهداف موجود اتخاذ نمايد؛ لذا وجود يک روش حل مسأله چند هدفه مي‌تواند موجب رسيدن به جواب‌هاي واقعي‌تر، عملي‌تر و کاربردي‌تر شود. اين مقاله، به ارايه يک مدل رياضي جديد چندهدفه براي حداقل نمودن حداکثر زمان تکميل کارها، حداقل کردن زمان ديرکرد و زودکرد کارها و حداقل کردن هزينه راه‌اندازي در محيط کارگاه باز که تاکنون به آن پرداخته نشده است، مي‌پردازد. اين مسأله با توجه به ماهيت پيچيده آن در زمره مسايل NP-Hard قرار مي‌گيرد [۱۸]، لذا مي‌توان از الگوريتم‌هاي فراابتکاري جهت حل اينگونه مسايل استفاده کرد. سپس براي حل مسأله مورد نظر در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ، يک الگوريتم جستجوي پراکنده چند هدفه براي يافتن تقريب خوبي از جواب بهينه پارتو براي حداقل نمودن سه تابع هدف پيشنهاد مي‌شود.

ويژگي متمايز الگوريتم جستجوي پراکنده چند هدفه پيشنهادي در جستجوي فضاي جواب مسأله از طريق يک روش هوشمند است که بر خلاف روش‌هاي فراابتکاري ديگر مانند الگوريتم ژنتيک، از روشي صرفاً تصادفي و در برخي موارد، بدون پشتوانه منطقي، اجتناب مي‌ورزد و همچنين استفاده از جواب‌هاي با بهترين کيفيت و بيشترين پراکندگي براي به دست آوردن جواب‌هاي غالب است. در انتها نيز براي اثبات کارايي روش پيشنهادي، نتايج حاصل از آن با جواب‌هاي توليد شده توسط روش NSGA-II مقايسه مي‌شود. الگوريتم NSGA-II، يك الگوريتم چندهدفه، نخبه‌گرا و بر اساس الگوريتم ژنتيک است که توسط دب [۱۹] ارايه شده است. کارايي اين الگوريتم از لحاظ پراکندگي بيشتر جواب‌ها ونزديک‌تر بودن جواب‌ها به منحني پارتو واقعي بهتر از دو الگوريتم هم طبقه خود به نام‌هاي PAES و SPEA مي‌باشد. در نتيجه با توجه به کارايي بالاي الگوريتم NSGA-II و استفاده ساير نويسندگان و پژوهشگران از اين الگوريتم براي مقايسه نتايج محاسباتي، در اين مقاله براي مقايسه کارايي الگوريتم پيشنهادي، از الگوريتم NSGA-II استفاده شده است. اين مقاله، از بخش‌هاي زير تشکيل شده است، بخش ۲ شامل مدل رياضي جديد براي مسأله مورد نظر است. بخش ۳ به ارايه روش جستجوي پراکنده پيشنهادي براي حل مسأله مورد نظر اشاره مي‌پردازد. نتايج محاسباتي در بخش ۴ و سپس نتيجه‌گيري نيز در بخش ۵ آورده مي‌شود.

۲. مدل پيشنهادي

مدل پيشنهادي چند هدفه با تشريح مفروضات, پارامترها، متغيرها، تابع هدف و محدوديت‌ها در ادامه ارايه مي‌گردد.

۲-۱. مفروضات مدل

مفروضات در نظر گرفته شده براي اين مدل عبارتند از:

- کارها مي‌توانند بر روي ماشين‌ها با هر ترتيب دلخواهي پردازش شوند.
- زمان پردازش کارها بر روي ماشين‌هاي متفاوت ممکن است با هم تفاوت داشته باشد.

- هر کار در لحظه مي‌تواند فقط بر روي يک ماشين پردازش شود و هر ماشين در لحظه تنها مي‌تواند يک عمليات را انجام دهد.
- بريدگي کارها و خرابي ماشين ها مجاز نمي‌باشد.
- هر کار داراي موعد تحويل معيني است.
- از هر نوع ماشين تنها يکي در محيط کاري وجود دارد.
- تمامي ماشين‌ها از ابتدا در دسترس مي‌باشند.
- هزينه راه‌اندازي هر کار بر روي ماشين به کار قبلي روي همان ماشين بستگي دارد.
- زمان‌هاي پردازش و موعدهاي تحويل قطعي است.

۲-۲. انديس‌ها

انديس‌هاي بکار رفته در مدل رياضي اين مساله به‌صورت زير است:

i و j : نماد کارها است که متعلق به مجموعه $i=\{1,\ldots,n\}$ است و n تعداد کارها است.

k: نماد ماشين که متعلق به مجموعه $j=\{1,\ldots,m\}$ مي‌باشد و m تعداد ماشين‌ها است.

۲-۳. پارامترهاي ورودي مسأله

مقادير پارامترهاي ورودي که بايد در ابتداي حل مدل رياضي مشخص شوند, عبارتند از: زمان پردازش، زمان تکميل کارها، موعد تحويل کارها، عمليات مربوط به کارها بر روي ماشين ها، هزينه راه‌اندازي ماشين‌ها. ورودي‌ها با نمادهاي زير نشان داده مي‌شوند:

T_{ik}: زمان پردازش کار i روي ماشين k

d_i: موعد تحويل کار i

O_{ik}: عمليات مربوط به کار i روي ماشين k

$S_i(j,k)$: هزينه راه‌اندازي ماشين k براي کار j وقتي که کار قبلي روي ماشين k و i باشد.

۲-۴. متغيرهاي تصميم‌گيري

C_{ik}: زمان تکميل کار i روي ماشين k

mc_i: زمان تکميل کار i

$$a_{ilk}\begin{cases}1 & \text{کار } i \text{ روی ماشین } k \text{ در صورتی که ماشین قبلی } l \text{ باشد}\\ 0 & \text{در غیر این صورت}\end{cases}$$

$$X_{ijk}\begin{cases}1 & \text{کار } j \text{ روی ماشین } k \text{ در صورتی که کار قبلی روی ماشین } k \text{ و } i \text{ باشد}\\ 0 & \text{در غیر این صورت}\end{cases}$$

۲-۵. مدل رياضي

مدل رياضي سه هدفه پيشنهادي به‌صورت زير ارايه مي‌شود:

$$\text{Min} \quad Z_1 \qquad (۱)$$

$$\text{Min} \quad Z_2 \qquad (۲)$$

$$\text{Min} \quad Z_3 \qquad (۳)$$

s.t.

$$Z_1 \ge c(i,k) \qquad \forall\, i,k \qquad (۴)$$

$$i,k,l\; c(i,k) - t(i,k) + M(1-a_{ilk})\, c(i,l)\ \forall \qquad (۵)$$

$$c(j,k) - t(j,k) + M(1-x_{ijk}) \ge c(i,k)\ \forall\, i,j,k \qquad (۶)$$

$$a_{ilk} + a_{ikl} = 1 \qquad \forall\, i,k,l \qquad (۷)$$

$$x_{ijk} + x_{jik} = 1 \qquad \forall\, i,j,k \qquad (۸)$$

$$c(i,k) - t(i,k) \ge 0 \qquad \forall\, i,k \qquad (۹)$$

$$mc(i) = max\{c(i,k)\} \qquad \forall\, i,k \qquad (۱۰)$$

$$Z_2 = \sum_{i=1}^{n} \max\{|mc(i) - d(i)|\} \qquad (۱۱)$$

$$Z_3 = \sum_{k=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} s_i\,(j,k)\,x_{ijk} \qquad (۱۲)$$

معادلات (۱) الي (۳) توابع هدف مسأله به‌ترتيب براي کمينه‌سازي حداکثر زمان تکميل کارها، کمينه‌سازي زمان ديرکرد و زودکرد کارها و کمينه‌سازي مجموع هزينه راه‌اندازي ماشين‌ها هستند. معادله (۴)، معادله کمکي براي جلوگيري از استفاده تابع Max در مدل رياضي است. با توجه به آنکه تابع هدف کمينه سازي Z_1 است و Z_1 نيز بزرگتر يا مساوي بيشترين زمان تکميل مي‌باشد، لذا استفاده از اين محدوديت به استفاده از تابع Max ارجحيت داده شده است. معادلات (۵) و (۶) براي محاسبه زمان تکميل عمليات مختلف از کارها بر روي ماشين‌ها است. معادله (۵) بيان مي نمايد که زمان اتمام دو عمليات متوالي از يک کار بر روي دو ماشين حداقل بايد به اندازه زمان پردازش عمليات قبلي فاصله داشته باشند. معادله (۶) بيان مي‌نمايد که زمان اتمام دو کار متوالي بر روي يک ماشين حداقل بايد به اندازه زمان پردازش کار قبلي با هم فاصله داشته باشند. معادلات (۷) و (۸) معادلات کمکي هستند که قدم و تاخر عمليات‌ها را بين يکديگر و بر روي ماشين‌هاي مشخصي نمايند. معادله (۹) براي تنظيم زمان عمليات اول از هر کار بر روي ماشين‌هاي است. معادله (۱۰) زمان اتمام هر کار را محاسبه مي‌نمايد. از اين مقدار براي محاسبه ديرکرد و زودکرد کارها استفاده مي‌شود. معادله (۱۱) مجموع ديرکرد و زودکرد کارها را محاسبه مي‌کند. معادله (۱۲) مجموع هزينه راه‌اندازي کارها را محاسبه مي‌کند.

۳. روش جستجوي پراکنده پيشنهادي

۳-۱. پيشينه روش جستجوي پراکنده

از اوايل دهه ۹۰ ميلادي همزمان با مشاهده ضعف روش‌هاي ابتکاري موجود در جستجوي هوشمندانه فضاي جواب، تلاش براي يافتن روش‌هاي جايگزين که بتوانند اين نقصان را برطرف نمايند، افزايش يافت. يکي از اين روش‌ها، جستجوي پراکنده بود که توجه محققان را به خود جلب نمود. روش جستجوي پراکنده به دليل برخورداري از يک ساختار جستجوي هدفمند براي توليد جواب‌هاي مناسب پراکنده، از قابليت بالايي در حل مسايل بهينه‌سازي پيوسته و ترکيبي برخوردار است [۲۰ و ۲۱].

گلوور و همکاران [۲۲] شباهت‌ها و تفاوت‌هاي موجود بين روش جستجوي پراکنده و الگوريتم ژنتيک را معرفي کردند. آن‌ها ادعا کردند که روش جستجوي پراکنده بر خلاف الگوريتم ژنتيک، از یک الگوي غير تصادفي و هوشمندانه براي جستجوي فضاي جواب استفاده مي‌کند. نوويسکي و همکاران [۲۳] نگاه جديدي به فضاي جواب و فرآيند جستجو داشته اند، در روش ارايه شده در اين مقاله از برخي ويژگي‌هاي جستجوي پراکنده و روش‌هاي مسيريابي مجدد براي حل مسأله زمان‌بندي جريان کارگاهي استفاده شده است. دياز و همکاران [۲۴] الگوريتم ابتکاري را براي مسأله توانا شده‌ي *p*-medium ارايه مي‌دهند. سيلوا و همکاران [۲۵] روشي بر اساس جستجوي پراکنده براي يافتن تقريب خوبي براي مسأله کوله پشتي صفر و یک بدون مرز ارايه دادند که اين روش از ساختار کلي جستجوي پراکنده استفاده مي‌کند. بوسوليل [۲۶] یک الگوريتم جستجوي پراکنده چند معياره بمنظور حل مساله بهينه‌سازي پيوسته غيرخطي کران‌دار در ابعاد بالا بکار برده است.

۳-۲. ساختار کلي روش جستجوي پراکنده

اساس اين روش فراابتکاري، بر پايه جستجوي فضاي جواب مسأله از طريق يك روش هوشمند است. بر خلاف روش‌هاي فراابتکاري ديگر مانند الگوريتم ژنتيك، از روشي صرفاً تصادفي و در برخي موارد، بدون پشتوانه منطقي، اجتناب مي‌ورزد. اين الگوريتم، فضاي حل مسأله را از طريق توليد جواب (جواب‌هاي) بهتر، بوسيله ترکيب جواب‌هاي موجودي که داراي پتانسيل لازم جهت ترکيب هستند، جستجو مي‌کند. به عبارت ديگر در روش جستجوي پراکنده، روش‌هاي انتخاب جواب‌ها براي ادغام و ترکيب اين جواب‌ها جهت دستيابي به جواب‌هاي بهتر و جستجوي فضاي حل مسأله، داراي الگوي مشخص و معيني هستند. ساختار کلي الگوريتم، متشکل از پنج بخش زير است.

- روش توليد جواب‌هاي پراکنده: اولين گام از گام‌هاي لازم جهت طراحي روش فراابتکاري جستجوي پراکنده، استفاده از الگويي معين و کارا جهت توليد جوابهاي پراکنده در يك سطح (حد) بحراني است. با توجه به ماهيت مسأله، براي توليد جوابهاي پراکنده مي‌توان از روش‌هاي ابتکاري يا فراابتکاري مانند جستجوي ممنوع استفاده کرد. استفاده از اين روش‌ها يکي از اصلي‌ترين مزاياي روش جستجوي پراکنده در مقايسه با ساير روش‌هاي فراابتکاري است. اين مزيت باعث مي‌گردد که الگوريتم از توانايي لازم جهت جستجوي فضاي جواب در مسيرهاي متفاوت برخوردار گردد.
- روش بهبود جواب‌هاي پراکنده توليد شده: در اين مرحله سعي مي‌گردد تا جواب‌هاي پراکنده توليد شده در مرحله قبل، از طريق يك رويکرد موثر و کارا، در راستاي اهداف مسأله بهبود يابند. اين روش بهبود مي‌تواند در ساده-ترين حالت، يك جستجوي محلي و در حالت پيچيده از طريق استفاده از روش‌هاي ابتکاري و فراابتکاري مناسب حاصل گردد.
- به روز رساني مجموعه مرجع: قبل از تشريح اين گام از ساختار روش جستجوي پراکنده، تعريف زير بايد در نظر گرفته شود:

مجموعه مرجع متشکل از b جواب است که از نقطه نظر کيفيت و ايجاد پراکندگي در مسيرهاي جستجو، داراي پتانسيل لازم و مناسب براي توليد جواب‌هاي جديد هستند.

براي تشکيل و به روز رساني مجموعه مرجع که در واقع مرکز اصلي جستجوي پراکنده است، بايد دو نکته اساسي را در نظر گرفت:

۱) اين مجموعه بايد در برگيرنده جواب‌هايي باشد که از نقطه نظر کيفيت، اهداف مسأله را بهتر برآورده مي‌کنند.

۲) علاوه بر جواب‌هاي با کيفيت، جواب‌هايي که باعث ايجاد پراکندگي در مسيرهاي جستجو مي‌گردند نيز بايد در اين مجموعه لحاظ گردند. بنابراين، هدف اصلي، بکارگيري يك روش به روز رساني هوشمند براي مجموعه مرجع، با توجه به جواب‌هاي توليد شده در دو مرحله قبل و جواب‌هاي موجود در مجموعه است.کنترل تعداد ترکيب‌هاي ممکن در يك مجموعه مرجع معين باشد.

- ايجاد زير مجموعه‌ها: در اين مرحله، با استفاده از يك رويکرد هوشمند و غيرتصادفي، جواب‌هايي که بايد با هم ترکيب شوند، از بين اعضاي مجموعه مرجع مشخص مي‌گردند. عموماً اگر مجموعه مرجع شامل b حل باشد، روش ايجاد زير مجموعه بطور تقريب (3b-7)/2 ترکيب از چهار نوع مختلف را بررسي و آزمايش مي‌کند. محدودسازي قلمرو جستجو به گروه منتخبي از انواع ترکيب‌ها مي‌تواند به

عنوان مکانيزمي براي کنترل تعداد ترکيب‌هاي ممکن در يک مجموعه مرجع معين باشد.

- ترکيب زير مجموعه‌هاي منتخب: پس از تشکيل زير مجموعه‌ها، اعضاي هر زير مجموعه از طريق ترکيبات محدب و غير محدب، ترکيب و بدين طريق جواب (جواب‌هاي) جديد حاصل مي گردند.

۳-۳. ساختار پيشنهادي روش جستجوي پراکنده

در اين بخش، اجزاي طراحي شده براي ساختار روش فراابتکاري جستجوي پراکنده به صورت کامل مورد تجزيه و تحليل قرار خواهند گرفت.

۱-۳-۳. ساختار کلي روش پيشنهادي

ساختار کلي طراحي شده براي روش جستجوي پراکنده چند هدفه به صورت زير ارايه مي‌گردد.

گام ۱)

- توليد يک جمعيت اوليه به اندازه N بوسيله الگوريتم ژنتيک
- مشخص کردن نقطه آرماني
- مقداردهي اوليه آرشيو پارتو

گام ۲) توليد جواب‌هاي پراکنده با استفاده از روش خط‌دار کردن مسير

گام ۳) بهبود جواب‌هاي پراکنده توليد شده

گام ۴) ايجاد مجموعه مرجع (b_1 براي جواب‌هاي باکيفيت بالا و b_2 براي جواب‌هاي داراي پراکندگي زياد)

گام ۵)

- توليد زيرمجموعه‌ها از مجموعه مرجع
- ترکيب زيرمجموعه‌هاي منتخب
- بهبود جواب‌هاي حاصل از ترکيب جواب‌ها
- به‌روزرساني آرشيو پارتو
- به‌روز رساني نقطه آرماني
- به‌روزرساني مجموعه مرجع

تا وقتي که ۷۰ درصد از مجموعه مرجع عوض نشوند، گام ۵ تکرار مي‌شود. به تعداد الگوريتم جستجوي پراکنده گام‌هاي ۲ الي ۵ تکرار مي‌شوند و بعد از تکرار معيني الگوريتم متوقف مي‌شود.

۲-۳-۳. نحوه نمايش جواب‌ها

در تمام الگوريتم‌هاي فراابتکاري، بدليل نياز به حل شدني در شروع کار، لازم است حل شدني را بر طبق ساختار مشخصي ذخيره کنيم که به اين ساختار، نحوه نمايش جواب مي‌گويند. يك حل شدني براي مسأله مورد نظر، در شکل (۲) نشان داده شده است.

نحوه نمايش جواب در اين مقاله بصورت يک ماتريس يک بعدي با $m \times n$ خانه است که m تعداد ماشين و n تعداد کار است. به عنوان مثال، جواب بالا نشان دهنده اين است که ابتدا کار ۱ بر روي ماشين ۲ پردازش مي‌شود و سپس کار ۲ بر روي ماشين ۴ و بلاخره کار i ام بر روي ماشين k ام پردازش خواهد شد.

1	2						$n \times m$
O_{12}	O_{24}			....		....	O_{ik}

شکل ۲. نحوه نمايش جواب

۳-۳- ۳. نحوه توليد جواب‌هاي اوليه

همان‌طور که مي‌دانيم کيفيت جواب‌هاي نهايي بدست آمده از روش‌هاي فراابتکاري بستگي مستقيم به کيفيت جواب‌هاي اوليه توليد شده دارد، در اين مقاله، از الگوريتم ژنتيک براي توليد جواب‌هاي آغازين استفاده مي‌شود. هدف اصلي بکارگيري اين روش، توليد جواب‌هاي اوليه‌اي است که از نقطه نظر کيفيت جواب و پراکندگي، از سطح مطلوبيت مناسبي برخوردار باشند. جمعيت اوليه‌اي با اندازه N براي شروع اين الگوريتم بصورت کاملاً تصادفي توليد مي‌شود. تعداد تکرار الگوريتم ژنتيک در اينجا ۲۰۰ بار در نظر گرفته شده است.

عملگر جهش: عملگر جهش استفاده شده در الگوريتم ژنتيک، يک عملگر معکوس است که در پياده‌سازي الگوريتم ژنتيك در تحقيقات پيشين از آن استفاده شده است. اين عملگر به اين صورت است که ابتدا دو نقطه از توالي ورودي به تصادف انتخاب مي‌شوند و سپس توالي بين اين دو نقطه معکوس خواهد شد.

عملگر تقاطع: عملگر ترکيب استفاده شده براي الگوريتم ژنتيک در اينجا يک عملگر دو نقطه‌اي است. به اين صورت که مثلاً فرزند ۱، بخش هاي اول و سوم والد ۱ را عيناً مي‌گيرد و قسمت وسط از والد ۲ گرفته مي‌شود يعني تمام اعضايي که در فرزند ۱ نيست به ترتيب از والد ۲ گرفته مي‌شود. در مورد فرزند ۲ همين کارها صورت گرفته فقط جاي والد ۱ و والد ۲ عوض مي‌شود.

مثال: فرض کنيد نحوه انتخاب والدين با استفاده از تورنومنت دوتايي صورت مي‌گيرد و سپس نقاط ۳ و ۶ از اين والدين انتخاب مي شوند (شکل ۳).

Parent 1	**2**	**4**	**1**	**5**	**7**	**6**	**3**	**9**	**8**
Parent 2	4	6	9	5	3	1	2	7	8

Child 1	**2**	**4**	**1**	6	5	7	**3**	**9**	**8**
Child 2	4	6	9	**1**	**5**	**3**	2	7	8

شکل ۳. نمايش عملگر تقاطع در ايجاد حل‌هاي جديد

نقطه آرماني: نقطه‌اي مجازي است که مولفه‌هاي آن از جواب بهينه هر يك از تابع‌هاي هدف، که بصورت مجزا بهينه گرديده‌اند، تشکيل شده است. بدست آوردن نقطه آرماني با مولفه‌هاي دقيق در مسائل بهينه‌سازي سخت، در يك زمان محاسباتي مناسب و معقول، امري غيرممکن است. در اين مقاله، براي مقابله با اين نقصان، از يك مفهوم جديد به نام نقطه آرماني پويا استفاده مي-شود. نقطه آرماني پويا، يك نقطه آرماني تقريبي است که مولفه-هاي آن از جوابهاي بهينه محلي تابع‌هاي هدف تشکيل شده است. جهت دستيابي به نقطه آرماني پوياي اوليه، در اين مقاله پس از توليد جمعيت اوليه، N مقدار بدست آمده براي هر يك از سه تابع هدف، جداگانه و بصورت صعودي مرتب مي‌شوند. کوچکترين مقدار بدست آمده براي تابع هدف i ام برابر مؤلفه متناظرش در نقطه آرماني پويا کوچکتر مي‌شود. براي به روز رساني مقادير مؤلفه‌هاي نقطه آرماني پويا، فرآيند زير در انتهاي هر تکرار جستجوي پراکنده چند هدفه انجام مي‌شود: N مقدار بدست آمده براي هر يك از سه تابع هدف، جداگانه و بصورت صعودي مرتب مي‌شوند. اگر کوچکترين مقدار بدست آمده براي تابع هدف i ام از مؤلفه متناظرش در نقطه آرماني پويا کوچکتر باشد، اين مقدار جايگزين مي‌گردد و در غير اين صورت مؤلفه مورد نظر تغيير نمي‌کند.

آرشيو جواب‌هاي پارتو

از آنجا که در حل مسايل چندهدفه به دليل وجود تناقض بين اهداف، يك جواب واحد که همه اهداف در آن بهينه باشند، وجود ندارد، در نهايت مجموعه‌اي از جواب‌هاي غالب به عنوان جواب‌هاي بهينه (نزديك بهينه)، ارايه خواهند شد. در اينجا که از يك روش مبتني بر آرشيو پارتو براي حل استفاده شده است، کيفيت جواب‌هاي موجود در آرشيو، بسيار اهميت دارد. لذا در اين مقاله، اين آرشيو در هر تکرار الگوريتم جستجوي پراکنده به روز خواهد شد. روش به روز کردن آن در اينجا به گونه‌اي طراحي شده است که در آن تمام جواب‌هاي غير مغلوب نگهداري مي-شوند. براي به روز کردن آرشيو پارتو، تمام جواب‌هاي موجود در آرشيو تکرار قبلي و جمعيت جواب‌هاي تکرار فعلي در يک استخر ريخته شده و تمام جوابهايي که هيچ جوابي در استخر بر آنها غلبه نمي‌کند را به آرشيو جديد وارد مي‌کنيم. در اين مقاله، براي اندازه آرشيو محدوديتي در نظر گرفته نشده است.

۴-۳-۳. روش توليد جواب‌هاي پراکنده

در اين مقاله، براي توليد جواب‌هاي پراکنده از روش خط‌دار کردن مسير [۲۷] استفاده مي‌گردد. اين روش در ابتدا به منظور هماهنگ‌سازي استراتژي‌هاي تشديد و تنوع در روش جستجوي ممنوع بکار برده شده است. اين روش، جواب‌هاي جديد را با استفاده از کاوش مسيرهاي متصل کننده بين دو جواب با کيفيت توليد مي‌کند.

اين روش، جستجوي خود را از حل اوليه شروع کرده و مسيري در همسايگي اين حل، بمنظور رسيدن به حل کمکي توليد مي-کند. اگر چه اين روش يك جزء لازم از الگوريتم جستجوي پراکنده نمي‌باشد، اما اجراي الگوريتم با اين روش به نتايج بهتري منجر مي‌گردد. بنابراين در اين مقاله، از اين روش در اجراي الگوريتم جستجوي پراکنده استفاده گرديده است. لازم به ذکر است که حل اوليه در بين حل‌هاي موجود در جمعيت جواب‌ها، حلي است که نسبت به نقطه آرماني پويا کمترين فاصله اقليدسي را دارا باشد. روش خط دار کردن مسير براي هر يك از حل‌هاي موجود در جمعيت جواب‌ها بطور جداگانه استفاده مي‌گردد.

در ادامه به منظور توضيح اين روش از يك مثال عددي استفاده مي گردد. دو حل اوليه و کمکي در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.

حل اوليه:

2	5	3	6	4	1

حل کمکي:

4	2	6	3	1	5

شکل ۴. حل اوليه و کمکي

بطور کلي با بکارگيري روش خط‌دار کردن مسير براي مسأله ارايه شده در اين تحقيق، حداکثر $n\times m$ جواب در همسايگي دو حل اوليه و کمکي ايجاد مي‌گردد. يعني در مثال بالا که ۳ کار و ۲ ماشين است، که هر ماتريس جواب شامل شش سلول است، حداکثر شش جواب در مسير دو جواب توليد خواهد شد. براي توليد جواب‌هاي مسير متصل کننده دو جواب مذکور، در هر مرحله، يك عمليات در حل اوليه در نظر گرفته شده و آن را در مکاني شبيه به حل کمکي زمانبندي مي‌کند. در آخرين مرحله، توالي عمليات روي آخرين حل توليد شده، مشابه حل کمکي خواهد بود. جواب‌هاي توليد شده بين دو جواب بالا در شکل (۵) نشان داده شده‌اند.

4	2	6	3	1	5

1	2	6	3	4	5

5	2	6	3	4	1

2	5	6	3	4	1

2	5	3	6	4	1

شكل ۵. جواب‌هاي توليد شده

همانطور كه مشاهده مي‌شود در مسير جواب اوليه به جواب كمكي، ۳ جواب توليد شده است. جواب‌هاي بدست آمده براي همه جواب‌ها در يك استخر ذخيره شده و در نهايت N جواب پراكنده لازم با توجه به قاعده دب [۱۹] انتخاب خواهند شد.

۳-۳-۵. روش بهبود جواب‌هاي پراكنده توليد شده

در اين بخش، يك روش بهبود دهنده بر روي هر يك از جواب‌هاي پراكنده توليد شده در مرحله قبل در راستاي افزايش كيفيت جواب‌ها اعمال مي‌گردد. براي طراحي روش بهبود جواب‌ها در اين مقاله، از عملگرهاي جستجوي همسايگي موازي استفاده شده است. در اينجا عملگرهاي جستجوي همسايگي بصورت دو عملگر زير براي بهبود جواب‌ها استفاده شده است. عملگر XP محل انجام دو كار را با هم تعويض مي‌كند و IP كاري را كه در مكان i ام زمانبندي شده است را در مكان j ام جا مي‌دهد. اين دو عملگر بصورت موازي (همزمان) بر روي يک جواب اعمال شده و از بين دو جواب خروجي اين عملگرها يكي انتخاب مي‌شود [۲۸].

۳-۳-۶. به روز رساني مجموعه مرجع

در اين مقاله، مجموعه مرجع از دو زير مجموعه به نام‌هاي Refset1 (جواب‌هاي با كيفيت) و Refset2 (جواب‌هاي پراكنده) تشكيل شده است. بيشينه ظرفيت اين دو زير مجموعه به ترتيب b_1 و b_2 است، به عبارت ديگر $|Refset|=b<=b_1+b_2$. براي تشكيل مجموعه مرجع، ابتدا زير مجموعه Refset1 تشكيل مي‌گردد. بدين منظور از آرشيو پارتو حداكثر b_1 جواب غالب غير تكراري كه داراي بيشترين پراكندگي مي‌باشند، انتخاب و به زير مجموعه Refset1 اضافه مي‌شوند. اگر تعداد جواب‌هاي موجود در آرشيو از b_1 كمتر باشند، بقيه مجموعه از بين بهترين جواب‌هاي موجود در جمعيت جواب‌ها، انتخاب خواهند شد. براي تشكيل زير مجموعه Refset2 ، b_2 جواب غير تكراري از بين جواب‌هاي موجود كه در Refset1 نيستند و بيشترين فاصله اقليدسي را با جواب‌هاي Refset1 دارند، انتخاب شده و به Refset2 وارد مي‌شوند. لازم به ذكر است كه فاصله اقليدسي پراكندگي بين دو زير مجموعه را تضمين مي‌كند.

۳-۳-۷. روش توليد زير مجموعه‌ها

با استفاده از اين روش، زير مجموعه‌هايي از جواب‌هاي مجموعه مرجع بمنظور استفاده در روش تركيب جواب‌ها براي توليد جواب‌هاي جديد، تشكيل خواهند شد. در اينجا سه نوع زير مجموعه (S_1,S_2,S_3) دوتايي از جواب‌هاي مجموعه مرجع تشكيل مي‌شوند كه بشرح زير مي‌باشند:

S_1 : تمام زير مجموعه‌هاي دوتايي مجموعه Refset1 مي‌باشد كه حداكثر داراي $|b_1-1|$ است.

S_2 :تمام زير مجموعه‌هاي دوتايي مجموعه Refset2 مي‌باشد كه حداكثر داراي $|b_2-1|$ است.

S_3: اين زير مجموعه دوتايي شامل جواب‌هاي Refset1 و Refset2 مي‌باشد كه هر عضو آن بدين صورت ساخته مي‌شود. عنصر اول هر عضو از اعضاي Refset1 انتخاب مي‌شود و عنصر دوم يكي از اعضاي Refset2 مي‌باشد كه بيشترين فاصله اقليدسي را با عنصر اول داشته باشد. اين زير مجموعه شامل b_1 عضو است.

۳-۳-۸. روش تركيب زير مجموعه هاي منتخب

در اين مقاله، از يك عملگر به نام OX ، براي تركيب جواب‌هاي موجود در زير مجموعه‌ها استفاده شده است [۲۹]. اين عملگر دو جواب از يك زير مجموعه منتخب را با هم تركيب كرده و دو جواب جديد بدست مي‌آورد. چگونگي پياده‌سازي اين عملگر در مثال زير شرح داده شده است. فر ض كنيد زير مجموعه شامل دو جواب زير باشد:

Original trial solution 1 : 1 4 7 | 2 3 5 | 9 8 6
Original trial solution 2 : 3 9 5 | 2 4 6 | 1 7 8

دو نقطه تقاطع بطور تصادفي انتخاب مي‌شوند. جواب‌هاي جديد از شيفت چرخشي كاراكترها به سمت راست، بطوري‌كه همه كاراكترهاي بعد از دومين نقطه تقاطع، در ابتداي جواب قرار گيرند، بدست مي‌آيند.

New trial solution 1 : 9 8 6 | 1 4 7 | 2 3 5
New trial solution 2 : 1 7 8 | 3 9 5 | 2 4 6

در هر يك از جواب‌هاي جديد بدست آمده، كاراكترهايي كه بين نقاط تقاطع جواب اوليه ديگر هستند، حذف مي‌شوند. جواب‌هاي جديد به‌صورت زير در مي‌آيند:

New trial solution 1 : 9 8 1 7 3 5
New trial solution 2 : 1 7 8 9 4 6

سپس جواب‌هاي نهايي از توالي کاراکترهاي بين نقاط تقاطع جواب اوليه و کاراکترهاي باقيمانده جواب جديد ديگر، ساخته مي‌شوند.

Final trial solution 1 : 9 8 1 2 4 6 7 3 5
Final trial solution 2 : 1 7 8 2 3 5 9 4 6

پس از ترکيب جواب‌هاي موجود در زير مجموعه‌ها و ساختن جواب‌هاي جديد، جمعيت جديدي از جواب‌ها از بين جواب‌هاي زير مجموعه‌ها و جواب‌هاي ساخته شده با روش مرتب کردن و سطح‌بندي جواب‌هاي غالب با در نظر گرفتن معيار پراکندگي ساخته خواهد شد.

۹-۳-۳. تشکيل مجموعه جديد جواب‌ها براي تکرار بعدي

فرض کنيد در انتهاي يك تکرار الگوريتم جستجوي پراکنده، تعداد جواب‌هاي غالب موجود در آرشيو پارتو برابر ϖ باشد. براي تشکيل مجموعه جديد، يکي از حالت‌هاي زير در نظر گرفته مي‌شود:

۱) اگر $\varpi = N$ باشد، تمام جواب‌هاي پارتو بعنوان ورودي‌هاي روش توليد جواب‌هاي پراکنده در نظر گرفته مي شوند.

۲) اگر $\varpi \succ N$ باشد، N جواب که داراي پراکندگي بيشتري هستند، بعنوان ورودي‌هاي روش توليد جواب‌هاي پراکنده در نظر گرفته مي‌شوند.

۳) اگر $\varpi \prec N$ باشد، تمام جواب‌هاي پارتو به عنوان جوابهاي ابتدايي روش توليد جواب‌هاي پراکنده در نظر گرفته شده و $N-\varpi$ جواب باقيمانده از بين جواب‌هاي مغلوبي که از فاصله اقليدسي کمتري نسبت به نقطه آرماني پويا برخوردار هستند، انتخاب مي‌گردند.

۴. نتايج محاسباتي

در اين بخش، روش پيشنهادي جستجوي پراکنده بر روي مسايل با اندازه‌هاي کوچك، متوسط و بزرگ اجرا گرديده است. براي اثبات کارايي روش‌هاي پيشنهادي، نتايج حاصل از آنها با جواب-هاي توليد شده توسط روش NSGA-II مقايسه شده است. در ادامه مفروضات کلي الگوريتم‌ها ارايه خواهند شد. براي نشان دادن عملکرد مناسب دو الگوريتم طراحي شده، مسايل متعددي در قالب دو گروه مسايل با ابعاد کوچك، متوسط و مسايل با ابعاد بزرگ بصورت تصادفي و هوشمند توليد مي‌گردند. براي هر سه گروه از مسايل توليد شده، هر يك از الگوريتم‌ها ۱۵ بار اجرا گرديده و نتايج بصورت متوسط مقدار حاصل از اين اجراها بيان مي‌گردد. Local_iteration برابر با ۵ در نظر گرفته مي‌شود. زمان‌هاي پردازش براي مسائل با اندازه کوچك در بازه [1,40] و مسائل با اندازه متوسط و بزرگ در بازه [1,100] بصورت تصادفي توليد مي‌گردند. در هر سه گروه از مسايل، هزينه راه‌اندازي ماشين‌ها براي انجام کارها بصورت تصادفي در $[0.2p_{mean},0.3p_{mean}]$ توليد مي‌شوند. موعد تحويل کارها با توزيع يکنواخت و در فاصله $[p(1-t-r/2), p(1-t+r/2)]$ توليد مي‌شوند که در اين رابطه $p=p_{mean}(n+m-1)$ و p_{mean} ميانگين کل زمان‌هاي پردازش مي‌باشد. همچنين مقادير r و t به‌صورت $r=\{0.2,0,6\}$ و $t=0.4$ در نظر گرفته مي‌شود.

براي ارزيابي کيفيت و پراکندگي الگوريتم‌هاي فراابتکاري چند هدفه، شاخص‌هاي متعدد و متنوعي وجود دارند. در اين مقاله، براي انجام مقايسه، سه شاخص کيفيت، يکنواختي و پراکندگي مورد بحث قرار گرفته است.

مسائل طراحي شده براي بررسي کارايي روش پيشنهاد شده جستجوي پراکنده چند هدفه در اين مقاله، شامل ۸ مسأله با ابعاد کوچك، ۱۵ مسأله متفاوت با اندازه متوسط و ۱۵ مسأله متفاوت با اندازه بزرگ مي‌باشند. در روش جستجوي پراکنده پيشنهادي براي مسائل با ابعاد کوچک اندازه جمعيت برابر با ۵۰، اندازه refset1 برابر با ۲۰ و refset2 ، ۱۵ در نظر گرفته شده، همچنين نرخ جهش برابر با ۰/۲ ، نرخ تقاطع ۰/۷ ، نرخ جايگزيني برابر با ۰/۱ و تعداد تکرار در الگوريتم ژنتيک ۱۵۰ در نظر گرفته شده است.

Local_iteration نيز برابر با ۵ و تعداد تکرار در الگوريتم ۱۰۰ بار در نظر گرفته شده است. در روش NSGA-II براي مسائل با ابعاد کوچک نرخ عملگر جهش ۰/۲ و نرخ عملگر تقاطع برابر با ۰/۸ فرض شده است. Local_iteration برابر با ۵ و تعداد تکرار الگوريتم ۲۰۰ و اندازه جمعيت در اين روش نيز ۵۰ فرض شده است. در روش پيشنهادي براي مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ اندازه جمعيت برابر با ۲۰۰، اندازه refset1 برابر با ۷۰ و refset2 ، ۵۵ در نظر گرفته شده و نرخ جهش و تقاطع به ترتيب برابر با ۰/۲ و ۰/۷ است. Local_iteration برابر با ۵ و تعداد تکرار در الگوريتم ۱۰۰ بار در نظر گرفته شده است. در روش NSGA-II براي مسايل با ابعاد متوسط و بزرگ نرخ عملگر جهش ۰/۲ و نرخ عملگر تقاطع برابر با ۰/۸، Local_iteration برابر با ۵، تعداد تکرار الگوريتم ۲۰۰ و اندازه جمعيت در اين روش نيز ۲۰۰ فرض شده است.

کارايي روش پيشنهادي توسط سه شاخص کيفيت، يکنواختي و پراکندگي مورد بررسي قرار گرفته است. نتايج حاصل از اجراي الگوريتم ها در جداول مربوطه بيانگر اين است که الگوريتم پيشنهادي جستجوي پراکنده شده به جوابهاي پارتوي بيشتر و با کيفيت تر و داراي پراکندگي بالاتري در مقايسه با روش NSGA-II دسترسي پيدا مي‌کند. در مورد شاخص يکنواختي همانطور که مشاهده مي‌شود، روش پيشنهادي توانايي توليد جواب‌هاي

يكنواخت را دارد؛ ولي با توجه به داده‌هاي موجود در جدول، اين نتيجه مي‌تواند حاصل شود كه روش NSGA-II در مواردي نسبت به روش پيشنهادي بهتر عمل مي‌كند. نتايج محاسباتي در جداول (۱) الي (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱. مقايسه نتايج بدست آمده براي مسايل با ابعاد كوچك

شماره مسأله	كار	ماشين	*t*=0.4 , *r*=0.2						*t*=0.4 , *r*=0.6					
			شاخص كيفيت		شاخص يكنواختي		شاخص پراكندگي		شاخص كيفيت		شاخص يكنواختي		شاخص پراكندگي	
			MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA- II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA- II	MOSS	NSGA-II
۱	۴	۴	۶۵/۴۷	۳۴/۵۳	۰/۸۳	۰/۱۷	۱۹۱/۸	۱۱۲/۲	۷۷/۳۲۱	۲۲/۶۷۹	۰/۸۹	۰/۹۷	۱۴۸/۲	۱۰۲/۷
۲	۴	۵	۷۶/۴۲	۲۳/۵۸۸	۰/۴۲	۰/۶۳	۲۰۹/۷	۱۷۷/۶	۴۲/۶۷	۵۷/۳۳	۱/۱۱	۰/۵۹	۱۶۰/۸	۱۲۱/۵
۳	۵	۴	۹۱/۴۲۳	۸/۵۶۸	۰/۷۳	۰/۸۷	۲۳۷/۷	۱۰۳/۵	۸۶/۵۸	۱۳/۴۲	۰/۹۴	۰/۷۴	۲۵۴/۷	۱۷۳/۲
۴	۵	۵	۸۲/۲۸	۱۷/۷۲	۰/۳۴	۰/۷۵	۲۰۹/۶	۱۳۱/۱	۹۷/۵۴	۲/۴۶	۰/۸۶	۰/۹۹	۳۴۹/۲	۱۶۹/۵
۵	۶	۴	۶۵/۵۹۹	۳۴/۴۰۱	۰/۹۸	۱/۶۵	۴۶۷/۵	۱۴۴/۳	۶۹/۱۲۸	۳۰/۸۷۲	۰/۸۲	۱/۳۲	۴۳۱/۸	۲۴۴/۷
۶	۶	۵	۸۷/۲۸۵	۱۲/۷۱۴	۰/۹۳	۰/۷۱۹	۴۹۱/۶	۲۷۴/۳	۷۹/۹۷۶	۲۰/۰۲۴	۱/۲۵	۱/۶۵	۷۵۲/۲	۳۶۴/۱
۷	۷	۴	۹۱/۲۱۳	۸/۷۸۷	۰/۸۷	۱/۰۲	۶۵۷/۱	۴۱۰/۲	۹۷/۳۹	۲/۶۱	۰/۶۳	۰/۸۰	۶۹۳/۶	۳۹۰/۳
۸	۷	۵	۷۴/۸۶۲	۲۵/۱۳۹	۰/۷۸	۰/۷۵	۷۶۷/۴	۴۱۴/۸	۸۸/۸۹۷	۱۱/۱۰۳	۰/۹۳	۰/۸۷	۷۱۱/۴	۴۳۲/۴

جدول ۲. مقايسه نتايج بدست آمده براي مسايل با ابعاد متوسط

شماره مسأله	كار	ماشين	*t*=0.4 , *r*=0.2						*t*=0.4 , *r*=0.6					
			شاخص كيفيت		شاخص يكنواختي		شاخص كيفيت		شاخص يكنواختي		شاخص كيفيت		شاخص يكنواختي	
			MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II
۱	۱۰	۶	۷۵/۶۹	۲۴/۳۱	۰/۹۸	۰/۶۰	۱۰۲۰/۱	۷۱۷/۱	۸۹/۷۸	۱۰/۲۲	۰/۵۹	۰/۷۰	۱۳۳۰/۴	۶۸۹/۹
۲	۱۰	۷	۹۹/۱۸	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۸۷	۱۱۵۳/۷	۷۵۸/۹	۷۵/۳۴	۲۴/۶۶	۰/۸۱	۰/۹۷	۱۰۸۰/۹	۷۳۱/۷
۳	۱۰	۸	۸۸/۹۸	۱۱/۰۲	۱/۱	۰/۹۴	۱۰۳۱/۵	۸۱۱/۹	۹۱/۶۹	۸/۳۱	۱/۵۴	۰/۸۲	۱۵۱۱/۷	۵۹۶/۱
۴	۱۰	۹	۸۹/۶۵	۱۰/۳۵	۰/۶۷	۰/۸۶	۱۳۱۹/۱	۶۸۴/۳	۸۸/۷۶	۱۱/۲۴	۰/۷۳	۱/۱۲	۱۱۷۹/۸	۸۳۱/۲
۵	۱۰	۱۰	۷۷/۷۶	۲۲/۲۴	۰/۸۴	۰/۷۸	۱۴۱۴/۳	۷۷۷/۶	۷۴/۱۰	۲۵/۹	۰/۹۱	۰/۷۶	۱۴۴۵/۳	۹۷۱/۲
۶	۱۲	۶	۹۸/۱۲	۱/۸۸	۰/۹۳	۱/۶	۱۳۴۰/۵	۸۰۸/۶	۹۶/۲۵	۳/۷۵	۰/۵۸	۰/۴۸	۱۵۱۷/۸	۹۸۵/۲
۷	۱۲	۷	۷۰/۵۶	۲۹/۴۴	۰/۶۶	۰/۷۰	۱۶۱۰/۲	۸۳۵/۵	۷۷/۴۱	۲۲/۵۹	۱/۱۲	۰/۷۴	۱۴۷۵/۴	۸۷۴/۹
۸	۱۲	۸	۸۲/۷۲	۱۷/۲۸	۰/۶۲	۰/۸۹	۱۹۱۴/۸	۹۵۰/۱	۹۷/۴۳	۲/۵۷	۰/۵۷	۱/۷۲	۱۳۴۴/۸	۹۳۴/۱
۹	۱۲	۹	۹۳/۵۹	۶/۴۱	۱/۵۱	۰/۸۸	۱۸۳۳/۹	۹۲۳/۱	۹۳/۳۸	۶/۶۲	۰/۷۱	۱/۲۲	۱۶۶۷/۳	۱۰۶۳
۱۰	۱۲	۱۰	۸۵/۴	۱۴/۶	۰/۹۴	۱/۷۷	۱۸۶۷/۷	۱۰۰۶/۴	۸۸/۳۸	۱۱/۶۲	۰/۷۰	۱/۱۵	۱۶۴۰/۹	۱۰۳۶/۳
۱۱	۱۴	۶	۹۷/۶۷	۲/۳۳	۰/۷۷	۰/۸۵	۱۵۸۴/۵	۱۰۵۰/۲	۸۴/۱۱	۱۵/۸۹	۰/۸۴	۰/۶۷	۱۹۷۲/۸	۹۲۹
۱۲	۱۴	۷	۹۸/۷۳	۱/۲۷	۰/۴۸	۰/۷۰	۱۹۴۸/۱	۹۸۷/۶	۶۳/۸۷	۳۶/۱۳	۰/۷۱	۱/۰۳	۱۹۷۰/۶	۹۸۶/۳
۱۳	۱۴	۸	۸۷/۹۹	۱۲/۰۱	۱/۰۲	۰/۹۶	۱۹۶۳/۴	۱۰۴۳/۲	۷۳/۹۱	۲۶/۰۹	۰/۷۶	۰/۷۵	۱۸۱۹/۳	۱۰۸۹/۸
۱۴	۱۴	۹	۹۴/۶۳	۵/۳۷	۰/۷۳	۰/۴۵	۱۹۳۴/۲	۱۱۲۹/۴	۶۵/۵۱	۳۴/۴۹	۰/۷۸	۰/۶۱	۱۸۷۴/۷	۱۳۵۱/۵
۱۵	۱۴	۱۰	۸۹/۴۳	۱۰/۵۷	۰/۹۰	۱/۱	۱۸۹۹/۴	۱۱۷۰/۷	۹۶/۴۳	۳/۵۷	۰/۶۷	۰/۴۸	۲۲۳۸/۳	۱۶۰۲/۲

جدول ۳. مقايسه نتايج بدست آمده براي مسايل با ابعاد بزرگ

شماره مسأله	کار	ماشين			t=0.4 , r=0.2						t=0.4 , r=0.6			
			شاخص كيفيت		شاخص يكنواختي		شاخص كيفيت		شاخص يكنواختي		شاخص كيفيت		شاخص يكنواختي	
			MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II	MOSS	NSGA-II
۱	۲۰	۶	۹۳/۴۷۰	۶/۵۲۳	۰/۷۴	۰/۸۲	۱۷۷۰/۲	۱۰۱۱/۸	۸۰/۱۵۴	۱۹/۸۳۹	۱/۶	۰/۶۸	۱۹۱۱/۳	۱۲۱۴/۷۸
۲	۲۰	۷	۹۵/۶۷۲	۴/۳۲۲	۰/۶۳	۱/۳۹	۲۱۱۵/۶	۱۴۳۰/۷	۷۸/۸۸۳	۲۱/۱۱۱	۰/۸۵	۱/۲۱	۲۰۹۱/۷	۱۲۳۰/۳۵
۳	۲۰	۸	۷۶/۷۹۱	۲۳/۲۰۹	۰/۷۶	۰/۷۵	۲۰۲۳/۹	۱۷۸۱/۱	۶۱/۰۵	۳۸/۹۵	۰/۷۴	۰/۸۹	۲۳۷۱/۷	۱۱۵۶/۲۵
۴	۲۰	۹	۹۵/۴۷۶	۴/۵۲۴	۰/۴۶	۱/۰۱۲	۲۳۶۵/۱	۱۵۸۴/۱	۸۶/۳۸۲	۱۳/۶۱۸	۰/۵۴	۰/۸۰	۲۰۹۱/۷	۱۱۵۱/۷۰
۵	۲۰	۱۰	۹۶/۷۶۱	۳/۲۳۹	۰/۶۵	۰/۷۷	۲۲۱۷/۵	۱۶۲۱/۸	۹۶/۷۶۱	۳/۲۳۹	۰/۷۷	۰/۶۷	۱۹۶۷/۸	۱۲۱۱/۷۶
۶	۳۰	۶	۹۱/۳۶۵	۸/۶۳۴	۰/۷۹	۰/۶۲	۲۴۰۳/۴	۱۹۷۳/۵	۹۱/۳۶۵	۸/۶۳۴	۰/۸۶	۰/۹۵	۱۷۹۱/۶	۱۵۳۳/۵۹
۷	۳۰	۷	۸۸/۲۴۲	۱۱/۷۵۷	۰/۶۸	۰/۸۵	۲۷۴۳/۹	۱۹۲۹/۸	۹۳/۷۶	۶/۲۳۹	۰/۶۲	۰/۹۱	۱۴۵۷/۱	۲۶۱۹/۱۶
۸	۳۰	۸	۹۳/۷۶	۶/۲۳۹	۰/۷۷	۰/۶۸	۲۳۲۰/۳	۱۹۲۸/۴	۹۶/۱۶۶	۳/۸۳۵	۰/۶۹	۰/۶۰	۱۸۶۷/۴	۲۷۱۴/۵۱
۹	۳۰	۹	۹۶/۱۶۶	۳/۸۳۵	۱/۷۱	۰/۹۸	۲۴۷۸/۱	۱۶۸۸/۵	۹۶/۲۹۵	۳/۷۰۵	۰/۷۱	۰/۵۶	۲۱۶۳/۹	۲۹۸۳/۰۴
۱۰	۳۰	۱۰	۹۶/۲۹۵	۳/۷۰۵	۰/۸۲	۰/۷۳	۲۵۸۹/۶	۱۹۵۹/۲	۹۶/۶۷۷	۳/۳۱۶	۰/۷۶	۰/۸۷	۱۵۱۷/۷	۱۴۰۶/۴۵
۱۱	۴۰	۶	۹۲/۸۶۱	۷/۱۳۷	۰/۹۲	۱/۳۲	۲۸۵۶/۹	۱۹۰۲/۷	۹۷/۳۴۲	۲/۶۵۷	۰/۹۶	۰/۸۳	۲۱۲۴/۱	۱۲۹۷/۹۹
۱۲	۴۰	۷	۹۷/۸۷۶	۲/۱۲۲	۰/۹۸	۰/۹۴	۲۶۸۵/۷	۱۷۸۹/۶	۱۰۰	۰	۰/۹۲	۰/۹۴	۲۶۰۶/۷	۱۳۰۰/۸۴
۱۳	۴۰	۸	۹۸/۹۰۵	۱/۰۹۵	۰/۸۳	۰/۸۸	۲۸۳۴/۴	۱۹۸۹/۱	۹۹/۰۵	۰/۹۵	۱/۷۲	۰/۹۹	۲۶۳۰/۶	۱۵۵۷/۱۶
۱۴	۴۰	۹	۹۹/۱۱۱	۰/۸۸۹	۱/۰۱	۱/۱۲	۳۰۰۹/۶	۱۶۵۰/۲	۹۱/۸۹	۱۱,۸	۰/۸۲	۱/۰۴	۲۸۱۲/۱	۱۶۶۹/۸
۱۵	۴۰	۱۰	۹۶/۵۶۹	۳/۴۳۱	۰/۸۵	۰/۸۸	۲۹۱۸/۸	۱۸۹۹/۴	۹۷/۹۹	۲/۰۱	۰/۷۸	۰/۸۸	۳۱۲۷/۷	۱۸۵۷/۴

۵. نتيجه گيري

در اين مقاله، مدل رياضي جديد چند هدفه‌اي براي مساله زمان بندي كارگاه باز ارايه شده است. اهداف مسأله مورد نظر شامل حداقل كردن حداكثر زمان تكميل كارها، حداقل كردن زمان ديركرد و زودكرد كارها و حداقل كردن هزينه راه‌اندازي هستند كه تاكنون به آن پرداخته نشده، است. اين مسأله با توجه به ماهيت پيچيده آن در زمره مسايل NP-hard قرار مي‌گيرد، بنابراين الگوريتم جستجوي پراكنده چندهدفه‌اي جهت حل مسأله مورد نظر ارايه گرديده است.

ابتدا چندين مسأله در ابعاد كوچك، متوسط و بزرگ طراحي گرديده و سپس نتايج حاصل از اجراي روش پيشنهادي بر روي اين مسايل با جواب‌هاي توليد شده توسط روش NSGA-II به دليل كارايي بالاي اين روش همانطور كه قبلاً بيان شد، از لحاظ سه شاخص كيفيت، پراكندگي و يكنواختي مقايسه شده است. نتايج نشان مي‌دهد كه روش پيشنهادي جستجوي پراكنده چند هدفه، كارايي بسيار قابل قبولي جهت توليد جواب‌هاي پارتوي با كيفيت، متنوع، داراي پراكندگي بالا و يكنواخت‌تري نسبت به روش NSGA-II داشته است و فقط در موارد معدودي عملكرد روش NSGA-II از لحاظ شاخص يكنواختي بهتر است. در نظر گرفتن توابع هدف ديگر، در نظر گرفتن زمان‌هاي آماده‌سازي، زمان‌هاي در دسترس براي ماشين‌ها و يا استفاده از ساير روش‌هاي فراابتكاري جهت حل مسأله مورد نظر براي تحقيقات آتي توصيه مي‌شود.

مراجع

[1] Sule, D.R., "*Industrial Scheduling*", PWS Publishing Company, 1997.

[2] Baker, K.R., Trietsch, D., "*Principles of Sequencing and Scheduling*", John Wiley & Sons, 2009.

[3] Low, C., Yeh, Y., "*Genetic Algorithm-Based Heuristics for an Open Shop Scheduling Problem with Setup, Processing, and Removal times Separated*", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 25, 2009, pp. 314–322.

[4] Sha, D.Y., Hsu, C.Y., "*A New Particle Swarm Optimization for the Open Shop Scheduling Problem*", Computers & Operations Research, Vol. 35, No. 10, 2008, pp. 3243–3261.

[5] Andresen, M., Bräsel, H., Tusch, J., Werner, F., Willenius, P., "*Simulated Annealing and Genetic Algorithms for Minimizing Mean Flowtime in an Open Shop*", Mathematical and Computer Modeling, Vol. 48, Nos. 7-8, 2008, pp. 1279–1293.

[6] Chen, R., Huang, W., Tang, G., "*Dense Open-Shop Schedules with Release Times*", Theoretical Computer Science, Vol. 407, Nos. 1-3, 2008, pp. 389-399.

[7] Low, C., Yeh, Y., "*Genetic Algorithm-Based Heuristics for an Open Shop Scheduling Problem with Setup, Processing, and Removal Times Separated*" Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 25, No. 2, 2009, pp. 314-322.

[8] Blum, C., "*Beam-ACO Hybridizing Ant Colony Optimization with Beam Search: An Application to Open Shop Scheduling*", Computers & Operations Research, Vol. 32, No. 6, 2005, pp. 1565–1591.

[9] Liaw, C-F., Cheng, C.-Y., Chen, M., "*Scheduling Two-Machine Nowait open Shops to Minimize Makespan*", Computers & Operations Research, Vol. 32, No. 4, 2005, pp. 901–917.

[10] Liaw, C.-F., "*An Efficient Tabu Search Approach for the Two-Machine Preemptive Open Shop Scheduling Problem*", Computers & Operations Research, Vol. 30, No. 14, 2003, pp. 2081–2095.

[11] Kononov, A., Sviridenko, M., "*A Linear Time Approximation Scheme for Makespan Minimization in an Open Shop with Release Dates*", Operations Research Letters, Vol. 30, No. 4, 2002, pp. 276–280.

[12] Breit, J., Schmidt, G. and Strusevich, V. A., "*Two-Machine Open Shop Scheduling with an Availability Constraint*", Operations Research Letters, Vol. 29, No. 2, 2001, pp. 65–77.

[13] Liaw, C-F., "*A Hybrid Genetic Algorithm for the Open Shop Scheduling Problem*", European Journal of Operational Research, Vol. 124, No. 1, 2000, pp. 28–42.

[14] Kravchenko, S. A., "*On the Complexity of Minimizing the Number of Late jobs in Unit Time Open Shop*", Discrete Applied Mathematics, Vol. 100(1-2), 2000, pp. 127—132.

[15] Liaw, C.-F., "*A Tabu Search Algorithm for the Open Shop Scheduling Problem*", Computers & Operations Research, Vol. 26, No. 2, 1999, pp. 109–126.

[16] Liaw, C.-F., "*Applying Simulated Annealing to the Open Shop Scheduling Problem*", IIE Transactions, Vol. 31, 1999, pp. 457–465.

[17] Seraj, O., Tavakkoli-Moghaddam, R., "*A Tabu Search Method for a New Bi-Objective Open Shop Scheduling Problem by a Fuzzy Multi-Objective Decision Making Approach*", International Journal of Engineering, Transactions A: Basics, Vol. 22, 2009, pp. 1-14.

[18] Gonzalez, T., Sahni, S., "*Open Shop Scheduling to Minimize Finish Time*", Journal of the ACM, Vol. 23, No. 4, 1976, pp. 665–679.

[19] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., "*A Fast and Elitist Multi Objective Genetic Algorithm: NSGA-II*", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, 2002, 182–197.

[20] Gen, M., Cheng, R., "*Genetic Algorithms & Engineering Design*", A Wiley Interscience Publication, New York, 1997.

[21] Hitomi, K., Ham, I., "*Operations Scheduling for Group Technology Applications*", Annals of the CIRP, Vol. 25, 1976, pp. 419–422.

[22] Glover, F., "*A Template for Scatter Search and Path Relinking*", Lecture Notes in Computer Science, J. –K. Hao, E. Lutton, E. Ronald, M. Schoenauer and D. Snyers (Eds.), Springer, 1998, pp. 13-54.

[23] Nowicki. E, Smutnicki. C., "*Some Aspects of Scatter Search in the Flow-Shop Problem*", European Journal of Operational Research, Vol. 169, 2006, pp. 654–666.

[24] Diaz. J.A., Fernandez. E., "*Hybrid Scatter Search and Path Relinking for the Capacitated p-Median Problem*". European Journal of Operational Research, Vol. 169, 2006, 570-585.

[25] Silva, C.G, Climaco, J., Figueira, J., "*A Scatter Search Method for bi-Criteria {0,1}-Knapsack Problems*", European Journal of Operational Research, Vol. 169, 2006, 373–391.

[26] Beausoleil, R.P., " *''MOSS'' Multiobjective Scatter Search Applied to Nonlinear Multiple Criteria Optimization*", European Journal of Operational Research, Vol. 169, No. 2, 2006, pp. 426-449.

[27] Cotta, C., "*Scatter Search with Path Reliking for Phylogenetic Inference*", European Journal of Operational Research, Vol. 169, 2006, pp. 520-539.

[28] Rahimi-Vahed, A.R., Javadi, B., Rabbani, M., Tavakoli-Moghaddam, R., "*A Multi-Objective Scatter Search for bi-Criteria no-Wait Flow Shop Scheduling Problem"*, Engineering Optimization, Vol. 40, No. 4, 2008, pp. 331-346.

[29] Jones. D.F., Mirrazavi. S.K., Tamiz. M., "*Multi-Objective Meta-Heuristics: An Overview of the Current State-of-the-Art*", European Journal of Operational Research, Vol. 137, 2002, pp. 1–9.