فصلنامه دانش مديريت، سال ۲۰، شماره ۷۶، بهار ۱۳۸۶، از صفحه ۳ تا ۲۲

# بهينه‌سازي قابليت اطمينان در سيستم‌هاي سري با انتخاب‌هاي چندگانه و محدوديت بودجه با استفاده از الگوريتم مورچگان

سيد غلامرضا جلالي نائيني*[1]، فردين احمدي زر[2]

[1] استاديار دانشكده مهندسي صنايع، دانشگاه علم و صنعت، ايران

[2] دانشجوي دكتري مهندسي صنايع، دانشگاه علم و صنعت، ايران

(تاريخ دريافت مقاله: ۱۳۸۵/۶/۳۰، تاريخ تصويب: ۱۳۸۵/۱۱/۲۵)

## چكيده

الگوريتم مورچگان يك روش فرا ابتكاري است كه بر اساس رفتار مورچه‌هاي طبيعي عمل مي‌نمايد. در اين مقاله از اين الگوريتم به منظور بهينه‌يابي قابليت اطمينان در سيستم‌هاي سري با انتخاب‌هاي چندگانه در مورد هر زيرسيستم استفاده شده است، طوريكه انتخاب تكنولوژي به گونه اي صورت مي گيرد تا قابليت اطمينان با در نظر گرفتن محدوديت بودجه حداكثر گردد. اين مسأله يك مسأله برنامه ريزي صفر و يك غيرخطي مي‌باشد كه از مسائل NP- hard محسوب مي‌شود. در الگوريتم مورچگان توسعه داده شده، هر مورچه مصنوعي بر اساس اطلاعاتي كه از مورچه‌هاي قبلي دريافت مي‌نمايد و با توجه به تابع هدف مسأله اقدام به ايجاد یک جواب مي‌نمايد؛ اين جواب تضميني ندارد كه موجه باشد، لذا ابتدا با يك مكانيزم مناسب با يك جواب همسايه موجه جايگزين مي‌شود و سپس با استفاده از يك روش جستجوي محلي بهبود مي‌يابد. اين روش با تنها روش فراابتكاري موجود كه يك الگوريتم مورچه مي باشد مقايسه شده است؛ نتايج محاسباتي نشان مي‌دهد كه الگوريتم ارائه شده مي‌تواند جواب‌هاي داراي كيفيت را براي مسائل با ابعاد بزرگ در زماني كوتاه بدست آورد.

واژه‌هاي كليدي: بهينه‌سازي قابليت اطمينان، سيستم‌هاي سري، الگوريتم مورچگان، انتخاب‌هاي چندگانه، محدوديت بودجه

---

* نويسنده مسئول: Email: sgjalali@iust.ac.ir

## مقدمه

در طراحي بسياري از سيستم‌هاي واقعي مانند سيستم‌هاي ساخت و مدارهاي الكترونيكي، قابليت اطمينان نقش پراهميتي را ايفا مي‌نمايد. در اينحالت طراحي يك سيستم بايد به صورتي انجام گيرد تا بيشترين مقدار ممكن قابليت اطمينان بر اساس منابع محدود حاصل گردد و اين امر در مورد اجزائي كه بصورت سري قرار مي‌گيرند اهميت زيادي پيدا مي‌نمايد. در بعضي مواقع مي‌توان در مورد هر يك از اجزاء يك سيستم سري بيش از يك واحد را بصورت موازي استفاده نمود و آشكار است كه هر چه تعداد اجزاء موازي یک زيرسيستم بيشتر گردد عملكرد سيستم افزايش مي‌يابد؛ اما از سوي ديگر به همان نسبت هزينه طراحي سيستم افزايش خواهد يافت، كه در اينصورت لازم است با بكارگيري كمترين واحدهاي موازي در مورد هر زيرسيستم (حداقل كردن هزينه) حداكثر عملكرد سيستم در مواردي مانند قابليت اطمينان و يا قابليت دسترسي فراهم گردد. اين مسأله بصورت تخصيص مازاد عنوان مي‌شود و تعدادي از محققين روي اين مسأله مطالعه نموده اند [۱۲] [۱۵ ] [۱۷ ] [۱۸] و [۲۱] و در بعضي موارد در يك سيستم موازي- سري يا در يك شبكه جهت كاركرد سالم سيستم لازم است در تعدادي از زيرسيستم‌ها بيش از يك واحد عملكرد سالم داشته باشد، كه بصورت سيستم $k$ از $n$ عنوان مي‌شود [۱۶] [۱۹] و [۲۰].

اما در طراحي بسياري از سيستم‌هاي واقعي به علت محدوديتهاي فيزيكي (به عنوان مثال فضايي كه هر واحد از یک جزء اشغال مي‌نمايد)، استفاده از واحدهاي موازي به منظور افزايش عملكرد سيستم مقدور نخواهد بود و در چنين مواردي كه انجام تخصيص مازاد ميسر نمي‌باشد، تنها راه حل ممكن استفاده از اجزائي با عملكرد بالاتر است. موضوع اين مقاله در خصوص سيستم‌هايي است كه در مورد هر یک از اجزاء بيش از يك تكنولوژي (با هزينه‌ها و قابليت اطمينان‌هاي متفاوت) در دسترس مي‌باشد. در اين حالت لازم است در مورد هر يك از اجزاء سيستم يك تكنولوژي به گونه اي انتخاب گردد تا قابليت اطمينان بيشتري بدست آيد. واضح است كه اگر محدوديتي در ارتباط با بودجه وجود نداشته باشد، فقط كافيست در مورد هر زيرسيستم از تكنولوژي داراي بيشترين قابليت اطمينان استفاده گردد. اما چنانچه در منابع مورد نياز محدوديت باشد (همانگونه كه در مورد طراحي هر سيستم واقعي اينگونه است)، در اينصورت ديگر انتخاب به سادگي صورت نخواهد گرفت (توجه شود كه معمولاً هر چه قابليت اطمينان يك تكنولوژي نسبت

به تكنولوژي ديگري بيشتر باشد، به همان نسبت هزينه بكارگيري آن نيز بيشتر خواهد بود). اين مسأله كه بصورت بهينه‌يابي قابليت اطمينان در سيستم‌هاي سري با انتخاب‌هاي چندگانه و محدوديت بودجه عنوان مي‌گردد، به صورت يك مدل برنامه ريزي غيرخطي عدد صحيح صفر و يك فرموله مي‌شود [۱] و [۱۴] و با توجه به اينكه اين مسأله معادل مسأله كوله پشتي با انتخاب‌هاي چندگانه مي‌باشد، لذا NP- hard محسوب مي‌گردد [۸]. تعدادي روش براي حل اين مسأله ارائه شده است كه مي‌توانند جواب بهينه را پيدا كنند [۱۰] [۱۱] [۱۳] و [۱۴]، اما اين روش‌ها در مورد مسائل با ابعاد بزرگ كارآيي لازم را ندارند و اين در حالي است كه اكثر مسائل واقعي از اين گونه‌اند. لذا جهت حل چنين مسائلي لازم است از روش‌هاي ابتكاري استفاده نمود كه مي‌توانند در زماني كوتاه جواب‌هاي قابل قبولي را توليد كنند، هر چند تضميني براي بهينگي چنين جواب‌هايي وجود نخواهد داشت. در سال ۲۰۰۵ ميلادي اولين روش فرا ابتكاري كه مبتني بر روش سيستم مورچه[۳] است براي حل اين مسأله ارائه شد، كه مي‌تواند مثال‌هاي با ابعاد بزرگ را در يك زمان كوتاه حل نمايد و جواب بهينه يا نزديك به بهينه را توليد نمايد [۹]. در اين الگوريتم از يك فاكتور پنالتي در ارتباط با محدوديت بودجه و از يك روش جستجوي محلي جهت بهبود هر جواب توليد شده استفاده گرديده است.

در اين مقاله از سيستم كلوني مورچه كه به عنوان يك الگوريتم فرا ابتكاري مؤثر براي برخورد با مسائل بهينه‌يابي تركيبي طراحي گرديده است [۳] [۴] و[۵]، جهت حل مسأله مذكور استفاده شده است. الگوريتم ارائه شده بر اساس روشي كاملاً جديد جهت رفع غيرموجه بودن و نيز يك روش جستجوي محلي بنا نهاده شده است.

## مدل رياضي مسأله

يك سيستم سري با چند جزء را در نظر بگيريد و فرض كنيد كه تكنولوژي‌هاي متفاوتي از نظر هزينه و قابليت اطمينان براي هر جزء در دسترس است. مسأله طراحي سيستم شامل انتخاب يك تكنولوژي براي هر جزء مي‌باشد، طوري كه حداكثر قابليت اطمينان با رعايت محدوديت بودجه عايد گردد. فرض كنيد $S$ تعداد اجزاء، $N_i$ تعداد تكنولوژي‌هاي موجود براي جزء $i$ ، $C_{ij}$ هزينه جزء $i$ با بكارگيري تكنولوژي $j$ ، $R_{ij}$ قابليت اطمينان جزء $i$ در صورت بكارگيري تكنولوژي $j$ ، $B$ بودجه در دسترس و $R_{sys}$ قابليت اطمينان سيستم مي‌باشد. متغيرهاي تصميم بصورت $x_{ij}$ در نظر گرفته مي‌شود ($j = 1, 2, \ldots, N_i$ و

($i=1, 2, \dots, S$)؛ مقدار اين متغير يك است اگر جزء $i$ از تكنولوژي $j$ استفاده كند و در غير اين صورت مقدار آن صفر خواهد بود.

با در نظر گرفتن اين نكات، مسأله فوق بصورت مدل برنامه ريزي غيرخطي صفر و يك زير فرموله مي‌شود.

$$
\begin{aligned}
& Max\, R_{sys} = \prod_{i=1}^{S} \Big(\sum_{j=1}^{N_i} x_{ij}.R_{ij}\Big) \\
& s.t. \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad (۱) \\
& \qquad \sum_{i=1}^{S}\sum_{j=1}^{N_i} x_{ij}.C_{ij} \le B \\
& \qquad \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} = 1 \qquad\qquad , \forall i = 1,2,\dots,S \\
& \qquad x_{ij} \in \{0,1\} \qquad\qquad , \forall i = 1,2,\dots,S \quad , j = 1,2,\dots,N_i
\end{aligned}
$$

همانگونه كه ديده مي‌شود تابع هدف اين مدل يك تابع غيرخطي بوده و متغيرهاي تصميم نيز صفر و يك هستند. محدوديت اول سقف بودجه را ارائه مي‌كند، محدوديت نوع دوم به اين معني است كه براي هر زيرسيستم دقيقاً يك تكنولوژي انتخاب گردد و محدوديت نوع سوم در ارتباط با تعريف متغيرهاي تصميم است. هدف اين است كه جوابي پيدا شود تا تمام محدوديت‌ها را ارضاء نمايد (موجه باشد) و $R_{sys}$ بيشترين مقدار گردد (جواب بهينه) و همانگونه كه قيد شد پيدا كردن چنين جوابي در مورد مثال‌هاي داراي ابعاد بزرگ در زمان قابل قبول مقدور نيست، لذا در چنين مواردي با بكارگيري الگوريتم‌هاي فرا ابتكاري دنبال جوابي هستيم كه موجه بوده و $R_{sys}$ تا حد امكان مقدار زيادي باشد. اين جواب در بهترين حالت همان بهينه است، هر چند هميشه چنين نخواهد بود.

## سيستم كلوني مورچه

الگوريتم بهينه‌يابي مورچگان يك روش فرا ابتكاري از نوع سازنده است، كه با الهام از رفتار مورچه‌هاي طبيعي براي حل مسائل بهينه‌يابي تركيبي استفاده مي‌شود. اولين روش در اين زمينه تحت عنوان سيستم مورچه براي حل مسأله فروشنده دوره گرد معرفي گرديد [۶] و افراد زيادي در طي چند سال گذشته اين روش را به گونه‌هاي مختلف بسط داده اند كه يكي از اين توسعه‌ها سيستم كلوني مورچه مي‌باشد [۷]. مورچه‌هاي طبيعي با وجود اينكه تقريباً كور هستند، مي‌توانند كوتاه‌ترين مسير بين لانه تا منبع غذا را بيابند. آنها در موقع حركت ماده‌اي تحت عنوان فرومون از خود متصاعد مي‌كنند و مورچه‌هاي بعدي از طريق اين ماده مسير خود را مي‌يابند. هر مورچه در موقع مواجه با بيش از يك مسير، بصورت احتمالي و متناسب با مقدار فرومون، راه خود را مي‌يابد. به‌عبارت ديگر، مسيري كه داراي فرومون بيشتري باشد، جذابيت بيشتري براي انتخاب توسط يك مورچه خواهد داشت. فرض كنيد مورچه‌ها در مسير حركت خود از لانه به سمت غذا با مانعي برخورد نمايند. در اين‌صورت آنها با انتخاب يكي از دو مسير اطراف مانع مواجه خواهند بود. هر مورچه در ابتدا (يعني زماني‌كه هيچ فروموني روي مسيرها وجود ندارد) بصورت تصادفي يكي از دو مسير را انتخاب مي‌كند، در واقع انتظار مي‌رود بطور متوسط هر مسير بوسيله نصف آنها انتخاب شود. چنانچه يكي از دو مسير كوتاه‌تر از آن يكي باشد، آنگاه مورچه‌هايي كه مسير كوتاه‌تر را انتخاب مي‌كنند زودتر به غذا رسيده و به لانه برمي‌گردند، لذا تعداد مورچه بيشتري در يك بازه زماني يكسان از مسير كوتاه‌تر استفاده مي‌نمايند و به همين نسبت مقدار فروموني كه روي اين مسير متصاعد مي‌شود بيشتر خواهد بود و لذا درصد بيشتري از مورچه‌هاي بعدي اين مسير را انتخاب مي‌كنند. به همين ترتيب اين پروسه ادامه مي‌يابد تا جائيكه روي مسير كوتاه‌تر به حدي فرومون جمع مي‌گردد كه تمامي مورچه‌ها اين مسير را انتخاب مي‌نمايند. البته توجه شود كه فرومون يك ماده شيميايي است و با گذشت زمان تبخير مي‌گردد [۲].

در الگوريتم بهينه‌يابي مورچگان از مورچه‌هاي مصنوعي استفاده مي‌شود. تعدادي مورچه در يك گراف كه متناظر با مسأله بهينه‌يابي تركيبي مي‌باشد قرار مي‌گيرند. هر مورچه بصورت احتمالي در اين گراف حركت كرده و بر اساس مقدار فرومون و اطلاعات هيورستيك[۸] اقدام به توليد جواب مي‌نمايد. سپس مقدار فرومون مسير استفاده شده را بر اساس كيفيت جواب توليد شده بهنگام مي‌كند و به اين وسيله بين مورچه‌ها ارتباط برقرار

مي‌گردد. هر مورچه مصنوعي علاوه بر ويژگي‌هاي مورچه‌هاي طبيعي، از اطلاعات هيورستيك و حافظه اي براي ثبت حركتهاي قبلي خود بهره مي‌برد. اطلاعات هيورستيك بر اساس تابع هدف مسأله تعريف مي‌گردد، به این‌صورت که میزان بهبود در این تابع در اثر حرکت یک مورچه از یک گره به گره دیگري را نشان مي‌دهد. همچنین هر حرکتي که یک مورچه مصنوعي انجام مي‌دهد در حافظه‌اي ذخیره مي‌گردد تا برگشت به عقب و اصلاح مقادیر فرومون به سادگي قابل انجام باشد. در خاتمه لازم بذکر است که تاکنون نسخه‌هاي مختلف بهينه‌يابي مورچگان براي حل انواع مسائل بهينه‌يابي تركيبي بطور كارا مورد استفاده قرار گرفته‌اند و مي‌توان گفت كه عمده ترين تفاوت اين روشها در چگونگي بهنگام سازي مقادير فرومون مي‌باشد [۷].

### قاعده حركت احتمالي در سيستم كلوني مورچه

هر مورچه در يك گره از گراف مربوط به مسأله قرار مي‌گيرد و سپس بصورت احتمالي به گره ديگري حركت كرده و به همين ترتيب ادامه مي‌دهد تا يك جواب كامل ايجاد گردد. فرض كنيد مورچه $k$ در گره $i$ قرار دارد، اين مورچه با احتمال $q_o$ گره بعدي $j$ را بصورت زير انتخاب مي‌كند [۴].

$$j = \arg\max_{l\in N_i^k}\left[\tau_{il}(t).\left(\eta_{il}\right)^{\beta}\right] \quad , \quad j\in N_i^k \qquad (۲)$$

و با احتمال $1\text{-}q_o$ گره $j$ را بر اساس احتمال زير انتخاب مي‌كند.

$$p_{ij}^{k}(t) = \frac{\tau_{ij}(t).\left(\eta_{ij}\right)^{\beta}}{\sum\limits_{l\in N_i^k}\tau_{il}.\left(\eta_{il}\right)^{\beta}} \quad , \quad j\in N_i^k \qquad (۳)$$

$q_o$ يك پارامتر بين صفر و يك است، $\tau_{ij}(t)$ مقدار فرومون كمان $(i,j)$ در زمان $t$ و $\eta_{ij}$ اطلاعات هيورستيك است. $N_i^k$ مجموعه گره‌هايي است كه مورچه $k$ واقع در گره $i$ مي‌تواند انتخاب نمايد و $\beta$ يك پارامتر مثبت است كه ميزان اهميت نسبي بين مقدار فرومون و اطلاعات هيورستيك را تعيين مي‌كند. توجه شود كه بعد از انتخاب گره $j$، اين گره از مجموعه $N_i^k$ خارج مي‌شود. براي استفاده از روابط فوق كافي است عددي مانند $q$ بين صفر و يك بصورت تصادفي از توزيع يكنواخت توليد شود، اگر $q \le q_\circ$ باشد آنگاه بر

طبق رابطه (۲) گره بعدي انتخاب مي‌شود و در غيراين‌صورت انتخاب $j$ از طريق رابطه (۳) صورت مي‌گيرد.

### قاعده بهنگام سازي موضعي فرومون‌ها در سيستم كلوني مورچه

مقدار فرومون در هنگام ساختن يك جواب بهنگام مي‌شود. وقتيكه يك مورچه از گره $i$ به گره $j$ حركت مي‌كند، مقدار فرومون اين مسير بصورت موضعي از رابطه زير بهنگام مي‌شود [۴].

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1-\rho')\,\tau_{ij}(t) + \rho'.\tau_o \qquad (۴)$$

$\rho'$ پارامتر تبخير فرومون در بهنگام سازي موضعي (مقداري بين صفر و يك) و $\tau_\circ$ مقدار فرومون اوليه است. توجه شود كه مقدار فرومون ثابت $\tau_\circ$ (كه يك پارامتر است) در ابتداي حل مسأله به همه كمان‌ها اختصاص مي‌يابد. بهنگام سازي موضعي فرومون به منظور كاهش جذابيت مسير انتخاب شده توسط يك مورچه صورت مي‌گيرد تا مورچه‌هاي بعدي فضاهاي ديگري را جستجو نمايند. در واقع مورچه‌ها اصطلاحاً مقداري از فرومون مسير خود را مي‌خورند؛ با اين عمل مقدار فرومون مسيرهاي انتخاب شده كاهش مي‌يابد و همين امر باعث مي‌شود كه مورچه‌هاي بعدي با احتمال كمتري همين جواب‌ها را توليد نمايند. بنابراين مورچه‌ها به سمت ايجاد جواب‌هايي كه تاكنون توليد نشده‌اند هدايت مي‌گردند و احتمال همگرايي آنها به سمت يك جواب كاهش مي‌يابد.

### قاعده بهنگام سازي عمومي فرومون‌ها در سيستم كلوني مورچه

بعد از آنكه تمام مورچه‌ها جواب خود را توليد كردند مقادير فرومون بهنگام مي‌شوند. بهنگام سازي عمومي مقادير فرومون براي هدايت مسير جستجو به سمت فضاهاي خوب صورت مي‌گيرد و به اين منظور لازم است فرومون مسيرهاي كوتاه‌تر (جواب‌هاي بهتر) افزايش يابد. در سيستم كلوني مورچه فقط مورچه اي كه بهترين جواب را توليد كرده است مجاز خواهد بود تا مقدار فرومون هر كمان $(i, j)$ مسيرش را بصورت زير بهنگام نمايد [۴].

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1-\rho)\,\tau_{ij}(t) + \rho.\Delta\tau(t) \qquad (۵)$$

$\rho$ پارامتر تبخير فرومون در بهنگام سازي عمومي است و $\Delta\tau(t)$ در مورد يك مسأله مينيمم‌يابي بايد با طول مسير (مقدار تابع هدف) مربوط به جواب مذكور رابطه عكس داشته باشد. در ضمن هم بهترين جواب در تكرار فعلي و هم بهترين جواب از ابتداي حل تا تكرار فعلي مي‌تواند به عنوان بهترين جواب در رابطه (۵) استفاده شود. با توجه به روابط (۴) و (۵) واضح است كه $\tau_0$ حد پايين مقادير فرومون است. به‌عبارت ديگر، مقدار فرومون هر كمان $\tau_0$ است مگر آنكه اين كمان روي مسير مربوط به بهترين جواب قرار گرفته باشد، كه در اين‌صورت مقدار فرومون آن اندكي افزايش مي‌يابد و در موقع بكارگيري رابطه (۴) نيز اين مقدار كمتر از $\tau_0$ نخواهد شد.

در پايان اين بخش لازم بذكر است كه جهت افزايش كارايي الگوريتم‌هاي بهينه‌يابي مورچگان از جمله سيستم كلوني مورچه، مي‌توان از يك روش جستجوي محلي به منظور بهبود هر جواب توليد شده استفاده نمود [۷].

## تشريح الگوريتم ارائه شده

در اين بخش روش مورچگان توسعه داده شده براي مسأله مورد بحث با جزئيات تشريح مي‌گردد. همان‌گونه كه در بخش قبلي توضيح داده شد پيداست اولين اقدامي كه بايد صورت بگيرد، تبديل مسأله به گونه‌اي است كه بوسيله سيستم كلوني مورچه قابل حل باشد.

## تبديل مسأله به يك گراف

مسأله مذكور در رابطه (۱) را مي‌توان با يك گراف كه داراي دو نوع گره مي‌باشد نمايش داد. يك نوع گره در ارتباط با اجزاء سيستم مي‌باشد، يعني هر جزء با يك گره نشان داده مي‌شود و نوع ديگر در ارتباط با تكنولوژي‌هاي مختلف است، يعني هر تكنولوژي نيز با يك گره نمايش مي‌يابد و بر اين اساس در اين گراف بين هر گره مربوط به يك جزء و هر گره مربوط به يك تكنولوژي در دسترس براي اين جزء يك كمان وجود خواهد داشت. هر مورچه در آغاز حركت در گره مربوط به جزء اول قرار مي‌گيرد و بر طبق قاعده انتقال احتمالي به گره مربوط به يكي از تكنولوژي‌هاي در دسترس حركت مي‌كند (اين حركت در واقع به اين معني است كه تكنولوژي مذكور براي اين جزء انتخاب شده است) و سپس اين مورچه بدون آنكه انتخابي انجام دهد به گره مربوط به جزء

دوم انتقال داده مي‌شود و مجدداً اين پروسه تكرار مي‌گردد تا تكنولوژي مربوط به آخرين جزء سيستم انتخاب شود، يعني تا وقتي‌كه يك جواب كامل ايجاد گردد.

### مطالعه موجه بودن

با توجه به مطالب بخش قبل واضح است كه محدوديت‌هاي نوع دوم و سوم مسأله مذكور در رابطه (۱) در موقع ايجاد يك جواب رعايت مي‌گردند، اما محدوديت نوع اول تضمين نمي‌شود و ممكن است كل بودجه مورد نياز در ارتباط با تكنولوژي‌هاي انتخاب شده بيشتر از $B$ باشد. به‌عبارت ديگر، تضميني بر موجه بودن جواب‌هاي توليد شده نيست. در اين ارتباط مي‌توان يك پنالتي براي جواب‌هاي غيرموجه در نظر گرفت و بر اساس آن بهنگام سازي عمومي فرومون‌ها را انجام داد [۹]، اما چون در سيستم كلوني مورچه اين نوع بهنگام سازي بر اساس تمام جواب‌ها صورت نمي‌گيرد، لذا اين عمل تأثير چنداني نخواهد داشت. بر همين اساس روش ارائه شده براي برخورد با جواب‌هاي غيرموجه به اين‌صورت است كه با جستجو در همسايگي چنين جواب‌هايي، يك جواب موجه را يافته و جايگزين آن مي‌گردد. اين پروسه ساده بصورت زير انجام مي‌گيرد.

### الگوريتم (۱)

قدم ۱- بصورت تصادفي يكي از اجزاء را انتخاب كنيد. تكنولوژي انتخاب شده براي اين جزء را در صورت امكان تعويض نماييد: به اينصورت كه از بين ساير تكنولوژي‌هاي در دسترس، آنهايي را كه هزينه كمتري نسبت به تكنولوژي فعلي دارند مشخص كنيد و از بين اين تكنولوژي‌ها آن يكي را كه بيشترين هزينه يا به‌عبارت ديگر بيشترين قابليت اطمينان را دارد انتخاب نماييد. در صورت وجود چنين موردي آنرا جايگزين تكنولوژي فعلي كنيد.

قدم ۲- كل هزينه مورد نياز در مورد اين جواب را بدست آوريد. اگر اين هزينه بزرگتر از $B$ نيست توقف كنيد و در غير اين‌صورت به قدم ۱ برويد.

### الگوريتم جستجوي محلي

بعد از آنكه يك جواب توليد شد - و در صورت غيرموجه بودن بعد از بكارگيري الگوريتم (۱)- اين جواب با استفاده از يك جستجوي محلي بهبود داده مي‌شود. به عبارت

ديگر، با جستجو در همسايگي اين جواب، يك جواب بهتر را يافته و جايگزين آن مي‌گردد. اين پروسه در مورد جواب‌هايي كه كل هزينه مورد نياز آنها كمتر از $B$ است، بصورت زير انجام مي‌گيرد.

الگوريتم (۲)

قدم ۱- بصورت تصادفي يكي از اجزاء را انتخاب كنيد. تكنولوژي انتخاب شده براي اين جزء را در صورت امكان تعويض نماييد: به اينصورت كه از بين ساير تكنولوژي‌هاي در دسترس، آنهايي را كه قابليت اطمينان بيشتري نسبت به تكنولوژي فعلي دارند و در صورت انتخاب شدن موجه بودن جواب را نقض نمي‌كنند (يعني اختلاف هزينه چنين تكنولوژي‌هايي نسبت به تكنولوژي فعلي بيشتر از بودجه استفاده نشده نمي‌باشد) مشخص كنيد و از بين اين تكنولوژي‌ها آن يكي را كه بيشترين قابليت اطمينان را دارد انتخاب نماييد. در صورت وجود چنين گزينه اي آن را جايگزين تكنولوژي فعلي كنيد.

قدم ۲- كل هزينه مورد نياز در مورد اين جواب را بدست آوريد. اگر اين هزينه كمتر از $B$ است به قدم بعد برويد و در غيراين‌صورت، يعني اگر اين هزينه برابر با $B$ است، توقف كنيد.

قدم ۳- اين مرحله مشابه قدم۱ است، با اين تفاوت كه اگر يك تكنولوژي با شرايط قيد شده وجود نداشته باشد الگوريتم متوقف مي‌شود و در غيراين‌صورت يك جواب جديد ايجاد شده و قدم بعد انجام مي‌گيرد.

قدم ۴- كل هزينه مورد نياز در مورد اين جواب را بدست آوريد. اگر اين هزينه كمتر از $B$ است به قدم ۱ برويد و در غيراين‌صورت توقف كنيد.

توجه شود كه اين الگوريتم در ابتدا فقط شامل قدم‌هاي۱ و ۲ بود و در قدم ۱ يك شرط توقف مانند آنچه در قدم ۳ وجود دارد موجود بود، اما نتايج نشان داد كه الگوريتم در مورد اكثر جواب‌ها بدون هيچ بهبودي يا پس از بهبودي اندك متوقف مي‌شود، كه عمده دليل اين امر انتخاب تصادفي اجزاء براي بهبود مي‌باشد. بنابراين الگوريتم به شكل فعلي تهيه گرديد و بهبود چشمگيري در بكارگيري آن حاصل شد. بر همين اساس جهت رسيدن به عملكرد بهتر، اين الگوريتم در ۶ قدم تهيه شد، طوريكه قدم‌هاي ۱ و ۲ به همين صورت فعلي دو بار پشت سر هم انجام مي‌گرفت، اما در اين‌حالت نسبت به الگوريتم فعلي بهبود چنداني در مقايسه با افزايش زمان اجرا بدست نيامد.

### ساختار كلي الگوريتم

قبل از تشريح ساختار كلي روش، لازم است كه تعدادي از روابط استفاده شده ارائه گردد. براي محاسبه اطلاعات هيورستيك از رابطه زير استفاده شده است [۹].

$$\eta_{ij} = {R_{ij}}/{C_{ij}} \qquad (۶)$$

همانگونه كه از روابط (۲) و (۳) پيداست، اطلاعات هيورستيك جذابيت انتخاب يك كمان (يك تكنولوژي) را نشان مي‌دهد و از سوي ديگر با توجه به مدل مسأله واضح است كه تكنولوژي داراي قابليت اطمينان بيشتر و هزينه كمتر جذابيت انتخاب بيشتري خواهد داشت، لذا استفاده از رابطه (۶) منطقي به نظر مي‌رسد. همچنين بر اساس بررسي نتايج، از بهترين جواب تا تكرار فعلي در بهنگام سازي عمومي فرومون‌ها استفاده شده است. بنابراين مقدار $\Delta\tau(t)$ به كيفيت جواب مذكور بستگي داشته و به اين منظور رابطه زير بكار رفته است.

$$\Delta\tau(t) = {R_{gb}}/{TC_{gb}} \qquad (۷)$$

كه $R_{gb}$ و $TC_{gb}$ به ترتيب قابليت اطمينان و كل هزينه مورد نياز مربوط به بهترين جواب تا تكرار فعلي الگوريتم مي‌باشد. در واقع هر چه قابليت اطمينان اين جواب بيشتر و كل هزينه آن كمتر باشد، مقدار فرومون بيشتري روي كمان‌هاي مربوط به اين جواب متصاعد مي‌گردد. توجه شود كه در موقع بكارگيري الگوريتم (۲) ممكن است قبل از آنكه از كل بودجه استفاده گردد، الگوريتم بعلت ماهيت تصادفيش خاتمه يابد (شرط توقف قدم ۳) و از سوي ديگر مقادير $B$ و $C_{ij}$ ممكن است به گونه‌اي باشند كه استفاده از كل بودجه مقدور نباشد. بنابراين در بعضي موارد ممكن است $TC_{gb} < B$ باشد، در واقع $TC_{gb}$ هميشه مقدار ثابت $B$ نخواهد بود. لذا جوابي كه تاكنون بيشترين قابليت اطمينان را داشته است، در صورت عدم استفاده از كل بودجه، به همان ميزان جذابيت بيشتري خواهد داشت. از سوي ديگر، استفاده از $TC_{gb}$ در محاسبه $\Delta\tau(t)$ باعث مي‌شود كه رشد فرومون كندتر صورت بگيرد تا احتمال همگرايي به يك بهينه موضعي كاهش يابد. با توجه به اين توضيحات ساختار كلي الگوريتم ارائه شده بصورت زير مي‌باشد.

### الگوريتم (۳)

قدم ۱- پس از خواندن داده‌هاي مسأله، به ازاي هر كمان $(i, j)$ اختصاص دهيد: $\tau_{ij}(0) = \tau_o$ و مقادير $\eta_{ij}$ را با استفاده از رابطه (۶) محاسبه كنيد.

قدم ۲- به تعداد تكرارهاي مورد نظر مراحل زير را تكرار نماييد.

مرحله ۲-۱- براي هر مورچه $k$ كه $k = 1, 2, \ldots, m$ است، مراحل زير را انجام دهيد.

i. براي مورچه $k$ با بكارگيري روابط (۲) و (۳) يك جواب كامل بسازيد. قابليت اطمينان و كل هزينه اين جواب را محاسبه كنيد.

ii. اگر اين جواب موجه نيست، با بكارگيري الگوريتم (۱) يك جواب موجه بسازيد.

iii. اگر اين جواب از كل بودجه استفاده ننموده است، با بكارگيري الگوريتم (۲) در صورت امكان آن را بهبود دهيد.

iv. مقادير فرومون مربوط به اين جواب را با استفاده از رابطه (۴) بهنگام كنيد.

v. بهترين جواب موجود را با مقايسه با اين جواب در صورت امكان بهنگام نماييد.

مرحله ۲-۲- مقادير فرومون مسير مربوط به بهترين جواب موجود را با استفاده از روابط (۵) و (۷) بهنگام كنيد.

قدم۳- بهترين جواب موجود را چاپ نماييد.

### نتايج محاسباتي

به منظور ارزيابي عملكرد الگوريتم ارائه شده از پنج مثال استفاده شده است. مثال‌هاي ۱ تا ۴ از تحقيقي كه در ارتباط با توسعه سيستم مورچه براي حل مسأله مورد بررسي مي‌باشد استخراج گرديده است. مثال۱ داراي ۱۵ جزء و۶۰ متغير، مثال۲ داراي ۱۵ جزء و۸۰ متغير، مثال۳ داراي ۱۵ جزء و۱۰۰ متغير و مثال۴ داراي ۲۵ جزء و ۱۶۶ متغير مي‌باشد (براي جزييات بيشتر مرجع [۹] را مشاهده نماييد). بنابراين از اين چهار مثال به منظور ارزيابي و مقايسه روش ارائه شده با الگوريتم مذكور استفاده شده است و مسأله‌اي با۴۰ جزء و ۲۶۶ متغير به منظور ارزيابي بيشتر طراحي گرديده است (مثال۵). داده‌هاي اين مثال در نگاره (۱) نشان داده شده است و پيداست كه اندازه فضاي جستجو بزرگتر از ۳/۰۳۹×$۱۰^{۳۲}$ مي‌باشد. در اين مسأله سه مقدار متفاوت ۲۴۰۰، ۲۵۵۰ و۲۷۰۰ دلار به عنوان بودجه در دسترس منظور شده است، لذا اين امر منجر به ايجاد سه مسأله مختلف به ترتيب با عناوين ۵a، ۵b و ۵c شده است.

نگاره (۱): داده هاي مثال ۵

| اجزاء | | تکنولوژي ۱ | تکنولوژي ۲ | تکنولوژي ۳ | تکنولوژي ٤ | تکنولوژي ۵ | تکنولوژي ٦ | تکنولوژي ۷ | تکنولوژي ۸ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | قابلیت اطمینان | ۰/۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۹ |
| | هزینه | ۲۰ | ٤۰ | ٦۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | ۱٤۰ | ۱۸۰ |
| ۲ | قابلیت اطمینان | ۰/۸۵ | ۰/۹۷۷۵ | ۰/۹۹٦٦ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ۳۰ | ٦۰ | ۹۰ | ۱۲۰ | ۱۵۰ | | | |
| ۳ | قابلیت اطمینان | ۰/۸ | ۰/۹٦ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۸ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹ |
| | هزینه | ۲۰ | ٤۰ | ٦۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | ۱٤۰ | ۱٦۰ |
| ٤ | قابلیت اطمینان | ۰/۷۵ | ۰/۹۳۸ | ۰/۹۸ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ۳۰ | ٤۰ | ۵۰ | ٦۰ | ۷۰ | | | |
| ۵ | قابلیت اطمینان | ۰/۸۵ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۸ |
| | هزینه | ۲۰ | ٤۰ | ٦۵ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | ۱٤۰ | ۱۵۵ |
| ٦ | قابلیت اطمینان | ۰/۹ | ۰/۹۵ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ۲۵ | ۳۰ | ۵۰ | ۷۰ | ۹۰ | | | |
| ۷ | قابلیت اطمینان | ۰/۹۵ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۷ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۷ |
| | هزینه | ٤۰ | ٦۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | ۱٤۰ | ۱٦۰ | ۱۸۰ |
| ۸ | قابلیت اطمینان | ۰/۸۵ | ۰/۹۹۵ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ۱۰ | ۳۰ | ٦۰ | ۸۰ | ۱۲۰ | | | |
| ۹ | قابلیت اطمینان | ۰/۹ | ۰/۹۵ | ۰/۹۹۵ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۹۹۹۹۵ | ۰/۹۹۹۹۹۵ | ۰/۹۹۹۹۹۹۵ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۵ |
| | هزینه | ۳۰ | ۵۰ | ۷۱ | ۹۰ | ۱۱۰ | ۱۳۰ | ۱۵۰ | ۱۷۰ |
| ۱۰ | قابلیت اطمینان | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹ | _ | _ |
| | هزینه | ۱۵ | ٤۰ | ۷۰ | ۱۰۰ | ۱۳۰ | ۱٦۰ | | |
| ۱۱ | قابلیت اطمینان | ۰/۹۵ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۹۹ |
| | هزینه | ۲۰ | ٤۰ | ٦۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | ۱٤۰ | ۱٦۰ |
| ۱۲ | قابلیت اطمینان | ۰/۸ | ۰/۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ٤۰ | ٦۰ | ۸۵ | ۱۱۰ | ۱۳۰ | | | |
| ۱۳ | قابلیت اطمینان | ۰/۷۵ | ۰/۸۵ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹٦ | ۰/۹۹۹۹٦ | ۰/۹۹۹۹۹٦ | ۰/۹۹۹۹۹۹٦ |
| | هزینه | ۳۰ | ۵۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | ۱٤۰ | ۱٦۰ | ۱۸۰ |
| ۱٤ | قابلیت اطمینان | ۰/۸ | ۰/۹۵ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ۱۰ | ۳۰ | ٤۰ | ٦۰ | ۸۰ | | | |

### *ادامه نگاره (۱): داده هاي مثال۵*

| اجزاء | | تکنولوژي ۱ | تکنولوژي ۲ | تکنولوژي ۳ | تکنولوژي ٤ | تکنولوژي ٥ | تکنولوژي ٦ | تکنولوژي ۷ | تکنولوژي ۸ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۵ | قابلیت اطمینان | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۹٥ |
| | هزینه | ٥۰ | ۸۰ | ۱۱۰ | ۱٤۰ | ۱٦۰ | ۱۸۰ | ۲۰۰ | ۲۲۰ |
| ۱٦ | قابلیت اطمینان | ۰/۹ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۹ |
| | هزینه | ۲۰ | ٤۰ | ٦۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | ۱٤۰ | ۱۸۰ |
| ۱۷ | قابلیت اطمینان | ۰/۸٥ | ۰/۹۷۷٥ | ۰/۹۹٦٦ | ۰/۹۹۹٥ | ۰/۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ۳۰ | ٦۰ | ۹۰ | ۱۲۰ | ۱٥۰ | | | |
| ۱۸ | قابلیت اطمینان | ۰/۸ | ۰/۹٦ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۸ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹ |
| | هزینه | ۲۰ | ٤۰ | ٦۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | ۱٤۰ | ۱٦۰ |
| ۱۹ | قابلیت اطمینان | ۰/۷٥ | ۰/۹۳۸ | ۰/۹۸ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ۳۰ | ٤۰ | ٥۰ | ٦۰ | ۷۰ | | | |
| ۲۰ | قابلیت اطمینان | ۰/۸٥ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۸ |
| | هزینه | ۲۰ | ٤۰ | ٦٥ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | ۱٤۰ | ۱٥٥ |
| ۲۱ | قابلیت اطمینان | ۰/۹ | ۰/۹٥ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ۲٥ | ۳۰ | ٥۰ | ۷۰ | ۹۰ | | | |
| ۲۲ | قابلیت اطمینان | ۰/۹٥ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۷ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹۷ |
| | هزینه | ٤۰ | ٦۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | ۱٤۰ | ۱٦۰ | ۱۸۰ |
| ۲۳ | قابلیت اطمینان | ۰/۸٥ | ۰/۹۹٥ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ۱۰ | ۳۰ | ٦۰ | ۸۰ | ۱۲۰ | | | |
| ۲٤ | قابلیت اطمینان | ۰/۹ | ۰/۹٥ | ۰/۹۹٥ | ۰/۹۹۹٥ | ۰/۹۹۹۹٥ | ۰/۹۹۹۹۹٥ | ۰/۹۹۹۹۹۹٥ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹٥ |
| | هزینه | ۳۰ | ٥۰ | ۷۰ | ۹۰ | ۱۱۰ | ۱۳۰ | ۱٥۰ | ۱۷۰ |
| ۲٥ | قابلیت اطمینان | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹ | _ | _ |
| | هزینه | ۱٥ | ٤۰ | ۷۰ | ۱۰۰ | ۱۳۰ | ۱٦۰ | | |
| ۲٦ | قابلیت اطمینان | ۰/۹٥ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۹۹۹٥ | ۰/۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹٥ | ۰/۹۹۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹۸ |
| | هزینه | ۲٥ | ۳٥ | ٥٥ | ۷۰ | ۹٥ | ۱۱٥ | ۱٤۰ | ۱٦۰ |
| ۲۷ | قابلیت اطمینان | ۰/۸٥ | ۰/۹۷ | ۰/۹۹۷ | ۰/۹۹۹٥ | ۰/۹۹۹۹ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ٤۰ | ٦۰ | ۹۰ | ۱۲۰ | ۱٤٥ | | | |
| ۲۸ | قابلیت اطمینان | ۰/۸٥ | ۰/۹٦ | ۰/۹۹ | ۰/۹۹۸ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۹۹۹۹٥ | ۰/۹۹۹۹۹ | ۰/۹۹۹۹۹۹ |
| | هزینه | ۲٥ | ٤٥ | ٦۰ | ۸٥ | ۱۰۰ | ۱۲٥ | ۱٥۰ | ۱۷۰ |

*ادامه نگاره (١): داده هاي مثال ٥*

| اجزاء | | تکنولوژي ١ | تکنولوژي ٢ | تکنولوژي ٣ | تکنولوژي ٤ | تکنولوژي ٥ | تکنولوژي ٦ | تکنولوژي ٧ | تکنولوژي ٨ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ٢٩ | قابلیت اطمینان | ٠/٨ | ٠/٩ | ٠/٩٨ | ٠/٩٩٨ | ٠/٩٩٩٥ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ٣٠ | ٤٥ | ٦٠ | ٧٠ | ٨٥ | | | |
| ٣٠ | قابلیت اطمینان | ٠/٨ | ٠/٩٨ | ٠/٩٩٥ | ٠/٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٩٩٩٥ |
| | هزینه | ٢٠ | ٤٠ | ٦٠ | ٨٠ | ١٠٠ | ١٢٠ | ١٤٠ | ١٦٠ |
| ٣١ | قابلیت اطمینان | ٠/٨٥ | ٠/٩ | ٠/٩٩ | ٠/٩٩٩ | ٠/٩٩٩٩ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ٢٠ | ٣٠ | ٥٠ | ٧٠ | ٩٠ | | | |
| ٣٢ | قابلیت اطمینان | ٠/٩ | ٠/٩٧ | ٠/٩٩٧ | ٠/٩٩٩٧ | ٠/٩٩٩٩٧ | ٠/٩٩٩٩٩٧ | ٠/٩٩٩٩٩٩٧ | ٠/٩٩٩٩٩٩٩٧ |
| | هزینه | ٣٠ | ٥٠ | ٧٠ | ٩٠ | ١١٠ | ١٣٠ | ١٥٠ | ١٧٠ |
| ٣٣ | قابلیت اطمینان | ٠/٨٥ | ٠/٩٥ | ٠/٩٩٥ | ٠/٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٥ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ١٥ | ٣٠ | ٦٠ | ٨٥ | ١١٠ | | | |
| ٣٤ | قابلیت اطمینان | ٠/٩ | ٠/٩٥ | ٠/٩٩٥ | ٠/٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٩٩٩٥ |
| | هزینه | ٢٥ | ٤٥ | ٦٥ | ٨٥ | ١٠٥ | ١٢٥ | ١٤٥ | ١٦٥ |
| ٣٥ | قابلیت اطمینان | ٠/٩٥ | ٠/٩٩٩ | ٠/٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٩ | ٠/٩٩٩٩٩٥ | ٠/٩٩٩٩٩٩٩ | _ | _ |
| | هزینه | ٢٠ | ٤٥ | ٧٠ | ١٠٠ | ١٤٠ | ١٧٠ | | |
| ٣٦ | قابلیت اطمینان | ٠/٩٩ | ٠/٩٩٨ | ٠/٩٩٩٨ | ٠/٩٩٩٩٨ | ٠/٩٩٩٩٩٨ | ٠/٩٩٩٩٩٩٨ | ٠/٩٩٩٩٩٩٩٨ | ٠/٩٩٩٩٩٩٩٩٨ |
| | هزینه | ٣٠ | ٤٠ | ٦٠ | ٨٠ | ١٠٠ | ١٢٠ | ١٤٠ | ١٦٠ |
| ٣٧ | قابلیت اطمینان | ٠/٨ | ٠/٩ | ٠/٩٩ | ٠/٩٩٩ | ٠/٩٩٩٩ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ٣٠ | ٥٠ | ٨٠ | ١١٥ | ١٣٠ | | | |
| ٣٨ | قابلیت اطمینان | ٠/٧٥ | ٠/٨٥ | ٠/٩٥ | ٠/٩٩٦ | ٠/٩٩٩٦ | ٠/٩٩٩٩٦ | ٠/٩٩٩٩٩٦ | ٠/٩٩٩٩٩٩٦ |
| | هزینه | ٢٠ | ٤٠ | ٧٥ | ١٠٠ | ١١٥ | ١٤٠ | ١٥٥ | ١٧٥ |
| ٣٩ | قابلیت اطمینان | ٠/٧٥ | ٠/٩ | ٠/٩٩ | ٠/٩٩٩ | ٠/٩٩٩٥ | _ | _ | _ |
| | هزینه | ١٥ | ٣٠ | ٤٠ | ٦٠ | ٨٠ | | | |
| ٤٠ | قابلیت اطمینان | ٠/٩٩ | ٠/٩٩٩ | ٠/٩٩٩٩ | ٠/٩٩٩٩٩ | ٠/٩٩٩٩٩٩ | ٠/٩٩٩٩٩٩٩ | ٠/٩٩٩٩٩٩٩٨ | ٠/٩٩٩٩٩٩٩٩٥ |
| | هزینه | ٤٠ | ٧٠ | ١٠٠ | ١٣٠ | ١٦٠ | ١٨٥ | ٢١٠ | ٢٢٥ |

الگوریتم ارائه شده داراي تعدادي پارامتر است که مقدار آنها باید مشخص شود. به این منظور ابتدا تعداد تکرارهاي قدم دوم برابر با ١٥٠٠ و مقدار $\tau_\circ$ برابر با $١٠^{-٦}$ انتخاب شد (توجه شود که این مقدار باید طوري انتخاب گردد که تضمین نماید همواره $\tau_\circ < \Delta\tau(t)$

باشد) و سپس مقادیر مناسب براي سایر پارامترها با انجام آزمایشات مقدماتي تعيين شد. در این راستا چهار اندازه (۵۰، ۳۰، ۱۵، ۵) براي $m$، چهار مقدار (۰/۹۹، ۰/۹۵، ۰/۹، ۰/۸) براي $q_o$، چهار مقدار (۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵) براي $\beta$ و سه مقدار (۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۱) براي $\rho$ و $\rho'$ تست شد و نتایج نشان داد که بهترین عملکرد الگوریتم با $m =$ ۳۰، $q_o =$ ۰/۸، $\beta =$ ۱، $\rho =$ ۰/۰۵ و $\rho' =$ ۰/۱ حاصل مي‌گردد، بنابراین براي حل تمام مثال‌ها از این مقادیر استفاده شده است.

روش ارائه شده با استفاده از ویژوال C++ کد شده و توسط یك کامپیوتر شخصي پنتیوم ۴ با پردازشگر ۲ GHz اجرا گردید. هر یك از مثال‌هاي مذکور ده بار حل گردید و کمترین، بیشترین، میانگین و انحراف از معیار قابلیت اطمینان مربوط به جواب‌هاي هر مثال محاسبه شد. نتایج بدست آمده به همراه نتایج مربوط به روش سیستم مورچه فوق الذکر در بهترین حالت [۹] در نگاره (۲) نشان داده شده است.

*نگاره (۲): نتایج محاسباتي*

| مثال | سیستم کلوني مورچه | | | | سیستم مورچه | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | حداقل | میانگین | انحراف | حداکثر | حداقل | میانگین | انحراف | حداکثر |
| ۱ | ۰/۸۵۷۰۵٤ | ۰/۸۵۷۰۵٤ | ۰ | ۰/۸۵۷۰۵٤ | ۰/۸۵۷۰۵ | ۰/۸۵۷۰۵ | ۰ | ۰/۸۵۷۰۵ |
| ۲ | ۰/۹۱۵۰٤۲ | ۰/۹۱۵۰٤۲ | ۰ | ۰/۹۱۵۰٤۲ | ۰/۹۱۵۰٤ | ۰/۹۱۵۰٤ | ۰ | ۰/۹۱۵۰٤ |
| ۳ | ۰/۹٦۵۱۳٤ | ۰/۹٦۵۱۳٤ | ۰ | ۰/۹٦۵۱۳٤ | ۰/۹٦٤۰٦ | ۰/۹٦٤۳۹ | ۰/۰۰۰۵۰ | ۰/۹٦۵۱۳ |
| ٤ | ۰/۸٦۵٤۳۹ | ۰/۸٦۵٤۳۹ | ۰ | ۰/۸٦۵٤۳۹ | ۰/۸٦٤٦۵ | ۰/۸٦٤۹۱ | ۰/۰۰۰۳۸ | ۰/۸٦۵٤۳ |
| ٥a | ۰/۸۲۲۰۳٤ | ۰/۸۲۵۷٤٦ | ۰/۰۰۱٦۵۷ | ۰/۸۲٦۵۲۰ | # | # | # | # |
| ٥b | ۰/۸۷۰۸۰۵ | ۰/۸۷۲۸٦٤ | ۰/۰۰۱۹٦۸ | ۰/۸۷۵۲۹٦ | # | # | # | # |
| ٥c | ۰/۹۱۱٥٤۸ | ۰/۹۱۳۸۷۲ | ۰/۰۰۱۳۰۲ | ۰/۹۲٤۸۹۵ | # | # | # | # |

همانگونه که مشخص است در مورد مثال‌هاي۱ و۲ دو روش عملکرد یکساني داشته‌اند، اما در مورد مثال‌هاي ۳ و ۴ الگوریتم ارائه شده نتایج بهتري داشته است. در مورد مثال ۵ بهترین جواب‌هاي بدست آمده بهینه یا نزدیك به بهینه مي‌باشند و تکنولوژي‌هاي انتخاب شده مربوطه به صورت زیر (نگاره ۳) است.

*نگاره (۳): تکنولوژي‌هاي انتخاب شده*

| |
|---|
| Ωa= ۳- ۳- ۳- ٤- ۲- ۳- ۲- ۲- ۳- ۱- ۲- ٤- ٤- ٤- ۱- ۳- ۳- ۳- ٤- ۲- ۳- ۲- ۲- ۳- ۱- ۳- ۳-<br>۳- ٤- ۳- ٤- ۳- ۳- ۳- ۲- ۲- ۳- ٤- ٤- ۱ |
| Ωb= ۳- ۳- ۳- ٤- ٤- ۳- ۳- ۳- ۲- ۳- ۲- ۲- ٤- ٤- ٤- ۱- ۳- ۳- ٤- ٤- ۳- ۳- ۳- ۲- ۳- ۱- ۳- ۳-<br>۳- ٤- ۳- ٤- ۳- ۳- ۳- ۲- ۲- ۳- ٤- ٤- ۱ |
| Ωc=۳- ۳- ٤- ٤- ۳- ۳- ۳- ۲- ۳- ۲- ۲- ٤- ٤- ٤- ۲- ۳- ۳- ٤- ٤- ۳- ۳- ۳- ۲- ۳- ۲- ۳- ۳-<br>٤- ٤- ۳- ٤- ۳- ۳- ۳- ۲- ۲- ٤- ٤- ٤- ۲ |

بیشترین زمان صرف شده براي حل هر یك از مثال‌ها به ترتیب ۶/۳، ۵/۳، ۶/۸، ۶/۳، ۸/۸، ۹/۲ و ۹/۳ ثانیه بوده است. در ضمن توجه شود که در الگوریتم سیستم مورچه پارامترهاي مختلفي براي حل هر یك از مثال‌هاي ۱ تا ۴ مورد استفاده قرار گرفته است و بر این اساس براي حل هر مثال دیگري لازم است مقادیر پارامترها انتخاب گردند و این مي‌تواند یك نقطه ضعف تلقي شود، در صورتیکه در الگوریتم ارائه شده از پارامترهاي یکساني استفاده شده است و با توجه به تنوع مثال‌هاي فوق، پیداست که براي حل هر مسأله دیگري نیاز به انتخاب مجدد پارامترها نمي‌باشد. به‌عبارت دیگر، براي هر مسأله با ابعاد بزرگ که از روش‌هاي دقیق نمي‌توان جواب بهینه را بدست آورد، با استفاده از همین پارامترها مي‌توان در زماني بسیار کوتاه جوابي داراي کیفیت را تولید نمود.

## نتیجه گیري

در این مقاله یك روش مبتني بر سیستم کلوني مورچه براي حل مسأله بهینه‌یابي قابلیت اطمینان در یك سیستم سري با انتخاب‌هاي چندگانه و محدودیت بودجه توسعه یافته است. در این الگوریتم یك مورچه مصنوعي بصورت احتمالي، بر اساس اطلاعاتي که از مورچه‌هاي قبلي دریافت مي‌نماید و با در نظر گرفتن اطلاعات هیورستیك، با شروع از اولین جزء یك تکنولوژي را انتخاب مي‌نماید و با ادامه این پروسه براي سایر زیرسیستم‌ها تا آخرین جزء، یك جواب کامل تولید مي‌کند و سپس به منظور ایجاد ارتباط با مورچه‌هاي بعدي اقدام به بهنگام سازي فرومون روي مسیر طي شده مي‌نماید تا مورچه‌هاي بعدي با احتمال کمتري همین مسیر را انتخاب کنند. با توجه به اینکه محدودیت بودجه در حین تولید یك جواب کنترل نمي‌گردد، لذا ممکن است جواب تولید شده موجه نباشد،

كه در اين‌صورت چنين جوابي با استفاده از يك الگوريتم ابتكاري جديد تبديل به يك جواب موجه مي‌گردد. همچنين يك روش جستجوي محلي جهت بهبود هر جواب موجه بكار گرفته مي‌شود. بعد از آنكه تمام مورچه‌ها جواب‌هاي خود را ساختند، مقداري فرمون روي مسيري كه مربوط به بهترين جواب موجود تا تكرار فعلي الگوريتم است متصاعد مي‌گردد، كه اين مقدار بستگي به ضريب تبخير فرومون و كيفيت اين جواب خواهد داشت. اين امر باعث مي‌شود كه مورچه‌هاي بعدي فضاهاي خوب را با احتمال بيشتري انتخاب كنند. به‌عبارت ديگر، بهنگام سازي موضعي فرومون‌ها جستجو را به ناحيه هاي جديد كشانده و در عوض بهنگام سازي عمومي جستجو در اطراف بهترين جواب را تشديد مي‌نمايد. در خاتمه يادآوري مي‌شود كه الگوريتم ارائه شده براي مسأله مورد بحث به ويژه در مواقعي كه تعداد زيرسيستم‌ها زياد است و استفاده از روش‌هايي مانند شاخه و كرانه به سادگي مقدور نمي‌باشد، مي‌تواند بطور كارا مورد استفاده قرار گرفته و در زماني بسيار ناچيز يك جواب بهينه يا نزديك به بهينه را توليد نمايد.

## منابع

1- Ait-Kadi, D. and Nourelfath, M. (2001). “Availability optimization of fault-tolerant systems” International Conference Industrial Engineering Production Management (IEPM’2001, August), Quebec.

2- Beckers, R.; Deneubourg, J. L. and Goss, S. (1992). “Trails and U-turns in the selection of the shortest path by the ant Lasius Niger” Journal of Theoretical Biology, Vol. 159, pp: 397- 415.

3- Dorigo, M. and Gambardella, L. M. (1997). “Ant colonies for the traveling salesman problem” BioSystems, Vol. 43, pp: 73- 81.

4- Dorigo, M. and Gambardella, L. M. (1997). “Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem” IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1, pp: 53- 66.

5- Dorigo, M.; Maniezzo, V. and Colorni, A. (1996). “The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents” IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part B, Vol. 26, No. 1, pp: 29- 41.

6- Dorigo, M. (1992). Optimization, Learning and Natural Algorithms, PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy.

7- Dorigo, M. and Stutzle, T. (2001). The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithm, Applications and Advances, In Glover F. and Kochenberger G. editors, Metaheuristics Handbook, Kluwer.

8- Garey, M. R. and Johnson, D. S. (1979). Computers and intractability, San Francisco, Freeman.

9- Nahas, N. and Nourelfath, M. (2005). “Ant system for reliability optimization of a series system with multiple-choice and budget constraints” Reliability Engineering and System Safety, Vol. 87, pp: 1-12.

10- Nauss, R. M. (1978). “The 0- 1 knapsack problem with multiple choice constraints” European Journal of Operational Research, Vol. 2, pp: 125-131.

11- Nourelfath, M. and Nahas, N. (2003). “Quantized hopfield networks for reliability optimization” Reliability Engineering and System Safety, Vol. 81, pp: 191- 196.

12- Ramirez- Marquez, J. E. and Coit, D. W. (2004). “A heuristic for solving the redundancy allocation problem for multi-state series-parallel systems” Reliability Engineering and System Safety, Vol. 83, pp: 341-349.

13- Sinha P, Zoltners AA. (1979). “The multiple choice knapsack problem” Operations Research, Vol. 27, pp: 503- 515.

14- Sung, C. S. and Cho, Y. K. (2000). “Reliability optimization of a series system with multiple-choice and budget constraints” European Journal of Operational Research, Vol. 127, pp: 159- 171.

15- Sung, C. S. and Lee, H. K. (1994). “A branch-and-bound approach for spare unit allocation in a series system” European Journal of Operational Research, Vol. 75, pp: 217- 232.

16- Tan, Z. (2003). “Minimal cut sets of s- t networks with k-out-of-n nodes” Reliability Engineering & System Safety, Vol. 82, pp: 49- 54.

17- Tillman, F. A.; Hwang, C. L. and Kuo, W. (1977). “Optimization techniques for system reliability with redundancy, a review” IEEE Transactions on Reliability, Vol. R 26, pp: 148- 155.

18- Tillman, I. A.; Hwang, C. L. and Kuo, W. (1980). Optimization of system reliability, New York, Marcel Dekker.

19- Yeh, W. C. (2004). “A simple algorithm for evaluating the k-out-of-n network reliability” Reliability Engineering and System Safety, Vol. 83, pp: 93- 101.

20- Yeh, W. C. (2006). “A new algorithm for generating minimal cut sets in k-out- of- n networks” Reliability Engineering and System Safety, Vol. 91, pp 36- 43.

21- You, P. S. and Chen, T. C. (2005). “An efficient heuristic for series-parallel redundant reliability problems” Computers and Operations Research, Vol. 32, pp: 2117- 2127.