ارائهٔ یک مدل ریاضی زمان‌بندی نیروی انسانی و حل آن با استفاده از روش جستجوی ممنوع (TS)

رضا توکلی مقدم[i]؛ سید محمدتقی فاطمی‌قمی[ii]؛ فهیمه افسری[iii]؛ نیما صفایی[iv]

چکیده

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضیِ عدد صحیح، برای زمان‌بندی نیروی انسانی ارائه می‌شود. زمان‌بندی نیروی انسانی عبارت است از تخصیص یک الگوی کاری برحسب زمان که با توجه به خواسته‌ها و نیازهای سیستم و نیروی کار صورت می‌گیرد. تابع هدف مدل پیشنهادی در قالب هزینهٔ بیکاری، هزینهٔ تخطی از درجهٔ اهمیت شیفت، هزینهٔ مازاد پرسنل متخصص و هزینهٔ تقاضای پوشش نیافته حداقل می‌شود. با توجه به اینکه مسألهٔ زمان‌بندی نیروی انسانی از نوع مسألهٔ مجموعهٔ پوششی و درنتیجه NP-Hard است و حل آن برای ابعاد بزرگ از طریق رویکردهای سنتی برنامه‌ریزی خطی زمان محاسباتی زیادی لازم دارد. لذا طراحی خاصی از روش جستجوی ممنوع[1] (TS) به عنوان یکی از روش‌های فرا ابتکاری برای حل مدل ارائه شده استفاده می‌شود. اعتبار مدل ارائه شده با نرم‌افزار لینگو مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس برای بررسی کارایی روش TS، حل بهینه با حل حاصل از روش TS در قالب ده مسأله نمونه مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی

زمان‌بندی نیروی انسانی، شیفت کار، الگوی کار، جستجوی ممنوع.

A Mathematical Model for Manpower Scheduling Solved by Tabu Search

R. Tavakkoli-Moghaddam; S.M.T. Fatemi-Ghomi; F. Afsari; N. Safaei

ABSTRACT

This paper presents an integer mathematical programming model for manpower scheduling problems. This can be considered as a type of set covering problem, which is to assign a work pattern considering system's requirements and associated workforces. The objective function is to minimize the costs of absent, disobeyed degree of significant for each work shift, and uncovered demands. It is so difficult to solve such problems in a reasonable computational time by using conventional optimization tools. Thus, in this paper a special design of tabu search (TS) is employed as a well-known meta-heuristic method to solve such hard problems. To show the efficiency of the proposed method, ten different test problems are solved and the associated solutions are compared to the solution obtained by the Lingo package.

KEYWORDS

Manpower scheduling, Work pattern, Workforce, Tabu search.

---

[i] دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، tavakoli@ut.ac.ir

[ii] استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[iii] فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران

[iv] دانشجوی دکترای مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

۱- مقدمه

زمان‌بندی نیروی انسانی یا برنامه‌ریزی خدمه، حالت خاصی از مسألهٔ زمان‌بندی است که هدف از آن تخصیص یک الگوی کاری به هر نیروی کار است به‌گونه‌ای که حداکثر مطلوبیت را برای سیستم و کارکنان آن به دنبال داشته باشد. در ادبیات موضوع به یک پریود کاری در الگوی ارائه شده اصطلاحاً شیفت اطلاق می‌شود. از دید زمان‌بندی نیروی انسانی هر روز کاری قابل تقسیم به چند شیفت است به‌طوری‌که در هر شیفت به تعداد معینی از انواع پرسنل نیاز است. مسألهٔ زمان‌بندی نیروی انسانی در اکثر مراکز تولیدی و خدماتی مانند بیمارستان، آتش نشانی، هتل، بخش حمل و نقل اعم از زمینی، هوایی و دریایی مطرح است. در عمل، عواملی همچون ایام تعطیل، نوع تخصص، درجه مهارت، سطح تجربه کارکنان و یا تمایل آنها جهت ارایه خدمت در یک شیفت خاص، نقش مؤثری را در زمان‌بندی نیروی انسانی ایفا می‌کنند. در ساده‌ترین حالت، با فرض وجود N پرسنل و M شیفت، برنامه‌ریزی خدمه را بصورت یک مسأله مجموعه پوششی[۲] (SCP) به شکل زیر می‌توان درنظر گرفت:

$$\min \quad Z(x) = \sum_{j=1}^{M} c_j x_{ij} \qquad (۱)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{M} a_{ij} x_{ij} \geq 1 \qquad i = 1,2,...,N \qquad (۲)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

به‌طوری‌که رابطه (۱)، مبین کمینه‌سازی هزینه شیفت‌ها است. پارامتر c_j نشان دهندهٔ هزینهٔ پرسنلی شیفت j و x_{ij} متغیر تصمیم‌گیری مدل است. مقدار x_{ij} برابر ۱ است هرگاه پرسنل i به شیفت j تخصیص یابد. رابطهٔ (۲) تضمین می‌کند که به هر شیفت حداقل یک پرسنل تخصیص داده شود. در اینجا مقدار a_{ij} برابر یک خواهد بود، هرگاه بتوان کارمند i را به شیفت jتخصیص داد. کارپ [۱] نشان داد که مساله SCP یک مساله NP-Hard است. توکلی مقدم و همکاران [۲] نیز مسأله SCP را با استفاده از الگوریتم ژنتیک[۳] حل کردند.

لاو و لیا [۳]، همچنین ساکاگوچی و همکاران [٤] از روش برنامه‌ریزی مقید، مارتلو و توس [٥] از روش ابتکاری، بالک ریشتن و ونگ [٦] از روش بهینه‌سازی شبکه، چو و همکاران [۷] از روش شاخه و کران برای حل مسأله زمان‌بندی نیروی انسانی استفاده کردند. لیورنکو و همکاران [۸] از روش جستجوی ممنوع، الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی، برای حل مسأله استفاده‌کردند. کوان [۹] مسأله را به‌صورت SCP مدل‌سازی و سپس آنرا با الگوریتم ژنتیک حل کرد. اسکارف و همکاران [۱۰] مسأله را با استفاده از روش جستجوی ممنوع حل کردند. چیراندینی [۱۱] شیفت‌ها را به سه صورت شیفت سخت، شبانه و آخر هفته و کارمندان را از نوع تمام وقت و پاره وقت در نظرگرفته و با هدف کمینه‌کردن مجموعه وزن‌دار محدودیت‌های نرم و سخت، مسأله را با استفاده از روش جستجو حل کرد. مایا و همکارانش [۱۲] از SA برای حل مسأله استفاده کردند. در تحقیقاتی که تاکنون انجام شده، سطح تجربه، نوع تخصص و مهارت کارکنان درنظر گرفته نشده‌اند و یا برخی از پرسنل به صورت تمام وقت فرض می‌شوند [۱۳ و ۱٤]. تحقیقاتی در رابطه با زمان‌بندی پرستاران به‌وسیله هانگ، سیتامپل و هراندها [۱٥ و ۱٦] انجام شده است. دازلند [۱۷] شرح داد که مسألهٔ مذکور می‌تواند به سه مرحلهٔ مستقل به شرح زیر تقسیم شود. او این مسأله را با روش جستجوی ممنوع حل کرد.

- اطمینان از این که تعداد پرستاران موجود در بیمارستان می‌توانند سطح تقاضا را بپوشاند. درغیر اینصورت یک پرستار برای پوشاندن مسأله معرفی می‌شود.
- تعیین تعداد روزها و شب‌های کاری و تعطیل برای پرستاران.
- تقسیم شیفت‌کاری روزانه به دو قسمت شیفت جلوتر و عقب‌تر با به‌کارگیری مدل شبکه جریان.

بلنتی و همکاران [۱۸] مسأله را در یک بیمارستان با درنظر گرفتن شیفت در یک روزکاری و با هدف تعیین حداقل پرستاران در هر روز و تعداد پرستاران موردنیاز در آخر هفته‌ها و روزهای تعطیل با استفاده از روش جستجوی ممنوع حل کردند. الکین [۱۹] با بسط و توسعه مدل زمان‌بندی دازلند، تعداد ۳ شیفت‌کاری با ۳۰ پرستار، و با در نظرگرفتن الگوی‌کاری هفتگی پرستاری و سرپرستار، مسأله را با الگوریتم ژنتیک حل‌کرده و نتایج بدست آمده را با روش جستجوی ممنوع که توسط دازلند انجام‌شده مقایسه‌کرده است که از نظر جواب نزدیک، ولی از نظر انعطاف پذیری دور است. کوله و وان‌درسلیوس [۲۰] با در نظرگرفتن مدت برنامه‌ریزی برای ٤ هفته، سه درجه پرستار و ٤ شیفت در هر ۲٤ ساعت، مسأله را با استفاده

از الگوریتم ژنتیک حل کردند. توکلی مقدم و همکاران [۲۱] یک مدل زمان‌بندی پرستاران با سه درجه اهمیت شیفت برای پرسنل بصورت {خیلی‌مهم، مهم و بهتر} ارائه نموده و با استفاده از ذوب شبیه‌سازی شده[۴] (SA) حل کردند.

در این مقاله با تمرکز بر زمان‌بندی نیروی انسانی در یک بیمارستان (زمان‌بندی پرستاران)، مدلی پیشنهاد شده است که هدف از آن بهینه‌سازی همزمان هزینه‌های زمان‌بندی و مطلوبیت پرسنل است. در این مدل پارامترهایی همچون ایام تعطیل، سطح تجربه، نوع تخصص، نوع اهمیت نرم و سخت شیفت‌کاری و همچنین بیکاری پرسنل مدنظر قرار گرفته است. اهمیت سخت به معنای تأکید پرستار برای خدمت در یک شیفت معین (مثلاً روز یا شب) است، در حالیکه اهمیت نرم به معنای ارجحیت پرستار جهت خدمت در یک شیفت معین می‌باشد که عدول از آن به معنای کاهش مطلوبیت شخص و مستلزم هزینه است. از مزایای دیگر مدل ارایه شده، قابلیت تعمیم سیکل زمان‌بندی و تعداد شیفت‌های کاری است. در ادبیات موضوع اکثراً سیکل زمان‌بندی بصورت هفتگی و تعداد شیفت‌ها در هر روز برابر دو شیفت روز و شب در نظر گرفته شده است.

۲- مدل‌سازی مسأله

در این بخش مدل ریاضی مسألهٔ زمان‌بندی پرستاران با تأکید بر بهینه‌سازی همزمان هزینه‌های زمان‌بندی و مطلوبیت پرسنل ارایه می‌شود. سیکل زمان‌بندی و تعداد شیفت‌ها در هر سیکل مشخص و قابل تعمیم هستند. در این مدل دو دسته محدودیت مربوط به اهمیت شیفت بصورت نرم و سخت برای پرستاران درنظر گرفته شده است که از محدودیت‌های سخت نمی‌توان عدول کرد ولی عدول از محدودیت‌های نرم برای سیستم هزینه دارد. همچنین پرستاران به لحاظ ۱- سطح تجربه و ۲- نوع تخصص رتبه‌بندی می‌شوند؛ به‌طوری‌که در هر شیفت حداقل به یک نفر از هر نوع تخصص نیاز است. همچنین در صورت نیاز، پرستاران با درجه بالاتر می‌توانند بجای پرستاران با درجه پایین‌تر تخصیص داده شوند ولی عکس آن صادق نیست.

برای تسهیل مدلسازی، ساختار مسأله را مطابق شکل (۱) در نظر می‌گیریم و به هر خانه آن یک "مکان- شیفت" می‌گوییم. به عنوان نمونه، فرض کنید سیکل زمان‌بندی بصورت هفتگی است و هر ۲۴ ساعت آن دارای دو نوع شیفت روز و شب باشد، به‌طوری‌که جمعه مبین آخرین روز سیکل زمان‌بندی است. وجود عنصر "*" در هر مکان- شیفت مبین تخصیص شخص متناظر با سطر آن مکان به شیفت روز متناظر با ستون مکان موردنظر است. به عنوان مثال، شخص ۲، در روزهای یکشنبه، سه‌شنبه و پنج‌شنبه در شیفت صبح کار می‌کند و شیفت شب برای او فاقد مطلوبیت است.

مکان / پرسنل	مکان‌های مربوط به شیفت‌های صبح سیکل زمان‌بندی						
	شنبه	۱ شنبه	۲ شنبه	۳ شنبه	۴ شنبه	۵ شنبه	جمعه
۱	*		*		*		
۲		*		*		*	
⋮							
N							

مکان / پرسنل	مکان‌های مربوط به شیفت‌های شب سیکل زمان‌بندی						
	شنبه	۱ شنبه	۲ شنبه	۳ شنبه	۴ شنبه	۵ شنبه	جمعه
۱		*		*			*
۲	شخص ۲ در شیفت شب اصلاً کار نمی‌کند (اهمیت سخت)						
⋮							
N							

شکل (۱) : تعریف ساختار مسأله برحسب تعریف مکان- شیفت.

۲-۱- فرضیات مدل

- سیکل زمان‌بندی مشخص است به‌طوری‌که انتهای سیکل با روز تعطیل تعیین می‌شود.
- تعداد شیفت‌های کاری درهر ۲۴ ساعت مشخص است.
- رتبه یا درجه هر شخص با توجه به سابقه کاری، سطح تجربه و مهارت او مشخص است.
- مقدار تقاضای هرشیفت برای پرستار با رتبه خاص مشخص است.
- تعداد انواع تخصص در قالب تیم‌های کاری مشخص است.
- در هر شیفت حداقل یک نفر از هر نوع تخصص باید تخصیص داده شود.
- درجه اهمیت هرشیفت برای هرشخص مشخص است.
- تعداد شیفت‌های کاری مجاز برای هرشخص (ظرفیت کاری شخص درهر سیکل) مشخص است.

- هزینه تخطی از محدودیت اهمیت نرم شیفت‌کاری پرسنل مشخص بوده و برای کل پرسنل یکسان است.
- هزینه تقاضای پوشش نیافته مشخص و برای تمام شیفت‌ها یکسان است.
- هزینه بیکاری مشخص و برای کل پرسنل یکسان است.

۲-۲- اهداف مدل

تابع هدف مدل ارایه شده از نوع کمینه‌سازی است و اجزاء آن عبارتند از:

- هزینهٔ عدول از محدودیت اهمیت شیفت برای پرسنل.
- هزینهٔ تقاضای پوشش‌نیافته شیفت‌ها.
- هزینهٔ مازاد پرسنل متخصص در شیفت‌ها.
- هزینهٔ بیکاری پرسنل (عدم استفاده از حداکثر ظرفیت کاری پرسنل).

۲-۳- ورودی‌های مدل

ورودی‌هایی که باید برای هر دوره جمع‌آوری شود و درطول دوره زمان‌بندی ثابت هستند عبارتند از:

N = تعداد پرسنل در دسترس.

D = تعداد درجه یا رتبه پرسنلی.

S = تعداد نوع شیفت‌ها (مانند شیفت روز، عصر، شب و غیره) در هر ۲٤ ساعت.

W = تعداد درجات اهمیت شیفت (مانند بی‌اهمیت، با اهمیت کم، مهم، خیلی مهم و غیره).

T = تعداد انواع تیم‌های تخصصی (مانند جراح عمومی، اعصاب و روان، قلب و غیره).

C = طول سیکل زمان‌بندی (به روز).

۲-٤- اندیس‌های مدل

i = شمارنده پرسنل در دسترس بطوریکه $i=1,\dots,N$.

j = شمارنده مکان- شیفت در طول سیکل زمان‌بندی؛ $j=1,\dots,S*C$ (مطابق شکل (۱)).

s = شمارنده نوع شیفت در ۲٤ ساعت؛ $s=1,\dots,S$.

d = شمارنده درجه یا رتبه پرسنلی؛ $d=1,\dots,D$.

t = شمارنده نوع تیم تخصصی؛ $t=1,\dots,T$.

w = شمارنده اهمیت شیفت؛ $w=1,\dots,W$ و مقدار $w=1$ مبین اهمیت سخت می‌باشد.

۲-۵- متغیر تصمیم‌گیری

متغیر تصمیم باید تعیین کند که هر شخص به کدام مکان- شیفت و با چه درجه‌ای تخصیص یابد.

$$X_{ijd} = \begin{cases} 1 & \text{؛ اگر شخص } i \text{ با درجه } d \text{ به مکان - شیفت } j \text{ تخصیص یابد.} \\ 0 & \text{؛ در غیر این‌صورت.} \end{cases}$$

۲-۶- پارامترهای ورودی مدل

D_{jd} = مقدار تقاضای مکان- شیفت j برای پرسنل با درجه d.

V_i = حداکثر تعداد شیفت‌های مجاز که می‌توان به شخص i تخصیص داد (ظرفیت کاری شخص i در یک سیکل).

C^*_w = هزینه تخطی از شیفت دارای اهمیت w. این هزینه به ازای کلیه پرسنل یکسان است. در حالت کلی تابعی از w است.

γ_D = هزینه تقاضای پوشش‌نیافته به ازای یک شیفت.

γ_T = هزینه مازاد پرسنل متخصص به ازای یک شیفت.

γ_I = هزینه بیکاری پرسنل به ازای هر شخص.

$$R_{id} = \begin{cases} 1 & \text{؛ شخص } i \text{ دارای درجه } d \text{ و یا کمتر است.} \\ 0 & \text{؛ در غیر این‌صورت.} \end{cases}$$

$$A_{isw} = \begin{cases} 1 & \text{؛ شیفت } s \text{ برای شخص } i \text{ دارای اهمیت } w \text{ است.} \\ 0 & \text{؛ در غیر این‌صورت.} \end{cases}$$

$$P_{js} = \begin{cases} 1 & \text{؛ مکان } j \text{ متعلق به شیفت نوع } s \text{ است.} \\ 0 & \text{؛ در غیر این‌صورت.} \end{cases}$$

$$B_{it} = \begin{cases} 1 & \text{؛ شخص } i \text{ به تیم تخصصی } t \text{ تعلق دارد.} \\ 0 & \text{؛ در غیر این‌صورت.} \end{cases}$$

۲-۷- مدل ریاضی

رابطه زیر مبین تابع هدف مدل پیشنهادی است که از چهار جزء تشکیل شده است. جزء اول مربوط به هزینهٔ تخطی از اهمیت شیفت برای پرسنل است. این جزء به ازای $w>1$ محاسبه شده است زیرا همان‌طور که قبلاً نیز گفته

شد، مقدار $w = 1$ مبین اهمیت سخت بوده و تخطی از آن اصلاً مجاز نیست. جزء دوم مربوط به هزینهٔ عدم جبران تقاضای مورد نیاز شیفت است. جزء سوم هزینهٔ مازاد پرسنل متخصص را محاسبه می‌کند.

$$\text{Min } Z = \sum_{w=2}^{W} C_w^* \times \left(\sum_{i=1}^{N} \sum_{s=1}^{S} \sum_{j=1}^{SxC} \sum_{d=1}^{D} x_{ijd} (1 - p_{js}) A_{isw} \right) +$$

$$+\gamma_D \times \sum_{j=1}^{FxC} \sum_{d=1}^{D} \left(D_{jd} - \sum_{i=1}^{N} x_{ijd} \right) +$$

$$+\gamma_T \times \sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{FxC} K_{jt} +$$

$$+\gamma_I \times \sum_{i=1}^{N} \left(V_i - \sum_{j=1}^{FxC} \sum_{d=1}^{D} X_{ijd} \right) \qquad (۳)$$

s.t.

$$(1 - R_{id}) X_{ijd} = 0 \quad \forall i, j, d \qquad (۴)$$

$$\sum_{d=1}^{D} X_{ijd} \le 1 \quad \forall i, j \qquad (۵)$$

$$\sum_{j=1}^{F \times C} \sum_{d=1}^{D} X_{ijd} \le V_i \quad \forall i \qquad (۶)$$

$$\sum_{i=1}^{N} X_{ijd} \le D_{jd} \quad \forall j, d \qquad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{d=1}^{D} X_{ijd} B_{it} \ge 1 \quad \forall j, t \qquad (۸)$$

$$K_{jt} \ge \sum_{i=1}^{N} \sum_{d=1}^{D} X_{ijd} B_{it} - 1 \quad \forall j, t \qquad (۹)$$

$$\sum_{j=1}^{F \times C} \sum_{d=1}^{D} X_{ijd} (1 - P_{js}) A_{is1} = 0 \quad \forall i, s \qquad (۱۰)$$

$$X_{ijd} = 0 \quad \text{or} \quad 1 \quad \forall i, j, d$$

مطابق تعریف K_{jt} در رابطه (۸)، هرگاه بیش از یک متخصص از هر تیم به شیفت تخصیص یابد، به ازای هر متخصص مازاد، سیستم هزینه‌ای برابر γ_T متحمل خواهد شد. جزء چهارم مبین هزینه بیکاری پرسنل نسبت به ظرفیت کاری آنها در هر سیکل است. رابطه (۴) تضمین می‌کند که هر پرستار با درجه‌ای کوچکتر یا مساوی درجه خود تخصیص یابد. رابطه (۵) تضمین می‌کند که در صورت نیاز هر شخص در هر مکان-شیفت فقط با یک درجه می‌تواند تخصیص یابد. رابطه (۶) تضمین می‌کند که تعداد شیفت‌های تخصیص داده شده به هر شخص از ظرفیت او تجاوز نکند. رابطه (۷) تضمین می‌کند تعداد پرسنل تخصیص داده شده به هر مکان-شیفت از مقدار تقاضای او تجاوز نکند. رابطه (۸) تضمین می‌کند که به هر شیفت حداقل یک متخصص از هر تیم تخصیص یابد. رابطه (۹) در ارتباط با جزء سوم هدف، تعداد مازاد متخصص در هر مکان - شیفت را تعیین می‌کند. رابطه (۱۰) مربوط به محدودیت اهمیت سخت شیفت‌ها است.

۳- رویکرد جستجوی ممنوع

فلسفهٔ روش جستجوی ممنوع (TS) هدایت و بهره‌برداری از یک مجموعه قواعد هوشمند برای حل مسایل بهینه‌سازی است. این روش بر مبنای انتخاب مفاهیمی از حوزه‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی بنا شده است. روش جستجوی ممنوع یک روش فوق ابتکاری است که روش جستجوی ابتکاری موضعی را به کاوش جواب‌های نزدیک به بهینه هدایت می‌کند. برای حل یک مسالهٔ بهینه‌سازی به روش جستجوی ممنوع به شش عنصر اساسی بصورت زیر نیاز است:

۱) **نحوه تولید جواب اولیه**: جواب اولیه، جوابی است قابل قبول یا شدنی که بطور تصادفی و یا با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری تولید می‌شود. نحوه تولید جواب اولیه برای مسأله مورد بررسی به تفصیل در قسمت ۳-۳ توضیح داده شده است.

۲) **نحوهٔ تولید جواب همسایه**: هر حل $x \in X$ متعلق به فضای شدنی مدل، دارای تعداد زیادی همسایگی است، به‌طوری‌که هریک خود می توانند حاوی تعداد زیادی جواب شدنی باشند. برای نزدیک شدن به جواب بهینه، بایستی در هر تکرار جواب‌های مختلف را از همسایگی‌های مختلف جستجو کنیم و در صورت لزوم دامنه همسایگی را افزایش دهیم. برای این کار لازم است بتوان جواب جاری را به جواب شدنی دیگری تبدیل کرد. به این کار اصطلاحاً حرکت[5] و به جواب جدید نیز *جواب همسایه* گفته می‌شود. نحوهٔ تولید جواب همسایه برای مسأله مورد بررسی به تفصیل در قسمت ۳-٤ توضیح داده شده است.

۳) **تشکیل لیست ممنوع**[6]: یعنی ثبت حرکت‌های استفاده شده است. در روش جستجوی ممنوع، محدودیت‌هایی را به

نام محدودیت‌های ممنوع که مانع بازگشت و انتخاب حرکت‌های تکراری می‌شوند به‌وجود می‌آورد. از مجموعه این محدودیت‌های ممنوع، *لیست ممنوع* تشکیل می‌شود.

۴) **تعیین طول لیست ممنوع**: طول لیست ممنوع بیان‌کنندهٔ حداکثر تعداد تکرارهای ممنوع در یک مرحله است و می‌تواند عددی ثابت و یا تابعی از پارامترهای مسأله باشد که در طول الگوریتم نیز می‌تواند ثابت یا متغیر باشد. به عبارت دیگر هرگاه L بیانگر طول لیست ممنوع باشد و حرکت m هم‌اکنون در لیست ممنوع قرار گرفته باشد، آنگاه تا L حرکت دیگر نمی‌توان حرکت m را انتخاب کرد.

۵) **سطح آرمانی**[۷]: عدم انتخاب حرکت‌های موجود در لیست ممنوع ممکن است باعث حذف تعدادی از جواب‌های خوب شود. به این دلیل برای مساله معیاری با عنوان *سطح آرمانی* تعریف می‌شود که تحت شرایط آن برخی از حرکت‌ها از لیست ممنوع خارج شوند.

۶) **معیار توقف**[۸]: الگوریتم می‌تواند با استفاده از هر معیار منطقی مناسب پایان یابد؛ مانند رسیدن تکرارها به حد تعیین شده، عدم بهبود تابع هدف و یا حداکثر زمان اجرای الگوریتم.

۳-۱- طراحی الگوریتم جستجوی ممنوع

اساس الگوریتم جستجوی ممنوع به‌کاررفته برای حل مسألهٔ، برمبنای الگوریتم به‌کار گرفته شده در ادبیات موضوع است. گام‌های الگوریتم در شکل (۳) نشان داده شده است. توضیح پارامترهای موجود در این شکل به شرح زیر است:

n = شمارندهٔ تعداد جواب های پذیرفته شده،

N = حداکثرتعداد جواب های پذیرفته شده (معیارتوقف)،

L = طول لیست ممنوع،

$Q(m)$ = تعداد دفعاتی که حرکت m در پشتهٔ لیست ممنوع ذخیره شده است. اگر $Q(m) = 1$ آنگاه می‌توان از حرکت m مجدداً استفاده کرد. دراولین تکرار قرار دهید $Q(m)=0$.

A = سطح آرمانی. اگر تعداد حرکت‌هایی که به‌طور همزمان درلیست ممنوع قرار دارند، از این مقدار تجاوز کند، کل محتویات لیست حذف می‌شود.

$U(x)$ = مقدار تابع هدف به ازای حل x.

۳-۲- استراژی نمایش جواب

بدیهی است مبنای هر رویکرد فرا ابتکاری، نحوهٔ نمایش جواب است. این موضوع به‌شدت به ماهیت مسألهٔ مورد بررسی یعنی تعداد وبعد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مدل وابسته است. در بسیاری از تحقیقات مشابه، جهت نمایش جواب شدنی از ساختار خطی استفاده شده است. اگرچه استفاده از ساختار خطی در ادبیات موضوع بسیار متداول است، ولی با افزایش تعداد محدودیت‌های مدل، بعد متغیرهای تصمیم‌گیری و همچنین اندازه مسأله این ساختار کارایی خود را از دست می‌دهد؛ چرا که ارضای قیود و تطبیق متغیرهای تصمیم با ساختار ارایه شده، کد نویسی را بسیار پیچیده و ناکارا خواهد ساخت. برای کاهش این پیچیدگی می‌توان به‌جای ساختار تک بعدی (خطی) از ساختار دو بعدی (ماتریسی) برای نمایش جواب استفاده کرد. این امر درک مسأله را افزایش می‌دهد و موجب کارایی در کد نویسی خواهد شد.

در این مقاله، از ساختار ماتریسی مشابه شکل (۱) برای نمایش جواب استفاده شده است. هر سطر ماتریس بیانگر زمان‌بندی یک پرسنل خاص در یک دوره کامل (در اینجا دو هفته‌ای) است و هر ستون آن بیانگر تخصیص افراد به یک شیفت کاری خاص (در اینجا روز یا شب) می‌باشد. با توجه به ماهیت متغیر تصمیم ماتریس مذکور یک ماتریس صفر و یک است. مقدار یک در سطر i و ستون j بیانگر تخصیص پرسنل i به شیفت کاری j بوده و صفر بیانگر عدم تخصیص است. لذا انتظار داریم حل شدنی دارای $S\times C$ =۲×۷=۱٤ ستون و N (تعداد پرسنل) سطر باشد. ستون‌های ۱ تا ۷ مربوط به شیفت کاری روزانه و ستون‌های ۸ تا ۱٤ مربوط به شیفت کاری شبانه است. ساختار ماتریسی جواب مشابه شکل (۲) است.

$$\begin{matrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,14} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,14} \\ \vdots & & & \vdots \\ X_{N,1} & X_{N,2} & \dots & X_{N,14} \end{matrix}$$

شکل (۲) : ساختار ماتریسی جواب.

بطوریکه X_{ij} برابر مقدار یک خواهد بود هرگاه فرد iام به شیفت jام با درجه‌ای حداکثر برابر درجه خود تخصیص یابد، در غیر این‌صورت برابر صفر خواهد بود. جهت بررسی صحت شدنی بودن یک جواب، با توجه به محدودیت‌های مدل ارائه شده، روابط (۱۱) و (۱۲) بایستی بین عناصر ساختار شکل (۲) برقرار باشند.

$$\sum_{i=1}^{N} X_{ij} \le \sum_{d=1}^{D} D_{jd} \quad \forall j = 1,..,F\times C \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{j=1}^{14} X_{ij} \le V_i \qquad \forall i = 1,...,P \qquad (۱۲)$$

۳-۳- راهبرد به‌دست آوردن حل اولیه

اولین گام در هر رویکرد فرا ابتکاری تولید حل اولیه است. منظور ازحل اولیه جوابی است که کلیه محدودیت‌ها را ارضا می‌کند و به ازای آن مقداری برای تابع هدف وجود داشته باشد. درمسألهٔ مورد بررسی منظور از حل شدنی، یک ماتریس باینری مانند ماتریس شکل (۲) است، به‌طوری‌که عناصر آن محدودیت‌های مدل و همچنین روابط (۱۱) و (۱۲) را ارضا کند. برای بدست آوردن چنین حلی عموماً از سیستم‌های خبره استفاده می‌شود. در این مقاله از الگوریتمی بر مبنای سیستم خبره استفاده شده است که گام‌های آن بصورت زیر است:

۱- به هر شیفت یک پرسنل با تخصص $t=1,...,T$ به‌صورت تصادفی تخصیص دهید به‌طوری‌که رابطه (۱۰) نقض نشود. با این کار رابطه (۸) ارضا می‌شود.

۲- تا زمانی که تقاضا برای شیفت‌ها وجود دارد (رابطه (۷) نقض نشده) پرسنل را با رعایت روابط (٦) و (۱۰) به شیفت‌ها تخصیص دهید. اگر پرسنل با درجه d یافت نشد از پرسنل با درجه پایین‌تر استفاده کنید.

۳-٤- راهبرد به‌دست آوردن حل همسایه

برای پیمایش درفضای شدنی مسأله مورد بررسی، لازم است بعد از تولید حل اولیه آن را بگونه‌ای تغییر داد تا حل شدنی جدیدی حاصل گردد که به آن حل همسایه می‌گویند. با تغییرات متناوب حل بدست آمده در هر تکرار، ابزار پیمایش فضای شدنی مهیا می‌گردد. برای به‌دست آوردن حل همسایه از یک حل شدنی ، رویه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

شیفتی را به تصادف انتخاب کنید که در آن تعداد پرسنل با یک نوع تخصص خاص مانند t_0 بیش از یکی باشد. در این‌صورت پرسنل متخصص مازاد را حذف یا پرسنل متخصص مازاد را با رعایت روابط (۷) و (۱۰) به شیفت دیگری منتقل کنید.

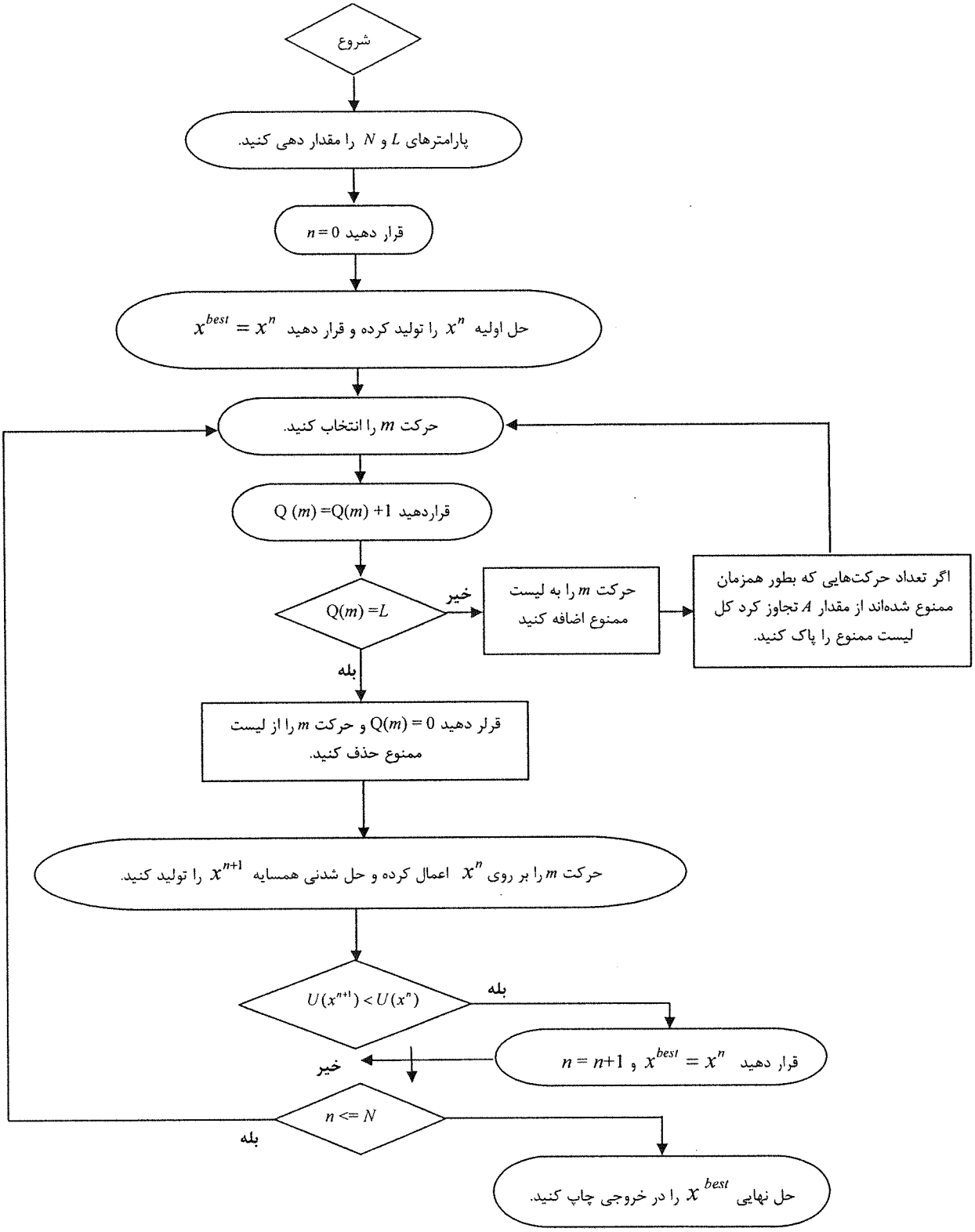
٤- نتایج محاسبات

برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، حل حاصل از TS با حل بهینه در قالب ده مسأله نمونه مورد مقایسه قرار می‌گیرد. مسایل نمونه با نرم‌افزار توسعه داده شده، در بازه مشخصی بصورت تصادفی و برطبق توزیع یکنواخت تولید شده‌اند. صحت مدل ارائه شده توسط نرم افزار Lingo بررسی شده و حل بهینه بدست آمده است. نتایج حاصل از مقایسه حل بهینه و حل TS برای ابعاد بزرگ برحسب زمان و مقدار هدف در جدول (۱) نشان داده شده است. همانطورکه در جدول (۱) نشان داده شده است، زمان حل بهینه برای مسایل با بیش از ۶۰ پرسنل بیش از ۹ ساعت به‌طول می‌انجامد. درحالیکه زمان حل TS از یک دقیقه کمتر است. میانگین اختلاف بین حل بهینه و TS برابر ۰/۶۲ درصد است که با توجه زمان حل، نتیجه بسیار مطلوبی است.

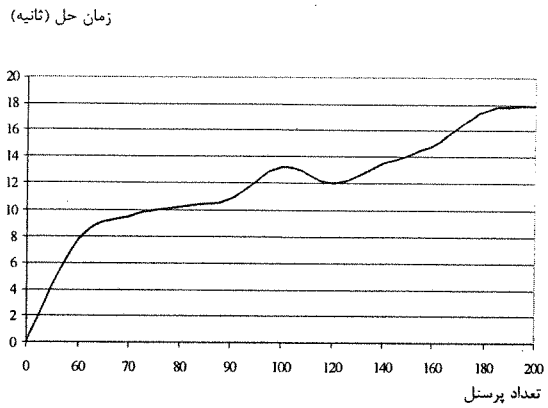
شکل (٤) رابطه بین تعداد پرسنل و زمان حل را ارایه می‌کند. رابطه بین تعداد پرسنل و مقدار هدف در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (٤) نشان داده شده است، رابطه بین ابعاد مسأله و زمان حل TS تقریباً بصورت خطی است. این موضوع قدرت پیمایش رویکرد TS در فضای شدنی مسأله را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای زمان‌بندی نیروی انسانی مدلی ارائه شد که در مقایسه با مدل‌هایی که تا کنون ارائه شده از ویژگی‌هایی مانند حق انتخاب شیفت، پارامتریک بودن درجه اهمیت شیفت و بیکاری برای پرسنل برخوردار می‌باشد. با حل چند مسأله چند مسأله نمونه، قابلیت الگوریتم پیشنهادی ارزیابی و نتایج جدول (۱) نشان دهنده توانمندی الگوریتم مزبور است. قابل ذکر است که با توجه به انعطاف‌پذیری مدل پیشنهادی، تطبیق مدل با شرایط واقعی امکان‌پذیر است.



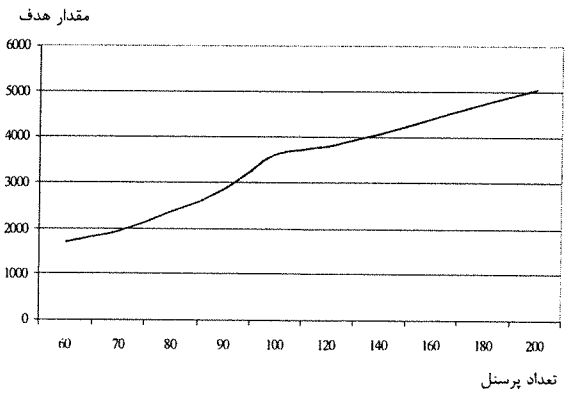
شکل (۳) : الگوریتم پیشنهادی جستجوی ممنوع.



شکل (۴) : رابطه تعداد پرسنل و زمان حل TS.

جدول (۱) : مقایسه حل بدست آمده از روش پیشنهادی TS با حل بهینه.

تعداد پرسنل	TS		حل بهینه		اختلاف (درصد)
	مقدار هدف	زمان حل (ثانیه)	مقدار هدف	زمان حل (ثانیه)	
۶۰	۱۷۲۲	۷/۸	۱۱۷۲	۳۲۵۰۳	۰/۴۷
۷۰	۱۹۴۴	۹/۵۰	۱۳۱۴	≥ ۳۲۵۰۳	۰/۴۸
۸۰	۲۳۶۱	۱۰/۲۴	۱۵۶۴	≥ ۳۲۵۰۳	۰/۵۱
۹۰	۲۸۶۲	۱۰/۷۸	۱۸۱۲	≥ ۳۲۵۰۳	۰/۵۸
۱۰۰	۳۶۲۵	۱۳/۲۹	۲۱۹۷	≥ ۳۲۵۰۳	۰/۶۵
۱۲۰	۳۷۸۰	۱۲/۰۱	۲۲۵۰	≥ ۳۲۵۰۳	۰/۶۸
۱۴۰	۴۰۵۶	۱۳/۵۱	۲۴۰۰	≥ ۳۲۵۰۳	۰/۶۹
۱۶۰	۴۴۰۱	۱۴/۹۱	۲۵۷۴	≥ ۳۲۵۰۳	۰/۷۱
۱۸۰	۴۷۴۸	۱۷/۵۰	۲۷۴۵	≥ ۳۲۵۰۳	۰/۷۳
۲۰۰	۵۰۳۸	۱۷/۹۱۴	۲۸۶۳	≥ ۳۲۵۰۳	۰/۷۶



شکل (۵) : رابطه تعداد پرسنل و مقدار تابع هدف.

۵- مراجع

[۱] Karp, R.M.; *Reducibility among combinatorial problems, in complexity of Computer Computations*, Plenum Press, New York, 1972.

[۲] Tavakkoli-Moghaddam, R.; Rabbani, M.; Ali-Hosseini, A.R.; "*An efficient heuristic method for set covering problem*", Int. Journal of Engineering Science, Iran University Science and Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 95-106, 2003 (in Farsi).

[۳] Lau, S.C.; Lua, S.C.; *Efficient multi-skill crew rostering via constrained*, Proc. 3rd ILOG International User Meeting, Paris, 1997.

[۴] Sakaguchi, T.; Noze, N.; "*Crew roster scheduling based on constraint logic*", Technical Report, No.96-04, Railway Technical and Research Institute, 1996.

[۵] Martello, S.; Toth, P.; "*A heuristic approach to the bus driver scheduling problem*", Eur. J. Ops. Res, Vol. 24, No. 1, pp. 106-117, (1986).

[۶] Balakrishnan, N.; Wong, R.T.; "*A network model for rotating workforce scheduling problem*", Networks, Vol.20, pp. 25-32, 1990.

[۷] Khoong, C.M.; Lau, H.C. and Chew, L.W., "*Automated manpower rostering: Techniques and experience*", Int. Trans. Opl. Res., Vol. 1, No. 3, pp. 353- 361, 1994.

[۸] Lourenco, G.; Paixao, H.; Portugal C.; "*Meta heuristics for the bus driver scheduling*", Economic Working Paper Series No. 304, Universitat Pompeu Fabra, Spain, 1997.

[۹] Kwan, A.S.K.; Kwan, R.S.K.; Wren, A.; "*Driver scheduling using genetic algorithms with embedded combinatorial transit*", Proceedings of the 7th International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport, pp. 81-102, 1997.

[۱۰] Schaerf, A.; "*Combining local search and look-ahead for scheduling and constraint satisfaction problems*", in Proc. of IJCAI-97, pp. 1254-1259, 1997.

[۱۱] Chirandini, M.; Schaerf, A.; "*Solving employee timetabling problems with flexible workload using tabu search*", PATAT '00 Proceedings of the 3rd Int. Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling pp. 298-302, 2002.

[۱۲] Kragelund, L.; Mayoh, B.; "Nurse scheduling generalized", http://daimi.au.dk/~brian, 1999.

[۱۳] Pinedo, M.; *Scheduling: theory, algorithms and systems*, 2nd Edition, Prentice Hall, 2001.

[۱۴] Sule, D.R., *Industrial scheduling*, PWS Publishing Co., 1997.

[۱۵] Hung, R.; "*Hospital nurse scheduling*", Journal of Nursing Administration, Vol. 1, pp 21-23, 1995.

[۱۶] Sitompul, D.; Randhawa, S.; "*Nurse scheduling models; A state-of the -art review*", Journal of the Society of Health Systems, Vol. 2, pp. 62-72, 1990.

[۱۷] Dowsland, K., "*Nurse scheduling with tabu search and strategic oscillation*", European Journal of Operational Research, Vol. 106, pp. 393-407, 1998.

[۱۸] Bellanti, F.; Carello, G.; Della Croce, F.; Tadei, R.; "*Tabu search approach to a nurse rostering problem*", 4th WATT Workshop, 2002.

[۱۹] Aickelin, D.; "*Exploiting problem structure in a genetic algorithm approach to nurse rostering problem*", Journal of Scheduling, Vol. 3, pp. 139-

153, 2000.
[۲۰] Koole, G.; van der Sluis, H.J.; "*Optimal shift scheduling with a global service level constraint*", IIE Transactions, Vol. 35, pp. 1049-1055, 2002.
[۲۱] Tavakkoli-Mogahddam, R., M. Rabbani, M.; Tagahvi, S.M.; "*A mathematical model for manpower scheduling solved by simulated annealing*", International Journal of Engineering Science", Iran University Science and Technology, Article in Press, 2005 (in Farsi).

زیر نویس‌ها

[۱] Tabu Search

[۲] Set covering Problem

[۳] Genetic Algorithm

[۴] Simulated Annealing

[۵] Move

[۶] Tabu List

[۷] Aspiration Level

[۸] Stopping Criteria