

## Paper Type: Original Article



# Solving the Multi-Objective Power Plant Personnel Scheduling Problem Using Sparse Search Method

Parisa Shahnazari Shahrezaei<sup>1,\*</sup> , Hamed Kazemipour<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran;  
parisa\_shahnazari@yahoo.com; h.kazemipour@iauctb.ac.ir.

## Citation:



Shahnazari Shahrezaei, P., & Kazemipour, H. (2024). Solving the multi-objective power plant personnel scheduling problem using sparse search method. *Management sciences and decision analysis*, 2(1), 48-74.

Received: 18/08/2023

Reviewed: 22/09/2023

Revised: 14/11/2023

Accepted: 10/03/2024

## Abstract

**Purpose:** Workforce planning and scheduling is an approach to arranging elements in a temporal or spatial pattern to achieve or approach various objectives, such that the constraints associated with these elements are entirely or almost satisfied. The first step of this process is to determine the number of employees required with specific skills to meet the demand at different times. In addition, all work rules and agreements must be considered during the process.

**Methodology:** For this purpose, in this paper, using mathematical programming, the specifications, conditions, regulations, and work agreements of the Shahid Solimi Neka Power Plant, as one of the country's strategic power plants and one of the most important national assets, are included in the problem. The workforce scheduling problem in this power plant involves various and contradictory constraints. Therefore, this research investigates the workforce scheduling problem using a multi-objective model. The proposed mathematical model has three objective functions: minimizing the number of workers with high-skill levels assigned to low-skill-level jobs, minimizing the wages paid to workers, and optimizing the use of workers. Due to the structure of the problem and its complexity, the problem is classified as a non-polynomial complex problem. Two meta-heuristic algorithms, sparse search and genetic with non-dominated sorting, have been generalized to solve the multi-objective model. Seven sample problems were solved using the generalized algorithms to evaluate the performance of the proposed algorithms.

**Findings:** In summary, solving problems of different sizes using performance index graphs and comparing the two algorithms show that the sparse search algorithm is better in two qualitative indices of quality and dispersion and that the genetic algorithm with non-dominated sorting performs better in the quantitative index of space uniformity.

**Originality/Value:** Implementing this model in power plants can improve operational efficiency, human resource productivity, and service quality.

**Keywords:** Manpower scheduling, Planning, Multi-objective model.



Corresponding Author: parisa\_shahnazari@yahoo.com

<https://doi.org/10.22105/msda.v2i1.58>

Licensee. **Management Sciences and Decision Analysis**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





## حل مساله زمان بندی پرسنل نیروگاهی چندهدفه با استفاده از روش جست و جوی پراکنده

پریسا شاه نظری شاه رضائی<sup>۱</sup>، حامد کاظمی پور<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

### چکیده

هدف: برنامه ریزی و زمان بندی نیروی انسانی یک رویکرد ترتیب دهی عناصر در یک الگوی زمانی یا مکانی به منظور رسیدن یا نزدیک شدن به اهداف گوناگونی است، به طوری که محدودیت های مرتبط با این عناصر کاملاً یا تقریباً برآورده شوند. درحقیقت، اولین گام از این فرآیند، تعیین تعداد کارکنان مورد نیاز با مهارت های خاص به منظور تامین تقاضا در زمان های مختلف می باشد. علاوه بر این، کلیه قوانین و توافقات کاری باید در طی فرآیند در نظر گرفته شوند.

روش شناسی پژوهش: بدین منظور در این مقاله، با استفاده از برنامه ریزی ریاضی مشخصات، شرایط، قوانین و توافقات کاری در نیروگاه شهید سلیمی نکا به عنوان یکی از نیروگاه های استراتژیک کشور و از مهم ترین سرمایه های ملی کشور در مساله گنجانده شده است. مساله زمان بندی نیروی انسانی در این نیروگاه شامل محدودیت های مختلف و درعین حال متناقض است. از این رو، تمرکز این تحقیق بر بررسی مساله زمان بندی نیروی انسانی بر پایه یک مدل چندهدفه می باشد. مدل ریاضی پیشنهادی سه تابع هدف دارد. کمینه نمودن تعداد نیروهایی با سطوح مهارتی بالا به کارهایی با سطح مهارت پایین، کمینه سازی دستمزد پرداختی به کارکنان و بهترین استفاده از نیروها. به دلیل ساختار حاکم بر مساله و پیچیدگی آن، مساله در دسته مسایل غیر چندجمله ای سخت قرار می گیرد دو الگوریتم فرا ابتکاری جست و جوی پراکنده<sup>۱</sup> و ژنتیک با مرتب سازی غیر مغلوب<sup>۲</sup> برای حل مدل چندهدفه تعمیم داده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم های پیشنهادی، هفت مساله نمونه با استفاده از الگوریتم های تعمیم یافته حل شده است.

یافته ها: در مجموع، نتایج به دست آمده از حل مسایل در اندازه های مختلف با استفاده نمودارهای شاخص های عملکردی و مقایسه بین دو الگوریتم، نشان از بهتر بودن الگوریتم جست و جوی پراکنده در دو شاخص کیفی کیفیت و پراکندگی و بهتر عمل کردن الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی غیر مغلوب در شاخص کمی یکنواختی فضا می باشد.

اصالت / ارزش افزوده علمی: نتایج حاصل از پیاده سازی این مدل در نیروگاه ها می تواند منجر به بهبود کارایی عملیاتی، افزایش بهره وری نیروی انسانی و ارتقای کیفیت خدمات شود.

کلیدواژه ها: زمان بندی نیروی انسانی، برنامه ریزی، مدل چندهدفه.

## ۱- ادبیات موضوع

برنامه ریزی نیروی انسانی از اهمیت به سزایی برخوردار است، چرا که کلیه برنامه های کوتاه مدت و بلندمدت سازمان ها توسط افراد و نیروهای انسانی تشکیل دهنده آن پیاده سازی و اجرا می گردند، اگر سازمان ها فاقد یک برنامه ریزی صحیح از نیروی انسانی باشند، ممکن است برنامه های سازمان به شکست منتهی شوند. برنامه ریزی نیروی انسانی مستلزم تجزیه و تحلیل مستمر نیازهای منابع انسانی در پرتو اهداف استراتژیک سازمان، نیازهای کارکنان، فرهنگ و فضای مطلوب سازمانی و همچنین تحلیل بازار نیروی کار و محیط های قانونی است. برنامه ریزی نیروی انسانی، عرضه و تقاضای

<sup>۱</sup> Scatter search

<sup>۲</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)

آتی سازمان برای کارکنان را به طور منظم پیش بینی می کند. یکی از اولین کار منتشر شده در حوزه زمان بندی نیروی انسانی توسط دانتزیگ [1] انجام شد.

وی با استفاده از تاخیرهای ترافیکی و تنوری احتمال تعداد کیوسک های عوارض و به تبع آن تعداد اپراتورهای مورد نیاز به منظور فراهم نمودن یک سطح معین از سرویس در اوقات مختلف از یک روز (متوسط زمان انتظار) پرداخت. این تحقیقات و روش های برنامه ریزی و زمان بندی نیروی انسانی در حوزه های مختلفی از قبیل سیستم های حمل و نقل، سیستم های درمانی و مراقبتی، خدمات اورژانسی، مراکز مخابراتی و بسیاری از سازمان های خدماتی مورد استفاده قرار گرفته است. زمان بندی پرسنل نیروگاهی که دارای سطوح مختلف تخصص می باشند، یکی از مسایل کاربردی و پیچیده در حوزه زمان بندی نیروی انسانی است که با وجود اهمیت بالای آن در سطوح عملیاتی و مدیریتی تاکنون کم تر مورد توجه محققین قرار گرفته است. به طور کل منابع انسانی یکی از مهم ترین منابع سازمان های تولیدی و خدماتی به خصوص صنایع نیرو و محور همچون صنعت نساجی می باشد [2].

برنامه ریزی و زمان بندی نیروی انسانی یک رویکرد ترتیب دهی عناصر در یک الگوی زمانی یا مکانی به منظور رسیدن یا نزدیک شدن به اهداف گوناگونی است، به طوری که محدودیت های مرتبط با این عناصر کاملاً یا تقریباً برآورده شوند [3]. دسته بندی های مختلفی برای مسایل زمان بندی نیروی انسانی در ادبیات موضوع مساله پیشنهاد شده است. برای مثال، تیین و کامی یاما [4] مساله عمومی زمان بندی نیروی انسانی را به پنج زیر مساله شامل نیاز به نیروی کار موقت، نیاز به کل نیروی کار، تفریح و مرخصی، زمان بندی های کار و زمان بندی های شیفت تقسیم نمودند. بیکر [5] نیز مساله زمان بندی نیروی انسانی را به سه نوع: زمان بندی شیفت (زمان بندی اوقات روز)، زمان بندی روزهای تعطیل (زمان بندی ایام هفته) و زمان بندی تور که ترکیبی از دو نوع اول است، تقسیم نمود. دی کاسماکر و همکاران [6] نیز به دسته بندی مسایل مختلف زمان بندی نیروی انسانی در دنیای واقعی پرداختند. این نوع مسایل، منجر به ارایه مدل های مختلف در ادبیات موضوع شده اند:

۱. برنامه ریزی بر اساس عملکرد بر اساس تعداد کارکنان مورد نیاز [7] و [8].

۲. برنامه ریزی بر اساس تغییرات تقاضای متغیر [9-11].

۳. برنامه ریزی بر اساس پویایی وظایف شامل خدمات حمل و نقل [12].

۴. برنامه ریزی بر اساس پروژه [13].

برای طبقه بندی پژوهش های انجام شده در حوزه زمان بندی نیروی انسانی، پژوهش های با درجه تشابه بالا در دسته های کاربردی مربوطه مانند مراکز تلفن، مراکز حمل و نقل، امنیتی، بهداشت و سازمان های تولیدی دسته بندی و در هر بخش به صورت مجزا مرور می شوند.

### ۱-۱- مراکز تلفن

برنامه ریزی و زمان بندی نیروی انسانی در مراکز تلفنی، برنامه ریزی و زمان بندی خدمه نامیده می شود. برنامه ریزی کارکنان در مراکز تلفن به ویژگی جغرافیائی بستگی ندارد. این موضوع، برنامه ریزی و زمان بندی را کمی ساده تر می کند. ماهیت و تعداد دقیق کارهایی که باید انجام شوند از پیش مشخص نیستند. تنها مورد مشخص این است که یک الگوی نیاز به نیروی انسانی برای کل افق برنامه ریزی وجود دارد. این ویژگی، برنامه ریزی و زمان بندی در مراکز تلفن را پیچیده می کند. لازم است به این نکته توجه شود که نیاز به نیروی انسانی در کاربردهای مراکز تلفن روز به روز و هفته به هفته تغییر می کند. شرکت AT&T با اجرای پژوهش بریگاندی و همکاران [14] هزینه هایش را کاهش داد و جایزه ادلمن<sup>۱</sup> را در سال ۱۹۹۳ برنده شد. یک مطالعه دیگر بر روی مرکز درخواست صورت حساب تلفن در هنگ کنگ توسط پارکان و همکاران [15] صورت گرفت.

بویا و همکاران [16] برای حل مساله مورد مطالعه در مراکز تلفن، سه مرحله پیش بینی، الزامات نیروی انسانی و زمان بندی ادغامی را بررسی کردند و رویکردهای برنامه ریزی ریاضی و ابتکاری برای زمان بندی شیفت ارایه کردند. هندرسن و همکاران [17] به تعمیم برخی از رویکردهای اخیر در ادغام نمودن شبیه سازی تقاضا، برنامه ریزی نیروی انسانی مورد نیاز و برنامه ریزی و زمان بندی شیفت پرداختند. ارتگرال و باموکابل [18] یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح برای زمان بندی کارکنان در یک مرکز تلفن دوزبانه (عربی و انگلیسی) ارایه نمودند. روش پیشنهادی شامل دو بخش است

<sup>۱</sup> Edelman

که ابتدا نیازهای کارکنان را در یک ساعت از یک هفته به دست می‌آورد که از تحلیل اطلاعات، صف تقریبی و مدل شبیه‌سازی استفاده می‌گردد. آورامیدیس و همکاران [19] مساله زمان‌بندی کارکنان در یک مرکز تلفن چندمهارته را در نظر گرفته و یک رویکرد حل که شبیه‌سازی با برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و تولید برش را ترکیب می‌کند، پیشنهاد نمودند.

## ۱-۲- سیستم‌های حمل‌ونقل

پژوهش‌های انجام‌شده در ارتباط با زمان‌بندی نیروی انسانی سیستم‌های حمل‌ونقل دارای ویژگی‌های مشترک و متفاوتی است که برای مجزا و طبقه‌بندی کردن این پژوهش‌ها از آن استفاده می‌شود. ویژگی‌های مشترک این کاربردها عبارت‌اند از:

۱. ویژگی‌های زمانی و مکانی، یعنی هر کار توسط زمان و مکان شروع و زمان و مکان پایان مشخص می‌شود.

۲. کلیه کارهایی که باید توسط کارکنان انجام شوند از یک جدول زمانی معلوم تعیین می‌شوند.

بزرگ‌ترین کاربرد برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نیروی انسانی در حوزه خطوط هوایی است، زیرا تاثیر زمان‌بندی و برنامه‌ریزی مناسب کارکنان از نظر اقتصادی غیرقابل چشم‌پوشی است. رایج‌ترین رویکرد برای حل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خدمه خطوط هوایی، تکنیک معروف تجزیه است. آرابیر و همکاران [20]، اولین پژوهش را در این حوزه انجام دادند.

آندرسن و همکاران [21] تفاوت‌های عمده‌ای را برحسب طبقات خدمه، انواع هواپیما، ساختارهای شبکه، قوانین و مقررات، نظم و قاعده جدول‌های زمانی پرواز و ساختارهای هزینه‌ای مطرح کردند. مرسی‌یر و سومیس [22] یک مدل یکپارچه برای مسیریابی هواپیما، زمان‌بندی خدمه و زمان‌سنجی مجدد پرواز ارائه نموده و ترکیبی از تکنیک تجزیه، تولید ستونی و یک رویه تولید محدودیت پویا را برای حل مساله پیشنهاد کردند. ویدی و همکاران [23] نیز از یک رویکرد تکراری برای حل مساله ادغام‌شده مسیریابی هواپیما و زمان‌بندی خدمه استفاده نمودند. آن‌ها نشان دادند که با زوج کردن دو مساله به‌صورت ابتکارانه، به‌سرعت یک مجموعه حل باکیفیت مناسب تولید می‌شود. دوک و همکاران [24] نیز، کاهش تاخیرهایی که از تغییر خدمه هواپیما ناشی می‌شود را بررسی کردند. بر اساس یک مدل قطعی انتشار تاخیر، یک شاخص برای ثبات برنامه‌ریزی خدمه خطوط هوایی و هواپیما پیشنهاد کردند.

بهینه‌سازی عملیاتی سفرهای دوسره خدمه توسط استاکجویچ و همکاران [25] مورد مطالعه قرار گرفت. یک مساله عملیاتی عبارت است از ساخت برنامه‌هایی برای خلبانان و خدمه پرواز ذخیره که برای انجام پروازهایی که خدمه تخصیص‌یافته‌اش قادر به پرواز نیستند و یا پروازهایی که به آن‌ها هیچ خدمه‌ای تخصیص داده نشده است، گوش به‌زنگ و آماده می‌باشند. به‌منظور بهره‌برداری بهتر، در تولید سفرهای دوسره سعی می‌شود که دوره‌های استراحت طولانی حذف‌شده و هزینه و جایگزین‌سازی خدمه حداقل گردد. به‌طورکلی، کسری و یا مازاد خدمه ممکن است تا حدی سودمند باشد، اما کسری و مازاد خدمه به میزان زیاد با افزودن جریمه‌هایی در اهداف مساله مرتفع می‌گردد [26].

سان و همکاران [27] به زمان‌بندی نیروی انسانی برای انجام عملیات بارگذاری بسته‌های غذایی در هنگام پرواز در سفرهای متعدد پرداخته‌اند. یک تیم بارگذاری با شیفت‌های قابل تغییر برای تحویل و بارگذاری بسته‌های غذایی موردنیاز است. گائو و همکاران [28] برای حل مساله زمان‌بندی خدمه و فرآیند تخصیص در خطوط هوایی از یک روش ابتکاری بر اساس استراتژی‌های انتخاب چندوزنی استفاده نمودند که در آن اعضای خدمه به‌طور غیریکنواخت بین پایگاه‌ها به ماموریت فرستاده می‌شوند. زقال و مینوکس [29] یک رویکرد جدید برای مساله تخصیص خدمه خطوط هوایی که در مسیرهای کوتاه و متوسط پرواز می‌کنند، ارائه نمودند. مسایل زمان‌بندی خدمه در سطح برنامه‌ریزی معمولاً در دو گام حل می‌شوند: (۱) ایجاد الگوهای کاری و (۲) تخصیص این الگوها به خدمه انفرادی. اولین گام با استفاده از یک مدل مجموعه پوششی و دومین گام با استفاده از مدل تقسیم‌بندی مجموعه<sup>۱</sup> حل می‌شود.

<sup>1</sup> Set-partitioning model

مدارد و ساهنی [30] هر دو مدل را ادغام نموده و شرح دادند که چگونه ساخت سفرهای دوسره و تخصیص سفرهای دوسره در یک گام انجام می شود و از روش های جست و جوی درختی ساده و الگوریتم های تولید ستونی و کوتاه ترین مسیر برای حل مساله مورد نظر بهره گرفتند. سوآی و تگهم [31] مساله سفرهای دوسره خدمه خطوط هوایی و زمان بندی خدمه خطوط هوایی را ادغام نموده و از یک رویکرد مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل آن استفاده نمودند. هو و لیونگ [32] مساله زمان بندی نیروی انسانی در تامین غذا و سایر ملزومات برای خطوط هوایی را رابطه بندی نمودند.

در سیستم های حمل و نقل عمومی، برنامه ریزی و زمان بندی خدمه قابل ملاحظه ای را نیز دریافت نموده اند. همانند برنامه ریزی و زمان بندی خدمه خطوط هوایی، برنامه ها و زمان بندی های اتوبوس ها نیز از جدول های زمانی معین برای اتوبوس ها ساخته می شوند. پائولو و همکاران [33] مدلی در زمینه زمان بندی هم زمان پرسنل و وسایل نقلیه در بخش مدیریت زباله های شهری ارائه کرده اند. مدیریت زباله های شهری به یک مشکل پیچیده برای مدیرانی که در این قسمت کار می کنند تبدیل شده است. پترز و همکاران [34] روشی جهت تولید زمان بندی های کم هزینه برای رانندگان اتوبوس در یک سیستم حمل و نقل درون شهری در هند تعمیم داده و عوامل موثر بر بهره وری رانندگان و بهره برداری از آنان را بررسی نمودند و از ترکیبی از الگوریتم شاخه و هزینه، آزادسازی لاگرانژین و الگوریتم جست و جوی ممنوعه برای حل مساله استفاده کردند. دی-متا و پترز [35] زمان بندی های کاری برای انواع رانندگان اتوبوس و انواع اتوبوس ها در یک سیستم حمل و نقل درون شهری در هند را تعمیم داده و از ترکیبی از الگوریتم شاخه و هزینه، آزادسازی لاگرانژین و الگوریتم جست و جوی ممنوعه برای حل مساله استفاده کردند.

### ۳-۱- سیستم های سلامت و بهداشت

یکی از مسایل موجود در زمان بندی نیروی انسانی، مساله ی زمان بندی الگوی شیفت پرستاران است. در این مساله، تعداد پرستاران مورد نیاز برای پوشش تقاضای هر شیفت در طول دوره ای زمان بندی مشخص بوده و هدف از حل مساله، تخصیص هر پرستار به مکان شیفت ها است، به طوری که تقاضای هر مکان شیفت برآورده شود. در نهایت لیستی از شیفت های کاری هر پرستار ارائه می شود.

الیاکوب و شرالی [36] یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط برای حل مساله ارائه نمودند. بارد و پورنومو [37] یک مدل برنامه ریزی ریاضی عدد صحیح ارائه و آن را با روش تولید ستون حل کردند. بلین و دمولمیستر [38] از روش شاخه و قیمت برای حل مساله کمک گرفتند. به دلیل پیچیدگی بیش از حد مساله و زمان حل بالای روش های برنامه ریزی عدد صحیح، الگوریتم های ابتکاری و اخیراً فرا ابتکاری برای حل مساله به کار گرفته شده اند. داوژلند و تامپسون [39] از الگوریتم فرا ابتکاری جست و جوی ممنوع و آیکلین و داوژلند [40] از الگوریتم ژنتیک برای حل مساله استفاده کردند. در ادامه تحقیقات محققین پیشرفت های بیشتری در کاربرد برنامه ریزی خطی و برنامه ریزی عدد صحیح مختلط و تکنیک های بهینه سازی شبکه برای تعمیم برنامه های پرستاران انجام شد [41].

روش های برنامه ریزی محدودیت<sup>۱</sup> نیز برای مدل کردن قوانین پیچیده مرتبط با برنامه های پرستاران مورد استفاده واقع شدند [42]. روش های فوق، بر روی مسایل شامل برنامه ریزی های ادواری و غیر ادواری اعمال شدند. ایسکن و هنکک [43] از یک الگوریتم شبیه سازی تبرید برای حل یک مجموعه بزرگ پوشش دهنده رابطه بندی برنامه ریزی عدد صحیح به منظور تعمیم برنامه هایی با ترکیبی از نیروی انسانی دایم و موقت با تقاضای مشخص در بازه های زمانی نیم ساعته در طی یک دوره ده روزه استفاده نمودند. نوری افشار [44] یک روش شبیه سازی تکمیل شده توسط روش های هوش مصنوعی<sup>۲</sup> برای جای دادن آموزش پرستاران در برنامه ها ارائه نمود. لوکمن و همکاران [45]، تعمیم یک سیستم مبتنی بر دانش<sup>۳</sup> برای تولید برنامه های هفتگی پرستاران و تنظیم برنامه ها در واکنش به تغییرات روزانه تقاضا و در دسترس بودن نیروی انسانی را مورد بحث قرار دارند.

داوژلند و تامپسون [39] با استفاده از ترکیب جست و جوی ممنوعه و برنامه ریزی عدد صحیح به تولید برنامه های هفتگی پرداختند که یک مجموعه پیچیده از قوانین شیفتی، محدودیت هزینه ای، رتبه پرستاران و محدودیت های ترجیحی کارکنان را برآورده می کند. برکه و همکاران [46] از یک الگوریتم جست و جوی ممنوعه ترکیبی برای به دست آوردن جواب هایی در یک چارچوب زمانی معقول برای یک سیستم تجاری برنامه ریزی پرستاران بهره گرفتند. پس از آن، رویکرد پیشنهادی توسط برکه و همکاران [47] با استفاده از یک مجموعه از الگوریتم های ممیتیک<sup>۴</sup> اصلاح شد.

<sup>۱</sup> Constraint Programming (CP)

<sup>۲</sup> Artificial Intelligence (AI)

<sup>۳</sup> Knowledge-based system

<sup>۴</sup> Memetic algorithms

آیکلین و داوزلند [40] مساله زمان بندی پرستاران در یک بیمارستان در انگلیس را مدنظر قرار داده و برای حل آن از یک رویکرد الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. بلانتی و همکاران [48] یک رویکرد جست و جوی همسایگی و رویه آزمند را به منظور ممانعت از تولید جواب های غیر عملی برای مساله زمان بندی پرستاران معرفی نموده و از رویه جست و جوی ممنوعه و جست و جوی محلی<sup>۱</sup> تکراری برای حل مساله استفاده نمودند. گاجهر و رونر [49] از الگوریتم بهینه سازی مورچگان<sup>۲</sup> برای حل یک مساله پویای زمان بندی پرستاران در بیمارستانی در اتریش استفاده نمودند. برکه و همکاران [50] یک مدل چند هدفه که ترکیبی از برنامه ریزی عدد صحیح و جست و جوی همسایگی متغیر را برای مسایل برنامه ریزی و زمان بندی پرستاران در محیط های بیمارستانی مدرن با محدودیت های زیاد استفاده می کند، ارائه نمودند. گلاس و نایت [51] بر مساله برنامه ریزی و زمان بندی پرستاران تمرکز نموده و چهار مساله نمونه برگرفته از ادبیات برنامه ریزی و زمان بندی پرستاران را به منظور فراهم نمودن نگرشی به ماهیت مساله مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. تپل اگلو و سلیم [52] با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مقادیر هدف ترجیحات پرستاران و مدیریت بیمارستان، یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح چند هدفه جدید برای مساله زمان بندی پرستاران ارائه نموده و با استفاده از رویکردهای حل فازی مختلف، مدل ارائه شده را به سه مدل برنامه ریزی آرمانی فازی تبدیل نمودند.

برتلز و فاهله [53] مساله مراقبت در منزل را در نظر گرفته و اجزای بهینه سازی هسته ای نرم افزار *PARPAP* را مورد بررسی قرار دادند. اوبرن و همکاران [54] مساله مراقبت در منزل را مدنظر قرار داده و یک سیستم پشتیبانی تصمیم *LAPS CARE* را برای کمک به برنامه ریزان تصمیم دادند. آکجیراتیکارل و همکاران [55] از یک الگوریتم مبتنی بر بهینه سازی ذرات انبوه برای زمان بندی نیروهای انسانی مراقبت کننده در منزل در انگلیس بهره گرفتند. در این مساله، هر حل نشان دهنده فعالیت های مراقبت مربوطه و اولویت تخصیص می باشد. چین و همکاران [56] یک الگوریتم تکاملی بر اساس الگوریتم ژنتیک را برای حل مساله زمان بندی بیماران توان بخشی به منظور افزایش کیفیت خدمات به وسیله کاهش زمان انتظار بیماران، بهبود کارایی عملیات و افزایش بهره برداری از تجهیزات درمانی گسترش دادند. تپل اگلو [57] یک مدل برنامه ریزی آرمانی شامل محدودیت های سخت و نرم برای زمان بندی رزیدنت ها در بخش اورژانس طی یک افق برنامه ریزی ماهانه ارائه و از سیاست های مدیریتی جهت تامین نیروی انسانی بخش تعمیرات و نگهداری استفاده کرد. تپل اگلو [58] یک مدل برنامه ریزی چند هدفه برای رزیدنت ها در سطوح مختلف ارشدیت ارائه نمود و با استفاده از روش ترتیبی و وزن دهی به حل آن پرداخت. یانگ و همکاران [59] از داده کاوی، طبقه بندی و یک درخت تصمیم برای تحلیل مدل پیش بینی تقاضای بیماران و زمان بندی پزشکان در بخش اورژانس استفاده نمودند. بلیین و همکاران [60] نیز، یک سیستم پشتیبانی تصمیم برای مساله چند هدفه زمان بندی ادواری جراحان پیشنهاد نموده و برای حل آن از تکنیک های برنامه ریزی عدد صحیح مختلط و الگوریتم فرا ابتکاری شبیه سازی تبرید استفاده نمودند.

#### ۱-۴- خدمات حفاظتی و اورژانسی

پیشرفت در برنامه ریزی و زمان بندی منابع انسانی در بخش بهداشت و درمان با چالش های بیشتری همراه است. با توجه به اهمیت زمان بندی نیروی انسانی و مطرح شدن انسان به عنوان محور توسعه که نمود بارز آن را می توان در برنامه توسعه هزاره سازمان ملل دید، مدیریت منابع انسانی در این بخش از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. اولین پژوهش در این زمینه در سال ۱۹۷۹ توسط باتلر و میدل [61] انجام شد که در آن مساله تعیین الگوهای ادواری از شیفت های صبح، ظهر و شب با دوروز استراحت متوالی را در مورد برنامه ریزی پلیس نظر می گیرد. تمرکز سینوآنی و همکاران [62] بر مساله تصمیم برنامه ها برای گاردهای امنیتی بود. مساله به صورت یک برنامه عدد صحیح چند هدفه رابطه بندی شده است. اهداف مختلف مساله شامل حداقل نمودن کسری پوشش تقاضا و ارضای ترجیحات کارکنان می باشد. مطالعه انجام شده توسط تیلور و هاکسلی [63]، مساله تخصیص شیفت های ماموران پلیس را با هدف حداقل نمودن کسری پوشش تقاضا در نظر گرفته است. ارنست و همکاران [64] برنامه ریزی ماموران آمبولانس جهت برآورده نمودن تقاضا برای ماموران در دسته بندی های مختلف که باید در شیفت های مشخص سرکار باشند را در نظر گرفتند. راجاگوپالان و صیدام [65] بر روی حداقل سازی مدت زمان پاسخگویی تمرکز نمودند.

#### ۱-۵- خدمات و مطلوبیت های شهری

دولت ها در هر سطحی اعم از: محلی، ایالتی و ملی برای ارائه خدمات به تعداد زیادی نیروی انسانی نیاز دارند. برنامه ریزی بهینه نیروی انسانی برای این خدمات عمومی، فرصت چشمگیری را برای بهبود خدمات دولتی همراه با کاهش هزینه ها فراهم می آورد. مطالعه انجام شده توسط ویکتور

<sup>1</sup> Local Search (LS)

<sup>2</sup> Ant Colony Optimization (ACO)

فرناندز و همکاران [66] منجر به ارایه یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح برای مساله زمان بندی هم زمان وظایف نیروی انسانی و سپس تخصیص آن ها به این وظایف بر اساس مهارتشان شد. آن ها با در نظر گرفتن این که یک کار می تواند تنها توسط کارکنانی بامهارت خاص انجام شود را نشان دادند. یک مطالعه موردی انجام شده توسط مولد [67] به بررسی پردازش انواع ادعا که ممکن است در آژانس های دولتی که با دعای حقوق بازنشستگی و سایر مستمری های تامین اجتماعی سر و کار دارند یا در شرکت های خصوصی که به دعای بیمه می پردازند رخ دهد، پرداخت. ریتزمن و همکاران [68] یک طبقه بندی از مشکلات جداسازی برای سازمان های تولیدی و خدماتی توسعه دادند و زمان بندی های هفتگی برای یک مرکز پردازش پستی به دست آوردند.

## ۶-۱- تولید

زمان بندی نیروی انسانی برای کارخانه ها و شرکت های تولیدی از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا مدیران در این نوع شرکت ها تمایل دارند از حداقل نیروی انسانی حداکثر استفاده را ببرند. مارتا و همکاران [69] الگوریتمی برای مساله زمان بندی نیروی انسانی در کارخانه تولید شیشه ارایه کردند. آن ها از یک الگوریتم ابتکاری برای حل مساله استفاده کردند. نتایج به دست آمده در مقایسه با یک مدل بهینه سازی نشان دادند که الگوریتم پیشنهادی عملکرد خوبی را داشته است. حسنی و همکاران [70] به ارایه یک مدل زمان بندی تک هدفه در رابطه با زمان های استراحت برای کارگران یک کارخانه در طول یک شیفت پرداختند. شاه نظری و همکاران [71] به حل مساله زمان بندی نیروی انسانی در یک کارخانه تولید لوله های پلی اتیلن با استفاده از یک مدل دوهدفه پرداختند. ساوینی و همکاران [72] به ارایه مدلی پویا برای زمان بندی نیروی انسانی در یک خط مونتاژ چند عامله پرداختند. هدف آن ها این بود که تعداد کارگران کم تر از دستگاه های مونتاژ باشد.

در انتهای مطالعه ادبیات در این قسمت به مروری بر چند مقاله که در زمینه مساله زمان بندی نیروی انسانی در نیروگاه ها و شبکه های برقی صورت گرفته است، پرداخته خواهد شد. البته باید متذکر شد که تحقیقات محدودی در این بخش انجام شده است. لیلی و همکاران [73] مساله زمان بندی نیروی انسانی جهت نگهداری و تعمیرات در نیروگاه برقی در نیجریه را با در نظرگیری نیروهای ستادی چند حالتی مورد بررسی قرار دادند. آن ها به بررسی انجام برنامه نگهداری و تعمیرات در ۴ روز کاری به جای برنامه های ۵ روزه قبلی پرداختند. یار و ونایاگامورتی [74] زمان بندی بهینه نگهداری و تعمیرات ژنراتورهای نیروگاهی را با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه و با در نظرگیری زمان بندی نیروی انسانی درگیر در بخش نگهداری و تعمیرات ارایه دادند. همچنین، ایتزن [75] از یک رویکرد تولید ستونی جهت تهیه برنامه های کاری برای حدود ۵۰ نفر نیروی کار در یک عملیات تولید نیروی برق بهره گرفت.

با توجه به این که این مسایل از مجموعه مسایل *NP-Hard* هستند، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده اند. لذا، الگوریتم های بسیاری برای حل آن ها ارایه شده است. الگوریتم های ارایه شده به دو دسته الگوریتم های دقیق و تقریبی تقسیم می شوند. روش دقیق به روش هایی اطلاق می شود که فقط به دنبال جواب بهینه کلی هستند و جواب های دیگری را نتیجه نمی دهند. با توجه به این که مساله زمان بندی نیروی انسانی یک مساله *NP-Hard* است، حتی برای ابعاد نه چندان بزرگ مساله، روش های دقیق به سرعت کارایی خود را از دست می دهند به طوری که بهترین الگوریتم های دقیق تنها قادر به حل مسایل با ابعاد بسیار کوچک می باشند [76]. با این وجود این روش ها، در مورد مسایل با ابعاد کوچک منجر به یافتن بهینه کلی مساله می شوند. از میان روش های حل بهینه دقیق ارایه شده برای زمان بندی پروژه می توان به «برنامه ریزی ریاضی» اشاره کرده که به عنوان مثال در [77]، [78] به کار گرفته شده است. از دیگر روش های دقیق می توان به روش های شمارش ضمنی از جمله برنامه ریزی پویا [79]، [80] و روش های شاخه و کران [81]، [82] اشاره کرد. روش های فرا ابتکاری و برنامه ریزی محدودیت از مجموعه روش های حلی هستند که در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار گرفته اند. خصوصیت مشترک این روش ها عدم توانایی این روش ها در اثبات بهینگی راه حل های ارایه شده می باشد. امروزه، رویکردهای فرا ابتکاری کاربردهای بسیاری در شاخه های مختلف بهینه سازی یافته اند. نمونه هایی از این روش ها عبارتند از: الگوریتم های جست و جوی ممنوع [83]، [84] کلونی مورچگان [85]، [86] الگوریتم شبیه سازی تبرید [87]، [88] الگوریتم های ژنتیک [89]، [90] الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه<sup>۱</sup> [83]، [91] و...

<sup>۱</sup> Partial swarm optimization

## ۲- رابطه‌بندی مساله زمان‌بندی نیروی انسانی چند مهارته چندهدفه در نیروگاه شهید سلیمی نکا

نیروگاه شهید سلیمی نکا به‌عنوان یکی از نیروگاه‌های استراتژیک کشور و از مهم‌ترین سرمایه‌های ملی کشور محسوب می‌گردد. این نیروگاه از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های خاورمیانه به شمار می‌رود که در ساحل دریای خزر و در ۲۲ کیلومتری شمال شهرستان نکا واقع در استان همیشه سرسبز مازندران قرار دارد. این نیروگاه دارای ۴ واحد ۴۴۰ مگاواتی بخار و یک بلوک سیکل ترکیبی متشکل از ۲ واحد ۱۳۶ مگاواتی گازی و یک واحد ۱۶۰ مگاواتی بخار و دو واحد توربین انبساطی به قدرت ۹/۴ مگاوات می‌باشد و در آینده نه چندان دور در بخش طرح و توسعه، زیرمجموعه‌های تولیدی دیگری با توجه به رشد مصرف برق در کشور نیز به این مجموعه اضافه خواهند گشت.

برای مساله موردبحث، واحد بهره‌برداری شماره ۱ نیروگاه در نظر گرفته شده است. واحد بهره‌برداری شماره ۱ نیروگاه دارای سه شیفت کاری هشت‌ساعته می‌باشد که پنج گروه کاری ثابت به هریک از این شیفت‌ها در طول روز تخصیص داده می‌شوند. به این صورت که نیروهای یک گروه خاص بعد از کار در شیفت خاصی در چهار شیفت بعدی استراحت دارند و در شیفت پنجم دوباره مشغول کار می‌شوند و این روند تکراری ادامه دارد. نیروها در گروه‌های خود ثابت هستند و نمی‌توانند به گروه‌های دیگر انتقال یابند. فقط برای مرخصی‌ها می‌توانند با هماهنگی یکدیگر شیفت‌های خود را جابه‌جا کنند. با این مدل نیروها ۱۳۶ ساعت در ۲۸ روز کار می‌کنند که از نظر قانون کار و استانداردهای جهانی اصلاً بهینه به نظر نمی‌رسد. به دلیل دولتی بودن نیروگاه و همچنین استخدام دایم بودن نیروها نمی‌شود نیروها را تعدیل کرد، اما با روند خصوصی‌سازی نیروگاه و همچنین توسعه نیروگاه ما توانستیم با ارایه مدلی چندهدفه به شیفت‌بندی نیروها اقدام کرده و همان کاری که در این واحد با ۱۸۷ نیروی انسانی در حال انجام است را با تعداد خیلی کم‌تری به انجام برسانیم که در فصل بعد مساله مذکور حل می‌گردد. نحوه شیفت‌بندی کنونی نیروگاه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- نحوه شیفت‌بندی نیروها به‌صورت دستی.

Table 1- How to manually shift forces.

| شیفت روز | شیفت صبح | شیفت عصر | شیفت شب |
|----------|----------|----------|---------|
| 1        | A        | B        | C       |
| 2        | D        | E        | A       |
| 3        | B        | C        | D       |
| 4        | E        | A        | B       |
| 5        | C        | D        | E       |

مساله زمان‌بندی نیروی انسانی چندهدفه مدنظر که بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از نیروگاه شهید سلیمی نکا رابطه‌بندی شده، در سایر محیط‌های تولیدی و خدماتی مشابه که به‌صورت ۲۴ ساعته در چندین شیفت کار می‌کنند، با اندکی تغییرات قابل کاربرد می‌باشد. ما با استفاده از اطلاعات موجود برای واحد بهره‌برداری شماره یک نیروگاه اقدام به نوشتن مدل ریاضی چندهدفه نمودیم که قابل تعمیم به کلیه واحدهای بهره‌برداری نیروگاه نیز می‌باشد. این مدل با استفاده از فرضیات واقعی نیروگاه و همچنین خواسته‌های مدیران نیروگاه از جمله کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری نیروها و همچنین استفاده از نیروها متناسب با تخصص و مهارتشان رابطه‌بندی شده است.

### ۲-۱- فرض‌های مساله

مساله پیش‌رو یک مطالعه موردی در بخش بهره‌برداری نیروگاه شهید سلیمی نکا در حوزه زمان‌بندی نیروهای انسانی این نیروگاه می‌باشد. از این رو، موارد زیر به‌عنوان فرض‌های تحقیق در کل پروژه در نظر گرفته شده است.

۱. یک روز کاری به ۳ شیفت ۸ ساعته تقسیم می‌شود.
۲. افق برنامه‌ریزی ۲۸ روزه می‌باشد.
۳. کارکنان به ۳ گروه تخصصی تقسیم می‌شوند و در هر گروه تخصصی در دو سطح مهارت قرار می‌گیرند.
۴. نیروی دارای سطح مهارت کارشناس از یک تخصص می‌تواند کار یک تکنسین از همان تخصص را انجام دهد، اما یک تکنسین نمی‌تواند به‌جای کارشناس فعالیت انجام دهد.

۵. کارکنان مجاز به کار در یک شیفت از هر روز می باشند.
۶. هر نیروی کاری که در شیفت شب کار می کند روز بعد باید تعطیل باشد.
۷. کارکنانی که در شیفت شب کار کرده اند و روز بعد را استراحت نموده اند، در صورت تخصیص به کار در دو روز پس از روز استراحت، مجاز به کار در شیفت شب نیستند.
۸. یک نیروی کار می تواند حداکثر ۲ روز متوالی که به کار مشغول است به یک شیفت ثابت تخصیص داده شود.
۹. هر نیروی کار در هر هفته حداقل باید به یک شیفت صبح، عصر و شب تخصیص داده شود.
۱۰. حداقل و حداکثر ساعات کاری کارکنان در طی دوره برنامه ریزی از قبل مشخص است.
۱۱. فاصله بین شیفت هایی که به هر نیروی کار تخصیص داده می شود باید حداقل ۲ شیفت باشد.

## ۲-۲- نمادگذاری

نمادهای زیر، در مدل ریاضی ارائه شده برای مساله زمان بندی نیروی انسانی چندمهارته چندهدفه نیروگاه شهید سلیمی استفاده خواهند شد. در ابتدا به تعریف مجموعه های استفاده شده در این مدل پرداخته خواهد شد. سپس اندیس های مورد استفاده شرح داده می شوند و در آخر نیز، به تعریف پارامترها و تعریف متغیر تصمیم مساله پرداخته خواهد شد.

### مجموعه ها

|      |                                                        |
|------|--------------------------------------------------------|
| $M$  | مجموعه کارکنان.                                        |
| $D$  | مجموعه روزها.                                          |
| $H$  | مجموعه شیفت ها.                                        |
| $S$  | مجموعه تخصص ها.                                        |
| $L$  | مجموعه مهارت ها.                                       |
| $LD$ | مجموعه آخرین روزها از کلیه هفته ها در افق برنامه ریزی. |

### شمارنده ها

|      |                                                                                      |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $m$  | شمارنده کارکنان ( $m = 1, \dots, M$ ).                                               |
| $d$  | شمارنده روزها ( $d = 1, \dots, 28$ ).                                                |
| $h$  | شمارنده شیفت ها (صبح $h1$ ، عصر $h2$ و شب $h3$ ).                                    |
| $s$  | شمارنده تخصص ها، در این مساله ۳ تخصص مکانیک، برق و الکترونیک داریم ( $s1, s2, s3$ ). |
| $l$  | شمارنده سطوح مهارت در هر تخصص (تکنسین $l1$ و کارشناس $l2$ ).                         |
| $ld$ | شمارنده آخرین روز از هر هفته در افق برنامه ریزی ( $ld = (7, 14, 21, 28)$ ).          |

### پارامترها

|           |                                                                                                                                      |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $t_h$     | طول هر شیفت (ساعت).                                                                                                                  |
| $T_{min}$ | حداقل ساعات کاری مورد نیاز برای هر نیروی کار در طی دوره زمان بندی.                                                                   |
| $T_{max}$ | حداکثر ساعات کاری مجاز برای هر نیروی کار در طی دوره برنامه ریزی.                                                                     |
| $C$       | ضریب جریمه ای (هزینه) که نیروگاه برای تخصیص هر نیروی کار به سطح مهارت پایین تر از سطح مهارت واقعی اش باید متقبل شود.                 |
| $N_{dst}$ | تعداد کل کارکنان مورد نیاز از سطح مهارت ۱ از تخصص $s$ در شیفت $h$ از روز $d$ .                                                       |
| $r_{msl}$ | نیروی کار $m$ با تخصص $s$ می تواند به کار کردن در سطح مهارت واقعی اش و یا سطح مهارت پایین تر تخصیص داده شود که ۱، در غیر این صورت ۰. |
| $V_{ms}$  | میزان مهارت واقعی هر نیروی کار از تخصص $s$ ، در این مساله ( $V_{ms}=2$ کارشناس، $V_{ms}=1$ تکنسین).                                  |

میزان دستمزد نیروی  $m$  در شیفت  $h$ .  $C_{mh}$   
 مطلوبیت استفاده از نیروی  $m$  توسط نیروگاه که به سوابق نیروی کار در ماه‌های گذشته، مدرک تحصیلی و دوره‌های گذرانده‌شده  $P_m$   
 توسط هر نیروی کار برمی‌گردد و در شروع هر بازه برنامه‌ریزی توسط واحد منابع انسانی تعیین می‌شود.

## متغیر تصمیم

اگر نیروی کار  $m$  از تخصص  $s$  بامهارت  $l$  در روز  $d$  به شیفت  $h$  تخصیص داده شود که ۱، در غیر این صورت ۰.  $X_{mdhsl}$

## ۳-۲- مدل پیشنهادی

مساله زمان‌بندی نیروی انسانی در این نیروگاه شامل محدودیت‌های مختلف و در عین حال متناقض است. در حقیقت، در این مساله می‌بایست علاوه بر در نظر گرفتن قوانین کاری و محدودیت‌های مختلف قانونی مربوط به شیفت‌بندی کارکنان در محیط‌های تولیدی و خدماتی، انتظارات کارکنان و مدیران به‌صورت هم‌زمان موردبررسی قرار گیرد. لذا در این بخش ابتدا مدل تعمیم‌یافته نمایش داده شده و در قسمت‌های بعدی به شرح توابع هدف و محدودیت‌های مساله پرداخته خواهد شد.

$$\text{Min}Z1: \sum_m \sum_d \sum_h \sum_s C(V_{m,s} \cdot X_{mdhs,lt} - X_{mdhs,lt}). \quad (1)$$

$$\text{Min}Z2: \sum_m \sum_d \sum_h \sum_s \sum_l C_{mh} \cdot X_{mdhsl}. \quad (2)$$

$$\text{Min}Z3: \sum_m \sum_d \sum_h \sum_s \sum_l P_m \cdot X_{mdhsl}. \quad (3)$$

s.t.

$$\sum_h \sum_s \sum_l X_{mdhsl} \leq 1; \quad \text{for all } m, d. \quad (4)$$

$$T_{\min} \leq \sum_d \sum_h \sum_s \sum_l X_{mdhsl} \cdot t_h \leq T_{\max}; \quad \text{for all } m. \quad (5)$$

$$\sum_m X_{mdhsl} = N_{dhs}; \quad \text{for all } d, h, s, l. \quad (6)$$

$$X_{mdhsl} \leq r_{msl}; \quad \text{for all } m, d, h, s, l. \quad (7)$$

$$\sum_s \sum_h \sum_l X_{m,d+1,hsl} \leq (1 - \sum_s \sum_l X_{md,h3,sl}) ; \quad \text{for all } m, d \in \{1, \dots, D-1\}. \quad (8)$$

$$\sum_s \sum_l \sum_{d=7d_l-6}^{7d_l} X_{mdhsl} \geq 1; \quad \text{for all } m, d_l \in \{1, \dots, \lfloor LD \rfloor / h\}. \quad (9)$$

$$\sum_s \sum_l X_{md,h3,l} + \sum_s \sum_l X_{m,d+2,h3,l} + \sum_s \sum_l X_{m,d+3,h3,l} \leq 1 \quad \text{for all } m, d \in \{1, \dots, 7 \mid LD \mid -2\}. \quad (10)$$

$$\sum_s \sum_l (X_{mdhsl} + X_{m,d+1,hsl} + X_{m,d+2,hsl}) \leq 2 ; \quad \text{for all } m, d \in \{1, \dots, 7 \mid LD \mid -2\}, h \neq \{h3\}. \quad (11)$$

$$\sum_s \sum_l X_{m,d,h2,1} + \sum_s \sum_l X_{m,d+1,h1,1} \leq 1 ; \quad \text{for } m, d \in \{1, \dots, 7 \mid LD \mid -1\}. \quad (12)$$

$$X_{mdhsl} = \{0, 1\}. \quad (13)$$

معادله (۱) تابع هدف اول است که به مینیم کردن تعداد نیروهای بامهارت کارشناس که به کار در مهارت تکنسین تخصیص می‌یابند می‌پردازد. معادله (۲) تابع هدف دوم در پی مینیم کردن دستمزد کارکنان است و معادله (۳) تابع هدف سوم است که در تلاش است تا بهترین استفاده را از نیروها داشته باشد. معادله (۴) این محدودیت تضمین می‌کند که هر نیروی انسانی در یک روز فقط می‌تواند به یک شیفت تخصیص یابد. معادله (۵) تضمین می‌کند که هر نیروی کار فقط در محدوده ساعات کاری مشخص‌شده می‌تواند به شیفت‌ها تخصیص یابد. این محدودیت همچنین موجب می‌شود که بین نیروها فاصله زیادی از نظر تعداد ساعات کاری ایجاد نشود تا باعث ایجاد اختلاف بین نیروها نشود. معادله (۶) تضمین می‌کند که در هر شیفت از هر روز تعداد کارکنانی که بامهارت مشخص از هر تخصص موردنیاز هستند، دقیقاً تخصیص یابند. معادله (۷) اجازه می‌دهد که نیروهای بامهارت کارشناس به‌جای نیروهای بامهارت تکنسین از تخصص خودشان در صورت نیاز به شیفت‌ها تخصیص یابند. در

**معادله (۸)** با تخصیص نیرو به شیفت شب، کل تخصیص به نیروی مذکور برای روز بعد صفر در نظر گرفته می شود. **معادله (۹)** تضمین می کند که هر نیروی انسانی در هر هفته حداقل باید به یک شیفت صبح، عصر و شب تخصیص یابد. **معادله (۱۰)** بدین گونه عمل می کند که نیرویی که در شیفت شب روز جاری کار کرده است با توجه به فرضیات قبلی فردا استراحت دارد. همچنین، در ۲ روز بعدی پس از روز استراحت نباید به شیفت شب تخصیص یابد. **معادله (۱۱)** به افراد اجازه می دهد که هر نیروی کار بتواند حداکثر در دو روز متوالی به شیفت صبح یا عصر تخصیص یابد. **معادله (۱۲)** این فرض را پوشش می دهد که فاصله بین دو شیفت کاری هر نیروی کار باید حداقل ۲ شیفت باشد. با توجه به این که اگر کسی در شیفت صبح مشغول به کار باشد دیگر نمی تواند در آن روز به شیفت تخصیص یابد این فرض برای شیفت صبح برقرار است، همچنین برای کسی که به شیفت شب تخصیص می یابد روز بعد استراحت خواهد داشت خودبه خود این فرض برقرار می شود و تنها برای نیروی که به شیفت عصر روزی مشغول به کار است این محدودیت نوشته شده است تا در فردای آن روز نتواند به شیفت صبح تخصیص یابد و در نهایت **معادله (۱۳)** متغیر تصمیم مساله را معرفی کرده است.

### ۳- روش حل

در این مقاله از دو الگوریتم برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است.

#### ۳-۱- الگوریتم جست و جوی پراکنده

یکی از الگوریتم های استفاده شده در این مقاله روش جست و جوی پراکنده، به عنوان یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر جمعیت است که توسط گلاور [92]، [93] برای حل گونه خاصی از مسایل به نام مساله محدودیت جانشین مطرح گردید. اساس این روش فرا ابتکاری، بر پایه جست و جوی فضای جواب مساله از طریق یک روش هوشمند است. شبه کد این الگوریتم مطابق شکل ۱ می باشد که جزئیات آن در ادامه برای حل مساله تعریف شده تشریح شده است.



شکل ۱- نمای کلی روش جست و جوی پراکنده برای مساله مورد بحث.

Figure 1- Overview of the distributed search method for the problem under discussion.

<sup>1</sup> Elite tabu search

## نحوه نمایش جواب‌ها

در تمام الگوریتم‌های فرا ابتکاری، به دلیل نیاز به حل‌شدنی در شروع کار، لازم است حل‌شدنی را بر طبق ساختار مشخصی ذخیره کنیم که به این ساختار، نحوه نمایش جواب می‌گویند. یک حل‌شدنی برای مساله موردنظر مطابق جدول ۲، به صورت یک ماتریس دوبعدی می‌باشد که سطرها ماتریس برابر با تعداد کارکنان بوده و ستون‌های آن برابر با حاصل ضرب تعداد روزهای دوره برنامه‌ریزی و تعداد شیفت در هر روز می‌باشد. به طور مثال، برای یک نمونه با ۴۰ نیروی انسانی و ۳ تخصص با ۲ سطح مهارت، ماتریس دوبعدی با تعداد ۴۰ سطر و ۸۴ ستون تشکیل می‌شود که سطرها نشان‌دهنده تعداد نیروی انسانی و ستون‌ها برابر با حاصل ضرب تعداد روزها در شیفت‌های هر روز می‌باشد. در جدول ۲ قسمتی از ماتریس جواب برای توضیح آورده شده است.

جدول ۲- نحوه خروجی جواب در الگوریتم جست‌وجوی پراکنده در نرم‌افزار مطلب.

Table 2- How the answer is output in the sparse search algorithm in MATLAB software.

| Day            | d1 |   |   | d2 |   |   | d3 |   |   |
|----------------|----|---|---|----|---|---|----|---|---|
| Manpower-shift | m  | a | n | m  | a | n | M  | a | n |
| 1.k1           | 0  | 2 | 0 | 0  | 2 | 0 | 0  | 0 | 0 |
| 2.k2           | 0  | 1 | 0 | 0  | 0 | 2 | 0  | 0 | 0 |
| 3.T            | 1  | 0 | 0 | 1  | 0 | 0 | 0  | 1 | 0 |

برای مثال با توجه به جدول ۱ تا جدول ۳ اگر سطر اول و دوم مربوط به نیروی بامهارت کارشناس و سطر سوم مربوط به نیروی بامهارت تکنسین باشد، بدین صورت می‌تواند شرح داده شود که نیروی شماره یک در روز اول به شیفت عصر بامهارت کارشناس تخصیص یافته و در روز دوم نیز به شیفت عصر بامهارت کارشناس تخصیص یافته و در روز سوم به هیچ شیفتی تخصیص داده نشده است. نفر دوم در روز اول به شیفت عصر بامهارت پایین‌تر یعنی تکنسین تخصیص داده شده و در روز دوم بامهارت کارشناس به شیفت شب و در روز سوم به استراحت خورده است، اما نیروی شماره ۳ در روز اول به شیفت صبح بامهارت تکنسین تخصیص داده شده است. در روز دوم نیز به شیفت صبح بامهارت تکنسین تخصیص داده شده است و در روز سوم به شیفت عصر با مهارت تکنسین تخصیص داده شده است.

## نحوه تولید جواب‌های اولیه

نحوه عملکرد این روش به صورت زیر است:

- ۱- برای هر روز  $i$ ، شیفت اول برای هر تخصص و هر مهارت به اندازه تقاضا، از بین کارکنانی که می‌توانند کار کنند، به طور تصادفی انتخاب می‌شوند. برای زمان‌بندی بقیه روزها و شیفت‌ها به جز شیفت اول روز  $i$ ام، به صورت زیر عمل می‌شود:
- برای هر تخصص و هر مهارت تا برآورده شدن میزان تقاضا، از بین کارمندانی که می‌توانند از نظر شدنی بودن در این روز کار کنند، کارمندی که تابه‌حال کم‌تر تخصیص داده شده است، انتخاب و تخصیص داده می‌شود.
- در ضمن به هنگام انتخاب یک کارمند برای یک مهارت بررسی از کارمندانی شروع می‌شود که سطح مهارتشان به سطح مهارت موردبررسی نزدیک‌تر باشد.
- ۲- به  $i$  یک واحد اضافه‌شده و به قدم یک می‌رویم.

## آرشیو جواب‌های پارتو

از آن‌جا که در حل مسایل چندهدفه به دلیل وجود تناقض بین اهداف، یک جواب واحد که همه اهداف در آن بهینه باشند وجود ندارد، در نهایت مجموعه‌ای از جواب‌های غالب به عنوان جواب‌های بهینه (نزدیک بهینه) ارایه خواهند شد. در این‌جا که از یک روش مبتنی بر آرشیو پارتو برای حل استفاده شده است، کیفیت جواب‌های موجود در آرشیو، بسیار اهمیت دارد. لذا در این پایان‌نامه، این آرشیو در هر تکرار الگوریتم جست‌وجوی

پراکنده به روز خواهد شد. جهت به روز رسانی آرشیو پارتو، کلیه جواب های موجود در آرشیو پارتو و جواب های تولید شده جدید، در یک استخر جواب ریخته شده و سطح بندی می گردند. سپس کلیه جواب های سطح اول به عنوان جواب های آرشیو پارتو جدید انتخاب می گردند.

### روش تولید جواب های پراکنده

در این پایان نامه، برای تولید جواب های پراکنده از روش خطدار کردن مسیر استفاده می گردد. این روش در ابتدا به منظور هماهنگ سازی استراتژی های تشدید و تنوع در روش جست و جو ممنوع به کار برده شده است. این روش، جواب های جدید را با استفاده از کاوش مسیرهای متصل کننده بین دو جواب با کیفیت تولید می کند. این روش، جست و جوی خود را از حل اولیه شروع کرده و مسیری در همسایگی این حل، به منظور رسیدن به حل کمکی تولید می کند. اگرچه این روش یک جزو لازم از الگوریتم جست و جوی پراکنده نمی باشد، اما اجرای الگوریتم با آن به نتایج بهتری منجر می گردد. همچنین برای هر یک از جواب های موجود در جمعیت جواب ها، یک بار جواب مذکور به عنوان حل کمکی در نظر گرفته می شود و جواب های مسیر متصل کننده بین جواب اولیه و کمکی تولید شده و بار دیگر جواب های مسیر بازگشت از حل کمکی به حل اولیه تولید خواهند شد. به عبارت دیگر، روش خطدار کردن مسیر برای هر یک از حل های موجود در جمعیت جواب ها به طور جداگانه استفاده می گردد. جواب های به دست آمده برای همه جواب ها در یک استخر ذخیره شده و در نهایت جواب های پراکنده لازم، با توجه به معیار تابع برازندگی  $C_s$  انتخاب خواهند شد. جهت محاسبه تابع برازندگی، ابتدا جواب ها با استفاده از قاعده دب سطح بندی گردیده و معیار فاصله ازدحام برای هر جواب با توجه به سطحی که جواب در آن قرار دارد، محاسبه می گردد. سپس برای هر جواب، معیار  $C_s$  به صورت رابطه (۱۴) محاسبه می گردد که نشان دهنده مقدار برازندگی هر جواب می باشد.

$$C_s = \frac{rank}{crowding\_dis}. \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)،  $crowding\_dis$  نشان دهنده فاصله ازدحام و  $rank$  شماره سطحی است که جواب در آن قرار دارد.  $N$  جواب که دارای  $C_s$  کمتری هستند به عنوان جواب های پراکنده اولیه انتخاب می شوند.

### روش بهبود جواب های پراکنده تولید شده

در این بخش، یک روش بهبود دهنده بر روی هر یک از جواب های پراکنده تولید شده در مرحله قبل در راستای افزایش کیفیت جواب ها اعمال می گردد. برای طراحی روش بهبود جواب ها در این مقاله، از ساختار جست و جوی همسایگی متغیر استفاده گردیده است. ساختار  $VNS$  شامل سه عملگر جست و جوی همسایگی می باشد که در ادامه شرح داده شده اند.

۱. عملگر جست و جوی همسایگی اول: این عملگر به این صورت عمل می کند که از بین کارکنان یکی به تصادف انتخاب شده و سعی می شود که تخصیص های این کارمند در برخی روزها (با رعایت محدودیت ها) لغو شده و به کارمندی که می تواند آن تخصیص ها را داشته باشد، داده می شود.
۲. عملگر جست و جوی همسایگی دوم: این عملگر به این صورت عمل می کند که یک کارمند به تصادف انتخاب شده و در تمام شیفت ها اگر آن کارمند به سطحی پایین تر از سطح مهارت خودش تخصیص داده شده باشد، سعی می شود که تخصیص وی به سطح مهارتش نزدیک تر شود. به این صورت که در صورت امکان تخصیص این کارمند لغو و به افراد واجد شرایط داده می شود و یا تخصیص این کارمند با کارمندی که در سطحی نزدیک تر به سطح مهارت کارمند مورد بررسی تخصیص داده شده است تعویض خواهد شد.
۳. عملگر جست و جوی همسایگی سوم: در این عملگر، اندیس یک روز و یک کارمند به طور تصادفی تولید شده و تخصیص کارمند مورد نظر (در صورت وجود)، در آن روز با حفظ شرایط شدنی بودن لغو و به کارمند واجد شرایط دیگری که مطلوبیت بالاتری دارد، داده می شود.

همان طور که گفته شد، ساختار  $VNS$  از ترکیب این سه عملگر مطابق شکل ۳ حاصل می شود. هر کدام از جواب های موجود در جمعیت جواب به الگوریتم  $VNS$  داده می شود و یک جواب به عنوان خروجی دریافت خواهد شد و سپس جایگزین جواب ورودی خواهد شد. در واقع ساختار کلی رویه بهبود نیز مطابق شکل ۴ خواهد بود.

{برای هر یک از حل‌های ورودی

$$K=1$$

تا هنگامی که معیار توقف مشاهده شد، انجام بده

حل جدید=درخواست NSS نوع K

اگر حل جدید بهتر است، سپس

$$K=1$$

در غیر این صورت

$$K=k+1$$

اگر  $k=4$  سپس

$$K=1$$

پایان اگر

پایان اگر

{پایان در حالی که.

شکل ۲- الگوریتم VNS.

Figure 2- VNS algorithm.

{برای هر  $S_i$  در جمعیت ورودی

$S_i =$  اعمال رویه VNS در  $S_i$ .

$S = S_i$  اعمال رویه شدنی بودن بر جواب و تولید یک جواب شدنی.

شکل ۳- ساختار کلی رویه بهبود.

Figure 3- General structure of the improvement procedure.

۱. اگر کارمندی به بیش از ساعت تعیین شده تخصیص داده شده باشد، یا پس از شیفت شب، به روز بعد تخصیص داده شده باشد، یا در دوروز بعد از تعطیلی باز هم به شیفت شب تخصیص داده شده باشد، یا هرگونه تخصیص غیرمجاز دیگری (با توجه به محدودیت‌های مدل) وجود داشته باشد، آن تخصیص لغو (با توجه به محدودیتی که نقض شده است) و سپس تخصیص‌ها در شیفتی که تخصیص لغو شده است با توجه به میزان تقاضا بررسی شده و اصلاح خواهند شد.

۲. اگر یک کارمند  $m$  با مهارت تکسین به مهارت کارشناس که بالاتر از سطح مهارت خودش است، تخصیص داده شده باشد.

اگر تعداد تخصیص مهارت کارشناس در آن شیفت بیش از میزان تقاضا باشد، تخصیص آن کارمند لغو می‌شود.

اگر کم‌تر یا مساوی باشد، از بین کارمندانی که می‌توانند در این سطح کار کنند و تخصیص داده نشده‌اند در صورت برقراری بقیه محدودیت‌ها یکی انتخاب شده و تخصیص داده شده و تخصیص کارمند  $m$  لغو می‌شود. اگر کارمندی در سطح مهارت کارمند  $m$  تخصیص داده شده باشد و بتواند در سطح مهارت کارشناس نیز کار کند، تخصیصش با کارمند  $m$  عوض می‌شود. در صورتی که این کارها امکان‌پذیر نباشد، کارمندانی که می‌توانند در این سطح تخصیص یابند، در صورت امکان تخصیصشان در شیفت‌های قبل یا بعد تغییر داده می‌شود تا بتوانند در شیفت جاری در سطح مهارت کارشناس تخصیص یابند.

۱. برای مهارت کارشناس سطح تقاضا رعایت نشده.

اگر تعداد تخصیص‌ها بیشتر از سطح تقاضا باشد تا برقراری رابطه تساوی برخی از تخصیص‌ها لغو می‌شوند.

اگر کم‌تر از سطح تقاضا باشد، سعی می‌شود کارمندی با رعایت محدودیت‌ها انتخاب و تخصیص داده شود و مانند حالت قبل اگر کارمندی پیدا نشد، در صورت امکان با تغییر زمان‌بندی شیفت‌های قبل و بعد، سطح تقاضا برآورده شود.

۱. اگر کارمندی به بیش از ساعت تعیین شده تخصیص داده شده باشد، یا پس از شیفت شب، به روز بعد تخصیص داده شده باشد، یا در دو روز بعد از تعطیلی باز هم به شیفت شب تخصیص داده شده باشد، یا هرگونه تخصیص غیر مجاز دیگری (با توجه به محدودیت‌های مدل) وجود داشته باشد، آن تخصیص لغو (با توجه به محدودیتی که نقض شده است) و سپس تخصیص‌ها در شیفتی که تخصیص لغو شده است با توجه به میزان تقاضا بررسی شده و اصلاح خواهند شد.
۲. اگر یک کارمند  $m$  با مهارت تکنسین به مهارت کارشناس که بالاتر از سطح مهارت خودش است، تخصیص داده شده باشد:
  - ✓ اگر تعداد تخصیص مهارت کارشناس در آن شیفت بیش از میزان تقاضا باشد، تخصیص آن کارمند لغو می شود.
  - ✓ اگر کم تر یا مساوی باشد، از بین کارمندانی که می توانند در این سطح کار کنند و تخصیص داده نشده اند در صورت برقراری بقیه محدودیت‌ها یکی انتخاب شده و تخصیص داده شده و تخصیص کارمند  $m$  لغو می شود. اگر کارمندی در سطح مهارت کارمند  $m$  تخصیص داده شده باشد و بتواند در سطح مهارت کارشناس نیز کار کند، تخصیصش با کارمند  $m$  عوض می شود. در صورتی که این کارها امکان پذیر نباشد، کارمندانی که می توانند در این سطح تخصیص یابند، در صورت امکان تخصیصشان در شیفت‌های قبل یا بعد تغییر داده می شود تا بتوانند در شیفت جاری در سطح مهارت کارشناس تخصیص یابند.
۳. برای مهارت کارشناس سطح تقاضا رعایت نشده:
  - ✓ اگر تعداد تخصیص‌ها بیشتر از سطح تقاضا باشد، تا برقراری رابطه تساوی برخی از تخصیص‌ها لغو می شوند.
  - ✓ اگر کم تر از سطح تقاضا باشد، سعی می شود کارمندی با رعایت محدودیت‌ها انتخاب و تخصیص داده شود و مانند حالت قبل اگر کارمندی پیدا نشد، در صورت امکان با تغییر زمان بندی شیفت های قبل و بعد، سطح تقاضا برآورده شود.

#### شکل ۴- رویه شدنی بودن جواب.

Figure 4- Procedural feasibility of the solution.

برای بقیه محدودیت‌ها با توجه به ماهیت محدودیت، کارمندان به همین شیوه انتخاب شده و زمان بندی‌ها در صورت امکان تا برقراری محدودیت‌ها تغییر می کنند. اگر برای یک محدودیت نتوان کارمند با رعایت همه شرایط انتخاب کرد، از آن جواب نمی توان به یک جواب شدنی رسید و رویه متوقف خواهد شد.

#### به روز رسانی مجموعه مرجع

در این پایان نامه، مجموعه مرجع از دو زیر مجموعه به نام های  $Refset1$  (جواب های با کیفیت) و  $Refset2$  (جواب های پراکنده) تشکیل شده است. بیشینه ظرفیت این دو زیر مجموعه به ترتیب  $b_1$  و  $b_2$  است، به عبارت دیگر  $|Refset| = b_1 + b_2$ . برای تشکیل مجموعه مرجع، ابتدا از زیر مجموعه  $refset1$  تشکیل می گردد. بدین منظور از آرشیو پارتو حداکثر  $b_1$  جواب غالب غیر تکراری که دارای بیشترین پراکندگی می باشند، انتخاب و به زیر مجموعه  $refset1$  اضافه می شوند. اگر تعداد جواب های موجود در آرشیو از  $b_1$  کم تر باشند، بقیه مجموعه از بین بهترین جواب های موجود در جمعیت جواب ها، انتخاب خواهند شد. برای تشکیل زیر مجموعه  $refset2$  از سه فاکتور سطح، فاصله ازدحام و کمینه فاصله اقلیدسی از مجموعه  $refset1$  استفاده می شود. فاصله ازدحام، پراکندگی بین جواب های  $refset2$  و فاصله اقلیدسی پراکندگی بین جواب های  $refset1$  و  $refset2$  را تضمین می کنند. برای هر کدام از جواب های موجود در جمعیت جواب ها که در  $refset1$  قرار ندارند، سه فاکتور فوق، دو معیار  $[cs = rank/crowding-distance]$  و  $[1/Euclidean-distance]$  محاسبه می شوند. سپس دو معیار فوق به عنوان دو هدف برای جواب ها در نظر گرفته شده و از بین جواب هایی که با این دو هدف غالب هستند، حداکثر  $b_2$  جواب غیر تکراری انتخاب و به زیر مجموعه  $refset2$  اضافه می شوند.

#### روش تولید زیر مجموعه ها

با استفاده از این روش، زیر مجموعه هایی از جواب های مجموعه مرجع به منظور استفاده در روش ترکیب جواب ها برای تولید جواب های جدید، تشکیل خواهند شد. در اینجا سه نوع زیر مجموعه  $(S_1, S_2, S_3)$  دوتایی از جواب های مجموعه مرجع تشکیل می شوند که به شرح زیر می باشند:

۱.  $S_1$ : تمام زیر مجموعه های دوتایی مجموعه  $refset1$  می باشد که حداکثر دارای  $|b_1 - 1|$  است.
۲.  $S_2$ : تمام زیر مجموعه های دوتایی مجموعه  $refset2$  می باشد که حداکثر دارای  $|b_2 - 1|$  است.
۳.  $S_3$ : این زیر مجموعه دوتایی شامل جواب های  $refset1$  و  $refset2$  می باشد که هر عضو آن بدین صورت ساخته می شود که عنصر اول هر عضو از اعضای  $refset1$  انتخاب می شود و عنصر دوم یکی از اعضای  $refset2$  می باشد که بیشترین فاصله اقلیدسی را با عنصر اول داشته باشد. این زیر مجموعه شامل  $b_1$  عضو است.

## روش ترکیب زیرمجموعه‌های منتخب

در این مقاله از یک عملگر تقاطع تک نقطه‌ای جهت ترکیب جواب‌ها استفاده شده است. ورودی این عملگر، دو جواب به‌عنوان والد می‌باشند. در این عملگر،  $i$  به‌طور تصادفی به‌عنوان اندیس یک روز انتخاب گردیده، سپس فرزند اول کلیه تخصیص‌های روز اول تا روز  $i$ م خود را از والد اول می‌گیرد و مابقی روزهای فرزند اول تا جایی که امکان داشته باشد و با حفظ شرایط شدنی بودن، مانند والد دوم تخصیص داده می‌شوند. جهت تشکیل فرزند دوم نیز مانند فرزند اول اقدام می‌شود، با این تفاوت که نقش والدین عوض خواهد شد.

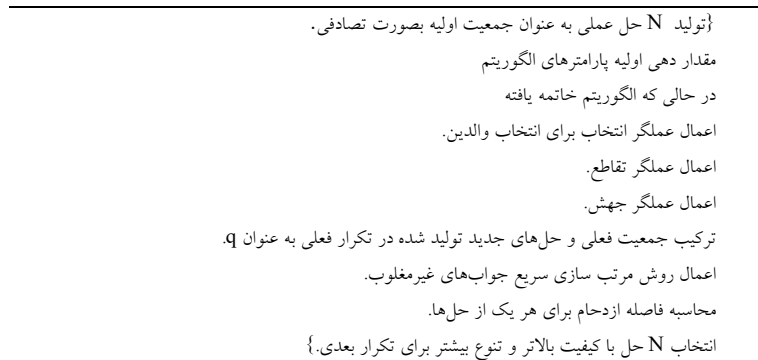
## تشکیل مجموعه جدید جواب‌ها برای تکرار بعدی

فرض کنید در انتهای یک تکرار الگوریتم جست‌وجوی پراکنده، تعداد جواب‌های غالب موجود در آرشیو پارتو برابر  $w$  باشد. برای تشکیل مجموعه جدید، یکی از حالت‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱. اگر  $w = N$  باشد، تمام جواب‌های پارتو به‌عنوان ورودی‌های روش تولید جواب‌های پراکنده در نظر گرفته می‌شوند.
۲. اگر  $w > N$  باشد،  $N$  جواب که دارای پراکندگی بیشتری هستند، به‌عنوان ورودی‌های روش تولید جواب‌های پراکنده در نظر گرفته می‌شوند.
۳. اگر  $w < N$  باشد، تمام جواب‌های پارتو به‌عنوان جواب‌های ابتدایی روش تولید جواب‌های پراکنده در نظر گرفته شده و  $N - w$  جواب باقیمانده از بین جواب‌های مغلوبی که از فاصله اقلیدسی کم‌تری نسبت به نقطه آرمانی پویا برخوردار هستند، انتخاب می‌گردند. نقطه آرمانی پویا یک نقطه آرمانی تقریبی است که مختصاتش مقدار بهینه محلی هر یک از توابع هدف می‌باشد. نقطه آرمانی پویا، شامل بهترین توابع هدفی است که تا به حال حاصل شده‌اند.

## ۳-۲- الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب

ساختار کلی این الگوریتم به‌صورت شکل ۶ می‌باشد. در ادامه نیز جزییات این الگوریتم بیان شده است.



شکل ۵- ساختار کلی الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی غیر مغلوب.

Figure 5- General structure of the genetic algorithm with non-dominated sorting.

در مورد الگوریتم *NSGAI* تولید جواب‌های اولیه به‌صورت تصادفی است. در واقع به‌طور تصادفی  $N$  جواب شدنی به‌عنوان جمعیت تکرار اول الگوریتم تولید خواهند شد. برای انتخاب والدین از روش تورنمنت دوتایی استفاده شده است. در هر بار انتخاب، دو جواب غیر مغلوب به‌عنوان والد انتخاب خواهند شد. همچنین از یک عملگر تقاطع تک نقطه‌ای استفاده شده است که کاملاً مانند عملگر تقاطع شرح داده شده در بخش ترکیب جواب‌ها در الگوریتم جست‌وجوی پراکنده می‌باشد. در پیاده‌سازی این الگوریتم در عملگر جهش، سه اندیس روز، شیف و کارمند به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند و اگر آن کارمند در آن روز و آن شیف تخصیص داده شده باشد، تخصیص لغو شده و به کارمند واجد شرایط دیگری که مطلوبیت بالاتری دارد، داده می‌شود.

## ۴- نتایج محاسباتی

در این مقاله، یک مدل ریاضی جدید برای مساله زمان بندی نیروی انسانی چند مهارته چندهدفه بر اساس یک مطالعه موردی ارائه شد. این مساله، به دلیل ساختار حاکم بر آن و پیچیدگی آن از لحاظ زمان حل در دسته مسایل غیر چندجمله ای سخت قرار می گیرد. دو الگوریتم فرا ابتکاری متفاوت برای حل مدل چندهدفه تعمیم داده شد. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم های پیشنهادی، ۷ مساله نمونه با استفاده از الگوریتم های تعمیم یافته حل خواهد شد. در ادامه، نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل با استفاده از الگوریتم های تعمیم یافته که در محیط نرم افزار *MATLAB R2012a* بر روی یک کامپیوتر شخصی با مشخصات ۴ گیگابایت حافظه رم و ۲/۵۳ گیگاهرتز سی پی یوی چهار هسته ای کد شده است، به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۴-۱- مشخصات مسایل نمونه

از آنجایی که مدل ریاضی ارائه شده برای مساله زمان بندی نیروی انسانی چند مهارته چندهدفه یک مدل جدید مبتنی بر یک مطالعه موردی می باشد و به دلیل ماهیت خاص مساله تعریف شده، استفاده از مسایل نمونه موجود در حیطه زمان بندی نیروی انسانی کمکی به مقایسه و ارزیابی کارایی الگوریتم ها نمی کند، لذا از ۷ مساله نمونه برای بررسی عملکرد محدودیت ها و ارزیابی کارایی الگوریتم های تعمیم یافته استفاده خواهد شد. جدول ۲، ۷ مساله مورد بررسی را نشان می دهد. جدول ۲، ویژگی های مشترک مسایل نمونه را نشان می دهد. جدول ۳ تا جدول ۷، تعداد کارکنان، تخصص و سطح مهارت واقعی هر نیروی کار، میزان مطلوبیت استفاده از هر نیروی کار و همچنین میزان دستمزد برای هر شیفت را برای ۲ مساله نمونه مبتنی بر واقعیت نشان می دهد (اطلاعات مربوط به سایر مسایل نمونه به علت حجم زیاد در پیوست شماره ۱ آورده شده است).

جدول ۳- مسایل تولید شده.

Table 3- Generated issues.

| سایز      | مثال    | تعداد نیروی انسانی | تعداد تخصص |
|-----------|---------|--------------------|------------|
| کوچک      | مساله ۱ | 40                 | 3          |
| بزرگ      | مساله ۲ | 71                 | 3          |
|           | مساله ۳ | 90                 | 3          |
|           | مساله ۴ | 142                | 3          |
|           | مساله ۵ | 154                | 3          |
| خیلی بزرگ | مساله ۶ | 296                | 3          |
|           | مساله ۷ | 426                | 3          |

جدول ۴- ویژگی های مشترک مسایل نمونه.

Table 4- Common features of problems.

|                                                                                       |                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| افق برنامه ریزی                                                                       | ۲۸ روز                                                           |
| تعداد شیفت ها                                                                         | ۳ شیفت<br>(شیفت m: صبح، شیفت a: بعداز ظهر و شیفت n: شب)          |
| تعداد تخصص ها                                                                         | ۳ تخصص<br>(تخصص S1: مکانیک، تخصص<br>S2: برق، تخصص S3: الکترونیک) |
| تعداد سطوح مهارت در هر تخصص                                                           | ۲ سطح مهارت<br>(مهارت ۱: تکنسین، مهارت ۲: کارشناس)               |
| طول زمانی هر شیفت                                                                     | ۸ ساعت                                                           |
| حداکثر ساعات کاری مجاز برای هر نیروی کار در طی یک روز                                 | ۸ ساعت                                                           |
| حداقل ساعات کاری مورد نیاز برای هر نیروی کار در طی دوره زمان بندی                     | ۱۳۶ ساعت                                                         |
| حداکثر ساعات کاری مجاز برای هر نیروی کار در طی دوره زمان بندی                         | ۱۷۶ ساعت                                                         |
| ضریب جریمه برای تخصیص هر نیروی کار در سطح مهارت پایین تر از مهارت واقعی اش در یک شیفت | ۱۵۰ واحد پولی                                                    |

جدول ۵- تعداد نیروهای مورد نیاز مساله نمونه ۱ در هر شیفت و هر روز.

Table 5- Number of workers required for Example 1 per shift and per day.

| صبح | عصر | شب | کل یک روز | کل موجودی |                   |
|-----|-----|----|-----------|-----------|-------------------|
| 2   | 1   | 1  | 4         | 6         | کارشناس مکانیک    |
| 3   | 4   | 3  | 10        | 13        | تکنسین مکانیک     |
| 2   | 1   | 1  | 4         | 6         | کارشناس برق       |
| 3   | 3   | 2  | 8         | 11        | تکنسین برق        |
| -   | -   | -  | -         | -         | کارشناس الکترونیک |
| 1   | 1   | 1  | 3         | 4         | تکنسین الکترونیک  |
| 11  | 10  | 8  | 29        | 40        | کل یک شیفت        |

جدول ۶- سایر ویژگی های مساله نمونه ۱.

Table 6- Other characteristics of problem 1.

| شماره کارکنان | تخصص | سطح مهارت | Cmm | Cma | Cmn | Pm   |
|---------------|------|-----------|-----|-----|-----|------|
| 1             | S1   | کارشناس   | 100 | 100 | 130 | 0.7  |
| 2             | S1   | کارشناس   | 100 | 100 | 130 | 0.7  |
| 3             | S1   | کارشناس   | 110 | 110 | 143 | 0.8  |
| 4             | S1   | کارشناس   | 115 | 115 | 150 | 0.85 |
| 5             | S1   | کارشناس   | 120 | 120 | 156 | 0.9  |
| 6             | S1   | کارشناس   | 120 | 120 | 156 | 0.9  |
| 7             | S1   | تکنسین    | 65  | 65  | 84  | 0.6  |
| 8             | S1   | تکنسین    | 65  | 65  | 84  | 0.6  |
| 9             | S1   | تکنسین    | 65  | 65  | 84  | 0.6  |
| 10            | S1   | تکنسین    | 70  | 70  | 90  | 0.7  |
| 11            | S1   | تکنسین    | 70  | 70  | 90  | 0.7  |
| 12            | S1   | تکنسین    | 70  | 70  | 90  | 0.7  |
| 13            | S1   | تکنسین    | 75  | 75  | 99  | 0.75 |
| 14            | S1   | تکنسین    | 80  | 80  | 104 | 0.8  |
| 15            | S1   | تکنسین    | 80  | 80  | 104 | 0.8  |
| 16            | S1   | تکنسین    | 80  | 80  | 104 | 0.8  |
| 17            | S1   | تکنسین    | 85  | 85  | 110 | 0.85 |
| 18            | S1   | تکنسین    | 90  | 90  | 115 | 0.9  |
| 19            | S1   | تکنسین    | 90  | 90  | 115 | 0.9  |
| 20            | S2   | کارشناس   | 95  | 95  | 126 | 0.65 |
| 21            | S2   | کارشناس   | 100 | 100 | 130 | 0.7  |
| 22            | S2   | کارشناس   | 110 | 110 | 143 | 0.8  |
| 23            | S2   | کارشناس   | 110 | 110 | 143 | 0.8  |
| 24            | S2   | کارشناس   | 120 | 120 | 156 | 0.9  |
| 25            | S2   | کارشناس   | 120 | 120 | 156 | 0.9  |
| 26            | S2   | تکنسین    | 60  | 60  | 79  | 0.55 |
| 27            | S2   | تکنسین    | 65  | 65  | 84  | 0.6  |
| 28            | S2   | تکنسین    | 70  | 70  | 90  | 0.7  |
| 29            | S2   | تکنسین    | 70  | 70  | 90  | 0.7  |
| 30            | S2   | تکنسین    | 75  | 75  | 99  | 0.75 |
| 31            | S2   | تکنسین    | 75  | 75  | 99  | 0.75 |

|     |     |    |    |        |    |    |
|-----|-----|----|----|--------|----|----|
| 0.8 | 104 | 80 | 80 | تکنسین | S2 | 32 |
| 0.8 | 104 | 80 | 80 | تکنسین | S2 | 33 |

جدول ۶- ادامه.

Table 6- Continued.

| شماره کارکنان | تخصص | سطح مهارت | Cmm | Cma | Cmn | Pm   |
|---------------|------|-----------|-----|-----|-----|------|
| 34            | S2   | تکنسین    | 85  | 85  | 110 | 0.85 |
| 35            | S2   | تکنسین    | 85  | 85  | 110 | 0.85 |
| 36            | S2   | تکنسین    | 90  | 90  | 115 | 0.9  |
| 37            | S3   | تکنسین    | 70  | 70  | 90  | 0.7  |
| 38            | S3   | تکنسین    | 75  | 75  | 99  | 0.75 |
| 39            | S3   | تکنسین    | 75  | 75  | 99  | 0.75 |
| 40            | S3   | تکنسین    | 85  | 85  | 110 | 0.85 |

جدول ۷- تعداد نیروهای مورد نیاز مساله نمونه ۲ در هر شیفت و هر روز.

Table 7- Number of workers required for Example 2 per shift and per day.

| صبح | عصر | شب | کل یک روز | کل موجودی |                   |
|-----|-----|----|-----------|-----------|-------------------|
| 3   | 2   | 2  | 7         | 10        | کارشناس مکانیک    |
| 7   | 6   | 5  | 18        | 24        | تکنسین مکانیک     |
| 3   | 2   | 1  | 6         | 9         | کارشناس برق       |
| 6   | 5   | 6  | 17        | 22        | تکنسین برق        |
| -   | -   | -  | -         | -         | کارشناس الکترونیک |
| 2   | 1   | 1  | 4         | 6         | تکنسین الکترونیک  |
| 21  | 16  | 15 | 52        | 71        | کل یک شیفت        |

جدول ۸- سایر ویژگی‌های مساله نمونه ۲.

Table 8- Other features of problem 2.

| شماره کارکنان | تخصص   | سطح مهارت | Cmh1 | Cmh2 | Cmh3 | Pm   |
|---------------|--------|-----------|------|------|------|------|
| 1             | مکانیک | کارشناس   | 140  | 140  | 185  | 0.95 |
| 2             | مکانیک | کارشناس   | 135  | 135  | 178  | 0.90 |
| 3             | مکانیک | کارشناس   | 135  | 135  | 178  | 0.90 |
| 4             | مکانیک | کارشناس   | 130  | 130  | 170  | 0.85 |
| 5             | مکانیک | کارشناس   | 130  | 130  | 170  | 0.85 |
| 6             | مکانیک | کارشناس   | 130  | 130  | 170  | 0.85 |
| 7             | مکانیک | کارشناس   | 125  | 125  | 165  | 0.80 |
| 8             | مکانیک | کارشناس   | 120  | 120  | 160  | 0.75 |
| 9             | مکانیک | کارشناس   | 120  | 120  | 160  | 0.75 |
| 10            | مکانیک | کارشناس   | 115  | 115  | 155  | 0.7  |
| 11            | مکانیک | تکنسین    | 110  | 110  | 145  | 0.95 |
| 12            | مکانیک | تکنسین    | 110  | 110  | 145  | 0.95 |
| 13            | مکانیک | تکنسین    | 110  | 110  | 145  | 0.95 |
| 14            | مکانیک | تکنسین    | 106  | 106  | 140  | 0.90 |
| 15            | مکانیک | تکنسین    | 106  | 106  | 140  | 0.90 |
| 16            | مکانیک | تکنسین    | 106  | 106  | 140  | 0.90 |
| 17            | مکانیک | تکنسین    | 103  | 103  | 136  | 0.85 |
| 18            | مکانیک | تکنسین    | 103  | 103  | 136  | 0.85 |
| 19            | مکانیک | تکنسین    | 103  | 103  | 136  | 0.85 |
| 20            | مکانیک | تکنسین    | 103  | 103  | 136  | 0.85 |
| 21            | مکانیک | تکنسین    | 100  | 100  | 130  | 0.80 |
| 22            | مکانیک | تکنسین    | 100  | 100  | 130  | 0.80 |

جدول ۸- ادامه.

Table 8- Continued.

| شماره کارکنان | تخصص   | سطح مهارت | Cmh1 | Cmh2 | Cmh3 | Pm   |
|---------------|--------|-----------|------|------|------|------|
| 23            | مکانیک | تکنسین    | 100  | 100  | 130  | 0.80 |
| 24            | مکانیک | تکنسین    | 97   | 97   | 125  | 0.75 |
| 25            | مکانیک | تکنسین    | 97   | 97   | 125  | 0.75 |
| 26            | مکانیک | تکنسین    | 97   | 97   | 125  | 0.75 |
| 27            | مکانیک | تکنسین    | 97   | 97   | 125  | 0.75 |
| 28            | مکانیک | تکنسین    | 93   | 93   | 120  | 0.70 |
| 29            | مکانیک | تکنسین    | 93   | 93   | 120  | 0.70 |
| 30            | مکانیک | تکنسین    | 93   | 93   | 120  | 0.70 |
| 31            | مکانیک | تکنسین    | 93   | 93   | 120  | 0.70 |
| 32            | مکانیک | تکنسین    | 90   | 90   | 115  | 0.65 |

|      |     |     |     |         |           |    |
|------|-----|-----|-----|---------|-----------|----|
| 0.65 | 115 | 90  | 90  | تکنسین  | مکانیک    | 33 |
| 0.65 | 115 | 90  | 90  | تکنسین  | مکانیک    | 34 |
| 0.95 | 185 | 140 | 140 | کارشناس | برق       | 35 |
| 0.95 | 185 | 140 | 140 | کارشناس | برق       | 36 |
| 0.90 | 178 | 135 | 135 | کارشناس | برق       | 37 |
| 0.85 | 170 | 130 | 130 | کارشناس | برق       | 38 |
| 0.85 | 170 | 130 | 130 | کارشناس | برق       | 39 |
| 0.80 | 165 | 125 | 125 | کارشناس | برق       | 40 |
| 0.75 | 160 | 120 | 120 | کارشناس | برق       | 41 |
| 0.75 | 160 | 120 | 120 | کارشناس | برق       | 42 |
| 0.70 | 155 | 115 | 115 | کارشناس | برق       | 43 |
| 0.95 | 145 | 110 | 110 | تکنسین  | برق       | 44 |
| 0.95 | 145 | 110 | 110 | تکنسین  | برق       | 45 |
| 0.95 | 145 | 110 | 110 | تکنسین  | برق       | 46 |
| 0.90 | 140 | 106 | 106 | تکنسین  | برق       | 47 |
| 0.90 | 140 | 106 | 106 | تکنسین  | برق       | 48 |
| 0.90 | 140 | 106 | 106 | تکنسین  | برق       | 49 |
| 0.90 | 140 | 106 | 106 | تکنسین  | برق       | 50 |
| 0.85 | 136 | 103 | 103 | تکنسین  | برق       | 51 |
| 0.85 | 136 | 103 | 103 | تکنسین  | برق       | 52 |
| 0.85 | 136 | 103 | 103 | تکنسین  | برق       | 53 |
| 0.80 | 130 | 100 | 100 | تکنسین  | برق       | 54 |
| 0.80 | 130 | 100 | 100 | تکنسین  | برق       | 55 |
| 0.75 | 125 | 97  | 97  | تکنسین  | برق       | 56 |
| 0.75 | 125 | 97  | 97  | تکنسین  | برق       | 57 |
| 0.75 | 125 | 97  | 97  | تکنسین  | برق       | 58 |
| 0.75 | 125 | 97  | 97  | تکنسین  | برق       | 59 |
| 0.70 | 120 | 93  | 93  | تکنسین  | برق       | 60 |
| 0.70 | 120 | 93  | 93  | تکنسین  | برق       | 61 |
| 0.70 | 120 | 93  | 93  | تکنسین  | برق       | 62 |
| 0.65 | 115 | 90  | 90  | تکنسین  | برق       | 63 |
| 0.65 | 115 | 90  | 90  | تکنسین  | برق       | 64 |
| 0.65 | 115 | 90  | 90  | تکنسین  | برق       | 65 |
| 0.95 | 145 | 110 | 110 | تکنسین  | الکترونیک | 66 |

Table 8- Continued.

| شماره کارکنان | تخصص      | سطح مهارت | Cmh1 | Cmh2 | Cmh3 | Pm   |
|---------------|-----------|-----------|------|------|------|------|
| 67            | الکترونیک | تکنسین    | 106  | 106  | 140  | 09   |
| 68            | الکترونیک | تکنسین    | 106  | 106  | 140  | 09   |
| 69            | الکترونیک | تکنسین    | 103  | 103  | 136  | 0.85 |
| 70            | الکترونیک | تکنسین    | 103  | 103  | 136  | 0.85 |
| 71            | الکترونیک | تکنسین    | 100  | 100  | 130  | 0.80 |

## ۴-۲- تنظیم پارامترها در الگوریتم‌های پیشنهادی به روش تاگوچی

در تمامی الگوریتم‌های فرا ابتکاری همواره پارامتر یا پارامترهایی وجود دارد که بایستی مقادیر آن‌ها بسته به هر مساله‌ای تعیین شوند. برای تنظیم پارامترهای موجود در الگوریتم‌های پیشنهادی این پژوهش، از روش آماری طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده شده است. در روش تاگوچی، آرایه‌های متعامد، برای مطالعه تعداد زیادی از متغیرهای تصمیم با تعداد کمی از آزمایش‌ها استفاده شده است. تاگوچی فاکتورها را به دو کلاس اصلی تقسیم می‌کند: فاکتورهای قابل کنترل و فاکتورهای نویز. فاکتورهای نویز آن‌هایی هستند که نمی‌توانند به‌طور مستقیم کنترل شوند. جدول ۱۳ بهترین سطح برای این فاکتورها را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، *Mutation* بیشترین تاثیر را بر روی الگوریتم *NSGA-II* دارد، *Pop size* و *N\_Iteration* به ترتیب دیگر فاکتورهای موثر بر الگوریتم *NSGA-II* می‌باشند.

جدول ۹- رتبه‌بندی اثرگذاری هر فاکتور الگوریتم *NSGA-II*.

Table 9- Ranking of the effectiveness of each factor of the NSGA-II algorithm.

| Response Table for Signal to Noise Ratios Smaller is Better |          |             |          |
|-------------------------------------------------------------|----------|-------------|----------|
| Level                                                       | Pop Size | N_Iteration | Mutation |
| 1                                                           | 10.122   | 14.193      | 5.647    |
| 2                                                           | 15.174   | 8.657       | 11.539   |
| 3                                                           | 9.147    | 11.839      | 12.590   |
| Delta                                                       | 6.027    | 5.536       | 6.944    |
| Rank                                                        | 2        | 3           | 1        |

## ۴-۳- نتایج محاسباتی

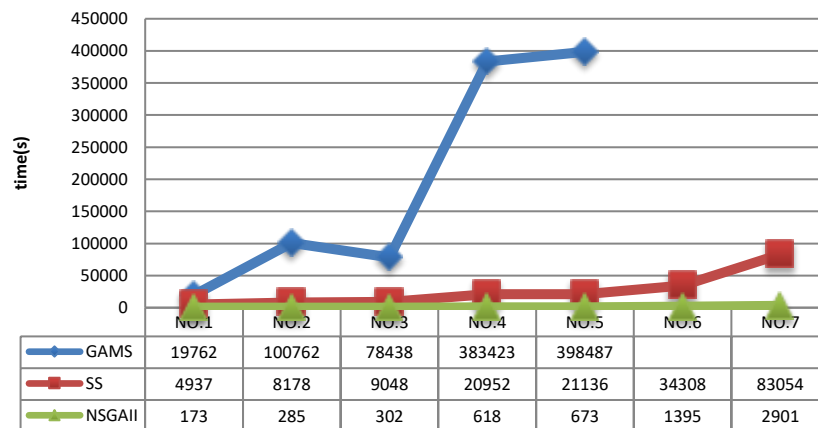
در این بخش عملکرد الگوریتم‌های *SS* و *NSGA-II* و حل‌کننده دقیق *GAMS* برای حل مساله نیروی انسانی مقایسه می‌شوند. الگوریتم‌های *SS* و *NSGA-II* پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار مطلب *R2012a* کدنویسی شده‌اند و مسایل مورد بررسی، در یک کامپیوتر شخصی با ۴ گیگابایت رم، سی‌پی‌یو ۴ هسته‌ای و قدرت پردازنده ۲/۵۳ گیگاهرتز اجرا شده‌اند. مقایسه جواب‌های به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار *GAMS 24.2* و الگوریتم‌های توسعه‌یافته برای کوچک‌ترین اندازه مساله (مساله نمونه ۱)، عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی را تایید می‌کند.

در این قسمت مسایل تولیدشده توسط الگوریتم‌های پیشنهادی *SS* و *NSGA-II* حل شده است. در ابتدا زمان حل مسایل مختلف مقایسه می‌شود، زمان حل مسایل کوچک و بزرگ توسط الگوریتم‌های *SS* و *NSGA-II* حل‌کننده *GAMS* مطابق جدول ۹ و شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین نتایج بررسی شاخص‌های عملکردی حاصل از هر الگوریتم مطابق جدول ۱۰ و شکل ۸ تا شکل ۱۰ نشان داده شده است. نقد و بررسی نتایج به‌دست‌آمده در مورد عملکرد این الگوریتم‌ها در ادامه انجام شده است. همان‌طوری که از شکل ۷ پیداست مساله *NP-Hard* بوده و زمان حل آن بسیار طولانی و زمان‌بر می‌باشد. همچنین در مقایسه بین دو الگوریتم *SS* و *NSGA-II* الگوریتم *NSGA-II* سریع‌تر از الگوریتم *SS* عمل می‌کند و عملکرد بهتری از لحاظ زمان حل دارد که این به دلیل فازهای کم‌تر این الگوریتم می‌باشد.

جدول ۱۰- نتایج زمان حل مسایل مختلف با استفاده از روش های حل مختلف.

Table 10- Results of solving time for different problems using different solution methods.

| زمان حل (ثانیه) |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| حل کننده        | مساله ۱ | مساله ۲ | مساله ۳ | مساله ۴ | مساله ۵ | مساله ۶ | مساله ۷ |
| GAMS            | 19762   | 100769  | 78438   | 383423  | 398487  | -       | -       |
| SS              | 4937    | 8178    | 9048    | 20952   | 21136   | 34308   | 83054   |
| NSGA-II         | 173     | 285     | 302     | 618     | 673     | 1395    | 2901    |



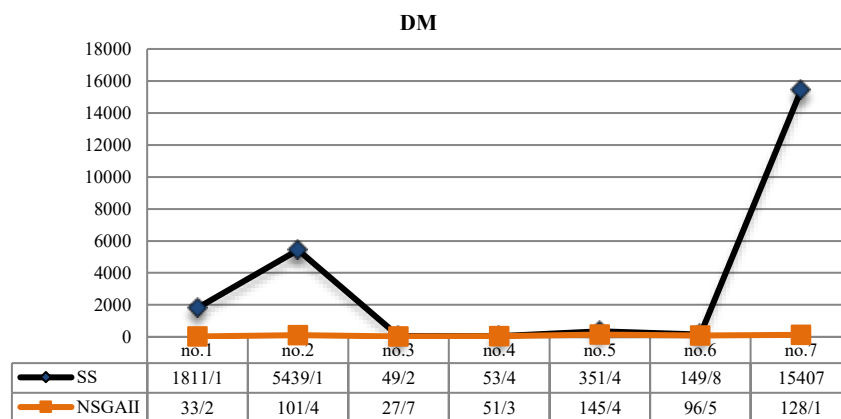
شکل ۶- نتایج زمان حل مسایل مختلف با استفاده از روش های حل.

Figure 6- Results of solving time for different problems using solution methods.

جدول ۱۱- مقدار شاخص های عملکردی به دست آمده هر مساله حل شده توسط الگوریتم SS و NSGA-II.

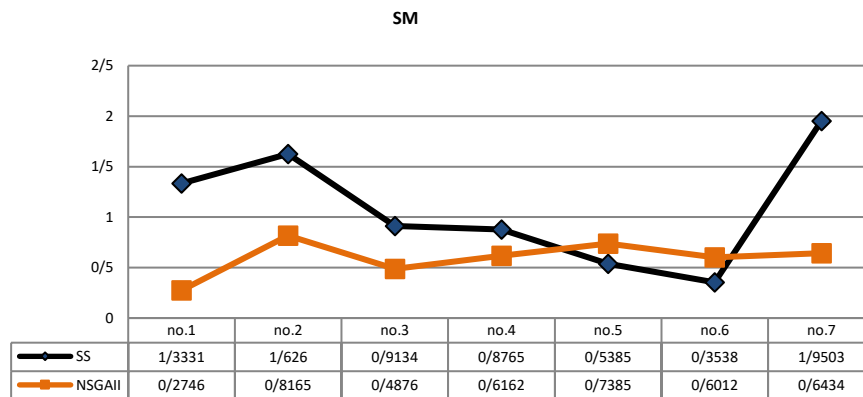
Table 11- The value of the performance indicators obtained for each problem solved by the SS and NSGA-II algorithms.

| NSGA-II |         |       | Scatter Search |         |        | متریک   |
|---------|---------|-------|----------------|---------|--------|---------|
| SM      | Q M     | DM    | SM             | QM      | DM     |         |
| 0.2746  | 60.5882 | 33.2  | 1.3331         | 39.4118 | 1811.1 | مساله ۱ |
| 0.8165  | 1.1111  | 101.4 | 1.6260         | 98.8889 | 5439.1 | مساله ۲ |
| 0.4876  | 25      | 27.7  | 0.9134         | 75      | 49.2   | مساله ۳ |
| 0.6162  | 4.5455  | 51.3  | 0.8765         | 95.4545 | 53.4   | مساله ۴ |
| 0.7385  | 3.2468  | 145.4 | 0.5385         | 96.7532 | 351.4  | مساله ۵ |
| 0.6012  | 0       | 96.5  | 0.3538         | 100     | 149.8  | مساله ۶ |
| 0.6434  | 5.9322  | 128.1 | 1.9503         | 94.0678 | 15407  | مساله ۷ |



شکل ۷- مقایسه شاخص DM مسایل حل شده توسط دو الگوریتم SS و NSGA-II.

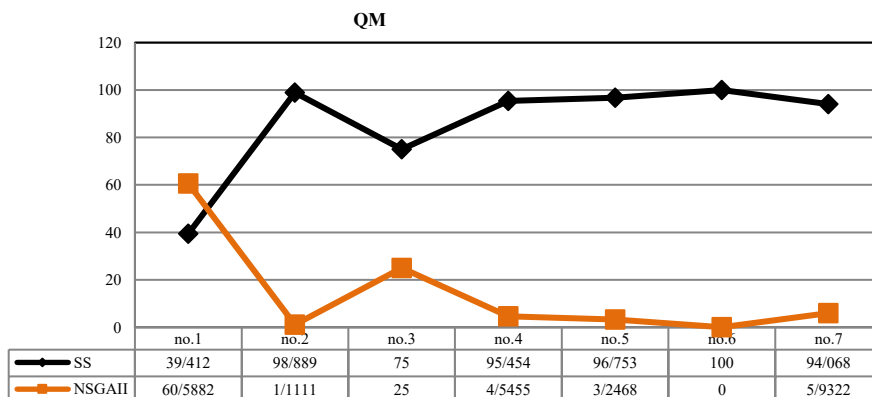
Figure 7- Comparison of DM index of problems solved by SS and NSGA-II dual algorithms.



شکل ۸- مقایسه شاخص QM مسایل حل شده توسط دو الگوریتم SS و NSGA-II.

Figure 8- Comparison of QM index of problems solved by two algorithms SS and NSGA-II.

شاخص کیفی کیفیت نشان‌دهنده کیفیت جواب‌های تولیدشده توسط الگوریتم‌های پیشنهادی در مقایسه با یکدیگر می‌باشد. با توجه به شکل ۱۰ جواب‌های تولیدشده در همه مسایل به جز مساله ۱ نشان‌دهنده این است که الگوریتم SS کیفیت بهتری را نسبت به الگوریتم NSGA-II داشته است، به نحوی که در ۵ مساله حل‌های به دست آمده توسط الگوریتم SS در مقایسه با الگوریتم NSGA-II کیفیت بالای ۹۰٪ را ایجاد کرده‌اند.



شکل ۹- مقایسه شاخص SM مسایل حل شده توسط دو الگوریتم SS و NSGA-II.

Figure 9- Comparison of SM index of problems solved by two algorithms SS and NSGA-II.

برخلاف دو شاخص قبلی که هر دو از شاخص‌های کیفی بودند شاخص یکنواختی فضا از شاخص‌های کمی می‌باشد. معیار مقایسه این شاخص نیز بدین صورت است که هر چه الگوریتم‌های پیشنهادی در حل یک مساله مقدار کم‌تری را بپذیرند، الگوریتم عملکرد بهتری را داشته است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری را دارد، اما در دو مساله ۵ و ۶ الگوریتم SS عملکرد بهتری را نسبت به الگوریتم NSGA-II نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل ریاضی جدید برای مساله زمان‌بندی نیروی انسانی چند مهارته چندهدفه مبتنی بر یک مطالعه موردی توسعه شده است. در این مساله، کارکنان بر اساس تخصص و سطح مهارتشان طبقه‌بندی شده‌اند. به همین منظور سعی می‌کند که در دوره‌های برنامه‌ریزی حداکثر دقت و نظم را رعایت کند و به امر آموزش و ارتقای خود توجه بیشتری نماید تا درجه مطلوبیت بیشتری کسب کند که در دوره‌های بعدی برنامه‌ریزی به تعداد شیفت‌های بیشتری تخصیص یابد. از این رو مدل توسعه داده شده یک مدل چندهدفه چند مهارته می‌باشد. مدل در اندازه کوچک حل دقیق گردیده و اعتبار مدل تصدیق شد. به علت NP-Hard بودن مساله برای حل مساله در اندازه‌های بزرگ و خیلی بزرگ از روش‌های فرا ابتکاری SS و NSGAII استفاده گردیده است. توضیحات کاملی در مورد شبه کد و نحوه عملکرد الگوریتم‌ها نیز در این پژوهش بیان شده است. بعد از اجرای برنامه‌های تولیدشده برای مسایل نمونه، نتایج در مورد الگوریتم‌های پیشنهادی و حل دقیق حاصله از نرم‌افزار GAMS به شرح زیر به دست آمده است:

جواب‌های حاصل از مدل ریاضی در اندازه‌های کوچک به صورت بهینه حاصل شده است. از نظر زمان حل، الگوریتم *NSGA-II* نسبت به الگوریتم *SS* بهتر عمل کرده است که به دلیل تعداد فازهای کمتر الگوریتم *NSGA-II* می‌باشد. نتایج به دست آمده از شاخص‌های عملکردی در مجموع نشان‌دهنده آن است که الگوریتم *SS* عملکرد بهتر و با کیفیت تری را در مقایسه با الگوریتم *NSGA-II* ارائه کرده است. مهم‌ترین پیشنهادهایی که برای تحقیقات آتی از برنامه‌ریزی آرمانی برای اولویت و ارجحیت دادن بیشتر به ترجیحات و نیازهای کارکنان استفاده نمود. همچنین پویا نمودن زمان بندی را، به منظور زمان بندی دوره بعد با توجه به زمان بندی چند شیفت یا چند روز آخر مدنظر قرار داد. در نهایت نیز می‌توان قواع بیشتر کاری مانند در نظر گرفتن غیبت، استعفا و ترک کار در طی دوره زمان بندی و همچنین استخدام و اخراج کارکنان و عدم قطعیت‌ها را به صورت فازی و احتمالی در مدل قرار داد.

## منابع

- [1] Dantzig, G. B. (1954). Letter to the editor-a comment on edie's. *Traffic delays at toll booths, journal of the operations research society of america*, 2(3), 339–341. <https://doi.org/10.1287/opre.2.3.339>
- [2] Sadjadi, S. J., Heidari, M., & Alinezhad Esboei, A. (2014). Augmented  $\epsilon$ -constraint method in multiobjective staff scheduling problem: a case study. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 70, 1505–1514. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5352-8>
- [3] Brucker, P., Qu, R., & Burke, E. (2011). Personnel scheduling: Models and complexity. *European journal of operational research*, 210(3), 467–473. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.11.017>
- [4] Tien, J. M., & Kamiyama, A. (1982). On manpower scheduling algorithms. *Society for industrial and applied mathematics* 24(3), 275–287. <https://doi.org/10.1137/1024063>
- [5] Baker, K. R. (1976). Workforce allocation in cyclical scheduling problems: A survey. *Journal of the operational research society*, 27(1), 155–167. <https://doi.org/10.1057/jors.1976.30>
- [6] De Causmaecker, P., Demeester, P., Berghe, G. Vanden, & Verbeke, B. (2004). Analysis of real-world personnel scheduling problems. *Proceedings of the 5th international conference on practice and theory of automated timetabling, pittsburgh* (pp. 183–197). PATAT. <https://patatconference.org/patat2004/proceedings/183.pdf>
- [7] Bard, J. F. (2004). Selecting the appropriate input data set when configuring a permanent workforce. *Computers & industrial engineering*, 47(4), 371–389. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2004.09.004>
- [8] Burke, E. K., De Causmaecker, P., Berghe, G. Vanden, & Van Landeghem, H. (2004). The state of the art of nurse rostering. *Journal of scheduling*, 7, 441–499. <https://doi.org/10.1023/B:JOSH.0000046076.75950.0b>
- [9] Raff, S. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers & operations research*, 10(2), 63–211. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(83\)90030-8](https://doi.org/10.1016/0305-0548(83)90030-8)
- [10] Mercier, A., Cordeau, J. F., & Soumis, F. (2005). A computational study of Benders decomposition for the integrated aircraft routing and crew scheduling problem. *Computers & operations research*, 32(6), 1451–1476. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2003.11.013>
- [11] Rodrigues, M. M., de Souza, C. C., & Moura, A. V. (2006). Vehicle and crew scheduling for urban bus lines. *European journal of operational research*, 170(3), 844–862. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.06.035>
- [12] Franz, L. S., Baker, H. M., Leong, G. K., & Rakes, T. R. (1989). A mathematical model for scheduling and staffing multiclinic health regions. *European journal of operational research*, 41(3), 277–289. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90249-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90249-X)
- [13] And, R. G. M., & Johnson, D. S. (1983). Computers and Intractability: A guide to the theory of NP-completeness. *WH freeman & co., san francisco*, 48(2), 498–500. <https://doi.org/10.2307/2273574>
- [14] Brigandi, A. J., Dargon, D. R., Sheehan, M. J., & Spencer III, T. (1994). AT & T's call processing simulator (CAPS) operational design for inbound call centers. *Interfaces*, 24(1), 6–28. <https://doi.org/10.1287/inte.24.1.6>
- [15] Parkan, C., Lam, K., & Chan, H. N. (1999). Workforce planning at a bill inquiries centre. *International journal of modelling and simulation*, 19(2), 118–126. <https://doi.org/10.1080/02286203.1999.11760411>
- [16] Buffa, E. S., Cosgrove, M. J., & Luce, B. J. (1976). An integrated work shift scheduling system. *Decision sciences*, 7(4), 620–630. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1976.tb00706.x>
- [17] Molnar, G., Jakobović, D., & Pavelić, M. (2016). Workforce scheduling in inbound customer call centres with a case study. *Applications of evolutionary computation: 19th european conference, evoapplications 2016, porto, portugal, march 30--april 1, 2016, proceedings, part i 19* (pp. 831–846). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-31204-0\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31204-0_53)
- [18] Ertogral, K., & Bamuqabel, B. (2008). Developing staff schedules for a bilingual telecommunication call center with flexible workers. *Computers & industrial engineering*, 54(1), 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.040>
- [19] Avramidis, A. N., Chan, W., Gendreau, M., L'ecuyer, P., & Pisacane, O. (2010). Optimizing daily agent scheduling in a multiskill call center. *European journal of operational research*, 200(3), 822–832. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.042>
- [20] Arabeyre, J. P., Fearnley, J., Steiger, F. C., & Teather, W. (1969). The airline crew scheduling problem: A survey. *Transportation science*, 3(2), 140–163. <https://doi.org/10.1287/trsc.3.2.140>
- [21] Anbil, R., Gelman, E., Patty, B., & Tanga, R. (1991). Recent advances in crew-pairing optimization at American Airlines. *Interfaces*, 21(1), 62–74. <https://doi.org/10.1287/inte.21.1.62>

- [22] Mercier, A., & Soumis, F. (2007). An integrated aircraft routing, crew scheduling and flight retiming model. *Computers & operations research*, 34(8), 2251–2265. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.001>
- [23] Weide, O., Ryan, D., & Ehr Gott, M. (2010). An iterative approach to robust and integrated aircraft routing and crew scheduling. *Computers & operations research*, 37(5), 833–844. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.03.024>
- [24] Dück, V., Ionescu, L., Klierer, N., & Suhl, L. (2012). Increasing stability of crew and aircraft schedules. *Transportation research part c: Emerging technologies*, 20(1), 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.02.009>
- [25] Stojković, M., Soumis, F., & Desrosiers, J. (1998). The operational airline crew scheduling problem. *Transportation science*, 32(3), 232–245. <https://doi.org/10.1287/trsc.32.3.232>
- [26] Dillon, J. E., & Kontogiorgis, S. (1999). US Airways optimizes the scheduling of reserve flight crews. *Interfaces*, 29(5), 123–131. <https://doi.org/10.1287/inte.29.5.123>
- [27] Sze, S.-N., Suk Fong, A. N., & Chiew, K. L. (2012). An insertion heuristic manpower scheduling for in-flight catering service application. *Computational logistics: third international conference, iccl 2012*, (pp. 206–216). ICCL. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33587-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33587-7_15)
- [28] Guo, Y., Mellouli, T., Suhl, L., & Thiel, M. P. (2006). A partially integrated airline crew scheduling approach with time-dependent crew capacities and multiple home bases. *European journal of operational research*, 171(3), 1169–1181. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.024>
- [29] Zeghal, F. M., & Minoux, M. (2006). Modeling and solving a crew assignment problem in air transportation. *European journal of operational research*, 175(1), 187–209. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.11.028>
- [30] Medard, C. P., & Sawhney, N. (2007). Airline crew scheduling from planning to operations. *European journal of operational research*, 183(3), 1013–1027. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.046>
- [31] Souai, N., & Teghem, J. (2009). Genetic algorithm based approach for the integrated airline crew-pairing and rostering problem. *European journal of operational research*, 199(3), 674–683. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.10.065>
- [32] Ho, S. C., & Leung, J. M. Y. (2010). Solving a manpower scheduling problem for airline catering using metaheuristics. *European journal of operational research*, 202(3), 903–921. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.030>
- [33] Ghiani, G., Guerriero, E., Manni, A., Manni, E., & Potenza, A. (2013). Simultaneous personnel and vehicle shift scheduling in the waste management sector. *Waste management*, 33(7), 1589–1594. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.001>
- [34] Peters, E., de Matta, R., & Boe, W. (2007). Short-term work scheduling with job assignment flexibility for a multi-fleet transport system. *European journal of operational research*, 180(1), 82–98. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.032>
- [35] de Matta, R., & Peters, E. (2009). Developing work schedules for an inter-city transit system with multiple driver types and fleet types. *European journal of operational research*, 192(3), 852–865. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.045>
- [36] Al-Yakoob, S. M., & Sherali, H. D. (2007). Mixed-integer programming models for an employee scheduling problem with multiple shifts and work locations. *Annals of operations research*, 155, 119–142. <https://doi.org/10.1007/s10479-007-0210-4>
- [37] Bard, J. F., & Purnomo, H. W. (2005). A column generation-based approach to solve the preference scheduling problem for nurses with downgrading. *Socio-economic planning sciences*, 39(3), 193–213. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2004.04.001>
- [38] Beliën, J., & Demeulemeester, E. (2008). A branch-and-price approach for integrating nurse and surgery scheduling. *European journal of operational research*, 189(3), 652–668. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.060>
- [39] Dowsland, K. A., & Thompson, J. M. (2000). Solving a nurse scheduling problem with knapsacks, networks and tabu search. *Journal of the operational research society*, 51(7), 825–833. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600970>
- [40] Aickelin, U., & Dowsland, K. A. (2004). An indirect genetic algorithm for a nurse-scheduling problem. *Computers & operations research*, 31(5), 761–778. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(03\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00034-0)
- [41] Jaumard, B., Semet, F., & Vovor, T. (1998). A generalized linear programming model for nurse scheduling. *European journal of operational research*, 107(1), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00330-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00330-5)
- [42] Cheng, B. M. W., Lee, J. H. M., & Wu, J. C. K. (1997). A nurse rostering system using constraint programming and redundant modeling. *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, 1(1), 44–54. <https://doi.org/10.1109/4233.594027>
- [43] Siferd, S. P., & Benton, W. C. (1994). A decision modes for shift scheduling of nurses. *European journal of operational research*, 74(3), 519–527. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90228-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90228-3)
- [44] Nooriafshar, M. (1995). A heuristic approach to improving the design of nurse training schedules. *European journal of operational research*, 81(1), 50–61. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0131-G](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0131-G)
- [45] Lukman, D., May, J. H., Shuman, L. J., & Wolfe, H. B. (1991). Knowledge-based schedule formulation and maintenance under uncertainty. *Journal of the society for health systems*, 2(2), 42–64. <https://europepmc.org/article/med/1760545>
- [46] Burke, E., De Causmaecker, P., & Vanden Berghe, G. (1999). A hybrid tabu search algorithm for the nurse rostering problem. *Simulated evolution and learning: Second asia-pacific conference on simulated evolution and learning*. (pp. 187–194). Springer. [https://doi.org/10.1007/3-540-48873-1\\_25](https://doi.org/10.1007/3-540-48873-1_25)
- [47] Burke, E., Cowling, P., De Causmaecker, P., & Berghe, G. Vanden. (2001). A memetic approach to the nurse rostering problem. *Applied intelligence*, 15, 199–214. <https://doi.org/10.1023/A:1011291030731>
- [48] Bellanti, F., Carello, G., Della Croce, F., & Tadei, R. (2004). A greedy-based neighborhood search approach to a nurse rostering problem. *European journal of operational research*, 153(1), 28–40. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00096-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00096-1)

- [49] Gutjahr, W. J., & Rauner, M. S. (2007). An ACO algorithm for a dynamic regional nurse-scheduling problem in Austria. *Computers & operations research*, 34(3), 642–666. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.018>
- [50] Burke, E. K., Li, J., & Qu, R. (2010). A hybrid model of integer programming and variable neighbourhood search for highly-constrained nurse rostering problems. *European journal of operational research*, 203(2), 484–493. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.036>
- [51] Glass, C. A., & Knight, R. A. (2010). The nurse rostering problem: A critical appraisal of the problem structure. *European journal of operational research*, 202(2), 379–389. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.046>
- [52] Topaloglu, S., & Selim, H. (2010). Nurse scheduling using fuzzy modeling approach. *Fuzzy sets and systems*, 161(11), 1543–1563. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2009.10.003>
- [53] Bertels, S., & Fahle, T. (2006). A hybrid setup for a hybrid scenario: combining heuristics for the home health care problem. *Computers & operations research*, 33(10), 2866–2890. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.01.015>
- [54] Eveborn, P., Flisberg, P., & Rönnqvist, M. (2006). Laps Care an operational system for staff planning of home care. *European journal of operational research*, 171(3), 962–976. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.011>
- [55] Akjiratikarl, C., Yenradee, P., & Drake, P. R. (2007). PSO-based algorithm for home care worker scheduling in the UK. *Computers & industrial engineering*, 53(4), 559–583. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.002>
- [56] Chien, C.-F., Tseng, F.-P., & Chen, C.-H. (2008). An evolutionary approach to rehabilitation patient scheduling: A case study. *European journal of operational research*, 189(3), 1234–1253. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.062>
- [57] Topaloglu, S. (2006). A multi-objective programming model for scheduling emergency medicine residents. *Computers & industrial engineering*, 51(3), 375–388. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.08.003>
- [58] Topaloglu, S. (2009). A shift scheduling model for employees with different seniority levels and an application in healthcare. *European journal of operational research*, 198(3), 943–957. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.10.032>
- [59] Yang, C. C., Lin, W. T., Chen, H. M., & Shi, Y. H. (2009). Improving scheduling of emergency physicians using data mining analysis. *Expert systems with applications*, 36(2), 3378–3387. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.02.069>
- [60] Beliën, J., Demeulemeester, E., & Cardoen, B. (2009). A decision support system for cyclic master surgery scheduling with multiple objectives. *Journal of scheduling*, 12(2), 147–161. <https://doi.org/10.1007/s10951-008-0086-4>
- [61] Butler, D. B., & Maydell, U. M. (1979). Manpower scheduling in the edmonton police department. *INFOR: Information systems and operational research*, 17(4), 366–372. <https://doi.org/10.1080/03155986.1979.11731754>
- [62] Sinuany-Stern, Z., & Teomi, Y. (1986). Multi-objective scheduling plans for security guards. *Journal of the operational research society*, 37(1), 67–77. <https://doi.org/10.1057/jors.1986.9>
- [63] Taylor, P. E., & Huxley, S. J. (1989). A break from tradition for the San Francisco police: Patrol officer scheduling using an optimization-based decision support system. *Interfaces*, 19(1), 4–24. <https://doi.org/10.1287/inte.19.1.4>
- [64] Ernst, A., Hourigan, P., Krishnamoorthy, M., Mills, G., Nott, H., & Sier, D. (1999). Rostering ambulance officers. *Proceedings of the 15th national conference of the Australian society for operations research, gold coast* (pp. 470–481). Gold Coast. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-72397-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72397-4_3)
- [65] Rajagopalan, H. K., & Saydam, C. (2009). A minimum expected response model: formulation, heuristic solution, and application. *Socio-economic planning sciences*, 43(4), 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2008.12.003>
- [66] Fernandez-Viagas, V., & Framinan, J. M. (2014). Integrated project scheduling and staff assignment with controllable processing times. *The scientific world journal*, 2014(1), 924120. <https://doi.org/10.1155/2014/924120>
- [67] Mould, G. I. (1996). Case study of manpower planning for clerical operations. *Journal of the operational research society*, 47(3), 358–368. <https://doi.org/10.1057/jors.1996.35>
- [68] Buffa, E. S., Krajewski, L. J., & Ritzman, L. P. (1977). Disaggregation in manufacturing and service organizations: survey of problems and research. *Decision sciences*, 8(1), 1–18. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1977.tb01064.x>
- [69] Rocha, M., Oliveira, J. F., & Carravilla, M. A. (2014). A constructive heuristic for staff scheduling in the glass industry. *Annals of operations research*, 217, 463–478. <https://doi.org/10.1007/s10479-013-1525-y>
- [70] Hasani-Goodarzi, A., Rabbani, M., & Manavizade, N. (2012). A novel mathematical model for manpower scheduling in break (relief) times in mixed model assembly lines. *Procedia-social and behavioral sciences*, 62, 1371–1377. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.234>
- [71] Shahnazari, S. P., Tavakkoli, M. R., & Kazempoor, H. (2011). Solving a bi-objective manpower scheduling problem considering the utility of objective functions. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2011.24.03b.05>
- [72] Savino, M. M., Brun, A., & Mazza, A. (2014). Dynamic workforce allocation in a constrained flow shop with multi-agent system. *Computers in industry*, 65(6), 967–975. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.02.016>
- [73] Lilly, M. T., Emovon, I., Ogaji, S. O. T., & Probert, S. D. (2007). Four-day service-staff work-week in order to complete maintenance operations more effectively in a Nigerian power-generating station. *Applied energy*, 84(10), 1044–1055. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.02.012>
- [74] Yare, Y., & Venayagamoorthy, G. K. (2010). Optimal maintenance scheduling of generators using multiple swarms-MDPSO framework. *Engineering applications of artificial intelligence*, 23(6), 895–910. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.05.006>
- [75] Eitzen, G. (1999). *Rostering multi-skilled employees efficiently and fairly: a column generation and constraint branching approach*. <http://dx.doi.org/10.1023/B:ANOR.0000019087.46656.e2>
- [76] Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., & Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European journal of operational research*, 153(1), 3–27. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00095-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00095-X)

- [77] Kazemipoor, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Shahnazari-Shahrezaei, P. (2013). Solving a novel multi-skilled project scheduling model by scatter search. *South african journal of industrial engineering*, 24(1), 121–131. <https://B2n.ir/eq9165>
- [78] Williams, H. P. (2013). *Model building in mathematical programming*. John Wiley & Sons. <https://B2n.ir/zf8236>
- [79] Koppula, K., & Rodrigues, L. L. R. (2012). Job scheduling of nurse staffing: A dynamic programming approach. *International journal of research in commerce, it & management*, 2(1). <https://B2n.ir/zk8087>
- [80] Clausen, T. (2010). A dynamic programming-based heuristic for the shift design problem in airport ground handling. <https://B2n.ir/gw1150>
- [81] Burke, E. K., & Curtois, T. (2010). An ejection chain method and a branch and price algorithm applied to the instances of the first international nurse rostering competition, 2010. *Proceedings of the 8th international conference on the practice and theory of automated timetabling patat* (Vol. 10, p. 13). Queen's university belfast. <https://B2n.ir/gq8796>
- [82] Brunner, J. O., & Bard, J. F. (2013). Flexible weekly tour scheduling for postal service workers using a branch and price. *Journal of scheduling*, 16, 129–149. <https://doi.org/10.1007/s10951-011-0265-6>
- [83] Shahnazari-Shahrezaei, P., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Kazemipoor, H. (2013). Solving a new fuzzy multi-objective model for a multi-skilled manpower scheduling problem by particle swarm optimization and elite tabu search. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 64, 1517–1540. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4119-y>
- [84] Cai, Y., Zhang, Z., Guo, S., Qin, H., & Lim, A. (2013). A tree-based tabu search algorithm for the manpower allocation problem with timewindows and job-teaming constraints. *IJCAI* (pp. 496–502). IJCAI. <https://www.ijcai.org/Proceedings/13/Papers/081.pdf>
- [85] Mohan, B. C., & Baskaran, R. (2012). A survey: Ant colony optimization based recent research and implementation on several engineering domain. *Expert systems with applications*, 39(4), 4618–4627. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.076>
- [86] Iacopino, C., Palmer, P., Brewer, A., Policella, N., & Donati, A. (2013). EO constellation mps based on ant colony optimization algorithms. *2013 6th international conference on recent advances in space technologies (RAST)* (pp. 159–164). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RAST.2013.6581192>
- [87] Kazemipoor, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Shahnazari-Shahrezaei, P. (2002). Solving a mixed-integer linear programming model for a multi-skilled project scheduling problem by simulated annealing. *Management science letters*, 2(2), 681–688. <https://doi.org/10.5267/j.msl.2011.10.010>
- [88] Chan, F. T. S., Prakash, A., Ma, H. L., & Wong, C. S. (2013). A hybrid Tabu sample-sort simulated annealing approach for solving distributed scheduling problem. *International journal of production research*, 51(9), 2602–2619. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.737948>
- [89] Alfadilla, N., Sentia, P. D., & Asmadi, D. (2019). Optimization of nurse scheduling problem using genetic algorithm: a case study. In *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 536, No. 1, p. 012131). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/536/1/012131>
- [90] Yang, F. C., & Wu, W. T. (2012). A genetic algorithm-based method for creating impartial work schedules for nurses. *International journal of electronic business management*, 10(3), 182. <https://B2n.ir/pn8755>
- [91] Gao, S. C., & Lin, C. W. (2013). Particle swarm optimization based nurses' shift scheduling. *Proceedings of the institute of industrial engineers asian conference 2013* (pp. 775–782). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-4451-98-7\\_93](https://doi.org/10.1007/978-981-4451-98-7_93)
- [92] Glover, F. (1977). Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision sciences*, 8(1), 156–166. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1977.tb01074.x>
- [93] Glover, F. (1997). A template for scatter search and path relinking. *European conference on artificial evolution* (pp. 1–51). Springer. <https://doi.org/10.1007/BFb0026589>