Archive of SID

مهندسی عمران شریف، بهار (۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۴۵-۱۵۵، (یادداشت فنی)

یادداشت فنی

یک مدل بهینه سازی چندهدفه برای حل مسئله‌ی چیدمان سایت‌های ساخت و ساز با در نظرگرفتن معیارهای ایمنی و ریسک

عبدالرسول پرهیزگارشریف (دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن
علیرضا لرک * (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد صفادشت
عبدالرسول تلوری (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز

در پژوهش حاضر، مسئله‌ی جانمایی تسهیلات کارگاهی به عنوان یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه بررسی شده است. توابع هدف مدل، شامل بیشینه‌سازی سطح ایمنی احداث تسهیلات، کمینه‌سازی هزینه‌ی احداث تسهیلات و کمینه‌سازی ریسک ناشی از احداث تسهیلات است. با توجه به این‌که مسئله‌ی جانمایی تسهیلات از رده‌ی مسائل NP-hard است، به منظور حل نمودارهای عددی در دنیای واقعی از الگوریتم‌های فرابتکاری NSGAII و MOGWO استفاده می‌شود. مطابق با نتایج محاسباتی می‌توان مشاهده کرد که جبهه‌ی پارتویی تولید شده توسط الگوریتم‌های مذکور در مثال‌های عددی در ابعاد کوچک به مقدار بسیار زیادی بر جبهه‌ی پارتویی بهینه منطبق است، که این موضوع نشان از کارایی الگوریتم‌ها دارد. همچنین در مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌ها در ابعاد متوسط و بزرگ نیز مشخص شده است که الگوریتم MOGWO، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم NSGAII دارد و جهت حل نمودارهای عددی در ابعاد واقعی، مناسب است.

واژگان کلیدی: جایابی تسهیلات کارگاهی، بیشینه‌سازی ایمنی، برنامه‌ریزی چندهدفه، NSGAII، MOGWO.

parhizgarrasoul@gmail.com
lorkdr@gmail.com
Telvari@gmail.com

۱. مقدمه

مسئله‌ی جانمایی تسهیلات کارگاهی، همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین عملیات اجرایی در پروژه‌های ساخت‌وساز مورد توجه کارفرمایان است.[۱] هدف اصلی جانمایی تسهیلات در پروژه‌های ساخت، قرار دادن مناسب برخی تسهیلات، شامل: دفتر کار، انبارها، کارگاه‌های ساخت مواد نیمه‌آماده و خوابگاه کارگران است؛ به طوری که جریان انتقال مواد، اطلاعات و نیروی انسانی در بهترین حالت ممکن قرار گیرند.[۲] باید توجه داشت که همواره وجود یک جانمایی مناسب، موجب ارتقاء سطح ایمنی و کارایی، کاهش هزینه‌های رفت‌وآمد بین تسهیلات، جلوگیری از ایجاد گلوگاه و ایجاد انسداد در مسیر انتقال مواد و تجهیزات به ویژه در پروژه‌های بزرگ می‌شود.[۳]

علم پژوهش در عملیات به عنوان یک ابزار مدیریتی مناسب جهت ارائه‌ی راهکارهای بهینه‌ی سراسری همواره مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در حوزه‌های مختلف بوده است.[۴] در حوزه‌ی مدیریت ساخت و ساز و به ویژه جانمایی تسهیلات کارگاهی، برنامه‌ریزی ریاضی کاربردهای بسیار وسیعی دارد.[۵] مطابق با بررسی‌های انجام شده، بیشتر پژوهش‌ها مسئله‌ی جانمایی تسهیلات کارگاهی را با هدف کاهش هزینه‌های احداث تسهیلات بررسی کرده‌اند؛ در حالی که در کاربردهای دنیای واقعی، مدیران به دنبال بهینه‌سازی اهداف بیشتری نظیر بیشینه‌سازی سطح ایمنی هستند.[۶] بنابراین توسعه‌ی مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه به عنوان ابزار پیشرفته مدنظر قرار گرفته است، که البته مطالعات بسیاری نیز در حوزه‌ی مذکور انجام شده است. از آن جمله می‌توان به پژوهش ژائو و لی (۲۰۱۴)،[۷] اشاره کرد، که به مطالعه‌ی مسئله‌ی برنامه‌ریزی جانمایی سایت‌های ساخت‌وساز با استفاده از مدل بهینه‌سازی چندهدفه پرداخته‌اند. به منظور حل مورد مطالعاتی ارائه شده نیز نسخه‌ی دوم الگوریتم ژنتیک چندهدفه به عنوان روش حل توسعه داده شده است. هوآنگ و ونگ (۲۰۱۵)،[۸] نیز در پژوهشی به مطالعه‌ی مسئله‌ی جانمایی سایت با مراحل ساخت‌وساز چندگانه در قالب یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی مختلط عدد صحیح پرداختند.

تابع هدف مدل پیشنهادی، شامل: کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل مواد بین تسهیلات سایت، هزینه‌های استهلاک تسهیلات و هزینه‌های مربوط به مدیریت جریان مواد در هر مرحله‌ی اجرای پروژه بوده است. همچنین هو و همکاران (۲۰۱۷)،[۹] به ارائه‌ی یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه به منظور جانمایی تسهیلات موقت در

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۹/۴/۲۵، پذیرش ۱۳۹۹/۵/۱۹.
DOI:10.24200/J30.2020.55611.2752

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. خلاصه‌یی از جدیدترین مطالعات ارائه شده در حوزه‌ی پژوهش.

شماره مرجع	ساختار مسئله		معیارها			الگوریتم حل
	تک‌هدفه	چندهدفه	ایمنی	ریسک	هزینه	
[۷]		ü		ü	ü	NSGAII
[۸]	ü				ü	GA
[۹]		ü	ü		ü	NSGAII
[۱۰]		ü	ü		ü	MOACO
[۱۰]		ü	ü	ü		NSGAII
[۱۲]		ü	ü		ü	WOA-CBO
[۱۱]	ü				ü	GA-ACO
[۱۳]	ü				ü	SA
[۱۴]	ü		کمینه‌سازی فاصله‌ی بین تسهیلات			PSO
پژوهش حاضر		ü	ü	ü	ü	NSGAII-MOGWO

پروژه‌های ساخت‌وساز بزرگ جهت بهبود ایمنی و بهره‌وری عملیاتی پرداخته‌اند. در پژوهش دیگری (۲۰۱۸) نیز مدلی در قالب یک سیستم پشتیبان تصمیم، شامل: مراحل ورودی، شناسایی مکان‌های کاندید و تسهیلات ساخت‌وساز موقتی، بهینه‌سازی جانمایی، ارزیابی و انتخاب و خروجی طراحی شده است.[۱۰] همچنین نینگ[۱] و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل بهینه‌سازی سه هدفه، شامل: کمینه‌سازی میزان ریسک احداث تسهیلات، بیشینه‌سازی ایمنی جریان مواد و بیشینه‌سازی ایمنی حرکت نیروی انسانی ارائه و جهت حل مسئله نیز از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه‌ی کلونی مورچگان استفاده کرده‌اند.[۱۱] ایشان یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی، شامل الگوریتم‌های ژنتیک و کلونی مورچگان با در نظرگرفتن معیارهای توسعه‌ی پایدار جهت مکان‌یابی تسهیلات کارگاهی در پروژه‌های ساخت‌وساز توسعه داده‌اند؛ لذا جهت بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، ۵۰ نمونه‌ی عددی استاندارد بررسی شده است، که نتایج عددی نشان از کارایی الگوریتم پیشنهادی است. به منظور بررسی دقیق‌تر مطالعات پیشین، در جدول ۱ به برخی از مهم‌ترین پژوهش‌های اخیر اشاره شده است.

همان طورکه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تاکنون مطالعه‌ی جامعی در مورد بهینه‌سازی هم‌زمان سطح ایمنی، ریسک و هزینه‌ی احداث تسهیلات انجام نشده است. این در حالی است که در شرایط دنیای واقعی، به معیارهای مذکور به عنوان عناصر کلیدی در جانمایی تسهیلات کارگاهی توجه شده است. همچنین در توسعه‌ی الگوریتم‌های حل نیز می‌توان مشاهده کرد که در اغلب پژوهش‌ها از الگوریتم شناخته شده‌ی ژنتیک استفاده شده است. با وجود این، استفاده از الگوریتم‌های جدید می‌تواند باعث توسعه‌ی دامنه‌ی مطالعات از منظر روش حل شود. در پژوهش حاضر نیز از الگوریتم چندهدفه‌ی گرگ خاکستری استفاده شده است، که یکی از جدیدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. برخی از نوآوری‌های پژوهش حاضر را می‌توان به صورت این موارد تشریح کرد:

- ✓ توسعه‌ی مدل ریاضی چندهدفه با در نظرگرفتن هم‌زمان معیارهای سطح ایمنی، ریسک و هزینه؛
- ✓ استفاده از الگوریتم‌های فرابتکاری جدید در حوزه‌ی پژوهش؛
- ✓ مقایسه‌ی کارایی الگوریتم MOGWO با الگوریتم NSGAII.

در ادامه، ساختار پژوهش بدین صورت سازماندهی شده است:
در بخش ۲، به بیان مسئله‌ی پژوهش و تشریح مدل ریاضی پرداخته شده است. در بخش ۳، ساختار الگوریتم‌های پیشنهادی ارائه شده است. در بخش ۴، نتایج محاسباتی حاصل از حل نمودارهای عددی تشریح و تحلیل‌های لازم انجام شده است. در پایان، در بخش ۵، به جمع‌بندی نتایج و ارائه‌ی پیشنهادهای آتی پرداخته شده است.

۲. بیان مسئله‌ی پژوهش

در پژوهش حاضر، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه به منظور جانمایی تسهیلات با اهداف بیشینه‌سازی سطح ایمنی، کمینه‌سازی هزینه‌های احداث تسهیلات و کمینه‌سازی مقدار ریسک جایابی تسهیلات ارائه شده است. باید توجه داشت که تعیین مقدار پارامترهای ورودی مدل به عنوان یک موضوع مهم است، که باید عدد آنها بر اساس یک ساختار منطقی مقداردهی شود. در پژوهش حاضر، مقادیر مربوط به هزینه‌ی احداث تسهیلات، ریسک و میزان ایمنی مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی ارائه شده بر اساس پژوهش پرهیزگارشریف و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۵] تعیین شده است. از آن‌جایی که مسائل حوزه‌ی بهینه‌سازی ریاضی تحت شرایط از پیش تعیین شده اقدام به حل مسئله می‌کنند، بنابراین نیاز است که مفروضات اولیه در نظرگرفته شود. در پژوهش حاضر، برخی از مهم‌ترین مفروضات به این صورت تشریح شده‌اند:

۱. تعداد تسهیلات جهت جانمایی در کارگاه مشخص است.
۲. هزینه‌های جانمایی برای هر تسهیل مشخص و در دسترس است.
۳. وجود و یا عدم وجود ارتباط منطقی بین تسهیلات مشخص است.
۴. تعداد معیارها و زیرمعیارهای مهم در تعیین سطح ایمنی و اجرای جانمایی مناسب مشخص است.
۵. تعداد خبرگان و کارشناسان همکار در تعیین اوزان هر یک از معیارها مشخص است.

با توجه به مطالب ارائه شده در بخش اول، مدل ریاضی مسئله به این صورت طراحی شده است:

- **مجموعه‌ها و نمادها**

I: مجموعه‌ی تسهیلات موجود جهت احداث $I = \{1, 2, ..\}$
J: مجموعه‌ی نقاط بالقوه جهت احداث تسهیلات $J = \{1, 2, ...\}$

www.SID.ir

Archive of SID

i: نماد تسهیلات موجود جهت احداث
j: نماد نقاط بالقوه جهت احداث تسهیلات

- **پارامترها**

$Im_{ii'}$: میزان کاهش سطح ایمنی در صورت احداث تسهیلات i و i' در مجاور یکدیگر.
$A_{jj'}$: برابر با ۱ است اگر دو نقطه‌ی بالقوه‌ی j وj' در مجاورت یکدیگر باشند.
$Ne_{ii'}$: برابر با ۱ است اگر بتوان تسهیلات i و i' را در مجاورت یکدیگر احداث کرد.
C_{ij}: هزینه‌ی احداث تسهیل i در نقطه‌ی بالقوه‌ی j.
$RisK_{ij}$: میزان ریسک موجود در احداث تسهیل i در نقطه‌ی بالقوه‌ی j.
X_j: مختصات محور افقی مکان بالقوه‌ی j.
y_j: مختصات محور عمودی مکان بالقوه‌ی j.
$MinD_{ii'}$: کمینه‌ی فاصله‌ی اقلیدسی مجاز بین تسهیلات i و i'.

- **متغیرهای تصمیم**

X_{ij}: برابر با ۱ است اگر تسهیل i در نقطه‌ی بالقوه‌ی j احداث شود و در غیر این‌صورت برابر صفر.
$D_{ii'}$: فاصله‌ی اقلیدسی بین تسهیلات i و 'i.

$$MaxZ = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{i'\neq i}^{I}\sum_{j'\neq j}^{J} \mathrm{Im}_{ii}, A_{jj}, X_{ij}Xi'j' \quad (1)$$

$$MinW = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} C_{ij}X_{ij} \quad (2)$$

$$MinK = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} Risk_{ij}X_{ij}$$

$$S.t \quad (3)$$

$$\forall i \in I \qquad \forall i \in I \quad (4)$$

$$j \in J \qquad j \in J \quad (5)$$

$$\forall i \neq i' \in I, \qquad \forall i \neq i' \in I,$$
$$j \neq j' \in J \qquad j \neq j' \in J \quad (6)$$

$$\forall i \neq i' \in I, \qquad \forall i \neq i' \in I,$$
$$j \neq j' \in J \qquad j \neq j' \in J \quad (7)$$

$$\forall i \neq i' \in I \qquad \forall i \neq i' \in I \quad (8)$$

$$\forall i \neq i' \in I, \qquad \forall i \neq i' \in I,$$
$$j \in J \qquad j \in J \quad (9)$$

معادله‌ی ۱، به بیشینه‌سازی سطح ایمنی در طراحی کارگاه از طریق احداث تسهیلات می‌پردازد. معادله‌ی ۲، هزینه‌های احداث تسهیلات در مراکز بالقوه را محاسبه می‌کند و کمینه می‌سازد. تابع هدف ۳، به کمینه‌سازی مقدار ریسک جایابی تسهیلات می‌پردازد. محدودیت ۴، تضمین می‌کند که هر تسهیل در یک نقطه‌ی بالقوه احداث شود. محدودیت ۵، تضمین می‌کند که در هر نقطه‌ی بالقوه، بیشینه‌ی یک تسهیل احداث شود. محدودیت‌های ۶ و۷، به محاسبه‌ی فاصله‌ی بین مراکز احداث شده می‌پردازد. محدودیت ۸، تضمین می‌کند که فاصله بین دو مرکز از یک مقدار مشخص بیشتر شود. محدودیت ۹، دامنه‌ی تغییرات متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۳. روش حل

همان طورکه پیشتر بیان شد، مسئله‌ی جانمایی تسهیلات از رده‌ی تصمیمات سطح تاکتیکی است؛ بنابراین حل مسئله در زمان مناسب با کیفیت قابل‌قبول، اهمیت دارد. یکی از رویکردهای رایج برای حل مدل‌های چندهدفه، استفاده از روش محدودیت اپسیلون تقویت شده است، که در آن یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی در نظرگرفته می‌شود و سایر توابع هدف در قالب محدودیت‌های ریاضی به مقدار مشخص اپسیلون محدود می‌شوند. ساختار کلی استفاده از روش محدودیت اپسیلون تقویت شده را می‌توان در مطالعات ماوروتاس و همکاران،[۱۶ و ۱۷] مطالعه کرد. همچنین با توجه NP-hard بودن مسئله‌ی جانمایی تسهیلات، حصول نتایج مناسب با استفاده از مدل ریاضی، بسیار مشکل است و زمان حل مسئله تا حدی افزایش می‌یابد، که عملاً قابل استفاده نیست. بدین منظور در پژوهش حاضر، دو الگوریتم فراابتکاری NSGAII و MOGWO به منظور یافتن پاسخ‌های پارتویی استفاده شده است. در ادامه، به تشریح ساختار الگوریتم‌های پیشنهادی پژوهش حاضر پرداخته شده است.

۱.۳. ساختار نمایش پاسخ‌ها

به منظور نمایش پاسخ‌های اولیه‌ی تولید شده جهت بهبود در رویه‌ی الگوریتم‌ها و حصول پاسخ‌های نهایی، یک ماتریس سطری در نظرگرفته می‌شود، که طول آن برابر با تسهیلات لازم جهت احداث و اعداد داخل آن بیانگر شماره‌ی نقطه‌ی بالقوه‌ی تخصیص یافته به آن مرکز است. واضح است که اعداد داخل ماتریس باید بدون تکرار باشند. اما به منظور تضمین محدودیت فاصله بین تسهیلات، برای هر تسهیل، مجموعه تسهیلاتی که می‌توانند درکنار آن احداث شوند، مشخص می‌شود. سپس در تکمیل نهایی ساختار پاسخ‌ها، عدد داخل هر خانه باید از مجموعه‌ی تسهیلات مجاز برای خانه‌ی قبلی انتخاب شود. بدین صورت پاسخ‌های تولید شده همواره موجه هستند.

۲.۳. الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی

با توجه به این‌که مسئله‌ی جانمایی تسهیلات از رده‌ی مسائل NP-hard است، بنابراین در پژوهش حاضر، به منظور حل مدل ریاضی در ابعاد کوچک از حل‌کننده‌ی Cplex۱۲/۱ با روش محدودیت اپسیلون استفاده شده است. همچنین جهت حل نمودارهای عددی با ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است. اما یکی از موضوعات بسیار مهم در استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، انتخاب مناسب آنها با توجه به ماهیت و ساختار عملکردی در یافتن پاسخ‌های نهایی است. مطابق با مرور ادبیات پژوهش، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت، سطح عملکرد مناسبت‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری دارند،[۱۸] بنابراین در پژوهش حاضر نیز از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت استفاده شده است. خانواده‌ی ژنتیک معمولاً در تمامی مسائل بهینه‌سازی، عملکرد مناسبی دارند و می‌توانند به عنوان یک معیار مقایسه‌یی خوب استفاده شوند. در خانواده‌ی ژنتیک، نسخه‌ی دوم الگوریتم ژنتیک NSGAII به عنوان شاخص‌ترین الگوریتم چندهدفه در تمام حوزه‌های بهینه‌سازی مطرح است. در بین الگوریتم‌های ارائه شده در سال‌های اخیر نیز الگوریتم گرگ خاکستری GWO، قدرت محاسباتی بسیار بالایی داشته و تقریباً در تمامی مسائلی که استفاده شده است، بر سایر الگوریتم‌ها برتری نسبی یا مطلق داشته است.[۱۹] نسخه‌ی چندهدفه‌ی الگوریتم

www.SID.ir

Archive of SID

گرگ خاکستری نیز کارایی بسیار بالایی دارد و قادر است به صورت کاملاً مناسبی از فاز Exploration وارد فاز Exploitation شود و پاسخ‌های نهایی مناسبی را گزارش دهد. بنابراین در پژوهش حاضر، جهت حل مدل ریاضی، الگوریتم‌های NSGAII و MOGWO استفاده و در ادامه، ساختار ریاضی آنها تشریح شده است:

۱.۲.۳. ساختار الگوریتم نسخه‌ی دوم الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGAII)

الگوریتم NSGAII، یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه بوده و کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. محققان، نسخه‌ی دوم الگوریتم ژنتیک دوهدفه را که در آن علاوه بر کیفیت جواب‌ها، تنوع و گوناگونی جواب‌های بهینه‌ی پارتویی مدنظر قرارگرفته بودند، برای رفع نواقص نسخه‌ی اولیه توسعه دادند {$Deb, ۲۰۰۲\#۱۱۰۹$}. در الگوریتم ژنتیک دوهدفه در ارتباط با جواب‌ها، دو معیار اصلی دنبال می‌شود: اول، جواب‌های با کیفیت را انتخاب می‌کنند و در صورتی‌که دو جواب با کیفیت یکسان وجود داشته باشد، جوابی انتخاب می‌شود که نظم بیشتری داشته باشد؛ بنابراین، اول کیفیت و سپس نظم بررسی می‌شوند، که برای اندازه‌گیری آنها از مفهوم فاصله‌ی ازدحامی استفاده شده است. الگوریتم NSGA-II، دو فاز شناخته شده دارد، فاز اول از معیار رتبه‌بندی و مفهوم غلبه و فاز دوم، که مربوط به نظم آنهاست، از فاصله‌ی ازدحامی استفاده می‌کنند. در فاز اول، رتبه‌بندی جواب‌ها تعیین می‌شود و برای: ۱) تعداد دفعاتی که یک جواب مغلوب می‌شود و ۲) مجموعه جواب‌هایی که جواب فعلی بر آنها غالب است، دو مقدار اخیر محاسبه می‌شوند. برای تعیین دو مقدار ذکر شده، باید تمامی جواب‌ها با یکدیگر مقایسه شوند. اگر جواب‌هایی وجود داشته باشد که تعداد دفعات مغلوب شدنشان صفر باشد، آن جواب‌ها نامغلوب هستند و تقریبی از جبهه‌ی پارتو هستند (شکل ۱).

۲.۲.۳. الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه (MOGWO)

الگوریتم گرگ خاکستری توسط میرجلیلی و همکاران (۲۰۱۴)،[۲۰] ارائه شده است. نسخه‌ی چندهدفه‌ی الگوریتم گرگ خاکستری نیز در نوشتار دیگری توسط جلیلی و همکاران (۲۰۱۶)،[۲۱] مطرح شده است. الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه بر مبنای ساختار اجتماعی گرگ‌های خاکستری طراحی شده است و عملگرهای سلسله مراتب اجتماعی، محاصره‌ی طعمه، شکار، حمله به طعمه و جستجو برای شکار دارد. اگر $\overrightarrow{X_p}$ بردار موقعیت طعمه و $\overrightarrow{X}$ موقعیت گرگ خاکستری باشد، در الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه، بهترین جواب به عنوان α در نظر گرفته می‌شود و دومین و سومین پاسخ برتر به ترتیب به عنوان بتا (β) و دلتا (δ) نامیده می‌شوند. سایر پاسخ‌ها نیز ω خطاب می‌شوند. به منظور مدل‌سازی ریاضی رفتار محاصره‌یی، معادلات ۴ و ۵ استفاده می‌شود:

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (۱۰)$$

$$X(t+۱) = X_p(t) - A \cdot D \quad (۱۱)$$

که در آنها، t شماره‌ی تکرار الگوریتم، $\overrightarrow{A}$ و $\overrightarrow{C}$ بردار ضرایب است، که توسط معادلات ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند.

$$A = ۲a \cdot r_۱ - a \quad (۱۲)$$

$$C = ۲r_۲ \quad (۱۳)$$

که در آن، درایه‌های بردار $\overrightarrow{\alpha}$ به صورت خطی از ۲ به ۰ کاهش می‌یابند. بردارهای $\overrightarrow{r_۱}$ و $\overrightarrow{r_۲}$ نیز به صورت تصادفی از بازه‌ی [۰،۱] انتخاب می‌شوند. به منظور شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ خاکستری، فرض می‌شود که آلفا، بتا و دلتا از محل شکار اطلاع بهتری دارند؛ بنابراین، ۳ جواب بهتر به دست آمده ذخیره می‌شوند و عامل‌های دیگر جستجو (از جمله امگا) مجبور می‌شوند تا موقعیت خود را مطابق با موقعیت بهترین عامل جستجو به‌روزرسانی کنند. معادلات ۱۴ تا ۱۶ بدین منظور ارائه شده‌اند.

$$\begin{aligned} D_a &= |C_۱ \cdot X_a - X|, D_\beta \\ &= |C_۲ X_\beta - X|, D_\delta \\ &= |C_۳ X_\delta - X| \end{aligned} \quad (۱۴)$$

$$\begin{aligned} X_۱ &= X_a - A_۱(D_a), X_۲ \\ &= X_\beta - A_۲(D_\beta), X_۳ \\ &= X_۳ - A_۳(D_\delta) \end{aligned} \quad (۱۵)$$

$$X(t+۱) = \frac{X_۱ + X_۲ + X_۳}{۳} \quad (۱۶)$$

سایر عملگرهای الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه را نیز می‌توان در پژوهش میرجلیلی و همکاران (۲۰۱۴)،[۲۰] مطالعه کرد. شبه کد الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه به صورت شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

```
Initialize Population
Generate N feasiable solution and insert into Population
While Stopping criteria not met Do
Generate ChildPopulation of Size N
Select Parents from Population
Create Children from Parents
Mutate Children
Repare Solution using repair mechanism
Merge Population and ChildPopulation with size 2N
For each individual in CurrentPopulation Do
Assign rank based on Pareto-Fast non-dominates sort
end
Generate sets of non-dominated vector along PF_known
Loop (inside) by adding solution to next generation of Population starting from the best front
Until N solution found and determine crowding distance between points on each front
end
Report results
```

شکل ۱. شبه کد الگوریتم ژنتیک چندهدفه.

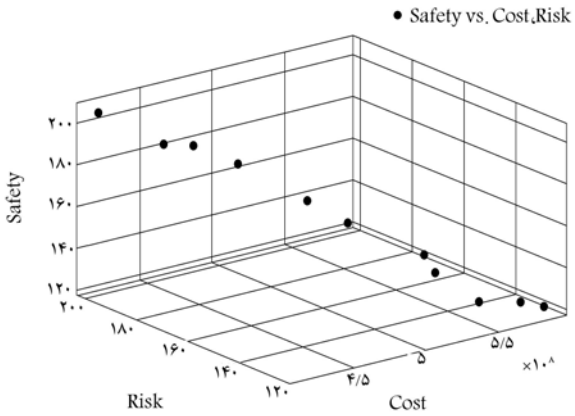
۳.۳. رویکرد پشتیبان تصمیم به منظور انتخاب عضو پارتویی

با توجه به این‌که انتخاب عضو پارتویی نهایی جهت پیاده‌سازی نتایج در ساختار دنیای واقعی، همواره به عنوان یک چالش مدیریتی شناخته می‌شود، بنابراین در پژوهش حاضر از روش بهترین - بدترین جهت امتیازدهی اعضاء پارتویی استفاده و عضوی که بالاترین امتیاز را داشته است، به‌عنوان پاسخ نهایی انتخاب شده است. ساختار سیستم پشتیبان تصمیم به صورت این گام‌ها تشریح می‌شود:

گام ۱. حل مدل ریاضی برای نمودهای عددی در ابعاد کوچک و یا اجرای الگوریتم فرااِبتکاری برای نمودهای عددی در ابعاد بزرگ؛

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. شبه کد الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه.

گام ۲. ذخیره‌ی اعضاء پارتویی در قالب جبهه‌ی پارتویی؛

گام ۳. انتخاب یکی از معیارهای هزینه، ریسک و ایمنی به عنوان مهم‌ترین معیار؛

گام ۴. انتخاب یکی از معیارهای هزینه، ریسک و ایمنی به عنوان بی‌اهمیت‌ترین معیار؛

گام ۵ تعیین میزان امتیازهای سایر معیارها نسبت به مهم‌ترین و بی‌اهمیت‌ترین معیار به کمک روش بهترین - بدترین؛[۲۲ و ۲۳]

گام ۶. تعیین میزان اهمیت هر یک از معیارهای هزینه، ریسک و ایمنی به صورت اعداد مستقل مطابق با روش بهترین - بدترین؛[۲۲ و ۲۳]

گام ۷. ضرب یک به یک هر یک از اعضاء پارتویی در مقدار به دست آمده از گام ششم برای هر یک از معیارهای هزینه، ریسک و ایمنی؛

گام ۸. رتبه‌بندی اعضاء پارتویی براساس وزن نهایی به دست آمده و تعیین بهترین عضو پارتویی.

$$\begin{bmatrix} obj۱ & obj۲ & obj۳ \\ obj۱ & obj۲ & obj۳ \end{bmatrix}_{N\times ۳} \times \begin{bmatrix} \mathrm{Im}u_Score \\ \mathrm{Cost}_Score \\ Risk_Score \end{bmatrix}_{۳\times ۱} =$$

$$\begin{bmatrix} ۱_{st} parecoScore \\ N_{th} parecoScore \end{bmatrix}$$

۴. نتایج محاسباتی

در بخش حاضر، به منظور اعتبارسنجی مدل و الگوریتم‌های ارائه شده، مثال‌هایی در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ بر اساس تعداد نقاط بالقوه جهت احداث تسهیلات طراحی و بررسی شده است. لازم به ذکر است که جهت حل مدل ریاضی از حل‌کننده‌ی Cplex استفاده شده است. همچنین الگوریتم پیشنهادی نیز در محیط سی‌شارپ کُد شده و با استفاده از رایانه‌ی شخصی با پردازنده‌ی ۳/۲GHz و حافظه‌ی تصادفی دردسترس ۱۶GB حل شده است.

۱.۴. ارزیابی کارایی مدل ریاضی

در بخش کنونی، به منظور صحت‌سنجی عملکرد مدل ارائه شده، یک مثال عددی با داده‌های تصادفی در نظر گرفته شده است، که در آن ۵ تسهیل کارگاهی باید

```
Initialize the grey wolf population
Initialize a, A, and C
Calculate the objective values for each search agent
Find the non-dominated solutions and initialized the
archive with them
X_α=Select Leader (archive)
Exclude alpha from the archive temporarily to avoid
selecting the same leader
X_β = Select Leader (archive)
Exclude beta from the archive temporarily to avoid
selecting the same leader
X_δ = Select Leader (archive)
Add back alpha and beta to the archive
t = 1
    While (t < Max number of iterations)
        For each search agent
        Update the position of the current search
        agent
        Repare Solution using repair mechanism
        End
    Update a, A, and C
    Calculate the objective values of all search
    agents
    Find the non-dominated solutions
    Update the archive with respect to the obtained
    non-dominated solutions
        If the archive is full
        Run the grid mechanism to omit one of
    the current archive members
        Add the new solution to the archive
        End
            If any of the new added solutions to
    the archive is located outside the hypercube
            Update the grids to cover the new
    solution(s)
            End
    X_α=Select Leader (archive)
    Exclude alpha from the archive temporarily to
    avoid selecting the same leader
    X_β = Select Leader (archive)
    Exclude beta from the archive temporarily to
    avoid selecting the same leader
    X_δ = Select Leader (archive)
    Add back alpha and beta to the archive
    t = t + 1
    End while
Return archive
```

شکل ۳. شبه کد الگوریتم گرگ خاکستری چندهدفه.

در ۸ مکان بالقوه‌ی جایابی شوند. مقدار پارامترهای ورودی مدل ریاضی در قالب جدول‌های ۲ تا ۷ ارائه شده است. باید توجه داشت که مثال عددی مذکور منطبق بر مورد مطالعاتی تشریح شده در پژوهش پرهیزگارشریف و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۵] است.

همان طور که مشاهده می‌شود، در تمامی تسهیلات میزان کاهش سطح ایمنی بین ۱۰ تا ۳۰ درصد است، که البته تمرکز اعداد در مقادیر ۱۰ تا ۱۵ درصد است. نکته‌ی قابل توجه در تولید مقادیر تسهیلات، عدم وجود تقارن در ماتریس است. در حقیقت میزان کاهش سطح ایمنی برای قرارگیری تسهیلات ۱ و ۲ با قرارگیری

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. میزان کاهش سطح ایمنی در صورت احداث تسهیلات در مجاورت یکدیگر (بر حسب درصد).

$Im_{ii'}$	تسهیل ۱	تسهیل ۲	تسهیل ۳	تسهیل ۴	تسهیل ۵
تسهیل ۱	-	۱۰	۱۲	۱۰	۱۵
تسهیل ۲	۱۰	-	۱۵	۱۰	۲۰
تسهیل ۳	۳۰	۲۰	-	۱۰	۱۲
تسهیل ۴	۱۵	۱۵	۲۰	-	۱۰
تسهیل ۵	۲۰	۳۰	۱۵	۱۰	-

جدول ۳. ماتریس مجاورت نحوه‌ی قرارگیری مکان‌های بالقوه.

$A_{jj'}$	مکان‌یابی بالقوه ۱	مکان‌یابی بالقوه ۲	مکان‌یابی بالقوه ۳	مکان‌یابی بالقوه ۴	مکان‌یابی بالقوه ۵	مکان‌یابی بالقوه ۶	مکان‌یابی بالقوه ۷	مکان‌یابی بالقوه ۸
مکان‌یابی بالقوه ۱	-	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱
مکان‌یابی بالقوه ۲	۰	-	۰	۰	۰	۰	۱	۰
مکان‌یابی بالقوه ۳	۱	۰	-	۱	۰	۰	۱	۱
مکان‌یابی بالقوه ۴	۰	۰	۱	-	۰	۰	۰	۰
مکان‌یابی بالقوه ۵	۰	۰	۰	۰	-	۰	۱	۰
مکان‌یابی بالقوه ۶	۱	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰
مکان‌یابی بالقوه ۷	۰	۱	۱	۰	۱	۰	-	۰
مکان‌یابی بالقوه ۸	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	-

جدول ۴. ماتریس مجاورت قرارگیری تسهیلات در کنار یکدیگر.

$Ne_{ii'}$	تسهیل ۱	تسهیل ۲	تسهیل ۳	تسهیل ۴	تسهیل ۵
تسهیل ۱	-	۱	۱	۱	۰
تسهیل ۲	۱	-	۰	۱	۱
تسهیل ۳	۱	۰	-	۱	۱
تسهیل ۴	۱	۱	۱	-	۱
تسهیل ۵	۰	۱	۱	۱	-

جدول ۵. میزان ریسک موجود ناشی از احداث تسهیلات در نقاط بالقوه بر حسب درصد.

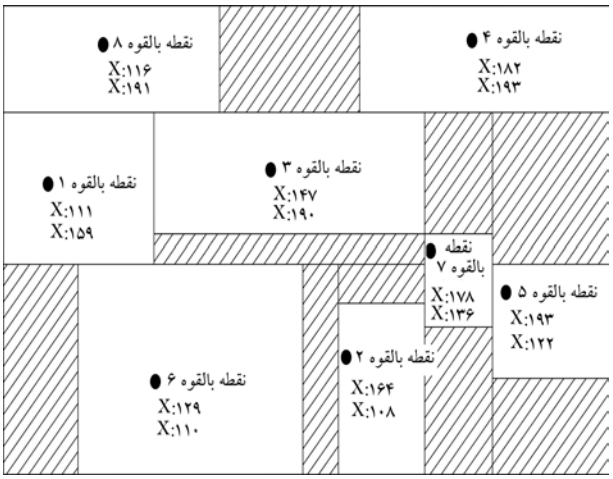
E_{ij}	مکان‌یابی بالقوه ۱	مکان‌یابی بالقوه ۲	مکان‌یابی بالقوه ۳	مکان‌یابی بالقوه ۴	مکان‌یابی بالقوه ۵	مکان‌یابی بالقوه ۶	مکان‌یابی بالقوه ۷	مکان‌یابی بالقوه ۸
تسهیل ۱	۱۶	۱۴	۱۹	۲۴	۱۳	۲۲	۲۱	۲۶
تسهیل ۲	۱۵	۱۵	۱۵	۱۰	۲۰	۲۶	۲۷	۱۹
تسهیل ۳	۲۰	۲۹	۳۰	۲۱	۱۴	۲۰	۳۰	۲۴
تسهیل ۴	۱۹	۱۳	۱۱	۲۴	۲۳	۲۸	۳۰	۲۴
تسهیل ۵	۲۴	۱۶	۲۲	۲۰	۲۹	۲۱	۲۰	۲۳

جدول ۶. هزینه‌ی احداث تسهیلات در نقاط بالقوه(میلیون تومان).

C_{ij}	مکان‌یابی بالقوه ۱	مکان‌یابی بالقوه ۲	مکان‌یابی بالقوه ۳	مکان‌یابی بالقوه ۴	مکان‌یابی بالقوه ۵	مکان‌یابی بالقوه ۶	مکان‌یابی بالقوه ۷	مکان‌یابی بالقوه ۸
تسهیل ۱	۱۰۰	۲۱۵	۱۵۰	۱۱۰	۱۲۰	۳۲۰	۱۷۰	۱۵۰
تسهیل ۲	۱۲۰	۲۰۰	۱۶۰	۱۲۰	۱۵۰	۳۱۰	۱۸۰	۱۶۰
تسهیل ۳	۱۱۰	۲۲۰	۱۷۰	۱۳۰	۱۳۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۷۰
تسهیل ۴	۱۰۰	۲۳۰	۱۵۰	۱۰۰	۱۸۰	۲۹۰	۱۹۰	۱۸۰
تسهیل ۵	۱۱۵	۲۰۰	۱۲۰	۱۱۰	۱۷۰	۲۸۰	۲۰۰	۱۱۰

جدول ۷. کمینه‌ی فاصله‌ی مجاز بین تسهیلات (متر).

$MD_{ii'}$	تسهیل ۱	تسهیل ۲	تسهیل ۳	تسهیل ۴	تسهیل ۵
تسهیل ۱	-	۲۰	۳۹	۲۷	۳۵
تسهیل ۲	۲۴	-	۲۷	۲۸	۲۳
تسهیل ۳	۲۰	۲۲	-	۲۷	۲۵
تسهیل ۴	۲۵	۴۰	۳۲	-	۳۸
تسهیل ۵	۳۳	۲۵	۳۳	۲۴	-



شکل ۴. ساختارگرافیکی مناطق بالقوه جهت احداث.

تسهیلات ۲ و ۱ با یکدیگر متفاوت است. این موضوع در واقع بیانگرکاهش سطح ایمنی برای هر تسهیل است. در حقیقت ممکن است با قرارگیری دو تسهیل ۱ و ۲ درکنار یکدیگر، برای تسهیل ۱ به میزان ۱۰٪ کاهش سطح ایمنی رخ دهد، اما برای تسهیل ۲ به میزان ۱۵٪ به عبارت دیگر، پارامتر اخیر مقادیر را به ازاء نخستین اندیس گزارش می‌کند و لزومی بر وجود تقارن نیست. در مورد ساختارگرافیکی محیط مورد مطالعه نیز می‌توان به شکل ۴ رجوع کرد.

همان طورکه مشخص است، نقاط بالقوه فقط در محل‌هایی مشخص قرار دارند و تسهیلات نیز می‌توانند فقط در محل‌های اشاره شده احداث شوند. مطابق شکل مذکور می‌توان ماتریس مجاورت قرارگیری تسهیلات درکنار یکدیگر را مشخص کرد (جدول ۳).

همان طورکه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر ۰ و ۱ متناسب با ساختار

www.SID.ir

Archive of SID

گرافیکی مقداردهی شده‌اند. برای مثال در شکل ۱، نقاط بالقوه‌ی ۱ و ۸ با یکدیگر مجاور هستند، بنابراین در ماتریس مذکور، نیز خانه‌ی مربوط به مکان‌های ۱ و ۸ و همچنین ۸ و ۱ با یکدیگر مجاور هستند. اما به منظور حل مسئله، نیاز است که ماتریس امکان قرارگیری تسهیلات درکنار یکدیگر نیز چک شود. در حقیقت، برخی از تسهیلات به دلایل فنی نمی‌توانند درکنار یکدیگر قرار گیرند. برای مثال نمی‌توان خوابگاه را در مجاورت محل تخلیه‌ی آهن‌آلات احداث کرد. در جدول ۴، ماتریس مجاورت قرارگیری تسهیلات درکنار یکدیگر ارائه شده است.

هزینه‌ی احداث تسهیلات در هر مکان نیز مطابق با جدول ۵ ارائه شده است. قطعاً مطابق با شرایط موجود در هر محل، مانند: شیب زمین، دسترسی به امکانات برق، آب و غیره، هزینه‌های احداث متفاوت خواهد بود. البته که هزینه‌های ذکر شده بسته به نوع تسهیل احداثی نیز تفاوت دارند.

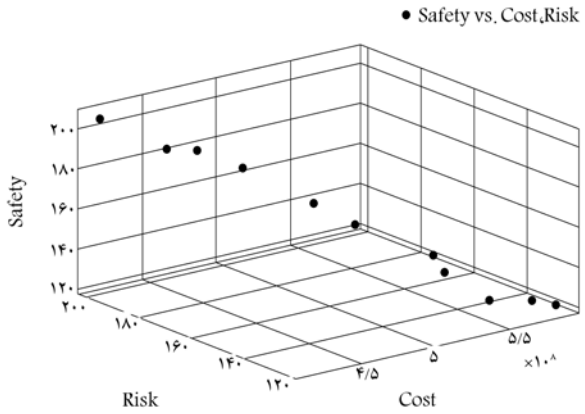
احداث هر تسهیل در مکان، سطح ریسک مشخصی دارد، که در جدول ۶ ارائه شده است. در واقع، مطابق با شرایط محیطی و فنی موجود در محیط کار، احداث هر تسهیل در هر مکان می‌تواند باعث ایجاد سطح خطرپذیری با همان ریسک شود.

مطابق با اطلاعات فنی در دسترس از پروژه و البته طبق نظر کارشناسان، هر دو تسهیل باید فاصله‌یی مجاز از یکدیگر داشته باشند. در جدول ۷، مقادیر فاصله‌ی مجاز گزارش شده است.

پس از حل مدل ریاضی با استفاده از داده‌های ارائه شده در جدول‌های ۲ تا ۷، جبهه‌ی پارتویی به صورت جدول ۸ و شکل ۵ ترسیم شده است.

جدول ۸. مقدار توابع هدف به ازاء هر عضو جبهه‌ی پارتویی.

عضو پارتویی	ریسک	هزینه	ایمنی
۱	۱۲۳	۵۹۰۰۰۰۰۰۰	۱۲۱
۲	۱۲۳	۵۷۴۰۰۰۰۰۰	۱۲۶
۳	۱۲۴	۵۴۶۰۰۰۰۰۰	۱۳۱
۴	۱۳۷	۵۳۹۰۰۰۰۰۰	۱۳۹
۵	۱۳۸	۵۳۳۰۰۰۰۰۰	۱۴۸
۶	۱۴۶	۴۹۴۰۰۰۰۰۰	۱۶۶
۷	۱۴۸	۴۶۹۰۰۰۰۰۰	۱۸۰
۸	۱۶۰	۴۴۲۰۰۰۰۰۰	۱۹۶
۹	۱۷۵	۴۳۸۰۰۰۰۰۰	۱۹۸
۱۰	۱۷۵	۴۱۷۰۰۰۰۰۰	۲۰۲
۱۱	۱۹۹	۴۱۴۰۰۰۰۰۰	۲۰۵



شکل ۵. جبهه‌ی پارتویی حاصل از حل مثال عددی.

همان طور که مشاهده می‌شود، تمام پاسخ‌های تولید شده، ساختار نامغلوب دارند و این موضوع حاکی از صحت عملکرد روش محدودیت اپسیلون در کشف پاسخ‌های پارتویی است. اما موضوع مهم دیگر در حل مدل ارائه شده، زمان اجرای هر یک از تکرارها به کمک نرم‌افزار است، که شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی این موضوع است.

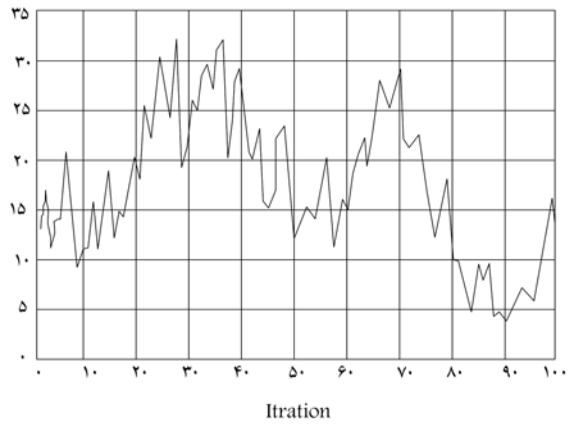
همان طور که مشاهده می‌شود، در برخی از تکرارها، زمان حل زیر ۱۵ ثانیه بوده و در برخی دیگر این زمان حدود ۵ ثانیه است. دلیل این امر را می‌توان در مقادیر مختلف پارامتر اپسیلون دانست؛ چرا که محدود کردن سطح توابع هدف در قالب محدودیت باعث می‌شود که زمان حل به طور قابل توجهی افزایش یا کاهش یابد.

۲.۴. تعیین عضو پارتویی نهایی با استفاده از سیستم پشتیبان تصمیم

در بخش کنونی، به منظور انتخاب عضو پارتویی نهایی جهت پیاده‌سازی در ساختار مسئله از سیستم پشتیبان ارائه شده مبتنی بر روش بهترین - بدترین استفاده شده است. لازم به ذکر است که درگام‌های سوم تا ششم روش بهترین - بدترین، از نظرات ۸ خبره، که سابقه‌ی عملیاتی بیشتر از ۱۰ سال در مدیریت کارگاه‌های ساخت‌وساز داشته‌اند، استفاده شده است.

همچنین به منظور انتخاب عضو پارتویی نهایی، از نظرات ۸ نفر از خبرگان فعال در بخش مدیریت پسماندهای شهرستان بیرجند، استفاده شده و امتیاز هر معیار مطابق با روش بهترین - بدترین در جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

اوزان معیارهای اصلی از طریق حل مدل خطی روش بهترین - بدترین برای ۸



شکل ۶. زمان حل هر تکرار روش محدودیت اپسیلون به کمک نرم‌افزار.

جدول ۹. بردارهای سایر معیارها - بهترین.

(خبرگان)	بهترین معیار	ایمنی	هزینه	ریسک
خبره‌ی ۱	هزینه	۴	۱	۸
خبره‌ی ۲	هزینه	۵	۱	۹
خبره‌ی ۳	هزینه	۶	۱	۹
خبره‌ی ۴	هزینه	۷	۱	۸
خبره‌ی ۵	هزینه	۹	۱	۵
خبره‌ی ۶	هزینه	۵	۱	۸
خبره‌ی ۷	هزینه	۹	۱	۳
خبره‌ی ۸	هزینه	۹	۱	۴

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۰. بردارهای سایر معیارها - بدترین.

(خبرگان) بدترین معیار	خبره‌ی ۱ ریسک	خبره‌ی ۲ ریسک	خبره‌ی ۳ ریسک	خبره‌ی ۴ ریسک	خبره‌ی ۵ ایمنی	خبره‌ی ۶ ریسک	خبره‌ی ۷ ایمنی	خبره‌ی ۸ ایمنی
معیار								
ایمنی	۵	۶	۷	۴	۱	۴	۱	۱
هزینه	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹
ریسک	۱	۱	۱	۱	۵	۱	۴	۱

جدول ۱۱. اوزان معیارهای مؤثر در انتخاب پاسخ نهایی.

معیار	پاسخ‌دهنده (خبرگان)								میانگین اوزان
	خبره‌ی ۱	خبره‌ی ۲	خبره‌ی ۳	خبره‌ی ۴	خبره‌ی ۵	خبره‌ی ۶	خبره‌ی ۷	خبره‌ی ۸	
هزینه	۰٫۳۲۱	۰٫۳۴۶	۰٫۳۲۴	۰٫۴۲	۰٫۵۲۲	۰٫۵۲۴	۰٫۶۴۳	۰٫۴۹۸	۰٫۴۴۹۷۵
ایمنی	۰٫۲۵۶	۰٫۲۷۲	۰٫۳۰۳	۰٫۴۰۶	۰٫۲۵۳	۰٫۳۷۴	۰٫۳۹۷	۰٫۳۹۱	۰٫۳۳۱۵
ریسک	۰٫۲۴۴	۰٫۲۴۲	۰٫۱۷۳	۰٫۲۲	۰٫۲۷۳	۰٫۲۴۳	۰٫۱۷۸	۰٫۱۷۷	۰٫۲۱۸۷۵
ξL^*	۰٫۰۴۱	۰٫۰۳۸	۰٫۰۵۱	۰٫۰۳۹	۰٫۰۴۶	۰٫۰۴۳	۰٫۰۴۴	۰٫۰۳۸	۰٫۰۴۳

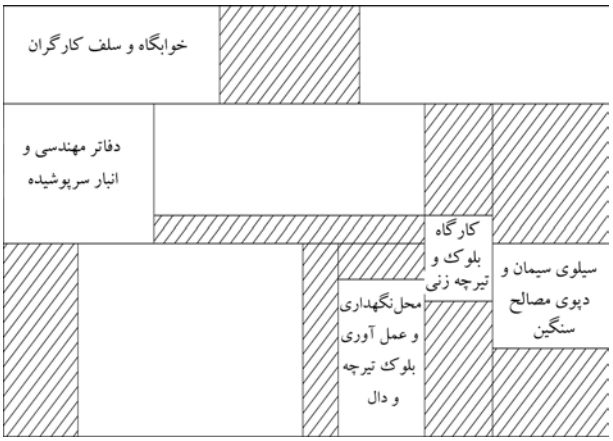
جدول ۱۲. محاسبه‌های مربوط به انتخاب عضو پارتویی نهایی مطابق با روش پشتیبان تصمیم.

رتبه‌بندی	امتیاز					ریسک	هزینه	ایمنی	عضو پارتوی
۱۱	۲۶۵۳۵۲۵۶۷					۱۲۳	۵۹۰۰۰۰۰۰۰	۱۲۱	۱
۱۰	۲۵۸۱۵۶۵۶۹					۱۲۳	۵۷۴۰۰۰۰۰۰	۱۲۶	۲
۹	۲۴۵۵۶۳۵۷۱					۱۲۴	۵۴۶۰۰۰۰۰۰	۱۳۱	۳
۸	۲۴۲۴۱۵۳۲۶					۱۳۷	۵۳۹۰۰۰۰۰۰	۱۳۹	۴
۷	۲۳۹۷۱۶۸۲۹					۱۳۸	۵۳۳۰۰۰۰۰۰	۱۴۸	۵
۶	۲۲۲۱۷۶۵۸۷	=	۲۳۹۷۱۶۸۲۹	۰٫۴۴۹۷۵	× ۰٫۳۳۱۵	۱۴۶	۴۹۴۰۰۰۰۰۰	۱۶۶	۶
۵	۲۱۰۹۳۲۸۴۲					۱۴۸	۴۶۹۰۰۰۰۰۰	۱۸۰	۷
۴	۱۹۸۷۸۹۶۰۰			۱۸۶۱۹۶۶۱۱		۱۶۰	۴۴۲۰۰۰۰۰۰	۱۹۶	۸
۳	۱۹۶۹۹۰۶۰۴					۱۷۵	۴۳۸۰۰۰۰۰۰	۱۹۸	۹
۲	۱۸۷۵۴۵۸۵۵					۱۷۵	۴۱۷۰۰۰۰۰۰	۲۰۲	۱۰
۱	۱۸۶۱۹۶۶۱۱					۱۹۹	۴۱۴۰۰۰۰۰۰	۲۰۵	۱۱

پاسخ‌دهنده (خبرگان) با به کارگیری نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده‌ی CONOPT نتیجه شده‌اند. این اوزان، متوسط اوزان به دست آمده برای هر معیار هستند، که در یک بردار وزنی واحد در جدول ۱۱ ارائه شده‌اند.

مقدار نزدیک به صفر برای ξL^* ، نشان‌دهنده‌ی سازگاری برای مقایسه‌های زوجی است. بنابراین می‌توان گفت که امتیازهای به دست آمده قابل اتکا هستند و می‌توانند به منظور رتبه‌بندی نهایی اعضاء پارتویی استفاده شوند. پس از انجام محاسبه‌ها مطابق با شکل ۴، امتیاز نهایی اعضاء پارتویی محاسبه و عضو با بالاترین امتیاز جهت تشریح پاسخ‌های نهایی انتخاب شده است (جدول ۱۲).

بنابراین عضو پارتویی با مقدار ۲۰۵ برای تابع هدف ایمنی، ۴۱۴ میلیون برای تابع دوم و ۱۹۹ برای تابع هدف ریسک به عنوان بهترین عضو پارتویی انتخاب می‌شود، که ساختار نهایی جایابی تسهیلات مطابق با این عضو پارتویی در شکل ۷ مشاهده می‌شود، که مطابق آن، نتایج مذکور ساختاری کاملاً موجه دارند و بنابراین



شکل ۷. ساختار نهایی جانمایی تسهیلات.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۳. مقادیر استانداردشده‌ی توابع هدف مسئله به ازاء پاسخ نهایی مسئله.

درصد استاندارد سطح عدم وجود ایمنی در کارگاه	هزینه های احداث	درصد استاندارد ریسک احداث
۱۸٫۷۱	۵۹۰ میلیون	۱۲٫۷۷

جدول ۱۴. مشخصات مثال‌های عددی در ابعاد کوچک.

نمودار عددی	تعداد تسهیلات	تعداد مکان های بالقوه
۱	۵	۸
۲	۶	۱۰
۳	۹	۱۵
۴	۱۲	۱۵
۵	۱۳	۲۰

می‌توان بر کارایی پاسخ‌های حاصل شده صحه گذاشت. برای مثال، خوابگاه و سلف کارگران و همچنین محل اداری در مجاورت یکدیگر قرارگرفته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که عوامل ارتقاءدهنده‌ی سطح ایمنی به صورت کاملاً مشخصی در ایجاد پاسخ نهایی نقش داشته‌اند. در واقع، این دو تسهیل سطح کاربری تقریباً مشابهی دارند و هیچ خطری برای یکدیگر ایجاد نمی‌کنند. در مورد توابع هدف ریسک و ایمنی باید به این نکته توجه کرد که مقدار گزارش شده برابر با مجموع درصدهای ابتدایی است، که به عنوان پارامتر وارد مسئله شده‌اند. بنابراین، اعداد مذکور از مقدار ۱۰۰ بیشتر می‌شوند. البته می‌توان با استفاده از استانداردسازی، درصد واقعی را نیز گزارش کرد. به عبارت دیگر، اگر عدد به دست آمده بر مجموع پارامترهای ورودی برای هر تابع هدف تقسیم شود، درصد واقعی حاصل خواهد شد. بنابراین درصد استاندارد توابع هدف ریسک و ایمنی به صورت جدول ۱۳ خواهد بود.

مطابق جدول ۱۳، در این ساختار به میزان ۸۱٫۲۹=۱۸٫۷۱-۱ درصد سطح ایمنی وجود خواهد داشت، که عدد قابل توجهی است. بنابراین می‌توان گفت که پاسخ نهایی ارائه شده، سطح عملکرد مناسبی دارد و می‌تواند در اتخاذ تصمیم‌های مناسب به مدیران کمک کند. در ادامه، به تشریح عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی پرداخته شده است.

۳.۴. ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی

در بخش کنونی، به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی در حل نمودارهای عددی، تجزیه و تحلیل‌های لازم انجام شده است. با توجه به این‌که برای ارزیابی الگوریتم‌های چندهدفه نیاز به استفاده از سنجه‌های استاندارد است، در پژوهش حاضر، ۳ سنجه‌ی معروف در حوزه‌ی ذکر شده بررسی شده‌اند.

۱.۳.۴. مقایسه‌ی کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی

در بخش حاضر، به منظور بررسی نتایج حاصل از حل الگوریتم‌های پیشنهادی در مقایسه با نتایج مدل ریاضی، ۵ نمودار عددی تصادفی تولید و به کمک شاخص MID، کارایی الگوریتم پیشنهادی و مدل ریاضی ارزیابی شده است. ابعاد مثال‌های اشاره شده در جدول ۱۴ ارائه شده است.

باید توجه داشت که با توجه به این‌که الگوریتم‌های فراابتکاری از یک فضای اولیه‌ی تصادفی اقدام به حل مسئله و یافتن پاسخ بهینه می‌کنند، بنابراین لازم است که به منظور حصول بهترین پاسخ ممکن، هر الگوریتم به تعداد دفعات مختلف به صورت مستقل اجرا و بهترین پاسخ حاصل شده به عنوان جواب نهایی گزارش شود. البته باید به استواری پاسخ‌های تولیدی در اجراهای مختلف نیز توجه داشت. به عبارت دیگر، یک الگوریتم کارا، علاوه بر تولید پاسخ‌های نهایی با کیفیت بالا، باید قادر به تولید پاسخ‌های نسبتاً نزدیک به یکدیگر، در تکرارهای مستقل مختلف باشد. بدین منظور در پژوهش حاضر، بدترین، میانگین و بهترین پاسخ حاصل از اجرای هر الگوریتم گزارش شده است (جدول ۱۵).

مطابق اطلاعات جدول ۱۵ مشاهده می‌شود که در مقایسه‌ی بدترین پاسخ میانگین و بهترین پاسخ، روند تغییرات زمان حل مسئله دچار تغییرات قابل توجهی شده است. دلیل این امر را می‌توان در وجود ساختار تصادفی پاسخ‌های اولیه و تلاش در یافتن بخشی از فضای پاسخ دانست، که پاسخ بهینه در آن محیط قرار دارد. در واقع هر چقدر پاسخ‌های با کیفیت بالاتر در بخش Exploration حاصل شود، در بخش Exploitation، محاسبات کمتری انجام می‌شود و پاسخ نهایی به صورت مناسب‌تر و در زمان کمتری به دست می‌آید.

۵. نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادهای آتی

در پژوهش حاضر، به منظور بهینه‌سازی مسئله‌ی جایابی تسهیلات، یک مدل ریاضی چندهدفه با در نظرگرفتن اهداف ایمنی، هزینه و ریسک توسعه داده شده است. توابع هدف، شامل: بیشینه‌سازی سطح ایمنی، کمینه‌سازی هزینه‌های احداث و کمینه‌سازی مقدار ریسک جایابی بوده است. به منظور حل مدل ریاضی از روش محدودیت اپسیلون تقویت شده استفاده شده است. نتایج عددی حاصل از بررسی نمودار عددی در ابعاد کوچک، نشان‌دهنده‌ی صحت عملکرد مدل ریاضی در حصول پاسخ‌های بهینه‌ی سراسری است. اما با توجه به NP-hard بودن مسئله‌ی جایابی، جهت حل مسائل در ابعاد دنیای واقعی، دو الگوریتم فراابتکاری NSGAII و MOGWO پیشنهاد شده است. طبق نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که الگوریتم MOGWO، بهترین عملکرد را نسبت به NSGAII دارد. بنابراین می‌توان در حصول پاسخ‌های نهایی از الگوریتم MOGWO استفاده کرد. به منظور توسعه‌ی دامنه‌ی مطالعات آتی، این موارد به عنوان پیشنهادهای پژوهشی ارائه شده است:

۱. استفاده از موارد مطالعاتی مختلف و پیاده‌سازی نتایج به دست آمده در محیط‌های واقعی بزرگتر می‌تواند به عنوان اولین پیشنهاد تحقیق مد نظر قرارگیرد. این موضوع از آن جهت مهم است که بررسی نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی خروجی ساختار پیشنهادی در محیط‌های واقعی می‌تواند دامنه‌ی کارایی مدل و الگوریتم‌ها را به طور مشخصی نشان دهد.

۲. استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری جدید و مقایسه‌ی نتایج را می‌توان به عنوان پیشنهاد پژوهشی دیگری در نظر گرفت. این موضوع می‌تواند باعث فراهم شدن زمینه‌ی مناسب جهت تولید پاسخ‌های بهتر توسط سایر

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۵. مقایسه‌ی نتایج حاصل از حل مدل ریاضی و الگوریتم‌های پیشنهادی.

اندازه نمونه	تعداد نمونه	بدترین پاسخ‌ها					پاسخ میانگین					بهترین پاسخ‌ها				
		زمان اجرا (second)			MID		زمان اجرا (second)			MID		زمان اجرا (second)			MID	
		Cplex	*NSGAII*	*MOGWO*	*NSGAII*	*MOGWO*	*Cplex*	*NSGAII*	*MOGWO*	*NSGAII*	*MOGWO*	*Cplex*	*NSGAII*	*MOGWO*	*NSGAII*	*MOGWO*
	SM۱	۱۶۲	۲۵	۴۸	۳٫۷۶	۳٫۷۶	۱۵۳	۵۰	۳۱	۴٫۰۹	۳٫۴۱	۱۶۷	۲۷	۲۶	۱٫۷۱	۱٫۵۵
	SM۲	۱۹۲	۴۶	۷۹	۴٫۹۰	۴٫۹۰	۲۰۱	۵۳	۳۷	۳٫۷۶	۳٫۷۶	۳۲۳	۳۲	۴۳	۱٫۷۱	۱٫۷۱
کوچک	SM۳	۳۰۹	۱۲۱	۱۱۳	۶٫۵۲	۶٫۵۲	۳۰۲	۷۲	۶۲	۶٫۸۹	۵٫۷۴	۳۵۳	۶۹	۸۳	۲٫۶۱	۲٫۶۱
	SM۴	۳۳۰	۷۸	۱۷۰	۸٫۰۷	۸٫۰۷	۳۲۶	۱۲۵	۱۷۵	۶٫۶۴	۶٫۶۴	۳۴۱	۹۹	۹۸	۴٫۴۰	۳٫۶۷
	SM۵	۳۴۸	۸۹	۱۸۶	۱۰٫۷۳	۹٫۷۵	۳۳۵	۱۳۳	۱۸۲	۸٫۲۱	۷٫۴۶	۳۴۳	۱۰۸	۱۲۸	۵٫۷۶	۴٫۴۳

الگوریتم‌ها و همچنین مقایسه‌ی کارکرد الگوریتم‌های مختلف در مسئله‌ی حاضر شود.

۳. استفاده از رویکردهای برنامه‌ریزی استوار، از جمله روش سیم و برتسیماس می‌تواند کاربرد مناسبی را ایجاد کند. با توجه به این‌که همواره تخمین برخی از پارامترهای مسئله، عدم قطعیت ذاتی دارد و یا این‌که به هر دلیلی مقداردهی آن مشکل است، بنابراین استفاده از رویکردهای برخورد با شرایط عدم قطعیت می‌تواند باعث گسترش سطح کاربرد مسئله شود. یکی از معتبرترین روش‌های برخورد با عدم قطعیت نیز استفاده از برنامه‌ریزی استوار است، که منجر به ایجاد پاسخ‌هایی استوار در مقابل تغییرات می‌شود

۴. ارائه‌ی الگوریتم‌های دقیق مانند الگوریتم شاخه - کران و شاخه - برش نیز می‌تواند تضمینی در حصول پاسخ‌های دقیق در ابعاد متوسط و بزرگ ایجاد کند.

پانوشت

1. Ning

منابع (References)

1. Yi, W., Chi, H.-L. and Wang, S. "Mathematical programming models for construction site layout problems", *Automation in Construction*, **85**, pp. 241-248 (2018).
2. Al Hawarneh, A., Bendak, S. and Ghanim, F. "Dynamic facilities planning model for large scale construction projects", *Automation in Construction*, **98**, pp. 72-89 (2019).
3. Said, H. and El-Rayes, K. "Performance of global optimization models for dynamic site layout planning of construction projects", *Automation in Construction*, **36**, pp. 71-78 (2013).
4. Winston, W.L. and Goldberg, J.B. "Operations research: applications and algorithms (Vol. 3)", *Thomson/Brooks/Cole Belmont^ eCalif Calif* (2004).
5. Mustafa, O., Bazaati, S., Aydinli, S. and et al. "Construction site layout planning:application of multi-objective particle swarm optimization", *Teknik Dergi*, **29**(6), pp. 8691-8713 (2018).
6. Kumar, S. and Bansal, V. "Use of GIS in locating TFs safely on a construction site in hilly regions", *International Journal of Construction Management*, **19**(4), pp. 341-353 (2019).
7. Zhao, S. and Li, Z. "Multi-objective optimization for construction site layout planning problem under fuzzy random environment", *Paper presented at the Computational Sciences and Optimization (CSO), 7th International Joint Conference* (2014).
8. Huang, C. and Wong, C. "Optimisation of site layout planning for multiple construction stages with safety considerations and requirements", *Automation in Construction*, **53**, pp. 58-68 (2015).
9. Huo, X., Ann, T. and Wu, Z. "A comparative analysis of site planning and design among green building rating tools", *Journal of cleaner production*, **147**, pp. 352-359 (2017).
10. Ning, X., Qi, J., Wu, C. and et al. "A tri-objective ant colony optimization based model for planning safe construction site layout", *Automation in Construction*, **89**, pp. 1-12 (2018).
11. Ning, X., Qi, J., Wu, C. and et al. "Reducing noise pollution by planning construction site layout via a multi-objective optimization model", *Journal of Cleaner Production*, **222**, pp. 218-230 (2019).
12. Kaveh, A. and Rastegar Moghaddam, M. "A hybrid WOA-CBO algorithm for construction site layout plan-

www.SID.ir

Archive of SID

ning problem", *Scientia Iranica*, **25**(3), pp. 1094-1104 (2018).

13. Moradi, N. and Shadrokh, S. "A simulated annealing optimization algorithm for equal and un-equal area construction site layout problem", *International Journal of Research in Industrial Engineering*, **8**(2), pp. 89-104 (2019).
14. Benjaoran, V. and Peansupap, V. "Grid-based construction site layout planning with particle swarm optimisation and travel path distance", *Construction Management and Economics*, **38**(1), pp. 1-16 (2019).
15. Parhizgarsharif, A., Lork, A. and Telvari, A. "A hybrid approach based on the BWM-VIKOR and GRA for ranking facility location in construction site layout for Mehr project in Tehran", *Decision Science Letters*, **8**(3), pp. 233-248 (2019).
16. Mavrotas, G. and Florios, K. "An improved version of the -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems", *Applied Mathematics and Computation*, **219**(18), pp. 9652-9669 (2013).
17. Mavrotas, G., Figueira, J.R. and Siskos, E. "Robustness analysis methodology for multi-objective combinatorial optimization problems and application to project selection" *Omega*, **52**, pp. 142-155 (2015).
18. Hiayati, M., Wibowo, A. and Abdulrahman, S. "Preliminary review on population based approaches for physician scheduling", *Indonesian Association for Pattern Recognition International Conference (INAPR)*, Jakarta, Indonesia (2018).
19. Faris, S., Heidari, A.S., Al-Zoubi, A. and et al. "Time-varying hierarchical chains of salps with random weight networks for feature selection", *Expert Systems with Applications*, **140**, pp.112898 (2020).
20. Mirjalili, A., Mirjalili, M. and Lewis, A. "Gray Wolf Optimizer", *Advances in Engineering Software*, **69**, pp. 46-61 (2014).
21. Mirjalili, A., Saremi, S., Mirjalili, M. and et al. "Multi-objective gray wolf optimizer: A novel algorithm for multi-criterion optimization", *Expert Systems with Applications*, **47**, pp. 106-119 (2016).
22. Rezaei, J. "Best-worst multi-criteria decision-making method", *Omega*, **53**, pp. 49-57 (2015).
23. Rezaei, J. "Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model", *Omega*, **64**, pp. 126-130 (2016).

www.SID.ir