

ارزیابی توابع جریمه مختلف در بهینه‌سازی خط پروژه راه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات شتابدار (APSO) و برخورد اجسام (CBO)

نسرین حیدرآبادی‌زاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

علیرضا غنی زاده (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران،

ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۰ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۶

چکیده

طراحی خط پروژه‌ای بهینه که کمترین هزینه عملیات خاکی را داشته باشد، می‌تواند در کاهش هزینه‌های اجرایی پروژه‌های راه‌سازی بسیار مؤثر باشد. در تحقیقات گذشته تابع هدف عموماً به صورت کمینه‌سازی مجموع قدر مطلق فاصله بین خط پروژه و خط زمین در نظر گرفته می‌شد و با توجه به پیچیدگی تعیین احجام عملیات خاکی توجه چندانی به حداقل نمودن حجم دقیق عملیات خاکی نشده است. همچنین برای مقابله با محدودیت‌ها صرفاً از تابع جریمه ساکن استفاده شده است که در صورت عدم برآورده شدن یکی از محدودیت‌ها، ضریب نسبتاً بزرگی در تابع هدف ضرب و در نتیجه بسیاری از جمعیت‌های اولیه حذف می‌شوند و زمان همگرایی در تعیین جواب بهینه افزایش می‌یابد. هدف این تحقیق مقایسه توابع جریمه مختلف برای بهینه‌سازی خط پروژه با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری است. برای این منظور، نخست مسئله بهینه‌سازی خط پروژه بر اساس تابع هدف و محدودیت‌های مسئله فرمول‌بندی شد و تابع هدف به صورت هزینه اجرای عملیات خاکریزی و خاکبرداری و محدودیت‌ها به صورت حداکثر و حداقل شیب طولی، حداقل ارتفاع پل، عدم‌تداخل قوس‌ها و حداقل طول قوس‌های قائم در نظر گرفته شد. برای بهینه‌سازی مسئله از دو الگوریتم ازدحام ذرات شتابدار (APSO) و بهینه‌سازی برخورد اجسام (CBO) استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که انتخاب تابع جریمه بر سرعت و همچنین جواب بهینه که همان حداقل‌سازی هزینه اجرای عملیات خاکی است، تأثیر می‌گذارد. این تحقیق همچنین نشان داد که تابع جریمه از نوع تبرید همراه با الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام می‌تواند به صورت مؤثر برای بهینه‌سازی خط پروژه بکار رود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی خط پروژه، حجم عملیات خاکی، تابع جریمه تبرید، الگوریتم ازدحام ذرات شتابدار (APSO)، الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام (CBO).

۱. مقدمه

ملاحظات اقتصادی یکی از اساسی‌ترین عناصر در طراحی هندسی راه است و تعادل احجام خاکبرداری و خاکریزی و به حداقل رساندن مقدار حجم عملیات خاکی، ازجمله عوامل قابل‌توجهی است که می‌تواند هزینه‌های ساخت‌وساز راه را کاهش دهد. احجام عملیات خاکی وابسته به خط پروژه طراحی‌شده است و یک خط پروژه مناسب می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز نهایی داشته باشد. دو عامل مهم جهت انتخاب خط پروژه بهینه باید مدنظر قرار گیرند که این دو مورد عبارت از ۱) یک الگوریتم جستجوی توانمند و ۲) محاسبه دقیق تابع هزینه راه می‌باشد [Tat and Tao, 2003]. خط پروژه طراحی‌شده بایستی علاوه بر رعایت محدودیت‌هایی از قبیل حداقل و حداکثر شیب طولی، حداقل طول قوس‌های قائم، برقراری پیوستگی مسیر و رعایت ارتفاع نقاط اجباری، به لحاظ اقتصادی نیز کمترین هزینه اجرای عملیات خاکی را داشته باشد. ازآنجا که طراحی خط پروژه در پروژه‌های راه‌سازی به‌صورت دستی و توسط مهندس طراح و بر اساس تجربه انجام می‌شود، هیچ تضمینی برای بهینه بودن خط پروژه از دیدگاه کمینه‌سازی احجام عملیات خاکی وجود ندارد، بنابراین استفاده از یک روش نظام‌مند به‌منظور بهینه‌سازی خط پروژه به‌شدت احساس می‌شود.

در سال‌های گذشته روش‌های مختلف عددی و تحلیلی در حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که هر یک محدودیت‌های خاص خود را دارند. به‌عنوان مثال، روش‌های عددی با رسیدن به بهینه محلی متوقف می‌شوند و توانایی یافتن بهینه‌های سرتاسری را ندارند. روش‌های تحلیلی نیز در محاسبات خود نیاز به مشتقات تابع هدف دارند که معمولاً در مسائل عملی مهندسی یافتن یک رابطه صریح برای تابع هدف برحسب متغیرهای طراحی بسیار دشوار و بعضاً غیرممکن است. مجموعه این نواقص و ناتوانی‌ها منجر به استفاده روزافزون از روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در

سال‌های اخیر شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله بهینه‌سازی خط پروژه عموماً از روش‌های فرا ابتکاری برای تعیین خط پروژه بهینه استفاده می‌شود.

تاکنون تحقیقات متعددی در خصوص بهینه‌سازی خط پروژه مسیرهای راه و راه‌آهن انجام‌شده است. اسا (۱۹۸۸) ابتدا یک مدل برای رسم تمامی خط پروژه‌های قابل قبول ارائه کرد، سپس با استفاده از برنامه‌نویسی خطی هزینه‌های عملیات خاکی را حداقل نمود [Easa, 1988]. اسا (۱۹۹۹) همچنین یک مدل بهینه‌سازی خطی که بهترین قوس قائم سهمی را متناسب با پروفیل داده‌شده تعیین می‌کند، ارائه کرد. تابع هدف با کاهش اختلاف ارتفاع خط زمین با قوس قائم به بهینه‌سازی می‌پردازد [Easa, 1999]. یک راه ساده برای کاهش احجام خاکی نزدیک کردن خط پروژه به خط زمین طبیعی است [Garber and Hoel 1988; Abbey 1992; AUSTROADS 1993; Papacostas and Prevedouros, 1993; Banks, 2002]. با این وجود در تمامی موارد نزدیک کردن خط زمین به خط پروژه سبب حداقل شدن احجام عملیات خاکی نمی‌شود، چراکه نقاط سمت راست و چپ زمین می‌توانند دارای ارتفاعی بسیار متفاوت از ارتفاع محور مسیر باشند. لی و چانگ (۲۰۰۱) به‌منظور حداقل کردن هزینه‌ها، تعادل عملیات خاکی و حفظ سرعت ترافیک، خط پروژه را بهینه کردند. محدودیت‌ها شامل حداقل طول قوس قائم و حداکثر و حداقل شیب طولی بود که برای برخورد با آن‌ها از روش جریمه ساکن استفاده شد. جواب‌های به‌دست آمده، نشان‌دهنده بازده خوب مدل بود [Lee and Cheng, 2001]. تات و تاو (۲۰۰۳) با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار GIS به کاهش هزینه‌های راه‌سازی پرداختند. محدودیت‌ها شامل حداقل شعاع قوس، فاصله دید در قوس‌های محدب و مقعر و حداکثر شیب طولی بود که از روش جریمه ساکن برای برخورد با محدودیت‌ها استفاده شد [Tat and Tao, 2003]. از آنجا که طراحی خط پروژه معمولاً تنها در محور راه صورت

ارزیابی توابع جریمه مختلف در بهینه‌سازی خط پروژه راه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام

می‌گیرد، ممکن است سبب گمراهی تعادل احجام خاکی شود، بنابراین گوکتپ و همکارانش (۲۰۰۳) روشی را که در آن یک ارتفاع وزنی فرضی^۱ به نمایندگی از میانگین ارتفاع‌ها در افست‌های مختلف مقطع عرضی زمین طبیعی در نظر گرفته می‌شد، ارائه نمودند. در نتیجه توانستند با نزدیک کردن خط پروژه به خط وزنی فرضی، تعادل میان احجام خاکبرداری و خاکریزی را برقرار کنند [Goktepe and Lav, 2003]. آن‌ها بار دیگر با گنجاندن عوامل تورم و انقباض و نوع خاک در روش پیشنهادی‌شان به نتایج مقرون به‌صرفه‌تری دست یافتند [Goktepe and Lav, 2004]. وانگ و همکارانش (۲۰۱۱) یک روش فرا ابتکاری دومرحله‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک، برای بهینه‌سازی خط پروژه ارائه نمودند. در این تحقیق، اختلاف ارتفاع بین خط پروژه و خط زمین در محور راه به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. محدودیت‌های مسئله به‌صورت حداکثر شیب مجاز، طول قوس قائم، فاصله دید و عدم تداخل بین قوس‌های قائم در نظر گرفته شد که از روش جریمه ساکن برای لحاظ نمودن این محدودیت‌ها استفاده شد [Wang, Lukas and Ji, 2011]. باباییک و منجم (۲۰۱۲) هزینه‌های مسیر را فرموله و خط پروژه مسیرهای راه‌آهن را با توجه به هزینه‌های عملیاتی و ساخت‌وساز بهینه کردند. هزینه‌های عملیاتی و ساخت‌وساز که به تغییرات شیب حساس بودند، به‌عنوان متغیرهای تصمیم در مدل قرار گرفتند. برای حل تابع هدف، یک روش جستجوی مستقیم برای یافتن فضای جستجو و یک الگوریتم حل‌کننده (الگوریتم ژنتیک) برای پیدا کردن جواب بهینه بکار گرفته شد. محدودیت‌های مسئله شامل حداکثر شیب طولی و مسافت دید می‌باشد که تنها از روش جریمه ساکن برای برخورد با آن‌ها استفاده شد [Bababeik and Monajjem, 2012]. پو و همکارانش (۲۰۱۷) روشی را برای بهینه‌سازی هم‌زمان پلان و پروفیل طولی راه‌آهن برای یک مسیر کوهستانی پیشنهاد نمودند، به‌گونه‌ای که محدودیت تداخل قوس افقی و قائم را برآورد کند. آن‌ها از روش

جریمه ساکن برای برخورد با محدودیت‌ها استفاده کردند. در این تحقیق از یک الگوریتم پیشرفته برای جستجوی پلان و پروفیل‌های دلخواه راه‌آهن با استفاده از مدل بهینه‌سازی هم‌زمان استفاده شد که هزینه‌های کل را به حداقل رساند [Pu et al. 2017]. لی و همکارانش (۲۰۱۷) پلان راه‌آهن کوهستانی را با استفاده از الگوریتم تبدیل مسافت دوطرفه و الگوریتم ژنتیک بهینه کردند. آن‌ها از روش ترکیبی که در آن الگوریتم تبدیل مسافت دوطرفه به‌طور خودکار قبل از اینکه الگوریتم ژنتیک پلان را تصحیح کند نقاط کنترل را انتخاب می‌کند و مشکل یافتن پلان در مناطق کوهستانی را حل می‌کند استفاده کردند و از روش جریمه ساکن برای برخورد با محدودیت‌ها استفاده کردند [Le and Pu, 2017].

در تحقیقات گذشته عموماً تابع هدف به‌صورت مجموع قدر مطلق فاصله بین خط پروژه و خط زمین در نظر گرفته‌شده است در صورتی‌که در تحقیق حاضر احجام عملیات خاکی با توجه به مقطع عرضی تیپ و بهره‌گیری از روش منشوری به‌صورت دقیق محاسبه گردیده است. همچنین در تحقیقات گذشته برای در نظر گرفتن محدودیت‌ها تنها از تابع جریمه ساکن استفاده‌شده است و هیچ‌گونه تحقیقی در خصوص تأثیر توابع جریمه مختلف بر سرعت همگرایی و جواب بهینه مسئله بهینه‌سازی خط پروژه انجام‌نشده است. در این مقاله پس از معرفی الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات شتابدار و الگوریتم برخورد اجسام، به معرفی سه تابع جریمه ساکن، پویا و تبرید پرداخته‌شده است. سپس مسئله بهینه‌سازی خط پروژه فرموله و محدودیت‌ها مشخص شدند و در مرحله بعد دو مسیر در توپوگرافی دشت و تپه‌ماهور طراحی گردید. پس از بهینه‌سازی خط پروژه این دو مسیر، هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و هر یک از روش‌های جریمه از دیدگاه درصد بهینگی و سرعت اجرا با یکدیگر مقایسه شدند.

۲. الگوریتم‌های بهینه‌سازی

۲-۱ الگوریتم ازدحام ذرات شتابدار

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲ توسط کندی و ابرهاردت در سال ۱۹۹۵ بر اساس رفتار گروهی در طبیعت، مانند حرکت گروهی ماهی‌ها و پرندگان توسعه یافت [Kennedy and Eberhart, 1995]. بهینه‌سازی ازدحام ذرات استاندارد، علاوه بر بهترین مقدار سرتاسری (بهترین مقداری که تاکنون توسط تمام ذرات در میان جمعیت به دست آمده است)، از بهترین مقدار فردی (بهترین جوابی که تاکنون برای هر ذره به طور جداگانه به دست آمد است) نیز استفاده می‌کند. یکی از دلایل استفاده از بهترین مقدار فردی افزایش تنوع در کیفیت جواب‌ها است. با این حال، این تنوع می‌تواند با استفاده از تعدادی ابزار تصادفی شبیه‌سازی شود. علاوه بر این، هیچ دلیل قانع‌کننده‌ای برای استفاده از بهترین مقدار فردی وجود ندارد، مگر اینکه مسئله بهینه‌سازی، چند هدف یا غیرخطی باشد. بهینه‌سازی ازدحام ذرات شتابدار تنها از بهترین مقدار سرتاسری استفاده می‌کند که این مورد سبب افزایش سرعت همگرایی این الگوریتم در مقایسه با بهینه‌سازی ازدحام ذرات استاندارد می‌شود [Yang, et al. 2011].

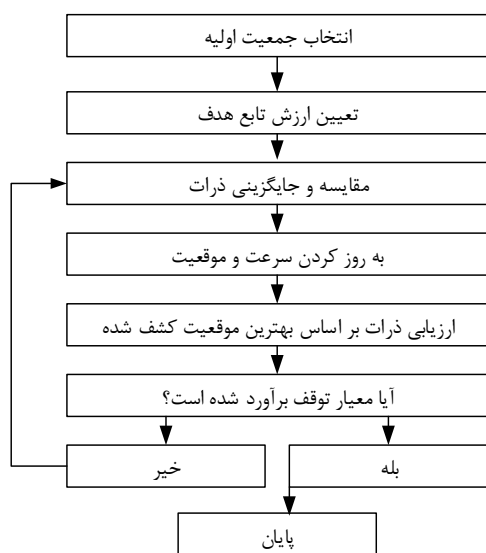
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شتابدار^۳ (APSO) توسط یانگ در سال ۲۰۰۸ توسعه داده شد [Yang, et al. 2008]. در این الگوریتم، ذراتی (پاسخ‌های مسئله) وجود دارند که در فضای جستجوی تابعی که قصد بهینه‌سازی آن را داریم، پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس هر ذره با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که قبلاً در آن بوده و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. کلیه ذرات جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شود تا جواب بهینه به دست آید. با توجه به این موارد، در هر مرحله سرعت جدیدی برای ذرات

محاسبه می‌شود. این الگوریتم دارای دو عملگر اصلی به‌روزرسانی سرعت (رابطه ۱) و به‌روزرسانی موقعیت (رابطه ۲) بوده و دارای ماهیت پیوسته است.

$$v_i^{t+1} = v_i^t + \beta(g^* - x_i^t) + \alpha \varepsilon_t \quad (1)$$

$$x_i^{t+1} = (1 - \beta)x_i^t + \beta g^* + \alpha \varepsilon_t \quad (2)$$

در روابط بالا، v_i^{t+1} و x_i^{t+1} به ترتیب سرعت و موقعیت ذره i در تکرار $t+1$ ، v_i^t و x_i^t به ترتیب سرعت و موقعیت ذره i در تکرار t ، α و β (پارامترهای این الگوریتم) اعداد ثابت و مثبتی هستند، ε بردار تصادفی دارای توزیع نرمال در محدوده $[0, 1]$ و g^* بهترین جواب سرتاسری می‌باشد [Yang, et al. 2011]. در شکل (۱)، مراحل کلی الگوریتم ازدحام ذرات شتابدار نشان داده شده است.



شکل ۱. مراحل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شتابدار [Yang, et al. 2011].

۲-۲ الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام (CBO)

بهینه‌سازی برخورد اجسام^۴ (CBO)، یک الگوریتم جستجوی فرا ابتکاری جدید است که توسط کاوه و مهدوی در سال ۲۰۱۴ توسعه یافته است [Kaveh and Mahdavi, 2014]. این الگوریتم الهام گرفته شده از برخورد اجسامی است که پس از برخورد، با حداقل

ارزیابی توابع جریمه مختلف در بهینه‌سازی خط پروژه راه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام

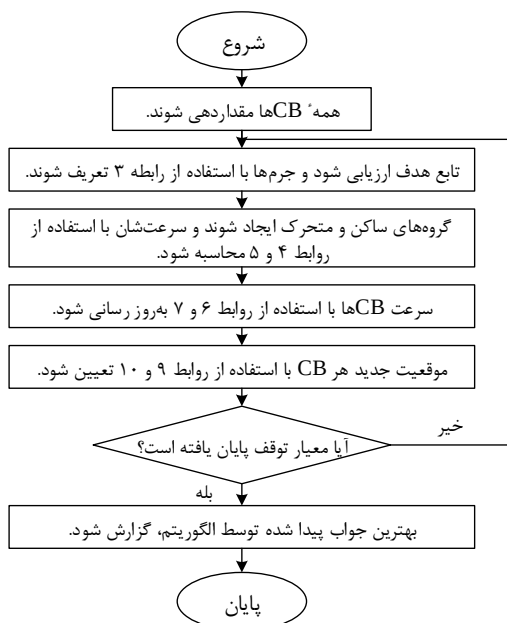
$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{iter}}{\text{iter}_{\max}} \quad (8)$$

که در آن iter و iter_{max} تعداد تکرار فعلی و تعداد کل تکرارها برای فرایند بهینه‌سازی و ε ضریب جبران است. سپس موقعیت‌های جدید هر گروه برای هر جفت اجسام برخوردکننده با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ به‌روزرسانی می‌شود.

$$x_i^{\text{new}} = x_i + \text{rand} \cdot v_i'; \quad i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} \quad (9)$$

$$x_i^{\text{new}} = x_{i-\frac{n}{2}} + \text{rand} \cdot v_i'; \quad i = \frac{n}{2} + 1, \frac{n}{2} + 2, \dots, n \quad (10)$$

که x_i^{new} ، x_i و v_i' به ترتیب موقعیت جدید، موقعیت قبلی و سرعت بعد از برخورد جسم i ام است. rand یک بردار تصادفی از توزیع یکنواخت در محدوده $[-1, 1]$ و علامت "°" نشان‌دهنده ضریب عنصر به عنصر است. شکل ۲ مراحل الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام را نشان می‌دهد [Kaveh and Ghazaan, 2014].



شکل ۲. مراحل الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام [Kaveh and Ghazaan, 2014]

۳. بهینه‌سازی مقید

روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی مقید به دو گروه قابل تفکیک هستند که مهم‌ترین آن‌ها روش‌های مبتنی بر

سطح انرژی نسبت به هم حرکت می‌کنند. CBO مفهوم ساده‌ای دارد و به هیچ پارامتر داخلی بستگی ندارد. در برخورد دو جسم، جسم X_k دارای جرمی مشخص است که با استفاده از رابطه ۳ به شکل زیر قابل تعیین است:

$$m_k = \frac{\frac{1}{\text{fit}(k)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\text{fit}(i)}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

که در آن $\text{fit}(i)$ نشان‌دهنده مقدار تابع هدف برای برخورد جسم i ام و n تعداد اجسام است. به‌منظور انتخاب دو جسمی که باهم برخورد می‌کنند، اجسام با توجه به جرم‌شان به‌صورت کاهشی به دو گروه مساوی طبقه‌بندی می‌شوند: گروه (i) گروه ثابت، گروه (ii) گروه در حال حرکت. برخورد اجسام در حال حرکت به اشیاء ثابت با هدف بهبود موقعیت آن‌ها و همچنین حرکت دادن اشیاء ساکن به سمت موقعیت بهتر است. سرعت اجسام ساکن و متحرک قبل از برخورد (v_i) به ترتیب با استفاده از رابطه (۴) و رابطه (۵) تعیین می‌شود.

$$v_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} \quad (4)$$

$$v_i = x_{i-\frac{n}{2}} - x_i \quad (5)$$

$$i = \frac{n}{2} + 1, \frac{n}{2} + 2, \dots, n$$

سرعت اجسام ساکن و متحرک پس از برخورد (v'_i) به ترتیب با استفاده از روابط (۶) و (۷) به دست می‌آید.

$$v'_i = \left(m_{i+\frac{n}{2}} + \varepsilon m_{i-\frac{n}{2}} \right) v_{i+\frac{n}{2}} / m_i + m_{i+\frac{n}{2}} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, \frac{n}{2}$$

$$v'_i = \left(m_i - \varepsilon m_{i-\frac{n}{2}} \right) v_i / m_i + m_{i-\frac{n}{2}} \quad (7)$$

$$i = \frac{n}{2} + 1, \frac{n}{2} + 2, \dots, n$$

۱. تولید L رده برای تخطی از هر قید
۲. تولید ضرایب جریمه $R_{ij} (i=1, \dots, L; j=1, \dots, m)$ برای هر رده از تخطی و هر قید به نحوی که ضرایب بزرگتر به رده‌های تخطی بزرگتر اختصاص داده می‌شود.
۳. تولید یک جمعیت تصادفی با استفاده از پاسخ‌های قابل قبول و غیرقابل قبول.
۴. ارزیابی پاسخ‌ها با استفاده از رابطه زیر:

$$\text{eval}(\bar{x}) = f(\bar{x}) + \sum_{j=1}^m R_{ij} \max[0, g_j(\bar{x})]^2 \quad (13)$$

به نحوی که در رابطه فوق R_{ij} نشان‌دهنده ضریب جریمه وابسته به قید j ام و رده تخطی i ام، g_j نشان‌دهنده محدودیت‌های نابرابری و m نشان‌دهنده تعداد قیود است [Homaifar, Lai and Qi, 1994].

۳-۲ جریمه‌های پویا

در روش‌های این دسته، پارامترهای جریمه عموماً به شماره نسل یا تکرار جاری وابسته‌اند. به نحوی که در مراحل ابتدایی حل، به دلیل تأکید بر جستجوی فراگیر مقدار جریمه کم و با پیشرفت الگوریتم به منظور تأکید بیشتر بر جستجوی محلی، مقدار جریمه افزایش می‌یابد. جونز و هوک (۱۹۹۴) تابع پویای زیر را برای ارزیابی پاسخ‌ها در هر تکرار پیشنهاد نمودند:

$$\text{eval}(\bar{x}) = f(\bar{x}) + (C)^\alpha \text{SVC}(\beta, \bar{x}) \quad (14)$$

به طوری که C ، α و β ثابت‌هایی هستند که به وسیله کاربر تعریف می‌شوند. جونز و هوک برای تعریف SVC رابطه زیر را بکار بردند.

$$\text{SVC}(\beta, \bar{x}) = \sum_{i=1}^q D_i^\beta(\bar{x}) \quad (15)$$

به نحوی که:

$$D_i(\bar{x}) = \begin{cases} 0 & g_i(\bar{x}) \leq 0, 1 \leq i \leq q \\ |g_i(\bar{x})| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

جستجوی ناحیه قابل قبول طراحی و روش‌های مبتنی بر تابع جریمه می‌باشند. استفاده از روش‌های گروه اول بیشتر در مسائل ساده که تعداد متغیرهای کمی دارند، مفید است؛ اما در مسائل بزرگ مهندسی با طبیعت پیچیده و تعداد زیاد متغیرها و قیود طراحی، روش‌های گروه دوم مفیدتر هستند [Coello, 2002]. روش‌های جریمه، مسائل مقید را به دو صورت به مسائل نامقید تبدیل می‌کنند. روش اول استفاده از روش افزودنی یا جمع شونده زیر است:

$$\text{eval}(\bar{x}) = \begin{cases} f(\bar{x}) & \text{if } \bar{x} \in F \\ f(\bar{x}) + p(\bar{x}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

به نحوی که F ، ناحیه پاسخ‌های امکان‌پذیر و $P(x)$ نشان‌دهنده بخش جریمه است. در مسائل کمینه‌سازی، در صورتی که تخطی از محدودیت صورت نگیرد، مقدار $P(x)$ برابر صفر خواهد بود و در غیر این صورت، مقدار $P(x)$ مثبت خواهد بود. روش دوم بهره‌گیری از روش ضرب شونده به شکل زیر است:

$$\text{eval}(\bar{x}) = \begin{cases} f(\bar{x}) & \text{if } \bar{x} \in F \\ f(\bar{x}).p(\bar{x}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

در مسائل کمینه‌سازی اگر تخطی صورت نگیرد، $P(x)$ برابر یک و در غیر این صورت بزرگتر از یک خواهد بود. در مجموع، روش جریمه جمع شونده، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [Coello, 2002].

۳-۱ جریمه‌های ساکن

در جریمه‌های این گروه، پارامترهای جریمه به شماره نسل یا تکرار جاری وابسته نیستند و یک مقدار جریمه ثابت برای پاسخ‌های غیرقابل قبول به کار گرفته می‌شود. همایی‌فر و همکاران (۱۹۹۴)، نوعی از تابع جریمه ساکن را پیشنهاد دادند که در آن کاربر رده‌هایی از تخطی را تعریف می‌کند [Homaifar, Lai and Qi, 1994]. گام‌های این روش به صورت زیر است:

ارزیابی توابع جریمه مختلف در بهینه‌سازی خط پروژه راه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام

- مقدار τ کاهش می‌یابد،
- از بهترین جواب به‌عنوان نقطه شروع نسل بعدی استفاده می‌شود،
- A به‌روزرسانی می‌شود،
- گام‌های اصلی مراحل قبل تکرار می‌شوند.

درحالی‌که درجه حرارت τ کاهش می‌یابد، فشار انتخابی در جواب‌های غیرقابل قبول افزایش می‌یابد. در هر نسل، دما τ کاهش می‌یابد و بهترین جواب که در تکرار قبلی پیدا شد، به‌عنوان نقطه شروع تکرار بعدی قرار می‌گیرد. الگوریتم در یک نقطه‌ی انجماد که قبلاً تعیین شده است، τ_f ، قطع می‌شود. این روش به مقادیر پارامترها بسیار حساس است. روش خاصی برای تعیین این پارامترها برای هر مسئله خاص وجود ندارد. میخائیلویچ و اتیا $\tau_0=1$ ، $\tau_{i+1}=0.1\tau_i$ و $\tau_f=0.000001$ استفاده نمودند [Michalewicz and Attia, 1994].

کارلسون و شونکویلر (۱۹۹۸) برای استفاده از هر جمعیت استفاده‌شده رابطه زیر را پیشنهاد دادند [Carlson and Shonkwiler, 1998].

$$\text{eval}(\bar{x}) = \alpha(M, T)f(\bar{x}) \quad (18)$$

در این رابطه $\alpha(M, T)$ به پارامتر M و T بستگی دارد. دمای T تابعی از زمان اجرای الگوریتم است. شرط توقف زمانی است که T نزدیک به صفر شود. کارلسون و شونکویلر از تابع زیر برای محاسبه $\alpha(M, T)$ استفاده کردند.

$$\alpha(M, T) = e^{-M/T} \quad (19)$$

مقدار اولیه پارامتر جریمه کوچک است، اما در طول زمان افزایش می‌یابد تا جواب‌های غیرقابل قبول از نسل‌های گذشته حذف شود. برای تعیین T از رابطه (۲۰) استفاده می‌شود. در اینجا، t آخرین دمای مورد استفاده در تکرار قبلی را نشان می‌دهد [Carlson and Shonkwiler, 1998].

که در این رابطه، g_j نشان‌دهنده محدودیت‌های نابرابری است. روش پویا، مقدار جریمه را با تولید نسل‌ها افزایش می‌دهد. کیفیت پاسخ‌های ممکن، به تغییرات α و β بسیار حساس است. توضیحی در مورد میزان حساسیت روش به مقادیر مختلف C توسط جونز و هوک داده نشده است [Joines and Houck, 1994].

۳-۳ جریمه‌های تبریدی^۹

میخائیلویچ و اتیا (۱۹۹۴) روشی را بر مبنای ایده شبیه‌سازی تبرید در نظر گرفتند. در این روش ضریب مجازات در بسیاری از ذرات تولیدشده یک‌بار تغییر می‌کند (پس‌ازآنکه الگوریتم در بهینه محلی به دام افتاد). محدودیت‌ها در هر تکرار در نظر گرفته می‌شوند و جریمه در طول زمان افزایش می‌یابد (به‌عنوان مثال، دما در طول زمان کاهش می‌یابد) به‌طوری‌که جواب‌های غیرقابل قبول در نسل‌های گذشته به‌شدت جریمه می‌شوند. مراحل این روش عبارت‌اند از [Michalewicz and Attia, 1994]:

- تمام محدودیت‌ها به چهار زیرمجموعه تقسیم می‌شوند: معادلات خطی، نابرابری‌های خطی، معادلات غیرخطی و نابرابری‌های غیرخطی،
- یک نقطه‌ی تصادفی انتخاب می‌شود که محدودیت‌های خطی را برآورد کند و به‌عنوان نقطه شروع در نظر گرفته می‌شود. جمعیت اولیه، یک کپی از این نقطه واحد است،
- مجموعه‌ای از محدودیت‌های فعال A تولید می‌شود که شامل معادلات غیرخطی است و نابرابری‌های غیرخطی را نقض می‌کند،
- $\tau = \tau_0$ قرار داده می‌شود.
- جمعیت استفاده‌شده با استفاده از رابطه (۱۷) تکامل می‌یابد.
- اگر $\tau < \tau_f$ (نقطه انجماد) باشد، روند متوقف می‌شود، در غیر این صورت مراحل زیر انجام می‌شوند:

$$\text{eval}(\bar{x}, \tau) = f(\bar{x}) + \frac{1}{2\tau} \sum_{j \in A} f_j^2(\bar{x}) \quad (17)$$

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل/ سال یازدهم/ شماره سوم/ بهار ۱۳۹۹

(۲۰)

$$T = 1/\sqrt{t}$$

به شکل رابطه (۲۱) در نظر گرفته شده است:

$$\text{Min } f = \delta_1 \times C_c \times V_c + \delta_2 \times C_f \times V_f \quad (22)$$

در این روابط f مقدار تابع هدف، δ_1 ضریب تورم بعد از خاکبرداری، δ_2 ضریب انقباض بعد از خاکریزی، C_c و C_f به ترتیب هزینه خاکبرداری و خاکریزی به ازای هر مترمکعب V_c و V_f به ترتیب حجم خاکبرداری و خاکریزی برحسب مترمکعب هستند. سایر پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند.

در صورتی که محدودیت‌ها از مقدار مجاز خود تجاوز کنند، مقدار تابع هدف بر اساس چهار نوع تابع جریمه شامل جریمه ساکن (P_1)، جریمه پویا (P_2)، جریمه تیرید ۱ (P_3) و جریمه تیرید ۲ (P_4) از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$P_1 = f + \sum_{j=1}^m R_{ij} \max[0, g_j(x)]^2 \quad (23)$$

$$P_2 = f + (C)^\alpha \text{SVC}(\beta, x) \quad (24)$$

$$P_3 = f + \frac{1}{2\tau} \sum_{j \in A} f_j^2(x) \quad (25)$$

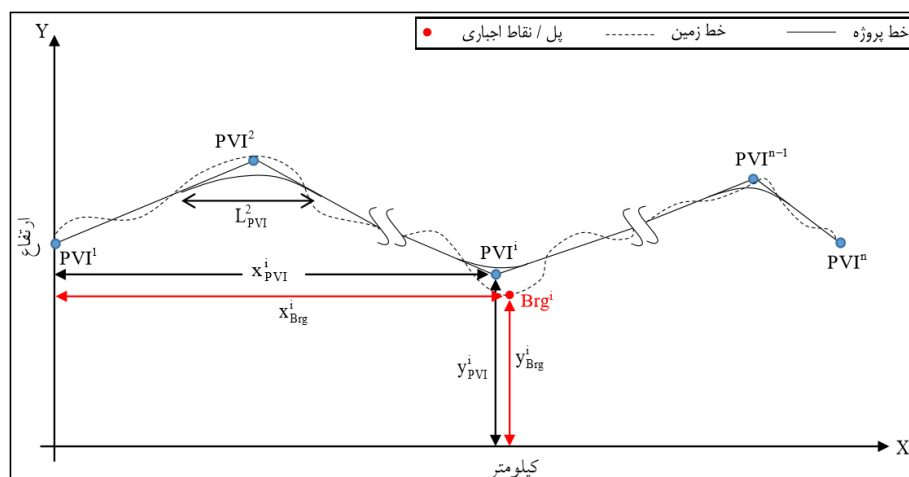
$$P_4 = e^{-M \cdot \sqrt{t}} \times f \quad (26)$$

۴. فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی خط پروژه

شکل (۳) قسمتی از پروفیل طولی مسیر را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این شکل منحنی نقطه‌چین نشان‌دهنده زمین موجود و منحنی توپر نشان‌دهنده خط پروژه است که از n سومه (PVI) تشکیل شده است. هر سومه دارای مشخصات x_{PVI}^i ، y_{PVI}^i و L_{PVI}^i است که این سه مقدار به ترتیب معرف کیلومتر، ارتفاع و طول قوس قائم در سومه i ام می‌باشند. مقدار L_{PVI}^i به ازای $i=1$ و $i=n$ برابر صفر است. همچنین نقاط توپر قرمز رنگ در شکل، نشان‌دهنده کالورت یا پل می‌باشند، که با سه پارامتر x_{Brg}^i ، y_{Brg}^i و h_{Brg}^i نشان داده می‌شوند. این سه پارامتر به ترتیب کیلومتر، ارتفاع و حداقل ارتفاع مجاز بین خط پروژه و پل را نشان می‌دهند.

۴-۱ تابع هدف

در این تحقیق، تابع هدف به صورت هزینه اجرای عملیات خاکی و



شکل ۳. قسمتی از پروفیل طولی مسیر.

اصلی جمع و یا ضرب می‌شود. سایر پارامترها قبلاً تشریح شده‌اند. به منظور محاسبه حجم عملیات خاکی باید با داشتن مقاطع عرضی، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل/ سال یازدهم/ شماره سوم/ بهار ۱۳۹۹

در این روابط p_1 تا p_4 مقادیر توابع جریمه مختلف را نشان می‌دهند که در صورتی که تخطی صورت گیرد تابعی با تابع هدف

ارزیابی توابع جریمه مختلف در بهینه‌سازی خط پروژه راه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام

۴-۲ محدودیت‌های مسئله

۴-۲-۱ شیب طولی

شیب خط پروژه معمولاً با توجه به پستی و بلندی، طبقه‌بندی عملکردی راه، قوس‌های افقی، قدرت وسایل نقلیه سنگین، هزینه تملک حریم راه، ایمنی، فواصل دید، هزینه‌های ساخت راه و زهکشی، فرهنگ رانندگی و منظر آرایایی تعیین می‌شود [نشریه ۴۱۵، ۱۳۹۱].

شیب طولی خط پروژه با توجه به سرعت طرح و نوع منطقه نبایستی از مقادیر حداقل و حداکثر ذکر شده در آیین‌نامه‌های طرح هندسی راه تجاوز کند. برای محاسبه شیب طولی از رابطه (۲۵) استفاده می‌شود.

$$S_{\min} \leq g^i = \frac{y_{PVI}^{i+1} - y_{PVI}^i}{x_{PVI}^{i+1} - x_{PVI}^i} \leq S_{\max} \quad (27)$$

$$i = 1, 2, \dots, N-1$$

که در این رابطه N تعداد سومه‌های خط پروژه، $S_{\min}$ حداقل شیب طولی مجاز، $S_{\max}$ حداکثر شیب طولی مجاز است و سایر پارامترها در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.

۴-۲-۲ حداقل طول قوس قائم

تغییر شیب طولی، به صورت تدریجی و به وسیله قوس قائم انجام می‌شود. قوس‌های قائم تأمین‌کننده مسافت دید کافی، تخلیه مناسب آب‌های سطحی، ایمنی، آسایش راننده و زیبایی ظاهری راه خواهند بود. طول قوس قائم باید به اندازه‌ای باشد که حداقل فاصله دید برای راننده وسیله نقلیه فراهم شود [نشریه ۴۱۵، ۱۳۹۱]. حداقل طول قوس قائم باید از رابطه زیر تبعیت کند:

$$L_i \geq K \times A_i \quad i = 2, 3, \dots, N-1 \quad (28)$$

$$A_i = \left| \frac{y_{PVI}^{i+1} - y_{PVI}^i}{x_{PVI}^{i+1} - x_{PVI}^i} - \frac{y_{PVI}^i - y_{PVI}^{i-1}}{x_{PVI}^i - x_{PVI}^{i-1}} \right| \quad (29)$$

$$i = 2, 3, \dots, N-1$$

که در این روابط N تعداد سومه‌های خط پروژه، L_i طول قوس

خط پروژه و مقطع عرضی تیپ، سطح خاکریزی و خاکبرداری برای مقاطع عرضی متوالی محاسبه و سپس حجم عملیات خاکی بر اساس روابط موجود تخمین زده شود.

در این تحقیق، برنامه توسعه داده شده با استفاده از روش مختصاتی سطح خاکبرداری و خاکریزی را برای هر مقطع عرضی محاسبه می‌کند. پس از محاسبه سطوح خاکبرداری و خاکریزی می‌توان از روش منشوری برای محاسبه حجم خاکبرداری و خاکریزی بین مقطع متوالی استفاده نمود.

رابطه منشوری برای محاسبه حجم محصور بین دو سطح A_1 و A_2 که در فاصله برابر با L از یکدیگر قرار دارند، به صورت زیر است:

$$V = \frac{A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2}}{3} L \quad (26)$$

که در آن V حجم بین دو مقطع متوالی، A_1 مساحت مقطع اول، A_2 مساحت مقطع دوم و L فاصله افقی بین دو مقطع ۱ و ۲ است. بسته به اینکه وضعیت خاکریزی و خاکبرداری دو مقطع متوالی در چه وضعیتی نسبت به یکدیگر قرار گیرند، حجم بین دو مقطع طبق یکی از شش حالتی که در مراجع مربوط به طرح هندسی راه به آن‌ها اشاره شده است، محاسبه می‌گردد.

به منظور محاسبه مقادیر پارامترهای هر یک از توابع جریمه مسئله‌ای با ۵۰ ذره و ۲۰۰۰ تکرار حل شد و مقادیر بهینه پارامترهای توابع جریمه به صورت سعی و خطا تعیین شد. در مورد تابع جریمه P_1 مقدار R_{ij} ، 10^{100} تعیین شد مقادیر کمتر از آن سبب می‌شد که محدودیت‌ها از مقدار مجاز خود تجاوز کنند. در مورد تابع جریمه P_2 محدوده α [۰.۵-۱]، محدوده β [۱-۱۰] و محدوده C [۰/۱-۲] در نظر گرفته شد. بهترین مقدار برای α ، β و C به ترتیب برابر ۳۸، ۲ و ۰/۵ به دست آمد. در مورد توابع جریمه P_3 و P_4 به ترتیب مقدار بهینه τ_i ، 10^{-100} و مقدار بهینه M ، ۱۰۰ تعیین شد. مقادیر کمتر از آن سبب می‌شد که محدودیت‌ها از مقدار مجاز خود تجاوز کنند.

قائم در سومه λ_m ، A_i قدر مطلق اختلاف شیب طرفین در سومه λ_m ، K میزان انحنا قوس قائم به ازای یک درصد اختلاف شیب و سایر پارامترها در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. مقدار K بستگی به سرعت طراحی مسیر و همچنین نوع قوس قائم دارد و با توجه به آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران (نشریه ۴۱۵) از جدول (۱) قابل تعیین است.

جدول ۱. مقادیر حداقل K برای فاصله دید توقف (نشریه ۴۱۵، ۱۳۹۱).

سرعت طرح (Km/h)	مقدار k برای قوس مقعر	مقدار K برای قوس محدب
۵۰	۱۳	۷
۶۰	۱۸	۱۱
۷۰	۲۳	۱۷
۸۰	۳۰	۲۶
۹۰	۳۸	۳۹
۱۰۰	۴۵	۵۲

در طراحی خط پروژه باید نقاط اجباری و ارتفاع مورد نیاز برای آن‌ها در نظر گرفته شود. در این تحقیق مهم‌ترین نقاط اجباری در طراحی خط پروژه یعنی پل‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به مطالعات هیدرولوژی کیلومتر، دهانه و همچنین حداقل ارتفاع آزاد پل‌ها تعیین می‌شود و ارتفاع خط پروژه در محل پل باید به گونه‌ای باشد که حداقل ارتفاع آزاد پل رعایت شود. برای این منظور باید ارتفاع خط پروژه در محل پل‌ها حداقل برابر با ضخامت تابلیه پل به اضافه ارتفاع آزاد پل در نظر گرفته شود.

۵. توسعه برنامه کامپیوتری به منظور بهینه‌سازی خط

پروژه

به منظور برآورد دقیق حجم عملیات خاکی، برنامه‌ای در محیط MATLAB نوشته شد. این برنامه از سه قسمت اصلی تشکیل شده است.

در قسمت اول، اطلاعات خط پروژه شامل کیلومتر، ارتفاع و طول قوس قائم در هر یک از سومه‌های خط پروژه و همچنین اطلاعات مقاطع عرضی شامل کیلومتر، آفست و ارتفاع نقاط مقاطع عرضی به عنوان ورودی‌ها توسط برنامه از طریق دو فایل اکسل مختلف خوانده می‌شوند و متناظر با هر مقطع عرضی، ارتفاع خط پروژه تعیین می‌شود.

در قسمت دوم با توجه به اطلاعات نقاط مقاطع عرضی، ارتفاع خط پروژه در مقطع عرضی مورد نظر و همچنین مشخصات مقطع عرضی تیپ شامل عرض سواره‌رو، عرض شانه، شیب سواره‌رو، شیب شانه، شیب خاکبرداری، شیب خاکریزی، عرض و عمق جوی زهکشی، مساحت خاکبرداری و خاکریزی برای هر مقطع با استفاده از روش مختصاتی محاسبه می‌شود.

در قسمت سوم با توجه به وضعیت دو مقطع عرضی متوالی و همچنین مساحت‌های خاکبرداری و خاکریزی محاسبه شده در

۴-۲-۳ عدم تداخل دو قوس قائم متوالی

به منظور افزایش ایمنی، راحتی و مسائل ساخت سعی می‌شود که مقدار طول در نظر گرفته شده برای هر قوس از حداقل مقدار خود بیشتر باشد. افزایش طول قوس‌ها بایستی به اندازه‌ای باشد که هیچ‌گونه تداخلی بین دو قوس متوالی صورت نگیرد و پیوستگی مسیر حفظ شود؛ بنابراین خط پروژه بهینه شده بایستی در رابطه زیر صدق کند.

$$(x_{pvi}^{i+1} - x_{pvi}^i) > \left(\frac{L_{pvi}^{i+1} + L_{pvi}^i}{2} \right) \quad (30)$$

$$i = 2, 3, \dots, N-2$$

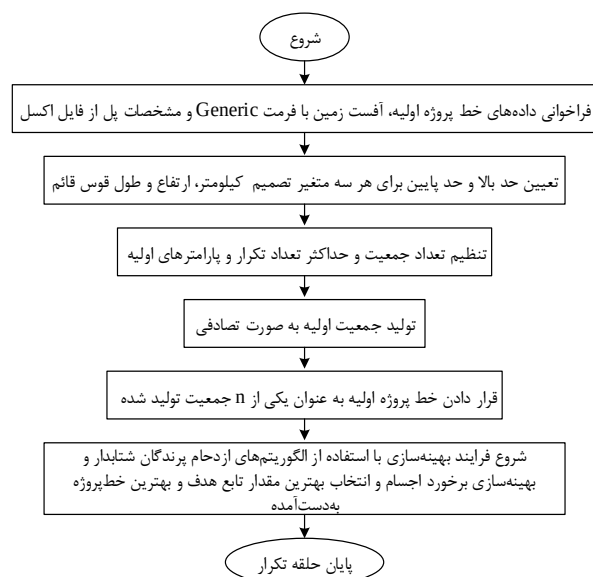
که در آن x_{pvi}^i کیلومتر سومه λ_m و L_{pvi}^i طول قوس قائم در سومه λ_m است.

۴-۲-۴ ارتفاع پل

ارزیابی توابع جریمه مختلف در بهینه‌سازی خط پروژه راه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام

و همچنین تعداد کل تکرارها را دریافت می‌کند. در تکرار اول الگوریتم بهینه‌سازی، پس از تولید جواب‌های تصادفی، خط پروژه اولیه به صورت تصادفی جایگزین یکی از جواب‌ها می‌شود و سپس تعداد تکرارهای الگوریتم بهینه‌سازی تا جایی ادامه می‌یابد که تکرارها به انتها برسد.

شکل (۴) به صورت شماتیک فرایند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. فرایند بهینه‌سازی.

۶. مسیر طراحی شده

به منظور ارزیابی تأثیر انتخاب توابع جریمه مختلف بر هزینه احجام عملیات خاکی، یک راه فرعی در دو توپوگرافی دشت و تپه‌ماهور طراحی شد. معیارهای طرح هندسی این دو مسیر در جدول (۳) آورده شده است.

پس از طراحی مسیر با نرم‌افزار AutoCAD Land Desktop، خط پروژه اولیه‌ای با رعایت محدودیت‌های طراحی، توسط یک کارشناس طرح هندسی مسیر ترسیم گردید. سپس اطلاعات خط پروژه شامل کیلومتر، ارتفاع و طول قوس قائم در هر یک از سومه‌ها و همچنین اطلاعات مقاطع عرضی شامل آفست و ارتفاع نقاط زمین

قسمت دوم، حجم خاکبرداری و خاکریزی بین مقاطع عرضی متوالی و نهایتاً حجم عملیات خاکبرداری و خاکریزی در طول کل مسیر محاسبه می‌شود.

از جمله نرم‌افزاری مطرح در زمینه طرح هندسی مسیر، نرم‌افزار AutoCAD Land Desktop 2009 است که توسط شرکت Autodesk عرضه شده است. به منظور اعتبار سنجی نتایج حاصل از برنامه توسعه داده شده در این تحقیق، حجم عملیات خاکی برای سه مسیر مختلف یکبار با استفاده از برنامه توسعه داده شده و یکبار با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD Land Desktop 2009 محاسبه گردید و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. نتایج محاسبه احجام عملیات خاکی با استفاده از این دو برنامه در جدول (۲) داده شده است.

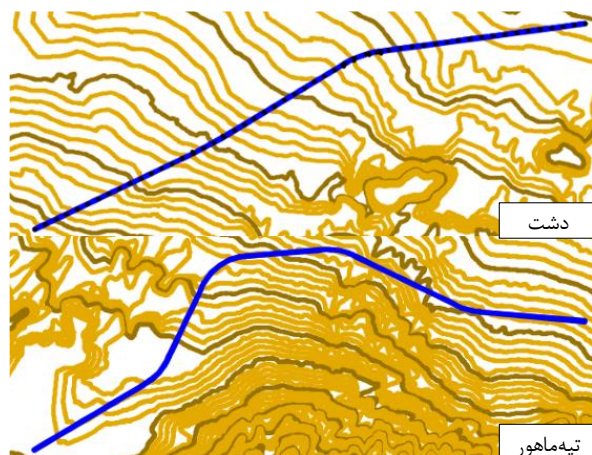
جدول ۲. احجام خاکی به دست آمده از نرم‌افزار AutoCAD Land Desktop 2009 و برنامه توسعه یافته.

نوع عملیات خاکی	روش	نوع توپوگرافی	
		دشت	تپه‌ماهور
حجم	نرم‌افزار لند	۸۱۹۶/۹	۱۵۳۶۹/۴۴
خاکبرداری	برنامه توسعه یافته	۸۷۶۷/۱۷	۱۵۱۶۷/۷۸
(m^3)	اختلاف (%)	۶/۵	۱/۳
حجم	نرم‌افزار لند	۲۷۷۸۷/۰۷	۲۲۴۹۸/۸۵
خاکریزی (m^3)	برنامه توسعه یافته	۲۹۳۸۴/۲۶	۲۱۷۸۱/۴۷
	اختلاف (%)	۵/۴	۳/۱۹

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، اختلاف بسیار کمی بین نتایج عملیات خاکی به دست آمده توسط برنامه توسعه داده شده و نرم‌افزار AutoCAD Land Desktop مشاهده می‌شود.

برنامه بهینه‌سازی پس از دریافت فایل‌های متنی مربوط به اطلاعات مقاطع عرضی و خط پروژه و همچنین پل‌ها، پارامترهای مربوط به الگوریتم‌های بهینه‌سازی شامل حد بالا و پایین متغیرهای تصمیم، پارامترهای داخلی الگوریتم بهینه‌سازی، تعداد جمعیت اولیه فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل/ سال یازدهم/ شماره سوم/ بهار ۱۳۹۹

هزینه خاکبرداری (C _c)	۱۳۰۰۰ (ریال در مترمکعب)
هزینه خاکریزی (C _i)	۱۶۰۰۰ (ریال در مترمکعب)



شکل ۵. مسیرهای طراحی شده در توپوگرافی های دشت و تپه ماهور.

۶-۱ انتخاب پارامترهای مربوط به الگوریتم های بهینه سازی

در الگوریتم ازدحام ذرات محدوده تغییر α برابر $[0/4-0/1]$ ، محدوده تغییر پارامتر β برابر $[0/7-0/1]$ و محدوده تغییر پارامتر γ برابر $[0/97-0/9]$ در نظر گرفته شد [Yang, et al. 2011]. به منظور تعیین مقادیر بهینه این سه پارامتر، خط پروژه بهینه مسیر با ۵۰ ذره و ۲۰۰۰ تکرار و با تغییر این سه پارامتر تعیین شد. در نهایت مقدار بهینه پارامتر α برابر با ۰/۲، مقدار بهینه پارامتر β برابر با ۰/۶ و مقدار بهینه پارامتر γ برابر با ۰/۹۶ به دست آمد. همچنین الگوریتم بهینه سازی برخورد اجسام فاقد پارامتر داخلی جهت تنظیم است.

۶-۲ مقایسه توابع جریمه مختلف از نظر مقدار بهینگی تابع

هدف

خط پروژه بهینه برای دو مسیر موردنظر در دو توپوگرافی دشت و تپه ماهور بر اساس چهار تابع جریمه مختلف با فرض ۵۰ جمعیت اولیه و ۲۰۰۰ تکرار با استفاده از دو الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات شتابدار و بهینه سازی برخورد اجسام تعیین شد. حد بالا و فصلنامه مهندسی حمل و نقل/ سال یازدهم/ شماره سوم/ بهار ۱۳۹۹

در دو طرف مسیر برای هر مقطع عرضی به همراه کیلومتر، ارتفاع و ارتفاع آزاد مورد نیاز پل ها جهت ورود به نرم افزار MATLAB در دو فایل اکسل نوشته شد. شکل شماره ۵ مسیر طراحی شده در توپوگرافی دشت و تپه ماهور را نشان می دهد.

جدول ۳. معیارهای عمومی مسیر طراحی شده.

پارامتر	شرح	دشت	تپه ماهور
معیارهای عمومی	طبقه بندی راه	فرعی	فرعی
	سرعت طراحی (km/h)	۶۰	۵۰
	طول مسیر (متر)	۵۰۹۰/۴۹	۵۱۰۲/۶۷
	عرض جاده (متر)	۱۱	۱۱
	شیب خاکبرداری (قائم به افق)	۳/۱	۳/۱
	شیب خاکریزی (قائم به افق)	۱/۳	۱/۳
	عرض جوی زهکشی (متر)	۰/۳	۰/۳
	عمق جوی زهکشی (متر)	۰/۵	۰/۵
	شیب خط (درصد)	۱/۵	۱/۵
	شیب شانه (درصد)	۱/۵	۱/۵
محدودیت های طراحی	تعداد نقاط اجباری	۶	۵
	تعداد سومه ها	۱۷	۲۷
	تعداد متغیرهای تصمیم	۴۵	۷۵
	حداکثر شیب طولی (درصد)	۷	۹
	حداقل شیب طولی (درصد)	۰	۰
	K برای قوس قائم محدب	۱۸	۱۳
	K برای قوس قائم مقعر	۱۱	۷
	حداقل ارتفاع آزاد پل ها (متر)	۱	۱

جدول ۵. مقادیر فرض شده پارامترها برای محاسبه هزینه عملیات

خاکی.

پارامتر	مقادیر
ضریب تورم (δ_1)	۱
ضریب انقباض (δ_2)	۱

ارزیابی توابع جریمه مختلف در بهینه‌سازی خط پروژه راه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام

پایین ارتفاع ۲۰ متر، حد بالا و پایین کیلومتر نصف فاصله سومه
موردنظر از سومه بعد و قبل از آن در نظر گرفته شد. نتایج
به‌دست‌آمده برای مسیر واقع در دو توپوگرافی دشت و تپه‌ماهور به
ترتیب در جداول ۴ الی ۷ آورده شده است. در هر حالت پس از
تعیین خط پروژه بهینه بر اساس تابع هدف موردنظر، درصد بهینگی

جدول ۴. مقادیر خط پروژه قبل و بعد از بهینه شدن توسط الگوریتم APSO در توپوگرافی دشت به ازای توابع جریمه مختلف.

عنوان	خط پروژه اولیه	P1	P2	P3	P4
هزینه عملیات خاکی (میلیون ریال)	۵۸۴/۱۲	۴۰۱/۵۳	۳۸۰/۸۴	۳۶۹/۵۸	۳۸۶/۶
حجم خاکبرداری (مترمکعب)	۸۷۶۷/۱۷	۱۱۰۲۶/۶۴	۱۲۰۶۶/۲۸	۱۲۶۲۶/۳	۱۲۷۲۳/۹۱
حجم خاکریزی (مترمکعب)	۲۹۳۸۴/۲۶	۱۶۱۳۶/۷۷	۱۳۹۹۸/۵۳	۱۲۸۳۹/۹۶	۱۳۸۲۴/۴۱
درصد بهینگی	-	۳۱/۲۶	۳۴/۸	۳۶/۷۳	۳۳/۸۱

جدول ۵. مقادیر خط پروژه قبل و بعد از بهینه شدن توسط الگوریتم CBO در توپوگرافی دشت به ازای توابع جریمه مختلف.

عنوان	خط پروژه اولیه	P1	P2	P3	P4
هزینه عملیات خاکی (میلیون ریال)	۵۸۴/۱۲	۳۴۷/۳۲	۳۱۹/۹۸	۳۱۵/۷۸	۳۵۴/۸۶
حجم خاکبرداری (مترمکعب)	۸۷۶۷/۱۷	۱۳۷۰۱/۶۴	۱۰۳۲۴/۳۹	۱۰۸۰۴/۷۳	۱۱۸۱۶/۶۶
حجم خاکریزی (مترمکعب)	۲۹۳۸۴/۲۶	۱۰۵۷۵/۲	۱۱۶۱۰/۲۴	۱۰۹۵۷/۱۱	۱۲۵۷۷/۹۱
درصد بهینگی	-	۴۰/۵۴	۴۵/۲۲	۴۵/۹۴	۳۹/۲۵

جدول ۶. مقادیر خط پروژه قبل و بعد از بهینه شدن توسط الگوریتم APSO در توپوگرافی تپه‌ماهور به ازای توابع جریمه مختلف.

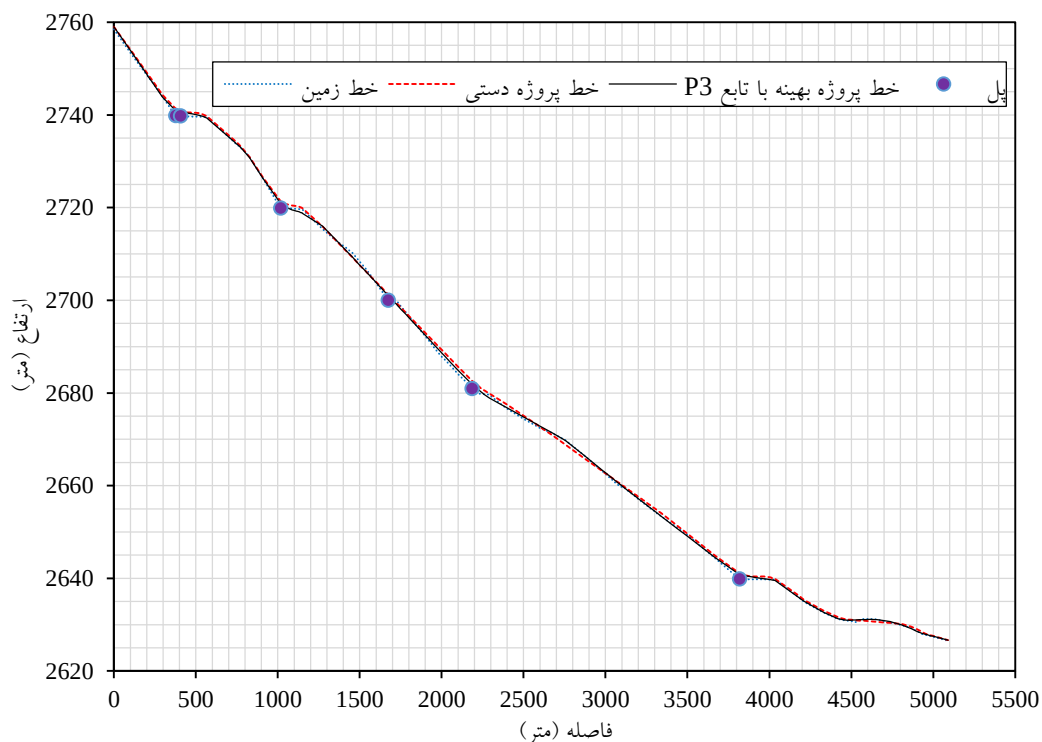
عنوان	خط پروژه اولیه	P1	P2	P3	P4
هزینه عملیات خاکی (میلیون ریال)	۵۴۵/۶۸	۳۹۸/۲۹	۳۹۷/۵۹	۳۸۶/۲۱	۳۸۱/۲۵
حجم خاکبرداری (مترمکعب)	۱۵۱۶۷/۷۸	۱۸۰۴۴/۱۲	۱۸۵۱۴/۷۹	۱۷۳۲۳/۱	۱۷۴۷۱/۲
حجم خاکریزی (مترمکعب)	۲۱۷۸۱/۴۷	۱۰۲۳۲/۱۴	۹۸۰۶/۳۹	۱۰۰۶۳/۲۹	۹۶۳۲/۸۶
درصد بهینگی	-	۲۷/۰۱	۲۷/۱۴	۲۹/۲۲	۳۰/۱۳

جدول ۷. مقادیر خط پروژه قبل و بعد از بهینه شدن توسط الگوریتم CBO در توپوگرافی تپه‌ماهور به ازای توابع جریمه مختلف.

عنوان	خط پروژه اولیه	P1	P2	P3	P4
هزینه عملیات خاکی (میلیون ریال)	۵۴۵/۶۸	۳۵۵/۷۸	۳۵۲/۹۱	۳۳۵/۲۹	۳۴۲/۹۶
حجم خاکبرداری (مترمکعب)	۱۵۱۶۷/۷۸	۱۴۹۵۱/۰۶	۱۵۷۶۴/۰۳	۱۴۷۸۵/۳۵	۱۵۱۸۰/۲
حجم خاکریزی (مترمکعب)	۲۱۷۸۱/۴۷	۱۰۰۸۸/۸۱	۹۲۴۸/۹۳	۸۹۴۲/۸۴	۹۱۰۱/۰۶

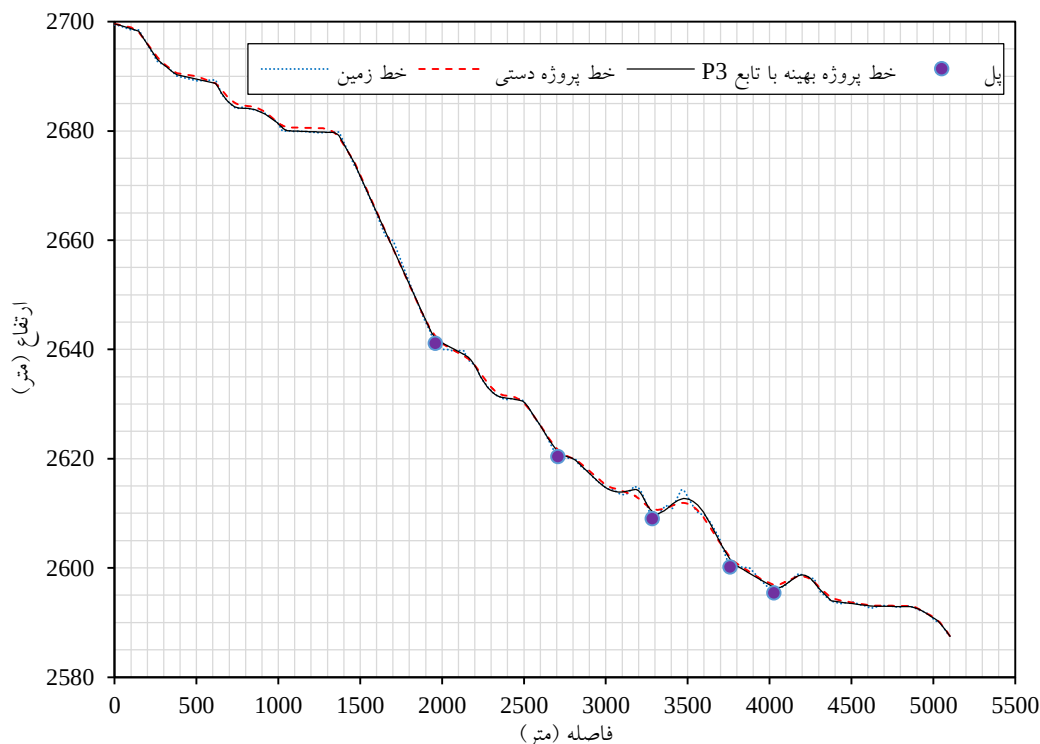
۳۷/۱۵	۳۸/۵۶	۳۵/۳۳	۳۴/۸	-	درصد بهینگی
-------	-------	-------	------	---	-------------

از آنجاکه درصد بهینگی در دو توپوگرافی دشت و تپه ماهور توسط الگوریتم CBO بیش تر از الگوریتم APSO است و تابع جریمه P3 در مقایسه با سایر توابع جریمه مقدار بهینه تری را در اختیار قرار می دهد، لذا نمودار خط زمین، خط پروژه دستی و خط پروژه بهینه توسط الگوریتم CBO برای تابع P3 در اشکال ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶. نمودار خط زمین، خط پروژه دستی و خط پروژه بهینه توسط الگوریتم CBO برای تابع P3 در توپوگرافی دشت.

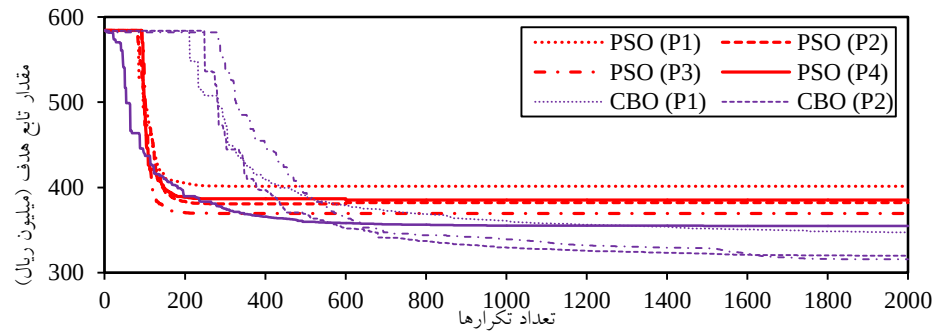
ارزیابی توابع جریمه مختلف در بهینه‌سازی خط پروژه راه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام



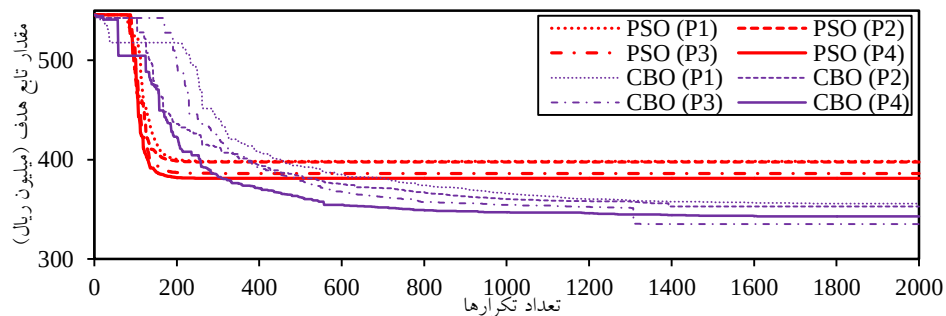
شکل ۷. نمودار خط زمین، خط پروژه دستی و خط پروژه بهینه توسط الگوریتم CBO برای تابع P3 در توپوگرافی تپه‌ماهور.

برابر ۲۷/۰۱، ۲۷/۱۴، ۲۹/۲۲ و ۳۰/۱۳ درصد می‌باشند. شکل‌های ۸ و ۹ نمودار بهینگی هر یک از چهار تابع جریمه را برای الگوریتم‌های برخورد اجسام و ازدحام ذرات شتابدار در توپوگرافی‌های دشت و تپه‌ماهور نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، الگوریتم ازدحام ذرات شتابدار با بهینه نمودن خط پروژه بعد از تعدادی تکرار محدود (حدود ۲۰۰ تکرار) در دام بهینه محلی افتاده و قادر به یافتن جواب بهینه سرتاسری نیست، درحالی‌که الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام با سرعت مناسب به سمت جواب بهینه سرتاسری همگرا می‌شود.

با توجه به جداول ارائه‌شده در بالا، الگوریتم بهینه‌سازی برخورد اجسام در مقایسه با الگوریتم ازدحام ذرات شتابدار توانایی بیشتری در یافتن جواب بهینه سرتاسری در تمامی توابع جریمه ارائه‌شده و در دو توپوگرافی دشت و تپه‌ماهور دارد. مقدار بهینگی توسط این الگوریتم به ترتیب برای توابع جریمه P1 تا P4 در توپوگرافی دشت برابر ۴۰/۵۴، ۴۵/۲۲، ۴۵/۹۴ و ۳۹/۲۵ و در توپوگرافی تپه‌ماهور به ترتیب برابر با ۳۴/۸، ۳۵/۳۳، ۳۸/۵۶ و ۳۷/۱۵ درصد است، درحالی‌که این مقادیر برای الگوریتم ازدحام ذرات در توپوگرافی دشت به ترتیب برابر ۳۱/۲۶، ۳۴/۸، ۳۶/۷۳ و ۳۳/۸۱ درصد است و در توپوگرافی تپه‌ماهور این مقادیر به ترتیب



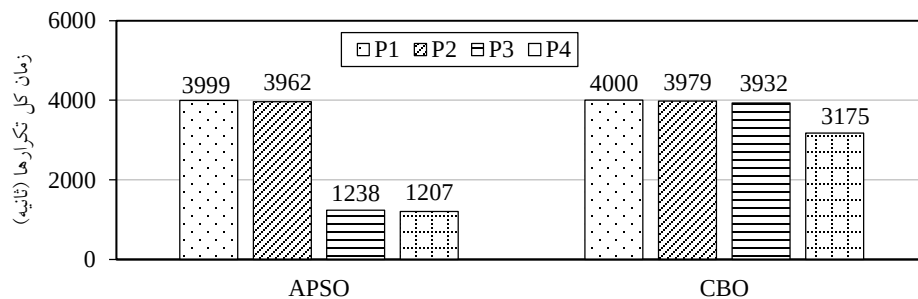
شکل ۸. نمودار بهینگی توابع جریمه مختلف در توپوگرافی دشت.



شکل ۹. نمودار بهینگی توابع جریمه مختلف در توپوگرافی تپه ماهور.

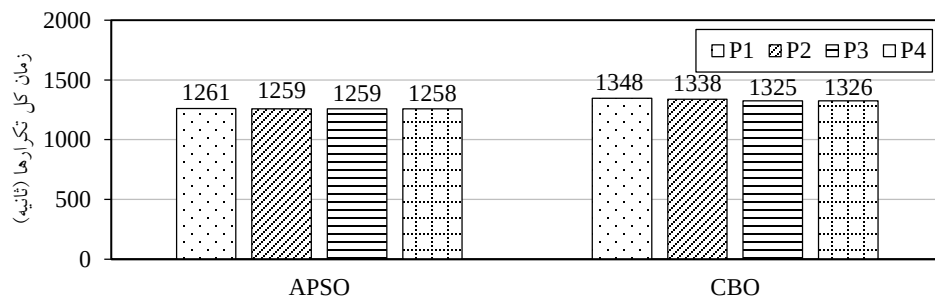
میخائیلویچ بهترین جواب بهینه را به دست می‌دهد. به منظور بررسی سرعت همگرایی الگوریتم‌ها و توابع جریمه مختلف، زمان اجرای کل تکرارها و آخرین تکرار بهینه در شکل‌های ۱۰ الی ۱۳ آورده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود توابع جریمه P3 و P4 (توابع مبتنی بر شبیه‌ساز تبریدی) در مقایسه با دو تابع جریمه دیگر مقدار بهینه‌تری را برای این مسئله در اختیار قرار می‌دهد. در مجموع می‌توان دید که نقطه نظر جواب بهینه سرتاسری، تابع جریمه تبرید

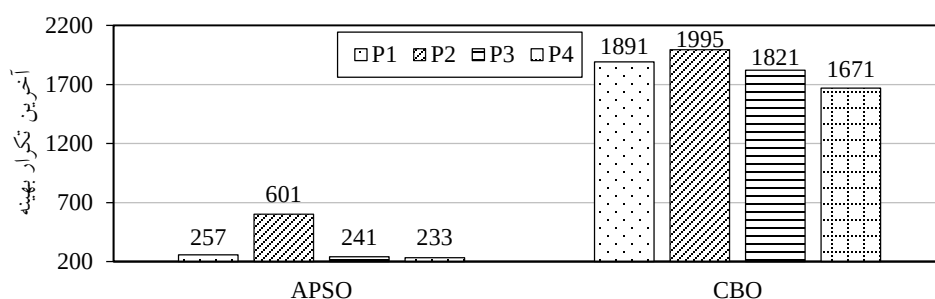


شکل ۱۰. زمان کل تکرارها در توپوگرافی دشت.

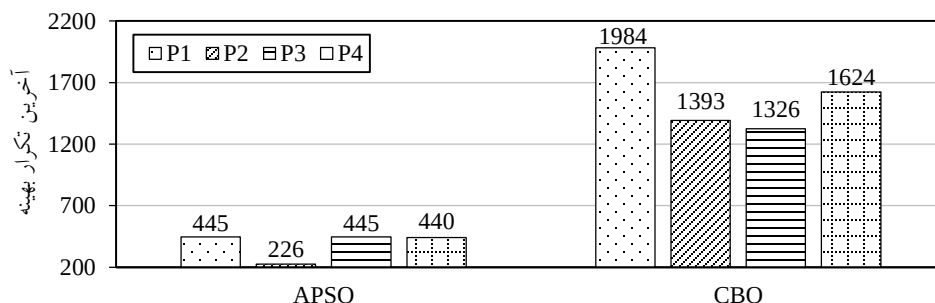
ارزیابی توابع جریمه مختلف در بهینه‌سازی خط پروژه راه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام



شکل ۱۱. زمان کل تکرارها در توپوگرافی تپه‌ماهور.



شکل ۱۲. آخرین تکرار بهینه در توپوگرافی دشت.



شکل ۱۳. آخرین تکرار بهینه در توپوگرافی تپه‌ماهور.

۸۸ و ۹۰ می‌یابد و این در حالی است که الگوریتم CBO برای چهار تابع جریمه P1 تا P4 اولین مقدار بهینگی خود را در توپوگرافی دشت به ترتیب در تکرارهای ۲، ۳، ۲ و ۲ در توپوگرافی تپه‌ماهور به ترتیب در تکرارهای ۲، ۲، ۴ پیدا می‌کند؛ که نشان‌دهنده سرعت همگرایی بالای الگوریتم CBO در مقایسه با الگوریتم APSO است. با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳ الگوریتم APSO در مقایسه با الگوریتم CBO با تعداد تکرار کمتری جواب

مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ در تمامی توابع جریمه زمان اجرای الگوریتم ازدحام ذرات از الگوریتم برخورد اجسام کمتر است. همچنین زمان اجراها در دو توپوگرافی دشت و تپه‌ماهور در توابع P3 و P4 از زمان اجرا برای جریمه‌های P1 و P2 کمتر است. الگوریتم APSO برای چهار تابع جریمه P1 تا P4 اولین مقدار بهینگی خود را در توپوگرافی دشت به ترتیب در تکرارهای ۸۵، ۸۳، ۹۳ و ۹۴ و در توپوگرافی تپه‌ماهور به ترتیب در تکرارهای ۱۳۹۹ فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل/ سال یازدهم/ شماره سوم/ بهار ۱۳۹۹

تپه‌ماهور، مقدار بهینه‌تری را در مقایسه با الگوریتم ازدحام ذرات شتاب‌دار نشان داد. درصد بهینگی توسط الگوریتم CBO برای چهار تابع هدف P1 تا P4 در توپوگرافی دشت برابر ۴۰/۵۴، ۴۵/۲۲، ۴۵/۹۴ و ۳۹/۲۵ و در توپوگرافی تپه‌ماهور به ترتیب برابر ۳۴/۸، ۳۵/۳۳، ۳۸/۵۶ و ۳۷/۱۵ درصد می‌باشد که این مقادیر برای الگوریتم APSO در توپوگرافی دشت به ترتیب برابر ۳۱/۲۶، ۳۴/۸، ۳۶/۷۳ و ۳۳/۸۱ درصد است و در توپوگرافی تپه‌ماهور این مقدار به ترتیب برابر ۲۷/۰۱، ۲۷/۱۴، ۲۹/۲۲ و ۳۰/۱۳ درصد است.

فرمول‌بندی ارائه‌شده در این تحقیق همراه با در نظر گرفتن محدودیت‌ها بر اساس تابع جریمه تبرید می‌تواند برای بهینه‌سازی خط پروژه انواع راه‌ها و حداقل نمودن هزینه احجام عملیات خاکی مورد استفاده قرار گیرد.

پانویس‌ها

1. Weighted Ground Elevation
2. Particle Swarm Optimization
3. Accelerated Particle Swarm Optimization
4. Colliding Bodies Optimization
5. Annealing penalties function
6. Exploration
7. Exploitation

مراجع

- Abbey, L. (1992) "Highways", Van Nostrand Reinhold, New York.
- AUSTROADS Guide. (1993) "Rural road design", Guide to the geometric design of rural roads, AUSTROADS Publication AP-1/89, Sydney, Australia.
- Bababeik, M. and Monajjem, M. S. (2012) "Optimizing longitudinal alignment in railway with regard to construction and operating costs", Journal of transportation engineering, Vol. 138, No.18, pp.1388-1395.

بهینه خود را می‌یابد، اما همانگونه که شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند، این الگوریتم در بهینه محلی به دام می‌افتد درحالی‌که الگوریتم CBO با وجود کندتر بودن در یافتن جواب بهینه، توانایی یافتن بهینه سرتاسری را داراست. حل مسائل بهینه‌سازی متعدد با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی CBO نشان می‌دهد که این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک بهینه‌سازی دارای توانایی اکتشاف^۶ و استخراج^۷ بهتر است [Kaveh and Mahdavi, 2015].

بنابراین این الگوریتم فضای مسئله را بهتر جستجو می‌کند و امکان به دام افتادن آن در جواب بهینه محلی کاهش می‌یابد. از طرفی بهره‌گیری از توابع جریمه ساکن با توجه به اختصاص مقدار جریمه زیاد در گام‌های ابتدایی سبب می‌شود تا بسیاری از جوابها در مراحل ابتدایی حذف شوند و امکان جستجوی کل فضای مسئله امکانپذیر نباشد، در حالی که توابع جریمه تبرید با اختصاص مقادیر پایین جریمه امکان جستجوی کل فضای مسئله را در طول فرایند بهینه‌سازی فراهم می‌سازد.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف مقایسه توابع جریمه مختلف به منظور بهینه‌سازی خط پروژه مسیرهای راه بوده است و برای این منظور از چهار تابع جریمه استفاده گردید که شامل جریمه ساکن (P1)، جریمه پویا (P2)، جریمه تبرید ۱ (P3) و جریمه تبرید ۲ (P4) هستند. به منظور محاسبه دقیق حجم عملیات خاکی در این تحقیق، برنامه‌ای در محیط MATLAB توسعه داده شد و نتایج آن با برنامه AutoCAD Land Desktop اعتبار سنجی شد که نشان می‌دهد برنامه توسعه داده‌شده با خطای کمتر از حدود ۶ درصد امکان محاسبه احجام عملیات خاکی را فراهم می‌سازد. نتایج حاصل از مثال‌های عددی گویای آن است که توابع جریمه تبرید در مقایسه با دو تابع ساکن و پویا مقدار بهینه‌تری را در اختیار قرار می‌دهند. همچنین الگوریتم برخورد اجسام در تمامی توابع جریمه و در دو توپوگرافی دشت و

- efficiently determining an optimal vertical alignment of roads", Computers & Operations Research, Vol. 44, No. 56, pp. 161-173.
- Homaifar, A., Lai, S.H.Y. and Qi, X. (1994) "Constrained optimization via genetic algorithms", Simulation, Vol. 62, pp. 242-253.
 - Joines, J. A. and Houck, C. R (1994) "On the use of non-stationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with GA's " , Evolutionary Computation, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on, IEEE.
 - Kaveh, A. and Ilchi Ghazaan, M. (2014) "Computer codes for colliding bodies optimization and its enhanced version " , Int J Optim Civil Eng. Vol 4, pp. 321-332.
 - Kaveh. A and Talatahari, S. (2010) "A novel heuristic optimization method: charged system search" , Acta Mech, Vol. 213, No, 16, pp. 267-89.
 - Kaveh, A. and Mahdavi, V. (2014) "Colliding bodies optimization: a novel meta-heuristic method", Computers & Structures, Vol. 139, No. 38, pp. 18-27.
 - Kaveh, A. and Mahdavi, V. R. (2015) "Colliding bodies optimization: extensions and applications:, Springer.
 - Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995) "PSO optimization", Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, IEEE Service Center, Piscataway, NJ.
 - Lee, Y. and J.-F. Cheng (2001) "Optimizing highway grades to minimize cost and maintain traffic speed." Journal of Transportation Engineering, Vol. 127, pp. 303-310.
 - Banks, J. H. (2002) "Introduction to transportation engineering", New York:McGraw-Hill.
 - Carlson, S. E. and Shonkwiler, R. (1998) "Annealing a genetic algorithm over constraints " , Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on, IEEE.
 - Coello, C. A. C. (2002) "Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art " , Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering, Vol. 191, No.10,pp. 1245-1287.
 - Easa, S. M. (1988) "Selection of roadway grades that minimize earthwork cost using linear programming" , Transportation Research Part A: General, Vol.22, No.12, pp. 121-136.
 - Easa, S. M. (1999) "Optimum vertical curves for highway profiles " , Journal Of Surveying Engineering, Vol. 125, No. 26, pp. 147-157.
 - Garber, N. J. and L. A. Hoel (2014) "Traffic and highway engineering", Cengage Learning.
 - Goktepe, A. B. and Lav, A. H. (2003) "Method for balancing cut-fill and minimizing the amount of earthwork in the geometric design of highways", Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No. 14, pp. 564-571.
 - Goktepe, A. B. and Lav, A. H. (2004) "Method for optimizing earthwork considering soil properties in the geometric design of Highways", Journal Of Surveying engineering, Vol. 130, No. 14, pp. 183-190.
 - Hare, W., Hossain, S., Lucet, Y. and Rahman F. (2014) "Models and strategies for

- Tat, C. W. and F. Tao (2003). "Using GIS and genetic algorithm in highway alignment optimization, Intelligent Transportation Systems, Proceedings. 2003 IEEE, IEEE.
- Wang, W. , Lukas, K. and Ji, Y. (2011) "Two-stage optimization of highway vertical alignment using genetic algorithms", Computational Modeling and Simulation Group.
- Yang, X.-S., Deb, S. and Fong S, editors. (2011) "Accelerated particle swarm optimization and support vector machine for business optimization and applications", Networked Digital Technologies. No. 47. pp. 53-66.
- آیین‌نامه طرح هندسی راه‌ها ایران، "نشریه شماره ۴۱۵"،
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ۱۳۹۱.
- Li, W., Pu.,H . (2017). "Mountain railway alignment optimization with bidirectional distance transform and genetic algorithm", Computer- Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 32. No.8, pp. 691-709.
- Michalewicz, Z. and Attia, N. (1994) "Evolutionary optimization of constrained problems “ , Proceedings of the 3rd Annual Conference On Evolutionary Programming, World Scientific Publishing, River Edge, NJ.
- Papacostas, C. S. and Prevedouros, P. D. (1993) “Transportation engineering and planning”, London: Prentice Hall.
- Pu, H., Zhang, H., Li, W., Wang, L. and Xiong, J. (2017) "Concurrent Optimization of Railway Alignment and Station Locations in Mountains Terrain “ , 96th annual meeting of Transportation Research Board, Washington, USA.

ارزیابی توابع جریمه مختلف در بهینه‌سازی خط پروژه راه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام

علیرضا غنی‌زاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-نقشه‌برداری را در سال ۱۳۷۹ با رتبه ممتاز از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری را در سال ۱۳۸۱ با رتبه ممتاز از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران-ژئوتکنیک از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گردید. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان تحلیل و طراحی روسازی، مصالح راهسازی، ژئوتکنیک حمل‌ونقل و کاربرد روش‌های هوش محاسباتی در مهندسی عمران بوده و در حال حاضر عضو هیئت‌علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه صنعتی سیرجان است.



نسرين حیدرآبادی‌زاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-عمران را در سال ۱۳۹۳ با رتبه ممتاز از دانشگاه صنعتی سیرجان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-برنامه ریزی حمل‌ونقل را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه اصفهان اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان کاربرد روش‌های هوش محاسباتی در مهندسی عمران بوده و در حال حاضر مدرس دانشگاه صنعتی سیرجان است.

