استفاده از سیستم الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) جهت بهینه‌سازی هزینهٔ طرح ضخامت روسازی راه‌ها و مقایسهٔ آن با روش شل

منصور توحیدی[۱]، نوید خیاط [۱*]، عبدالرسول تلوری[۱]

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسول: khayat@iauahvaz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

چکیده

از آنجایی که هزینهٔ روسازی راه‌ها بخش بزرگی از منابع مالی بخش اجرا را به خود اختصاص می‌دهد، یافتن مناسب‌ترین طرح ضخامت روسازی با حداقل هزینه یکی از دغدغه‌های مهندسین طراح است. در همین خصوص، استفاده از الگوریتم‌های جستجوی هوشمند را می‌توان به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در یافتن طرح بهینه مطرح کرد. هدف تحقیق حاضر، بررسی کارآمدی تکنیک الگوریتم هوشمند اجتماع ذرات PSO در طرح ضخامت روسازی به روش اشتو و تعیین هزینهٔ بهینهٔ اقتصادی و مقایسهٔ عملکرد این الگوریتم با روش شل است. به همین منظور، نرم‌افزار مناسب برای پیاده‌سازی این الگوریتم جهت حل مسئلهٔ طراحی روسازی انتخاب و مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی لازم توسعه داده شد. در ادامه با ذکر یک مثال با استفاده از سه ترکیب از مصالح با مدول الاستیسیتهٔ متفاوت و قیود مختلف، هزینهٔ بهینهٔ طرح ضخامت روسازی با استفاده از الگوریتم PSO و روش شل محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان داد که روش الگوریتم PSO توسعه‌یافته هزینه‌ها را در حالت با قید محدودیت ضخامت اساس و زیراساس در روش شل برای ترکیبات سه‌گانه به‌ترتیب حدود ٪۰/۵، ٪۱۱ و ٪۱۴ و در حالت بدون قید محدودیت ضخامت به‌ترتیب حدود ٪۳، ٪۱۷ و ٪۲۱ و در حالت بدون قید محدودیت ضخامت و استفاده از اساس سیمانی در طرح ضخامت روسازی حدود ٪۱۷، ٪۲۷ و ٪۳۰ نسبت به روش شل کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: روسازی آسفالتی؛ طراحی روسازی بهینه؛ روش آئین نامه طراحی روسازی ایران (کد ۲۳۴)؛ روش طراحی روسازی شل.

مقدمه

از آنجایی که راه‌های هر کشور به‌عنوان سرمایه‌های آن به شمار می‌رود، لذا تمرکز بر روی حفظ و توسعهٔ آن‌ها ضروری است. بخش روسازی جزء پرهزینه‌ترین قسمت‌های راه‌ها است و بنابراین دقت بر روی محاسبات و طراحی روسازی و انتخاب بهترین و کم‌هزینه‌ترین طرح می‌تواند به برنامه‌ریزی جهت توسعهٔ بیشتر راه‌ها منجر و بدین ترتیب باعث توسعه و رونق اقتصادی یک کشور شود [۱]. بسیاری از پروژه‌های راه‌سازی به‌دلیل کمبود بودجه با تأخیر مواجه می‌شوند. محاسبات طرح ضخامت روسازی به‌صورت دستی جهت انتخاب گزینهٔ مناسب و کم‌هزینه، یک روش آزمون کند و ناکارآمد است. برای حل این موضوع، ادارات راه به‌دنبال راه‌حل‌های بهینه برای طراحی و ساخت روسازی‌های آسفالتی هستند. از طرفی، الگوریتم‌های بهینه‌ساز به‌عنوان یک ابزار سریع و کارآمد با بررسی بی‌شمار طرح‌های ضخامت روسازی در کمترین زمان و انتخاب گزینهٔ برتر با کمترین هزینه می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد. چنانچه از تکنیک‌های بهینه‌سازی در طرح روسازی آسفالتی استفاده شود، عواید مختلفی از جمله صرفه‌جویی در حجم بالایی از منابع مالی و امکان هزینهٔ این منابع در راستای توسعهٔ آتی شبکهٔ راه‌ها و همچنین صرفه‌جویی در استفاده از معادن تأمین مصالح لایه‌های مختلف روسازی به ارمغان خواهد آمد [۲].

طراحی روسازی یک فرآیند پیچیده است زیرا بسیاری از متغیرها را از جمله بارگذاری دینامیکی، خصوصیات غیرخطی مصالح و شرایط محیطی شامل می‌شود. در واقع طراحی روسازی فعالیتی است که ملاحظات مهندسی و اقتصادی به

ترکیب‌های متفاوتی از زیراساس، اساس و آسفالت تخصیص داده می‌شود به طوری که طرح نهایی بتواند ظرفیت تحمل بار را با صرف کمترین هزینهٔ ممکن تأمین کند. روش‌های مختلفی برای طراحی روسازی ارائه شده است که به یافتن ضخامت و مصالح بهینهٔ لایه‌های روسازی در شرایط موردنظر مسئله کمک می‌کنند. این روش‌ها تجربی یا تحلیلی هستند. در هر دو صورت، طراح بعد از تلاش‌های بسیار جهت تکرار محاسبات در مواردی قبل از رسیدن به گزینهٔ بهینه از کار دست می‌کشد؛ دلیل این موضوع می‌تواند توانایی اندک و کم‌حوصلگی طراح باشد. طراحی روسازی‌های آسفالتی از چند دهه قبل آغاز شده است. در طول سالیان متوالی، پارامترهای دخیل در طراحی این نوع روسازی‌ها در حال توسعه بوده و به‌طور مداوم فعالیت‌های زیادی در خصوص ارتقاء کیفیت مصالح، روش‌های طرح ضخامت و تطبیق طراحی و تأثیر مصالح با شرایط محیطی محل اجرای پروژه انجام شده است. مجموع این فعالیت‌ها و پژوهش‌ها با هدف ارتقاء سطح کیفی طرح روسازی آسفالتی و جهت بالابردن طول عمر روسازی‌ها و استفادهٔ بهینه از منابع مالی و سرمایه‌گذاری در پروژه‌های راه‌سازی صورت می‌گیرد[۳].

مطالعات مختلفی در زمینهٔ طراحی روسازی انعطاف‌پذیر انجام و برنامه‌های مختلفی در این زمینه منتشر شده است. به‌طور مثال، پرایک و همکاران[۲] به بررسی بهینه‌سازی ضخامت لایه‌های روسازی آسفالتی به کمک الگوریتم ژنتیک پرداخته و از روش ضخامت معادل[1] استفاده کردند. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش شل، هزینهٔ طرح ضخامت روسازی بررسی و طبق نتایج به‌دست آمده، برتری روش الگوریتم ژنتیک نسبت به روش شل نشان داده شد. غنی‌زاده و فخری[۴] مدلی را بر پایهٔ برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای دست‌یابی به طراحی بهینهٔ سازهٔ روسازی آسفالتی ارائه دادند و کاهش هزینه در این روش نسبت به روش دستی نشان داده شد. چانگ[۵]در تحقیق خود یک برنامهٔ کامپیوتری را برای طراحی ضخامت روسازی انعطاف‌پذیر بر پایهٔ آیین‌نامهٔ آشتو و نیز آیین‌نامهٔ شمارهٔ ۳۱ توسعه داد. او نتایج برتری طرح ضخامت روسازی به روش اشتو را نسبت به آیین‌نامهٔ کد ۳۱ با توجه به برنامهٔ کامپیوتری خود به میزان ۳۰۰ میلی‌متر و کاهش هزینه‌ای ۱۹.۵٪ نشان داد. پورویس[۶] در تحقیق خود به تحلیل حساسیت نتایج سه روش طراحی روسازی آسفالتی در ایالت آیووا[2] پرداخت. نتایج آنالیز او نشان‌دهندهٔ تفاوت قابل‌ملاحظه در پاسخ‌های به‌دست‌آمده از روش‌های طراحی بود. او همچنین نتیجه گرفت که میزان ترافیک عبوری نسبت به مقاومت بستر، ضریب‌اطمینان و عمر طراحی تأثیر بیشتری بر روی نتایج ضخامت‌های طراحی روسازی آسفالتی دارد.

کیم و جیدون[۷] روش طراحی مکانیستکی-تجربی[3] روسازی برای ایالت کارولینای شمالی را به کمک دو روش بهینه‌سازی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک[4] و شیب کاهش‌یافته و تعمیم‌یافته[5] کالیبره کردند و در نهایت نتیجه گرفتند که عملکرد GA در مسئلهٔ موردمطالعهٔ آن‌ها بهتر بوده است. جیا رویی چانگ[۸] به بهینه‌سازی برنامه‌ریزی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری ۱۳۵ قطعه روسازی پرداخت. او ۸ پارامتر وضعیت روسازی را انتخاب و از روش بهینه‌سازی PSO برای سرعت‌بخشی به محاسبات و انتخاب گزینهٔ برتر نگهداری قطعات روسازی استفاده کرد.

طیبی و همکاران[۹] در پژوهشی کاربرد بهینه‌سازی اجتماع ذرات[6] را در برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری روسازی با نتایج الگوریتم ژنتیک مقایسه کردند. نتایج این مقاله برتری PSO را برای مدل‌سازی موفق در زمینهٔ سیستم مدیریت روسازی نسبت به GA نشان داده است. محمود و همکاران[۱۰] از الگوریتم اجتماع ذرات برای بهینه‌سازی تصمیمات نگهداری روسازی استفاده کردند. آن‌ها دو هدف کمینه‌کردن هزینه‌های نگهداری روسازی و همچنین کمینه‌کردن میزان شاخص باقی‌مانده در کیفیت روسازی را برای یافتن برنامهٔ نگهداری بهینه در نظر گرفتند. این روش که به صورت بدون پارامتر طراحی شده است، با مقایسهٔ تعدادی از معیارهای عملکردی، نتایج بهتری را در مقایسه با الگوریتم PSO استاندارد از خود نشان می‌دهد. نیک و

1 Method of Equivalent Thickness (MET)
2 IOWA
3 Mechanistic–Empirical
4 Genetic algorithm (GA)
5 Generalized reduced gradient (GRG)
6 Particle Swarm Optimization (PSO)

همکاران[۱۱] با ترکیب دو الگوریتم PSO و GA برای بهینه‌سازی واحدهای بازرسی روسازی آسفالت در شبکه استفاده کردند. این الگوریتم ترکیبی، منجر به تشکیل راه‌حل بهینه در یک زمان کوتاه با دقت بالا برای هر بخش از یک شبکهٔ راه شد. احمد و همکاران[۱۲] بهینه‌سازی اجتماع ذرات چندهدفه[1]را در برنامه‌ریزی برای تعمیر و نگهداری روسازی به کار بردند. نتایج، بهبود در عملکرد روسازی و کاهش هزینه‌ها را با استفاده از این روش نشان داد.

لی و همکاران[۱۳] با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ترکیبی PSO – GA تحلیل مجدد ضخامت روسازی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این الگوریتم ترکیبی پیشنهادی می‌تواند دقت وارون‌سازی را تحت شرایط اطمینان از بازده محاسباتی بهبود بخشد. کومار و ساندیپ[۱۴] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفهٔ ترکیبی را با تلفیق بهینه‌سازی MOPSO و با تکنیک فاصلهٔ جمعیت[2] و استراتژی خوشه‌بندی K میانی توسعه دادند و نتیجه گرفتند که برای منطقهٔ موردمطالعه (شمال‌شرقی هند) استفاده از لایه‌های تثبیت‌شده به جای لایه‌های دانه‌ای به علت کاهش ضخامت روسازی منجر به کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل شده و به اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند. احمد و همکاران[۱۵] یک روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفهٔ گسسته (باینری) را با روش آشوب[3] توسعه به‌منظور مدیریت، تعمیر و نگهداری روسازی به کار بردند. هدف اصلی، یافتن طرح تعمیر، نگهداری و بهسازی بهینه برای روسازی انعطاف‌پذیر با حداقل هزینهٔ تعمیر و نگهداری و حداکثر عملکرد روسازی بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که این روش دارای سرعت هم‌گرایی بالاتری نسبت به گونه‌های دیگر PSO است و هر دو عامل هزینهٔ نگهداری و عملکرد روسازی را بهبود می‌بخشد.

عبدی و همکاران[۱۶] در این پژوهش طراحی و مدل‌سازی روسازی آسفالتی را به دو روش اشتو و شل بررسی کردند. ورودی‌های مدل‌سازی شامل مشخصات مکانیکی مصالح روسازی از قبیل چگالی و مدول الاستیسیته و ضریب برجهندگی مؤثر بستر و زاویهٔ اصطکاک داخلی است. در این تحقیق، بررسی‌هایی از نظر مقادیر تغییر مکان و مقادیر کرنش کششی افقی زیرلایهٔ آسفالتی و مقادیر تنش و کرنش عمودی فشاری روی بستر انجام شد. همچنین در این پژوهش برای مدل‌سازی از نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS 6-10 استفاده شد. نتایج نشان داد که وابستگی تغییر مکان لایهٔ آسفالتی به مدول الاستیسیته در روش اشتو بیشتر از روش شل (در حدود ۱۱ درصد بیشتر) است.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، اکثر پژوهش‌ها بر بهینه‌سازی در عملکرد، تعمیر و نگهداری روسازی و یا سیستم مدیریت روسازی با روش‌های مختلف بهینه‌سازی همانند روش GA و برنامه‌ریزی خطی و روش PSO تمرکز دارند که از ضروریات است. لیکن مهم‌ترین مسئله در زمینهٔ احداث راه‌ها در گام اول، هزینهٔ اولیهٔ طرح ضخامت روسازی است. در جهت کاهش این هزینه‌ها، انتخاب مناسب‌ترین گزینه از دیدگاه اقتصادی ضرورت دارد و این خود باعث مقرون‌به‌صرفه‌شدن سرمایه‌گذاری در پروژه‌های راه‌سازی خواهد شد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم PSO به‌عنوان یک الگوریتم هوشمند و قدرتمند می‌تواند در زمینهٔ بهینه‌سازی کارایی مطلوبی داشته باشد[۱۱]. بنابراین در این تحقیق به موضوع استفاده از این الگوریتم پرداخته شد تا هزینه‌های اجرای روسازی با رویکرد بهینه‌ساختن ضخامت روسازی به حداقل میزان خود برسد. بهینه‌سازی ازدحام ذرات جزء الگوریتم‌های هوشمند مبتنی بر تکامل جمعیت است. این الگویتم مزایا و کاستی‌هایی در فرآیند محاسبه دارد. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سرعت هم‌گرایی سریعی دارد و با توجه به کارایی، سادگی و سرعت عمل آن به‌عنوان ابزاری مناسب جهت دستیابی به مناسب‌ترین طرح ضخامت روسازی با کمترین هزینهٔ اجرایی از پرکاربردترین الگوریتم‌ها به شمار می‌آید[۱۷]. همچنین طرح ضخامت روسازی به روش شل از جمله روش‌های کاربردی است. از مزایای این روش می‌توان به تأثیر دو فاکتور اساسی دما و استفاده از مخلوط‌های آسفالتی مختلف در طرح ضخامت روسازی اشاره کرد. همچنین از معایب آن ثابت فرض‌نمودن ضخامت

1 Multi Objective Particle Swarm Optimization
2 crowd distance
3 chaos

مصالح اساس و زیراساس است که باعث افزایش لایهٔ آسفالت در بعضی از طرح‌ها می‌شود[۱۹]. این پژوهش دو هدف اصلی را دنبال می‌کند؛ ابتدا یافتن مناسب‌ترین طرح ضخامت روسازی با کمترین هزینه با استفاده از روش اشتو و با تکنیک الگوریتم PSO از بین چند ترکیب روسازی که از لایه‌هایی با کیفیت‌های متنوع مصالح طراحی شده و سپس مقایسهٔ نتایج آن با روش شل. علاوه بر این موارد، در ادامه روشی ارائه خواهد شد که به‌راحتی با صرف زمان کوتاه طراحی بهینه را انجام می‌دهد و جایگزین روش‌های دستی معمول می‌شود.

مواد و روش‌ها (طراحی روسازی به روش آیین‌نامهٔ طرح ضخامت روسازی ایران کد (۲۳۴) و شل)

شبیه‌سازی-بهینه‌سازی بر اساس روش آیین‌نامهٔ طرح ضخامت روسازی ایران (کد ۲۳۴) با تکنیک الگوریتم (PSO)

الف) شبیه‌سازی بر اساس روش آیین‌نامهٔ طرح ضخامت روسازی ایران (کد ۲۳۴)

روش‌های طراحی روسازی انعطاف‌پذیر را می‌توان در پنج دسته قرار داد: روش‌های تجربی با یا بدون آزمایش مقاومت خاک، روش محدودکردن شکست برشی، روش محدودکردن نشست و همچنین روش‌های رگرسیونی مبتنی بر عملکرد روسازی و آزمایش راه و روش مکانیستی-تجربی است. به‌عنوان مثال، یکی از روش‌های استفاده از معادلات رگرسیونی در طراحی، روش آشتو است که بر نتایج آزمایش‌های راه مبتنی است. اگرچه استفاده از روش‌های تجربی مانند آشتو دارای محدودیت‌های ویژه است، با این وجود با توجه به گران‌بودن و همچنین عدم‌دسترسی به تجهیزات آزمایشگاهی، روش آشتو همچنان در بسیاری از کشورها به‌عنوان روش طراحی روسازی آسفالتی مورداستفاده قرار می‌گیرد[۱]. در ایران، آیین‌نامهٔ طراحی روسازی راه‌های ایران (کد ۲۳۴) بر اساس روش آشتو و با تغییرات محدود نگارش یافته است که از آن برای تعیین سناریوهای ممکن در پژوهش حاضر استفاده شده است[۱۸].

نخستین گام در روند حل مسئلهٔ روسازی راه‌ها، استخراج اطلاعات مندرج در جداول مورداستفاده در این روش و تعریف آن‌ها در قالب ماتریس‌هایی مشخص برای مدل توسعه داده شده است. این اطلاعات شامل موارد ذیل است:

- طبقه‌بندی وسایل‌نقلیه و مشخصات محور و وزن آن‌ها؛
- سطح قابلیت اطمینان و انحراف معیار نرمال؛
- ضریب بار هم‌ارزی برای محورهای منفرد، تاندم و تریدم و نشانهٔ خدمت‌دهی نهایی ۲ (برای راه‌های فرعی)، ۲/۵ (برای راه‌های اصلی) و ۳ (برای بزرگراه‌ها و آزادراه‌ها)

با توجه به روش طراحی روسازی در آیین‌نامهٔ کد ۲۳۴ ایران (منطبق بر آشتو)، عدد سازه‌ای روسازی از رابطهٔ ۱ به دست می‌آید.

$$LogW_{8.2} = Z_R S_0 + 9.36Log(SN+1) - 0.2 + \frac{Log\left(\frac{\Delta psi}{4.2-1.5}\right)}{0.4+\frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.3Log(15M_r) - 8.07 \qquad (۱)$$

که در آن:

SN = عدد سازه‌ای روسازی

$W_{8.2}$= تعداد کل بارهای محوری ساده ۸/۲ تنی هم‌ارز پیش‌بینی‌شده در عمر روسازی

M_r = ضریب برجهندگی مؤثر خاک بستر روسازی، برحسب Kg/cm2

Z_R = انحراف معیار نرمال

S_0 = انحراف معیار کلی پیش‌بینی ترافیک و عملکرد روسازی

ΔPSI_{TR} = افت نشانهٔ خدمت‌دهی در اثر ترافیک

عدد سازه‌ای SN محاسبه‌شده بیانگر مقاومت موردنیاز لایه‌ها و ضرایب عنوان‌شده و همچنین بیانگر کیفیت مصالح لایه‌ها است که با به‌کارگیری این اعداد در رابطهٔ تجربی (رابطهٔ ۲) می‌توان ضخامت لایه‌ها را تشخیص داد.

$$SN = (a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3) \times \frac{1}{2.5} \quad (۲)$$

$a_3، a_2، a_1$ = به ترتیب ضرایب لایه‌های قشر آسفالتی، اساس و زیراساس

$D_3، D_2، D_1$= ضخامت لایه‌های قشر آسفالتی، اساس و زیراساس (بر حسب سانتی‌متر)

$m_2، m_1$ = به ترتیب ضرایب زهکشی لایه‌های زیراساس و اساس

ب) بهینه‌سازی با تکنیک الگوریتم اجتماع ذرات (PSO)

PSO یک الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت‌گرا است که از حرکت جمعی موجودات در طبیعت و جستجوی پرندگان و ماهی‌ها برای یافتن غذا الهام گرفته است. این الگوریتم نخستین بار توسط کندی و ابرهارت[۱۷] معرفی شد. PSO به‌واسطهٔ سادگی و هزینهٔ کم محاسبات و عملکرد خوب موردتوجه بسیاری از محققین در زمینه‌های مختلف قرار گرفته است.

در ادبیات فنی، PSO هر بردار تصمیم‌گیری به‌صورت یک ذره دارای بردار موقعیت مکانی و بردار سرعت تعریف می‌شود. در PSO استاندارد، پروسهٔ بهینه‌سازی با رهاسازی تصادفی تعداد PS ذره در فضای تصمیم‌گیری آغاز می‌گردد، سپس تابع هدف برای هر ذره ارزیابی شده و بر مبنای آن موقعیت بهترین ذره در کل اجتماع ذرات، $Gbest_t$ و بهترین موقعیت مشاهده‌شده برای هر ذره $ps = 1\ to\ PS$ ، $Pbest_{ps,t}$، تا تکرار $t = 1$ تعیین می‌شود. پس از این مرحله، موقعیت ذرات جمعیت بر اساس $Gbest_t$ و $Pbest_{ps,t}$ بر مبنای روابط ۳ و ۴ به‌روزرسانی شده و این روند تا حصول شرایط هم‌گرایی ادامه می‌یابد.

$$V_{ps,t+1} = \theta V_{ps,t} + r_1 c_1 \left(Pbest_{ps,t} - X_{ps,t}\right) + r_2 c_2 \left(Gbest_t - X_{ps,t}\right) \quad (۳)$$

$$X_{ps,t+1} = X_{ps,t} + V_{ps,t+1} \quad (۴)$$

در این روابط، $X_{ps,t}$ و $V_{ps,t}$ به ترتیب بردارهای موقعیت و سرعت حرکت ذره psام در تکرار tام بهینه‌سازی، ps شمارهٔ ذره، r_1 و r_2 اعداد تصادفی بین صفر و یک، c_1 و c_2 ضرایب شناختی مربوط به هوش فردی[1] و هوش اجتماعی ذرات[2]، و θ ضریب موسوم به اینرسی[3] است.

ذرات در فضای مسئله حرکت کرده و بر اساس تجربیات فردی خود و تجربیات جمعی سعی می‌کنند تا راه‌حل بهینه را در فضای جستجو بیابند. این روش به‌وسیلهٔ ابعاد و غیرخطی‌بودن مسئله تا حد زیادی تحت‌تأثیر قرار نگرفته است و نتایج خوبی در محیط‌های استاتیک، نویزی و محیط‌هایی که به‌طور پیوسته در حال تغییر هستند به دست می‌آورد. به‌دلیل سادگی پیاده‌سازی، عدم‌الزام بر پیوستگی تابع هدف و توانایی وفق‌داده‌شدن با محیط پویا باعث شده است که این الگوریتم در حوزه‌های بسیار مختلفی از جمله علوم مهندسی استفاده شود. از این جهت که PSO نیز با یک ماتریس جمعیت تصادفی اولیه شروع می‌شود، شبیه به بسیاری دیگر از الگوریتم‌های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک پیوسته و الگوریتم رقابت استعماری است. برخلاف الگوریتم ژنتیک PSO هیچ عمل‌گر تکاملی همانند جهش و تزویج نداشته و مزیت اصلی الگوریتم ذرات این است که پیاده‌سازی این الگوریتم ساده بوده و نیاز به تعیین پارامترهای کمی ندارد.

داده‌های مورداستفاده برای حل مسئله در طراحی روسازی را می‌توان در سه گروه طبقه‌بندی کرد؛ گروه اول که پارامترهای شناخته‌شده در این پژوهش نامیده می‌شوند شامل برخی اطلاعاتی هستند که مقادیر آن‌ها از ابتدا برای طراح شناخته شده و به‌عنوان ویژگی‌های پروژه در نظر گرفته می‌شوند؛ پارامتر دوم از مجموعه پارامترهایی به نام متغیرهای تصمیم‌گیری تشکیل شده است. در واقع، آن‌ها پارامترهایی هستند که مقادیر مختلفی را در محدودهٔ تصمیم‌گیری خود در طول فرآیند بهینه‌سازی

1 Cognitive individual rate
2 Cognitive social rate
3 Inertia rate

اختصاص می‌دهند و مقادیر بهینهٔ آن‌ها با ارزیابی پاسخ‌های به‌دست‌آمده تعیین خواهند شد. گروه سوم پارامترهای وابسته به مسئله هستند که مقادیر آن‌ها با استفاده از جداول و نمودارهای ارائه‌شده در کد ۲۳۴ (مبتنی بر روش اشتو) پس از تعریف پارامترهای گروه اول و دوم تعیین می‌شوند.در ذیل به اجزای مدل بهینه‌سازی اشاره می‌شود [۱۸].

ب-۱) متغیرهای تصمیم‌گیری:

در این پژوهش به‌منظور کاربردی‌بودن، متغیرهای متنوعی برای طراحی روسازی در نظر گرفته شده که فضای تصمیم‌گیری را گسترده نموده است که در ذیل به آن‌ها اشاره می‌شود:

۱- در نظر گرفتن پیکربندی‌های متعدد؛
۲- در نظر گرفتن درصد مواد افزودنی جهت تثبیت لایه‌های روسازی؛
۳- در نظر گرفتن امکان تثبیت و به‌سازی بستر روسازی؛
۴- در نظر گرفتن تنوع پارامترهای طراحی؛
۵- در نظر گرفتن مکان اجرای پروژه.

ب-۲) تابع هدف

تابع هدف این مسئله به صورت هزینه تعریف می‌شود. پس از به دست آمدن ضخامت لایه‌های مختلف، هزینهٔ کل روسازی برای هر آرایش (سناریو) از طریق رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود.

$$C_s = \sum V_i \times C_i \qquad (۵)$$

در این معادله بر اساس اطلاعات واردشده و نوع مصالح و ضخامت هر لایه، هزینهٔ ساخت یک مترمربع از ضخامت طرح روسازی موردنظر محاسبه می‌شود. پارامترهای موجود در این معادله به قرار زیر می‌باشند:

$C_s =$ هزینهٔ اجرای یک مترمربع از لایهٔ ضخامت روسازی (دلار)
$V_i =$ حجم یک مترمربع در ضخامت لایهٔ شمارهٔ i (مترمکعب)
$C_i =$ هزینهٔ واحد حجم لایهٔ شمارهٔ i (دلار بر مترمکعب)

ب-۳) قیود

در نهایت محدودیت‌های مسئله باید برطرف شود تا طراح بهینه‌سازی سناریو را به‌عنوان یک طرح قابل‌قبول در نظر بگیرد. قیود طراحی شامل معادلهٔ ۲ است. برای تأمین این محدودیت در فرآیند بهینه‌سازی، معادلهٔ ۶ به شرح زیر در نظر گرفته خواهد شد:

$$\delta = (SN_2 - SN_1) \geq 0 \qquad (۶)$$

که در آن SN_1 و SN_2 به ترتیب از معادلات ۱ و ۲ به دست می‌آیند.

به دنبال محاسبهٔ تابع هدف و محدودیت، مقادیر پارامترهای C وδ مربوط به هر پاسخ، دوباره به الگوریتم بهینه‌سازی برمی‌گردند. پس از انجام روند بهینه‌سازی، اطلاعات جدید مجدداً به الگوریتم شبیه‌ساز ارسال می‌شود. سپس این اطلاعات موردارزیابی قرار می‌گیرد. این چرخه تا زمانی ادامه خواهد یافت که PSO بتواند معیار هم‌گرایی الگوریتم را برآورده کند [۱۷].

ب-۴) اجرا و کالیبراسیون مدل‌های بهینه‌سازی

الگوریتم PSO دارای ویژگی‌هایی است که تنظیم آن‌ها قبل از اجرا، تأثیر قابل‌توجهی بر دقت و سرعت خروجی خواهد داشت. در این بخش برای تنظیم ویژگی‌های مناسب با مسئلهٔ موردنظر، تجزیه‌وتحلیل حساسیت هزینه با هر یک از ویژگی‌ها برای به دست آوردن مقادیر مناسب انجام شد. این امر به کمک آنالیز حساسیت پارامترها برای یک مثال انجام گرفت. به‌منظور از بین بردن اثر تصادفی‌بودن پاسخ بهینهٔ به‌دست‌آمده از بهینه‌ساز، نرم‌افزار ایجادشده در این پژوهش هفت بار اجرا (run) و میانگین آن به‌عنوان پاسخ نهایی تعیین شد.

ب-۵) نتایج کالیبراسیون PSO

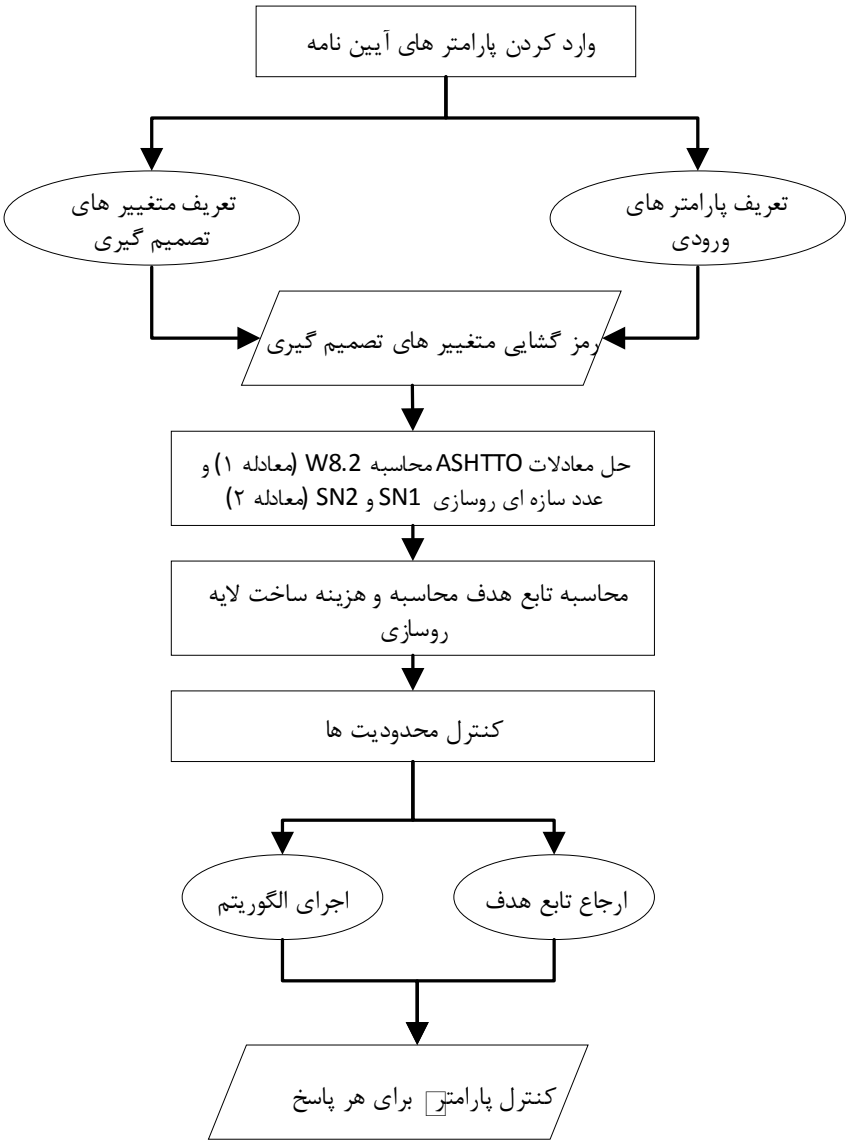
پارامترهای اساسی PSO شامل جمعیت اولیه، ضریب اینرسی و بهترین تجربهٔ شخصی و جمعی است. با استفاده از آنالیز حساسیت برای یک مثال، مقدار ۶۰ برای اندازهٔ جمعیت به دست آمد. تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد که جمعیت‌های بزرگ‌تر

بهبود قابل‌توجهی در دقت نتایج نهایی ندارند، در حالی که زمان بیشتری طول می‌کشد تا مدل اجرا شود. ضریب اینرسی برابر با ۰/۵ و بهترین تجربهٔ شخصی و جمعی (c2 ,c1) نیز برابر با ۲ به دست آمد.

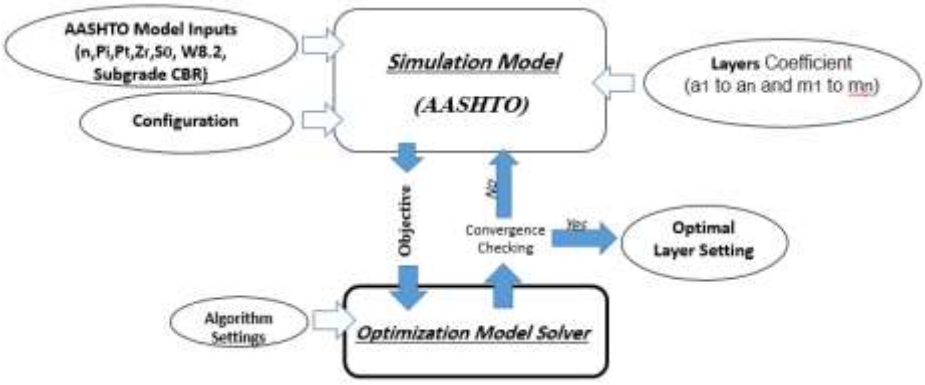
ب-۶) روش حل مسئله

با توجه به مطالب ارائه‌شده، روش حل مسئلهٔ طراحی روسازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز می‌تواند به شرح شکل ۱ خلاصه شود.

در پژوهش حاضر، تلاشی برای ارائهٔ طیف وسیعی از مشکلات تصمیم‌گیری به‌صورت سیستماتیک با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی انجام شده است که در آن پاسخ بهینه به‌عنوان نتیجهٔ مطالعات انجام‌شده با حداقل مقدار زمان صرف‌شده برای محاسبات به‌دست می‌آید. برای این منظور، مدل شبیه‌سازی که مطابق با کد ۲۳۴ (مبتنی بر روش اشتو) است، با استفاده از الگوریتم جستجوی اجتماع ذرات به‌صورت مجزا ترکیب شد. ترکیبی از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای تحلیل مورداستفاده قرار گرفت. عملکرد مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی مرتبط در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۱): روش حل مسئله



شکل (۲): چارچوب بهینه‌سازی-شبیه‌سازی

۲-۲- طرح ضخامت روسازی به روش شل

طرح روسازی راه به روش کمپانی شل ابتدا در سال ۱۹۹۶ توسط این کمپانی ارائه شد[۱۹]. در این روش، ضخامت لایه‌ها بر اساس تئوری ارتجاعی خطی و با داشتن اطلاعاتی از مصالح لایه‌های روسازی تعیین می‌شد. دو فاکتور اساسی «دما» و «استفاده از مخلوط‌های آسفالتی مختلف» در طراحی روش شل وارد شد که موجب کاربرد هرچه بیشتر این روش است. فاکتور «دما» این امکان را می‌دهد تا طراحی مختص آب‌وهوای هر منطقه انجام گیرد و پارامتر «استفاده از مخلوط‌های آسفالتی مختلف» استفاده از مصالح محلی را تسهیل می‌کند و طراحی با انتخاب نوع مخلوط آسفالتی مناسب انجام خواهد شد. در این روش، پیش‌بینی مقادیر تغییر شکل‌ها در لایه‌های آسفالتی موردتأیید قرار گرفته است. در روش شل، مدل روسازی به‌صورت یک سیستم چندلایه‌ای در نظر گرفته شده است که در آن خصوصیات مکانیکی مصالح تشکیل‌دهندهٔ لایه‌ها با دو پارامتر مدول الاستیسیته (نسبت تنش به تغییر شکل نسبی) و ضریب پوآسون (نسبت تغییر شکلی نسبی افقی به تغییر شکل نسبی عمودی) تعیین می‌شود. این مسئله در صورتی است که تئوری الاستیسیتهٔ خطی در لایه‌های روسازی صدق کند. البته در شرایطی که دمای محیط پایین و شدت بارگذاری سریع باشد نیز این تئوری با تقریب خوبی در سیستم روسازی قابل‌بسط است. یکی از ویژگی‌های روش شل انتخاب ضخامت اساس و زیراساس است. بدین صورت که ضخامت قشر اساس و زیراساس به‌صورت ثابت انتخاب سپس بر اساس گراف‌های مربوطه ضخامت آسفالت محاسبه می‌شود. در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی و صحت‌سنجی روش PSO از مثالی استفاد شده که در مرجع[۱۶] برای طرح روسازی به روش شل آمده است، سپس نتایج آن با روش اشتو مقایسه شده که با تکنیک PSO بهینه‌سازی شده است؛ در ذیل فرضیات آن ارائه شده است.

۲-۳- مشخصات پروژهٔ موردی

مثال مورداستفاده در این پژوهش جهت طرح ضخامت روسازی به روش شل، با فرضیات ترافیکی ارائه‌شده در جدول (۱) انجام شده است. البته این ترافیک برای ورود به طراحی باید به شکل ترافیک تعداد محور هم‌ارز (۸۰KN در روش SHELL) تبدیل شود[۱۶].

جدول(۱): مشخصات تعداد وسایل‌نقلیه [۱۶]

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
سواری	وانت	مینی‌بوس	اتوبوس	کامیون دومحوره سبک	کامیون دومحوره سنگین	کامیون سه‌محوره	کامیون چهارمحوره
۳۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۴۰۰	۳۰۰	۱۵۰	۱۵۰

در این مثال برای سه ترکیب مختلف با مدول الاستیسیتهٔ متفاوت از مصالح در لایه‌های روسازی استفاده و طراحی و مدل‌سازی نیز انجام شد. مشخصات مصالح لایه‌های روسازی مورداستفاده در سه ترکیب در جدول (۲) آورده شده است.

جدول(۲): مشخصات مصالح لایه‌های روسازی[۱۶]

ترکیب	لایه	مدول الاستیسیته (کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع)	ضریب زهکشی (متر)	ضریب قشرلایه (a)	CBR
ترکیب اول	آسفالت	۳۱۵۰۰	-	۰/۴۴	-
	اساس	۱۹۶۰	۱/۱	۰/۱۳	۸۰
	زیراساس	۱۰۵۰	۰/۹	۰/۱۱	۳۰
ترکیب دوم	آسفالت	۲۸۰۰۰	-	۰/۴۲	-
	اساس	۲۱۰۰	۱/۱۵	۰/۱۴	۸۵
	زیراساس	۱۱۰۰	۰/۹۵	۰/۱۲	۳۵
ترکیب سوم	آسفالت	۲۴۵۰۰	-	۰/۴۰	-
	اساس	۲۴۵۰	۱/۲	۰/۱۵	۹۰
	زیراساس	۱۴۰۰	۱	۰/۱۳	۵۰

در این روش، پس از مشخص‌شدن پارامترهای موردنیاز، بار محوری هم‌ارز استاندارد ۸۰KN، متوسط دمای وزنی سالیانه و مقدار CBR که بستر و لایه‌های اساس و زیراساس را شامل می‌شود، ضریب ارتجاعی بستر و انتخاب نوع مخلوط آسفالتی با استفاده از دیاگرام‌های این روش ضخامت تعیین می‌گردد[۱۹]. یکی از ویژگی‌های روش شل، انتخاب ضخامت اساس و زیراساس به‌صورت ثابت است که در این مثال مجموع ضخامت اساس و زیراساس ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که بر مبنای آن و با استفاده از گراف‌های این روش، ضخامت آسفالت تعیین می‌شود. نتایج این اندازه‌گیری در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): نتایج طرح ضخامت روسازی با استفاده از روش شل[۱۶]

Project no.	روش حل	ضخامت لایه‌ها (Cm)		
		آسفالت	اساس دانه‌ای	زیراساس
ترکیب اول	روش شل	۲۱	۲۳	۲۷
ترکیب دوم	روش شل	۲۵	۱۹	۳۱
ترکیب سوم	روش شل	۲۶	۲۱	۲۹

در این مثال، روش طراحی روسازی آسفالتی با در نظر گرفتن مقادیر ضریب رشد ۴٪ برای خودروهای سواری و وانت و ۳٪ برای سایر وسایل‌نقلیه و ۲۰ سال عمر طراحی و با محاسبهٔ ترافیک عبوری و وزن محورهای وسایل‌نقلیهٔ گذرنده از روسازی و تبدیل آن به تعداد محور هم‌ارز ۸/۲ تن با توجه به نشریهٔ کد ۲۳۴ که مبتنی بر روش اشتو است انجام می‌شود و بار محوری هم‌ارز استاندارد (w8/2) برابر با ۱۴۲۵۹۸۶۱ به دست می‌آید[۱۸].

کاربرد مدل بهینه‌سازی و مقایسهٔ آن در مطالعات موردی

جهت دستیابی به بهترین طرح در طراحی ضخامت روسازی در راه‌ها می‌توان از مصالح متنوع در لایه‌ها استفاده کرد و در نوع کیفیت آن‌ها تفاوت‌هایی قائل شد تا به یک روسازی بهینه با هزینهٔ مناسب دست یافت؛ بدین معنی که در لایه‌های روسازی می‌توان از مصالح متنوع با مدول الاستیسیتهٔ متفاوت جهت لایه‌های آسفالت و اساس و زیراساس استفاده کرد. از آنجایی که در روش شل مجموع ضخامت‌های اساس و زیراساس به‌صورت ثابت انتخاب می‌شوند، جهت مقایسهٔ روش PSO با روش شل این محدودیت با استفاده از نرم‌افزار توسعه‌یافته برطرف شد و حل مسئله نیز برای یافتن بهترین پاسخ در کوتاه‌ترین زمان به روش الگوریتم PSO با سه حالت ممکن انجام گرفت که از این قرار است:

- حالت اول: طراحی با قید محدودیت استفاده از ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس ثابت موردنظر در روش شل.
- حالت دوم: بدون قید محدودیت به گونه‌ای که الگوریتم به‌صورت آزادانه بتواند لایه‌های اساس و زیراساس را بدون در نظر گرفتن محدودیت ضخامت‌های روش شل، طرح ضخامت روسازی را انتخاب کند.
- حالت سوم: بدون قید محدودیت ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس در روش شل و با افزودن اساس تثبیت‌شده با سیمان به ضخامت روسازی انجام گیرد.

سپس مقایسهٔ هزینه‌ها به روش طراحی شل و روش استفاده از الگوریتم PSO برای سه حالت اشاره‌شده صورت گرفت. جهت ارزیابی و صحت‌سنجی نرم‌افزار توسعه‌یافته بر اساس الگوریتم PSO فرضیات مثالی مورداستفاده قرار گرفته است که بر اساس طرح ضخامت روسازی به روش شل در مرجع[۱۶] به آن اشاره شد. ضخامت‌های روسازی با استفاده از روش شل و الگوریتم PSO برای سه ترکیب ارائه‌شده در جدول ۲ محاسبه شده است. جهت مقایسه و تعیین حداقل هزینه و طرح ضخامت برتر، محاسبات به چهار حالت ذیل انجام شده است.

۱- محاسبات طرح ضخامت روسازی و برآورد هزینهٔ طرح با استفاده از روش شل؛

۲- محاسبات طرح ضخامت روسازی و برآورد هزینهٔ طرح به روش اشتو با استفاده از الگوریتم PSO (با قید محدودیت ضخامت‌های اساس وزیراساس در روش شل)؛

۳- محاسبات طرح ضخامت روسازی و برآورد هزینهٔ طرح به روش اشتو با استفاده از الگوریتم PSO (بدون قید محدودیت ضخامت‌های اساس و زیراساس در روش شل)؛

۴- محاسبات طرح ضخامت روسازی و برآورد هزینهٔ طرح به روش اشتو با استفاده از الگوریتم PSO (بدون قید محدودیت ضخامت‌های اساس و زیراساس در روش شل و افزودن اساس تثبیت‌شده با سیمان (با مقاومت فشاری ۷روزه به‌میزان ۷۰ کیلوگرم بر مترمربع و ضریب قشر معادل ۰/۲۳۸ در طرح ضخامت روسازی).

با استفاده از نرم‌افزاری که بر اساس روش اشتو با تکنیک الگوریتم PSO توسعه یافته است و همچنین با توجه به سه ترکیب روسازی و هزینه (یک مترمربع در یک سانتی‌متر)، مصالح ارائه‌شده در جدول (۴) بررسی شد و محاسبات طرح ضخامت روسازی جهت مقایسه انجام و نتایج آن در جدول (۵) آورده شده است.

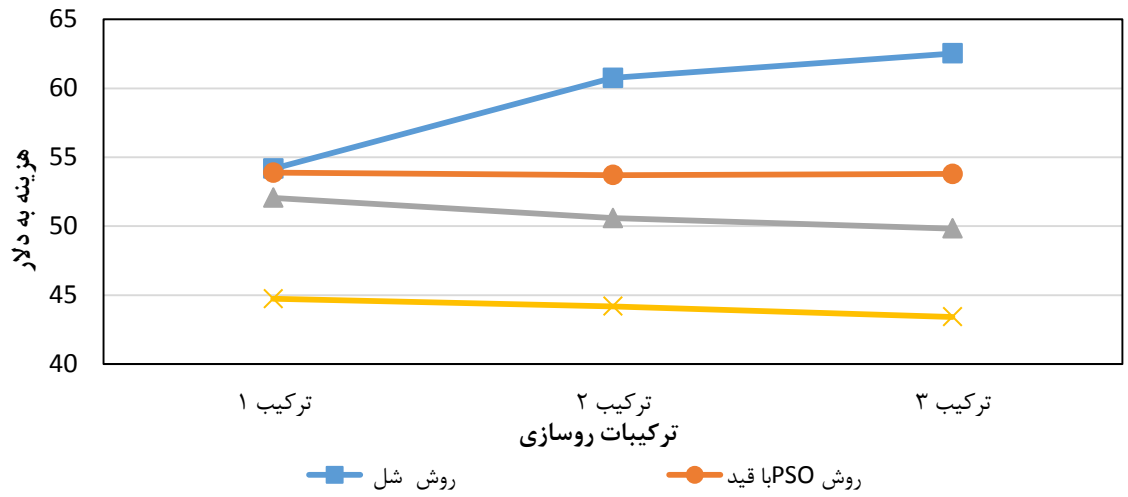
در شکل (۳-الف) و (۳-ب)، نتایج مطالب ارائه‌شده نشان داده شده است. که در شکل (۳-ب) c1,c2,c3 به‌ترتیب ترکیبات اول تا سوم هستند.

جدول (۴): هزینهٔ اجرای هر یک از مصالح لایه‌های روسازی با توجه به محل پروژه‌های مختلف (برحسب سنت)

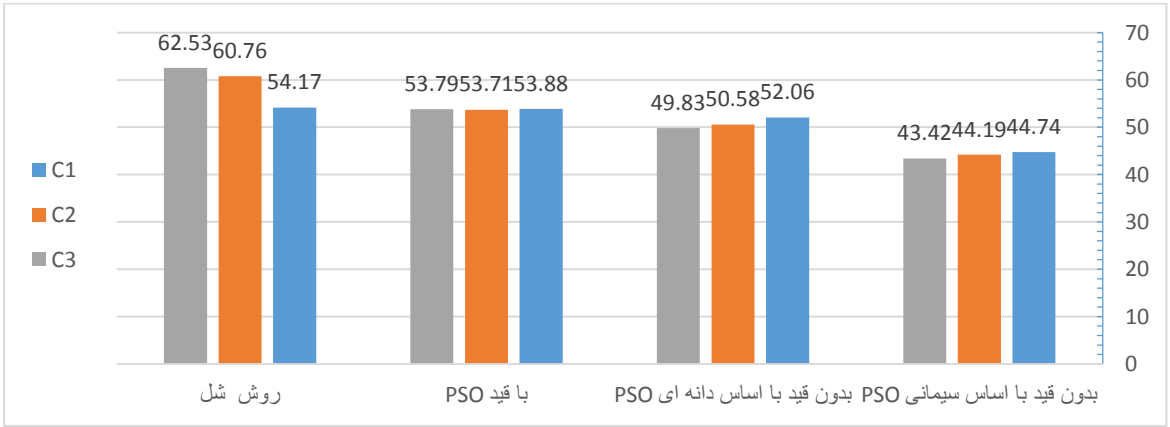
لایه‌ها	آسفالت	اساس سیمانی	اساس دانه‌ای	زیراساس
هزینهٔ مصالح	۱۸۶/۶	۵۳/۴	۳۹/۷	۳۵/۶

جدول (۵): نتایج طرح ضخامت روسازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO و روش شل

Project no.	روش حل	ضخامت لایه‌ها (cm)				هزینه
		آسفالت	اساس سیمانی	اساس دانه‌ای	زیراساس	(دلار)
ترکیب اول	روش حل شل	۲۱	-	۲۳	۲۷	۵۴.۱۷
	PSO با قید	۱۹	-	۲۳	۲۷	۵۳.۸۸
	PSO بدون قید با اساس دانه‌ای	۱۳	-	۴۰	۳۵	۵۲.۰۶
	PSO بدون قید با اساس سیمانی	۱۰	۲۹	۱۵	۱۰	۴۴.۷۴
ترکیب دوم	روش حل شل	۲۵	-	۱۹	۳۱	۶۰.۷۶
	PSO با قید	۱۹	-	۱۹	۳۱	۵۳.۷۱
	PSO بدون قید با اساس دانه‌ای	۱۳	-	۳۹	۳۲	۵۰.۵۸
	PSO بدون قید با اساس سیمانی	۱۰	۲۸	۱۵	۱۰	۴۴.۱۹
ترکیب سوم	روش حل شل	۲۶	-	۲۱	۲۹	۶۲.۵۳
	PSO با قید	۱۹	-	۲۱	۲۹	۵۳.۷۹
	PSO بدون قید با اساس دانه‌ای	۱۱	-	۴۰	۳۶	۴۹.۸۳
	PSO بدون قید با اساس سیمانی	۱۰	۲۷	۱۵	۱۰	۴۳.۶۴



(الف)



(ب)

شکل (۳): (الف) تغییرات هزینه در ترکیبات اول تا سوم، (ب) تغییرات هزینه در ترکیبات اول تا سوم

نتایج و بحث

همانگونه که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، در ترکیبات ارائه‌شدهٔ اول تا سوم، مشخصات فنی همانند مقاومت و مدول الاستیسیتهٔ آسفالت کاهش و مدول اساس و زیراساس افزایش یافته است. لیکن با توجه به نتایج جدول (۵) و گراف‌های (۳-الف) و (۳-ب) مشاهده می‌شود که در روش شل با تغییرات در مدول الاستیسیته به‌علت افزایش ضخامت آسفالت، هزینهٔ روسازی افزایش یافته است اما در روشی که از الگوریتم PSO استفاده شده است، هرچه در دتایل روسازی از اساس و زیراساس مقاوم‌تری استفاده شود علاوه بر کاهش ضخامت آسفالت، می‌توان به هزینهٔ بهینه‌ای نیز دست یافت. با توجه به هزینه‌های طرح روسازی به روش شل و روش استفاده از الگوریتم PSO، نتایج زیر را می‌توان بیان کرد.

۱- هزینهٔ طرح روسازی به روش شل از ترکیب اول تا سوم سیر صعودی دارد بدین معنی که با کاهش مدول الاستیسیتهٔ آسفالت، ضخامت آن افزایش یافته و با افزایش این مدول در لایه‌های اساس و زیراساس، هزینهٔ کل ضخامت روسازی افزایش پیدا می‌کند.

۲- هزینهٔ طرح ضخامت روسازی در روش الگوریتم PSO با قید محدودیت، ضخامت اساس و زیراساس در روش شل از ترکیب اول تا سوم تغییرات چندانی ندارد ولی نسبت به هزینه در روش شل کاهش پیدا کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم PSO جهت کاهش هزینه‌های ضخامت روسازی با وجود قید محدودیت نیز نسبت به شل برتری دارد.

۳- هزینهٔ طرح ضخامت روسازی در روش الگوریتم PSO بدون قید محدودیت، ضخامت اساس و زیراساس در روش شل از ترکیب اول تا سوم روند کاهشی دارد اما می‌توان نتیجه گرفت که چنانچه الگوریتم PSO بتواند بدون قید محدودیت شل ضخامت لایه‌ها را انتخاب کند، هزینهٔ کل طرح را هم می‌تواند کاهش دهد.

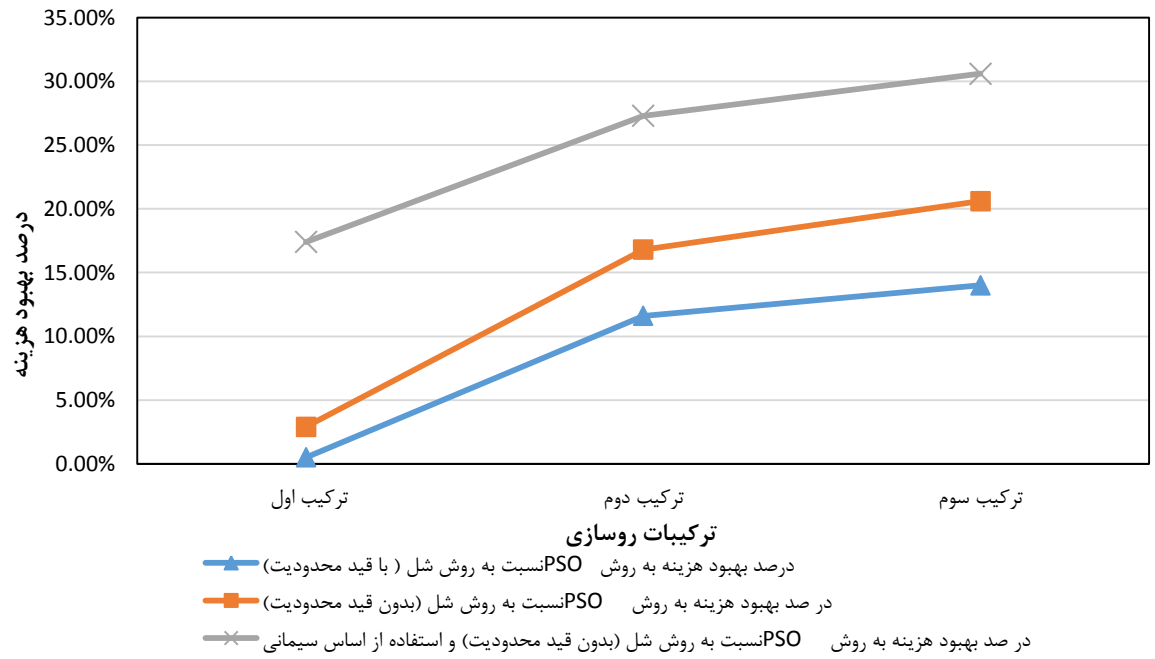
۴- هزینهٔ طرح ضخامت روسازی در روش الگوریتم PSO بدون قید محدودیت، ضخامت اساس و زیراساس در روش شل و با ورود اساس تثبیت‌شده با سیمان در ضخامت روسازی از ترکیب اول تا سوم تغییرات چندانی نداشته اما هزینهٔ آن نسبت به حالت‌های دیگر در حداقل میزان خود بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از اساس سیمانی در طرح ضخامت روسازی می‌تواند هزینهٔ کل طرح را کاهش داده و در نهایت طرح بهینه‌ای را ارائه دهد.

همچنین درصد کاهش هزینه با استفاده از الگوریتم PSO با و بدون قید محدودیت ضخامت اساس و زیراساس نسبت به روش شل در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول (۶): میزان درصد کاهش هزینه در روش الگوریتم PSO با و بدون قید محدودیت نسبت به روش شل (درصد)

روش	درصد بهبود هزینه‌ها		
	ترکیب اول	ترکیب دوم	ترکیب سوم
کاهش هزینه به روش PSO نسبت به روش شل (با قید محدودیت)	% ۰/۵	% ۱۱/۵	% ۱۴
کاهش هزینه به روش PSO نسبت به روش شل (بدون قید محدودیت)	% ۲/۹	% ۱۶/۸	% ۲۰/۶
کاهش هزینه به روش PSO نسبت به روش شل (بدون قید محدودیت) و استفاده از اساس سیمانی	% ۱۷/۴	% ۲۷/۳	% ۳۰/۲

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۶) مشاهده می‌شود که در طرح ضخامت روسازی به روش آیین‌نامهٔ کد ۲۳۴ (مبتنی بر روش اشتو) از نرم‌افزاری استفاده می‌شود که به روش الگوریتم PSO توسعه یافته است. درصد کاهش هزینه نسبت به روش شل در حالت با قید محدودیت ضخامت‌های روش شل برای ترکیبات سه‌گانه بین ٪۰/۵ تا ۱۴% و در حالت بدون قید محدودیت ضخامت‌های روش شل بین ٪۲/۹ تا ٪۲۰/۶ و در حالت بدون قید محدودیت ضخامت‌های روش شل و استفاده از اساس سیمانی در طرح ضخامت روسازی بین ٪۱۷/۴ تا ٪۳۰/۲ است. در شکل (۴) تغییرات درصد بهبود هزینه با توجه به ترکیبات اول تا سوم نشان داده شده است.



شکل (۴): تغییرات درصد بهبود هزینهٔ طرح با توجه به ترکیبات اول تا سوم نسبت به روش شل

با توجه به نسبت درصدهای فوق نتیجه‌گیری می‌شود که الگوریتم PSO در زمینهٔ بهینه‌سازی هزینهٔ طرح ضخامت روسازی کارایی لازم را در سه حالت ارائه‌شده نسبت به روش شل دارا است. با مقایسهٔ درصد کاهش در هر ترکیب با استفاده از روش الگوریتم PSO نتیجه‌گیری می‌شود که چنانچه در طرح ضخامت روسازی از اساس و زیراساس با مدول الاستیسیته بالاتری استفاده شود، می‌توان علاوه بر کاهش ضخامت آسفالت به هزینهٔ بهینه‌ای در طرح کل ضخامت روسازی منجر شود. همچنین با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که استفاده از اساس سیمانی در طرح ضخامت روسازی باعث کاهش هزینهٔ روسازی در تمام حالات خواهد شد.

نتیجه‌گیری

با بررسی پژوهش‌های گذشته مشاهده شد که استفاده از الگوریتم‌های هوشمند کارایی لازم را جهت بهینه‌سازی در زمینه‌های متعدد فنی و مهندسی داشته و علاوه بر این، کاربرد فراوانی نیز در زمینهٔ بهینه‌سازی سیستم مدیریت روسازی یا روش بهینه‌کردن تعمیر و نگهداری روسازی و غیره دارد. به‌عنوان مثال در مرجع [۲] با مقایسهٔ روش الگوریتم ژنتیک و شل نشان داده شد که روش الگوریتم ژنتیک می‌تواند هزینهٔ روسازی را برای ترافیک عبوری متفاوت بین ۱۱٪ تا ۱۶٪ نسبت به روش شل کاهش دهد. در پژوهش حاضر با بررسی الگوریتم بهینه‌ساز PSO و مقایسهٔ آن با روش شل، کارایی این الگوریتم در بهینه‌سازی هزینهٔ طرح ضخامت روسازی نشان داده و درصد کاهش هزینهٔ روسازی نیز در جدول (۶) ارائه شد. در ادامه به دیگر نتایج این روش اشاره شده است.

۱- همانگونه که از نتایج مشاهده شد، تغییرات در مدول الاستیسیته آسفالت و اساس و زیراساس در روش شل باعث تغییرات در هزینهٔ طرح ضخامت روسازی خواهد شد به‌گونه‌ای که در ترکیبات ارائه‌شده با کاهش مدول الاستسیتهٔ آسفالت و افزایش این مدول در اساس و زیراساس باعث افزایش ضخامت روسازی می‌شود که این خود باعث افزایش هزینهٔ روسازی در روش شل خواهد شد.

۲- با توجه به هزینه‌های طرح ضخامت روسازی به روش الگوریتم PSO در حالت‌های با و بدون قید محدودیت (ضخامت‌های اساس و زیراساس روش شل)، مشاهده شد که هزینهٔ طرح روسازی در تمام حالات، کمتر از روش شل بوده و در نتیجه بهینه‌سازی هزینه به روش الگوریتم PSO کارایی و برتری لازم را نسبت به روش شل دارد.

۳- با توجه به نتایج طرح ضخامت روسازی، مشاهده شد که استفاده از اساس تثبیت‌شده با سیمان در طرح ضخامت روسازی می‌تواند هزینهٔ طرح را در تمام ترکیبات اول تا سوم به حداقل برساند.

۴- با توجه به تعیین ضخامت لایه‌های روسازی، در جدول (۵) مشاهده می‌شود که ضخامت آسفالت در روش الگوریتم PSO نسبت به روش شل کمتر است که این خود باعث کاهش هزینه‌ها خواهد شد.

۵- با توجه به نتایج جدول (۶) بیشترین درصد کاهش هزینه مربوط به ترکیب سوم است و با مشاهدهٔ مشخصات فنی ترکیب سوم می‌توان نتیجه گرفت که چنانچه بتوان از مصالح اساس و زیراساس با مقاومت و مدول الاسیسیتهٔ بالاتری در ترکیب روسازی استفاده کرد می‌توان هزینهٔ کل روسازی را کاهش داد.

مراجع

[1] AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO, Washington, DC, USA.

[2] Pryke, A., Evdorides, H., Ermaileh, R. A. (2006). "Optimization of pavement design using a genetic algorithm." 2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, IEEE, Vancouver, BC, Canada, pp. 1095–1098.

[3] Pereira, P., Pais, J. (2017). Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method., Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 4(4), pp. 316-346..

[4] Ghanizadeh, A.R., Fakhri, M. (2009). A Mixed-integer Programming Model to Determine the Optimum Design of Flexible Pavement Structure." Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(3), pp. 1652–1660.

[5] Chang, T. H. (2009). Software Development for Flexible Pavement Thickness Design Based on AASTHO and Road Note 31, Ph.D. Thesis, Universiti Teknologi, Johor, Malaysia.

[6] Purvis, J. (2013). Sensitivity analysis of pavement thickness design software for local roads in Iowa. MS (Master of Science) thesis, University of Iowa.

[7] Fadi M. J., Richard Kim Y., (2012) Calibrating Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide for North Carolina Genetic Algorithm and Generalized Reduced Gradient Optimization Methods, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2305, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 131–140.

[8] Chang. J-r.(2013) Particle Swarm Optimization Method for Optimal Prioritization of Pavement Sections for Maintenance and Rehabilitation Activities, Applied Mechanics and Materials. 343, pp. 43-49,

[9] Tayebi, N. R., Moghadas Nejad, F., Mola. M., (2014). Comparison between GA and PSO in Analyzing Pavement Management Activities." Journal of Transportation Engineering 140(1), pp. 99–104.

[10] Mahmood M. Sh., Mathavan. S, M. Rahman .M. (2016). Pavement Management Maintenance Decision Optimization Using a 2 Novel Discrete Bare-Bones Particle Swarm Algorithm, TRB Annual Meeting.

[11] Nik, A. A., Nejad, F. M., Zakeri, H. (2016). Hybrid PSO and GA approach foroptimizing surveyed asphalt pavement inspection units in massive network. Automation in Construction, 71(2), pp. 325–345.

[12] Ahmed, K., Al-Khateeb, B., Mahmood, M. (2018). A chaos with discrete multi-objective particle swarm optimization for pavement maintenance. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 96(8), pp. 2317–2326.

[13] Li, S. T., Zhang, B., Xu, S. J., Zhong, Y. H. (2019). Back-analysis of Pavement Thickness Based on PSO-GA Hybrid Algorithms. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 252(5).

[14] Inti, S., Anjan Kumar, S. (2021). Sustainable road design through multi-objective optimization: A case study in Northeast India. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 91, 102594.

[15] Ahmed, K., Al-Khateeb, B., Mahmood, M. (2019). Application of chaos discrete particle swarm optimization algorithm on pavement maintenance scheduling problem. Cluster Computing, 22, pp. 4647–4657.

[16] Abdi, A., Badiany, M., salehfard, R. (2018). A Comparison of AASHTO and SHELL Methods in Flexible Pavement Design Using ABAQUS Software. Journal of Transportation Research, 15(4), pp. 375-389.

[17] Sabzkouhi,A.M., Haghighi,A., (2016), Uncertainty Analysis of Pipe-Network Hydraulics Using a Many-Objectiv Particle Swarm Optimization, j. Hydraul.Eng., 142, 04016030.

[۱۸] آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران – نشریه شماره ۲۳۴، سازمان مدیریت و برنامه ریزی، تهران، ایران.

[19] Shell International Petroleum Company Limited (1978), Shell Pavement Design Manual, London.