مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال هفدهم، شماره چهارم (پیاپی ۶۷)،زمستان ۹۹، ص ص ۱۳۵-۱۱۷
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

حل مساله تخصیص اسکله‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی واکنش شیمیایی بهبودیافته

محمد سرایی [1*]، پروانه منصوری [2]
۱- کارشناسی ارشد، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
۲- دکتری، علوم کامپیوتر، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

رسید مقاله: ۲۹ شهریور ۱۳۹۸
پذیرش مقاله: ۱۶ شهریور ۱۳۹۹

چکیده
پایانه‌های کانتینری مکان‌هایی هستند که، محموله‌ها با استفاده از تجهیزات خاص از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر منتقل می‌شوند. یکی از مهم‌ترین مسایل در برنامه‌ریزی عملیات ساحلی در پایانه‌های کانتینری، مساله برنامه‌ریزی پهلوگاه یا اسکله است، که تأثیر به‌سزایی در برنامه‌های جرثقیل‌ها، محوطه، انبار و مسیریابی کامیون‌ها دارد. این پژوهش شامل یک مدل برنامه‌ریزی پهلوگاه، با رویکرد برنامه‌ریزی هم‌زمان چند اسکله در یک بندر می‌باشد. برای حل این مدل، از الگوریتم بهبودیافته واکنش شیمیایی استفاده شده است. الگوریتمCRO، یک الگوریتم موثر برای جستجو راه حل‌های بهینه یا نزدیک بهینه است. این الگوریتم دارای جمعیت متغیر است که گاها الگوریتم را کند کرده و یا برخی عملگرهایش را غیرقابل استفاده می‌نماید. در این پژوهش تلاش شده تا جمعیت الگوریتم در بازه مناسبی حفظ شود. برای ارزیابی روش پیشنهادی، نتایج زمان‌بندی حاصل از روش پیشنهادی را با سه الگوریتم DE، GA و PSO بررسی می‌کنیم. با کاهش انتظار کشتی‌ها بندر مورد نظر می‌تواند با افزایش جلب رضایت شرکت‌های کشتیرانی در رقابت با بنادر، موفق‌تر عمل نموده و بهره‌وری و سوددهی بالاتری داشته باشد.

کلمات کلیدی: پایانه‌های کانتینری، برنامه‌ریزی پهلوگاه، تخصیص اسکله، الگوریتم واکنش شیمیایی.

۱ مقدمه
بهره‌گیری از فنون و تکنولوژی‌های نوین در بنادر تجاری بزرگ دنیا در چند دهه اخیر ثمرات بسیاری را به ارمغان آورده است. بنادر به لحاظ نقش اساسی خود در زنجیره‌تامین، همواره مورد توجه بوده‌اند. افزایش سرعت و کاهش زمان انجام عملیات بندری و دریایی، از مشخصه‌های مهم بنادر توسعه‌یافته و طراز اول جهان است [۱]. با توجه به محدودیت فضای اسکله‌ها و تعداد روزافزون کشتی‌های وارد شده به اسکله و با توجه به هزینه بالای توقف کشتی‌ها جهت دریافت سرویس تخلیه و یا بارگیری، استفاده از روشی با ایجاد کم‌ترین تاخیر ممکن

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: mohammadsaraei@gmail.com

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

می‌تواند در این زمینه راهگشا باشد. حمل و نقل دریایی نقش مهمی را در زنجیره‌تأمین بین المللی بازی می‌کند و تأثیر مهمی در اقتصاد جهانی دارد. سرعت حمل و نقل نقش مهمی را در تجارت جهانی دارد. ازاین‌رو مهم‌ترین هدف پایانه کانتینری افزایش کارایی وکاهش تأخیر در خروج کشتی‌ها از اسکله است. زمان بیکاری یک کشتی به کارایی زمان‌بندی اسکله و چگونگی تخصیص منابعی از قبیل پهلوگاه‌های اسکله، جرثقیل‌های اسکله، کامیون‌ها، جرثقیل‌های محوطه، دردسترس بودن آن‌ها و... بستگی دارد. بنابراین مدیریت مطلوب منابع پایانه موجب افزایش کارایی بنادر شده و زمان پهلوگیری کشتی‌ها می‌تواند به عنوان معیار اصلی در جهت افزایش کارایی پایانه‌های کانتینری در نظر گرفته شود. بنابراین مساله تخصیص اسکله‌ها که به منظور انجام عملیات تخلیه و بارگیری استفاده می‌شود به دنبال تخصیص کشتی‌ها به اسکله‌ها با توجه به مشخصات کشتی و اسکله می‌باشد. بنابراین در این مساله با توجه به فضای بزرگ مساله استفاده از الگوریتم‌های جستجو و بهینه‌سازی روشی مناسب در برخورد با مساله زمان‌بندی اسکله می‌باشد. در کشور ایران نیز با توجه به وسعت دریاها و وجود بنادر مختلف بخش قابل توجهی از صنعت حمل و نقل توسط بنادر و پایانه‌های کانتینری صورت می‌پذیرد. بنابراین پژوهش‌های بسیاری در حیطه افزایش کارایی در زمینه‌های مختلف بنادر و همچنین در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پهلوگاه صورت پذیرفته است. محمدپور و همکاران [۲] برای زمان‌بندی اسکله با در نظر گرفتن زمان‌بندی جرثقیل‌ها و وسایل حمل و نقل از یک مدل خطی صحیح مختلط بهره بردند. آنها پاسخ‌های ممکن را با استفاده از یک آرایه چند بعدی با ابعاد اسکله‌ها و کشتی‌های تخصیص داده شده و همچنین آرایه تک بعدی که هر درایه نشانگر یک کشتی و مقدار درایه نشانگر تعداد جرثقیل می‌باشد، مدل نمودند. داداشی و همکاران [۳] در پژوهشی یک مدل ریاضی خطی صحیح مختلط به منظور برنامه‌ریزی پهلوگاه با رویکرد مرکب و با زمان ورود دینامیک که قادر به برنامه‌ریزی هم زمان چند پایانه در یک بندر می‌باشد، پیشنهاد نمودند. ارزیابی مدل پیشنهادی نشانگر کاهش چشمگیر تاخیر بود. جمشیدی و یزدانی [۴] در پژوهشی، تخصیص اسکله به کشتی را برای اولین بار با هدف حداقل کردن هم‌زمان هزینه جا به جایی کانتینرها و زمان انتظار کشتی‌ها در بندر با توجه به مطابقت عمق کشتی با عمق آب پهلوگاه و تطابق طول کشتی با طول پهلوگاه در نظر گرفتند و سپس مدل ریاضی جدیدی ارایه نموده و برای یافتن جواب بهینه مساله، از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک بهره گرفتند. محمدپور و حسینی [۵] مساله تخصیص پهلوگاه‌های اسکله به کشتی‌ها را بررسی و مدل بررسی کرده را با استفاده از الگوریتم علف‌های هرز حل نمود. در انتها کارایی الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از نرم‌افزار تجاری GAMS مقایسه شده و نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی علاوه بر کیفیت بالای نتایج، به‌خصوص در مسایل با اندازه بزرگ، سرعت حل بسیار بالاتری نسبت به نرم افزار GAMS دارد. محرمی [۶] در پژوهشی مساله تخصیص پیوسته و پویایی اسکله با هدف به حداقل رساندن مجموعه زمان شناوری وزن دار را مورد مطالعه قرار داد. محرمی در این پژوهش یک روش کارا را برای موقعیت‌دهی کشتی‌های بعدی که وارد اسکله می‌شوند به کمک نمودار زمان فضا مدل‌سازی کرده است و سپس به کمک الگوریتم فراابتکاری به جستجوی جواب بهینه پرداخته است. پارامترهای تاثیرگذار برعملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و رقابت استعماری با به‌کارگیری روش RSM تنظیم شده است. نهایتاً کارایی این دو الگوریتم در حل مثال‌های عددی مقایسه شده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

دویدویک و کوردیک [۷] در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی جهت حل مساله تخصیص اسکله با رویکرد گسسته از الگوریتمی با عنوان رسوب بهره بردند که اولین الگوریتم ترکیبی دقیق در راستای حل این مساله بود.

تینگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۴ در پژوهشی به حل مساله تخصیص اسکله پرداختند. هدف آنها به حداقل رساندن زمان سرویس‌دهی به کشتی‌ها بود. رویکرد آنها در حل مساله، تخصیص گسسته پویا بود. به طوری که زمان انتظار کل کمینه گردد. آنها برای این منظور از یک روش برنامه‌ریزی صحیح و الگوریتم PSO استفاده کردند.

ساسیادیک و دولگو [۹] در سال ۲۰۱۵ از الگوریتم NSGA-II جهت حل مدل چندهدفه برنامه‌ریزی کشتی‌ها استفاده نمودند. برنامه‌ریزی با توجه به میزان گسسته اسکله در دسترس و با توجه به اولویت کشتی‌ها انجام شد. هموتی و همکاران نیز مساله تخصیص اسکله را با استفاده از الگوریتم خفاش با در نظر گرفتن نوع اسکله برای خدمت‌دهی هم‌زمان بیش از یک کشتی مورد بررسی قرار دادند. هموتی و همکاران از داده‌های موجود در محوطه کانتینری به صورت واقعی استفاده نمودند تا کارایی روش خود را بیشتر نمایان سازند[۱۰].

بوهرکال و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۱ سه مدل اصلی ارایه شده در مساله تخصیص پهلوگاه‌های اسکله را در حالت گسسته و پویا مقایسه نمودند و کارایی اولین مدل از آنها را بهبود دادند. اولین مدل بررسی شده در این پژوهش مدل بیان شده در مقاله ایمی و همکاران [۱۲] است که یک مدل برنامه‌ریزی صحیح مختلط می‌باشد و در سال ۲۰۰۱ ارایه شده است. در این مدل تابع هدف، مجموع زمان انتظار و زمان عملیات تخلیه و بارگیری کمینه می‌شود. ایمی و همکاران از الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل فوق بهره بردند و اثبات کردند که مدل ارایه شده جهت حل مسایل دنیای واقعی مناسب می‌باشد.

لیانگ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۱ از الگوریتم ژنتیک چندهدفه و یک مدل برنامه‌ریزی صحیح مختلط غیرخطی برای حل مساله تخصیص اسکله بهره بردند. در این مدل تخصیص جرثقیل‌ها لحاظ شده و زمان عملیات هر کشتی وابسته به تعداد جرثقیل‌های تخصیص‌یافته می‌باشد. اهداف مساله کمینه‌سازی مجموع زمان سرویس و انتظار و تاخیر کشتی‌ها و کمینه‌سازی جابجایی جرثقیل‌ها میان اسکله‌ها است.

هان و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۰ مدلی پویا جهت ورود کشتی‌ها ارایه دادند که کشتی‌ها جهت دریافت خدمات دارای اولویت متفاوت می‌باشند. در این پژوهش جرثقیل‌ها در هنگام پهلوگیری کشتی جهت ارایه سرویس می‌توانند از یک کشتی به کشتی دیگر منتقل شوند. اما تعداد جرثقیل‌هایی که به هر کشتی خدمت می‌دهند در هر لحظه ثابت فرض شده است. زمان ورود و سرویس کشتی‌ها به‌صورت تصادفی با توزیع نرمال ایجاد شده است. تابع هدف زمان انتظار به‌علاوه انحراف استاندارد مجموع زمان سرویس و مقدار وزن تاخیر جدایی از اسکله در نظر گرفته شده است. آنها از یک الگوریتم ابتکاری برپایه ژنتیک جهت حل مساله بهره برده‌اند. حل مساله تخصیص و زمانبندی آن با روش‌ها و الگوریتم‌های ترکیبی نیز در [۱۵] بسیار مورد بررسی قرار گرفته است. جیائو و همکاران مساله تخصیص را با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام شبیه‌سازی تبرید مورد بررسی قرار داده‌اند. باربوسا و همکاران [۱۶] از ترکیب الگوریتم‌های تکاملی برای حل مساله بهره بردند. تحقیقات بسیاری در سطح جهانی در حیطه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی موضوعات مختلف انجام شده است،

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

به‌طوری‌که مسایل زمان‌بندی همواره به عنوان چالش مورد بررسی محققان قرار می‌گیرد. به عنوان مسایل زمان‌بندی پروژه‌ها، زمان‌بندی وسایل نقلیه [۱۷]، زمان‌بندی دروس دانشگاهی یا زمان‌بندی تولید کارگاهی [۱۸] از جمله این مسایل است.

۲ مدل‌سازی

مدل ریاضی انتخاب شده مساله تخصیص اسکله (Berth allocation) نام دارد که در آن به تخصیص اسکله به یک سری کشتی با یک افق زمانی مشخص اشاره می‌شود. در این زمینه می‌توان چندین هدف مانند مینیمم کردن زمان سرویس کشتی‌ها، مینیمم کردن زمان ماندن در بندر، مینیمم کردن تعداد کشتی‌های رد شده، مینیمم کردن انحراف بین زمان‌بندی برنامه‌ریزی شده و واقعی را در نظر گرفت. هدف این مدل اما تخصیص بهینه کشتی‌ها در بنادر است به طوری که زمان بارگیری کشتی‌ها مینیمم شود. محدودیت‌های زمانی محدودیت‌هایی هستند که به زمان ورود کشتی‌ها مربوط و به دو دسته زمان ورود استاتیک و زمان ورود دینامیک تقسیم می‌شوند. در زمان ورود استاتیک فرض می‌شود در ابتدای افق زمانی تمامی کشتی‌ها در بندر وجود دارند. در زمان ورود دینامیک فرض می‌شود که کشتی‌ها به مرور زمان وارد می‌شوند و در ابتدای افق زمانی لزوما در بندر وجود ندارند. محدودیت‌های مکانی موقعیت‌های پهلوگیری عملی کشتی‌ها را با توجه به تقسیم‌بندی از پیش تعیین‌شده اسکله به پهلوگاه‌ها محدود می‌کنند. محدودیت‌های مکانی به سه دسته گسسته، پیوسته و مرکب تقسیم می‌شوند. در رویکرد گسسته، اسکله به پهلوگاه‌های مجزایی تفکیک می‌شود. در هر پهلوگاه و در زمان واحد تنها یک کشتی می‌تواند مورد سرویس‌دهی قرارگیرد. در رویکرد پیوسته، هیچ تقسیم‌بندی در اسکله صورت نمی‌گیرد یعنی کشتی‌ها می‌توانند در موقعیت‌های دلخواه در طول اسکله پهلوگیری نمایند. در رویکرد مرکب نیز مانند رویکرد گسسته، اسکله اصلی به پهلوگاه‌هایی تقسیم می‌شود، با این تفاوت که کشتی‌های بزرگ می‌توانند بیش از یک پهلوگاه را اشغال نمایند یا کشتی‌های کوچک می‌توانند یک پهلوگاه را به اشتراک گذارند. در پژوهش حاضر مدل‌سازی برای حالت دینامیک و رویکرد مکانی مرکب انجام شده است.

پارامترها در مساله تخصیص اسکله به شرح زیر می‌باشد:

Ns: تعداد اسکله‌ها

S: طول هر اسکله

T: طول افق زمان‌بندی

N: تعداد کل کشتی‌های ورودی

p_i: زمان پردازش کشتیi

s_i: سایز کشتیi

a_i: زمان ورود کشتیi

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

متغیرهای تصمیم:

u_i: زمان شروع عملیات کشتی i

v_i : موقعیتی که کشتی i پهلوگیری می‌کند

c_i: زمان خروج کشتی i

σ_{ij}: اگر در دیاگرام زمان- فضا کشتی i کاملا سمت چپ کشتی j باشد $\sigma_{ij} = ۱$ در غیر این‌صورت $\sigma_{ij} = ۰$

δ_{ij}: اگر در دیاگرام زمان- فضا کشتی i کاملا بالای کشتی j باشد $\delta_{ij} = ۱$ در غیر این‌صورت $\delta_{ij} = ۰$

مدل ریاضی ارایه شده مساله که به تفکیک اسکله می‌باشد، به تخصیص اسکله به تعدادی کشتی با یک افق زمانی مشخص اشاره می‌شود. در این پژوهش، هدف تخصیص بهینه کشتی‌ها در بنادر است به طوری که زمان تاخیر کشتی‌ها مینیمم شود. پهلوگیری کشتی‌ها در زمان و مکان بهینه یکی از مسایل مهم در صنعت کشتیرانی است و در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. مدل ریاضی زیر یکی از همین مدل‌ها است به طوری که در تابع هدف این مدل در رابطه ۱ ترکیب خطی زمان تاخیر دریافت سرویس کشتی‌ها در اسکله کمینه‌سازی می‌شود.

$$\min \sum_{i-۱}^{N} (c_i - (a_i + p_i)) \qquad (۱)$$

$$s.t.$$

$$\begin{cases} u_j - u_i - p_i - (\sigma_{ij} - ۱).T \geq ۰, & \forall i \geq ۱,\ j \leq N, i \neq j \\ v_j - v_i - s_i - (\delta_{ij} - ۱).S \geq ۰, & \forall i \geq ۱,\ j \leq N, i \neq j \\ \sigma_{ij} + \sigma_{ji} + \delta_{ij} + \delta_{ji} \geq ۱, & \forall i \geq ۱,\ j \leq N, i \neq j \\ \sigma_{ij} + \sigma_{ji} \leq ۱, & \forall i \geq ۱,\ j \leq N, i \neq j \\ \delta_{ij} + \delta_{ji} \leq ۱, & \forall i \geq ۱,\ j \leq N, i \neq j \\ p_i + u_i = c_i, & \forall ۱ \leq i \leq N \\ a_i \leq u_i \leq (T - p_i), & \forall ۱ \leq i \leq N \\ ۰ \leq v_i \leq (S - s_i), & \forall ۱ \leq i \leq N \\ u_i, v_i \in R^+ & \forall ۱ \leq i \leq N \\ \sigma_{ij} \in \{۰,۱\}, \delta_{ij} \in \{۰,۱\} & \forall i \geq ۱,\ j \leq N, i \neq j \end{cases}$$

تابع هدف کمینه‌سازی مجموعه موزون زمان تاخیر در دریافت سرویس کشتی‌ها در اسکله‌ها است. محدودیت‌های اول و دوم محدودیت‌های مربوط به زمان و فضای تخصیص کشتی‌ها در اسکله را بیان می‌کند. محدودیت‌های سوم، چهارم و پنجم تضمین می‌کنند که تخصیص کشتی‌ها در اسکله دارای هم پوشانی روی دیاگرام زمان-فضا نباشد. محدودیت ششم، یک محدودیت محاسباتی برای زمان خروج کشتی‌ها از اسکله (completion time)است. محدودیت هفتم محدودیت افق زمانی برنامه‌ریزی است و محدودیت هشتم محدودیت ظرفیت اسکله یا فضای در دسترس است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

۳ الگوریتم واکنش شیمیایی

۳-۱مفهوم اساسی الگوریتم

این الگوریتم از عملکرد مولکول‌ها در واکنش‌های شیمیایی برای رسیدن به حداقل انرژی الهام گرفته است و اولین بار در سال ۲۰۱۰ توسط آلبرت مطرح شد. همان‌طور که می‌دانیم ماده در طبیعت سعی در رسیدن به حداقل سطح انرژی پتانسیل را دارد. فرض می‌شود که مولکول‌ها در یک محیط بسته قرار دارند. بنابراین یا با هم برخورد می‌کنند و یا به دیواره ظرف برخورد می‌کنند. این الگوریتم از فرایند و واکنش‌های مولکولی الهام گرفته است. هر مولکول مجموعه‌ای از اتم‌ها و خواصی مانند تعداد و ... می‌باشد. ما هر مولکول را با یک آرایه نمایش می‌دهیم که ویژگی‌های آن مولکول را نمایش می‌دهد.

ω : که نشان‌دهنده‌ی ساختار مولکول یا همان راه حل مفید می‌باشد.

PE: برای هر مولکول یک ویژگی انرژی پتانسیل (Potential Energy) تعریف می‌کنیم که میزان شایستگی هر مولکول را نمایش می‌دهد.

KE: برای هر مولکول یک ویژگی انرژی جنبشی (Kinetic Energy) تعریف می‌کنیم.

NumHit: برای هرمولکول یک ویژگیnumHit تعریف شده که تعداد برخوردهای هرمولکول را مشخص می‌کند.

MinHit: برای هر مولکول یک ویژگی minHit تعریف می‌کنیم که حداقل تعداد برخوردها را مشخص می‌کند.

LocalMin: برای هر مولکول یک ویژگی localMin تعریف می‌کنیم که مینیمم‌ترین جوابی که اخیرا این مولکول مشاهده کرده است را نگهداری می‌کند. هر مولکول مجموعه‌ای از اتم‌ها و خواصی همچون تعداد است که یک راه حل قابل قبول برای مساله می‌باشد. هر مولکول دو نوع انرژی PE و KE را دارا می‌باشد. مقدار تابع هدف هر مولکول برابر با میزان انرژی PE است. هر مولکولی ω تمایل دارد به مولکول ω' تغییر یابد، این تغییر همیشه امکان‌پذیر است اگر $f(\omega) \geq f(\omega')$ و در غیر این‌صورت تنها در صورت برقراری $PE_{\omega} + KE_{\omega} \geq PE_{\omega'}$ تغییر ممکن می‌شود. در واقع KE توانایی مولکول برای فرار از بهینه محلی است. طبق قانون بقای انرژی، انرژی ایجاد نمی‌شود و از بین نمی‌رود؛ بنابراین تنها تبدیل انرژی PE و KE در طی فرایندهای شیمیایی به یکدیگر امکان‌پذیر می‌باشد. الگوریتم CRO با یک بافر مرکزی انرژی کار می‌کند. به‌طوری‌که با پیشرفت الگوریتم، مقدار KE کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر مولکول‌ها مجبورند که در تکرارهای بعدی ساختار مولکولی با مقدار PE کمتر و کمتر داشته باشند. واکنش‌های اصلی در الگوریتم CRO در چهار دسته قرار می‌گیرند. هر یک از این واکنش‌ها روشی برای دستکاری انرژی مولکول‌های درگیر در آن واکنش هستند.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

۳-۲ برخورد بی‌اثر دیواره‌ای

یک مولکول به دیواره برخورد کرده و بازمی‌گردد و برخی ویژگی‌های آن در این برخورد تغییر می‌کند. در اثر این واکنش مولکول ω به مولکول ω' تبدیل می‌شود به‌طوری‌که $\omega' = Neigbour(\omega)$. این تبدیل زمانی مجاز است که رابطه (۲) برقرار باشد:

$$PE_{\omega} + KE_{\omega} \geq PE_{\omega'} \qquad (۲)$$

درصورت عدم برقراری شرط رابطه (۲)، ω و PE و KE همان مقادیر قبلی باقی می‌مانند و در صورت برقراری شرط، ω' به ω' تبدیل می‌شود به‌طوری‌که رابطه (۳) برقرار شود.

$$KE_{\omega'} = (PE_{\omega} + KE_{\omega} - PE_{\omega'}) \times q \qquad (۳)$$

که q عددی بین KELossRate و ۱ می‌باشد. $q-۱$ نشان دهنده ضریب کاهش KE در محیط هنگام برخورد به دیواره می‌باشد. KELossRate یک پارامتر سیستم است که حداکثر درصد کاهش KE در هر زمان را محدود می‌کند. انرژی هدررفته در بافر ذخیره می‌شود و انرژی ذخیره شده می‌تواند در فرایند تجزیه استفاده شود.

شبه کد این واکنش در الگوریتم ۱ آمده است.

---

ineff _coll _on _wall(*M*, *buffer*)

Input : *Amolecule M with* its profile and central energy buffer.

---

۱. Obtain $\omega' = Neighbor(\omega)$

۲. *Calculate* $PE_{\omega'}$

۳. if $PE_{\omega} + KE_{\omega} \geq PE_{\omega'}$ then

۴. Get q randomly in interval [KELossRate,۱]

۵. $KE_{\omega'} = (PE_{\omega} + KE_{\omega} - PE_{\omega'}) \times q$

۶. Update buffer=buffer+$(PE_{\omega} + KE_{\omega} - PE_{\omega'}) \times (۱ - q)$

۷. Update the profile of M by $\omega = \omega'$, $PE_{\omega} = PE_{\omega'}$ and $KE_{\omega} = KE_{\omega'}$

۸. end if

۹. Output M and buffer

الگوریتم ۱. شبه کد برخورد بی اثر دیواره‌ای

۳-۳ تجزیه

یک مولکول بعد از برخورد به دیواره به دو یا چند مولکول متفاوت تبدیل می‌شود (فرض بر این است که یک مولکول به دو مولکول تجزیه می‌شود). مولکول ω'_1 به دومولکول ω'_1 و ω'_2 تجزیه می‌شود. مقدار PE مولکول‌های حاصل از شرط (۴) پیروی می‌کند و در صورت عدم برقراری تجزیه صورت نمی‌گیرد:

$$PE_{\omega} + KE_{\omega} \geq PE_{\omega'_1} + PE_{\omega'_2} \qquad (۴)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

مقدار KE مولکول‌های حاصل به‌صورت زیر می‌باشد:

$$KE_{\omega_1'} = temp1 \times K$$

$$KE_{\omega_2'} = temp1 \times (1 - K)$$

که در آن:

$$temp1 = PE_{\omega} + KE_{\omega} - PE_{\omega_1'} - PE_{\omega_2'}$$

K یک عدد تصادفی در بازه صفر و یک با توزیع یکنواخت است. برای تشویق به عمل تجزیه از انرژی موجود در بافر استفاده می‌شود و اگر شرط مذکور در (۴) برقرار نبود شرط (۵) بررسی می‌شود:

$$PE_{\omega} + KE_{\omega} + buffer \geq PE_{\omega_1'} + PE_{\omega_2'} \qquad (۵)$$

اگر شرط (۵) برقرار بود تجزیه صورت می‌گیرد و داریم:

$$KE_{\omega_1'} = (temp1 + buffer) \times m1 \times m2$$
$$KE_{\omega_2'} = (temp1 + buffer - KE_{\omega_1'}) \times m3 \times m4$$

که m1 و m2 و m3 و m4 اعداد تصادفی هستند. که با توزیع یکنواخت در بازه صفر و یک تولید شده‌اند، ضرب کردن m1 در m2 و m3 در m4 تضمین می‌کند که مقدار KE مولکول‌های جدید خیلی زیاد نباشد. چرا که مقدار بافر معمولا زیاد است. سپس مقدار بافر با رابطه (۶) به‌روزرسانی می‌شود:

$$temp1 + buffer - KE_{\omega_1'} - KE_{\omega_2'} \qquad (۶)$$

اگر شرط (۴) و (۵) برقرار نباشد تغییرات مجاز نیست و ω و PE و KE همان مقادیر قبلی می‌مانند.

شبه کد مربوط به تجزیه در الگوریتم ۲ آمده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

---

decompose$(M, buffer)$

Input : *A* molecule M with its profile and the central energy buffer buffer.

۱. obtain ω'_1 and ω'_2 from ω

۲. Calculate $PE_{\omega'_1}$ *and* $PE_{\omega'_2}$

۳. Let $temp_1 = PE_\omega + KE_\omega - PE_{\omega'_1} - PE_{\omega'_2}$

۴. Create a Boolean variable Success

۵. if $temp_1 \geq 0$ then

۶. Success= TRUE

۷. Get k randomly in interval $[0,1]$

۸. $KE_{\omega'_1} = temp_1 \times k$

۹. $KE_{\omega'_2} = temp_1 \times (1-k)$

۱۰. Create new molecues M'_1 and M'_2

۱۱. Assign $\omega'_1, PE_{\omega'_1}$ and $KE_{\omega'_1}$ to the profile of M'_1, and $\omega'_2, PE_{\omega'_2}$ and $KE_{\omega'_2}$ to the profile of M'_2

۱۲. else if $temp_1 + buffer \geq 0$ then

۱۳. *Success* = TRUE

۱۴. Get M_1, M_2, M_3 and M_4 independently randomly in interval [0,1]

۱۵. $KE_{\omega'_1} = (temp_1 + buffer) \times m_1 \times m_2$

۱۶. $KE_{\omega'_2} = (temp_1 + buffer - KE_{\omega'_1}) \times m_3 \times m_4$

۱۷. *Update* buffer $= temp_1 + buffer - KE_{\omega'_1} - KE_{\omega'_2}$

۱۸. Assign $\omega'_1, PE_{\omega'_1}$ and $KE_{\omega'_1}$ to the profile of M'_2

۱۹. else

۲۰. Success =FALSE

۲۱. end if

۲۲. Output M'_1 and M'_2, Success and buffer

الگوریتم۲. شبه کد تجزیه

۳-٤ برخورد بی‌اثر داخل مولکولی

دو مولکول با هم برخورد کرده و دو مولکول با ویژگی‌های جدید ایجاد می‌شود. دو مولکول ω_1 و ω_2 با هم برخورد می‌کنند و دو مولکول جدید ω'_1 و $\acute{\omega}_2$ به ترتیب ایجاد می‌شود که ω'_1 همسایگی ω_1 و $\acute{\omega}_2$ همسایگی ω_2 است. این تغییرات قابل انجام است اگر رابطه (۷) برقرار باشد.

$$PE_{\omega_1} + PE_{\omega_2} + KE_{\omega_1} + KE_{\omega_2} \geq PE_{\omega'_1} + PE_{\omega'_2} \qquad (۷)$$

و داریم:

$$KE_{\omega'_1} = temp2 \times P$$
$$KE_{\acute{\omega}_2} = temp2 \times (1-P)$$

که در آن:

$$temp2 = \left(PE_{\omega_1} + PE_{\omega_2} + KE_{\omega_1} + KE_{\omega_2}\right) - \left(PE_{\omega'_1} + PE_{\omega'_2}\right)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

P یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه صفر و یک است. اگر شرط (۷) برقرار نباشد مولکول ω_1 و ω_2 بدون تغییر باقی می‌مانند

شبه کد برخورد داخل مولکولی در الگوریتم ۳ آمده است.

---

int $er_ineff_coll(M_1, M_2)$

Input : *molecule* M_1,M_2 *with* their profiles.

۱. Obtain $\omega'_1 = Neighbor(\omega_1)$ and ω'_2=Neighbor(ω_2)

۲. *Calculate* $PE_{\omega'_1}$ and *Calculate* $PE_{\omega'_2}$

۳. *Let* temp2=(PE_{ω_1} +PE_{ω_2} +kE_{ω_1} +kE_{ω_2})-($PE_{\omega'_1}$ + $PE_{\omega'_2}$)

۴. if $temp_2 \geq 0$ then

۵. *Get* p randomly in interval [۰,۱]

۶. $KE_{\omega'_1} = temp2 \times p$

۷. $KE_{\omega'_2} = temp2 \times (1-p)$

۸. Update the profile of M_1 by $\omega_1=\omega'_1$, $PE_{\omega_1} = PE_{\omega'_2}$ and $KE_{\omega_1} = KE_{\omega'_1}$, *and* the profile of M_2 by $\omega_2 = \omega'_2$, $PE_{\omega_2} = PE_{\omega'_2}$ *and* $KE_{\omega_2} = KE_{\omega'_2}$

۹. end if

۱۰. Output M_1 and M_2

الگوریتم ۳. شبه کد برخورد داخل مولکولی

۳-۵ سنتز یا ترکیب

در این فرایند دو (یا چند) مولکول با هم ترکیب می‌شوند و یک مولکول جدید ایجاد می‌کنند. ω_1 و ω_2 را مولکول‌های اولیه و ω' را مولکول حاصل در نظر بگیرید. اگر شرط (۸) برقرار باشد، عمل ترکیب انجام می‌گیرد.

$$PE_{\omega_1} + PE_{\omega_1} + KE_{\omega_1} + KE_{\omega_2} \geq PE_{\omega'} \qquad (۸)$$

و داریم:

$$KE_{\omega'} = PE_{\omega_1} + PE_{\omega_2} + KE_{\omega_1} + KE_{\omega_2} - PE_{\omega'}$$

در اثر این واکنش مقدار KE مربوط به ω' بیشتر از دو مولکول اولیه است زیرا مقدار PE مربوط به ω' انتظار می‌رود که مقداری مشابه PE دو مولکول اولیه داشته باشد. و در نتیجه مولکول حاصل توانایی بیشتری در فرار از بهینه‌های محلی را دارد. شبه کد الگوریتم CRO در الگوریتم ۵ آمده است.

شبه کد این واکنش درالگوریتم۴ آمده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

synthesis(M_1, M_2)

– – – – – – – – – – – – – – – – – – –

Input : *molecule* M_1,M_2 *with* their profiles.

۱. Obtain ω' *from* ω_1 and ω_2

۲. *Calculate* $PE_{\omega_1'}$

۳. Create a Boolean variable Success

۴. Create a new molecule M'

۵. *if* $PE_{\omega_1} + PE_{\omega 2} + KE_{\omega_1} + KE_{\omega 2} \geq PE_{\omega'}$ then

۶. *Success* = *TRUE*

۷. $KE_{\omega_1'} = PE_{\omega_1} + PE_{\omega 2} + KE_{\omega_1} + KE_{\omega 2} - PE_{\omega'}$

۸. Assign $\omega', PE_{\omega'}$ and $KE_{\omega'}$ to the profile of M'

۹. *else*

۱۰. Success=FAlSE

۱۱. end if

۱۲. *Output* M'*and Success*

الگوریتم٤. شبه کد ترکیب.

```
12.      Select a molecule M from Pop randomly
13.      if decomposition critertion met then
14.         (M'1, M'2, Success)=decompose(M,buffer)
15.       if Success then
16.          Remove M forom pop
17.          Add M'1 and M'2 to Pop
18.       end if
19.    else
20.      ineff_coll_on_wall(M,buffer)
21.      end if
22.   else
23.        Select Molecules M1 and M2 from Pop randomly
24.        if synthesis criterion met then
25.        (M' , Success)=synthesis(M1, M2)
26.          if Success then
27.            Remove M1 and M2 from Pop
28.            Add M' to Pop
29.          end if
30.        else
31.          inter_ineff_coll(M1, M2)
32.        end if
33.     end if
34.     Check for any new minimum solution
35.  end
36. output the overall minimum solution and its funtion
```

الگوریتم ۵. شبه کد الگوریتم CRO

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

٤ روش پیشنهادی

در این مقاله از یک روش موثر به‌نام (CRO_OPT) برای حل مساله تخصیص اسکله‌ها با استفاده از MATLAB R2013a روی پلت فرمی به مشخصات Intel core i3 با حافظه 4GB،RAM و سیستم‌عامل ویندوز7 استفاده نمودیم. برای حل مساله داده‌های مورد نیاز را با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مورد تست قرار دادیم، سپس روش پیشنهادی را با سه الگوریتم ژنتیک ، ازدحام ذرات ودیفرانسل تکاملی مقایسه نمودیم. در مساله مورد بررسی هر دیتاست ۲۰ بار تکرار شده است. در این پژوهش فرض شده است کشتی‌ها در طول زمان وارد می‌شوند و باید به محض رسیدن در زودترین زمان ممکن پهلو داده شوند. بنابراین اولین فرض، دینامیک بودن زمان ورود کشتی‌ها می‌باشد، چرا که در واقعیت هم همین گونه است. فرض بعدی در مورد نحوه برخورد با منابع پهلوگاهی می‌باشد. از بین دو نوع رویکرد گسسته و پیوسته، رویکرد پیوسته باعث بهره‌وری بیشتر از منابع پهلوگاهی می‌شود و همچنین موجب درگیری منابع بیشتری از اسکله در مقایسه با رویکرد گسسته می‌شود. بنابراین در این پژوهش ترجیح داده شد از رویکرد پیوسته استفاده شود. اما از آنجایی‌که بنادر اسکله‌های مختلفی را شامل می‌شود، برای برنامه‌ریزی هم‌زمان اسکله‌های پایانه، به طوری که فضای اسکله‌ی هر پایانه به صورت پیوسته در نظر گرفته شود نیاز به یک رویکرد مرکب برای برخورد با محدودیت مکانی مربوط به فضای اسکله می‌باشد. علاوه بر این در این مقاله فرض بر این است سرویس‌دهی در یک مرحله صورت می‌پذیرد و زمان تاخیر در این مقاله همان زمان انتظار کشتی است. جهت استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری پاسخ‌های ممکن مساله باید به صورت مدلی به الگوریتم ارایه گردد و برازندگی آن توسط تابع هدف مدل شده در یک فرمول ریاضی مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش از الگوریتم CRO بهبودیافته و یک کدینگ تک قسمتی پیوسته در مرحله نخست استفاده می‌کنیم. به این ترتیب در صورتی که تعداد کشتی‌ها P و تعداد اسکله‌ها Q باشد، هر عضو جمعیت یک آرایه به طول $P+Q-1$ از اعداد مابین صفر تا یک می‌باشد که به‌طور تصادفی در آرایه چیده شده‌اند. آنچه در این کدینگ حایز اهمیت است این است که ترتیب قرارگیری اعداد در آرایه در صورت مرتب‌سازی یک جایگشت از اعداد یک تا $P+Q-1$ ارایه می‌دهد. به‌طور مثال اگر تعداد کشتی‌ها برابر ۲۰ باشد و تعداد اسکله‌ها ۳ اسکله باشد. یک کدینگ ممکن از پاسخ به‌صورت زیر خواهد بود. (یک آرایه با بیست و دو عضو)

۰/۰۲۹۲ ۰/۹۲۳۴ ۰/۷۹۴۸ ۰/۷۳۱۷ ۰/۴۸۹۳ ۰/۲۶۳۸ ۰/۰۸۳۸ ۰/۵۶۷۸ ۰/۱۳۸۶ ۰/۴۸۹۸ ۰/۹۳۴۰
۰/۲۶۱۹ ۰/۸۵۹۴ ۰/۱۴۹۹ ۰/۴۳۱۷ ۰/۵۳۹۱ ۰/۱۲۰۶ ۰/۳۱۲۷ ۰/۶۱۱۰ ۰/۲۲۴۰ ۰/۱۵۲۷ ۰/۷۰۹۳

پس از مرتب‌سازی ترتیب به‌دست آمده به‌صورت زیر است:

۱۱ ۵ ۱۷ ۳ ۱۴ ۲۱ ۲۰ ۱۲ ۶ ۱۸ ۱۵ ۷ ۲ ۱۶ ۴ ۱۹ ۲۲ ۸ ۹ ۱۳ ۱۰ ۱

اعداد ۱ تا ۲۰ نشانگر کشتی‌ها و اعداد ۲۱ و ۲۲ به‌عنوان جدا کننده عمل می‌کنند به‌طوری که اعداد قرار گرفته از ابتدای آرایه تا جداکننده اول که در ارایه قرار دارد شماره کشتی‌هایی می‌باشند که در اسکله اول پهلو می‌گیرند. اعداد قرار گرفته مابین دو جداکننده که در آرایه قرار دارد شماره کشتی‌هایی می‌باشند که در اسکله دوم پهلو می‌گیرند و اعداد باقی مانده شماره کشتی‌هایی که در اسکله سوم پهلو می‌گیرند. تابع هدف نیز به‌صورت مجموع تاخیر در پهلوگیری کشتی‌ها محاسبه می‌شود و هدف کاهش این زمان می‌باشد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

الگوریتم COR شامل سه مرحله می‌باشد: مرحله اول، مقداردهی اولیه می‌باشد که در این مرحله جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود جمعیت ممکن به‌صورت جایگشتی از کشتی‌ها همچنان که ذکرشد ارایه می‌گردد و در ادامه پارامترهای الگوریتم مقداردهی می‌شوند. درمرحله دوم، عملیات تکرار الگوریتم بارها تکرار می‌شود و پاسخ ممکن به سمت بهینگی حرکت می‌کند. در هر تکرار یک برخورد انتخاب می‌شود، ابتدا تصمیم‌گیری می‌شود که یک برخورد درون مولکولی یا یک برخورد تک مولکولی رخ دهد. برای این کار یک عدد تصادفی t به‌صورت رندوم با توزیع یکنواخت در بازه صفر و یک تولید و اگر این عدد بیشتر از مقدار معینی باشد در نتیجه یک برخورد تک مولکولی رخ خواهد داد و در غیراین‌صورت یک برخورد بین مولکولی اتفاق خواهد افتاد. سپس به تعداد مناسب (بسته به اینکه برخورد تک مولکولی است یا بین مولکولی) مولکول از جمعیت به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. برای انتخاب نوع برخورد شرط تجزیه یا ترکیب بررسی می‌شود. سپس ایجاد یک نقطه مینیمم جدید بررسی می‌گردد و در صورت وجود ثبت می‌شود. این مراحل تا رسیدن به شرط توقف تکرار می‌شود. الگوریتم CRO یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت می‌باشد اما اندازه جمعیت بسته به عملگرهای تجزیه و ترکیب می‌تواند متغیر باشد. در روش پیشنهادی در این پژوهش تلاش‌شده تا تعداد جمعیت در الگوریتم کنترل شود. با توجه به سازوکار الگوریتم در بخش ترکیب، جمعیت به سمت تک نقطه ای شدن و در نتیجه عدم امکان استفاده از عملگرهای دو مولکولی می‌رود. سازوکار الگوریتم در بخش تجزیه، جمعیت را به سمت افزایش سوق می‌دهد و الگوریتم کند می‌شود ما از یک سازوکار حذف با استفاده از نخبه‌گرایی جهت حفظ حداکثر جمعیت استفاده نمودیم. به این ترتیب که در صورت افزایش جمعیت از حداکثر تعیین شده، تعداد لازم جهت حذف از بدترین پاسخ‌ها انتخاب و حذف شده و بهترین پاسخ‌ها حفظ می‌شوند. جهت پیشگیری از تک نقطه‌ای شدن الگوریتم نیز از بهینه سراسری جهت افزایش یک نقطه در محیط تک نقطه‌ای شده بهره بردیم. در این پژوهش زمان ورود کشتی به اسکله جهت پهلوگیری، طول کشتی و زمان انتظار کشتی به ترتیب aو sوp در نظر گرفته شده که مشخصات آن در پیوست (۱) آمده است.

۵ نتایج

در این مطالعه ما از الگوریتم واکنش شیمیایی بهبودیافته حل مساله تخصیص اسکله‌ها که جز مسایل NP-Hard است، استفاده کردیم. در این مقاله برای حل این مساله از MATLAB R2013a روی پلت فرمی به مشخصات Intel core i3 با حافظه RAM، 4GB و سیستم‌عامل ویندوز10 استفاده شده‌است. برای حل انتخاب ویژگی داده‌های موردنیاز را با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مورد تست قرار دادیم، سپس روش پیشنهادی را با ۳ الگوریتم ازدحام ذرات، ژنتیک و دیفرانسیل مقایسه نمودیم. در مساله مورد بررسی تعداد تکرار در هر الگوریتم ۱۰۰۰ و سایر پارامترها مانند اندازه جمعیت ،حد بالا و پایین یکسان در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه جهت بهبود نتایج الگوریتم سعی در حفظ جمعیت الگوریتم در یک بازه مناسب نمودیم. جهت بررسی نتایج از سه الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات، ژنتیک و دیفرانسیل تکاملی برای مقایسه استفاده کردیم. مشخصات بندر کانتینری مورد بررسی به‌صورت تصادفی انتخاب و به‌صورت زیر می‌باشد:

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

افق زمانی: ۵۰ روز

تعداد اسکله‌ها: ۳

طول اسکله‌ها: در پیوست ۱

مشخصات کشتی‌ها (به ترتیب): در پیوست ۱

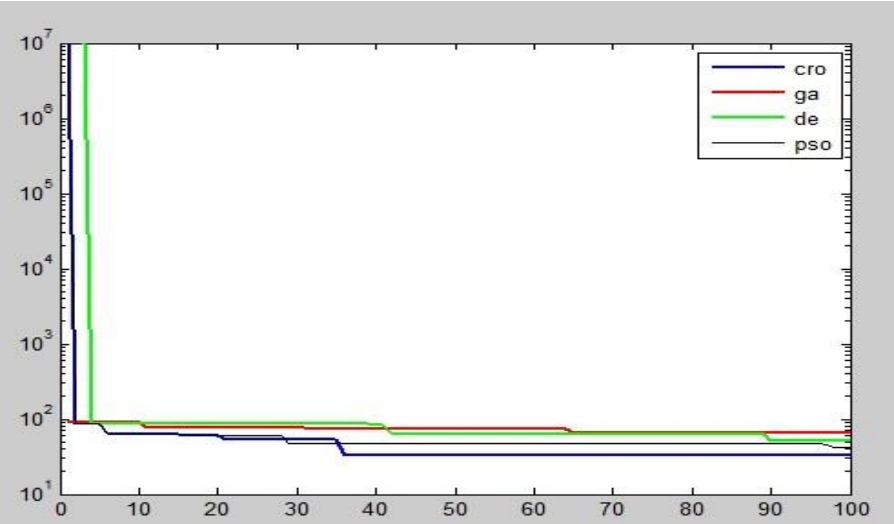
داده‌های به‌کار رفته در این شبیه‌سازی در پنج سایز مختلف انتخاب شد تا تحلیل مناسب‌تری از کارکرد روش‌های مختلف نشان دهد. جدول ۱ نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مساله با روش پیشنهادی و سه الگوریتم مورد مقایسه را به تفکیک دیتا و الگوریتم نشان می‌دهد. علاوه براین نمودار Rocurve با تکرار ۱۰۰۰ مرتبه مربوط به الگوریتم‌ها در شکل ۱ آمده است.

جدول ۱. نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی

داده	الگوریتم	بهترین زمان سرویس	بدترین زمان سرویس	میانگین زمان‌های سرویس	انحراف معیار زمان‌های سرویس	زمان پاسخ دهی الگوریتم(ثانیه)
۱	CRO_opt	۲۵	۴۲	۳۰/۱	۵/۰۷	۴۰/۹۳
	PSO	۲۷	۴۲	۳۱/۳۳	۴/۲۲	۲۰۹/۲۷
	GA	۲۸	۶۲	۴۰/۸۹	۱۱/۸۷	۷۴/۲۰
	DE	۳۱	۴۴	۳۴/۴	۳/۹۶	۲۳۳/۰۷
۲	CRO_opt	۱۴	۲۸	۲۰/۴	۵/۱۷	۶۰/۵۰
	PSO	۱۸	۲۹	۲۱/۱۶۷	۴/۱۶	۲۵۶/۰۸
	GA	۳۰	۵۵	۴۱/۲۲	۸/۱۳	۱۲۶/۶
	DE	۳۰	۴۰	۳۴/۲	۴/۸۶	۳۹۷/۳۲
۳	CRO_opt	۱۹	۲۶	۲۳/۲	۱/۹۲	۷۶/۶۱
	PSO	۳۷	۴۴	۳۶/۸	۶/۶۸	۵۲۰/۱۹
	GA	۲۲	۳۵	۲۷/۶	۵/۰۲	۱۶۸/۱۲
	DE	۴۳	۵۴	۴۶/۸	۴/۲۶	۵۰۵/۵۱
۴	CRO_opt	۲۵	۷۱	۳۳/۱	۶/۱۶	۱۳۶/۲۱
	PSO	۳۱	۲۵	۱۶	۶/۲۱	۴۴۶/۱۲
	GA	۳۴	۵۵	۴۰	۷/۷۴	۲۳۵/۲۱
	DE	۴۴	۵۵	۵۰/۲	۵/۴۴	۶۷۰/۸۱
۵	CRO_opt	۱۱	۴۰	۲۵/۵	۱۰/۴۶	۱۸۶/۵۱
	PSO	۱۷	۲۷	۲۴/۶	۲/۸۸	۶۰۷/۲۲
	GA	۲۶	۳۷	۲۹/۴۲	۶/۱۰	۲۲۶/۱۶
	DE	۴۶	۶۰	۵۱/۴	۵/۷۲	۶۳۱/۹۳

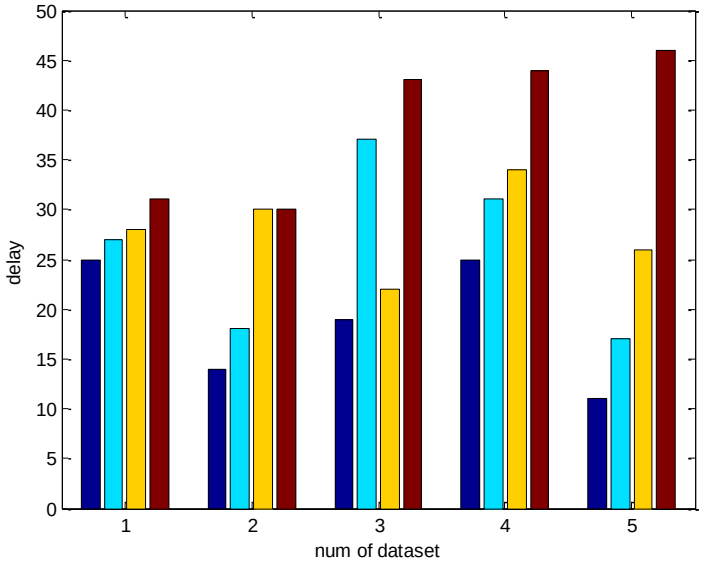
[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]



شکل ۱. نمودار Rocurv مقایسه الگوریتم‌ها

نتایج با استفاده از سه الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک و دیفرانسیل تکاملی پایه و روش پیشنهادی به‌دست آمده است مقایسه این روش‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی با دقت بالاتری عمل کرده است و نتایج زمان سرویس و بالطبع تاخیر کمتری را نشان می‌دهد. در شکل ۲ نمودار میله‌ای مقایسه بهینه نهایی الگوریتم‌ها به تفکیک داده‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار میله ای مقایسه بهینه نهایی الگوریتم‌ها به تفکیک دیتا

الگوریتم CRO پاسخ بهینه را می‌یابد. نمودار میله‌ای مقایسه بهترین پاسخ حاصل از الگوریتم‌ها را به‌خوبی نشان می‌دهد. الگوریتم CRO کم‌ترین تأخیر را ارایه می‌دهد. در شکل بالا رنگ آبی متعلق به الگوریتم پیشنهادی است که کم‌ترین تأخیر را دارد. در نمودار به‌راحتی بازه شماره ۵ کارایی روش پیشنهادی را بهتر نمایان می‌سازد. در صورت زمان‌بندی به‌صورت دستی، زمان تأخیرها با توجه به تعداد و اندازه و زمان پردازش متنوع کشتی‌ها بسیار بالا خواهد بود و زمان لازم جهت زمان‌بندی روزها به‌طول می‌انجامد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

٦ نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل صحیح زمان‌بندی چندین اسکله مورد بررسی قرار گرفت و الگوریتم پیشنهادی زمان سرویس یا خدمت‌دهی مناسبی را در مقابل الگوریتم‌های مورد مقایسه به‌دست آورد. به عنوان مثال در ستون اول جدول ۱ بهترین زمان سرویس برای الگوریتم‌های واکنش شیمیایی، ازدحام ذرات، ژنتیک و دیفرانسیل تکاملی به ترتیب ۲۷،۲۵،۲۸ و ۳۱ در شرایط یکسان پارامترها و تعداد تکرارها به‌دست آمده است. علاوه بر این الگوریتم پیشنهادی، زمان پاسخ‌دهی (جدول شماره ۱) مناسب‌تری در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر مورد بررسی دارد. در این مطالعه اثربخشی روش پیشنهادی، با بررسی پنج مجموعه داده بررسی شد. الگوریتمCRO ، یک الگوریتم بسیار موثر برای جستجوی راه حل‌های بهینه برای یک مساله بهینه‌سازی در حوزه جستجو است. الگوریتم CRO یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت می‌باشد اما اندازه جمعیت بسته به عملگرهای تجزیه و ترکیب می‌تواند متغیر باشد. این الگوریتم ذاتاً شامل سه عملیات بین ملکولی است که باعث تغییر در تعداد جمعیت‌شده و گاهاً الگوریتم را کند کرده و یا برخی عملگرهای ممکن جهت استفاده را غیرقابل استفاده می‌نماید. بنابراین با تلاش جهت حفظ جمعیت الگوریتم در بازه مناسب عملکرد، زمان پاسخ مناسب‌تر حاصل شد. در این پژوهش تلاش‌شده تا تعداد جمعیت در الگوریتم در بازه خاصی حفظ شود. به این ترتیب که در صورت افزایش جمعیت از میزان تعیین‌شده با یک روند نخبه‌گرایی جمعیت را کاهش دهیم و در صورت کاهش جمعیت مولکول، به جمعیت بیافزاییم. در روش‌های دقیق ریاضی نیاز به زمان اجرای بسیار زیادی است چرا که تعداد حالت‌های مختلف ممکن در این مساله بسیار زیاد است و با افزایش هر یک از پارامترهای درگیر در مساله تعداد حالت‌های ممکن به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری که همه حالت‌های ممکن را بررسی نمی‌کند، کارآمدتر می‌باشد. پیچیدگی الگوریتم پیشنهادی، چندجمله‌ای است و عملکرد کلی الگوریتم (دقت، سرعت همگرایی، پیچیدگی محاسباتی) در مقایسه با سایر روش‌ها رضایت‌بخش است. در روش‌های حل مسایل برنامه‌ریزی خطی به روش سیمپلکس با توجه به این‌که پیچیدگی زمانی الگوریتم چند جمله‌ای است، تعداد عملیات ماتریسی در هر تکرار زیاد است، حال آنکه در روش پیشنهادی با جستجوی مستقیم، بدون هیچ‌گونه عملیات ماتریسی تقریب دلخواهی از جواب یافت می‌شود و تعداد عملیات محاسباتی کاهش می‌یابد.

منابع

[۱] دیلمی ، وحید.، (۱۳۹۲)، بررسی و امکان سنجی زیر ساخت‌های فناوری اطلاعات در بندر الکترونیکی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه پردیس بین الملل گیلان.

[۲] محمدپور عمران، محمد.، حسینی، سید فرزاد.، محرمی، مسعود.، ابوعلی، سیامک.، (۱۳۹۳). ارائه مدلی جدید برای مساله زمانبندی اسکله در پایانه‌های کانتینری با در نظر گرفتن تخصیص جرثقیل‌های اسکله و وسایل حمل و نقل. شانزدهمین همایش صنایع دریایی بندر عباس.

[۳] داداشی، علی.، شیخ الاسلامی، عبدالرضا.، بابایی تیرکلایی، عرفان.، (۱۳۹۵). برنامه‌ریزی تخصیص اسکله در پایانه کانتینری بندر شهید رجایی. صنعت حمل و نقل دریایی، ۲(۱)، ۴۱-۴۷.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

[۴] جمشیدی، سمانه .، یزدانی، مهدی.، (۱۳۹۶). مدل‌سازی مساله تخصیص اسکله گسسته در پایانه‌های کانتینری و حل آن به وسیله الگوریتم ژنتیک. سومین کنفرانس بین المللی مدیریت و مهندسی صنایع، تهران، دانشگاه مقدس اردبیلی.

[۵] محمدپور عمران، محمد.، حسینی، سید فرزاد.، (۱۳۹۶). استفاده از الگوریتم علف‌های هرز برای حل مساله تخصیص پهلوگاه‌های اسکله به کشتی‌ها در بنادر کانتینری. فصلنامه دریا فنون، ۲(۳)، ۸۵-۹۶.

[۶] محرمی، مسعود.، (۱۳۹۵). مساله تخصیص اسکله به کشتی‌ها دراسکله‌های ترمینالهای کانتینری. هجدهمین همایش صنایع دریایی، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران.

[۱۷] محمدپور عمران، محمد.، حسینی، سید فرزاد.، محرمی، مسعود.، ابوعلی، سیامک.، (۱۳۹۸). زمان بندی کامیون‌ها در فراباراندار چندگانه برای کاهش تاخیرات با استفاده از الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری. تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، ۱۶(۱)، ۶۹-۹۱.

[۱۸] سموئی، پروانه .، فتاحی، پرویز.، (۱۳۹۶). مقایسه و تحلیلی بر استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسایل زمان‌بندی تولید کارگاهی. تحقیق در عملیات در کاربردهای آن. ۱۴(۱)، ۶۳-۷۶.

[7] Kordić, S., Davidović, T., Kovač, N., Dragović, B., (2016). Combinatorial approach to exactly solving discrete and hybrid berth allocation problem. Applied Mathematical Modelling.

[8] Ting, C. J., Wu, K. C., Chou, H., (2014). Particle swarm optimization algorithm for the berth allocation problem. Expert Systems with Applications, 41(4, Part 1),1543-1550.

[9] Bierwirth, C., Meisel, F., (2015). A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. European Journal of Operational Research, 244(3), 675-689.

[10] Hammouti, I., Merouani, M., Lajjam, A, (2018). Solving the hybrid berth allocation problem using a bat-inspired algorithm, 4th International Conference on Optimization and Applications.

[11] Buhrkal, K., Zuglian, S., Ropke, S., Larsen, J., Lusby, R., (2011). Models for the discrete berth allocation problem: a computational comparison. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 47, 461-473.

[12] Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S., (2001). The dynamic berth allocation problem for a container port. Transportation Research Part B: Methodological, 35(4), 401-417.

[13] Liang, C., Guo, J., Yang, Y., (2011) Multi-objective hybrid genetic algorithm for quay crane dynamic assignment in berth allocation planning. Journal of Intelligent Manufacturing, 22, 471-479.

[14] Han, X. l., Lu, Z. q., Xi, L. f., (2010). A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time, European Journal of Operational Research, 207, 1327-1340.

[15] Jiao, X., Zheng, F., Lio, f., Yinfeng, X, (2018). Integrated Berth Allocation and Time-Variant Quay Crane Scheduling with Tidal Impact in Approach Channel, Discrete Dynamics in Nature and Society.

[16] Barbosa, F., Rampazoo, P., yamakami, A., Camanho, A, (2019). The use of frontier techniques to identify efficient solutions for the Berth Allocation Problem solved with a hybrid evolutionary algorithm, 107, 43-60.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

پیوست ۱.

در دیتای اول ۲۰ کشتی ابتدایی از جدول مشخصات کشتی و در دیتای دوم ۳۰ کشتی ابتدایی از جدول مزبور و به همین منوال در ادامه، استفاده شده است.

جدول الف. طول اسکله‌ها و تعداد کشتی و اسکله

شماره دیتا	تعداد کشتی	طول اسکله	تعداد اسکله
۱	۲۰	۱۰۰	۳
۲	۳۰	۱۵۰	۳
۳	۴۰	۱۸۰	۳
۴	۵۰	۲۰۰	۳
۵	۶۰	۲۵۰	۳

جدول ب. مشخصات کشتی‌ها

s	p	a	i
۱۰	۱۵	۷	۱
۵۰	۹	۲۵	۲
۷۰	۸	۲۲	۳
۴۰	۱	۳۴	۴
۶۰	۱۱	۱۱	۵
۱۰	۲۸	۲	۶
۳۰	۱۵	۹	۷
۶۰	۱۴	۳	۸
۳۰	۱	۱۷	۹
۲۰	۱۳	۱۷	۱۰
۲۰	۴	۳۳	۱۱
۱۰	۱۷	۱۶	۱۲
۵۰	۱۲	۱۰	۱۳
۳۰	۳۵	۱	۱۴
۶۰	۲۱	۷	۱۵
۳۰	۱۲	۱۶	۱۶
۷۰	۲	۴	۱۷
۴۰	۲	۲	۱۸
۲۰	۲۸	۱	۱۹
۵۰	۱۴	۲۰	۲۰
۲۰	۵	۲۳	۲۱
۶۰	۱۰	۱۶	۲۲
۸۰	۹	۲۸	۲۳
۴۰	۲	۳۸	۲۴
۱۰	۷	۳۷	۲۵
۵۰	۵	۲۴	۲۶
۷۰	۱۱	۳۴	۲۷
۹۰	۱۳	۱۹	۲۸

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]

۳۰	۹	۳۰	۲۹
۳۰	۲	۴۱	۳۰
۶۰	۲	۲۶	۳۱
۳۰	۹	۲۷	۳۲
۲۰	۹	۳۱	۳۳
۴۰	۳	۳۹	۳۴
۲۰	۷	۳۲	۳۵
۱۰	۷	۳۶	۳۶
۳۰	۱۳	۱۳	۳۷
۵۰	۱	۴۲	۳۸
۲۰	۳	۱۵	۳۹
۶۰	۹	۲۰	۴۰
۴۰	۶	۲۱	۴۱
۵۰	۷	۱۷	۴۲
۲۰	۲	۳۳	۴۳
۱۰	۵	۳۵	۴۴
۴۰	۸	۲۵	۴۵
۱۰	۱۲	۱۴	۴۶
۵۰	۳	۴۰	۴۷
۶۰	۱۶	۱۸	۴۸
۱۰	۶	۲۲	۴۹
۳۰	۷	۲۹	۵۰
۲۰	۹	۶	۵۱
۵۰	۳	۱۱	۵۲
۲۰	۱	۱۱	۵۳
۳۰	۳	۳۶	۵۴
۵۰	۴	۱۲	۵۵
۱۰	۱	۴۳	۵۶
۴۰	۱۳	۸	۵۷
۲۰	۳	۴۶	۵۸
۴۰	۱۵	۱۰	۵۹
۶۰	۵	۱۵	۶۰

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2020.17.4.8.0]