Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Journal Homepage: jscit.nit.ac.ir
DOI: 10.22034/jscit.2025.532187.2134
Volume 14, Number 4, Winter 2026, pp. 41-55
Received: 07/20/2025, Revised: 11/27/2025, Accepted: 11/28/2025

The Cuckoo Optimization Algorithm in elevator group control systems

Mohammad Nasiraee[1], Behnam malekzadeh[2] and Javad kazemitabar[3]*
Electrical and computer engineering department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

[1]nasiraee.mohammad@nit.ac.ir, [2]behnammalekzadeh6970@gmail.com, and [3*]j.kazemitabar@nit.ac.ir

Corresponding author: Javad kazemitabar

Abstract- A novel group elevator scheduling approach is presented based on the Cuckoo Search Optimization Algorithm. The proposed framework introduces a computationally efficient multi-objective optimization mechanism that simultaneously minimizes several performance criteria, including queue length, passenger waiting time, total travel distance of the elevators, and the ratio of the number of stops to the number of passengers. Unlike traditional optimization methods, the proposed algorithm is activated only upon the arrival of new service requests, aiming to determine the most optimal elevator assignment for each incoming demand. This dynamic assignment strategy is designed to satisfy all system constraints while minimizing the defined objective functions and ensuring smooth system operation. The effectiveness and robustness of the proposed method have been validated through extensive simulation experiments under various traffic scenarios and passenger movement patterns. Finally, a comparative performance analysis with other state-of-the-art optimization algorithms demonstrates the superior efficiency and adaptability of the proposed approach in complex elevator scheduling environments.

Keywords- Elevator group scheduling, multi-objective optimization, evolutionary algorithms, cuckoo search.

مجله علمی رایانش نرم و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
صفحه مجله: jscit.nit.ac.ir
شناسه دیجیتال: 10.22034/jscit.2025.532187.2134
جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۴۱-۵۵
دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در سیستم‌های کنترل گروهی آسانسور

محمد نصیرایی[۱]، بهنام ملک‌زاده[۲]، جواد کاظمی‌تبار*[۳]
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.
[۱]nasiraee.mohammad@nit.ac.ir, [۲]behnammalekzadeh6970@gmail.com, and [۳*]j.kazemitabar@nit.ac.ir

* نویسنده مسئول: جواد کاظمی‌تبار

چکیده- به‌منظور زمان‌بندی گروهی آسانسورها، روشی نوین مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته ارائه شده است. راهکار پیشنهادی، سازوکاری سریع و کارآمد بر پایه‌ی بهینه‌سازی چندهدفه است که معیارهایی نظیر طول صف انتظار، زمان انتظار، مسافت پیموده‌شده توسط آسانسور، و نسبت تعداد توقف‌ها به تعداد مسافران را به‌عنوان اهداف بهینه‌سازی در نظر می‌گیرد. الگوریتم چندهدفه‌ی پیشنهادی تنها در زمان ایجاد تقاضاهای جدید فعال می‌شود و وظیفه‌ی آن تخصیص بهینه‌ی آسانسور به هر تقاضای تازه است. این الگوریتم می‌کوشد فرآیند تخصیص را به گونه‌ای انجام دهد که با رعایت محدودیت‌های مسئله، مقادیر معیارهای بهینه‌سازی یادشده به حداقل برسند. کارایی روش پیشنهادی در یک محیط شبیه‌سازی‌شده مورد ارزیابی قرار گرفته و عملکرد آن در سناریوها و الگوهای گوناگون جابه‌جایی افراد بررسی شده است. در پایان، نتایج به‌دست‌آمده با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی موجود مقایسه و تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی گروهی آسانسور، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم‌های تکاملی، جستجوی فاخته.

۱-مقدمه

آسانسورها از تجهیزات رایج در حمل‌ونقل عمودی ساختمان‌ها هستند که نقش مهمی در انتقال سریع و کاهش زمان انتظار مسافران ایفا می‌کنند. کنترل‌کننده‌ی آسانسورها باید بتواند مناسب‌ترین آسانسور را انتخاب کند؛ به این معنا که هر آسانسوری که امکان پاسخ سریع‌تر به درخواست‌های خارج از کابین را دارد، در اولویت قرار گیرد. بنابراین، کیفیت عملکرد آسانسورهای گروهی به برنامه‌ای وابسته است که توسط برنامه‌نویس برای کنترل‌کننده‌ی این آسانسورها نوشته شده است .[۱] بنابراین، تعریف توابع هدف با رویکردهای مختلف از قبیل کاهش تعداد آسانسورها در عین ارائه خدمات مطلوب - شامل کاهش زمان انتظار مسافران و کوتاه کردن مدت سفر - و حل این توابع با در نظرگیری محدودیت‌های موجود، گامی اساسی در جهت حل این مسئله به شمار می‌رود [۲]. تخصیص بهینه آسانسورها، علاوه بر محاسبه دقیق توابع هزینه، به چگونگی ترکیب آن‌ها و تصمیم‌گیری بین مقادیر به‌دست‌آمده نیز وابسته است. به عبارت دیگر، در سیستمی که از ترکیب چند تابع هزینه استفاده می‌شود، میزان تأثیر هر تابع توسط ضرایب وزنی مشخص می‌گردد. این ضرایب نیز با توجه به شرایط ترافیکی تغییر می‌کنند. برای مثال، در شرایط ترافیک سنگین، کاهش ازدحام و کاهش مصرف انرژی از اهمیت کمتری برخوردارند، در حالی که کاهش زمان انتظار مسافران اولویت بالاتری دارد. اما در ترافیک سبک، کاهش ازدحام نیز مطلوب خواهد بود.

هدف سیستم کنترل گروهی آسانسور[۱](EGCS)، تخصیص بهترین آسانسور برای پاسخ‌گویی به درخواست‌های استفاده، در راستای بهینه‌کردن معیارهای ارزیابی تعیین‌شده است. مسئله زمان‌بندی آسانسور در قالب یک مسئله بهینه‌سازی با تابع هدفی مبتنی بر

ترکیب معیارهای ارزیابی وابسته به هم تعریف می‌شود که فاکتورهایی از جمله مؤلفه‌های فنی آسانسور و جمعیت ساختمان بر آن‌ها اثرگذارند. این مسئله به دلیل پیچیدگی و حجم بالای محاسبات، در گروه مسائل NP-hard قرار داشته و برای حل، نیازمند روش‌های فراابتکاری است. با توجه به پیچیدگی حل مدل به‌سبب وجود روابط غیرخطی، از جواب‌های عددی پیاده‌سازی‌شده توسط نرم‌افزارها غالباً در مقالات استفاده می‌شود. تاکنون تحلیل اندکی در رابطه با بهینه‌سازی زمان‌بندی حرکت آسانسورها انجام گرفته و بیشتر فعالیت‌ها معطوف به بهینه‌نمودن کنترل مکانیکی حرکت آسانسور بوده است. همچنین، استفاده از روش‌های طراحی ترافیک برای کاهش زمان انتظار و سفر افراد، دارای روندی کند بوده است[۶-۳].

یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در سال‌های اخیر، کشف روش‌های ابداعی از طبیعت بوده است که از آن‌ها برای به دست آوردن نتایج مطلوب در مسائل بهینه‌سازی ترکیبی استفاده شده است. از تعدادی از فرآیندهای مشاهده‌شده در تکامل طبیعی یک جمعیت استفاده می‌شود تا راه‌حل‌های جدید و بهبودیافته ایجاد شود. به طور خلاصه، برخی از الگوریتم‌های به دست آمده از طبیعت عبارتند از: الگوریتم ژنتیک[۲](GA)[۷]، شبیه‌سازی تبرید[۳] (SA)[۸]، ازدحام ذرات[۴] (PSO) [۹]، نمونه‌گیری و دسته‌بندی، شبکه‌های عصبی [۱۰]، جستجوی ممنوعه [۱۱]، سیستم مورچگان[۱۲] و منطق فازی[۱۳]. امتیاز این روش‌ها، استفاده از مقدار تابع هدف برای جستجو است. بنابراین، نیازی به اطلاعات جانبی دیگری مانند مشتق تابع ندارند. به همین دلیل به راحتی می‌توان از این روش‌ها در بهینه‌سازی توابع گسسته یا توابع دارای تغییرات ناگهانی و چندین نقطه بهینه موضعی استفاده کرد.

الگوریتم ژنتیک، نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی برگشتی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند[.۱۴] الگوریتم ژنتیک، یک روش بهینه‌سازی الهام‌گرفته از طبیعت است که می‌توان در طبقه‌بندی‌ها از آن به عنوان یک روش عددی جستجوی مستقیم و تصادفی یاد کرد. این الگوریتم، روشی مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده است. از مزایای این الگوریتم می‌توان به طیف وسیع کاربرد آن اشاره کرد، به‌ویژه برای مسائلی که ساختاری بسیار پیچیده دارند و برای آن‌ها روش حل مرسومی مانند مسائل برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح، برنامه‌ریزی غیرخطی و غیره وجود ندارد. همچنین یکی از ویژگی‌های ویژه این الگوریتم که آن را از سایر الگوریتم‌ها متمایز می‌کند، توانایی حل مسائلی است که تابع هدف آن‌ها دارای نقاط بهینه موضعی متعدد است. با این حال، به دلیل محدودیت زمان در دسترس و پیچیدگی محاسباتی، انتخاب تابع برازش در الگوریتم ژنتیک آسان نبوده و مدت زمان زیادی برای جستجوی جواب بهینه نیاز دارد[۱۵].

شبکه‌های عصبی مصنوعی با مدل‌سازی ارتباطات نورون‌های مغز انسان، حل مسئله را ممکن می‌سازند. توانایی این شبکه‌های مصنوعی در کشف روابط غیرخطی بین داده‌های ورودی و خروجی و تشکیل یک مدل دینامیک غیرخطی برای داده‌ها قابل توجه می‌باشد. از سوی دیگر، به دلیل وابستگی قوانین کنترل به دانش خبرگی جاسازی‌شده در منطق فازی، این منطق قابلیت یادگیری ندارد و تنظیم بلادرنگ توابع عضویت فازی نیز دشوار است [۱۶]. شبکه‌های عصبی مصنوعی در تئوری یک الگوریتم قابل کنترل می‌باشند، اما دارای برخی نقایص ذاتی مانند زمان آموزش طولانی و دشواری در انتخاب ساختار و پارامترهای شبکه هستند[۱۸-۱۷]. به منظور ارتقای کنترل گروه آسانسور، در مقاله [۱۹] الگوریتم ترکیبی PSO-SA در EGCS برای بهینه‌سازی زمان‌بندی اعمال شده است. این الگوریتم ترکیبی، همگرایی سریع الگوریتم PSO و مزیت پرش از جواب محلی الگوریتم SA را با هم ادغام می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که این روش نه تنها سرعت همگرایی را تضمین می‌کند، بلکه از قابلیت جستجوی سراسری خوبی نیز برخوردار است که منجر به بهبود عملکرد و کیفیت بهینه‌سازی می‌شود.

مسئله زمان‌بندی گروهی آسانسورها به دلیل ماهیت NP-Hard و وجود معیارهای متناقض همچون کاهش زمان انتظار و کاهش مصرف انرژی، همواره یک چالش اساسی در سیستم‌های حمل‌ونقل عمودی بوده است. نوآوری اصلی پژوهش حاضر در دو بعد قابل توجه است: نخست، به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته برای اولین بار در حوزه‌ی زمان‌بندی آسانسورها؛ دوم، تعریف همزمان چهار معیار کلیدی (زمان انتظار، طول صف، مسافت طی‌شده و نسبت توقف به مسافر) در قالب یک مدل چندهدفه. این ویژگی‌ها موجب می‌شود روش پیشنهادی علاوه بر سادگی در تنظیم پارامترها و توانایی بالاتر در گریز از بهینه‌های محلی، قابلیت اجرا در شرایط واقعی و بلادرنگ را نیز دارا باشد.

در بخش بعد و در روش پیشنهادی، از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته به منظور حل مسئله زمان‌بندی گروهی آسانسورها استفاده می‌شود. بدین منظور، ابتدا مسئله مذکور مدل‌سازی شده و اهداف بهینه‌سازی در آن مشخص خواهد شد. سپس یک سازوکار سریع و با بار محاسباتی کم برای زمان‌بندی گروهی آسانسورها ارائه خواهد شد.

۲-روش پیشنهادی

یک سیستم آسانسور گروهی در نظر گرفته می‌شود که برای جابجایی افراد بین طبقات طراحی شده است. ساختمان مفروض دارای F طبقه بوده و هر آسانسور می‌تواند به صورت آزادانه بین این طبقات جابجا شود. تعداد آسانسورهای این سیستم را با N نشان می‌دهیم که در آن هر آسانسور مانند i دارای ظرفیت C_i می‌باشد. بنابراین مجموعه $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$ مشخص‌کننده ظرفیت آسانسورها است.

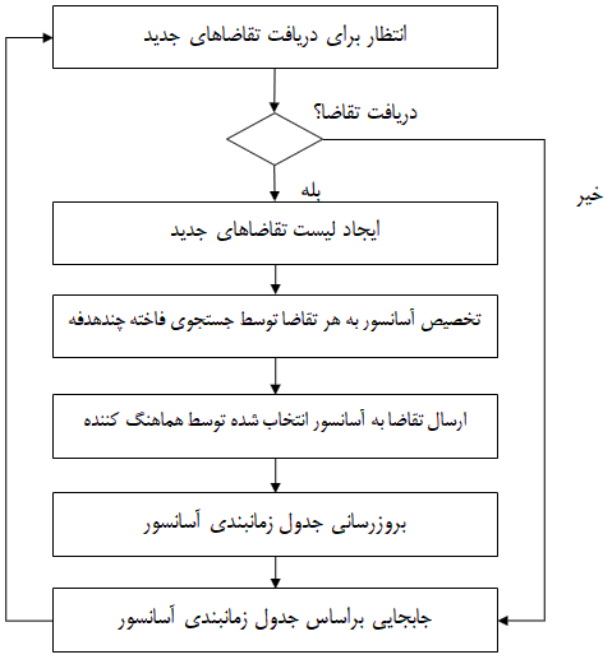
هر فرد مستقر در ساختمان می‌تواند با فشردن دکمه فراخوانی آسانسور، تقاضای جابجایی بین طبقات را ثبت کند. به محض فشردن دکمه فراخوانی توسط فرد، یک تقاضای جابجایی جدید ایجاد شده که آن را به صورت r_i نشان می‌دهیم. این شناسه، طبقه مبدأ iامین تقاضای جابجایی را مشخص می‌کند. همچنین در لحظه ایجاد تقاضای r_i ، یک زمان‌سنج راه‌اندازی شده و تا لحظه رسیدن یکی از آسانسورهای موجود به طبقه هدف، زمان سپری شده را اندازه‌گیری می‌کند(این بازه زمانی در واقع زمان انتظار برای تقاضای r_iخواهد بود).

مجموعه تقاضاهای ایجاد شده به مولفه بهینه‌سازی ارسال می‌شود تا آسانسورهای بهینه برای هر تقاضا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته تعیین شوند. وظیفه این مولفه، تعیین آسانسورهای بهینه برای پاسخگویی به تقاضاهای ایجاد شده براساس اهداف تعیین شده در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد.

لازم به ذکر است که در طی فرآیند تعیین آسانسورهای بهینه برای پاسخگویی به تقاضاهای ایجاد شده توسط الگوریتم جستجوی فاخته، دو محدودیت ظرفیت آسانسور و کران بالایی زمان انتظار نیز برای تعیین پاسخ‌های مجاز در نظر گرفته شده است که به واسطه این محدودیت‌ها، عملی بودن پاسخ در الگوریتم زمان‌بندی تضمین می‌شود.

پس از تخصیص آسانسور بهینه به هر تقاضای جدید توسط الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته، از یک الگوریتم محلی برای به‌روزرسانی جدول زمان‌بندی آسانسور تخصیص یافته استفاده می‌شود. این الگوریتم در مولفه هماهنگ‌کننده آسانسورها تعریف شده است. ساختار طرح پیشنهادی شکل ۱ نمایش داده شده است. مطابق روند نمایش داده شده، الگوریتم زمان‌بندی پیشنهادی با انتظار برای دریافت اولین مجموعه تقاضا آغاز می‌شود. به محض دریافت هر مجموعه تقاضا، یک لیست از خصوصیات مجموعه تقاضاهای R ایجاد شده و فرآیند تخصیص آسانسور به تقاضاها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجرا می‌شود.

همانطور که اشاره شد، در این معماری از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته به منظور زمان‌بندی بهینه و گروهی آسانسورها استفاده می‌شود. بدین ترتیب، الگوریتم بهینه‌سازی به صورت یک مولفه در زمان ایجاد تقاضاهای جدید اجرا شده و راه‌حل یافته شده را به مولفه هماهنگ‌کننده آسانسورها تحویل می‌دهد. مولفه هماهنگ‌کننده، خصوصیات تقاضا را به آسانسور اختصاص یافته ارسال می‌کند و از یک الگوریتم محلی برای به‌روزرسانی جدول زمان‌بندی آسانسور استفاده می‌شود. در ادامه به تشریح نحوه عملکرد هر یک از این مولفه‌ها خواهیم پرداخت. با افزودن نسخه تک‌هدفه تجمیعی، مشخص شد که هرچند این رویکرد موجب کاهش چشمگیر پیچیدگی زمانی می‌شود، اما با اندکی افت در کیفیت جبهه پارتو همراه است. ازاین‌رو، روش چندهدفه پیشنهادی همچنان کارآمدترین گزینه برای ایجاد توازن میان شاخص‌های عملکرد در سیستم‌های چندآسانسوری محسوب می‌شود. مطابق با بررسی جامع کوئلو [۲۰]، به‌کارگیری تابع هدف تجمیعی تنها زمانی توجیه‌پذیر است که وزن‌دهی اهداف بر پایه معیارهای فیزیکی یا تصمیم‌گیری مشخص صورت گیرد؛ در غیر این صورت، رویکرد چندهدفه مبتنی بر پارتو، به‌دلیل توانایی در حفظ تنوع پاسخ‌ها و دستیابی به مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه غیرقابل‌غلبه، ارجح است. همچنین بر اساس دیدگاه دِب[۲۱]، تجمیع اهداف متعدد در قالب یک تابع منفرد معمولاً موجب از بین رفتن ساختار جبهه پارتو و کاهش تنوع پاسخ‌ها می‌شود؛ درحالی‌که الگوریتم‌های چندهدفه، به‌ویژه خانواده NSGA، قادرند تعادل میان معیارهای متضاد را



شکل ۱: ساختار طرح پیشنهادی برای زمانبندی گروهی آسانسورها

حفظ کرده و جبهه‌ای واقعی‌تر و متنوع‌تر از راه‌حل‌های بهینه ارائه دهند.

۲-۱- زمان‌بندی گروهی آسانسور با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته

بهینگی یک الگوریتم زمان‌بندی گروهی آسانسور به جنبه‌های مختلفی بستگی دارد. از دیدگاه استفاده‌کنندگان از سیستم آسانسور، بهینگی یک سیستم زمان‌بندی را می‌توان در کمینه‌کردن زمان انتظار و دستیابی به مقصد در کمترین زمان ممکن خلاصه نمود؛ اگرچه معیارهایی مانند ازدحام کابین و تهویه مناسب نیز می‌توانند بر رضایتمندی افراد در استفاده از آسانسور تأثیرگذار باشند. از طرفی، از دیدگاه نگهدارندگان سیستم آسانسور، بهینگی سیستم زمان‌بندی شامل جنبه‌های دیگری نیز خواهد بود. کاهش استهلاک، کاهش مصرف انرژی و مسافت جابجایی (در کنار معیارهای زمانی ذکر شده) از جمله مواردی هستند که بهینگی سیستم زمان‌بندی را از دیدگاه نگهدارندگان سیستم آسانسور توصیف می‌کنند.

با این وجود، عدم همخوانی این معیارها با یکدیگر موجب می‌شود که در نظر گرفتن آن‌ها در یک الگوریتم بهینه‌سازی به صورت همزمان دشوار باشد. بدین ترتیب به نظر می‌رسد که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه راهکاری مناسب‌تر برای حل مسئله تحقیق باشد. در هر مسئله زمان‌بندی آسانسور، ممکن است راه‌حل‌های معتبر بسیار زیادی برای انجام این عمل وجود داشته باشد. اما مسئله اساسی در این شرایط، تعیین میزان بهینگی هر یک از پاسخ‌های معتبر موجود خواهد بود. باید بتوان با به‌کارگیری مجموعه‌ای از معیارهای دقیق و کارآمد، بهترین حالت ممکن برای مسئله تخصیص آسانسور به تقاضاهای جابجایی را تعیین نمود. به همین دلیل، در روش پیشنهادی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای حل مسئله تخصیص آسانسورها استفاده شده است. الگوریتم به کار رفته در این تحقیق، الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته می‌باشد.

الگوریتم جستجوی فاخته، یک الگوریتم بهینه‌سازی است که علاوه بر همگرایی سریع‌تر نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی، نیازمند تعیین پارامترهای متعدد نمی‌باشد[۲۲]. این الگوریتم، یک روش بهینه‌سازی کارآمد برای حل مسائل NP-Hard می‌باشد و دارای کاربردهای وسیعی در زمینه حل مسائل مرتبط با حوزه شبکه و گراف است. الگوی کلی این الگوریتم، شروع جستجو از یک مجموعه راه‌حل تصادفی و سپس بهبود آن از طریق عملگرهای مختلف می‌باشد. یکی از چالش‌های اصلی در حل مسائل NP-hard، خطر گرفتار شدن الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌های محلی است. در روش پیشنهادی، برای مقابله با این چالش از پنج راهکار استفاده شده است: به‌کارگیری جهش لوی برای خروج از نواحی بهینه محلی از طریق پرش‌های بلند، اعمال احتمال ترک لانه برای جایگزینی راه‌حل‌های ضعیف با نمونه‌های جدید، تولید تصادفی جمعیت اولیه به منظور پوشش کامل فضای جستجو، استفاده از چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه برای حفظ تنوع در جبهه پارتو[۵] و جلوگیری از همگرایی زودرس، و در نهایت اجرای مکرر آزمایش‌ها برای کاهش اثرات تصادفی. این ترکیب راهکارها، الگوریتم پیشنهادی را به رویکردی پایدار و کارآمد تبدیل کرده که توانایی بالاتری در یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه سراسری در مقایسه با روش‌های موجود دارد.

این الگوریتم برگرفته از رفتار تخم‌گذاری برخی گونه‌های فاخته است که تخم‌های خود را در آشیانه پرندگان میزبان (از گونه‌های دیگر) قرار می‌دهند. جستجوی فاخته بر اساس چنین شیوه پرورشی شکل می‌گیرد و می‌تواند برای انواع مسائل بهینه‌سازی اجرا شود. این الگوریتم بر اساس سه قانون زیر عمل می‌کند[۲۲]:

- هر فاخته در هر لحظه بر روی یک تخم می‌خوابد و تخم خود را در آشیانه تصادفی انتخاب‌شده می‌اندازد.
- بهترین آشیانه‌ها با بهترین کیفیت تخم‌ها به چرخه بعدی واگذار می‌شوند. به بیانی دیگر، بهترین راه‌حل‌ها در تکرار بعدی الگوریتم جستجو حضور خواهند داشت.
- تعداد آشیانه‌های میزبان موجود ثابت است و پرنده میزبان با احتمال $P_a \in (0,1)$ تخمی را پیدا می‌کند که فاخته بر روی آن خوابیده است.

مزیت اصلی الگوریتم جستجوی فاخته، سادگی آن است. در واقع، در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت یا مبتنی بر عامل مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات و بهینه‌سازی ژنتیک، در این الگوریتم تنها دو پارامتر P_a و اندازه جمعیت وجود دارند. بنابراین استفاده از این الگوریتم بسیار ساده خواهد بود.

در الگوریتم جستجوی فاخته، هر تخم فاخته‌ای که در لانه‌ای گذاشته شده است، در واقع نماینده یک راه‌حل است. از آنجا که در هر لانه بیش از یک تخم گذاشته می‌شود، هر لانه نماینده یک مجموعه راه‌حل می‌باشد. به بیان دیگر، راه‌حل و تخم هر دو به یک مفهوم اشاره دارند. ساختار بردار راه‌حل در این الگوریتم بهینه‌سازی در ادامه توضیح داده خواهد شد.

الگوریتم جستجو با تولید یک مجموعه راه‌حل تصادفی برای لانه‌ها آغاز می‌شود. در روش پیشنهادی، مقادیر اولیه هر راه‌حل به صورت

تصادفی انتخاب می‌گردد. سپس بر اساس یک چرخه تکراری، ابتدا یک فاخته مانند i به صورت تصادفی انتخاب شده و میزان بهینگی پاسخ آن محاسبه می‌شود. نحوه ارزیابی بهینگی بر اساس معیارهای هدف در ادامه تشریح خواهد شد. در گام بعدی، یک لانه (مجموعه راه‌حل) تصادفی دوم مانند j انتخاب شده و بهینگی پاسخ آن با لانه i مقایسه می‌شود. در صورتی که لانه j غالب بر لانه i باشد، مجموعه راه‌حل‌های لانه j به عنوان مجموعه پاسخ بهینه‌تر نسبت به لانه i تعیین شده و مجموعه راه‌حل j با i جایگزین می‌شود.

در گام بعدی این الگوریتم، نسبت P_a از لانه‌های با برازش بدتر ترک شده و مجموعه راه‌حل‌های جدیدی به صورت تصادفی تولید می‌شوند. در پایان هر چرخه، بهترین مجموعه راه‌حل‌ها نگهداری می‌شوند. این گام‌ها تا زمانی که تعداد تکرار الگوریتم به مقدار از پیش تعیین‌شده حداکثر نسل[۶] برسد، تکرار می‌شود. در هر گام تکرار این الگوریتم، بهترین پاسخ‌ها نگهداری شده و در آخرین تکرار الگوریتم، بهترین N پاسخ به عنوان پاسخ‌های بهینه نهایی در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۲- ساختار بردار پاسخ و اهداف بهینه‌سازی در الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت، به تشریح ساختار بردار پاسخ و معیارهای هدف جهت ارزیابی برازش در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته خواهیم پرداخت. هدف الگوریتم بهینه‌سازی در این گام، تخصیص بهینه آسانسور به تقاضاهای واردشده جدید می‌باشد.

اگر مسئله مورد بحث دارای M تقاضای جدید و N آسانسور باشد، آنگاه هر بردار پاسخ در الگوریتم بهینه‌سازی دارای طول M خواهد بود. هر درایه این بردار مشخص‌کننده یکی از تقاضاهای جابجایی جدید می‌باشد و عدد موجود در این درایه نشان‌دهنده شناسه آسانسوری است که در پاسخ جاری به آن اختصاص داده شده است. بدین ترتیب، هر درایه بردار راه‌حل می‌تواند یکی از مقادیر 1 تا N را در خود داشته باشد و به بیانی دیگر، تعداد متغیرهای بهینه‌سازی برابر با M و کران‌های هر متغیر بهینه‌سازی به صورت $[1, N]$ خواهد بود.

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته در روش پیشنهادی به صورت همزمان از چهار معیار طول صف انتظار، زمان انتظار، مسافت طی شده توسط آسانسور و نسبت تعداد توقف به تعداد مسافر به منظور ارزیابی برازش هر پاسخ استفاده می‌کند. در مجموعه چهار هدف فوق، با استفاده از معیارهای طول صف انتظار و زمان انتظار تلاش می‌شود تا میزان رضایتمندی مسافران بیشینه گردد و در مقابل، با استفاده از معیارهای مسافت طی شده توسط آسانسور و نسبت تعداد توقف به تعداد مسافر تلاش می‌شود تا میزان انرژی مصرفی و سطح استهلاک سیستم آسانسور کمینه گردد. بدین ترتیب، با استفاده از اهداف به‌کار رفته در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی می‌توان ضمن افزایش رضایتمندی افراد در استفاده از آسانسور، سطح کارایی انرژی و طول عمر سیستم را افزایش داد.

هر یک از این معیارهای هدف به صورت زیر ارزیابی خواهند شد:

الف) طول صف انتظار: هدف یک الگوریتم زمان‌بندی گروهی آسانسور، کاهش تعداد افراد منتظر آسانسور در راهروها می‌باشد. این معیار را می‌توان با رابطه زیر توصیف نمود:

$$minimize\ LW = \sum_{i=1}^{N} |Q_i| \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، N نشان‌دهنده تعداد آسانسورهای موجود در سیستم بوده و Q_i مشخص‌کننده صف زمان‌بندی حرکت آسانسور i می‌باشد. همچنین تابع $|.|$ مشخص‌کننده اندازه صف زمان‌بندی می‌باشد.

ب) زمان انتظار: این هدف، یکی از اصلی‌ترین معیارهای ارزیابی یک الگوریتم زمان‌بندی آسانسور بوده و می‌تواند میزان رضایتمندی مسافران از سیستم حمل‌ونقل ساختمان را توصیف کند. از آنجا که محاسبه مقدار دقیق این معیار برای هر راه‌حل ایجاد شده در الگوریتم بهینه‌سازی مستلزم صرف توان محاسباتی بالایی است، لذا در روش پیشنهادی بر اساس معادله تقریبی ارائه شده در[۲۰]. برای ارزیابی زمان انتظار استفاده خواهد شد. بدین ترتیب، این معیار را می‌توان به صورت رابطه زیر محاسبه نمود:

$$minimize\ WT = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[0.4 + \frac{1.8P_i}{C_i} - .77^2] \qquad (۲)$$

در رابطه فوق، P_i تعداد افراد موجود در آسانسور را توصیف می‌کند. همچنین C_i مشخص‌کننده ظرفیت آسانسور i می‌باشد. لازم به ذکر است که تعداد افراد موجود در هر آسانسور از طریق مؤلفه هماهنگ‌کننده آسانسور قابل دریافت می‌باشد.

ج) مسافت طی شده توسط آسانسور: کاهش مسافت طی شده توسط آسانسورهای گروهی برای جابجایی افراد می‌تواند در افزایش طول عمر سیستم مؤثر باشد. این معیار همچنین به صورت غیرمستقیم بر کاهش زمان حمل و زمان دستیابی به مقصد تأثیرگذار خواهد بود و به صورت رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$minimize\ TD = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{|Q_i|-1} D(q_i^j, q_i^{j+1}) \qquad (۳)$$

که در آن $D(.,.)$ فاصله اقلیدسی بین دو توقفگاه متوالی در صف

زمان‌بندی آسانسور i را نشان می‌دهد.

د) نسبت تعداد توقف به تعداد مسافر: آخرین هدف بهینه‌سازی در الگوریتم پیشنهادی، معیارهای مرتبط با مصرف انرژی و بهره‌وری فضای سیستم آسانسور را مورد بررسی قرار می‌دهد. این معیار به صورت رابطه زیر قابل توصیف می‌باشد:

$$minimize\ SP = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{S_i}{P_i} \qquad (۴)$$

در رابطه فوق، S_i نشان‌دهنده تعداد توقفگاه‌ها در صف زمان‌بندی آسانسور i می‌باشد.

۲-۳- محدودیت‌های مسئله در الگوریتم پیشنهادی

محدودیت‌های مسئله، شرایطی هستند که در کنار تابع هدف قرار می‌گیرند و بیانگر محدودیت هر یک از متغیرهای مسئله است. در مسئله زمان‌بندی گروهی آسانسورها از طریق روش پیشنهادی، با سه محدودیت مواجه هستیم. در ادامه به فرموله کردن هر یک از این محدودیت‌ها خواهیم پرداخت.

تخصیص منحصر به فرد آسانسور: به هر تقاضای جابجایی فقط و فقط یک آسانسور اختصاص می‌یابد. این محدودیت، یکی از نیازمندی‌های طبیعی سیستم حمل‌ونقل بوده و نشان می‌دهد که پاسخ به تقاضای هر فرد تنها از طریق یک آسانسور برآورده می‌شود و آسانسور پاسخ‌دهنده ملزم به توقف در نقطه فراخوانی و سپس توقف در نقطه مقصد می‌باشد. با توجه به ساختار بردار پاسخ در روش پیشنهادی، این محدودیت به صورت ضمنی برآورده می‌گردد؛ چرا که در بردار پاسخ، هر درایه مختص به یک تقاضا بوده و تنها عدد موجود در هر درایه، شناسه آسانسور تخصیص‌یافته را نشان می‌دهد.

محدودیت ظرفیت آسانسور: مجموع تقاضاهای اختصاص‌یافته به یک آسانسور نباید از ظرفیت آن بیشتر باشد. هدف از اعمال این محدودیت، عملیاتی بودن یک راه‌حل کشف‌شده توسط روش پیشنهادی در شرایط واقعی می‌باشد. بر این اساس، یک آسانسور نمی‌تواند به صورت همزمان به تعداد افرادی سرویس دهد که از ظرفیت آن فراتر رود.

محدودیت زمان انتظار: زمان انتظار تخمین‌زده شده برای هر آسانسور نباید از آستانه W_i بیشتر باشد. این محدودیت در واقع یک کران بالایی برای بدترین عملکرد روش پیشنهادی را تضمین می‌کند. زمان انتظار تخمینی برای هر آسانسور بر اساس رابطه (۲) محاسبه خواهد شد و به ازای هر پاسخ ایجاد شده در الگوریتم بهینه‌سازی بررسی می‌شود که این مقدار از آستانه ثابت و از پیش‌تعیین‌شده W_i بیشتر نباشد. بدین ترتیب، با استفاده از این محدودیت می‌توان تضمین نمود که میانگین زمان انتظار افراد همواره از W_i کمتر خواهد بود.

همانطور که پیش از این اشاره شد، الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی در زمان ایجاد تقاضاهای جدید اجرا شده و راه‌حل یافته شده را به مؤلفه هماهنگ‌کننده آسانسورها تحویل می‌دهد تا زمان‌بندی حرکت آسانسور بر اساس تخصیص‌های جدید به‌روزرسانی گردد. در ادامه به تشریح این فرآیند خواهیم پرداخت. لازم به توضیح است که در این پژوهش، ظرفیت آسانسور صرفاً بر اساس تعداد افراد در نظر گرفته شده و تفاوت وزنی بین مسافران لحاظ نگردیده است. بدیهی است که در شرایط عملی، وزن مسافران می‌تواند بر مصرف انرژی، مدت زمان شتاب‌گیری و میزان استهلاک آسانسور تأثیرگذار باشد. در مطالعات آتی می‌توان وزن افراد را به عنوان متغیری تصادفی با توزیع مشخص در مدل گنجانده و اثر آن را بر معیارهای زمان‌بندی و کارایی سیستم مورد بررسی قرار داد.

۲-۴- بروزرسانی زمان‌بندی حرکت آسانسورها براساس تخصیص‌های تعیین‌شده

پس از تعیین آسانسورهای بهینه برای پاسخ‌گویی به تقاضاها توسط الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته، اطلاعات هر تقاضا به آسانسور اختصاص‌یافته به آن ارسال می‌شود. این عمل با استفاده از مؤلفه هماهنگ‌کننده آسانسور صورت می‌پذیرد. سپس، از یک الگوریتم محلی برای به‌روزرسانی جدول زمان‌بندی آسانسور استفاده می‌شود.

اگر جدول زمان‌بندی هر آسانسور مانند i را به صورت $Q_i = \{q_i^1, \dots, q_i^L\}$ نمایش دهیم که در آن q_i^j نشان‌دهنده توقفگاه j ام آسانسور i می‌باشد و این آسانسور در حال حاضر در طبقه‌ای مانند F قرار داشته باشد و همچنین شناسه طبقه‌ای که تقاضا از آن ارسال شده را به صورت r نشان دهیم، آنگاه به‌روزرسانی زمان‌بندی این آسانسور از طریق گام‌های زیر و به صورت محلی انجام خواهد پذیرفت:

الگوریتم به‌روزرسانی زمان‌بندی آسانسور:

۱. شروع

۲. اگر r در یکی از طبقات میانی بین F و q_i^1 قرار دارد ($F \le r < q_i^1$ یا $q_i^1 < r \le F$)، آنگاه r را به ابتدای لیست زمان‌بندی Q_i اضافه کن و به گام ۷ برو.

۳. در غیراین‌صورت، اگر r برابر با شناسه یکی از طبقات در Q_i باشد ($r = q_i^k$ و $q_i^k \in Q_i$) آنگاه بدون تغییر در لیست زمان‌بندی به گام ۷ برو. در غیراین‌صورت به گام ۴ برو.

$x \leftarrow 1.۴$

۵. تا زمانی که $x \leq L$ گام‌های زیر را تکرار کن:
   - اگر r در یکی از طبقات میانی بین q_i^x و q_i^{x+1} قرار دارد ($q_i^x < r < q_i^{x+1}$ در حرکت رو به بالا یا $q_i^{x+1} < r < q_i^x$ در حرکت رو به پایین) ، آنگاه بین توقفگاه q_i^x و q_i^{x+1} یک توقفگاه جدید r را اضافه کن، $L \leftarrow L + 1$ و به گام ۷ برو. در غیر این صورت، ادامه بده.
   - $x \leftarrow x + 1$

۶. r را به انتهای لیست زمان‌بندی Q_i اضافه کن.

۷.**پایان**

۳- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

در بخش قبل، در روش پیشنهادی از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته برای زمان‌بندی بهینه حرکت آسانسورها به صورت گروهی استفاده شده است. روش پیشنهادی تلاش می‌کند تا فرایند زمان‌بندی را به صورتی انجام دهد که ضمن بیشینه‌نمودن رضایت‌مندی ساکنین، میزان استهلاک و احتمال فرسودگی سیستم آسانسور را به حداقل برساند. در اینجا، کارایی روش پیشنهادی در زمان‌بندی گروهی آسانسورها از زوایای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل با کارهای مشابه پیشین مقایسه شده است. در ادامه، پس از تشریح محیط شبیه‌سازی و پارامترهای آزمایش، به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی خواهیم پرداخت.

پیاده‌سازی در محیط MATLAB نسخه R2023a و بر روی یک سیستم با پردازنده Intel Core i7-7500U، حافظه RAM برابر با ۸ GB و فضای ذخیره‌سازی SSD 1TB انجام گرفته است. در این پیاده‌سازی، از هیچ‌گونه جعبه‌ابزار یا کتابخانه جانبی استفاده نشده و تمامی بخش‌ها با توابع پایه MATLAB کدنویسی شده‌اند. این موضوع بازتولیدپذیری نتایج را در سایر محیط‌های مشابه تضمین می‌کند. در این آزمایش‌ها، یک ساختمان با ۲۰ طبقه و ۴ آسانسور در نظر گرفته شده است. هر آسانسور گنجایش حمل حداکثر ۱۰ مسافر را دارد و با سرعت و شتاب مشخص در تمامی طبقات قابل جابجایی می‌باشد. افراد با نرخ ورود P_R تقاضای جابجایی بین طبقات ساختمان را خواهند داشت. با توجه به اینکه احتمال جابجایی هر فرد در شرایط واقعی مستقل از احتمالات جابجایی سایر افراد می‌باشد، لذا در طی انجام آزمایش‌ها، توزیع جابجایی افراد بر اساس توزیع پواسون در نظر گرفته شده است. مهم‌ترین پارامترهای در نظر گرفته شده در محیط شبیه‌سازی در جدول آورده شده است. در انتخاب مقادیر پارامترهای الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه، از ترکیب دو رویکرد استفاده شده است. نخست، مقادیر اولیه بر اساس مطالعات پیشین[۲۲]. تعیین گردید که دامنه‌های پیشنهادی برای پارامترهایی نظیر اندازه جمعیت و نرخ ترک لانه را ارائه کرده‌اند. سپس، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مقدماتی در محیط شبیه‌سازی برای تنظیم تجربی این پارامترها اجرا شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که مقادیر اندازه جمعیت برابر با ۵۰، تعداد تکرار الگوریتم ۱۰۰ چرخه، و احتمال ترک لانه ۰٫۲۵ بهترین توازن را میان کیفیت پاسخ‌ها و هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند. بنابراین مقادیر نهایی مورد استفاده در این پژوهش بر اساس شواهد ادبیات و آزمون‌های تجربی تعیین گردیده است.

جدول ۱:پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
تعداد طبقات ساختمان	۲۰
تعداد آسانسور	۴
فاصله طبقات	۳٫۲ متر
سرعت آسانسور	۲٫۵ متر بر ثانیه
شتاب آسانسور	۱ متر بر مجذور ثانیه
زمان ورود و خروج هر فرد	۱ ثانیه
ظرفیت هر آسانسور	۱۰ نفر
زمان باز/بسته شدن درب	۲ ثانیه
نرخ ورود افراد	۰٫۵ نفر در ثانیه
زمان شبیه‌سازی	۱۰۰۰ ثانیه

در طی انجام آزمایش‌ها، سه سناریوی مختلف زیر برای الگوی جابجایی افراد در بین طبقات در نظر گرفته شده است:

۱. الگوی جابجایی تصادفی یکنواخت: در این حالت، هر تقاضای جابجایی بین طبقات مستقل از سایر تقاضاها بوده و هر طبقه ساختمان برای انتخاب به‌عنوان مبدأ یا مقصد جابجایی از احتمال یکسانی برخوردار خواهد بود. به بیان دیگر، توزیع احتمالی طبقات ورود و خروج هر فرد در حین جابجایی از طریق آسانسور از نوع تصادفی یکنواخت می‌باشد. این سناریو در واقع توصیف‌کننده نحوه استفاده از آسانسور در شرایط عادی است.

۲. الگوی جابجایی تصادفی غیریکنواخت: این سناریو برای توصیف شرایط خاص در جابجایی توسط آسانسور به کار رفته و شامل دو حالت الگوهای جریانی رو به بالا و رو به پایین می‌باشد:

- **الگوی جریان رو به بالا**: در این حالت، هر فرد می‌تواند تقاضای استفاده از آسانسور را در هر یک از طبقات ساختمان داشته باشد، اما مقصد حداقل ۸۰ درصد از جابجایی‌ها، آخرین طبقه ساختمان خواهد بود. بدین ترتیب، توزیع احتمال ورود فرد به آسانسور برای هر یک از طبقات از نوع تصادفی یکنواخت بوده و توزیع احتمال خروج او از نوع تصادفی غیریکنواخت می‌باشد. این سناریو

در دنیای واقعی در شرایطی مانند لحظات قبل از شروع جلسات رخ می‌دهد.

- **الگوی جریان رو به پایین:** در این حالت، حداقل ۸۰ درصد از افراد از یکی از طبقات بالایی ساختمان وارد آسانسور شده و پایین‌ترین طبقه را به عنوان مقصد خود انتخاب می‌کنند. در این حالت، توزیع احتمال ورود فرد به آسانسور از نوع تصادفی یکنواخت و توزیع احتمال خروج او از نوع تصادفی غیریکنواخت می‌باشد. در دنیای واقعی، این سناریو در شرایطی مانند لحظات پایانی ساعات کاری یک سازمان رخ می‌دهد.

۳. تغییرات در تعداد طبقات و آسانسورها: در این سناریو، هدف بررسی کارایی روش پیشنهادی در پیکربندی‌ها و کاربردهای مختلف می‌باشد. بدین منظور، حالات مختلف برای محیط شبیه‌سازی از طریق تغییرات تعداد طبقات و همچنین تعداد آسانسورهای موجود برای جابجایی افراد مورد بررسی قرار خواهند داد.

در هر یک از سناریوهای فوق، کارایی روش پیشنهادی از جنبه‌هایی مانند زمان انتظار مسافرین، زمان حمل توسط آسانسور، زمان کل دستیابی به مقصد و تعداد مسافرین در حال انتظار مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل برای روش پیشنهادی با الگوریتم زمان‌بندی مبتنی بر بهینه‌سازی PSO در [۲۴] و الگوریتم زمان‌بندی مبتنی بر بهینه‌سازی GA در [۲۵]. مقایسه شده است. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده حاصل ۱۰ بار تکرار آزمایش بوده و میانگین نتایج ارائه شده است.

پارامترهای به کار رفته در الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته چندهدفه به صورت زیر می‌باشد:

اندازه جمعیت: ۵۰ فاخته

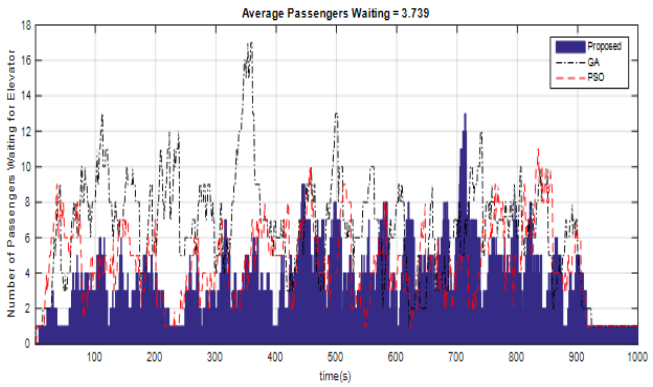
تعداد تکرار الگوریتم بهینه‌سازی: ۱۰۰ چرخه

احتمال ترک لانه: ۰٫۲۵

همچنین در زمان‌بندی مبتنی بر الگوریتم‌های PSO و GA، پارامترهای اندازه جمعیت و تعداد تکرار الگوریتم بهینه‌سازی مشابه مقادیر تعیین شده برای روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، نوع ترکیب به کار رفته در الگوریتم ژنتیک، دونقطه‌ای با نرخ ۰٫۸ بوده و احتمال جهش برابر با ۰٫۰۵ تعیین شده است. در ادامه، به ارائه نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر اساس سناریوهای تشریح شده خواهیم پرداخت.

۳-۱- کارایی روش پیشنهادی در جابجایی افراد با الگوی تصادفی یکنواخت

در این آزمایش، مجموعه‌ای از افراد با نرخ ورود ۰٫۵ تقاضای جابجایی بین طبقات را داشته و توزیع طبقات مبدأ و مقصد به صورت تصادفی یکنواخت در نظر گرفته شده است. مدت زمان شبیه‌سازی برابر با ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین، سایر پارامترهای شبیه‌سازی بر اساس جدول ۱ تنظیم شده است. نرخ ورود ۰٫۵ به این معناست که به‌صورت میانگین در هر ۲ ثانیه، یک تقاضای جابجایی جدید در طبقات ساختمان ایجاد می‌شود. با در نظر داشتن زمان ورود و خروج مسافرین و همچنین تأخیر ناشی از باز و بسته شدن درب‌های آسانسور، طبیعی است که پس از گذشت زمانی مشخص، تعداد افراد در حال انتظار برای ورود به آسانسور افزایش خواهد یافت. این شرایط در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل، تعداد افراد منتظر ورود به آسانسور در طی مدت زمان شبیه‌سازی نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است، در حالت استفاده از روش پیشنهادی برای زمان‌بندی گروهی آسانسورها، در اغلب مقاطع زمانی، تعداد افراد منتظر ورود به آسانسور کمتر از حالات مقایسه‌شده می‌باشد. نتایج آزمون نشان می‌دهد که با استفاده از روش پیشنهادی، میانگین تعداد افراد در حال انتظار برابر با ۳٫۷۳۹ می‌باشد؛ در حالی که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات و ژنتیک برای زمان‌بندی گروهی آسانسورها به ترتیب مقادیر ۴٫۳۹ و ۶٫۳۱ را در پی خواهد داشت. این کاهش در تعداد افراد در حال انتظار را می‌توان نتیجه کارایی بالاتر الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی نسبت به روش‌های مقایسه‌شده دانست؛ چرا که طول صف درخواست، به‌عنوان یکی از اهداف مدل بهینه‌سازی چندهدفه در روش پیشنهادی توصیف شده و در نتیجه، روش پیشنهادی تلاش می‌کند تا زمان‌بندی آسانسورها را به‌صورتی انجام دهد که کمترین تعداد

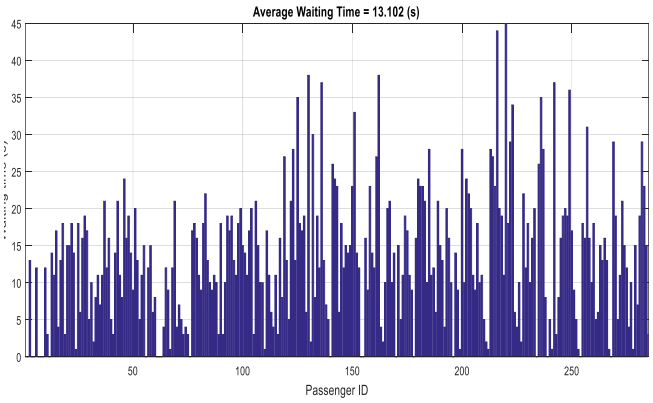


شکل ۲: زمان انتظار برای ورود به آسانسور به تفکیک هر فرد در محیط شبیه‌سازی

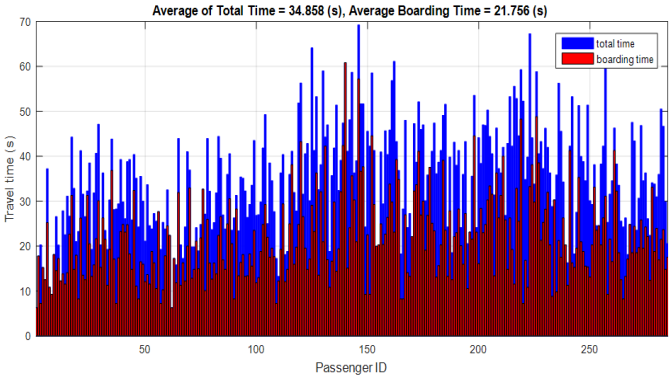
افراد در حال انتظار را در پی داشته باشد. کاهش زمان انتظار برای ورود به آسانسور، یکی از اصلی‌ترین معیارها برای حفظ رضایتمندی ساکنین یک ساختمان در استفاده از آسانسور می‌باشد. این معیار در شرایط وقوع حادثه (ترک اضطراری ساختمان) یا محیط‌های اورژانسی مانند بیمارستان‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود.

در شکل ۳، زمان انتظار هر فرد برای ورود به آسانسور در طی شبیه‌سازی نمایش داده شده است. معیار زمان انتظار به بازه‌ی زمانی از لحظه ورود فرد (فشردن دکمه فراخوانی آسانسور) تا لحظه ورود او به داخل کابین اشاره دارد. این نتایج نشان می‌دهد که زمان انتظار افراد در شرایط استفاده از روش پیشنهادی به‌صورت میانگین برابر با ۱۳٫۱ ثانیه می‌باشد. این در شرایطی است که اگر از الگوریتم‌های PSO و GA برای زمان‌بندی گروهی آسانسورها استفاده شود، میانگین زمان انتظار به ترتیب برابر با ۱۸ و ۱۹ ثانیه خواهد بود. در نظر گرفتن معیار زمان انتظار به‌عنوان یکی از اهداف بهینه‌سازی در روش پیشنهادی موجب شده است که بتوان میانگین زمان انتظار مسافرین را به‌صورت مؤثری کاهش داد. نتایج ارائه‌شده در شکل ۳ نشان می‌دهد که بیشترین زمان انتظار در حالت استفاده از روش پیشنهادی برابر با ۴۴٫۸۲ ثانیه می‌باشد که در لحظات اوج ترافیک تقاضا رخ می‌دهد. این در حالی است که بیشترین زمان انتظار در حالات استفاده از الگوریتم‌های PSO و GA به ترتیب برابر با ۵۳٫۱۹ و ۶۷٫۳۵ ثانیه می‌باشد. این نتایج تأیید می‌کند که روش پیشنهادی می‌تواند کارایی سیستم حمل افراد در ساختمان را در شرایط اوج تقاضا بهبود بخشد.

در شکل ۴، نمودار زمان کل و زمان حمل افراد در شرایط استفاده از روش پیشنهادی نمایش داده شده است. در این نمودار، زمان کل به بازه زمانی از لحظه ورود فرد (فشردن دکمه فراخوانی آسانسور) تا لحظه خروج او از آسانسور در طبقه مقصد اشاره دارد. همچنین، معیار زمان حمل فرد مشخص‌کننده بازه زمانی است که او در کابین



شکل ۳: زمان انتظار برای ورود به آسانسور به تفکیک هر فرد در محیط شبیه‌سازی



شکل ۴: نمودار زمان کل و زمان حمل افراد به تفکیک هر فرد در الگوی جابجایی تصادفی یکنواخت

آسانسور برای رسیدن به مقصد سپری می‌کند. طبیعی است که کاهش این معیارها از اهداف اصلی الگوریتم‌های زمان‌بندی خواهد بود. نتایج ارائه‌شده در این شکل نشان می‌دهد که در شرایط استفاده از روش پیشنهادی، میانگین زمان کل برابر با ۳۴٫۸۶ ثانیه و میانگین زمان حمل افراد برابر با ۲۱٫۷۶ ثانیه خواهد بود. بدین ترتیب، روش پیشنهادی می‌تواند میانگین زمان کل را نسبت به الگوریتم‌های PSO و GA به ترتیب به میزان ۳٫۹۲ و ۱۰٫۴۶ ثانیه کاهش دهد. همچنین، میزان کاهش میانگین زمان حمل افراد در روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های PSO و GA به ترتیب برابر با ۶٫۷۳ و ۱۸٫۷۲ ثانیه می‌باشد.

مقادیر عددی حاصل از آزمایش‌ها صورت گرفته در این بخش، در جدول با واحد ثانیه نمایش داده شده است. برای ارتقای جامعیت مقایسه، علاوه بر GA و PSO کلاسیک، دو الگوریتم فرابتکاری مدرن شامل الگوریتم بهینه‌سازی شاهین‌های هریس (HHO[۷]) [۲۶]. و الگوریتم کپک لجن (SMA[۸]) [۲۷]. به آزمایش‌ها افزوده شدند. HHO از رفتار شکار گروهی شاهین‌های هریس الهام گرفته و در سال ۲۰۱۹ معرفی شد، در حالی که SMA در سال ۲۰۲۰ بر پایه رفتار جستجوی کپک‌های لجن توسعه یافت و تعادل بالایی میان اکتشاف و بهره‌برداری برقرار می‌کند. برای اطمینان از برابری شرایط، اندازه جمعیت، تعداد تکرار، و سازوکار رتبه‌بندی پارتو در همه روش‌ها یکسان در نظر گرفته شد. نتایج جدول بیانگر برتری قابل‌توجه الگوریتم پیشنهادی در برابر دو روش مدرن HHO و SMA است. میانگین زمان انتظار پیشنهادی به‌ترتیب ۱۲٪ و ۱۵٪ کمتر از HHO و SMA است، در حالی که در شاخص‌های تعداد افراد انتظار، زمان حمل و زمان کل نیز عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. افزون بر این، SMA در شاخص زمان حمل نسبت به PSO عملکرد بهتری دارد، اما در مجموع پیشنهادی همچنان در تمامی اهداف چندگانه

نتایج برتر و پایدارتری را نشان می‌دهد ($p < ۰,۰۱$). این یافته‌ها پایداری و اثربخشی الگوریتم پیشنهادی را در مقایسه با نسل جدید فراابتکاری‌ها تأیید می‌کند.

نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند زمان‌بندی گروهی آسانسورها در شرایط نرمال را به شیوه‌ای کارآمد انجام دهد. در سناریوی بعدی، به بررسی کارایی روش پیشنهادی در شرایط خاص، یعنی جریان‌های رو به بالا و رو به پایین خواهیم پرداخت.

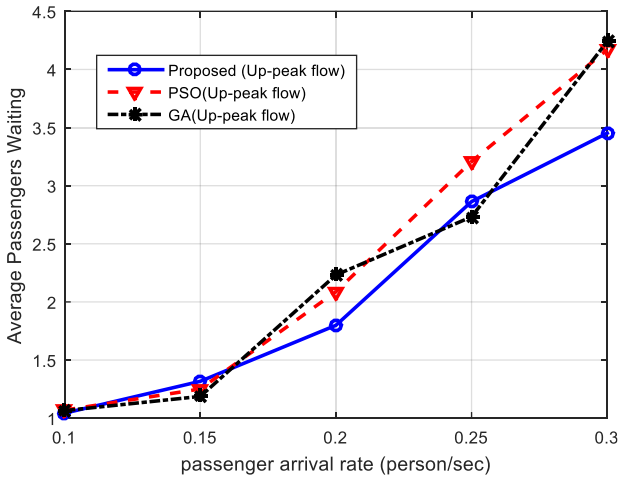
جدول ۲: مقادیر عددی حاصل از آزمایش عملکرد روش پیشنهادی در سناریوی الگوی جابجایی تصادفی یکنواخت

	پیشنهادی	SMA [۲۷]	HHO [۲۶]	PSO [۹]	GA [۷]
تعداد افراد انتظار	۳,۷	۴,۲	۴,۳	۴,۳	۶,۳
زمان انتظار	۱۳,۱	۱۴,۹	۱۵,۴	۱۵,۹	۲۱,۳
زمان حمل	۳۴,۸	۴۲	۴۰,۸	۴۱,۵	۵۳,۵
زمان کل	۲۱,۷	۲۴,۷	۲۵,۵	۲۵,۶	۳۲,۳

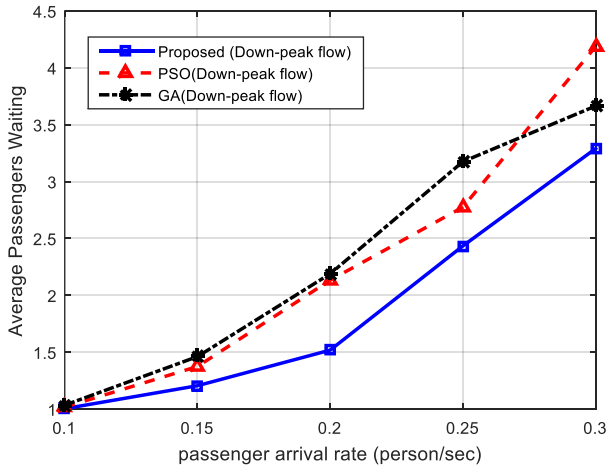
۳-۲- کارایی روش پیشنهادی در جابجایی افراد با الگوی تصادفی غیر یکنواخت

یک الگوریتم زمان‌بندی کارآمد برای آسانسورهای گروهی باید بتواند در الگوهای جابجایی خاص نیز به درستی عمل نموده و افراد را به شیوه‌ای بهینه و در کمترین زمان ممکن بین طبقات جابجا نماید. الگوهای جابجایی با جریان رو به بالا و جریان رو به پایین نمونه‌هایی از این حالات می‌باشند که در سناریوهای دنیای واقعی ممکن است به دفعات اتفاق بیفتند و به همین دلیل در تحقیقات مختلفی نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در اینجا، به بررسی کارایی روش پیشنهادی در زمان‌بندی حرکت آسانسورها برای جابجایی افراد براساس الگوی تصادفی غیریکنواخت خواهیم پرداخت. بدین منظور دو سناریوی حرکتی جریان رو به بالا و جریان رو به پایین مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در طی اجرای شبیه‌سازی، عملکرد روش پیشنهادی به ازای تغییرات نرخ تقاضا (نرخ ورود افراد) مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور پارامتر نرخ تقاضا در بازه ۰٫۱ تا ۰٫۳ تغییر داده شده و معیارهای زمان انتظار مسافرین، زمان حمل توسط آسانسور، زمان کل دستیابی به مقصد و تعداد مسافرین در حال انتظار مورد مطالعه قرار گرفته است. زمان شبیه‌سازی در این آزمایش‌ها نیز برابر با ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده و سایر پارامترهای شبیه‌سازی بر اساس جدول ۱ تعیین شده است.

در شکل‌های ۵ و ۶، نمودار میانگین تعداد افراد در حال انتظار به ازای تغییرات نرخ تقاضا در دو حالت جریان رو به بالا و جریان رو به پایین نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای نمایش داده شده در این شکل مشخص است، با افزایش نرخ تقاضا، تعداد افراد در حال انتظار برای آسانسور نیز افزایش می‌یابد. چرا که با افزایش نرخ ورود افراد، طول صف تقاضای آسانسور نیز افزایش یافته و در نتیجه مدت زمان بیشتری برای سرویس‌دهی به افراد نیاز خواهد بود که نتیجه آن سیر صعودی نمودارهای نمایش داده شده در شکل‌های ۵ و ۶ می‌باشد. اما با این وجود، روش پیشنهادی با در نظر گرفتن تعداد افراد در حال انتظار به‌عنوان یکی از اهداف بهینه‌سازی خود، می‌تواند در شرایط افزایش نرخ تقاضا به خوبی عمل نموده و به همین دلیل میانگین تعداد افراد در حال انتظار در روش پیشنهادی نسبت به دو روش مقایسه‌شده کمتر می‌باشد و این اختلاف با افزایش نرخ تقاضا نیز بیشتر می‌شود.

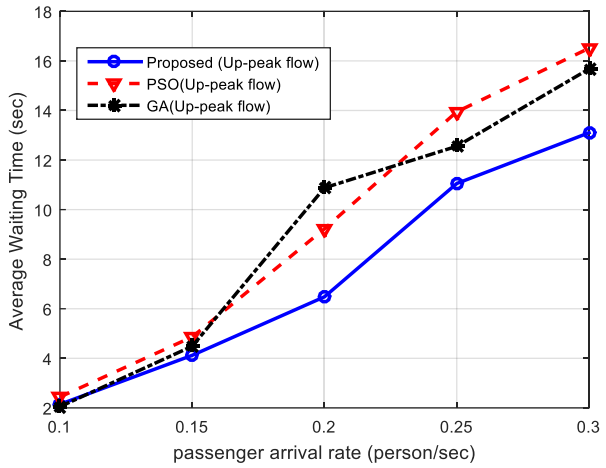


شکل ۵: میانگین تعداد افراد در حال انتظار در شرایط تغییرات نرخ تقاضا جریان روبه‌بالا

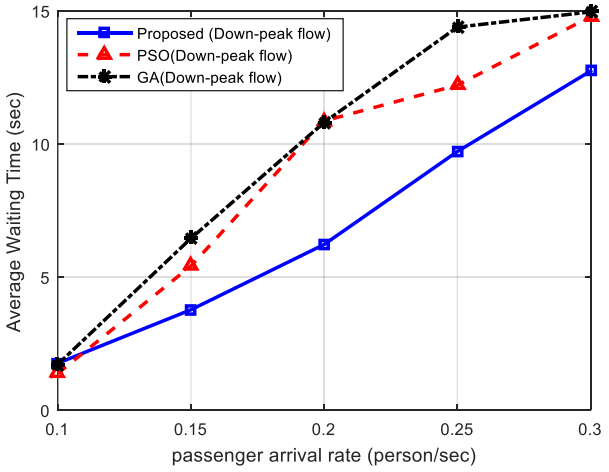


شکل ۶: میانگین تعداد افراد در حال انتظار در شرایط تغییرات نرخ تقاضا جریان رو به پایین

در شکل‌های ۷ و ۸، نمودار میانگین زمان انتظار افراد به ازای تغییرات نرخ تقاضا در دو حالت جریان رو به بالا و جریان رو به پایین نمایش داده شده است. طبیعی است که با افزایش نرخ تقاضا، میانگین زمان انتظار افراد نیز افزایش خواهد یافت. زیرا همان‌طور که اشاره شد، با افزایش نرخ تقاضا، طول ثبت زمان‌بندی هر آسانسور افزایش یافته و در نتیجه هر فرد مدت زمان بیشتری را در انتظار ورود به آسانسور سپری خواهد کرد. اما با این وجود، روش پیشنهادی می‌تواند با در نظر گرفتن معیار زمان انتظار به‌عنوان یکی از اهداف بهینه‌سازی خود، زمان‌بندی گروهی آسانسورها را به صورتی انجام دهد که میانگین زمان انتظار نسبت به روش‌های مقایسه‌شده کاهش یابد. بر اساس این نتایج، بیشترین زمان انتظار افراد در حالت استفاده از روش پیشنهادی کمتر از ۱۳ ثانیه می‌باشد که در مقایسه با الگوریتم‌های PSO و GA دارای کاهش حداقل ۱۲ درصدی می‌باشد.

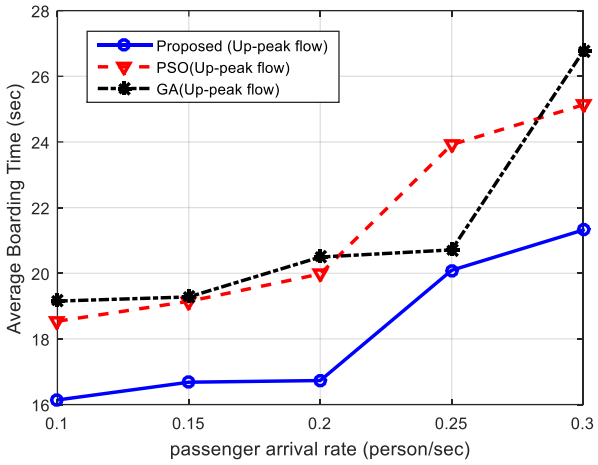


شکل ۷: میانگین زمان انتظار در شرایط تغییرات نرخ تقاضا جریان روبه بالا

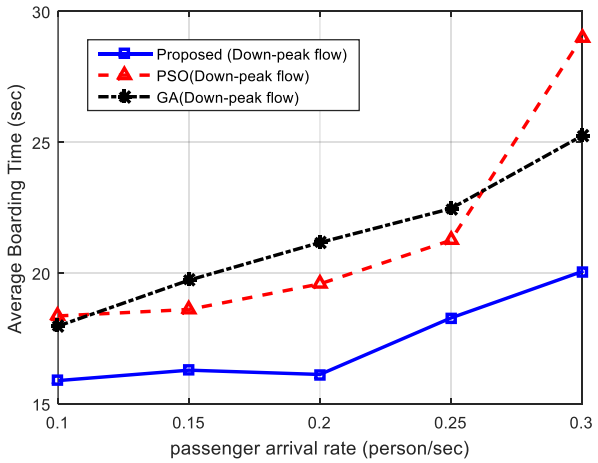


شکل ۸: میانگین زمان انتظار در شرایط تغییرات نرخ تقاضا جریان رو به پایین

نمودارهای میانگین زمان حمل و میانگین زمان دستیابی به مقصد در شرایط تغییرات نرخ تقاضا برای دو حالت جریان رو به بالا و جریان رو به پایین در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است.

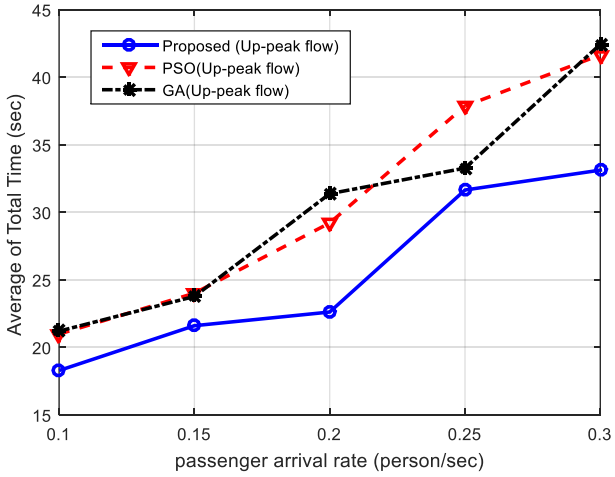


شکل ۹ میانگین زمان حمل در شرایط تغییرات نرخ تقاضا جریان روبه‌بالا

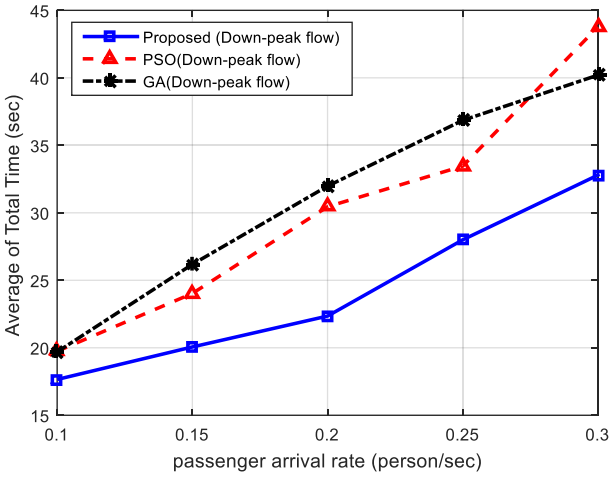


شکل ۱۰: میانگین زمان حمل در شرایط تغییرات نرخ تقاضا جریان رو به پایین

نتایج نمایش داده شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تأیید می‌کند که روش پیشنهادی یک راهکار کارآمد برای زمان‌بندی گروه آسانسورها برای جابجایی افراد می‌باشد؛ به‌طوری که از طریق آن می‌توان افراد را در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به الگوریتم‌های مقایسه‌شده به مقصد رساند.



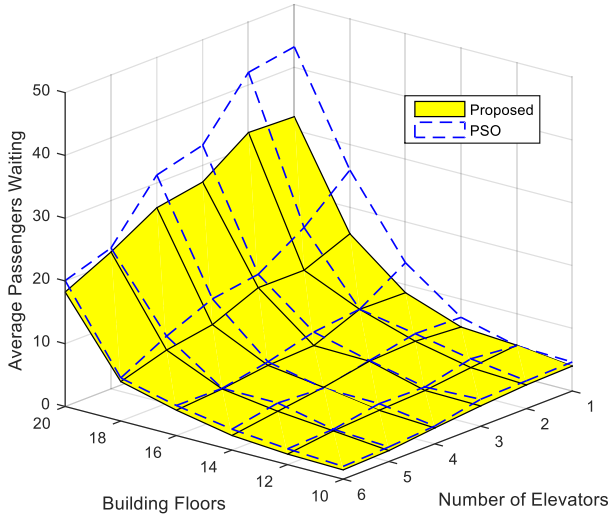
شکل ۱۱: میانگین زمان دستیابی به مقصد در شرایط تغییرات نرخ تقاضا جریان روبه‌بالا



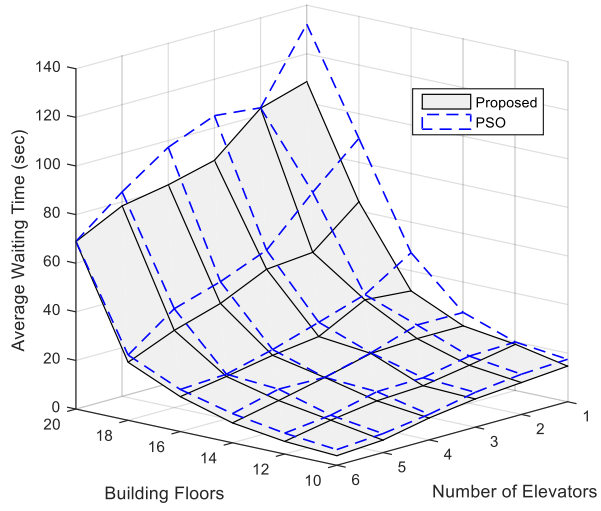
شکل ۱۲: میانگین زمان دستیابی به مقصد در شرایط تغییرات نرخ تقاضا جریان رو به پایین

۳-۳- بررسی تغییرات تعداد طبقات و تعداد آسانسورها بر عملکرد روش پیشنهادی

یک الگوریتم زمان‌بندی گروهی آسانسور باید بتواند عملکرد صحیح خود را در پیکربندی‌ها و کاربردهای مختلف حفظ نماید. منظور از پیکربندی‌ها و کاربردهای مختلف، تعداد طبقات ساختمان، الگوهای جابجایی افراد و همچنین تعداد خطوط آسانسور در دسترس برای جابجایی افراد می‌باشد. بدین منظور، در این سناریو حالات مختلف برای محیط شبیه‌سازی را از طریق تغییرات تعداد طبقات و همچنین تعداد آسانسورهای موجود برای جابجایی افراد مورد بررسی قرار خواهیم داد. در این آزمایش، تعداد طبقات ساختمان مورد آزمایش در بازه ۱۰ تا ۲۰ تغییر داده شده و به ازای هرکدام از این حالات، تعداد خطوط آسانسور در دسترس برای جابجایی افراد نیز در بازه ۱ تا ۶ تغییر داده می‌شود. نرخ تقاضا ثابت و برابر با ۰٫۵ در نظر گرفته شده است. همچنین زمان شبیه‌سازی به ازای هر پیکربندی برابر با ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در طی هر بار اجرای شبیه‌سازی، ۵۰ درصد جابجایی‌ها از الگوی تصادفی یکنواخت تبعیت می‌کنند؛ در حالی‌که ۲۵ درصد دارای الگوی غیریکنواخت با جریان رو به بالا و ۲۵ درصد باقیمانده نیز دارای الگوی غیریکنواخت با جریان رو به پایین می‌باشند. نتایج حاصل جهت بررسی تغییرات تعداد طبقات و تعداد آسانسورها بر عملکرد روش پیشنهادی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمایش داده شده است.



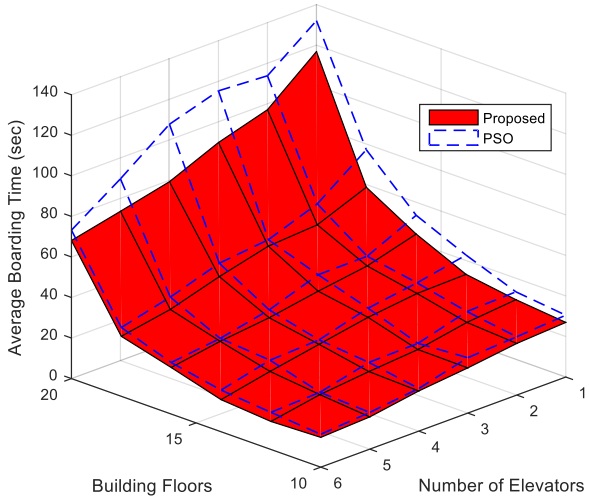
شکل ۱۳: میانگین افراد درحال انتظار



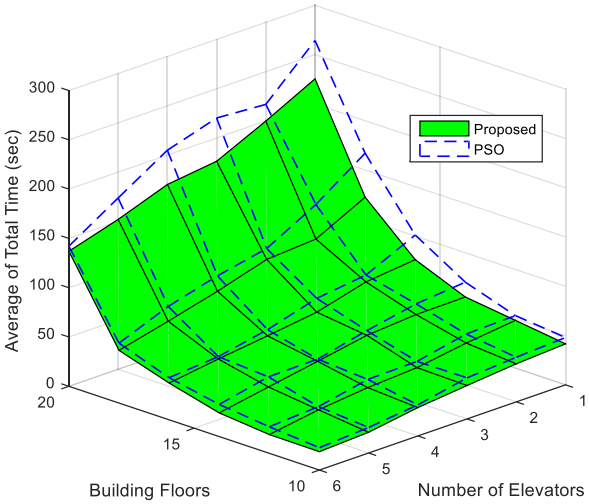
شکل ۱۴: میانگین افراد درحال انتظار

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶، عملکرد روش پیشنهادی با الگوریتم PSO (که دارای عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم GA می‌باشد) مقایسه شده است. نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد طبقات و یا کاهش تعداد خطوط آسانسور، معیارهای

مرتبط با زمان (زمان انتظار، حمل و دستیابی به مقصد) و همچنین تعداد افراد در حال انتظار افزایش خواهد یافت. این افزایش در بُعد تعداد طبقات ساختمان بیشتر بوده و دارای فرمی نمایی است. با این وجود، روش پیشنهادی در تمامی حالات از عملکرد بهتری نسبت به روش مقایسه‌شده برخوردار بوده و براساس آزمایش‌ها صورت‌گرفته، قادر به جابجایی افراد به شیوه‌ای بهینه‌تر خواهد بود. این بهبود در روش پیشنهادی را می‌توان به استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه در روش پیشنهادی نسبت داد. براساس نتایج حاصل، روش پیشنهادی یک راهکار کارآمد در زمان‌بندی گروهی آسانسورها بوده و می‌تواند عملکرد مناسب خود را در پیکربندی‌ها و کاربردهای مختلف حفظ نماید.



شکل ۱۵: میانگین زمان حمل



شکل ۱۶: میانگین زمان دستیابی به مقصد

به منظور اعتبارسنجی صحت عملکرد روش پیشنهادی، یک آزمایش تکمیلی در مقیاس کوچک انجام شد. در این آزمایش، مسأله زمان‌بندی گروهی آسانسور برای یک ساختمان ۵ طبقه با ۲ آسانسور مدل‌سازی گردید. این مسأله با استفاده از روش دقیق برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در نرم‌افزار GAMS/CPLEX حل شد. سپس همان مسأله توسط الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته اجرا گردید. مقایسه نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی قادر است جواب‌هایی بسیار نزدیک به جواب بهینه (با میانگین اختلاف کمتر از ۳ درصد) تولید کند. این در حالی است که زمان محاسبه در روش دقیق به مراتب بیشتر از زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی علاوه بر توانایی حل مسائل بزرگ، در مسائل کوچک نیز عملکردی معتبر و نزدیک به روش‌های دقیق دارد.

۴-۳- تحلیل سازوکارهای بهبود عملکرد

در این‌جا، دلایل بنیادیِ بهبود عملکرد مدل تبیین می‌شود. هدف اصلی آن است که نشان داده شود چرا انتخاب اهداف بهینه‌سازی موجب ارتقای شاخص‌های خدمت‌رسانی، به‌ویژه کاهش زمان انتظار، شده است. در چارچوب نظریه صف، زمان انتظار به میانگین و واریانس زمان خدمت و همچنین به ضریب بهره‌برداری سیستم بستگی دارد. هنگامی که مسافت حرکتی آسانسورها و پراکندگی توقف‌ها کاهش یابد، میانگین و پراکندگی زمان خدمت نیز کمتر می‌شود و با متعادل‌سازی اشغال کابین‌ها، فشار بار از نقاط پرترافیک برداشته شده و قله‌های ضریب بهره‌برداری کنترل می‌گردد. بدین‌ترتیب، سه هدف اصلی مدل—یعنی کاهش طول برنامه توقف‌ها، کاهش مسافت مؤثر حرکت و تنظیم انحراف اشغال از ظرفیت—به‌صورت هم‌افزا موجب کاهش میانگین و پراکندگی زمان انتظار می‌شوند.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد الگوریتم به‌طور خودکار الگوهایی را ایجاد می‌کند که کارایی سیستم را بالا می‌برند. توقف‌ها به‌صورت خوشه‌ای در طبقات مجاور گروه‌بندی می‌شوند و زمان‌های باز و بسته شدن درب‌ها و سوار و پیاده شدن مسافران متمرکز می‌گردد. از سوی دیگر، بازگشت‌های غیرضروری و حرکت‌های زیگزاگی آسانسورها به حداقل می‌رسد و محدوده طبقات میان کابین‌ها به شکل ضمنی تقسیم می‌شود. این رفتارها در عمل منجر به کاهش نسبت توقف به مسافر و یکنواخت‌تر شدن توزیع زمان انتظار می‌شود.

ویژگی چندهدفه بودن الگوریتم نیز نقشی کلیدی در جلوگیری از گرفتار شدن در کمینه‌های محلی دارد. رویکرد پارتو با حفظ تنوع در فضای پاسخ، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های متعادل را ارائه می‌دهد

که هرکدام الگوی متفاوتی برای کاهش زمان خدمت یا پراکندگی آن دارند. انتخاب نهایی از میان این مجموعه، بهبود پایدارتری نسبت به روش‌های تک‌هدفه ایجاد می‌کند که معمولاً به‌دلیل وزن‌دهی ثابت به یک تابع هزینه، بخشی از فضای جست‌وجو را نادیده می‌گیرند. تحلیل داده‌های خروجی نیز این روند علّی را تأیید می‌کند. میان مسافت طی‌شده و زمان انتظار هم‌بستگی منفی معنادار مشاهده شده و در نرخ‌های ورود بالاتر، اختلاف عملکرد روش پیشنهادی با سایر روش‌ها در صدک‌های بالایی زمان انتظار افزایش یافته است. همچنین، در تحلیل نقش مؤلفه‌ها، حذف هر یک از اهداف به‌طور میانگین ۹ تا ۱۴ درصد زمان انتظار را افزایش داده و حذف تنوع پارتو موجب نوسانات قابل‌توجه در دُم توزیع انتظار شده است. به‌طور کلی، بهبود حاصل‌شده نتیجه مستقیم کاهش زمان خدمت مؤثر، تعادل بار بین کابین‌ها و جست‌وجوی هم‌زمان چند هدف در قالب بهینه‌سازی پارتو است، نه صرفاً یک بهبود عددی یا تجربی.

۴- نتیجه‌گیری

در روش پیشنهادی، از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته به منظور حل مسئله زمان‌بندی گروهی آسانسورها استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا مسئله مذکور مدل‌سازی شده و اهداف بهینه‌سازی در آن مشخص شده است. سپس یک سازوکار سریع و با بار محاسباتی کم برای زمان‌بندی گروهی آسانسورها ارائه شده است. روش پیشنهادی، معیارهای طول صف انتظار، زمان انتظار، مسافت طی شده توسط آسانسور و نسبت تعداد توقف به تعداد مسافر را به عنوان اهداف بهینه‌سازی در نظر می‌گیرد. الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی تنها در زمان ایجاد تقاضاهای جدید اجرا شده و وظیفه آن، تخصیص آسانسور بهینه به هر تقاضای جدید می‌باشد. این الگوریتم تلاش می‌کند تا فرآیند تخصیص را به صورتی انجام دهد که ضمن رعایت محدودیت‌های مسئله (در نظر گرفتن ظرفیت آسانسور و حد بالایی زمان انتظار)، اهداف بهینه‌سازی ذکر شده را کمینه نماید. پس از تخصیص آسانسور بهینه به هر تقاضای جدید توسط الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته، از یک الگوریتم محلی برای به‌روزرسانی جدول زمان‌بندی آسانسور تخصیص‌یافته استفاده می‌شود. استفاده از این سازوکار موجب می‌شود تا ضمن حفظ هماهنگی سیستم آسانسورهای گروهی، پیچیدگی مسئله بهینه‌سازی کاهش یافته و پاسخ بهینه در یک بازه زمانی قابل قبول کشف گردد.

مراجع

[1] N. Zrnić, A. Dragović, N. Kosanić, and V. Milovanović, "Development and state-of-the-art in green elevators technologies: A survey," *Engineering Today*, vol. 2, no. 3, Sep. 2023, doi: 10.5937/engtoday2300009Z.

[2] M. Hanif and N. Mohammad, "Metaheuristic algorithms for elevator group control system: a holistic review," Soft Computing, vol. 27, pp. 15905–15936, 2023, doi: 10.1007/s00500-023-08843-0.

[3] F. Zheng, H. Yao, R. Liang and M. Tu, "Research on Elevator Group Control Algorithms," *2024 6th International Conference on Internet of Things, Automation and Artificial Intelligence (IoTAAI)*, Guangzhou, China, 2024, pp. 563-567, doi: 10.1109/IoTAAI62601.2024.10692730.

[4] P. Cortés, J. Muñuzuri, A. Vázquez-Ledesma, and L. Onieva, "Double deck elevator group control systems using evolutionary algorithms: Interfloor and lunchpeak traffic analysis," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 155, 107190, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107190.

[5] J. R. Fernandez and P. Cortes, "A Survey of Elevator Group Control Systems for Vertical Transportation: A Look at Recent Literature," IEEE Control Systems Magazine, vol. 35, no. 4, pp. 38–55, Aug. 2015, doi: 10.1109/MCS.2015.2427045.

[6] J. Olaizola, U. Izagirre, O. Serradilla, E. Zugasti, M. Mendicute, and J. I. Aizpurua, "An interpretable operational state classification framework for elevators through convolutional neural networks," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 40, no. 17, pp. 2464–2479, 2025, doi: 10.1111/mice.13479.

[7] J. Sorsa, "A real-time genetic algorithm for the bilevel double-deck elevator dispatching problem," *EURO Journal on Computational Optimization*, 2017.

[8] F. Luo, X. Zhao, and Y. Xu, "A new hybrid elevator group control system scheduling strategy based on Particle Swarm Simulated Annealing Optimization algorithm," *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Jinan, China, 2010, pp. 5121–5124, doi: 10.1109/WCICA.2010.5554939.

[9] Z. Li, H. Z. Tan, and Y. Zhang, "Particle swarm optimization applied to vertical traffic scheduling in buildings," in *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, B. Apolloni, R. J. Howlett, and L. Jain, Eds.*, vol. 4692, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, pp. 613–620, doi: 10.1007/978-3-540-74819-9_102.

[10] W. Liu, N. Liu, H. Sun, G. Xing, Y. Dong, and H. Chen, "Dispatching algorithm design for elevator group control system with Q-learning based on a recurrent neural network," 2013 *25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Guiyang, China, 2013, pp. 3397–3402, doi: 10.1109/CCDC.2013.6561535.

[11] B. Bolat and P. Cortés, "Genetic and tabu search approaches for optimizing the hall call—Car allocation problem in elevator group systems," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 1792–1800, 2011, doi: 10.1016/j.asoc.2010.05.023.

[12] J. Liu and Y. Liu, "Ant Colony Algorithm and Fuzzy Neural Network-based Intelligent Dispatching Algorithm of An Elevator Group Control System," 2007 *IEEE International Conference on Control and Automation*, Guangzhou, China, 2007, pp. 2306–2310, doi: 10.1109/ICCA.2007.4376773.

[13] M. D. Sale and V. Chandra Prakash, "Dynamic scheduling of elevators with reduced waiting time of passengers in elevator group control system: Fuzzy system approach," in *Innovations in Computer Science and Engineering*, H. Saini, R. Sayal, and S. Rawat, Eds., vol. 8, Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Singapore, 2017, doi: 10.1007/978-981-10-3818-1_37.

[14] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, "A review on genetic algorithm: past, present, and future," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, pp. 8091–8126, 2021, doi: 10.1007/s11042-020-10139-6.

[15] O. I. Abiodun, A. Jantan, A. E. Omolara, K. V. Dada, N. A. Mohamed, and H. Arshad, "State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey," *Heliyon*, vol. 4, no. 11, 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00938.

[16] T. Tyni and J. Ylinen, "Evolutionary bi-objective controlled elevator group regulates passenger service level and minimises energy consumption," in *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII*, X. Yao, et al., Eds., vol. 3242, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, doi: 10.1007/978-3-540-30217-9_83.

[17] C. B. Kim, K. A. Seong, H. Lee-Kwang, and J. O. Kim, "Design and implementation of a fuzzy elevator group control system," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 28, no. 3, pp. 277–287, May 1998, doi: 10.1109/3468.668960.

[18] B. Gu and H. Liu, "An Optimal Stopping Model for Elevator Group Control Network Based on Fuzzy Mathematics Algorithm," 2024 *7th International Conference on Computer Information Science and Application Technology (CISAT)*, Hangzhou, China, 2024, pp. 571–574, doi: 10.1109/CISAT62382.2024.10695356.

[19] H. Wang et al.,"Smart dispatching and optimal elevator group control through real-time occupancy-aware deep learning of usage patterns," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 48, 101286, 2021, doi: 10.1016/j.aei.2021.101286.

[20] C. A. Coello Coello, "Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 28–36, Feb. 2006, doi: 10.1109/MCI.2006.1597059.

[21] K. Deb, *Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: an introduction*, Springer, 2011.

[22] M. Zhang, H. Wang, Z. Cui, et al., "Hybrid multi-objective cuckoo search with dynamical local search," *Memetic Computing*, vol. 10, pp. 199–208, 2018, doi: 10.1007/s12293-017-0237-2.

[23] J. Wan, K. Lee, and H. Shin, "Traffic pattern-aware elevator dispatching via deep reinforcement learning," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 61, 102497, 2024, doi: 10.1016/j.aei.2024.102497.

[24] Z. Li, "PSO-based real-time scheduling for elevator group supervisory control system," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 16, no. 1, pp. 111–121, 2010, doi: 10.1080/10798587.2010.10643068.

[25] E. O. Tartan, H. Erdem, and A. Berkol, "Optimization of waiting and journey time in group elevator system using genetic algorithm," *2014 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, Alberobello, Italy, 2014, pp. 361–367, doi: 10.1109/INISTA.2014.6873645.

[26] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 849–872, 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.02.028.

[27] S. Li, H. Chen, M. Wang, A. A. Heidari, and S. Mirjalili, "Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization," *Future Generation Computer Systems*, vol. 111, pp. 300–323, 2020, doi: 10.1016/j.future.2020.03.055.

پاورقی‌ها:

[1] Elevator group control system
[2] genetic algorithm
[3] simulated annealing
[4] Particle swarm
[5] Pareto Front
[6] Max Generation
[7] Harris Hawks Optimization
[8] Slime Mould Algorithm