

کاربرد شبیه‌سازی رویدادهای گسسته در بهینه‌سازی عملیات کشتیرانی، بندری و حمل‌ونقل دریایی

مقاله علمی-پژوهشی

*سیده معصومه صدافی (نویسنده مسئول)، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

مونا مقدم، کارشناس پژوهشی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: S.Sadaghi@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۱ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۱۸۴-۱۷۳

چکیده

با توجه به نقش حیاتی بنادر در زنجیره تأمین جهانی و رشد روزافزون حجم تجارت دریایی، بهینه‌سازی عملیات بندری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از ابزارهای مؤثر برای تحلیل و ارتقای کارایی در چنین سیستم‌های پیچیده‌ای، شبیه‌سازی رویدادهای گسسته است. این پژوهش با هدف بررسی کاربرد شبیه‌سازی فرایندهای گسسته در بهینه‌سازی عملیات کشتیرانی، بندری و حمل‌ونقل دریایی انجام شده است. در بخش نخست، مروری نظام‌مند بر مطالعات مرتبط با مدل‌سازی و شبیه‌سازی در حوزه بنادر ارائه شده و جایگاه رویکردهای ترکیبی مانند DES-DEA در تحلیل کارایی پایانه‌ها تبیین گردیده است. سپس یک مدل نمونه در محیط نرم‌افزار Arena شبیه‌سازی شده است. در این مدل، فرایندهایی همچون ورود کشتی‌ها، تخصیص یدک‌کش، پهلوگیری در اسکله و وقوع تأخیرهای عملیاتی در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای ورودی بر اساس توزیع‌های آماری برگرفته از مطالعات علمی معتبر و شواهد آماری موجود تعیین شده‌اند تا الگوی واقعی عملکرد بندر بازنمایی شود. ارائه این مثال به منظور نشان دادن قابلیت‌های شبیه‌سازی برای تدوین سیاست‌های تخصیص پویا برای افزایش بهره‌وری منابع در بنادر و حمل‌ونقل دریایی است. در مجموع، شبیه‌سازی رویدادهای گسسته ابزاری کارآمد برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوزه بنادر و طراحی سیاست‌های بهینه تخصیص منابع محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تئوری صف، شبیه‌سازی رویدادهای گسسته، بهینه‌سازی عملیات بندری، نرم‌افزار آرنا

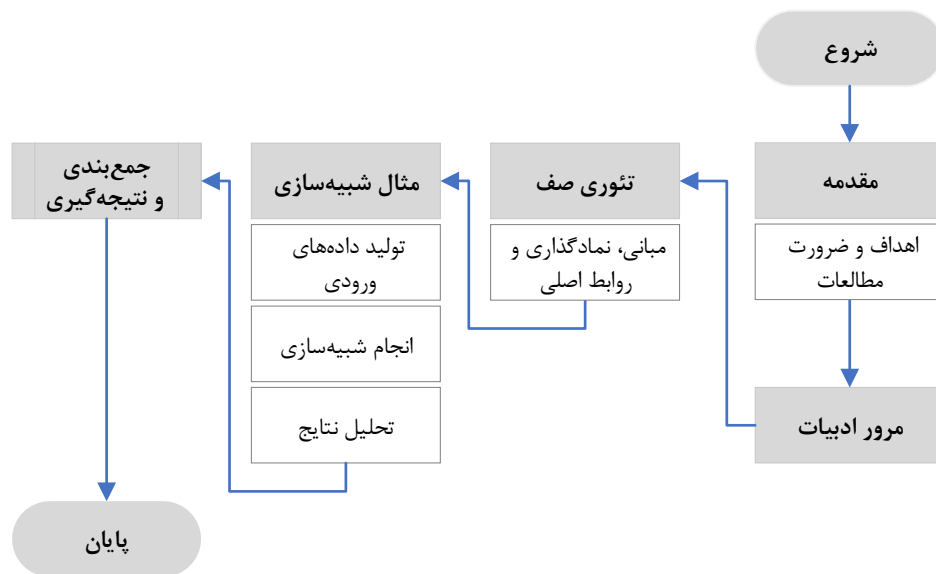
۱-مقدمه

بار در سال، ستون فقرات تجارت خارجی کشور هستند. البته عملیات بندری با چالش‌هایی نظیر تأخیر در پهلوگیری کشتی‌ها، ازدحام بنادر ناشی از محدودیت منابع (مانند جرثقیل‌ها و محوطه‌های ذخیره‌سازی) و اثرات محیط‌زیستی ناشی از مصرف بالای انرژی روبه‌روست. این مسائل، به‌ویژه در بنادر پرتراфик، می‌توانند هزینه‌های عملیاتی را افزایش داده و رقابت‌پذیری بندر را کاهش دهند. در این زمینه، شبیه‌سازی رویدادهای گسسته (Discrete Event Simulation یا DES) به عنوان یک ابزار

بنادر به‌عنوان دروازه‌های اصلی تجارت جهانی، نقشی حیاتی در اقتصاد کشورها ایفا می‌کنند. بر اساس گزارش کنفرانس تجارت و توسعه سازمان ملل متحد (UNCTAD, 2024)، بیش از ۹۰ درصد تجارت جهانی از طریق حمل‌ونقل دریایی انجام می‌شود که این امر بنادر را به حلقه‌ای کلیدی در زنجیره تأمین جهانی تبدیل کرده است. حجم تجارت دریایی در سال ۲۰۲۴ به حدود ۱۲,۳ میلیارد تن رسیده است. در ایران، بندری مانند بندر شهید رجایی و بندر امام خمینی با جابجایی میلیون‌ها تن

می‌پردازد. اهداف اصلی شامل تحلیل مدل‌های DES برای سناریوهای واقعی، ارزیابی عملکرد آن‌ها و پیشنهاد راهکارهای نوین برای ادغام با فناوری‌های نوظهور مانند هوش مصنوعی است. روندنمای انجام این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

قدرتمند مدل‌سازی، امکان ارزیابی و بهینه‌سازی فرآیندهای پیچیده مانند تخصیص اسکله، تخلیه کانتینرها و مدیریت ترافیک کشتی‌ها را فراهم می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که DES می‌تواند زمان انتظار را کاهش و بهره‌وری را افزایش دهد. این مقاله به بررسی کاربرد نرم‌افزارهای DES در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عملیات کشتیرانی، بندری و حمل‌ونقل دریایی



شکل ۱. روندنمای پژوهش

۲- پیشینه تحقیق

of Science، به بررسی نظام‌مند مطالعات منتشرشده طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۲ در حوزه به‌کارگیری روش‌های شبیه‌سازی رویداد گسسته و تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)^۱ در ارزیابی کارایی بنادر پرداخته است. نتایج مطالعه مذکور نشان داده است که در بازه‌ی زمانی مورد اشاره، تعداد ۱۷۲ مقاله علمی در این زمینه منتشر شده و روند انتشار آن‌ها با نرخ رشد سالانه حدود ۹/۲۵ درصد افزایش یافته است. تمرکز اصلی این مطالعات بر موضوعاتی مانند بهینه‌سازی عملیات بندری، تخصیص منابع و سنجش بهره‌وری پایانه‌های کانتینری بوده است. البته یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که استفاده هم‌زمان و تلفیقی از دو رویکرد DES و DEA در تحقیقات بندری هنوز محدود بوده و اغلب مطالعات، این دو روش را به‌صورت مجزا به کار گرفته‌اند. ازاین‌رو، توسعه‌ی مطالعات کاربردی مبتنی بر شبیه‌سازی در حوزه‌ی حمل‌ونقل دریایی می‌تواند درک جامع‌تری از فرآیندهای عملیاتی بنادر و راهکارهای ارتقای کارایی فراهم آورد.

شبیه‌سازی رویدادهای گسسته به عنوان یک روش مدل‌سازی دینامیک، از دهه ۱۹۶۰ میلادی در حوزه‌های صنعتی و لجستیکی مورد استفاده قرار گرفته است و در سال‌های اخیر، کاربرد آن در عملیات حمل‌ونقل دریایی، بنادر و کشتیرانی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این روش با مدل‌سازی رویدادهای گسسته مانند ورود کشتی‌ها، تخصیص اسکله‌ها و تجهیزات، فرایندهای تخلیه و بارگیری، فرایندهای انتقال کالا در محیط بندر و حتی در مسیر مبدا تا مقصد، تخصیص منابع فیزیکی و انسانی و کنترل زمان‌بندی فرایندها، امکان ارزیابی سناریوهای پیچیده را بدون اختلال در عملیات واقعی فراهم می‌کند. بر اساس بررسی‌های انجام شده، بیش از ۲۰۰ مطالعه در دو دهه اخیر به کاربرد شبیه‌سازی رویدادهای گسسته در بنادر اختصاص یافته که اغلب بر بهینه‌سازی عملیات کانتینری تمرکز دارند. (آزنام و خوریزان، ۲۰۲۳) پژوهش مروری انجام‌شده توسط آزنام و خوریزان (۲۰۲۳)، با استفاده از داده‌های دو پایگاه معتبر Scopus و Web

روش‌شناسی و فناوریانه، چند گرایش نوظهور و قابل توجه وجود دارند. در اولین گروه می‌توان به شبیه‌سازی‌های پیش‌بین^۵ که با استفاده از یادگیری ماشین یا تجزیه و تحلیل داده‌ها زمان‌های عملیات را پیش‌بینی می‌کنند و سپس رفتار سیستم را شبیه‌سازی می‌کنند اشاره کرد (مانند مطالعه پارک و همکاران، ۲۰۲۴). دسته دیگر شامل تلفیق مدل‌های چندعامله/عامل محور با DES برای افزایش واقع‌نمایی سیستم و پشتیبانی از تحلیل سطح بالاتر است (مانند مطالعه فیوری و همکاران، ۲۰۲۵). گروه دیگر مربوط به استفاده از شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای یافتن سیاست‌های زمان‌بندی یا تخصیص منابع است (مانند مطالعه لو و همکاران، ۲۰۲۴).

۳-تئوری صف

تئوری صف^۶ مبنای روش‌های شبیه‌سازی رویدادهای گسسته است که به بررسی رفتار سیستم‌هایی می‌پردازد که در آنها مشتریان^۷ (مانند کشتی‌ها، کامیون‌ها یا کانتینرها)، نیازمند دریافت خدماتی مشخص^۸ (مانند تخصیص اسکله، بارگیری، تخلیه و ...) هستند. در صورتیکه تقاضا برای آن خدمت^۹ بیش از ظرفیت لحظه‌ای ارائه خدمت باشد، موجودیتهای برای دریافت خدمت در صف انتظار^{۱۰} قرار می‌گیرند. هدف، تحلیل زمان انتظار، طول صف، بهره‌وری منابع و کیفیت خدمات است. در حمل‌ونقل دریایی و مدیریت بنادر، تئوری صف برای شبیه‌سازی مواردی مانند انتظار کشتی‌ها در لنگرگاه برای ورود به حوضچه بندر، تخصیص اسکله به کشتی‌ها و پهلوگیری، سرویس‌دهی جرثقیل‌ها و تجهیزات تخلیه و بارگیری، صف کامیون‌ها در محوطه اسکله برای بارگیری و در محوطه انبارها برای تخلیه، فرایند ورود و خروج کانتینرها از پایانه‌ها و مواردی مشابه قابل کاربرد است. در تئوری صف، هر سیستم معمولاً دارای اجزای زیر است.

کاربردهای عملی شبیه‌سازی رویداد گسسته در مطالعات بندری را می‌توان در چند گروه اصلی دسته‌بندی کرد. از آن جمله می‌توان به تخصیص اسکله و برنامه‌ریزی پهلوگیری، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تجهیزات راهبردی مانند جرثقیل‌های دروازه‌ای^۱ و جرثقیل‌های محوطه^۲، مدیریت ذخیره‌سازی و جابجایی کانتینرها و مدیریت ترافیک بندر در ورودی-خروجی و محوطه بندر از جمله صف کامیون‌ها اشاره کرد. مطالعاتی مانند پیتترینگ و مورتی (۲۰۰۹) نشان داده‌اند که پارامترهایی مانند طول بلوک و نحوه استقرار جرثقیل‌های محوطه تأثیر معنی‌داری بر عملکرد کل ترمینال دارند؛ این نوع مطالعات معمولاً با استفاده از مدل‌سازی DES، اثر سیاست‌ها یا پیکربندی‌های مختلف را شبیه‌سازی و مقایسه می‌کنند.

یکی از حوزه‌های فعال پژوهشی که ارتباط مستقیم با کاهش تراکم و بهبود زمان پاسخ‌دهی دارد، «سامانه نوبت‌دهی کامیون» (TAS)^۴ است. شواهد تجربی و مطالعات شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از TAS می‌تواند به‌طور قابل توجهی زمان انتظار کامیون‌ها و بارگیری/ترخیص در ورودی بندر را کاهش دهد و بهره‌وری محوطه را بهبود بخشد؛ مطالعات کلاسیک و جدید هر دو این موضوع را تایید می‌کنند. (زهندنر و فیله، ۲۰۱۴، بت و همکاران، ۲۰۲۴ و سان و همکاران، ۲۰۲۵). در خصوص روش‌های ترکیبی، رویکردهای متفاوتی مطرح شده‌اند. ترکیب DES با روش‌های بهینه‌سازی یا روش‌های ارزیابی کارایی مانند DEA امکان تولید سناریوهای شبیه‌سازی‌شده و سپس ارزیابی کارایی هر سناریو را فراهم می‌آورد؛ هرچند مطالعات ترکیبی در حوزه بنادر نسبتاً محدود هستند، برخی مطالعات پایه‌ای و نمونه‌های موردی (از جمله مین و پارک، ۲۰۰۸ و سیسلی‌اوغلو و همکاران، ۲۰۱۹) نشان می‌دهند که ترکیب DES-DEA می‌تواند در تعیین ورودی‌های مؤثر و مقایسه سناریوها مفید باشد. با این حال، نیاز به مطالعات تجربی و کاربردی بیشتر با استفاده از داده‌های میدانی در این زمینه روشن است. از منظر

-مشتري^{۱۱}: موجودیتی^{۱۲} که نیاز به خدمت دارد (کشتی، کانتینر، کامیون، جرثقیل، ...)

-مرکز خدمت^{۱۳}: نهادی که خدمت ارائه می‌دهد (اسکله، جرثقیل، گیت ورودی، ...)

-صف^{۱۴}: محلی که مشتری‌ها تا زمان دریافت خدمت منتظر می‌مانند

-قوانین خدمت‌دهی^{۱۵}: نحوه انتخاب مشتری بعدی برای خدمت (مثلاً FIFO, LIFO, Priority-based).

-ظرفیت سیستم^{۱۶}: حداکثر تعداد مشتریانی که می‌توانند در صف یا خدمت باشند

-تعداد مشتریان^{۱۷}: تعداد کل مشتریانی که ممکن است وارد سیستم شوند (محدود یا نامحدود)

نمادگذاری استاندارد کنادال

مدل‌های صف معمولاً با نمادگذاری کنادال^{۱۸} نمایش داده می‌شوند که نخستین بار توسط کنادال در سال ۱۹۵۳ معرفی شده است. این نمادگذاری، یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌ها برای

توصیف ویژگی‌های سیستم‌های مبتنی بر صف در تئوری صف است که به شکل کلی زیر بیان می‌شود.

$A/B/c/K/N/D$

در این رابطه تعریف نمادها به شرح زیر است.

- A: الگوی ورود (Arrival Process) یا توزیع زمانی بین ورود موجودیت‌ها (مانند کشتی‌ها یا کامیون‌ها)
- B: الگوی خدمت‌دهی (Service Process) یا توزیع زمانی عملیات (مانند عملیات بارگیری، تخلیه یا پهلوگیری)
- c: تعداد خدمت‌دهندگان (Servers) یا تامین‌کنندگان خدمات (مانند اسکله‌ها و جرثقیل‌های فعال)
- K: ظرفیت کلی سیستم (System Capacity) شامل تعداد واحدهایی که می‌توانند در صف انتظار یا در حال خدمت باشند
- N: اندازه جمعیت مبدأ (Population Size) یا تعداد کل مشتریانی که ممکن است وارد سیستم شوند (مانند شناورها یا کامیون‌ها)
- D: قوانین خدمت‌دهی (Queue Discipline) مانند «اول وارد، اول خارج» (FIFO)^{۱۹} یا اولویت بر اساس نوع کشتی یا محموله

خدمت‌دهی به کشتی‌ها هستند. استفاده از نمادگذاری کنادال، ابزار مؤثری برای مدل‌سازی و تحلیل زمان انتظار کشتی‌ها در لنگرگاه، بهره‌وری اسکله‌ها و ظرفیت عملیاتی بنادر فراهم می‌کند و مبنایی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع، کاهش ازدحام و افزایش کارایی در سیستم‌های حمل و نقل دریایی به‌شمار می‌رود.

در اغلب کاربردهای مهندسی بندر، نمایش سه مؤلفه اول به‌صورت $A/B/c$ کافی است. برای مثال، مدل $M/M/1$ نشان‌دهنده سیستمی با ورود و خدمت‌دهی تصادفی (توزیع نمایی) و تنها یک اسکله فعال است. در مقابل، مدل $M/M/c$ می‌تواند برای حالتی به‌کار رود که چند اسکله به‌صورت موازی مشغول

روابط اصلی در تئوری صف

نرخ ورود و خدمت

و برای پایداری سیستم معمولاً نیاز است که $\rho < 1$ باشد که به معنای نرخ ورود کمتر از ظرفیت کل سرویس‌دهنده‌ها است (گراس و همکاران، ۲۰۰۸).

با فرض نرخ ورود مشتری‌ها برابر با λ (تعداد ورود در واحد زمان) و نرخ خدمت‌دهی برابر با μ (تعداد خدمات ارائه شده در واحد زمان برای هر سرور)، چنانچه تعداد c خدمت‌دهنده وجود داشته باشد، شدت ترافیک ρ ^{۲۰} به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu}$$

مدل‌های پایه M/M/1

یکی از ساده‌ترین مدل‌ها، سیستم تک خدمت‌دهنده با ورود پواسونی و خدمت نمایی است. روابط کلیدی در این مدل‌ها عبارتند از:

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

- میانگین تعداد مشتریان در سیستم

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

- میانگین تعداد مشتریان در صف

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

- میانگین زمان حضور مشتری در سیستم

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{\rho}{\mu - \lambda}$$

- میانگین زمان انتظار در صف

$$L = \lambda W, \quad L_q = \lambda W_q$$

- قانون لیتل^{۲۱}

مدل های M/M/c

در حالتی که تعداد خدمات دهندگان بیش از یک عدد باشد، روابط پیچیده تر می شوند. برای مثال در صورت وجود c

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{(c\rho)^n}{n!} + \frac{(c\rho)^c}{c! (1 - \rho)} \right]^{-1}$$

- احتمال خالی بودن سیستم

$$L_q = \frac{P_0 (c\rho)^c \rho}{c! (1 - \rho)^2}$$

- میانگین تعداد مشتریان در صف

به عنوان مثال، بررسی زمان انتظار کامیون ها در ورودی بندر می تواند با تعیین نرخ ورود کامیون ها، نرخ خدمات دهی در ورودی و تحلیل زمان های توقف با استفاده از شبیه سازی انجام شود.

زمان های انتظار با استفاده از روابط مشابه L_q و قانون لیتل محاسبه می شوند. روابط تئوری صف می توانند به عنوان چارچوب مفهومی برای تعریف توزیع ها و شاخص ها در شبیه سازی به کار روند و شبیه سازی رویدادهای گسسته می تواند با داده های واقعی، این مدل ها را شبیه سازی و اعتبارسنجی نماید.

۴-مثالی از کاربرد DES در بهینه سازی عملیات اسکله و تخصیص جرثقیل

۴-۱- تعیین مبانی و پارامترهای پایه

نوسانات روزانه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، مبانی شبیه سازی عملیات بنادر و توزیع های زمانی در تحقیقات مروری مانند اشتینکن و همکاران (۲۰۰۴) مورد بررسی قرار گرفته اند و به عنوان مرجع برای اعتبار روش مورد استفاده در پژوهش حاضر پذیرفته شده اند.

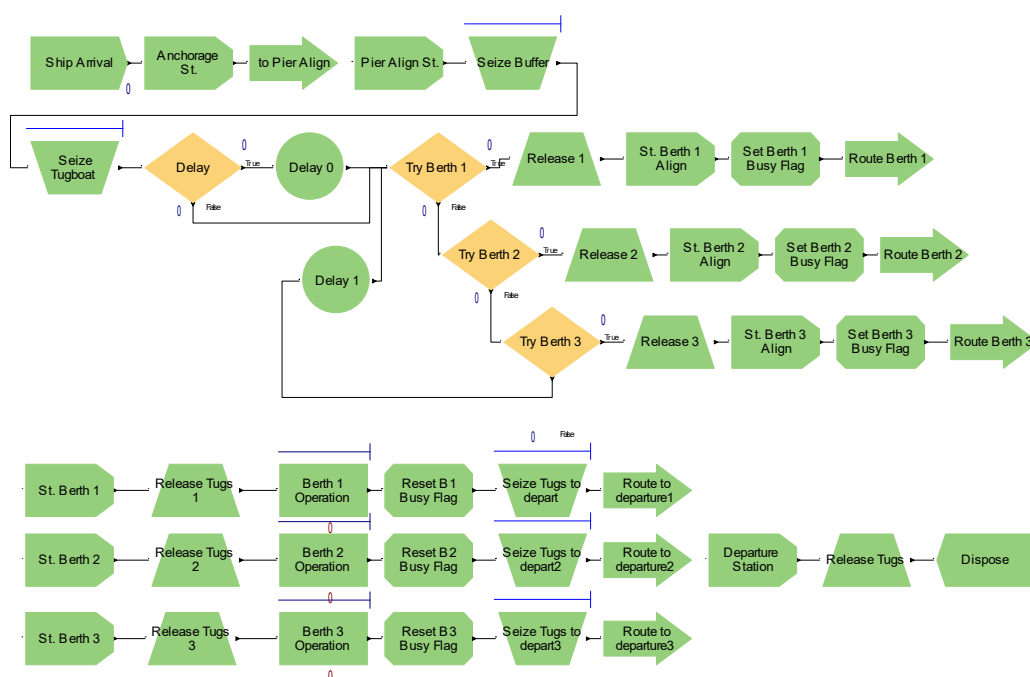
در پژوهش حاضر، یک مثال فرضی از کاربرد شبیه سازی رویدادهای گسسته (DES) در بهینه سازی عملیات بندری ارائه شده است. مدل شبیه سازی رویدادهای گسسته در محیط نرم افزار آرنا پیاده سازی شده است. دوره شبیه سازی برابر با ۳۰ روز (۴۳۲۰۰ دقیقه) با دوره راه اندازی (warm-up) برابر با ۲ روز (۲۸۸۰ دقیقه) و ۲۵ تکرار مستقل برای محاسبه بازه اطمینان ۹۵٪ تعیین شده است. داده های فرضی با توجه به محدودیت دسترسی به داده های AIS^{۲۲} کامل و واقعی از بنادر به کار گرفته شده است. پارامترهای داده مصنوعی بر اساس نتایج مطالعات علمی و شواهد آماری از مقالات مرتبط انتخاب شده اند. برای مثال، با الهام از یافته های کو و همکاران (۲۰۰۶)، مبنی بر انطباق توزیع زمان های بین ورود کشتی های کانتری با توزیع Erlang، این توزیع برای شبیه سازی الگوهای بین ورود و نوسانات روزانه قابل استفاده است. همچنین تحقیقات پیش بینی ورود کشتی ها مانند مطالعات یو و همکاران (۲۰۱۸)، الگوهای زمانی ورود را تحلیل کرده اند که در تعیین نرخ پایه ورود λ و

۴-۲- تعریف فرایندهای عملیاتی

زمان ورود کشتی ها بر اساس توزیع نمایی با میانگین سه ساعت بین دو ورود ایجاد شده است. کشتی ها پس از ورود به محل لنگرگاه بیرونی، به صف انتظار برای ورود به بندر می روند. این صف انتظار با استفاده از مدل Seize برای اخذ مجوز ورود تعریف می شود و به این معناست که اگر اسکله خالی نباشد و ظرفیت منطقه انتظار نیز پر شده باشد، کشتی نمی تواند وارد بندر شود و باید در صف خارجی منتظر بماند تا یک جایگاه انتظار آزاد شود؛ این روش، محدودیت واقعی ظرفیت لنگرگاه را مدل سازی کرده و از ایجاد ازدحام غیرواقعی در شبیه سازی

مدت زمان تخلیه و بارگیری کشتی‌ها در اسکله با استفاده از یک توزیع مثلثی مدل‌سازی شد. این توزیع با پارامترهای حداقل ۳ ساعت، حداکثر ۸ ساعت و محتمل ۵ ساعت تعریف شده است. توزیع مثلثی^{۲۳} به دلیل سادگی و امکان نمایش عدم قطعیت در عملیات، در شبیه‌سازی فرآیندهای بندری پرکاربرد است. انتخاب این محدوده زمانی بر اساس تجربیات عملیاتی و داده‌های تقریبی از عملیات بنادر کوچک صورت گرفته است. پس از اتمام فرایند تخلیه و بارگیری، شناور از اسکله جدا شده و با استفاده از دو یدک‌کش از بندر خارج می‌شود. فرایند شبیه‌سازی شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

جلوگیری می‌کند. پس از اجازه ورود، به هر کشتی دو عدد شناور یدک‌کش تخصیص داده می‌شود. در این مثال فرض شده است که بندر در مجموع پنج عدد یدک‌کش در اختیار دارد. سه عدد اسکله در بندر برای سرویس‌دهی به شناورها در نظر گرفته شده است. همچنین تأخیرهای تصادفی با احتمال وقوع ۵ درصد و زمان تأخیر بین ۵ تا ۶۰ دقیقه به مدل افزوده شدند تا نوسانات عملیاتی واقعی شبیه‌سازی شود و عدم قطعیت‌های عملیاتی بازتاب یابد. شناورهای ورودی پس از اختصاص یدک‌کش، به یکی از اسکله‌ها در صورت خالی بودن هدایت می‌شوند.



شکل ۲. فرایند شبیه‌سازی رویداد گسسته در نرم‌افزار Arena

۴-۳- تحلیل نتایج

کارایی کلی سیستم

شبیه‌سازی شده‌اند. شاخص‌های عملکردی مانند میانگین زمان انتظار کشتی‌ها، زمان توقف کل کشتی‌ها و نرخ اشغال اسکله‌ها اندازه‌گیری شده‌اند. وضعیت کلی سیستم در جدول ۲ نشان داده شده است.

مدل شبیه‌سازی مبتنی بر رویداد گسسته در نرم‌افزار Arena 16.1 با ۲۵ تکرار مستقل اجرا شد تا تأثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد بندر بررسی شود. فرآیند ورود و خروج کشتی‌ها، تخصیص اسکله‌ها، صف‌های انتظار و زمان سرویس در این مدل

جدول ۱. وضعیت کلی سیستم پس از ۲۵ تکرار مستقل شبیه سازی

شاخص	میانگین	کمترین میانگین	بیشترین میانگین	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	نیم عرض بازه اطمینان
تعداد کشتی های وارد شده (In)	۲۲۷/۰۴	۲۰۳	۲۵۹			±۵/۹۱
تعداد کشتی های خارج شده (Out)	۲۲۷/۸۰	۲۰۴	۲۵۹			±۵/۷۰
میانگین زمان خدمت (VA Time) دقیقه	۳۱۹/۹۱	۳۱۲/۷۲	۳۲۷/۸۳	۱۸۰/۵۶	۴۶۷/۷۱	±۱/۶۹
میانگین زمان انتظار (Wait Time) دقیقه	۱۸/۳۵	۲/۲۹	۴۳/۶۸	۰/۰۰	۷۵۴/۴۰	±۴/۷۸
میانگین کل زمان در سیستم (Total Time) دقیقه	۴۱۷/۸۳	۳۷۰/۹۳	۴۶۱/۶۶	۲۰۷/۵۶	۱۶۱۵/۷۰	±۹/۸۲
تعداد کشتی های در سرویس Work-In-Process (WIP)	۲/۳۶	۱/۹۵	۲/۹۶	۰	۱۱	±۰/۱

نتایج نشان داد که در هر دوره شبیه سازی ۳۰ روزه در ۲۵ تکرار مستقل اجرا، به طور متوسط حدود ۲۲۸ کشتی وارد و خارج شده اند. این مقدار نشان می دهد که سیستم با وجود محدودیت های اسکله و یدک کش ها، توان عملیاتی نسبتاً پایداری دارد و میانگین خروج تقریباً برابر با میانگین ورود است. این موضوع نشان دهنده تعادل دینامیک سیستم و عدم انباشته شدن بیش از حد کشتی ها طی دوره شبیه سازی است. میانگین کل زمان حضور کشتی در سیستم حدود ۳۷۰ تا ۴۶۱ دقیقه (بین ۶ تا ۷٫۵ ساعت) با مقدار ماکزیمم ۱۶۱۵ دقیقه (در حدود ۲۷ ساعت) است. دامنه بزرگ تغییر مقادیر نشان دهنده وجود شرایط نوسانی در فرآیند تخصیص اسکله و یدک کش ها است. عوامل تأخیر تصادفی (۵ درصد) می تواند دلیل بخشی از این پراکندگی باشد.

مجموعه منابعی که در این شبیه سازی در نظر گرفته شدند شامل سه پست اسکله و پنج عدد یدک کش بود. بهره وری منابع^{۲۴} شامل بهره برداری آنی (نسبت زمان بهره برداری)^{۲۵} در جدول ۲ و تعداد منابع مشغول^{۲۶} (تعداد متوسط واحدهای منبع که در هر لحظه مشغول بوده اند) در جدول ۳ ارائه شده اند.

تحلیل منابع

جدول ۲. بهره برداری آنی از منابع تخصیص یافته (نسبت زمان بهره برداری)

منبع	میانگین	کمترین میانگین	بیشترین میانگین	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	فاصله اطمینان (نیم عرض)
اسکله ۱	۰/۷۱۷۶	۰/۶۴۹۵	۰/۷۸۲۵	۰	۱	±۰/۰۱
اسکله ۲	۰/۶۰۷۸	۰/۵۳۶۷	۰/۶۹۵۰	۰	۱	±۰/۰۲
اسکله ۳	۰/۴۷۹۲	۰/۳۷۳۳	۰/۵۸۶۱	۰	۱	±۰/۰۲
بافر (ورود به بندر)	۰/۱۵۶۰	۰/۰۶۷۹	۰/۲۴۱۷	۰	۱	±۰/۰۲
یدک کش	۰/۱۷۴۸	۰/۱۰۸۴	۰/۲۴۴۶	۰	۰/۸	±۰/۰۱

جدول ۳. تعداد منابع مشغول

منبع	میانگین	کمترین میانگین	بیشترین میانگین	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	فاصله اطمینان (نیم عرض)
اسکله ۱	۰/۷۱۷۶	۰/۶۴۹۵	۰/۷۸۲۵	۰	۱	±۰/۰۱
اسکله ۲	۰/۶۰۷۸	۰/۵۳۶۷	۰/۶۹۵۰	۰	۱	±۰/۰۲
اسکله ۳	۰/۴۷۹۲	۰/۳۷۳۳	۰/۵۸۶۱	۰	۱	±۰/۰۲
بافر	۰/۳۱۲۰	۰/۱۳۵۷	۰/۴۸۳۴	۰	۲	±۰/۰۳
(ورود به بندر)						
یدک کش	۰/۸۷۴۱	۰/۵۴۲۰	۱/۲۲۲۸	۰	۴	±۰/۰۷

مشاهده شده در برخی نقاط ناشی از هم زمانی تقاضا و نه کمبود ساختاری است. بنابراین افزایش تعداد یدک کش ها تأثیر معناداری بر میانگین عملکرد ندارد اما ممکن است نوسانات شدید را کاهش دهد.

تحلیل صف های انتظار

زمان انتظار در صف های ایجاد شده برای ورود به بندر، دریافت یدک کش، عملیات بارگیری و تخلیه در اسکله و دریافت یدک کش برای ترک اسکله در جدول ۴ نشان داده شده اند.

اسکله ۱ بیشترین نرخ استفاده و اسکله ۳ کمترین را دارد. این تفاوت به علت نحوه تخصیص اسکله ها است که به صورت منظم ابتدا به اسکله اول رجوع می شود و در صورت اشغال بودن آن به اسکله دوم مراجعه می شود. مراجعه به اسکله سوم نیز تنها در صورت اشغال بودن اسکله اول و دوم انجام می شود. استفاده از یک سیاست تخصیص اسکله هوشمند (مثلاً کمترین صف یا کمترین زمان انتظار) یا مراجعه تصادفی به اسکله ها می تواند بهره برداری از اسکله ها را متوازن تر کند. میانگین بهره برداری یدک کش ها حدود ۱۰٪ تا ۲۴٪ بوده است و به طور متوسط ۰/۸۷ از ۵ یدک کش مشغول بوده اند. این نتایج نشان می دهد که تعداد یدک کش ها برای وضعیت فعلی کافی است اما صف های

جدول ۴. زمان انتظار در صف بر حسب دقیقه

نام صف	میانگین	کمترین میانگین	بیشترین میانگین	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	فاصله اطمینان (نیم عرض)
صف ورود به بندر (بافر)	۱۳/۰۶	۱/۰۴	۳۵/۰۰	۰	۷۱۹/۰۵	±۴/۰۳
صف دریافت یدک کش	۲/۸۴	۰/۴۸	۵/۱۰	۰	۳۹/۶۹	±۰/۴۸
صف عملیات اسکله ۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
صف عملیات اسکله ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
صف عملیات اسکله ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
صف یدک کش برای ترک اسکله ۱	۲/۱۷	۰/۸۸	۳/۶۵	۰	۲۴/۸۴	±۰/۲۸
صف یدک کش برای ترک اسکله ۲	۲/۵۶	۰/۸۱	۳/۸۶	۰	۲۴/۵۷	±۰/۳۴
صف یدک کش برای ترک اسکله ۳	۲/۸۷	۰/۲۹	۵/۲۶	۰	۲۳/۴۳	±۰/۴۳

جدول ۵. تعداد در انتظار در صف

نام صف	میانگین	کمترین	بیشترین	کمترین	بیشترین	فاصله اطمینان (نیم عرض)
صف ورود به بندر (بافر)	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۲۲	۰	۶	±۰/۰۲
صف دریافت یدک کش	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۳	۰	۲	۰
صف عملیات اسکله ۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
صف عملیات اسکله ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
صف عملیات اسکله ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
صف یدک کش برای ترک اسکله ۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰	۱	۰
صف یدک کش برای ترک اسکله ۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰	۱	۰
صف یدک کش برای ترک اسکله ۳	۰/۰۰۴	۰	۰/۰۱	۰	۱	۰

۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، پس از معرفی روش شبیه سازی رویداد گسسته مبتنی بر تئوری صف و پیشینه کاربرد آن در مدل سازی عملیات بندری، مثالی از کاربرد آن با استفاده از داده های فرضی مبتنی بر الگوهای واقعی تردد کشتی ها، عملیات پهلوگیری، بارگیری و تخلیه در یک بندر ارائه شد. مدل مورد اشاره، در محیط Arena 16.1 توسعه یافت که شامل فرآیند ورود به لنگرگاه، تخصیص یدک کش ها، پهلوگیری در اسکله ها، زمان های خدمت و تأخیرهای تصادفی بود. هرچند داده های مورد استفاده فرضی بودند و استنتاج کمی و قطعی درباره ظرفیت ها یا سیاست های بهره برداری مورد نظر نبود، اما مدل توسعه یافته نشان داد که روش DES ابزاری کارآمد و منعطف برای بازنمایی رفتار پویا و پیچیدگی های سیستم های بندری است. این روش قابلیت بررسی سناریوهای مختلف تخصیص منابع، ارزیابی شاخص های عملکردی و تحلیل اثر نوسانات عملیاتی را فراهم می کند و می تواند به عنوان بستری مؤثر برای تصمیم سازی و طراحی بهینه سازی های آتی در مدیریت بنادر به کار رود. از منظر مدیریتی، این یافته ها می توانند مبنای تصمیم گیری برای طراحی سیاست تخصیص پویا^{۲۷} باشند به گونه ای که برای مثال با تنظیم تعداد یدک کش های فعال در هر بازه زمانی، بتوان بهره وری کلی سیستم را افزایش و هزینه های یکبارگی تجهیزات را کاهش داد.

در مجموع، شبیه سازی رویدادهای گسسته ابزاری کارآمد برای ارزیابی سیاست های تخصیص منابع در محیط های بندری است و قابلیت توسعه برای تحلیل سناریوهای مختلف از جمله تغییر نرخ ورود کشتی ها، شرایط آب و هوایی یا افزایش ظرفیت اسکله ها را دارد.

نتایج نشان می دهد میانگین زمان انتظار در صف ورود به بندر در حدود ۱ دقیقه بوده است اما بیشینه زمان انتظار در این صف به حدود ۷۱۹ دقیقه (بیش از ۱۲ ساعت) رسیده است. این نشان می دهد اگرچه میانگین انتظار کوتاه است، اما در برخی تکرارها ازدحام شدید ایجاد شده است که علت آن می تواند ظرفیت محدود ناحیه انتظار، وقوع تأخیرهای تصادفی و یا هم زمانی ورود چند کشتی در دوره های اوج باشد. این رفتار یک ویژگی طبیعی سیستم های بندری با ظرفیت محدود است و می تواند نشانه «حساسیت سیستم به نوسانات ورودی» باشد. میانگین صف های مربوط به تخصیص یدک کش ها نیز نسبتاً کوچک و در حدود ۲ تا ۳ دقیقه به دست آمده است اما در مواقع اوج، به دلیل محدودیت ۵ یدک کش، زمان های انتظار تا حدود ۴۰ دقیقه هم رسیده است.

در خصوص اسکله ها، نتایج نشان می دهد که صف انتظار در هر سه اسکله برابر با صفر بوده است. این مسئله نشان می دهد که مدل، به خوبی رفتار «انتظار بیرونی قبل از ورود» را به واسطه ایجاد ناحیه انتظار برای ورود به بندر اعمال کرده و از تجمع غیرواقعی در مقابل اسکله جلوگیری کرده است. به بیان دیگر، صف واقعی اسکله ها شکل نمی گیرد زیرا کشتی ها قبل از ورود به بندر در صف لنگرگاه بیرونی متوقف می شوند. این موضوع نشان می دهد که شبیه سازی رویدادهای گسسته توسط نرم افزار Arena، امکان مدل سازی سیاست های واقعی کنترل ظرفیت را دارد.

می‌توانند در شبیه‌سازی فرایندهای واقعی بنادر مورد توجه قرار گیرند.

اعتبارسنجی مدل با داده‌های واقعی از بنادر شمال و جنوب کشور جهت بررسی دقت پیش‌بینی‌ها، افزودن ماژول‌های مربوط به پسرانه شامل کامیون‌ها، واگن‌ها و انبارها برای بررسی تأثیر تنگناهای محوطه بندری بر عملکرد کل زنجیره عملیاتی و تحلیل پایداری عملکرد در سناریوهای بحرانی مانند افزایش ناگهانی ترافیک دریایی یا خرابی تجهیزات جهت طراحی سیاست‌های تاب‌آور می‌توانند به عنوان مطالعات تکمیلی مطرح باشند.

عدم دسترسی به داده‌های واقعی، از محدودیت‌های اصلی پژوهش حاضر محسوب می‌شود. البته هدف اصلی این پژوهش، نمایش توانمندی شبیه‌سازی رویدادهای گسسته در تحلیل سیستم‌های بندری بوده است ولی دسترسی به داده‌های واقعی می‌تواند منجر به تسهیل اتخاذ سیاست‌های بهینه اجرایی در بنادر گردد. همچنین مدل حاضر تنها بخشی از فرایندهای اصلی تخصیص یدک‌کش‌ها، پهلوگیری و عملیات در اسکله‌ها را شبیه‌سازی کرده و عوامل محیطی، محدودیت‌های انسانی و تعاملات پسرانه‌ای در آن لحاظ نشده است. چنین مواردی

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Data Envelopment Analysis
2. Gantry Cranes
3. Yard Cranes
4. Truck Appointment System
5. predictive DES
6. Queueing Theory
7. Customer
8. Services
9. Service Demand
10. Waiting Queue
11. Customer
12. Entity
13. Server
14. Queue
15. Service Discipline
16. System Capacity
17. Source Population
18. Kendall Notation
19. First In, First Out
20. Traffic Intensity
21. Little's Law
22. Automatic Identification System
23. Triangular Distribution
24. Resource Utilization
25. Instantaneous Utilization
26. Number Busy
27. Dynamic Allocation Policy

۷- مراجع

-Bett, D. K., Ali, I., Gheith, M., & Eltawil, A. (2024). Simulation-Based Optimization of Truck Appointment Systems in Container Terminals: A Dual Transactions Approach with Improved Congestion Factor Representation. *Logistics*, 8(3), 80.

doi.org/10.3390/logistics8030080

-Fiori, C., Cisternas, L. J., & de Luca, S. (2025). A discrete-event multi-agent simulation framework supporting well-to-wheel analysis for greening commercial maritime ports. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 140, 103061.

doi.org/10.1016/j.simpat.2024.103061

-Aznam, N. H. Z., & Khurizan, N. (2023). Discrete-Event Simulation and Data Envelopment Analysis in Port Efficiency Evaluation: A Bibliometric Analysis and Mapping of Combined Databases. In Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Information Scientific Development (ICAISD 2023), *SciTePress*. Vol. 1, 84-95.

doi.org/10.5220/0012444300003848

-Sislioglu, M., Celik, M., & Ozkaynak, S. (2019). A simulation model proposal to improve the productivity of container terminal operations through investment alternatives. *Maritime Policy & Management*, 46(2), 156–177.

doi.org/10.1080/03088839.2018.1489165

-Steenken, D., Voß, S., & Stahlbock, R. (2004). Container terminal operation and operations research – a classification and literature review. *OR Spectrum*, 26, (1), 3–49.

doi.org/10.1007/s00291-003-0157-z

-Sun, S., Shi, X., & Zheng, D. (2025). Enhancing the truck appointment system at container terminals based on data-driven and intelligent decision-making methods. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 12(1).

doi.org/10.1080/23302674.2025.2518463

-Yu, J., Tang, G., Song, X., Yu, X., Qi, Y., Li, D., & Zhang, Y. (2018). Ship arrival prediction and its value on daily container terminal operation. *Ocean Engineering*, 157, 73–86.

doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.038

-Zehendner, E., & Feillet, D. (2014). Benefits of a truck appointment system on the service quality of inland transport modes at a multimodal container terminal. *European Journal of Operational Research*, 235(2), 461–469

-Gross, D., Shortle, J. F., Thompson, J. M., & Harris, C. M. (2008). *Fundamentals of queueing theory (4th ed.)*. Wiley.

-Kuo, T.-C., Huang, W.-C., Wu, S.-C., & Cheng, P.-L. (2006). A case study of inter-arrival time distributions of container ships. *Journal of Marine Science and Technology*, 14(3), 161–166.

doi.org/10.51400/2709-6998.2069

-Luo, Q., Song, P., & Zhou, Y. (2024). An improved equilibrium optimizer for solving multi-quay berth allocation problem. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 17, 177.

doi.org/10.1007/s44196-024-00585-7

-Min, H., & Park, B.-I. (2008). Hybrid data envelopment analysis and simulation methodology for measuring capacity utilisation and throughput efficiency of container terminals. Management Faculty Publications, 3. Bowling Green State University.

-Park, K., Kim, M., & Bae, H. (2024). A predictive discrete event simulation for predicting operation times in container terminal. *IEEE Access*, 12, 10.1109/ACCESS.2024.3389961.

doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3389961

-Petering, M. and Murty, K. (2009). Effect of block length and yard crane deployment systems on overall performance at a seaport container transshipment terminal. *Computers and Operations Research*, 36:1711–1725.

Application of Discrete Event Simulation in Optimizing Maritime, Port and Shipping Operations

Seyede Masoome Sadaghi, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Mona Moghadam, Research Expert, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: S.Sadaghi@bhrc.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Given the critical role of ports in the global supply chain and the ever-increasing volume of maritime trade, optimizing port operations is of paramount importance. Discrete Event Simulation (DES) is an effective tool for analyzing and improving the efficiency of such complex systems. This research aims to investigate the application of DES in optimizing shipping, port and maritime transportation operations. The study begins with a systematic review of relevant research on modeling and simulation in the port sector, explaining the role of hybrid approaches like DES–DEA in analyzing terminal efficiency. Subsequently, a sample model is simulated using Arena software. This model incorporates processes such as vessel arrivals, tugboat allocation, berthing and operational delays. Input parameters are defined based on statistical distributions derived from credible scientific studies and available statistical data to represent the real-world performance pattern of a port. This example demonstrates the capabilities of simulation for developing dynamic resource allocation policies to enhance productivity in ports and maritime transport. In conclusion, Discrete Event Simulation proves to be an efficient tool for supporting managerial decision-making and designing optimal resource allocation strategies in the port and maritime domain.

Keywords: Queueing Theory, Discrete Event Simulation, Port Operations Optimization, Arena Software