Journal of Intelligent Financial Management

ISSN: 3116-0964

Life Cycle Cost and Cost-Effectiveness Analysis of Modernization Strategies for Tactical Heavy Transport Vehicle Fleets

Mohammadreza Nasiri Jan Agha[1], Hamid Bigdeli [2*], Reza Roshani [3]

[1] *Department of Science and Technology Studies, AJA Command and Staff University, Tehran, Iran*

[2*] *Department of Science and Technology Studies, AJA Command and Staff University, Tehran, Iran (Coresponding autour), Email: hamidbigdeli92@gmail.com*

[3] *Logistics and Finance Specialized Training Group, Support and Staff College, I.R.I Army Command and Staff College, Tehran, Iran*

ARTICLE INFO

Article history:
Received:30/07/2026
Received in revised form:17/09/2026
Accepted:11/11/2026
Available online:11/11/2026

Keywords:

Life Cycle Cost; Cost-Effectiveness Analysis
Defense Economics
Asset Budgeting
System Dynamics
Asset Management
Sanctions
Decision Making

ABSTRACT

Procurement, modernization, and service-life extension decisions regarding military logistical assets represent some of the costliest and irreversible financial commitments for armed forces. The majority of the life-cycle cost for these assets arises not at the point of acquisition, but rather over decades of operation in the form of maintenance, human resources, workshop capacity, and spare parts. Under conditions of defense budget constraints and economic sanctions, this study aims to simultaneously evaluate the financial and capability-based implications of fleet management strategies for the tactical heavy transport vehicles of the Islamic Republic of Iran Army Ground Force. It localizes and expands upon the system dynamics-based decision support methodology proposed by Elsawah et al. (2024). The proposed model represents a two-tier fleet, repair bays, industrial technicians, conscript-based crews, and a sanctioned spare parts supply chain, coupled with an eight-component life cycle cost index, supplemented by a "robustness and stress-testing" phase (two-way sensitivity analysis, Monte Carlo simulation, and combined sanction-crisis scenarios).

Nine strategies were evaluated using hypothetical yet realistic data over a 30-year horizon from the perspective of cost-capability trade-offs and incremental cost-effectiveness ratios. The results indicate that rapid fleet replacement is the lowest-cost option; however, it creates a "capability valley" with a cumulative gap of 9,424 vehicle-weeks. A 10-year service-life extension reduces this gap by 72%, but increases life-cycle costs by 29% and decreases availability from 77.4% to 60.8%. The marginal cost per vehicle-week of gap reduction ranges from approximately 0.42 units for life-cycle extension to 1.2 units with the addition of repair bays, and reaches 4.1 units by doubling the technical workforce, reflecting diminishing returns on unilateral investments in complementary resources. Staged procurement and the resource-resilience policy reduce life-cycle costs by 1.4% and 0.9%, respectively, without compromising capability. Under sanction and crisis conditions, the resilience policy based on strategic reserves and sourcing 50% of parts from domestic production reduces the capability gap by 70% with a 9.2% additional cost, making it the most cost-effective incremental step among the tested policies, at approximately 0.12 units per vehicle-week. The proposed methodology provides a transparent "policy laboratory" for the cost-effective allocation of logistics and sustainment budgets, while avoiding illusory savings.

Article Type: Research Paper

Journal of Intelligent Financial Management, 2026, Vol. 2, No.3, pp. 441- 466

Publish by:
Tolou-e Binish-e Ayandeh Scientific Institute

https://doi.org/10.25843/JIFM.2025.8563.236302

©Authors

Cite: Nasiri Jan Agha, M., Bigdeli, H. & Roshani, R. (2026). Life Cycle Cost and Cost-Effectiveness Analysis of Modernization Strategies for Tactical Heavy Transport Vehicle Fleets. Journal of Intelligent Financial Management, 2(3), 441-466.

نگرش های
مدیریت مالی هوشمند
Journal of Intelligent Financial Management
ISSN: 3116-0964

تحلیل هزینه چرخه عمر و هزینه–اثربخشی راهبردهای نوسازی ناوگان خودروهای ترابری سنگین تاکتیکی

محمدرضا نصیری جان آقا[1]، حمید بیگدلی[2]*، رضا روشنی[3]

۱ – گروه علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران

۲ و * – گروه علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران (نویسنده مسئول)، ایمیل نویسنده مسئول: *hamidbigdeli92@gmail.com*

۳ – گروه آموزش های تخصصی لجستیک و مالی، دانشکده پشتیبانی و ستاد، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۰

کلیدواژه‌ها:

هزینه چرخه عمر

تحلیل هزینه–اثربخشی

اقتصاد دفاع؛ بودجه‌ریزی دارایی

پویایی سیستم

مدیریت دارایی

تحریم

تصمیم‌گیری مقاوم

چکیده

تصمیمات خرید، نوسازی و تمدید عمر دارایی‌های لجستیکی نظامی از پرهزینه‌ترین و برگشت‌ناپذیرترین تصمیمات مالی نیروهای مسلح است و بخش عمده هزینه چرخه عمر این دارایی‌ها نه در زمان خرید، بلکه طی دهه‌ها بهره‌برداری در قالب هزینه نگهداری، نیروی انسانی، ظرفیت تعمیرگاهی و قطعات یدکی پدید می‌آید. در شرایط محدودیت بودجه دفاعی و تحریم، این پژوهش با هدف ارزیابی هم‌زمان پیامدهای مالی و قابلیتی راهبردهای مدیریت ناوگان خودروهای ترابری سنگین تاکتیکی نیروی زمینی ارتش جمهوری اسلامی ایران، روش‌شناسی پشتیبان تصمیم مبتنی بر پویایی سیستم الساوه و همکاران (۲۰۲۴) را بومی‌سازی و توسعه می‌دهد. مدل پیشنهادی ناوگان دورده‌ای، جایگاه‌های تعمیرگاه، تکنسین‌های صنعتی، خدمه مبتنی بر خدمت وظیفه و زنجیره تأمین قطعات یدکی تحت تحریم را همراه با یک شاخص هزینه چرخه عمر هشت‌جزئی بازنمایی می‌کند و گام «آزمون استواری و تنش» (تحلیل حساسیت دوطرفه، شبیه‌سازی مونت‌کارلو و سناریوی ترکیبی تحریم و بحران) به آن افزوده شده است. نه راهبرد با داده‌های فرضی اما واقع‌گرایانه در افق ۳۰ ساله از منظر مبادله هزینه–قابلیت و نسبت هزینه–اثربخشی افزایشی ارزیابی شد.

نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی سریع ناوگان کم‌هزینه‌ترین گزینه است، اما «دره قابلیت»ی با شکاف تجمعی ۹٬۴۲۴ خودرو–هفته ایجاد می‌کند؛ تمدید ۱۰ ساله عمر، شکاف را ۷۲٪ کاهش، اما هزینه چرخه عمر را ۲۹٪ افزایش و دسترس‌پذیری را از ۷۷٫۴٪ به ۶۰٫۸٪ کاهش می‌دهد. هزینه نهایی هر خودرو–هفته کاهش شکاف از حدود ۰٫۴۲ واحد در تمدید عمر به ۱٫۲ واحد با افزودن جایگاه تعمیرگاه و ۴٫۱ واحد با دو برابر کردن نیروی فنی می‌رسد که بیانگر بازده نزولی سرمایه‌گذاری یک‌جانبه در منابع مکمل است. خرید مرحله‌ای و سیاست مقاوم منابع، بدون کاهش قابلیت، به ترتیب ۱٫۴٪ و ۰٫۹٪ از هزینه چرخه عمر می‌کاهند. تحت تحریم و بحران، سیاست تاب‌آوری مبتنی بر ذخیره راهبردی و تأمین ۵۰ درصد قطعات از تولید داخلی، با ۹٫۲٪ هزینه اضافی شکاف قابلیت را ۷۰٪ کاهش می‌دهد و با حدود ۰٫۱۲ واحد به ازای هر خودرو–هفته، هزینه–اثربخش‌ترین گام افزایشی در میان سیاست‌های آزموده‌شده است. روش‌شناسی ارائه‌شده «آزمایشگاه سیاستی» شفافی برای تخصیص هزینه–اثربخش بودجه آماد و پشتیبانی و پرهیز از صرفه‌جویی‌های ظاهری فراهم می‌کند.

نشریه مدیریت مالی هوشمند، ۱۴۰۵، دوره ۲، شماره ۳، صفحه ۴۴۱-۴۶۶.

ناشر: موسسه علمی طلوع بینش آینده

https://doi.org/ 10.25843/JIFM.2025.8563.236302

نوع مقاله: پژوهشی

© نویسندگان

استناد: نصیری جان آقا، محمدرضا و بیگدلی، حمید و روشنی، رضا. (۱۴۰۵). تحلیل هزینه چرخه عمر و هزینه–اثربخشی راهبردهای نوسازی ناوگان خودروهای ترابری سنگین تاکتیکی. *مدیریت مالی هوشمند*، ۲(۳)، ۴۴۱- ۴۶۶.

۱. مقدمه

مدیریت دارایی‌های لجستیکی یکی از ارکان تعیین‌کننده آمادگی رزمی نیروهای مسلح است. سازمان بین‌المللی استانداردسازی، مدیریت دارایی را «فعالیت هماهنگ یک سازمان برای خلق ارزش از دارایی‌ها» تعریف می‌کند (ISO ۵۵۰۰۰, ۲۰۱۴). در نیروی زمینی ارتش جمهوری اسلامی ایران، ناوگان خودروهای ترابری سنگین تاکتیکی (کشنده‌های تانک‌بر، کامیون‌های سنگین حمل مهمات و سوخت، و خودروهای امداد و تعمیر صحرایی) نمونه‌ای روشن از یک دارایی راهبردی است: عمر خدمتی آن به چند دهه می‌رسد، تصمیم به خرید یا نوسازی آن سرمایه‌گذاری کلان و تقریباً برگشت‌ناپذیری است، و بهره‌برداری از آن به چند منبع راهبردی دیگر، یعنی تعمیرگاه‌های سطح بالا، نیروی فنی متخصص، خدمه آموزش‌دیده و زنجیره تأمین قطعات یدکی وابسته است. از منظر اقتصادی، چنین دارایی‌ای یک تعهد مالی بلندمدت است: هزینه خرید تنها بخش آشکار «کوه یخ» هزینه است و بخش عمده هزینه چرخه عمر در طول دوره بهره‌برداری و پشتیبانی، یعنی در قالب نگهداری و تعمیرات، نیروی انسانی، ظرفیت تعمیرگاهی و قطعات یدکی پدید می‌آید (Blanchard & Fabrycky, ۱۹۹۱; Woodward, ۱۹۹۷).

تجربه جنگ‌های اخیر نشان می‌دهد که سامانه‌های پشتیبانی خدمات رزمی، علی‌رغم پراکندگی گسترده، باید یگان‌های خط مقدم را در زمان مناسب و در منطقه عملیاتی صحیح پشتیبانی کنند؛ و در تقابل‌های کوتاه‌مدت آینده، سرعت کنش و واکنش لجستیکی ممکن است سرنوشت‌ساز باشد. در عین حال، ناوگان لجستیکی نیروهای مسلح کشور با سه فشار هم‌زمان روبه‌روست: فرسودگی بخشی از ناوگان موجود و افزایش هزینه نگهداری آن؛ محدودیت بودجه دفاعی و منابع انسانی برای نوسازی، در شرایطی که هزینه واقعی تجهیزات نظامی در هر نسل با نرخی بیش از تورم عمومی افزایش می‌یابد (Kirkpatrick, ۲۰۰۴)؛ و اختلال در زنجیره تأمین قطعات یدکی ناشی از تحریم‌ها که قیمت، زمان تدارک و عدم‌قطعیت تأمین را افزایش می‌دهد (te Hufbauer et al., ۲۰۰۷). این سه فشار مستقل از یکدیگر نیستند؛ تصمیم درباره یکی (مثلاً تمدید عمر ناوگان قدیمی برای پر کردن شکاف قابلیت) با تأخیر و از طریق حلقه‌های بازخوردی بر دیگری (بار تعمیرگاه‌ها و مصرف قطعات) اثر می‌گذارد و هزینه‌هایی پنهان و تأخیری ایجاد می‌کند که در بودجه سالانه دیده نمی‌شوند.

در چنین شرایطی، پرسش کلیدی برای ستاد آماد و پشتیبانی و حوزه‌های برنامه و بودجه صرفاً «کدام راهبرد قابلیت بیشتری ایجاد می‌کند؟» نیست، بلکه «هر واحد بودجه در کدام منبع بیشترین آمادگی را خلق می‌کند؟» است. اقتصاد دفاع، مسئله محوری را تخصیص منابع کمیاب میان مصارف رقیب برای بیشینه‌سازی توان دفاعی می‌داند و هزینه–اثربخشی را معیار اصلی این انتخاب معرفی می‌کند (McKean & Hitch, ۱۹۶۰; Sandler & Hartley, ۱۹۹۵). با این حال، ارزیابی‌های هزینه در عمل اغلب ایستا و جزءنگرند: هزینه خرید جدا از هزینه پشتیبانی بررسی می‌شود، صرفه‌جویی در یک قلم (مانند کاهش جذب نیرو یا تعویق احداث تعمیرگاه) بدون محاسبه اثر تأخیری آن بر آمادگی و سایر اقلام هزینه پذیرفته می‌شود، و ریسک مالی ناشی از عدم‌قطعیت و تحریم در برآورد هزینه لحاظ نمی‌شود. پیامد چنین رویکردی ممکن است «صرفه‌جویی ظاهری» باشد که بهای واقعی آن با افت آمادگی یا هزینه‌های بزرگ‌تر در آینده پرداخت می‌شود.

ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که مسائل برنامه‌ریزی دارایی و منابع نظامی، شامل اندازه و ترکیب ناوگان، زمان‌بندی نوسازی و تمدید عمر، تحلیل چرخه عمر، برنامه‌ریزی نیروی انسانی، طراحی شبکه پشتیبانی و راهبرد نگهداری و تعمیرات، اغلب به‌صورت جداگانه حل می‌شوند (Gräßler et al., ۲۰۱۵). برای مثال، در تعیین اندازه بهینه ناوگان معمولاً فرض می‌شود نیروی انسانی لازم «در دسترس» است. چنین نگاه تقلیل‌گرایانه‌ای ممکن است به بهبود عملکرد یک زیرسامانه به بهای تضعیف زیرسامانه دیگر منجر شود. الساوه و همکاران (Elsawah et al., ۲۰۲۴) برای پر کردن این شکاف، یک روش‌شناسی پشتیبان تصمیم سه‌مرحله‌ای مبتنی بر پویایی سیستم ارائه کردند و آن را در طراحی سامانه پشتیبانی ناوگان زیردریایی نیروی دفاعی استرالیا به کار بردند.

پژوهش حاضر در راستای پاسخ به این سؤال طراحی شده است:

- چگونه می‌توان از مدل‌سازی پویایی سیستم برای ارزیابی هم‌زمان پیامدهای مالی (هزینه چرخه عمر) و قابلیتی راهبردهای مدیریت دارایی‌های لجستیکی نظامی و تخصیص هزینه–اثربخش بودجه میان منابع مکمل استفاده کرد؟

نوآوری‌های مقاله جاری عبارت‌اند از:

بومی‌سازی ساختار مدل برای شرایط نیروی زمینی آجا، از جمله زنجیره نیروی انسانی مبتنی بر خدمت وظیفه با ترخیص دوره‌ای خدمه آموزش‌دیده، که با زنجیره نیروی حرفه‌ای در مدل مرجع تفاوت ماهوی دارد؛

در نظر گرفتن ماژول قطعات یدکی و اختلال تأمین، شامل تأخیر و سقف واردات در دوره تحریم و گزینه تولید بومی؛

استفاده از آزمون استواری و تنش، که شامل تحلیل حساسیت دوطرفه، شبیه‌سازی مونت‌کارلو و سناریوی ترکیبی تحریم و جهش تقاضای بحران؛ و نشان دادن اینکه سیاست بهینه قطعی می‌تواند در برابر عدم‌قطعیت شکننده باشد؛

ادغام شاخص هزینه چرخه عمر هشت‌جزئی (خرید، تمدید عمر، جایگاه، بهره‌برداری، نگهداری، نیروی فنی، خدمه و قطعات) در کنار شاخص‌های آمادگی و تحلیل مبادله هزینه–قابلیت و نسبت هزینه–اثربخشی افزایشی راهبردها تحت عدم‌قطعیت، در پاسخ به هدف فرعی طرح درباره کاهش هزینه‌های تأمین و نگهداری.

ساختار مقاله به این شرح است: بخش ۲ مبانی نظری و پیشینه پژوهش را مرور می‌کند. بخش ۳ مسئله و بستر مطالعه موردی را توصیف می‌کند. بخش ۴ روش‌شناسی پیشنهادی و مدل پویایی سیستم را تشریح می‌کند و بخش ۵ به اعتبارسنجی مدل می‌پردازد. بخش ۶ نتایج آزمایش‌های شبیه‌سازی را ارائه می‌کند و بخش ۷ یافته‌ها را بحث کرده، دلالت‌های مدیریتی را برای فرماندهان و ستاد آماد و پشتیبانی بیان می‌کند. بخش ۸ نتیجه‌گیری، محدودیت‌ها و پیشنهادهای آتی را در بر دارد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱. راهبرد مدیریت دارایی و منابع به‌عنوان مسئله‌ای پویا و پیچیده

دارایی راهبردی دارایی‌ای است که آن‌قدر مهم باشد که بر تصمیمات راهبردی و ارزش‌های ذی‌نفعان اثر بگذارد، و منبع راهبردی عاملی کلیدی برای عملکرد فعلی و آینده دارایی‌هاست، نه صرفاً نهاده‌ای برای عملیات روزمره (GrößerI, ۲۰۰۷; Amit & Schoemaker, ۱۹۹۳). تدوین راهبرد برای چنین دارایی‌هایی چهار ویژگی دشوار دارد (Sterman, ۲۰۰۰):

وابستگی به مسیر: تصمیمات بلندمدت و تقریباً برگشت‌ناپذیرند؛ خرید یک ناوگان پیامدهای عملیاتی و اقتصادی چنددهه‌ای دارد.

پیچیدگی پویا: عملکرد هر راهبرد حاصل تعامل بازخوردی تصمیماتی است که در بخش‌های پراکنده سازمان (خرید، نگهداری، نیروی انسانی، زنجیره تأمین) گرفته می‌شود.

تأخیر و مبادله: اثر برخی تصمیمات (مانند کاهش جذب نیرو) در کوتاه‌مدت مثبت و در بلندمدت منفی است.

زیرسامانه‌های به‌هم‌پیوسته: استفاده مشترک از منابع و کاربرد دوگانه دارایی (عملیات و آموزش) زیرسامانه‌ها را به هم گره می‌زند.

۲-۲. مبانی اقتصادی مدیریت دارایی‌های دفاعی: هزینه چرخه عمر و هزینه–اثربخشی

اقتصاد دفاع، تصمیم‌گیری درباره دارایی‌های نظامی را مسئله‌ای از جنس تخصیص منابع کمیاب می‌داند: بودجه‌ای که صرف خرید ناوگان جدید می‌شود، دیگر برای نگهداری ناوگان موجود، توسعه تعمیرگاه یا آموزش نیروی انسانی در دسترس نیست و هزینه واقعی هر گزینه، هزینه فرصت گزینه‌های کنارگذاشته‌شده است (McKean & Hitch, ۱۹۶۰). از این منظر، هدف نه «کمینه‌سازی هزینه» و نه «بیشینه‌سازی قابلیت» به‌تنهایی، بلکه یافتن ترکیبی از منابع است که با بودجه معین بیشترین توان دفاعی را ایجاد کند یا سطح معینی از توان را با کمترین هزینه تأمین کند (Sandler & Hartley, ۱۹۹۵). هیچ و مک‌کین این دو صورت‌بندی هم‌ارز را مبنای تحلیل هزینه–اثربخشی در تصمیمات دفاعی معرفی کردند و هشدار دادند که معیارهای نسبتی ساده، بدون توجه به سطح بودجه و مقیاس گزینه‌ها، می‌توانند به انتخاب‌های نادرست منجر شوند.

هزینه چرخه عمر ابزار اصلی عملیاتی‌کردن این نگاه است و مجموع همه هزینه‌های یک دارایی از مفهوم‌پردازی و خرید تا بهره‌برداری، پشتیبانی و کنارگذاری را در بر می‌گیرد (Blanchard & Fabrycky, ۱۹۹۱; IEC ۶۰۳۰۰-۳-۳, ۲۰۱۷). فابریکی و بلانچارد با استعاره «کوه یخ» نشان دادند که هزینه خرید تنها بخش آشکار هزینه است و هزینه‌های بهره‌برداری و پشتیبانی که زیر سطح آب پنهان‌اند، معمولاً سهم بزرگ‌تری دارند؛ ضمن آنکه بخش عمده این هزینه‌ها در همان مراحل نخست تصمیم‌گیری متعهد می‌شود. مرورهای وودوارد (Woodward, ۱۹۹۷) و اسیدو و گو (Gu & Asiedu, ۱۹۹۸) نشان می‌دهند که کاربرد هزینه

چرخه عمر با دشواری برآورد هزینه‌های آینده در شرایط عدم‌قطعیت روبه‌روست و بیشتر مدل‌های هزینه ماهیتی ایستا و جمع‌پذیر دارند که وابستگی متقابل و پویای اقلام هزینه را نادیده می‌گیرد.

در حوزه دفاعی، دو پدیده اقتصادی این مسئله را تشدید می‌کند. نخست، هزینه واقعی واحد تجهیزات نظامی در هر نسل با نرخی بیش از تورم عمومی افزایش می‌یابد و در صورت ثابت ماندن بودجه، به کوچک‌شدن ناوگان یا افزایش عمر خدمتی دارایی‌های موجود می‌انجامد (rickKirkpat, ۲۰۰۴). دوم، با افزایش سن دارایی، نرخ خرابی و هزینه نگهداری افزایش و دسترس‌پذیری کاهش می‌یابد؛ از این رو تصمیم جایگزینی یا تمدید عمر در ادبیات اقتصاد نگهداری، مبادله‌ای میان هزینه سرمایه‌ای جایگزینی و هزینه فزاینده بهره‌برداری و نگهداری دارایی فرسوده است (Tsang & Jardine, ۲۰۱۳). مدل‌های کلاسیک جایگزینی این مبادله را معمولاً برای یک دارایی منفرد و با فرض در دسترس بودن منابع پشتیبانی حل می‌کنند؛ در حالی که در یک ناوگان، تمدید عمر بار تعمیرگاه، نیروی فنی و قطعات را افزایش می‌دهد و بخشی از هزینه واقعی آن از طریق صف و کاهش آمادگی کل ناوگان آشکار می‌شود (al et lerößGr., ۲۰۱۵).

تحلیل هزینه–اثربخشی در عمل با مقایسه افزایشی گزینه‌ها انجام می‌شود: گزینه‌ها بر اساس هزینه مرتب می‌شوند و برای هر گام، نسبت هزینه–اثربخشی افزایشی، یعنی هزینه اضافی به ازای هر واحد اثربخشی اضافی، محاسبه می‌شود (erFish, ۱۹۷۱; al et Boardman., ۲۰۱۸). این نسبت بازده نهایی هر واحد بودجه را آشکار می‌کند و نقطه‌ای را نشان می‌دهد که پس از آن سرمایه‌گذاری بیشتر در یک منبع بازده نزولی دارد. در مسائل دارایی نظامی، اثربخشی معمولاً با شاخص‌هایی مانند دسترس‌پذیری یا شکاف آمادگی سنجیده می‌شود و هزینه عدم آمادگی، هرچند پولی‌کردن آن دشوار است، باید به‌عنوان هزینه فرصت در تصمیم لحاظ شود. فیشر (Fisher, ۱۹۷۱) همچنین تأکید می‌کند که در تحلیل هزینه برای تصمیمات بلندمدت دفاعی، عدم‌قطعیت برآوردها باید به‌طور صریح تحلیل شود و مقایسه نسبی گزینه‌ها از دقت مطلق برآوردها مهم‌تر است.

در نهایت، تحریم‌های اقتصادی با محدودکردن تجارت و دسترسی به کالا و فناوری، هزینه‌هایی بر کشور هدف تحمیل می‌کنند (al et Hufbauer., ۲۰۰۷). در زنجیره تأمین قطعات یدکی، این هزینه به شکل افزایش قیمت، طولانی‌شدن زمان تدارک و افزایش ریسک توقف بهره‌برداری ظاهر می‌شود. پاسخ‌های اقتصادی به این شوک، مانند نگهداری ذخیره احتیاطی و جایگزینی واردات با تولید داخلی، خود هزینه‌بر هستند (هزینه نگهداری موجودی، سرمایه درگیر و هزینه احتمالاً بالاتر تولید داخلی) و ارزیابی آن‌ها مستلزم مقایسه این هزینه‌ها با هزینه اجتناب‌شده افت آمادگی است. پویایی سیستم، با بازنمایی صریح انباشت‌ها، جریان‌ها و تأخیرها، امکان ردیابی پویای اقلام هزینه و پیوند آن‌ها با شاخص‌های آمادگی را فراهم می‌کند و از این رو ابزاری مناسب برای تحلیل پویای هزینه چرخه عمر و هزینه–اثربخشی راهبردهای دارایی دفاعی است (Sterman, ۲۰۰۰; al et lerößGr., ۲۰۱۵).

۲-۳. جایگاه شبیه‌سازی در برنامه‌ریزی دارایی و منابع نظامی

رویکردهای تحلیلی و بهینه‌سازی ریاضی در این حوزه کاربرد گسترده دارند، اما معمولاً برای بازنمایی ویژگی‌های پویا و بازخوردی تصمیم‌گیری ساده‌سازی بیش از حد دارند. شبیه‌سازی‌های نظامی به سه دسته زنده، مجازی و سازنده تقسیم می‌شوند (et Hill al., ۲۰۰۱; Tolk & Hill, ۲۰۱۷) و مدل‌های برنامه‌ریزی دارایی در دسته سازنده قرار می‌گیرند. این مدل‌ها را می‌توان بر اساس سطح نگاه به سامانه به خُرد و کلان تقسیم کرد. مدل‌های خرد (مانند شبیه‌سازی گسسته‌پیشامد و عامل‌بنیان) برای تمرین مأموریت و برنامه‌ریزی تاکتیکی مفیدند اما به داده انبوه نیاز دارند و زمان اجرای آن‌ها ممکن است به چند ساعت یا چند هفته برسد (islerE & Allen, ۲۰۱۲). در مقابل، مدل‌های کلان سامانه را در سطح تجمیعی بازنمایی می‌کنند، به داده کمتری نیاز دارند، سریع اجرا می‌شوند و برای گفت‌وگوی راهبردی میان ذی‌نفعان مناسب‌ترند. به تعبیر بیسشاپ و میراوس، در چنین محیطی «مقدار مطلق نتایج مدل اهمیت چندانی ندارد، بلکه مقادیر نسبی حاصل از آزمون سناریوهای مختلف مورد توجه است؛ مدل ابزار یادگیری است و نباید از آن انتظار تصمیم نهایی داشت» (Meeraus & Bisschop, ۱۹۸۲).

۲-٤. پویایی سیستم در مسائل راهبردی نظامی

پویایی سیستم که بر نظریه کنترل بازخوردی و شبیه‌سازی رایانه‌ای استوار است (Forrester, ۱۹۶۱; Sterman, ۲۰۰۰)، سه مزیت برای تدوین راهبرد دارد: (۱) تمرکز بر روابط علّی میان تصمیمات، وضعیت منابع و شاخص‌های عملکرد، که توضیح می‌دهد چرا یک راهبرد رفتار خاصی بروز می‌دهد؛ (۲) هم‌خوانی ساختار انباشت و جریان با دیدگاه منبع‌محور راهبرد و تحلیل چرخه عمر (Warren, ۲۰۰۲; ۲۰۰۵)؛ و (۳) ماهیت سناریومحور که آزمون «چه می‌شود اگر» را بدون نیاز به داده‌های دقیق ممکن می‌کند. جدول ۱ مهم‌ترین مطالعات کاربرد پویایی سیستم در مسائل دارایی نظامی را خلاصه می‌کند.

جدول ۱. مرور مطالعات کاربرد پویایی سیستم در برنامه‌ریزی دارایی و منابع نظامی

پژوهش	سال انتشار	هدف مدل	دسته مسئله
& Andersen Emmerichs	۱۹۸۲	اثر سیاست‌های بازنشستگی، جدایی و جذب بر ترکیب و هزینه نیروی انسانی	نیروی انسانی
Gardiner & Coyle	۱۹۹۱	اثر تأخیرها و زمان تدارک بر تکمیل تعمیرات زیردریایی‌ها	زمان‌بندی ناوگان
al et Thomas	۱۹۹۷	اثر ترکیبی آموزش، بازنشستگی و جذب بر اندازه نیروی انسانی ارتش آمریکا	نیروی انسانی
.al et Adamides	۲۰۰۴	عملکرد بلندمدت نگهداری موتور هواپیمای نظامی با بازخورد منابع انسانی	نگهداری، نیروی انسانی
.al et McLucas	۲۰۰۶	روابط آمادگی هواگرد، نگهداری و نیروی انسانی در ورود بالگرد چندمنظوره	نگهداری، نیروی انسانی
.al et Fan	۲۰۱۰	علل اثر شلاقی در زنجیره تأمین نگهداری جنگ‌افزار	نگهداری، زنجیره تأمین
.al et Hudson	۲۰۱۷	اثر تأخیر سفارش بر تأمین مهمات در مأموریت (لجستیک نیروی زمینی)	زنجیره تأمین
al et Jnitova	۲۰۱۷	اثر طراحی خط لوله آموزش بر تأخیرهای آموزشی	نیروی انسانی، آموزش
al et Turan	a۲۰۲۰	اثر برنامه نوسازی ناوگان بر دسترس‌پذیری تحت عدم‌قطعیت	نوسازی ناوگان
.al et Jalalvand	۲۰۲۰	اثر تصمیمات نیروی انسانی و نوسازی بر هزینه و دسترس‌پذیری	نوسازی، نیروی انسانی
.al et Elsawah	۲۰۲۴	روش‌شناسی جامع دارایی و منابع در طول چرخه عمر (ناوگان زیردریایی)	جامع: ناوگان، نگهداری، نیروی انسانی، منطقه
پژوهش حاضر	۲۰۲۶	بومی‌سازی برای ناوگان لجستیکی زمینی با خدمه وظیفه، قطعات یدکی، تحریم و آزمون استواری	جامع، ریسک و استواری

مرور جدول ۱ نشان می‌دهد که کاربردهای پویایی سیستم عمدتاً بر یک زیرسامانه (نیروی انسانی یا نگهداری) متمرکز بوده‌اند و تنها مطالعه الساوه و همکاران نگاهی جامع و چرخه‌عمرمحور ارائه می‌کند. با این حال، سه شکاف همچنان باقی است: نخست، مدل‌های موجود برای ناوگان‌های دریایی و هوایی کشورهای دارای ارتش حرفه‌ای طراحی شده‌اند و پویایی خدمت وظیفه را که در ایران بخش مهمی از خدمه را تأمین می‌کند بازنمایی نمی‌کنند؛ دوم، قطعات یدکی و اختلال تأمین که برای نیروهای مسلح تحت تحریم مسئله‌ای محوری است، خارج از مرز مدل مانده است؛ و سوم، ارزیابی راهبردها به‌صورت قطعی و با آزمون و خطا انجام شده و استواری سیاست‌های پیشنهادی در برابر عدم‌قطعیت سنجیده نشده است (al et Elsawah، ۲۰۲۴). در داخل کشور نیز مطالعات پویایی سیستم بیشتر در حوزه حمل‌ونقل غیرنظامی و انتخاب شیوه سفر انجام شده و کاربرد آن در مدیریت چرخه عمر دارایی‌های لجستیکی نظامی کمتر دیده می‌شود. این مقاله بر هر سه شکاف تمرکز دارد.

۲-۵. مرور پژوهش‌های اخیر

برای بررسی پیشینه و تعیین دقیق جایگاه پژوهش حاضر، مطالعات منتشرشده در بازه ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ در چهار محور مرور شده است: (۱) برنامه‌ریزی یکپارچه ناوگان، نیروی انسانی و ظرفیت؛ (۲) نگهداری، قطعات یدکی و نیروی فنی؛ (۳) تصمیم‌گیری تحت عدم‌قطعیت عمیق؛ و (۴) تاب‌آوری زنجیره تأمین دفاعی.

۲-۵-۱. برنامه‌ریزی یکپارچه ناوگان، نیروی انسانی و ظرفیت

جریان اصلی پژوهش‌های اخیر، ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی (به‌ویژه پویایی سیستم) با الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. توران و همکاران (Turan et al.، ۲۰۲۲) مسئله توأم برنامه‌ریزی راهبردی نیروی انسانی و نوسازی ناوگان را صورت‌بندی کردند. در رویکرد آن‌ها یک الگوریتم ژنتیک راهبردهای جذب، ارتقا و زمان‌بندی جایگزینی دارایی‌ها را پیشنهاد می‌دهد و یک مدل پویایی سیستم مسیر شغلی کارکنان و چرخه عمر دارایی‌ها را شبیه‌سازی می‌کند؛ نتایج در مطالعه موردی نوسازی نیروی دریایی استرالیا کاهش قابل توجه هزینه را نشان داد. همین گروه در پژوهش دیگری، مکان‌یابی راهبردی تسهیلات، برنامه‌ریزی نیروی انسانی و تخصیص ظرفیت را به‌صورت چندهدفه و هم‌زمان بهینه کرد (Turan et al.، ۲۰۲۱a) و ترجیحات تصمیم‌گیرنده را در یک بهینه‌سازی ریسک‌گریز مبتنی بر شبیه‌سازی برای مسئله توأم نیروی انسانی، مدیریت دارایی و ناوگان وارد کرد (uranT et al.، ۲۰۲۱b).

علی و همکاران (Ali et al.، ۲۰۲۳) مسئله ترکیب و ارتقای ناوگان دارایی‌های دفاعی پرارزش را با رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی–بهینه‌سازی و یک مدل جانشین[1] حل کردند و در یک مطالعه موردی نیروی زمینی، ۲٫۴ درصد گسترش‌پذیری بیشتر نسبت به الگوریتم تکامل تفاضلی و ۷٫۲ درصد بیشتر نسبت به الگوریتم ژنتیک به دست آوردند. جلالوند و همکاران (Jalalvand et al.، ۲۰۲۶) یادگیری ماشین را در بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر شبی‌ه‌سازی برای مسئله توأم برنامه‌ریزی کارکنان، مدیریت دارایی و نوسازی ناوگان ادغام کردند تا بار محاسباتی ارزیابی راهبردها کاهش یابد. در داخل کشور، صالحی و همکاران (Salehi et al.، ۲۰۲۴) یک مدل بهینه‌سازی استوار، پشتیبانی‌شده با ابزارهای شبیه‌سازی، برای زمان‌بندی بهبود و جابه‌جایی ناوگان حمل‌ونقل نظامی نیروهای مسلح ارائه کردند و نشان دادند که این رویکرد در سناریوهای بررسی‌شده هزینه و زمان را کاهش می‌دهد.

۲-۵-۲. نگهداری، قطعات یدکی و نیروی فنی

توران و همکاران (Turan et al.، ۲۰۲۰b) ظرفیت نیروی فنی، سطح موجودی قطعات یدکی و اولویت‌های زمان‌بندی تعمیرات را در یک رویکرد ریسک‌گریز مبتنی بر شبیه‌سازی به‌صورت توأم بهینه کردند. عقل و همکاران (Akl et al.، ۲۰۲۲) برنامه‌ریزی راهبردی نیروی انسانی و زمان‌بندی نگهداری پیشگیرانه را با رویکرد شبیه‌سازی–بهینه‌سازی تلفیق کردند و کوسان‌اوغلو و همکاران (Kosanoglu et al.، ۲۰۲۴) برای یک مسئله برنامه‌ریزی نگهداری، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را با یادگیری تقویتی عمیق ترکیب کردند. اونیل و همکاران (O'Neil et al.، ۲۰۲۵) مدلی برای نگهداری انتخابی ناوگان ارائه کردند که تخصیص سامانه‌ها به مأموریت‌ها و نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر حسگر را تحت عدم‌قطعیت به‌صورت هم‌زمان تعیین می‌کند و آن را روی ناوگان هواگرد نظامی آزمودند. توران (Turan, ۲۰۲۶) نیز یک چارچوب شبیه‌سازی–بهینه‌سازی در سطح سامانه برای پشتیبانی از قطعات یدکی تعمیرپذیر پیشنهاد کرد.

از منظر تاب‌آوری تأمین قطعات، والتونن و همکاران (Valtonen et al.، ۲۰۲۳) با یک مدل شبیه‌سازی، ظرفیت ساخت افزایشی (چاپ سه‌بعدی فلزی) را برای پشتیبانی نگهداری یک گردان مکانیزه بررسی کردند. یافته آن‌ها این بود که با سرعت فعلی چاپ، این فناوری تاب‌آوری را در سطح انبار پشتیبانی بهبود نمی‌دهد و افزایش موجودی قطعات یدکی در حال حاضر گزینه بهتری است؛ این نتیجه با سیاست «ذخیره راهبردی قطعات» در پژوهش حاضر هم‌راستاست.

۲-۵-۳. تصمیم‌گیری تحت عدم‌قطعیت عمیق

یکی از روندهای برجسته سال‌های اخیر، گذار از بهینه‌سازی قطعی به تصمیم‌گیری مقاوم است. کاهاگالاگه و همکاران (Kahagalage et al.، ۲۰۲۴) با مدل‌سازی و تحلیل اکتشافی، راهبردی را که از بهینه‌سازی قطعی برای برنامه‌ریزی منابع نیروی دریایی استرالیا به دست آمده بود در فضای عدم‌قطعیت آزمودند و سه رویکرد تصمیم‌گیری مقاوم، کشف سناریوی مبتنی بر رفتار و فضای سناریوی شدنی را مقایسه کردند. نتیجه کلیدی آن‌ها این بود که اتکا به «بهترین برآورد شرایط» در استفاده پیش‌بینانه از مدل‌های شبیه‌سازی می‌تواند گمراه‌کننده باشد. توران و همکاران (Turan et al.، ۲۰۲۶a) دو چارچوب تصمیم‌گیری استوار چندهدفه (MORDM و MORO) را برای راهبردهای جذب، ارتقا و گذار ناوگان مقایسه کردند و نشان دادند MORO راهبردهای مقاوم‌تری تولید می‌کند، اما هزینه محاسباتی آن حدود ده برابر است. شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری مقاوم برای بهینه‌سازی

[1] Surrogate

نگهداری دارایی‌ها و مدیریت نیروی انسانی نظامی نیز به کار رفته است (Turan et al., ۲۰۲۶b). در حوزه نیروی انسانی، مک‌دونالد و پال (Paul & MacDonald, ۲۰۲۴) یک مدل پویای تصادفی برای برآورد احتمال کمبود یا مازاد کارکنان در درجه‌های مختلف و ارزیابی سیاست‌های جذب، آموزش و نگهداشت با هدف حفظ آمادگی ارائه کردند.

۲-۵-٤. تاب‌آوری زنجیره تأمین دفاعی

ثانی و همکاران (Sani et al., ۲۰۲۲) با مرور ادبیات دوازده سال گذشته نشان دادند که بیشتر پژوهش‌ها بر واکنش و بازیابی پس از اختلال تمرکز دارند و زنجیره‌های تأمین نظامی به راهبردهای «تاب‌آوری پیش‌دستانه» نیاز دارند. همین گروه سپس یک مدل پشتیبان تصمیم مبتنی بر مسئله تصمیم سازشی ارائه کردند که به جای یک جواب بهینه، مجموعه‌ای از جواب‌های رضایت‌بخش را برای اهداف زمان تدارک، تأمین تقاضا و بهره‌وری وسایل نقلیه تولید می‌کند، و نشان دادند که در شرایط اختلال فضای جواب ناپایدار می‌شود (Sani et al Mohammed, ۲۰۲۳).

ارمستون و همکاران (Urmston et al., ۲۰۲۴) با روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA)، یک مدل ارزیابی ریسک و تاب‌آوری تأمین‌کنندگان صنایع نظامی با در نظر گرفتن اختلال‌های نادر ارائه کردند. آسپتگ و همکاران (Aspeteg et al., ۲۰۲۶) با تحلیل گزارش‌های سالانه شرکت‌های دفاعی در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ نشان دادند که پس از ۲۰۲۲ ظرفیت و دسترس‌پذیری تأمین‌کنندگان به نگرانی غالب تبدیل شده و شرکت‌ها ترکیبی از راهبردهای «پل‌زنی» (هماهنگی بیرونی) و «ضربه‌گیری» (ذخیره و افزونگی داخلی) را به کار می‌گیرند. حامد و همکاران (Hamed et al., ۲۰۲۴) نیز با یک مدل پویایی سیستم نشان دادند که تنوع‌بخشی منابع تأمین می‌تواند ریسک زنجیره تأمین مواد راهبردی را کاهش دهد.

۲-۵-۵. جمع‌بندی و جایگاه پژوهش حاضر

مرور پژوهش‌های گذشته چهار نکته را آشکار می‌کند. نخست، رویکرد غالب، ترکیب شبیه‌سازی (اغلب پویایی سیستم) با بهینه‌سازی و در سال‌های اخیر با تصمیم‌گیری مقاوم است؛ این روند، افزودن گام چهارم روش‌شناسی پیشنهادی (آزمون استواری و تنش) را تأیید می‌کند. دوم، تقریباً همه این مطالعات بر ناوگان دریایی یا هوایی ارتش‌های حرفه‌ای متمرکزند و پویایی خدمه مبتنی بر خدمت وظیفه و ناوگان لجستیکی زمینی در آن‌ها بازنمایی نشده است. سوم، مطالعات تاب‌آوری زنجیره تأمین دفاعی عمدتاً کیفی یا مبتنی بر ارزیابی ریسک تأمین‌کنندگان هستند و اثر اختلال در تأمین قطعات (مانند تحریم) را در کنار تصمیمات گذار ناوگان، ظرفیت تعمیرگاه و نیروی انسانی در یک مدل پویای یکپارچه بررسی نکرده‌اند. چهارم، اگرچه برخی از این مطالعات کاهش هزینه را به‌عنوان یکی از اهداف یا نتایج بهینه‌سازی گزارش کرده‌اند (Turan et al., ۲۰۲۲; Salehi et al., ۲۰۲۴)، تحلیل تفکیک‌شده و پویای هزینه چرخه عمر و ارزیابی هزینه–اثربخشی افزایشی سرمایه‌گذاری در منابع مکمل (ناوگان، تعمیرگاه، نیروی فنی، خدمه و قطعات) تحت عدم‌قطعیت و تحریم کمتر مورد توجه بوده است. پژوهش حاضر با تلفیق این ابعاد قابلیتی و مالی در یک مدل پویایی سیستم برای ناوگان ترابری سنگین نیروی زمینی، این شکاف را هدف قرار می‌دهد.

۳. بیان مسئله و مطالعه موردی

نیروی زمینی برای پشتیبانی از یگان‌های مانوری خود به ناوگانی از خودروهای ترابری سنگین تاکتیکی متکی است که مأموریت جابه‌جایی تجهیزات زرهی، مهمات، سوخت و اقلام پشتیبانی را بر عهده دارد. فرض مطالعه موردی این است که ناوگان فعلی شامل ۱۲۰ دستگاه خودروی نسل قدیم با میانگین سنی ۲۲ سال است و برنامه‌ای برای ورود ۱۲۰ دستگاه خودروی نسل جدید (تولید داخل) طی سال‌های ۱ تا ۱۰ افق برنامه‌ریزی وجود دارد. سطح آمادگی الزامی، ۹۰ دستگاه مأموریت‌پذیر در هر هفته تعیین شده است. هر خودرو در طول عمر خود میان وضعیت‌های «در انتظار به‌کارگیری»، «عملیاتی»، «صف تعمیرات»، «در تعمیر» و «معاینه فنی و صدور گواهی آمادگی» جابه‌جا می‌شود و برای عملیاتی شدن به دو نفر خدمه آموزش‌دیده نیاز دارد.

تصمیم‌گیران در این بستر با پرسش‌های به‌هم‌پیوسته‌ای روبه‌رو هستند: آیا عمر ناوگان قدیم تمدید شود یا سریع کنار گذاشته شود؟ آیا خرید بیشتر لازم است و اگر آری، یکجا یا مرحله‌ای؟ ظرفیت تعمیرگاه‌ها و نیروی فنی صنعتی (کارکنان صنایع دفاعی و پیمانکاران) چقدر باید باشد؟ نرخ جذب و آموزش خدمه با توجه به ترخیص دوره‌ای سربازان وظیفه چگونه تنظیم شود؟ و ناوگان در برابر تحریم قطعات و جهش تقاضای زمان بحران چقدر تاب‌آور است؟ این پرسش‌ها مستقیماً با سؤالات فرعی طرح تحقیقاتی (عوامل مؤثر بر کارایی زنجیره تأمین، شبیه‌سازی تعاملات اجزا، تعریف سناریوها، تحلیل اثر تغییر ورودی‌ها و استفاده از نتایج برای کاهش هزینه) منطبق‌اند.

به دلیل طبقه‌بندی اطلاعات ناوگان و منابع نیروهای مسلح، همانند مطالعه مرجع (Elsawah et al., ۲۰۲۴)، همه داده‌ها و سناریوهای این مقاله بصورت الگویابی هستند و برای نمایش کارکرد روش‌شناسی طراحی شده‌اند. بنابراین مقادیر مطلق نتایج نباید به‌عنوان برآورد وضعیت واقعی آجا تفسیر شود؛ آنچه اعتبار دارد الگوهای رفتاری و مقایسه نسبی گزینه‌هاست. روش‌شناسی به گونه‌ای طراحی شده که با جایگزینی داده‌های واقعی در محیط طبقه‌بندی‌شده قابل اجرا باشد.

٤. روش‌شناسی پشتیبان تصمیم

روش‌شناسی پیشنهادی (شکل ۱) از سه گام روش‌شناسی مرجع، یعنی (۱) طراحی راهبرد مدیریت دارایی، (۲) ارزیابی راهبرد با مدل شبیه‌سازی پویایی سیستم و (۳) تولید شاخص‌های عملکرد و تحلیل نتایج، به‌علاوه یک گام چهارم برای آزمون استواری و تنش تشکیل شده است. فرایند مدل‌سازی از گام‌های استاندارد استرمن (Sterman, ۲۰۰۰) شامل تبیین مسئله، فرضیه پویا، صورت‌بندی، آزمون و طراحی و ارزیابی سیاست پیروی کرده است.



شکل ۱. روش‌شناسی پشتیبان تصمیم پیشنهادی

٤-۱. گام اول: طراحی راهبرد

راهبرد برداری از متغیرهای تصمیم است که پیکربندی سامانه را تعیین می‌کند. جدول ۲ مؤلفه‌های راهبرد، متغیرهای تصمیم و مسائل متناظر را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های «قطعات یدکی» و «ریسک و تاب‌آوری» در این پژوهش اضافه شده‌اند و مؤلفه نیروی انسانی برای خدمت وظیفه بازتعریف شده است.

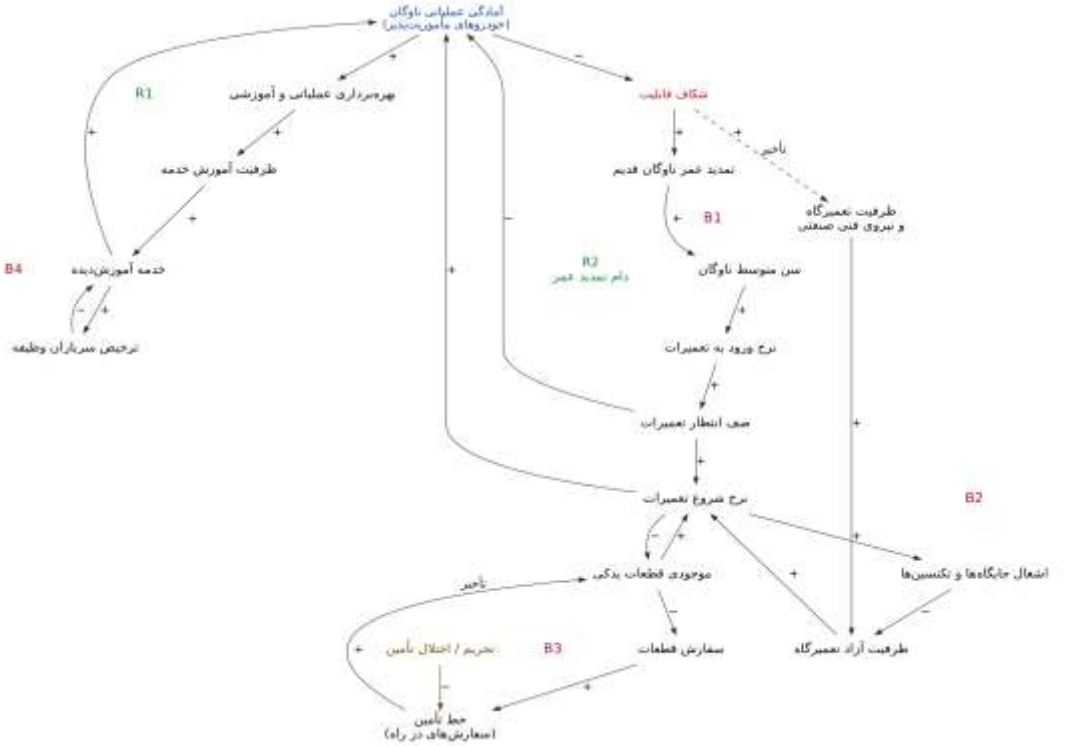
جدول ۲. مؤلفه‌های راهبرد و متغیرهای تصمیم در روش‌شناسی بومی‌سازی‌شده

مؤلفه راهبرد	متغیرهای تصمیم (ورودی‌ها)	مسئله تصمیم
ترکیب دارایی	تعداد رده‌ها (قدیم، جدید)؛ تعداد خودرو در هر رده	اندازه و ترکیب ناوگان
برنامه خدمت	نرخ و زمان ورود خودروهای جدید؛ زمان شروع و طول دوره خروج ناوگان قدیم؛ مدت تمدید عمر	گذار ناوگان و تمدید عمر
چرخه عمر	توالی وضعیت‌ها؛ دوره کارکرد بین سرویس‌ها؛ زمان تعمیر و معاینه فنی؛ اثر سن بر خرابی	برنامه‌ریزی چرخه عمر
نگهداری و ظرفیت	تعداد جایگاه تعمیرگاه و زمان افزودن آن؛ تکنسین مورد نیاز هر رده؛ سطح هدف تکنسین‌ها	نگهداری و برنامه‌ریزی منابع
نیروی انسانی (خدمه)	نرخ جذب؛ زمان آموزش؛ ظرفیت آموزش وابسته به خودروهای عملیاتی؛ مدت باقی‌مانده خدمت وظیفه	برنامه‌ریزی نیروی انسانی و آموزش
قطعات یدکی *(جدید)*	مصرف قطعه هر رده؛ زمان تدارک؛ سقف واردات؛ پوشش موجودی هدف؛ سهم تولید بومی؛ ذخیره راهبردی	زنجیره تأمین
ریسک و تاب‌آوری *(جدید)*	دوره و شدت تحریم؛ دوره، شدت و آستانه بحران	مدیریت ریسک

۴-۲. فرضیه پویا و نمودار علت و معلولی

شکل ۲ ساختار علّی حاکم بر آمادگی ناوگان را نشان می‌دهد. حلقه تقویتی R۱ ناشی از کاربرد دوگانه خودروها در عملیات و آموزش است: آمادگی بیشتر، بهره‌برداری بیشتر و در نتیجه ظرفیت آموزش خدمه بیشتر را به دنبال دارد و خدمه بیشتر امکان عملیاتی شدن خودروهای بیشتری را فراهم می‌کند. بنابراین کاهش آمادگی علاوه بر شکاف فوری، با تأخیر از طریق کاهش آموزش نیز به شکاف بیشتر منجر می‌شود. حلقه تقویتی R۲ (دام تمدید عمر) این پژوهش را از مدل مرجع متمایز می‌کند: شکاف قابلیت، تصمیم‌گیران را به تمدید عمر ناوگان قدیم سوق می‌دهد؛ تمدید عمر میانگین سن ناوگان را بالا برده، نرخ خرابی و ورود به تعمیرات را افزایش می‌دهد و صف تعمیرات را طولانی‌تر می‌کند که خود آمادگی را کاهش داده و شکاف را تشدید می‌کند.

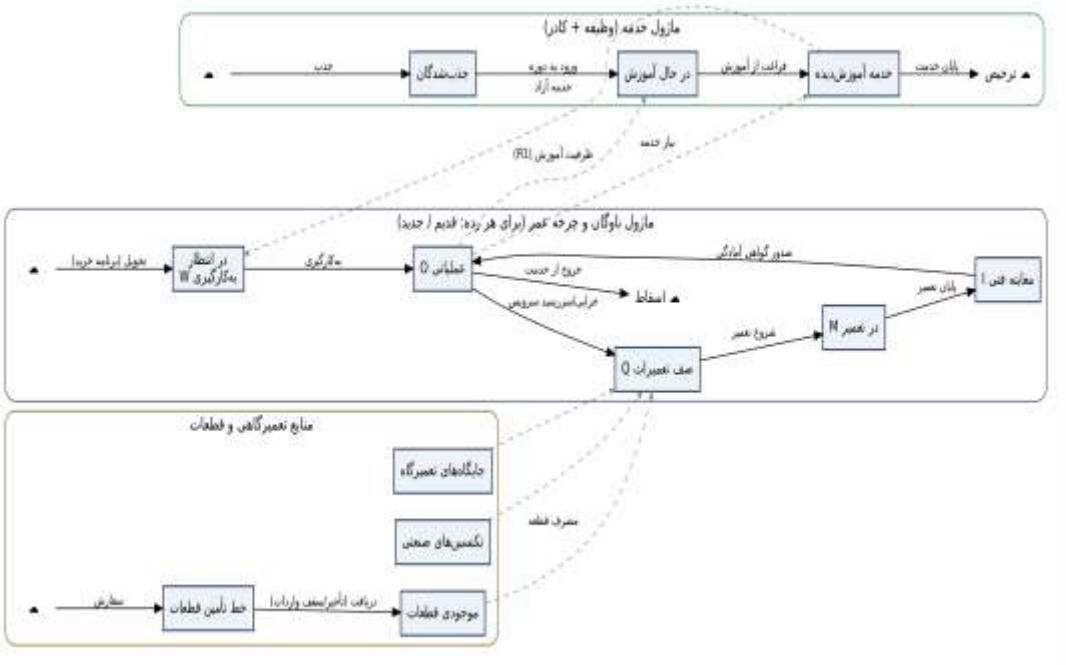
حلقه‌های تعادلی سازوکارهای کنترلی سامانه را نشان می‌دهند. B۱ تصمیم افزایش ظرفیت تعمیرگاه و نیروی فنی در پاسخ به شکاف است که با تأخیر ساخت و جذب همراه است. B۲ محدودیت ظرفیت را بازنمایی می‌کند: شروع تعمیرات بیشتر، جایگاه‌ها و تکنسین‌های بیشتری را اشغال کرده و ظرفیت آزاد برای شروع تعمیرات بعدی را کاهش می‌دهد. B۳ حلقه کنترل موجودی قطعات است که تحریم با افزایش تأخیر و محدود کردن ظرفیت خط تأمین، آن را کند و ناپایدار می‌کند. B۴ خروج دائمی خدمه آموزش‌دیده به دلیل پایان خدمت وظیفه است که سامانه را به جذب و آموزش مستمر وابسته می‌کند.



شکل ۲. نمودار علت و معلولی سامانه مدیریت دارایی و منابع ناوگان لجستیکی (R: حلقه تقویتی؛ B: حلقه تعادلی)

٤-۳. گام دوم: مدل انباشت و جریان

مدل شبیه‌سازی از پنج ماژول تشکیل شده است (شکل ۳): ماژول ناوگان و چرخه عمر (برای هر رده c، شامل رده قدیم و رده جدید)، ماژول خدمه، ماژول جایگاه تعمیرگاه، ماژول تکنسین‌های صنعتی و ماژول قطعات یدکی. افق شبیه‌سازی ۳۰ سال (۱۵۶۰ هفته)، گام زمانی نیم هفته و روش انتگرال‌گیری اویلر است. مدل در زبان پایتون پیاده‌سازی شده و هر اجرای آن کمتر از یک ثانیه طول می‌کشد؛ این ویژگی برای استفاده در جلسات گروهی تصمیم‌گیری و اجرای صدها تکرار مونت‌کارلو اهمیت دارد.



شکل ۳. ساختار انباشت و جریان مدل و تبادل اطلاعات میان ماژول‌ها (خطوط خط‌چین: پیوندهای اطلاعاتی)

ماژول ناوگان. تعداد خودروهای عملیاتی رده c از رابطه (۱) به دست می‌آید که در آن a_c نرخ به‌کارگیری، e_c نرخ خروج از معاینه فنی، f_c نرخ ورود به صف تعمیرات و r_c نرخ خروج از خدمت است:

$$O_c(t) = O_c(0) + \int_0^t [a_c(s) + e_c(s) - f_c(s) - r_c(s)]ds \tag{۱}$$

نرخ ورود به تعمیرات تابع دوره کارکرد بین سرویس‌هاست که با افزایش سن ناوگان پس از سن آستانه A_k کاهش می‌یابد. در رابطه (۲)، $\bar{A}_c$ میانگین سن رده (حاصل تقسیم انباشت «خودرو–سال» بر تعداد خودروها)، α شیب فرسودگی، $\varphi_{\min}$ کف ضریب و m_s ضریب افزایش آهنگ عملیات در بحران است؛ زمان تعمیر نیز طبق رابطه (۳) با سن افزایش می‌یابد:

$$f_c = \frac{O_c}{\tau_{\mathrm{op}}^c}, \qquad \tau_{\mathrm{op}}^c = \bar{\tau}_{\mathrm{op}}^c \cdot \max\{\varphi_{\min}, 1 - \alpha(\bar{A}_c - A_k)^+\} \cdot m_s(t) \tag{۲}$$

$$\tau_{\mathrm{m}}^c = \bar{\tau}_{\mathrm{m}}^c \cdot [1 + \beta(\bar{A}_c - A_k)^+] \tag{۳}$$

تخصیص منابع تعمیرگاهی. شروع تعمیرات کل (s) به کوچک‌ترین مقدار میان تقاضای شروع، جایگاه آزاد، تکنسین آزاد و قطعه موجود محدود است (رابطه ۴) و به نسبت سهم هر رده از صف $(w_c = Q_c/\sum Q)$ میان رده‌ها تقسیم می‌شود. در این رابطه B تعداد جایگاه، H تعداد تکنسین، h_c و k_c به ترتیب تکنسین و بسته قطعه مورد نیاز هر خودروی رده c و K موجودی قطعات است. هر جا قید غیر از تقاضا فعال باشد، زمان انتظار ایجادشده به همان منبع گلوگاهی نسبت داده می‌شود؛ این قاعده، تحلیل سطح فعالیت را ممکن می‌کند.

$$s = \min\left\{\frac{\sum Q_c}{\delta}, \frac{B - \sum M_c}{\Delta t}, \frac{H - \sum h_c M_c}{\sum w_c h_c\, \Delta t}, \frac{K}{\sum w_c k_c\, \Delta t}\right\} \tag{۴}$$

ماژول خدمه (خدمت وظیفه). زنجیره خدمه شامل سه انباشت جذب‌شدگان (R)، در حال آموزش (T) و خدمه آموزش‌دیده (Cr) است. ورود به دوره آموزش به ظرفیت آموزشی محدود است که خود به تعداد خودروهای عملیاتی بستگی دارد (حلقه R۱)، و خروج از انباشت خدمه با میانگین مدت باقی‌مانده خدمت τ_{serv} انجام می‌شود:

$$\frac{dR}{dt} = \rho m_R - x - \varepsilon R, \qquad x = \min\left\{\frac{R}{2}, \gamma \sum O_c + \gamma_0\right\} \tag{۵}$$

$$\frac{dT}{dt} = x - \frac{T}{\tau_{\mathrm{tr}}}, \qquad \frac{d\mathrm{Cr}}{dt} = \frac{T}{\tau_{\mathrm{tr}}} - \frac{\mathrm{Cr}}{\tau_{\mathrm{serv}}} \tag{۶}$$

به‌کارگیری خودروهای جدید به خدمه آزاد محدود است (رابطه ۷) و تعداد خودروهای مأموریت‌پذیر برابر کمینه خودروهای عملیاتی و خودروهای قابل خدمه‌گذاری است (رابطه ۸)، که در آن n_{cr} تعداد خدمه هر خودروست:

$$a_{\mathrm{new}} = \min\left\{\frac{W}{\tau_{\mathrm{com}}}, \frac{(\mathrm{Cr} - n_{\mathrm{cr}} \sum O_c)^+}{n_{\mathrm{cr}}}\right\} \tag{۷}$$

$$\mathrm{Ready}(t) = \min\left\{\sum O_c(t), \frac{\mathrm{Cr}(t)}{n_{\mathrm{cr}}}\right\} \tag{۸}$$

ماژول تکنسین‌ها. نیروی فنی صنعتی بدون طی مسیر آموزش نظامی و با تعدیل تدریجی به سمت سطح هدف H^* جذب می‌شود؛ m_H ضریب هدف (مثلاً ۲ برای دو برابر کردن نیرو) و σ ضریب کاهش آن در سیاست بهینه‌سازی است:

$$\frac{dH}{dt} = \max\left\{0, h_0 m_H(1 - \sigma) + \frac{H^* m_H(1 - \sigma) - H}{\tau_H}\right\} - \varepsilon_H H \tag{۹}$$

ماژول قطعات یدکی (جدید). موجودی قطعات (K) از دو مسیر وارداتی (خط تأمین SL با زمان تدارک L) و بومی (خط DL با زمان تدارک L_d) تغذیه می‌شود. دریافت وارداتی در دوره تحریم به سقف $\mathrm{Cap} \cdot \kappa(t)$ محدود است (κ کسری از ظرفیت عادی). سیاست سفارش از قاعده لنگر و تعدیل استرمن (Sterman, ۱۹۸۹) پیروی می‌کند و وزن $\omega < 1$ برای خط تأمین، کم‌توجهی رایج مدیران به سفارش‌های در راه را بازنمایی می‌کند:

$$\frac{dK}{dt} = \min\left\{\frac{\mathrm{SL}}{L}, \mathrm{Cap} \cdot \kappa(t)\right\} + \frac{\mathrm{DL}}{L_d} - \sum k_c s_c \tag{۱۰}$$

$$\mathrm{Order} = \max\left\{0, \hat{e} + \frac{K^* - K}{\tau_a} + \omega \frac{\mathrm{SL}^* - \mathrm{SL}}{\tau_a}\right\}, \qquad K^* = \hat{e} \cdot c_K + K_{\mathrm{buf}} \tag{۱۱}$$

٤-٤. گام سوم: شاخص‌های عملکرد چندسطحی

شاخص‌ها در سه سطح تعریف شده‌اند تا امکان ردیابی علت‌های سطح پایین برای عملکرد سطح بالا فراهم شود (al te Hall„ ۲۰۰۴): سطح ناوگان شامل شکاف قابلیت تجمعی (رابطه ۱۲، بر حسب خودرو–هفته)، تعداد هفته‌های دارای شکاف، دسترس‌پذیری ناوگان (رابطه ۱۳) و میانگین خودروهای مأموریت‌پذیر؛ سطح فعالیت شامل انتظار تجمعی برای جایگاه، تکنسین و قطعه؛ و سطح منبع شامل نرخ بهره‌وری جایگاه‌ها، تکنسین‌ها و خدمه و هزینه چرخه عمر (رابطه ۱۴). $\theta(t)$ آستانه آمادگی و $N(t)$ اندازه ناوگان است. هزینه‌ها با واحد پولی نسبی بیان شده‌اند.

$$\text{Gap} = \int_0^T \max\{0, \theta(t) - \text{Ready}(t)\}\, dt \tag{۱۲}$$

$$\text{Availability} = \frac{\int_0^T \text{Ready}(t)dt}{\int_0^T N(t)dt} \tag{۱۳}$$

$$\text{LCC} = C_{\text{acq}} + C_{\text{ext}} + C_{\text{bay}} + C_{\text{op}} + C_{\text{maint}} + C_{\text{tech}} + C_{\text{crew}} + C_{\text{parts}} \tag{۱۴}$$

٤-٥. گام چهارم: آزمون استواری و تنش

در روش‌شناسی مرجع، تحلیل نتایج با آزمون و خطا انجام می‌شود و نویسندگان آن خطر از دست دادن راهبردهای بهتر را به‌عنوان محدودیت ذکر کرده‌اند (al et Elsawah„ ۲۰۲۴; Coyle, ۱۹۸۵). در این پژوهش سه ابزار به روش‌شناسی اضافه شد: (۱) تحلیل حساسیت دوطرفه شبکه‌ای روی متغیرهای منابع برای یافتن کم‌هزینه‌ترین پیکربندی با شکاف قابل قبول؛ (۲) شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۵۰ تکرار و اعداد تصادفی مشترک، که در آن دوره کارکرد (±۱۵٪)، زمان تعمیر، زمان تدارک و مدت خدمت (±۲۰٪) به‌صورت یکنواخت تغییر می‌کنند؛ و (۳) آزمون تنش با سناریوی ترکیبی تحریم (سال‌های ۸ تا ۱۴؛ زمان تدارک ۵/۲ برابر و سقف واردات ۳۰٪ ظرفیت عادی) و بحران (سال ۱۰ تا ۵/۱۱؛ کاهش ۴۰ درصدی دوره کارکرد و افزایش آستانه آمادگی به ۱۰۵ دستگاه). معیار انتخاب سیاست مقاوم، کم‌ترین هزینه به شرط آنکه صدک ۹۰ شکاف قابلیت از ۱۱۰٪ مقدار متناظر سیاست مرجع بیشتر نشود، تعریف شد؛ این رویکرد از منطق تصمیم‌گیری مقاوم پیروی می‌کند (al et Lempert„ ۲۰۰۳).

٤-٦. پارامترهای مدل

در جدول ۳ پارامترهای مدل نشان داده شده است.

جدول ۳. مقادیر پایه پارامترهای مدل

پارامتر	رده قدیم	رده جدید	واحد
تعداد اولیه، برنامه خرید	۱۲۰	۱۲۰ (سال‌های ۱ تا ۱۰)	دستگاه
سن اولیه	۲۲	۰	سال
دوره کارکرد پایه بین سرویس‌ها	۲۰	۳۰	هفته
زمان تعمیر پایه	۴	۴	هفته
سن آستانه فرسودگی، شیب اثر سن بر کارکرد و تعمیر	۱۲، ۰٫۰۳ و ۰٫۰۴	۱۲، ۰٫۰۳ و ۰٫۰۴	سال، در سال
زمان معاینه فنی و صدور گواهی	۱٫۵	۱٫۵	هفته
تکنسین مورد نیاز هر خودرو در تعمیر	۱۰	۸	نفر
مصرف قطعه در هر تعمیر	۱٫۶	۱٫۰	بسته
جایگاه تعمیرگاه اولیه	۳۶ (مشترک)	–	جایگاه
تکنسین صنعتی اولیه، ریزش	۳۶۰ ، ۰٫۲٪	–	نفر در هفته
خدمه هر خودرو ، خدمه اولیه	۲ ، ۲۳۰	–	نفر
نرخ جذب خدمه، زمان آموزش	۴ ؛ ۱۰	–	نفر در هفته، هفته
مدت باقی‌مانده خدمت پس از آموزش	۷۰	–	هفته
زمان تدارک وارداتی، بومی؛ سقف واردات	۱۴ ، ۶؛ ۱۲	–	هفته؛ بسته در هفته
آستانه آمادگی الزامی	۹۰	–	دستگاه

۵. اعتبارسنجی مدل

اعتبار مدل‌های پویایی سیستم به‌عنوان مدل‌های علّی–توصیفی، پیش از هر چیز به اعتبار ساختار داخلی و توانایی آن در توضیح رفتار سامانه بستگی دارد (asBarl, ۱۹۹۶; Sterman, ۲۰۰۰). جدول ۴ آزمون‌های انجام‌شده و نتایج آن‌ها را خلاصه می‌کند.

جدول ٤. آزمون‌های اعتبارسنجی ساختاری و رفتاری مدل

آزمون	شرح اجرا	نتیجه
سازگاری ابعادی	بررسی واحد همه معادلات (دستگاه، نفر، بسته، هفته)	همه معادلات سازگار
قیود فیزیکی	نامنفی بودن انباشت‌ها و محدودیت جریان‌ها به موجودی	بدون نقض در همه اجراها
شرایط حدی: جذب صفر خدمه	نرخ جذب = ۰	تخلیه تدریجی خدمه طی حدود ۷۰ هفته و افت آمادگی تا صفر؛ منطبق با انتظار
شرایط حدی: زمان تعمیر بسیار بزرگ	زمان تعمیر ×۲۰	انباشت خودروها در صف و تعمیر و آمادگی نزدیک صفر
شرایط حدی: قطع کامل واردات	سقف واردات = ۰ بدون تولید بومی	تخلیه موجودی قطعات و توقف تعمیرات پس از مصرف ذخیره
رفتار تأخیری	افزایش ناگهانی جذب خدمه	افزایش خدمه با تأخیر برابر زمان آموزش؛ منطبق با ساختار خط لوله
حساسیت رفتاری	تغییر ±۲۰٪ پارامترهای کلیدی (مونت‌کارلو)	الگوی رفتار و رتبه‌بندی اصلی گزینه‌ها پایدار
کفایت مرز مدل	افزودن/حذف ماژول قطعات	بدون اختلال، نتایج پایه حفظ شد؛ تحت تحریم، ماژول قطعات تعیین‌کننده است

افزون بر این، ساختار مدل با ساختار مدل مرجع (Elsawah et al., ۲۰۲۴) و ادبیات نگهداری و نیروی انسانی نظامی (Adamides et al., ۲۰۰۴; McLucas et al., ۲۰۰۶; Jnitova et al., ۲۰۱۷) مقایسه شد. برای کاربرد عملیاتی، پیشنهاد می‌شود ساختار و پارامترها در کارگاه‌های مرور ساختاری با حضور کارشناسان معاونت آماد و پشتیبانی و فرماندهی پشتیبانی منطقه‌ای تأیید و با داده‌های تاریخی واقعی واسنجی شوند.

٦. نتایج آزمایش‌های شبیه‌سازی

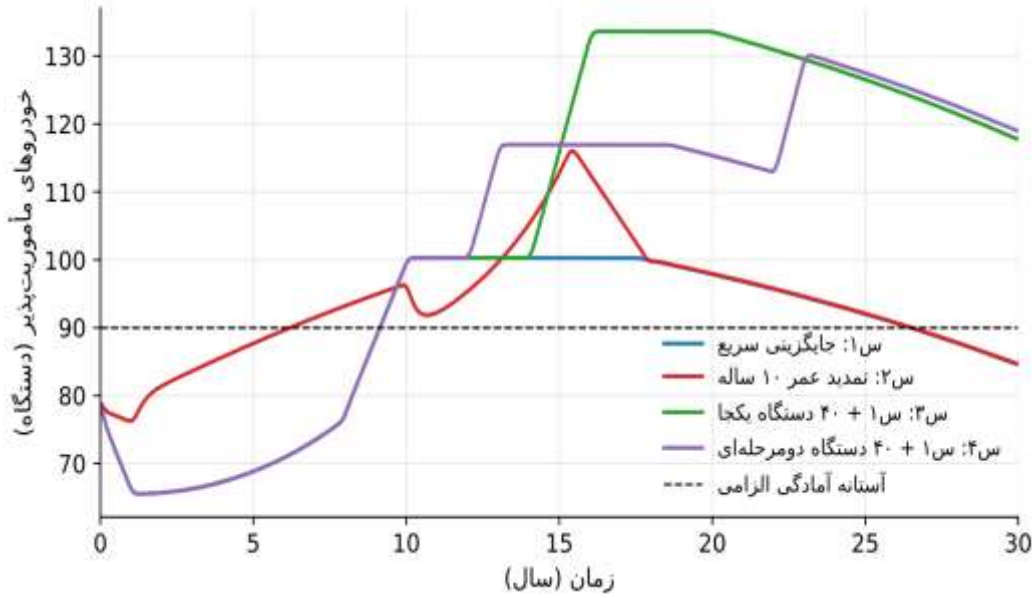
جدول ۵ نه گزینه راهبردی آزموده‌شده را معرفی می‌کند. گزینه‌های ۱ تا ۶ ساختار آزمایش‌های مطالعه مرجع را برای ناوگان لجستیکی بازتولید می‌کنند و گزینه‌های ۷ تا ۹ حاصل گام چهارم روش‌شناسی هستند.

جدول ۵. گزینه‌های راهبردی آزموده‌شده

کد	شرح گزینه
س۱	جایگزینی سریع: خروج ناوگان قدیم طی سال‌های ۰ تا ۸ بدون تمدید عمر؛ ورود ۱۲۰ خودروی جدید طی سال‌های ۱ تا ۱۰
س۲	تمدید ۱۰ ساله عمر ناوگان قدیم (خروج طی سال‌های ۱۰ تا ۱۸)؛ برنامه خرید مشابه س۱
س۳	س۱ و خرید ۴۰ خودروی اضافه به‌صورت یکجا (سال‌های ۱۴ تا ۱۶)
س۴	س۱ و خرید ۴۰ خودروی اضافه به‌صورت دومرحله‌ای (۲۰ دستگاه در سال ۱۲ و ۲۰ دستگاه در سال ۲۲)
س۵	س۲ و احداث ۸ جایگاه تعمیرگاهی جدید در هفته ۱۰۰
س۶	س۵ و دو برابر کردن سطح هدف تکنسین‌های صنعتی از هفته ۱۰۰
س۷	سیاست بهینه مقاوم منابع: س۶ با ضریب جذب خدمه ۰٫۸ و کاهش ۰٪ سطح هدف تکنسین‌ها
س۸	آزمون تنش: س۷ تحت تحریم قطعات (سال‌های ۸ تا ۱۴) و جهش تقاضای بحران (سال‌های ۱۰ تا ۵/۱۱)
س۹	سیاست تاب‌آوری: س۸ و ذخیره راهبردی ۴۰ بسته قطعه و تأمین ۵۰٪ قطعات از تولید بومی

٦-١. ارزیابی گزینه‌های گذار ناوگان

شکل ۴ تعداد خودروهای مأموریت‌پذیر را در گزینه‌های ۱ تا ۴ نشان می‌دهد. در گزینه ۱ خروج سریع ناوگان قدیم پیش از رسیدن کامل ناوگان جدید، یک دره قابلیت در سال‌های ۲ تا ۸ ایجاد می‌کند که در آن آمادگی تا ۶۶ دستگاه کاهش می‌یابد. در نتیجه، گزینه ۱ با وجود دسترس‌پذیری نسبی بالا (۷۷٫۴٪)، شکاف قابلیت تجمعی ۹٬۴۲۴ خودرو–هفته و ۶۳۸ هفته دارای شکاف دارد. خرید ۴۰ خودروی اضافه در گزینه‌های ۳ و ۴ دره ابتدای افق را برطرف نمی‌کند (شکاف تجمعی ۸٬۹۴۱ خودرو–هفته)، زیرا این خودروها پس از دوره بحرانی وارد می‌شوند؛ اما افت آمادگی ناشی از فرسودگی ناوگان جدید در دهه پایانی را جبران می‌کنند. میانگین آمادگی دهه پایانی در گزینه ۱ برابر ۹۱٫۸ دستگاه و در گزینه‌های ۳ و ۴ به ترتیب ۱۲۶٫۲ و ۱۲۲٫۴ دستگاه است. هزینه چرخه عمر گزینه ۴ (۱۰٬۷۱۵ واحد) از گزینه ۳ (۱۰٬۸۶۵ واحد) کمتر است، زیرا خرید مرحله‌ای بخشی از هزینه نگهداری ناوگان اضافه را به تعویق می‌اندازد و ناوگان جوان‌تری در پایان افق باقی می‌گذارد.



شکل ٤. تعداد خودروهای مأموریت‌پذیر در گزینه‌های ۱ تا ٤ (میانگین متحرک ۱۳ هفته‌ای)

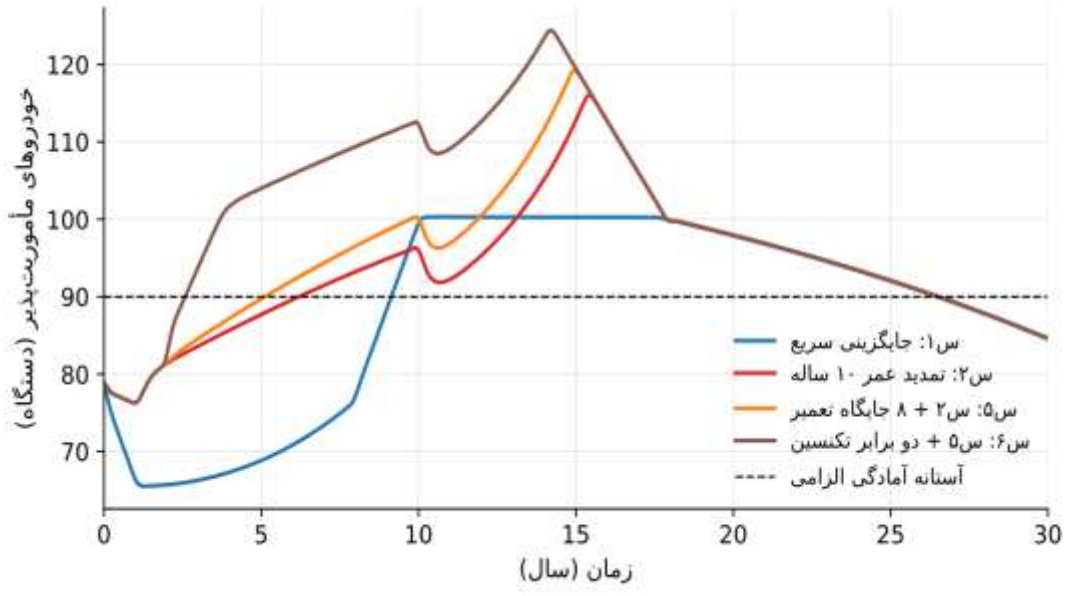
گزینه ۲ (تمدید عمر) رفتاری دوگانه دارد. از یک سو، حفظ ناوگان قدیم دره قابلیت را پر می‌کند و شکاف تجمعی را به ۲٬۶۰۷ خودرو–هفته کاهش می‌دهد (۷۲٪ کمتر از گزینه ۱). از سوی دیگر، دسترس‌پذیری ناوگان از ۷۷٫۴٪ به ۶۰٫۸٪ و هزینه چرخه عمر از ۹٬۶۶۷ به ۱۲٬۵۱۰ واحد (۲۹٪ بیشتر) می‌رسد. به عبارت دیگر، تمدید عمر قابلیت را با «اندازه ناوگان» و نه با «کارایی ناوگان» حفظ می‌کند: در سال‌های ۸ تا ۱۴، به‌طور میانگین ۵۱٪ کل ناوگان در صف یا در تعمیر است، در حالی که این نسبت در گزینه ۱ برابر ۱۳٪ است. این یافته با نتیجه مطالعه مرجع (کاهش دسترس‌پذیری در گزینه تمدید عمر) هم‌سوست و همان سازوکار حلقه R۲ را تأیید می‌کند.

جدول ٦. شاخص‌های اصلی سطح ناوگان برای گزینه‌های راهبردی (اجرای قطعی)

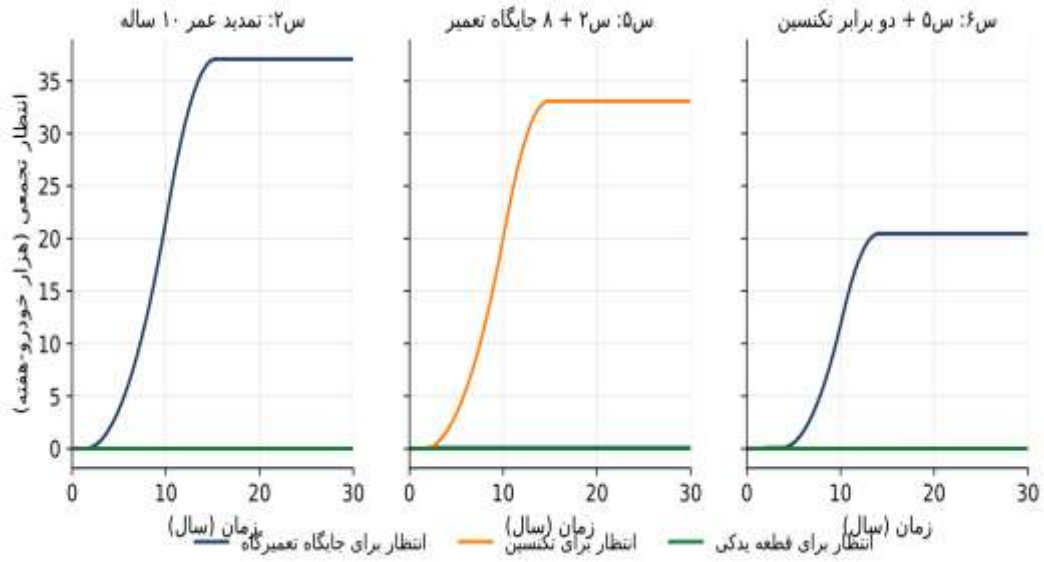
گزینه	دسترس‌پذیری (٪)	میانگین آماده (دستگاه/هفته)	شکاف تجمعی (خودرو–هفته)	هفته‌های دارای شکاف	کمینه آمادگی	هزینه چرخه عمر (واحد)
س۱	۷۷٫۴	۸۸٫۳	۹٬۴۲۴	۶۳۸	۶۵٫۵	۹٬۶۶۷
س۲	۶۰٫۸	۹۳٫۶	۲٬۶۰۷	۴۷۰	۷۶٫۱	۱۲٬۵۱۰
س۳	۷۸٫۶	۱۰۵٫۴	۸٬۹۴۱	۴۷۳	۶۵٫۵	۱۰٬۸۶۵
س۴	۷۸٫۶	۱۰۲٫۷	۸٬۹۴۱	۴۷۳	۶۵٫۵	۱۰٬۷۱۵
س۵	۶۱٫۸	۹۵٫۳	۲٬۳۴۷	۴۱۷	۷۶٫۱	۱۲٬۸۲۱
س۶	۶۵٫۲	۱۰۰٫۴	۱٬۷۹۲	۲۹۴	۷۶٫۱	۱۵٬۱۰۹
س۷	۶۴٫۴	۹۹٫۱	۱٬۷۹۲	۲۹۴	۷۶٫۱	۱۴٬۹۶۸
س۸	۵۶٫۷	۸۷٫۴	۱۵٬۱۵۷	۵۹۰	۳۰٫۱	۱۳٬۵۱۴
س۹	۶۲٫۵	۹۶٫۲	۴٬۵۵۸	۴۱۶	۶۵٫۸	۱۴٬۷۶۲

٦-۲. تحلیل سطح فعالیت: شناسایی گلوگاه‌ها

برای درک علت عملکرد ضعیف دسترس‌پذیری در گزینه ۲، ماژول فعالیت به کار گرفته شد. شکل ۶ انتظار تجمعی خودروها را بر حسب منبع گلوگاهی نشان می‌دهد. در گزینه ۲ تمام انتظار (۳۷٬۰۷۲ خودرو–هفته) ناشی از کمبود جایگاه تعمیرگاه است. تصمیم‌گیر طبیعتاً در گزینه ۵ هشت جایگاه جدید احداث می‌کند. نتیجه آموزنده است: انتظار برای جایگاه تقریباً حذف می‌شود (۸۱ خودرو–هفته)، اما گلوگاه به تکنسین‌های صنعتی منتقل می‌شود (۳۳٬۰۷۲ خودرو–هفته انتظار برای تکنسین) و شکاف قابلیت تنها ۱۰٪ کاهش می‌یابد. در گزینه ۶ با دو برابر شدن تکنسین‌ها، انتظار برای تکنسین از بین می‌رود، اما بخشی از انتظار دوباره به جایگاه‌ها بازمی‌گردد (۲۰٬۴۶۴ خودرو–هفته)، زیرا اکنون تعمیرات سریع‌تر شروع می‌شوند و جایگاه‌ها دوباره به قید فعال تبدیل می‌شوند. این جابه‌جایی گلوگاه نمونه‌ای روشن از پیچیدگی پویاست که در تحلیل جزءنگر دیده نمی‌شود و نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری در یک منبع بدون توجه به منابع مکمل بازده محدودی دارد.



شکل ۵. اثر افزایش ظرفیت تعمیرگاه (س۵) و نیروی فنی (س٦) بر آمادگی ناوگان در مقایسه با س۱ و س۲



شکل ٦. انتظار تجمعی خودروها بر حسب منبع گلوگاهی در گزینه‌های ۲، ۵ و ٦ (جابه‌جایی گلوگاه)

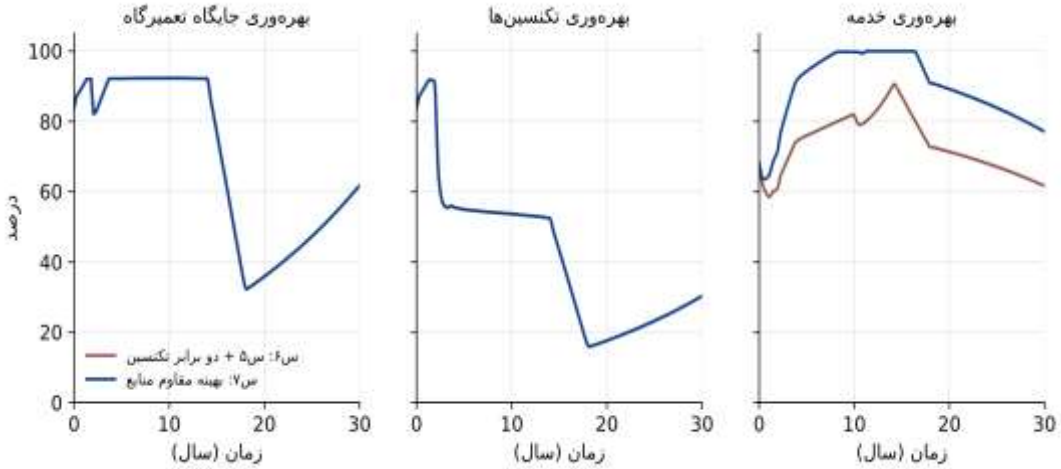
جدول ۷. شاخص‌های سطح فعالیت و سطح منبع

گزینه	انتظار برای جایگاه	انتظار برای تکنسین	انتظار برای قطعه	بهره‌وری جایگاه (٪)	بهره‌وری تکنسین (٪)	بهره‌وری خدمه (٪)
س۱	۰	۰	۰	۵۱,۰	۴۳,۶	۶۴,۶
س۲	۳۷,۰۷۲	۰	۰	۷۴,۹	۶۸,۰	۶۸,۵
س۳	۰	۰	۰	۵۶,۰	۴۷,۶	۷۷,۱
س۴	۰	۰	۰	۵۴,۸	۴۶,۶	۷۵,۱
س۵	۸۱	۳۳,۰۷۲	۰	۶۳,۸	۶۹,۸	۶۹,۷
س۶	۲۰,۴۶۴	۱۱	۰	۶۹,۰	۴۱,۴	۷۳,۵
س۷	۲۰,۲۹۴	۱۱	۰	۶۹,۰	۴۱,۴	۸۹,۸
س۸	۶,۷۸۰	۱۱	۴۲,۸۲۸	۵۸,۵	۳۵,۳	۷۹,۲
س۹	۲۲,۷۱۰	۱۱	۴,۴۳۹	۶۷,۶	۴۰,۵	۸۷,۱

٦-۳. تحلیل سطح منبع و بهینه‌سازی مقاوم

گزینه ۶ کمترین شکاف را در میان گزینه‌های ۱ تا ۶ دارد، اما گران‌ترین آن‌هاست (۱۵٬۱۰۹ واحد) و بهره‌وری تکنسین‌ها در آن تنها ۴۱٫۴٪ و بهره‌وری خدمه ۷۳٫۵٪ است (شکل ۷). برای یافتن ظرفیت مازاد، تحلیل حساسیت دوطرفه روی ضریب نرخ جذب خدمه و کاهش سطح هدف تکنسین‌ها انجام شد (شکل ۸).

نتایج قطعی نشان می‌دهد که با کاهش ضریب جذب تا ۰٫۷ (یعنی ۳۰٪ کاهش جذب) شکاف قابلیت تغییر نمی‌کند و هزینه کاهش می‌یابد؛ اما کاهش بیشتر به افت ناگهانی و غیرخطی آمادگی منجر می‌شود، زیرا ترخیص سربازان وظیفه خدمه را سریع‌تر از جایگزینی آن‌ها تخلیه می‌کند. کاهش تکنسین‌ها حتی به میزان ۱۰٪ شکاف را افزایش می‌دهد؛ بنابراین ظرفیت ظاهراً بیکار تکنسین‌ها در گزینه ۶ در واقع ظرفیت ذخیره برای اوج‌های بار تعمیرات است.



شکل ۷. نرخ بهره‌وری جایگاه‌ها، تکنسین‌ها و خدمه در گزینه ٦ و سیاست بهینه مقاوم (س۷)



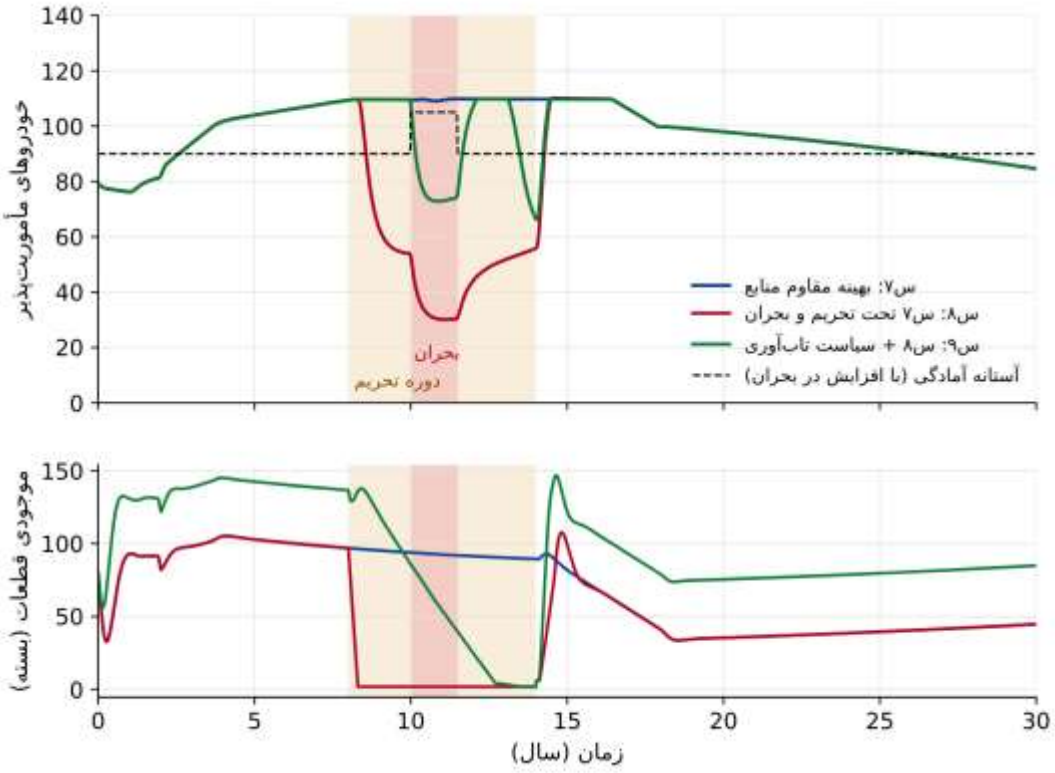
شکل ۸. تحلیل حساسیت دوطرفه شکاف قابلیت (و هزینه چرخه عمر داخل پرانتز، هزار واحد) نسبت به ضریب جذب خدمه و کاهش تکنسین‌ها در گزینه ٦؛ کادر خط‌چین: بهینه قطعی، کادر پررنگ: بهینه مقاوم

نکته کلیدی هنگام ارزیابی استواری آشکار شد. پیکربندی بهینه قطعی (ضریب جذب ۰٫۷) در شبیه‌سازی مونت‌کارلو صدک ۹۰ شکاف قابلیت برابر ۱۴٬۶۳۶ خودرو–هفته دارد، در حالی که این مقدار برای سیاست مرجع (ضریب ۰/۱) ۳٬۳۸۸ است؛ یعنی سیاستی که در شرایط قطعی «بهینه» به نظر می‌رسد، در بدترین ده درصد حالت‌ها بیش از ۴٫۳ برابر شکاف بیشتری ایجاد می‌کند. علت آن است که این پیکربندی خدمه را در مرز نیاز نگه می‌دارد (بهره‌وری خدمه حدود ۹۶٪) و هر نوسان کوچک در مدت خدمت یا آهنگ عملیات مستقیماً به شکاف تبدیل می‌شود. بر اساس معیار تصمیم مقاوم، ضریب جذب ۰٫۸ با کاهش ۰٪ تکنسین‌ها انتخاب شد (س۷). این سیاست صدک ۹۰ شکاف را ۳٬۵۴۵ خودرو–هفته نگه می‌دارد و ۲۰٪ جذب خدمه کمتر و هزینه چرخه عمر ۰٫۹٪ کمتر از گزینه ۶ دارد، در حالی که شکاف قابلیت قطعی آن (۱٬۷۹۲) با گزینه ۶ (۱٬۷۹۲) برابر است.

٦-٤. آزمون تنش: تحریم و بحران

شکل ۹ رفتار سیاست مقاوم را تحت سناریوی ترکیبی تحریم و بحران نشان می‌دهد. در گزینه ۸، کاهش دریافت قطعات از سال ۸ موجودی را تخلیه می‌کند و هم‌زمانی آن با جهش تقاضای بحران در سال ۱۰ (که هم نرخ خرابی و هم آستانه آمادگی را افزایش می‌دهد) آمادگی را تا ۳۰٫۱ دستگاه پایین می‌آورد. شکاف قابلیت تجمعی از ۱٫۷۹۲ به ۱۵٫۱۵۷ خودرو–هفته (حدود ۸٫۵ برابر) و انتظار برای قطعه به ۴۲٫۸۲۸ خودرو–هفته می‌رسد. نکته مهم آن است که افت آمادگی چند ماه پیش از آغاز بحران و صرفاً به دلیل تخلیه موجودی قطعات رخ می‌دهد؛ یعنی تحریم، سامانه را پیش از وقوع بحران آسیب‌پذیر می‌کند. پس از پایان تحریم، آمادگی به سرعت بازمی‌گردد، اما سفارش‌های انباشته‌شده یک جهش موقت در موجودی و سپس افت آن را به دنبال دارند که موجودی تا پایان افق به سطح پیش از تحریم بازنمی‌گردد؛ این همان سازوکار حلقه B۳ و اثر شلاقی در زنجیره تأمین نگهداری نظامی است (Fan et al., ۲۰۱۰).

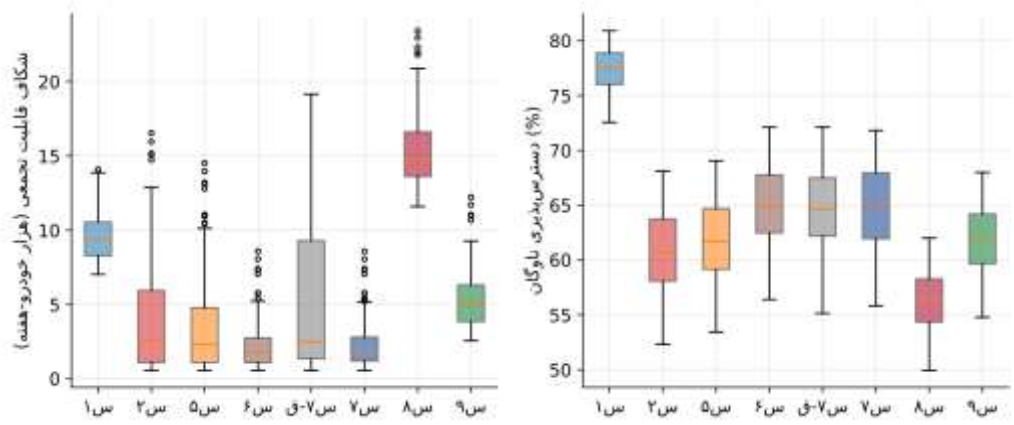
سیاست تاب‌آوری (گزینه ۹)، یعنی ترکیب ذخیره راهبردی ۴۰ بسته قطعه و تأمین نیمی از قطعات از تولید داخلی، شکاف قابلیت را به ۴٫۵۵۸ خودرو–هفته (۷۰٪ کمتر از گزینه ۸) و انتظار برای قطعه را به ۴٫۴۳۹ خودرو–هفته کاهش می‌دهد، و کمینه آمادگی (که در انتهای دوره تحریم و با اتمام ذخیره راهبردی رخ می‌دهد) ۶۵٫۸ دستگاه است؛ بنابراین اندازه ذخیره راهبردی باید متناسب با طول محتمل دوره تحریم تعیین شود. هزینه چرخه عمر این سیاست ۱۴٫۷۶۲ واحد است که ۹٫۲٪ بیشتر از گزینه ۸ است؛ بخشی از این تفاوت به این دلیل است که در گزینه ۸ کمبود قطعه تعمیرات را متوقف می‌کند و به‌ظاهر هزینه کمتری ثبت می‌شود، در حالی که بهای آن با آمادگی پرداخت می‌شود. همچنین در گزینه ۹ با رفع گلوگاه قطعه، بخشی از انتظار به جایگاه‌های تعمیرگاه منتقل می‌شود (۲۲٫۷۱۰ خودرو–هفته)، که بار دیگر لزوم نگاه یکپارچه به منابع مکمل را نشان می‌دهد.



شکل ۹. آزمون تنش: آمادگی ناوگان (بالا) و موجودی قطعات (پایین) برای سیاست مقاوم (س۷)، تحت تحریم و بحران (س۸) و با سیاست تاب‌آوری (س۹)

٦-٥. تحلیل عدم‌قطعیت و مبادله هزینه-قابلیت

شکل ۱۰ توزیع شکاف قابلیت و دسترس‌پذیری را در ۱۵۰ تکرار مونت‌کارلو نشان می‌دهد و جدول ۸ صدک‌های اصلی را ارائه می‌کند. سه نتیجه برجسته است: نخست، رتبه‌بندی اصلی گزینه‌ها (برتری راهبردهای تمدید عمر همراه با تقویت منابع در شاخص شکاف، و برتری گزینه‌های بدون تمدید عمر یعنی س۱، س۳ و س۴ در دسترس‌پذیری) در برابر عدم‌قطعیت پایدار است؛ دوم، پراکندگی نتایج در گزینه‌ها بسیار متفاوت است، چنان‌که گزینه ۲ با وجود میانه شکاف پایین، دامنه صدک ۵ تا ۹۵ بسیار گسترده‌ای دارد (۶۳۱ تا ۱۲٬۲۷۵) و افزودن جایگاه و تکنسین (س۵ و س۶) این دامنه را تنگ‌تر می‌کند؛ و سوم، بهینه قطعی (س۷-ق) دنباله‌ای بلند از نتایج نامطلوب دارد که در سیاست مقاوم (س۷) حذف شده است.

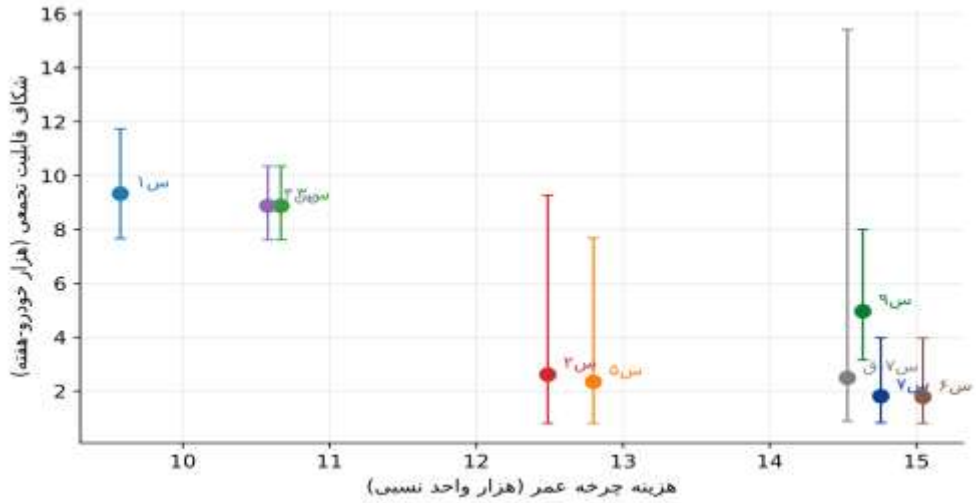


شکل ۱۰. توزیع شکاف قابلیت تجمعی (چپ) و دسترس‌پذیری ناوگان (راست) در ۱۵۰ تکرار مونت‌کارلو

جدول ۸. نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو (۱۵۰ تکرار، اعداد تصادفی مشترک)

گزینه	شکاف – صدک ۵	شکاف – میانه	شکاف – صدک ۹۵	دسترس‌پذیری – میانه (٪)	هزینه – میانه (واحد)
س۱	۷,۲۱۵	۹,۳۳۰	۱۲,۴۸۷	۷۷,۵	۹,۵۷۴
س۲	۶۳۱	۲,۶۱۳	۱۲,۲۷۵	۶۰,۷	۱۲,۴۸۸
س۳	۷,۲۱۰	۸,۸۷۸	۱۰,۷۹۸	۷۸,۷	۱۰,۶۶۸
س۴	۷,۲۱۰	۸,۸۷۸	۱۰,۷۹۸	۷۸,۷	۱۰,۵۷۹
س۵	۶۳۱	۲,۳۴۴	۱۰,۴۶۷	۶۱,۷	۱۲,۷۹۹
س۶	۶۳۱	۱,۷۷۸	۵,۴۰۲	۶۴,۹	۱۵,۰۴۴
س۷-ق	۷۵۷	۲,۴۹۰	۱۶,۶۴۲	۶۴,۷	۱۴,۵۳۰
س۷	۶۳۱	۱,۸۱۰	۵,۴۰۲	۶۵,۱	۱۴,۷۵۷
س۸	۱۲,۳۹۹	۱۴,۷۹۸	۲۰,۴۰۱	۵۶,۴	۱۳,۴۰۲
س۹	۲,۹۶۴	۴,۹۶۴	۸,۸۳۱	۶۲,۰	۱۴,۶۳۵

شکل ۱۱ مبادله میان هزینه چرخه عمر و شکاف قابلیت را با میانه و دامنه صدک ۱۰ تا ۹۰ نشان می‌دهد. گزینه‌هایی که در این نمودار به سمت پایین و چپ قرار دارند، از نظر هر دو معیار برترند. این نمودار به فرماندهی اجازه می‌دهد سطح ریسک‌پذیری و محدودیت بودجه را به‌صورت شفاف در انتخاب راهبرد لحاظ کند، به جای آنکه بر یک عدد قطعی تکیه کند.



شکل ۱۱. مبادله هزینه چرخه عمر و شکاف قابلیت (نقطه: میانه مونت‌کارلو؛ میله: صدک ۱۰ تا ۹۰)

برای ترجمه این مبادله به زبان بودجه، نسبت هزینه–اثربخشی افزایشی (هزینه چرخه عمر اضافی به ازای هر خودرو–هفته کاهش شکاف قابلیت) برای گام‌های اصلی بر اساس نتایج قطعی جدول ۶ محاسبه شد. تمدید عمر (س۱ به س۲) با ۲٬۸۴۳ واحد هزینه اضافی، ۶٬۸۱۷ خودرو–هفته از شکاف می‌کاهد (حدود ۰٫۴۲ واحد به ازای هر خودرو–هفته)؛ افزودن جایگاه تعمیرگاه (س۲ به س۵) با ۳۱۱ واحد، ۲۶۰ خودرو–هفته (حدود ۱٫۲ واحد) و دو برابر کردن نیروی فنی (س۵ به س۶) با ۲٬۲۸۸ واحد، ۵۵۵ خودرو–هفته (حدود ۴٫۱ واحد) کاهش شکاف ایجاد می‌کند. این افزایش حدوداً ده‌برابری هزینه نهایی، بازده نزولی سرمایه‌گذاری یک‌جانبه در منابع مکمل را نشان می‌دهد. در مقابل، خرید مرحله‌ای (س۴ در برابر س۳) و سیاست مقاوم (س۷ در برابر س۶) بدون تغییر شکاف قطعی، به ترتیب ۱۵۰ و ۱۴۱ واحد صرفه‌جویی ایجاد می‌کنند، و سیاست تاب‌آوری (س۸ به س۹) با ۱٬۲۴۸ واحد هزینه اضافی، ۱۰٬۵۹۹ خودرو–هفته از شکاف می‌کاهد (حدود ۰٫۱۲ واحد به ازای هر خودرو–هفته) که کمترین هزینه نهایی در میان گام‌های بررسی‌شده است.

۷. بحث های مدیریتی

نتایج به سؤال اصلی مقاله جاری پاسخی عملیاتی یه شرح زیر ارائه می شود. پویایی سیستم زمانی به بهبود مدیریت دارایی‌های لجستیکی کمک می‌کند که (الف) تصمیمات خرید، تمدید عمر، ظرفیت تعمیرگاه، نیروی انسانی و قطعات را در یک مدل یکپارچه کند؛ (ب) شاخص‌ها را در سه سطح ناوگان، فعالیت و منبع ردیابی کند تا علت ریشه‌ای شکاف آشکار شود؛ و (ج) سیاست‌ها را نه فقط در شرایط قطعی بلکه در برابر عدم‌قطعیت و تنش بیازماید. جدول ۹ ارتباط سؤالات فرعی طرح با یافته‌های مقاله را نشان می‌دهد.

بر اساس یافته‌ها، دلالت‌های زیر برای فرماندهان و ستاد آماد و پشتیبانی پیشنهاد می‌شود:

- **پرهیز از دره قابلیت:** خروج ناوگان قدیم باید با آهنگ واقعی ورود و خدمه‌گذاری ناوگان جدید همگام شود؛ تمدید عمر محدود و هدفمند (نه کامل) برای عبور از دوره گذار، به شرط تقویت هم‌زمان ظرفیت تعمیرگاه، توصیه می‌شود.
- **دام تمدید عمر:** تمدید عمر بدون سرمایه‌گذاری در جایگاه‌ها و نیروی فنی، قابلیت را با هزینه بالا و دسترس‌پذیری پایین حفظ می‌کند؛ هر تصمیم تمدید عمر باید هم‌زمان با برنامه ظرفیت تعمیرگاهی و قطعات تصویب شود.
- **سرمایه‌گذاری متوازن در منابع مکمل:** افزایش یک منبع (جایگاه) گلوگاه را به منبع دیگر (تکنسین) منتقل می‌کند؛ بسته‌های سرمایه‌گذاری باید به‌صورت ترکیبی ارزیابی شوند.
- **مدیریت خدمه وظیفه:** به دلیل ترخیص دوره‌ای، کاهش جذب و آموزش اثری غیرخطی و تأخیری دارد؛ در این مطالعه، سیاست مقاوم حدود ۱۵ درصد جذب بیشتر از کمینه قطعی نیاز داشت؛ بنابراین در نظر گرفتن چنین حاشیه ایمنی‌ای توصیه می‌شود.

- **تاب‌آوری تأمین:** ذخیره راهبردی قطعات حیاتی و بومی‌سازی بخشی از تولید قطعات، اثر تحریم و بحران را به شکل معناداری کاهش می‌دهد و باید در اسناد پشتیبانی به‌عنوان سیاست پیشگیرانه لحاظ شود.
- **تصمیم‌گیری مقاوم:** سیاست‌های «بهینه» باید پیش از تصویب در برابر عدم‌قطعیت آزموده شوند و معیار انتخاب، عملکرد در بدترین حالت‌های محتمل (مانند صدک ۹۰) باشد، نه فقط مقدار مورد انتظار.

این یافته‌ها با نتایج مطالعه مرجع هم‌خوانی دارند، از جمله کاهش دسترس‌پذیری در گزینه تمدید عمر، جابه‌جایی گلوگاه میان جایگاه و نیروی فنی، و امکان کاهش منابع بدون افزایش شکاف (Elsawah et al., ۲۰۲۴). تفاوت مهم آن است که در بستر این پژوهش، به دلیل دره قابلیت دوره گذار، تمدید عمر شکاف تجمعی را کاهش می‌دهد؛ بنابراین قضاوت درباره تمدید عمر به معیار فرماندهی (شکاف قابلیت در برابر دسترس‌پذیری و هزینه) بستگی دارد و مدل این مبادله را شفاف می‌کند. همچنین برخلاف مطالعه مرجع، این پژوهش نشان داد که ظرفیت به‌ظاهر بیکار تکنسین‌ها نقش ذخیره برای اوج بار را دارد و کاهش آن هزینه‌بر است.

۸. نتیجه‌گیری

این مقاله روش‌شناسی پشتیبان تصمیم مبتنی بر پویایی سیستم الساوه و همکاران را برای مدیریت دارایی‌ها و منابع لجستیکی نیروی زمینی آجا بومی‌سازی و توسعه داد و با ادغام شاخص هزینه چرخه عمر و تحلیل هزینه–اثربخشی افزایشی، آن را به ابزاری برای ارزیابی هم‌زمان پیامدهای مالی و قابلیتی راهبردها تبدیل کرد. مدل پیشنهادی ناوگان دوره‌ای، تعمیرات و معاینه فنی، جایگاه تعمیرگاه، نیروی فنی صنعتی، خدمه مبتنی بر خدمت وظیفه و زنجیره قطعات یدکی تحت تحریم را در یک چارچوب یکپارچه بازنمایی می‌کند و با افزودن گام آزمون استواری و تنش، امکان انتخاب سیاست‌های مقاوم را فراهم می‌آورد. نتایج مطالعه موردی شبیه‌سازی‌شده نشان داد که (۱) گذار شتاب‌زده ناوگان دره قابلیت ایجاد می‌کند؛ (۲) تمدید عمر بدون تقویت ظرفیت به دام فرسودگی منجر می‌شود؛ (۳) گلوگاه‌های منابع مکمل جابه‌جا می‌شوند؛ (۴) بهینه‌سازی قطعی منابع می‌تواند شکننده باشد؛ (۵) ذخیره راهبردی و بومی‌سازی قطعات تاب‌آوری ناوگان را در برابر تحریم و بحران به‌طور معناداری افزایش می‌دهد؛ و (۶) هزینه نهایی کاهش شکاف قابلیت در منابع مختلف تفاوت چشمگیری دارد و سرمایه‌گذاری متوازن و هدفمند، از افزایش یک‌جانبه یک منبع هزینه–اثربخش‌تر است.

از منظر اقتصادی و مالی، یافته‌ها چند پیام روشن برای برنامه‌ریزی بودجه آماد و پشتیبانی دارد. نخست، ارزان‌ترین راهبرد از نظر هزینه چرخه عمر (جایگزینی سریع، ۹٬۶۶۷ واحد) لزوماً اقتصادی‌ترین نیست، زیرا هزینه پنهان آن به شکل دره قابلیت پرداخت می‌شود؛ تمدید عمر، با هزینه نهایی حدود ۰٫۴۲ واحد به ازای هر خودرو–هفته کاهش شکاف، کم‌هزینه‌ترین گام برای عبور از دره گذار است، هرچند هزینه چرخه عمر را ۲۹٪ افزایش می‌دهد. دوم، هزینه نهایی کاهش شکاف با افزودن جایگاه تعمیرگاه (حدود ۱٫۲ واحد) و سپس دو برابر کردن نیروی فنی (حدود ۴٫۱ واحد) به‌سرعت افزایش می‌یابد؛ این بازده نزولی که ریشه در جابه‌جایی گلوگاه میان منابع مکمل دارد، نشان می‌دهد بودجه‌ریزی جداگانه برای هر منبع به اتلاف منابع منجر می‌شود و بسته‌های سرمایه‌گذاری باید به‌صورت ترکیبی ارزیابی شوند. سوم، صرفه‌جویی بدون کاهش قابلیت امکان‌پذیر است: خرید مرحله‌ای ۱٫۴٪ و سیاست مقاوم منابع ۰٫۹٪ از هزینه چرخه عمر می‌کاهد؛ اما صرفه‌جویی تهاجمی‌تر (بهینه قطعی) ریسک عملیاتی پنهانی دارد که تنها در تحلیل عدم‌قطعیت آشکار می‌شود. چهارم، سرمایه‌گذاری در تاب‌آوری تأمین، با ۹٫۲٪ هزینه اضافی و هزینه نهایی حدود ۰٫۱۲ واحد به ازای هر خودرو–هفته، هزینه–اثربخش‌ترین گام افزایشی در میان سیاست‌های آزموده‌شده است؛ به بیان دیگر، هزینه کمتر ثبت‌شده در سناریوی تحریم بدون ذخیره راهبردی، صرفه‌جویی کاذبی است که بهای آن با آمادگی پرداخت می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود ستاد آماد و پشتیبانی و حوزه‌های برنامه و بودجه، تصمیمات خرید، تمدید عمر و توسعه ظرفیت پشتیبانی را بر اساس هزینه چرخه عمر کل و نسبت هزینه–اثربخشی افزایشی، و نه صرفاً هزینه خرید یا اعتبار سالانه، ارزیابی و تصویب کنند.

براساس موارد اشاره شده در طول تحقیق جاری، مهمترین محدودیت ها عبارت اند از، نخست، داده‌ها فرضی–واقع‌گرایانه‌اند و نتایج عددی باید پس از واسنجی با داده‌های واقعی در محیط طبقه‌بندی‌شده تفسیر شوند. دوم، مدل در سطح تجمیعی و برای یک منطقه پشتیبانی ساخته شده و تبادل منابع میان مناطق، که در مدل مرجع بازنمایی شده بود، در این نسخه حذف شده است. سوم، هزینه‌ها به‌صورت نسبی بیان شده‌اند و تنزیل زمانی نشده‌اند؛ از این رو اثر ارزش زمانی پول، تورم دفاعی و نرخ ارز بر

رتبه‌بندی گزینه‌ها، به‌ویژه گزینه‌های مبتنی بر تعویق هزینه مانند تمدید عمر و خرید مرحله‌ای، بررسی نشده و هزینه عدم آمادگی نیز پولی نشده است. چهارم، رفتار تصمیم‌گیران (مانند تصمیم تمدید عمر یا احداث جایگاه) به‌صورت سناریوی برون‌زا و نه قاعده تصمیم درون‌زا مدل شده است. بنابراین، مهترین پیشنهادات آتی برای تحقیقات بیشتر عبارت اند از، (۱) افزودن ماژول منطقه‌ای و تبادل منابع میان قرارگاه‌های پشتیبانی منطقه‌ای؛ (۲) توسعه مدل ترکیبی که در آن زیرسامانه تعمیرات با شبیه‌سازی گسسته‌پیشامد و زیرسامانه خدمه با مدل عامل‌بنیان بازنمایی و با مدل پویایی سیستم یکپارچه شوند؛ (۳) اتصال مدل به الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی (مانند الگوریتم ژنتیک چندهدفه) برای جست‌وجوی خودکار فضای راهبرد؛ (۴) طراحی داشبورد تعاملی برای استفاده مستقیم فرماندهان و کاربرد مدل در دوره‌های آموزشی دانشگاه فرماندهی و ستاد؛ (۵) گسترش مدل به سایر دارایی‌های لجستیکی مانند ناوگان بالگرد پشتیبانی و تجهیزات مهندسی رزمی و تحلیل منابع مشترک میان آن‌ها؛ و (۶) محاسبه ارزش فعلی خالص هزینه چرخه عمر با نرخ‌های تنزیل و تورم دفاعی متفاوت، لحاظ‌کردن قید بودجه سالانه به‌صورت درون‌زا در مدل، و تحلیل ریسک مالی گزینه‌ها با داده‌های واقعی هزینه.

منابع:

Adamides, E., Stamboulis, Y., & Varelis, A. (2004). Model-based assessment of military aircraft engine maintenance systems. Journal of the Operational Research Society, 55(9), 957–967.

Akl, A. M., El Sawah, S., Chakrabortty, R. K., & Turan, H. H. (2022). A joint optimization of strategic workforce planning and preventive maintenance scheduling: A simulation–optimization approach. Reliability Engineering & System Safety, 219, 108175. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108175

Ali, I. M., Turan, H. H., & Elsawah, S. (2023). A military fleet mix problem for high-valued defense assets: A simulation-based optimization approach. Expert Systems with Applications, 213, 118964. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118964

Amit, R., & Schoemaker, P. J. (1993). Strategic assets and organizational rent. Strategic Management Journal, 14(1), 33–46.

Andersen, D. F., & Emmerichs, R. M. (1982). Analyzing US military retirement policies. Simulation, 39(5), 151–158.

Asiedu, Y., & Gu, P. (1998). Product life cycle cost analysis: State of the art review. International Journal of Production Research, 36(4), 883–908.

Aspeteg, J., Holtström, J., Rehme, J., & Havemo, E. (2026). Supply chain resilience development in the defence industry: An AI-assisted content analysis of annual reports. Supply Chain Management: An International Journal, 31(7), 38–52. https://doi.org/10.1108/SCM-10-2025-1017

Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. System Dynamics Review, 12(3), 183–210.

Bisschop, J., & Meeraus, A. (1982). On the development of a general algebraic modeling system in a strategic planning environment. In J. L. Goffin & J. M. Rousseau (Eds.), Applications (pp. 1–29). Springer.

Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2018). Cost-benefit analysis: Concepts and practice (5th ed.). Cambridge University Press.

Coyle, R. G. (1985). The use of optimization methods for policy design in a system dynamics model. System Dynamics Review, 1(1), 81–91.

Coyle, R. G., & Gardiner, P. A. (1991). A system dynamics model of submarine operations and maintenance schedules. Journal of the Operational Research Society, 42(6), 453–462.

Eisler, C., & Allen, D. (2012). A strategic simulation tool for capability-based joint force structure analysis. In Proceedings of ICORES 2012 (pp. 21–30). SciTePress.

Elsawah, S., Turan, H. H., Gordon, L., & Ryan, M. J. (2024). A decision support methodology to support military asset and resource planning. Journal of Simulation, 18(2), 154–179. https://doi.org/10.1080/17477778.2023.2165460

Fabrycky, W. J., & Blanchard, B. S. (1991). Life-cycle cost and economic analysis. Prentice Hall.

Fan, C. Y., Fan, P. S., & Chang, P. C. (2010). A system dynamics modeling approach for a military weapon maintenance supply system. International Journal of Production Economics, 128(2), 457–469.

Fisher, G. H. (1971). Cost considerations in systems analysis. American Elsevier.

Forrester, J. W. (1961). Industrial dynamics. MIT Press.

Shakerian, M., & Keihani, H. (2026). AI-Driven Economic Forecasting for Industry 5.0 Enterprises. In *Industry 5.0's Impact on Economic Innovation* (pp. 35-50). IGI Global Scientific Publishing.

Größler, A. (2007). A dynamic view on strategic resources and capabilities applied to an example from the manufacturing strategy literature. Journal of Manufacturing Technology Management, 18(3), 250–266.

Größler, A., Bivona, E., & Li, F. (2015). Evaluation of asset replacement strategies considering economic cycles: Lessons from the machinery rental business. International Journal of Modelling in Operations Management, 5(1), 52–71.

Roudaki, M., Pourghader Chobar, A., Nagahi, A., Keihani, H., & Alamiparvin, R. (2025). Evaluation of supply chain performance using combination of DEA and fuzzy TOPSIS: A case from Iranian electric industry. *Journal of industrial engineering and management studies*, *12*(1), 114-124.

Hall, J. W., Le Masurier, J. W., Baker Langman, E. A., Davis, J. P., & Taylor, C. A. (2004). A decision-support methodology for performance-based asset management. Civil Engineering and Environmental Systems, 21(1), 51–75.

Hamed, M. M., Turan, H. H., & Elsawah, S. (2024). Balancing supply diversification and environmental impacts: A system dynamics approach to de-risk rare earths supply chain. Resources Policy, 92, 105038. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105038

Hartley, K., & Sandler, T. (1995). The economics of defense. Cambridge University Press.

Hill, R. R., Miller, J. O., & McIntyre, G. A. (2001). Applications of discrete event simulation modeling to military problems. In Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference (pp. 780–788). IEEE.

Hill, R. R., & Tolk, A. (2017). A history of military computer simulation. In Advances in modeling and simulation (pp. 277–299). Springer.

Hitch, C. J., & McKean, R. N. (1960). The economics of defense in the nuclear age. Harvard University Press.

Hudson, K., Elsawah, S., & Ryan, M. (2017). A prototype simulation model for army logistics training. INCOSE International Symposium, 27, 1520–1538.

Hufbauer, G. C., Schott, J. J., Elliott, K. A., & Oegg, B. (2007). Economic sanctions reconsidered (3rd ed.). Peterson Institute for International Economics.

IEC 60300-3-3. (2017). Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing. International Electrotechnical Commission.

ISO 55000. (2014). Asset management: Overview, principles and terminology. International Organization for Standardization.

Jalalvand, F., Turan, H. H., & Elsawah, S. (2026). Machine learning integrated multi-objective simulation-based optimization for a personnel planning, asset management and fleet renewal problem. Computers & Industrial Engineering, 211, 111564. https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111564

Jalalvand, F., Turan, H. H., Elsawah, S., & Ryan, M. J. (2020). A multi-objective risk-averse workforce planning under uncertainty. In 2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (pp. 1626–1633). IEEE.

Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2013). Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications (2nd ed.). CRC Press.

Jnitova, V., Elsawah, S., & Ryan, M. (2017). Towards a modular system dynamics approach for modelling military workforce planning problems. INCOSE International Symposium, 27, 704–720.

Kahagalage, S. D., Turan, H. H., Elsawah, S., & Gary, M. S. (2024). Exploratory modelling and analysis to support decision-making under deep uncertainty: A case study from defence resource planning and asset management. Technological Forecasting and Social Change, 200, 123150. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123150

Kirkpatrick, D. L. I. (2004). Trends in the costs of weapon systems and the consequences. Defence and Peace Economics, 15(3), 259–273.

Kosanoglu, F., Atmis, M., & Turan, H. H. (2024). A deep reinforcement learning assisted simulated annealing algorithm for a maintenance planning problem. Annals of Operations Research, 339, 79–110. https://doi.org/10.1007/s10479-022-04612-8

Keihani, H. (2025). Simulation-based on multi-objective optimization in complex system: A meta-modeling approach. *Complexity Analysis and Applications*, *2*(1), 25-38.

Lempert, R. J., Popper, S. W., & Bankes, S. C. (2003). Shaping the next one hundred years: New methods for quantitative, long-term policy analysis. RAND Corporation.

MacDonald, L., & Paul, J. A. (2024). A risk analytics model for strategic workforce planning: Readiness of enlisted military personnel. Annals of Operations Research. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s10479-023-05567-0

McLucas, A., Lyell, D., & Rose, B. (2006). Defence capability management: Introduction into service of multi-role helicopters. In Proceedings of the 24th International Conference of the System Dynamics Society (pp. 92–110).

O'Neil, R., Khatab, A., & Diallo, C. (2025). Optimizing predictive maintenance and mission assignment to enhance fleet readiness under uncertainty. Autonomous Intelligent Systems, 5(1). https://doi.org/10.1007/s43684-025-00104-1

Pourghader Chobar, A., Bigdeli, H., & Shamami, N. (2024). A Mathematical Model of Hub Location for War Equipment under Uncertainty Using Meta-Heuristic Algorithms. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, *11*(1), 62-83.

Salehi, P., Khalaj, M., & Jafari, D. (2024). Presenting a robust optimization model for the problem of scheduling the improvement and transfer of the military transport fleet in the armed forces. Defense Policy, 33(128), 11–38. (In Persian)

Sani, S., Schaefer, D., & Milisavljevic-Syed, J. (2022). Strategies for achieving pre-emptive resilience in military supply chains. Procedia CIRP, 107, 1526–1532. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.186

Sani Mohammed, S., Schaefer, D., & Milisavljevic-Syed, J. (2023). Towards pre-emptive resilience in military supply chains: A compromise decision support model-based approach. Production & Manufacturing Research, 11(1), 2220768. https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2220768

Sterman, J. D. (1989). Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. Management Science, 35(3), 321–339.

Sterman, J. D. (2000). Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. Irwin/McGraw-Hill.

Thomas, D. A., Kwinn, B. T., McGinnis, M., Bowman, B. A., & Entner, M. D. (1997). The US Army enlisted personnel system: A system dynamics approach. In 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Vol. 2, pp. 1263–1267).

Turan, H. H. (2026). A system-level simulation–optimisation framework for repairable spare parts sustainment. INCOSE International Symposium, 36, 497–508. https://doi.org/10.1002/iis2.70145

Turan, H. H., Atmis, M., Kosanoglu, F., Elsawah, S., & Ryan, M. J. (2020b). A risk-averse simulation-based approach for a joint optimization of workforce capacity, spare part stocks and scheduling priorities in maintenance planning. Reliability Engineering & System Safety, 204, 107199. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107199

Turan, H. H., Elsawah, S., & Ryan, M. J. (2020a). A long-term fleet renewal problem under uncertainty: A simulation-based optimization approach. Expert Systems with Applications, 145, 113158.

Turan, H. H., Jalalvand, F., Elsawah, S., & Ryan, M. J. (2022). A joint problem of strategic workforce planning and fleet renewal: With an application in defense. European Journal of Operational Research, 296(2), 615–634. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.04.010

Turan, H. H., Jalalvand, F., Kahagalage, S., & El Sawah, S. (2021b). Integrating decision maker preferences to a risk-averse multi-objective simulation-based optimization for a military workforce planning, asset management and fleet management problem. Computers & Industrial Engineering, 162, 107752. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107752

Turan, H. H., Kahagalage, S. D., & El Sawah, S. (2026b). Leveraging simulation and robust decision-making to optimize military asset maintenance and workforce management. Journal of Defense Analytics and Logistics, 10, 20–40. https://doi.org/10.1108/JDAL-03-2025-0007

Turan, H. H., Kahagalage, S. D., Jalalvand, F., & El Sawah, S. (2021a). A multi-objective simulation–optimization for a joint problem of strategic facility location, workforce planning, and capacity allocation: A case study in the Royal Australian Navy. Expert Systems with Applications, 186, 115751. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115751

Turan, H. H., Kahagalage, S., & Elsawah, S. (2026a). Multi-objective robust decision-making approach to a joint problem under deep uncertainty in defence. RAIRO-Operations Research, 60(4), 1837–1862. https://doi.org/10.1051/ro/2026068

Urmston, A., Song, D., & Lyons, A. (2024). The development of risk assessments and supplier resilience models for military industrial supply chains considering rare disruptions. Logistics, 8(2), 57. https://doi.org/10.3390/logistics8020057

Valtonen, I., Rautio, S., & Lehtonen, J.-M. (2023). Designing resilient military logistics with additive manufacturing. Continuity & Resilience Review, 5(1), 1–16. https://doi.org/10.1108/CRR-08-2022-0015

Warren, K. (2002). Competitive strategy dynamics. Wiley.

Warren, K. (2005). Improving strategic management with the fundamental principles of system dynamics. System Dynamics Review, 21(4), 329–350.

Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing—Theory, information acquisition and application. International Journal of Project Management, 15(6), 335–344.