از بنادر سنتی به هوشمند: ارزیابی و رتبه‌بندی بنادر بازرگانی ایران با رویکرد ترکیبی BWM، TOPSIS و PROMETHEE

مقاله علمی -پژوهشی

محمد والی پور، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
***عبدالرّضا شیخ‌الاسلامی (نویسنده مسئول)**، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
***پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Sheikh@iust.ac.ir**

دریافت:۱۴۰۵/۰۳/۱۵- پذیرش:۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه ۱۸۲-۱۵۷

چکیده

گذار به اکوسیستم هوشمند به ضرورتی انکارناپذیر برای حفظ رقابت‌پذیری بنادر و تضمین تاب‌آوری زنجیره تأمین تبدیل شده است. با این حال، در بسیاری از اقتصادهای در حال توسعه، این گذار مستلزم عبور از نگاه صرفاً فناورانه و تمرکز فعالانه بر رفع گلوگاه‌های عمیق ساختاری و عملیاتی است؛ امری که تنها با مشارکت تمامی ذی‌نفعان بندری قابل تحقق است. این پژوهش با هدف فاصله گرفتن از مدل‌های مرسوم و ایستای سنجش بلوغ، یک چارچوب پیش‌نگر تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) را توسعه داده است که به‌طور خاص برای ارزیابی آمادگی و اولویت‌بندی بنادر جهت استقرار اکوسیستم هوشمند طراحی شده است. بدین منظور، تلاش شده است تا ابتدا با استفاده از روش بهترین-بدترین (BWM)، وزن‌دهی مستحکمی به شاخص‌های کلیدی استخراج‌شده از تقاطع چالش‌های عملیاتی، آمادگی زیرساختی، ریسک‌های پیاده‌سازی فناوری و مشخصات ژئواکونومیک صورت گیرد. سپس، با بهره‌گیری از ترکیب تکنیک‌های TOPSIS و PROMETHEE، شبکه‌ای جامع از بنادر بازرگانی ایران از منظر پتانسیل هوشمندسازی رتبه‌بندی و اولویت‌بندی شوند. همچنین، به‌منظور اطمینان از پایایی نتایج تحت سناریوهای مختلف، چارچوب ارزیابی پیشنهادی با استفاده از شبیه سازی مونت‌کارلو و تحلیل حساسیت جامع تقویت شده است. یافته‌های مطالعه نشان می‌دهد که تخصیص منابع کلان در این حوزه باید هم‌راستا با ظرفیت جذب، میزان خطرپذیری و واقعیت‌های ذاتی هر بندر باشد. از این رو، تجویز نسخه‌ای واحد برای تمامی بنادر، فاقد کارایی و توجیه راهبردی است و بنادر به سیاست‌های تفکیک شده و متناسب با اقتضائات محلی نیاز دارند. در این مسیر، باید از رویکرد تحول یک‌باره پرهیز نمود و در عوض، راهبرد توسعه پیمانه‌ای و گلوگاه‌محور را در پیش گرفت. در نهایت، خروجی این الگوی ترکیبی، نقشه‌راهی منعطف در اختیار مقامات بندری و سیاست‌گذاران قرار می‌دهد تا هوشمندسازی در بنادر کشورهای درحال‌توسعه را با تمرکز بر حل چالش‌های عملیاتی و بر پایه راهبرد «شروع کوچک، تفکر بزرگ» طراحی و اجرایی نمایند.

واژه‌های کلیدی: اکوسیستم بندر هوشمند، اولویت‌بندی بنادر، روش بهترین-بدترین، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره

۱ - مقدمه

اختصاص بیش از ۸۰ درصد از حجم تجارت جهانی به حمل‌ونقل دریایی (Ribeiro and Pimentel,2024) و ثبت رشد سالیانه‌ای در حدود ٤درصد طی دهه‌های اخیر (Lazaroiu and Roscia,2017)، این شیوه حمل‌ونقل را به شریان حیاتی اقتصاد بین‌الملل و ستون فقرات زنجیره‌های تأمین جهانی مبدّل ساخته است. در سال‌های اخیر، اهمیت راهبردی و درهم‌تنیدگی عمیق اقتصاد جهانی با تجارت دریایی بیش‌ازپیش نمایان شده است؛ به‌گونه‌ای که رخدادهای شوک‌آوری نظیر همه‌گیری کووید-۱۹

(Heikkilä,Saarni,2022) و تنش‌های ژئوپلیتیک در آبراهه‌های بین‌المللی، اثبات نمودند که بروز هرگونه اختلال و محدودیت در تردد ناوگان دریایی و عملیات بندری، می‌تواند پیامدهای مخرب و مستقیمی بر پیکره تجارت جهانی، ثبات زنجیره‌های تأمین و اقتصاد کلان کشورها بر جای گذارد. در سایه این تجربیات، ضرورت توسعه مستمر و ارتقای کارایی بنادر بیش از گذشته برجسته شده است؛ چراکه بنادر، به‌عنوان گره‌های کلیدی شبکه لجستیک جهانی و دروازه‌های اصلی تجارت بین‌الملل، نقشی بی‌بدیل در تسهیل جریان کالا، پشتیبانی از شکوفایی اقتصادی و تقویت تاب‌آوری اقتصاد ملی کشورها ایفا می‌کنند (Lee and Choi,2018) Jun.

همگام با درک این جایگاه حساس، پارادایم رقابت در صنعت بندری و شاخص‌های ارزیابی عملکرد بنادر نیز دگردیسی بنیادینی را تجربه کرده است. اگر در گذشته معیار اصلی برتری بنادر صرفاً بر حجم عملیات تخلیه و بارگیری استوار بوده، امروزه مؤلفه‌هایی چون ارتقای کیفیت، تسریع در عملیات و بهره‌وری خدمات، به شاخص‌های تعیین‌کننده در این عرصه بدل شده‌اند (Dong and Wang,2024) Niu . این تغییر رویکرد استراتژیک، در واقع واکنشی ناگزیر به چالش‌های نوپدیدی است که در نتیجه رشد تصاعدی تجارت دریایی و ظهور شناورهای غول‌پیکر، پیش روی بنادر قرار گرفته است.

خطاها و تأخیرهای عملیاتی و ازدحام بندری، در کنار بحران‌های نوظهور مرتبط با مصرف انرژی و پیامدهای مخرب زیست‌محیطی، از جمله چالش‌های بنیادین و فراگیر بنادر در سالیان اخیر بوده‌اند (Lim and Race,2020) Molavi .

این گره‌های عملیاتی، حتی در پیشرفته‌ترین بنادر جهان نیز بحران‌ساز شده‌اند؛ برای نمونه، بندر لس‌آنجلس/لانگ‌بیچ در ایالات متحده و کلان‌بندر شانگهای در چین، در مقاطع مختلف با انسدادهای شدید زنجیره تأمین و تأخیرهای عملیاتی فلج‌کننده‌ای مواجه بوده‌اند که موجی از پیامدهای منفی را به اقتصاد جهانی تحمیل نموده است (UNCTAD,2022) .

به‌طور مشابه، این دست چالش‌های سیستماتیک در بنادر بازرگانی ایران نیز رسوخ کرده و ماهیتی مزمن به صورت صف‌های طویل و فرسایشی کامیون‌ها در پشت دروازه‌های ورود و خروج به خود گرفته‌اند. از سوی دیگر، فقدان قابلیت رهگیری لحظه‌ای و سیستماتیک جریان بار، پدیده‌ی نامطلوب «رسوب کالا» را تشدید کرده و به اشغالِ ناکارآمد ظرفیت محوطه‌ها و انبارهای بندری منجر شده است.

در پاسخ به این چالش‌ها، مفهوم «بندر هوشمند» به‌عنوان یکی از دستاوردهای کلیدی انقلاب صنعتی چهارم (Zarzuelo,2021) ظهور یافته است. این مفهوم، فراتر از اتوماسیون ساده تجهیزات، به‌معنای ایجاد یک اکوسیستم دیجیتال و یکپارچه است که در آن تمامی جریان‌های فیزیکی و اطلاعاتی برای تصمیم‌گیری لحظه‌ای بهینه‌سازی می‌شوند. در واقع، تحقق این اکوسیستم نوین با بهره‌مندی از نه فناوری پیشرفته (Li et al,2023) مورد اشاره در جدول ۱ صورت می‌پذیرد که امکان رفع چالش‌های عملیاتی و حفظ و ارتقای رقابت‌پذیری بنادر را فراهم آورده‌اند.

باید توجه داشت که استقرار فناوری‌های یادشده، صرفاً به‌معنای انباشت تجهیزات رباتیک نیست. در درک دقیق این پارادایم، تمایز قائل شدن میان دو مفهوم «اتوماسیون» و «هوشمند سازی» امری بنیادین است. در اتوماسیون، سیستم صرفاً یک دستورالعمل واحد را به‌صورت تکراری (نظیر ثبت ورود کامیون‌ها از طریق شناسایی RFID) به‌عنوان جایگزینی برای کار فیزیکی انسان انجام می‌دهد؛ اما هوشمند سازی به‌معنای توانمند کردن سیستم جهت تفکّر، تحلیل و تصمیم‌گیری است. ازاین‌رو، هوشمندی یک مفهوم دووجهی است که از پیوند ابعاد «تکنولوژیک» و «کارکردی» معنا می‌یابد (Ribeiro and Pimentel,2024).

در همین راستا، بنادر هوشمند به‌عنوان پنجمین مرحله از سیر تکامل نسلی بنادر شناخته می‌شوند (Chen et al,2019) که با بهره‌مندی از فناوری‌های نوین، نه‌تنها عملیات لجستیکی را بهینه می‌سازند، بلکه با کاهش چشمگیر مصرف انرژی و آلاینده‌ها، بستری برای تحقق «اهداف توسعه پایدار» (SDGs) فراهم می‌آورند (Yen et al,2023).

رسیدن به این سطح از پایداری و هوشمندی، نمایانگر نقطه آرمانی تکامل بنادر است؛ با این‌وجود، مطالعات نشان می‌دهند که سیر توسعه بنادر را نمی‌توان در بازه‌های زمانی مشخص منجمد نمود و حرکت آن‌ها برای پیشرفت، لزوماً یک مسیر خطی و تک‌بعدی را طی نمی‌کند. به‌عبارت‌دیگر، الزامی وجود ندارد که یک بندر برای ورود به نسل پنجم، تمامی مراحل نسل‌های پیشین (نسل یک تا چهار) را به‌طور کامل و متوالی به اتمام رسانده باشد؛ بلکه در رویکردهای نوین مدیریت بندری، استقرار فناوری‌های هوشمند نسل پنجم می‌تواند به‌مثابه یک جهش فناورانه عمل نماید. شواهد آماری نیز این تغییر پارادایم را تأیید می‌کنند؛ طبق گزارش‌های سال ۲۰۲۰، حدود ۲۰۰ بندر در جهان برنامه‌هایی را برای ارتقا و حرکت به سمت نسل پنجم (بنادر هوشمند) در بازه پنج‌ساله ارائه کرده‌اند و این در حالی

است که در همان سال تنها ۶۰ بندر به‌طور کامل به‌عنوان بنادر نسل چهارم شناسایی شده‌اند (Orive et al,2020).

جدول ۱ . فناوری‌های قابل استفاده در بنادر هوشمند

فناوری	نمونه کاربرد در اکوسیستم بنادر هوشمند
کلان‌داده و تحلیل‌گری (Big data and analytics)	پردازش داده‌های حجیم عملیاتی بنادر
ربات‌های خودران و اتوماسیون (Autonomous robots)	به‌کارگیری تجهیزات بدون سرنشین (نظیر AGVها) جهت اجرای ایمن، پیوسته و شبانه‌روزی عملیات تخلیه و بارگیری.
شبیه‌سازی (Simulation)	ایجاد مدل مجازی (Digital Twin) از بندر جهت مدل‌سازی سناریوهای ترافیکی، بدون ایجاد اختلال در سیستم واقعی.
یکپارچه‌سازی افقی و عمودی (Horizontal and vertical integration)	پیوند اطلاعاتی فرآیندهای درون‌سازمانی بندر (عمودی) و اشتراک‌گذاری بی‌درنگ داده‌ها با سایر بازیگران زنجیره تأمین نظیر گمرک (افقی).
اینترنت اشیای صنعتی (Industrial IoT)	تجهیز دارایی‌ها به حسگرهای متصل برای پایش لحظه‌ای تجهیزات، ردیابی کالاها و اجرای استراتژی تعمیرات پیش‌بینانه.
امنیت سایبری (Cybersecurity)	استقرار پروتکل‌های امنیتی جهت صیانت از زیرساخت‌های حیاتی شبکه و جلوگیری از توقف عملیات در برابر حملات بدافزاری.
رایانش ابری (The cloud)	بهره‌گیری از بسترهای پردازشی با ظرفیت منعطف جهت کاهش هزینه‌های IT و تسهیل دسترسی یکپارچه ذی‌نفعان به سامانه‌های جامعه بندری (PCS).
چاپ سه‌بعدی (3D Printing)	تولید در محل و سریع قطعات یدکی استراتژیک تجهیزات بندری جهت کاهش زمان توقف عملیات (Downtime) و وابستگی به تأمین‌کنندگان.
واقعیت افزوده (Augmented reality - AR)	هم‌پوشانی اطلاعات دیجیتال بر محیط فیزیکی با گجت‌های هوشمند (نظیر عینک‌های AR) جهت هدایت دیداری تکنسین‌ها در تعمیرات پیچیده و بازرسی‌ها.

در پرتو این درک مفهومی، وضعیت بنادر بازرگانی ایران نیازمند تحلیلی استراتژیک است. بنادر ایران اگرچه هنوز به‌طور کامل در استانداردهای جامع نسل‌های تو سعه بنادر تثبیت نشده‌اند و با چالش‌های فیزیکی (مربوط به نسل سوم) و اطلاعاتی (مربوط به نسل چهارم) دست‌وپنجه نرم می‌کنند، اما برای حفظ جایگاه خود در اقتصاد منطقه‌ای و رقابت با بنادر پیشرو در کشورهای همسایه، نمی‌توانند منتظر طی شدن خطی این مراحل بمانند. در این راستا، اتخاذ استراتژی جهش فناورانه یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. توسعه و ارزیابی مدل‌هایی جهت استقرار اکوسیستم بندر هوشمند در ایران، نه‌تنها مسیر را برای ورود به نسل پنجم هموار می‌کند، بلکه همانند یک کاتالیزور، نقایص زیرساختی و اطلاعاتی موجود را نیز با بهره‌گیری از راه‌حل‌های نوآورانه جبران خواهد کرد.

گذار به اکوسیستم بندر هوشمند، یک دگرگونی دفعی و یک‌باره برای رفع تمامی چالش های بندری نیست؛ بلکه فرایندی تدریجی، مستمر و وابسته به سطح بلوغ دیجیتال هر بندر است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که توسعه و استقرار بنادر هوشمند نیازمند یک نقشه‌راه جامع اما مرحله‌بندی‌شده است که امکان پیاده‌سازی گام‌به‌گام فناوری‌ها را در طول زمان فراهم سازد (Belmoukari et al,2026). ازآنجاکه بنادر همواره با محدودیت‌های گوناگونی در حوزه‌های مالی، زیرساختی، فناورانه و منابع انسانی مواجه‌اند، امکان پیاده‌سازی هم‌زمان تمامی ابعاد هوشمندسازی برای آن‌ها مقدور نیست.

بر اساس استدلال بیان شده و ضرورت تدوین برنامه‌ای هدفمند برای گذار به بنادر هوشمند در کشورهای درحال‌توسعه، هدف اصلی این پژوهش توسعه یک چارچوب ارزیابی استراتژیک و جامع‌نگر جهت سنجش ظرفیت و اولویت‌بندی بنادر بازرگانی ایران برای آغاز فرایند هوشمندسازی است. برای دستیابی به این هدف، پژوهش حاضر یک رویکرد سیستماتیک و چهاروجهی را پیشنهاد می‌دهد. در این راستا، ظرفیت و اولویت هر بندر بر مبنای تحلیل یکپارچه چهار بعد کلیدی شامل: بررسی «چالش‌های عملیاتی موجود»، سنجش «مشخصات بندر و اهمیت راهبردی-ژئواکونومیک»، ارزیابی «ریسک‌های پیاده‌سازی» و تعیین سطح «آمادگی زیرساختی» مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این چارچوب به سیاست‌گذاران کلان اجازه می‌دهد تا با درکی متقاطع از این ابعاد، منابع محدود خود را بهینه‌تر تخصیص داده و گام نخست هوشمندسازی را از مستعدترین بنادر آغاز نمایند.

۲- پیشینه تحقیق

۲-۱- سیر تکامل و بسط مفهومی بندر هوشمند

مرور ادبیات نشـــان می‌دهد که تاکنون تعریفی واحد، دقیق و جهان‌شـــمول برای مفهوم «بندر هوشـــمند» ارائه نشـــده اســـت (Li et al,2023)؛ بلکه پژوهشگران مختلف، بسته به زاویه دید و تمرکز مطالعاتی خود، ابعاد متفاوتی از این مفهوم را برجســـته ساخته و طی یک سیر تاریخی موجب تکامل آن شده‌اند.

ا صطلاح «بندر هو شمند» نخ ستین‌بار در سال ۱۹۹٤ در ادبیات علمی معرفی شد. در آن زمان، این مفهوم ابتدایی صرفاً به‌معنای پیاده‌ســـازی ســـیســـتم‌های حمل‌ونقل هوشـــمند در بنادر بود؛ به‌عبارت‌دیگر، بندری هوشـــمند تلقی می‌شـــد که از فناوری‌های اطلا عاتی و ارتباطی ز مان خود برای مدیر یت بهتر ترافیک بهره می‌برد Lin (Chang and Chung,2022). امّا همگام با پیشـــرفت فنّاوری، این مفهوم از ســـطح کاربردهای محدود فراتر رفت و به یک مدل بلوغ ساختاریافته تبدیل شد. در همین راستا، کمیســـیون اقتصـــادی و اجتماعی ســـازمان ملل در حوزه آســـیا و اقیانوســـیه (UNESCAP)، چارچوبی چندمرحله‌ای برای تبیین ســـیر تکامل بنادر ارائه کرده اســـت که مســـیر گذار عملیاتی و فناورانه آن‌ها را تا ر سیدن به یکپارچگی در زنجیره تأمین جهانی به تصـــویر می‌کشـــد (Canton,2021). این مدل تکاملی نشـــان می‌دهد که بنادر برای رســـیدن به بالاترین ســـطح هوشـــمندی، از چهار گام اصلی عبور می‌کنند.

در گام نخســـت یا «الکترونیکی‌ســـازی جریان اطلاعات»، تمرکز بندر بر کاهش اتکّا به اسناد کاغذی و پردازش‌های دستی است و تلاش می‌شـــود تا رویه‌های ســـنتّی با معرفی اســـناد و داده‌های الکترونیکی جایگزین گرد ند. در گام دوم، بندر به ســـطح «نیمه‌خودکار/خودکار» ارتقا می یابد؛ در این فاز، با اســـتقرار دروازه‌های خودکار جهت کاهش ترافیک ورودی و به‌کارگیری ابزار هایی نظیر تبادل الکترونیکی داده ها (EDI) و ســـا ما نه مدیریت عملیات پایانه (TOS)، رویه‌های کسب‌وکار و عملیات بندری سیستماتیک‌تر می‌شوند.

در گام ســـوم یا «بندر دیجیتال»، تمرکز از درون بندر به ســـمت «تعامل‌پذیری و اتصـــال شـــبکه‌ای» معطوف می‌گردد. در این مرحله، بندر با بهره‌گیری از ســـیســـتم‌های ردیابی بلادرنگ مانند RFID و ایجاد بســـترهای همکاری ملی نظیر «پنجره واحد» و « سیستم جامعه بندری» (PCS)، امکان به ا شتراک‌گذاری داده‌ها با ســـایر نهادهای زنجیره تأمین را فراهم می‌آورد. در نهایت، در گام چهارم یعنی «بندر هوشـــمند»، بندر به ســـطحی از تحول دیجیتال دســـت می‌یابد که در آن با خلق مدل‌های کســـب‌وکار نوآورانه و به‌کارگیری فناوری‌های نوین، عملیات خود را برای همگامی با اســـتانداردهای جهانی کاملاً بهینه‌ســـازی می‌کند (Makkawan and Muangpan,2021). انتظار بهینه سازی عملیات بندری در نتیجه به‌کارگیری صـــرف فناوری‌های نوین را می‌بایســـت کمی خوش‌بینانه پنداشـــت؛ چراکه بنادر هوشـــمند با تمام الزامات و زیرســـاخت‌های موردنیاز تنها زمانی می‌توانند پاسخگوی اهداف عملیاتی باشند که با پیاده‌سازی یک اکوسیستم جامع متشـــکل از ذی‌نفعان مختلف و مبتنی بر توانمندی تفکر، تحلیل و تصـــمیم‌گیری، بســـتری مناســـب جهت تحقق «اهداف توسعه پایدار» (SDGs) را فراهم آورند (Yen et al,2023).

با ورود مفهوم تو سعه پایدار به ادبیات بنادر، تلاقی اهداف «بندر هوشـــمند» و «بندر ســـبز» برجســـته گردید. در ادبیات پژوهش این‌گونه تبیین شـــده اســـت که بندر ســـبز عمدتاً بر حفاظت از محیط‌زیست، کاهش آلاینده‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی تمرکز دارد، درحالی‌که بندر هوشـــمند بر کاربرد فناوری‌های نوین و ســـیســـتم‌های یکپارچه برای مدیریت بهینه تأکید می‌کند Lin (Chang and Chung,2022). با این‌وجود، مطالعات اخیر اثبات کرده‌اند که این دو رویکرد در عمل تفکیک نا پذیر ند؛ به‌گونه‌ای که توســـعه پا یدار ســـبز به‌عنوان « هدف نهایی»، و فناوری‌های هوشمند به‌عنوان «ابزار تحقق آن» شناخته می‌شوند Chen et al (2019) و (Girard,2013) و Kia (Shayan and Ghotb,2000) .

بـر همـین اسـاس، بلموکـاری و همکـاران (Belmoukari et al,2026) بنـدر هوشـمند را به‌صـورت جـامع این‌گونـه تعریـف می‌کننـد: بنـدری کـه بـا بهره‌گیـری از زیرسـاخت‌های دیجیتـال، داده‌هـای بلادرنـگ و تحلیل‌هـای پیشـرفته، عملیـات را یکپارچه کـرده و در راسـتای اهـداف توسـعه پایـدار، اثـرات مخرب زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند.

۲-۲- چالش‌های اجرایی و تجارب جهانی

هرچند تعاریف نظری پیرامون بنادر هو شمند رو به تکامل‌اند، اما واقعیت‌های میدانی نشـان می‌دهند که پیاده‌ســازی اکوســیســتم هوشـــمند با چالش‌های جدی مواجه اســـت Boullauazan (Sys and Vanelslander,2023) و (Philipp,2020) و Schumacher (Nemeth and Sihn , 2019) و همان‌طور که ژانگ و همکاران (Zhang and Lam,2019) بیان کرده‌اند،

ترویج فناوری‌های نوظهور به‌هیچ‌عنوان سهل‌تر از اختراع آن‌ها نیست. تجربه جهانی اثبات می‌کند که پذیرش فناوری‌های دیجیتال صرفاً نیازمند سرمایه‌گذاری مالی نیست، بلکه در گرو توانمندی بنادر برای غلبه بر مقاومت‌های سازمانی و موانع همگام‌سازی است (Sys and Boullauazan Vanelslander,2023). به‌عنوان‌مثال، پروژه بندر هوشمند هامبورگ نشان داد که عواملی نظیر مقاومت ذی‌نفعان و ضعف در هماهنگی از موانع اصلی موفقیت هستند (Lalla-Heilig Ruiz and Voß,2017). همچنین، روند پیاده‌سازی سامانه جامعه بندری در روتردام نزدیک به دو دهه به‌طول انجامید که گواه پیچیدگی‌های اجرایی این گذار است (Sys and Vanelslander,2023 Boullauazan).

ژانگ و همکاران (Zhang and Lam,2019) با استفاده از چارچوب فازی دلفی–AHP–TOPSIS، موانع پذیرش تحلیل کلان‌داده را در صنعت دریایی شناسایی و رتبه‌بندی نمودند و نشان دادند که چالش‌های اصلی در سه حوزه مدیریتی، فرهنگی و فنی متمرکز هستند که مهم‌ترین آن‌ها به‌ترتیب اهمیت شامل عدم درک کاربرد تحلیل داده برای بهبود کسب‌وکار، نبود حمایت مدیران ارشد و محدودیت در تبدیل داده‌های حجیم به اطلاعات قابل‌استفاده برای کاربران نهایی گزارش گردید.

بااین‌وجود، فشار رقابتی موجب شده تا پروژه‌های موفقی نظیر پروژه «اتصال کشتیرانی روتردام–۲۰۲۵» (کاهش زمان انتظار) (ark,2023) و برنامه‌های یکپارچه‌سازی هامبورگ (Kapkaeva et al,2021) شکل بگیرند که همگی بر اهمیت استراتژیک این تحوّل تأکید دارند.

۲-۳- رویکردهای ارزیابی در ادبیات پیشین

مرور انتقادی ادبیات پژوهش حاکی از آن است که رویکردهای ارزیابی عملکرد در بنادر، تحولی بنیادین و ساختاری را از مدل‌های تک‌بعدی به سمت چارچوب‌های سنجش سیستماتیک و چندوجهی تجربه کرده‌اند. در رویکردهای سنتی و اولیه، ارزیابی هوشمندی غالباً با نگاهی محدود، به سنجش جزیره‌ای متغیرهای خاص محدود می‌شد؛ به‌عنوان نمونه، تمرکز ارزیابی‌ها صرفاً معطوف به توسعه فیزیکی و سخت‌افزاری نظیر میزان اتوماسیون جرثقیل‌ها و ظرفیت تجهیزات پایانه‌ای Soeane and Bermúdez,2020) Zarzuelo) و (Gunes Kayisoglu and Bolat,2021)، پاسخگویی انفعالی به مقررات اکولوژیک مانند اعمال استانداردهای حداقلّی دفع پسماند (Iris and Lam,2019) و (Lacalle et al,2020)، و یا ارتقای کمّی شاخص‌های لجستیکی نظیر کاهش زمان توقف کشتی‌ها (Meyer et al,2021) بود. بااین‌حال، با درهم‌تنیدگی روزافزون فناوری‌های تحول‌آفرین و فرایندهای پیچیده دریایی، ناکارآمدی این مدل‌های فاقد جامعیت در سنجش میزان تاب‌آوری و پویایی اکوسیستم‌های بندری، به‌وضوح نمایان گردید.

در پاسخ به این پیچیدگی‌های نوظهور، جریان نوین پژوهش‌ها به‌سوی ارزیابی بلوغ هوشمندسازی از طریق توسعه مدل‌های مفهومی و شاخص‌های عملکردی جامع (SPI) تغییر مسیر داده است (Makkawan and Muangpan,2021).. بسط این چارچوب‌های مفهومی نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد یک بندر هوشمند، مستلزم سنجش هم‌زمان و یکپارچه پارامترهای درهم‌تنیده‌ای نظیر «عملیات»، «محیط‌زیست و انرژی» و «ایمنی و امنیت» است که از طریق شبکه‌ای از شاخص‌های خردتر و بومی‌سازی‌شده پایش می‌شوند (Makkawan and Muangpan,2021). در این انگاره‌های نوین، استقرار فناوری، دیگر غایت نهایی محسوب نمی‌شود؛ بلکه هوشمندی بر اساس توانمندی سیستم در تحقق دستاوردهای کلانی نظیر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهینه‌سازی مصرف انرژی، حداقل‌سازی تأخیرهای عملیاتی و کاهش هزینه‌های مالی سنجیده می‌شود (Yau et al,2020).

اهمیت راهبردی این رویکرد یکپارچه زمانی آشکارتر می‌گردد که بدانیم اختلال در یک زیرساخت پایه (مانند نوسانات شبکه برق)، مستقیماً توان عملیاتی کل یک بندر هوشمند را با خطر فروپاشی مواجه می‌سازد (Cannella and Framinan,2015 Dominguez).

با این‌وجود، یکی از چالش‌های بنیادین در توسعه مدل‌های ارزیابی، لزوم انطباق شاخص‌ها با اقتضائات منطقه‌ای و ناهمگونی ساختاری بنادر مختلف است. به همین دلیل، متدولوژی‌های ارزیابی در ادبیات معاصر، رویکردی ترکیبی به خود گرفته‌اند. کالیبراسیون این مدل‌ها نشان می‌دهد که در فازهای گذار به سمت هوشمندی، ابعاد عملیاتی و توجیه‌پذیری مالی به‌عنوان اولویت‌های نخستین عمل می‌کنند؛ درحالی‌که

الزامات زیست‌محیطی و ایمنی، نقش ارکان بنیادین و تضمین‌کننده تاب‌آوری سیستم را در افق‌های بلندمدت ایفا می‌نمایند (Karlı and Çelikyay,2021).

در نهایت، بلوغ رویکردهای ارزیابی در پیوند ناگسستنی آن‌ها با پارادایم «پایداری سه‌گانه» تبلور یافته است (El Othman Gazzar and Knez,2022). در پیشرفته‌ترین چارچوب‌های سنجش، اثربخشی اکوسیستم هوشمند به‌عنوان ابزاری جهت تحقق هم‌زمان سه هدف کلان ارزیابی می‌شود: نخست، بلوغ اقتصادی و عملیاتی که بر توانایی سیستم‌های هوشمند در بهینه سازی جریان‌های تجارت جهانی، ارتقای کارایی لجستیکی و حداقل‌سازی هزینه‌ها تمرکز دارد.

دوم، بلوغ اکولوژیک که نشان‌دهنده گذار از انطباق منفعلانه با مقررات زیست‌محیطی، به مدیریت پیشگیرانه از طریق پایش لحظه‌ای آلاینده‌ها، مدیریت هوشمند پسماند و بهینه سازی منابع انرژی است(Karlı and Çelikyay,2021) و Othman (El Gazzar and Knez,2022). و در نهایت، بلوغ اجتماعی-انسانی که ظرفیت بندر را در ارتقای ایمنی فیزیکی و امنیت سایبری نیروی کار در محیط‌های پرخطر، همگام با توسعه مهارت‌های دیجیتال منابع انسانی و تعامل سودمند با ذی‌نفعان محلی می‌سنجد (Othman (El Gazzar and Knez,2022).

بدین ترتیب، ارزیابی بنادر هوشمند از یک «ممیزی فناورانه» ساده، به یک «سنجش استراتژیک چندمعیاره» تکامل یافته است؛ روندی که بهره‌گیری از متدولوژی‌های ترکیبی تصمیم‌گیری را برای شناخت دقیق و اولویت‌بندی مسیر گذار این اکوسیستم پیچیده، گریزناپذیر می‌سازد.

۲-٤- شکاف مطالعاتی: ضرورت گذار به رویکرد پیش‌دستانه و کلان‌نگر

بررسی عمیق‌تر چارچوب‌های ارزیابی موجود، یک شکاف بنیادین را آشکار می‌سازد: محوریت قریب‌به‌اتفاق این مدل‌ها، سنجش عملکرد یا میزان هوشمندی بنادری است که از پیش توسعه‌یافته محسوب شده و یا وارد مسیر استقرار فناوری شده‌اند. این ابزارهای ارزیابی که عموماً رویکردی خروجی‌محور داشته و به‌صورت ارزیابی پس از توسعه هستند، برای بنادر کشورهای درحال‌توسعه که همچنان با چالش‌های فیزیکی و اطلاعاتی پایه‌ای دست‌وپنجه نرم می‌کنند، کاربردی نیستند.

همان‌طور که در منطق این پژوهش استدلال شد، استقرار فناوری‌های نوین برای این دسته از بنادر لزوماً یک مسیر خطی نیست، بلکه یک «جهش فناورانه» است. به‌گونه‌ای که در پژوهش شیخ‌الاسلامی و همکاران Sheikholeslami (Babaie and Tabbakhpour,2026) آمده است، هوشمندسازی و پذیرش تحوّل آن می‌بایست به‌صورت مرحله‌ای؛ از ترکیب‌های ساده‌تر آغاز و به‌سمت ترکیب‌های پیچیده‌تررود.

حلقه مفقوده در پیشینه پژوهش، فقدان رویکردی است که به‌جای ارزیابی خروجی‌های هوشمندی، بتواند بنادر سنتی را از منظر آمادگی پایه‌ای برای آغاز این جهش ارزیابی کند. علاوه‌براین، اکثر مطالعات پیشین روی یک پایانه یا بندر خاص متمرکز بوده‌اند و از نگاه شبکه‌ای و ملی در سطح اقتصادهای کلان غفلت کرده‌اند. در شرایط محدودیت منابع که عموماً کشورهای درحال‌توسعه با آن مواجه‌اند، سؤال اصلی سیاست‌گذاران این نیست که بندر نهایی چقدر هوشمند است؛ بلکه سؤال این است که گام نخست این گذار استراتژیک باید از کدام بندر و به چه صورت آغاز شود.

در پاسخ به این شکاف، پژوهش حاضر یک چارچوب تصمیم‌گیری استراتژیک و کلان‌نگر توسعه داده است. این مدل با عبور از شاخص‌های صرفاً فناورانه، ظرفیت بنادر را در تقاطع چهار بعد کلیدی (چالش‌های عملیاتی، آمادگی زیرساختی، ریسک‌های پیاده سازی و مشخصات ژئواکونومیک) می سنجد. جامعیت این رویکرد به‌گونه‌ای است که شبکه‌ای متنوع از بنادر کشور (شمالی و جنوبی، رودخانه‌ای و اقیانوسی) را در بر گرفته و مدلی منعطف و قابل‌تعمیم جهت تخصیص بهینه منابع و آغاز فاز استقرار اکوسیستم بندر هوشمند در کشورهای درحال‌توسعه ارائه می‌نماید.

در این پژوهش از یک رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) استفاده شده است؛ به‌گونه‌ای که در گام اول پس از تعیین معیارهای ارزیابی، از روش بهترین-بدترین (BWM) (Rezaei,2015)اوزان ابعاد و معیارها تعیین گردیده، سپس با اتخاذ شاخص‌های مختلف ارزیابی بنادر از دو روش معتبر TOPSIS (Hwang and Yoon,1981) و PROMETHEE Brans (Vincke and Mareschal,1986) به‌صورت موازی رتبه‌بندی و اولویت‌بندی شده و استحکام و پایداری رتبه‌بندی با دو روش تحلیل حساسیت (جهت بررسی تأثیر تغییر وزن معیارها بر جایگاه بنادر) و شبیه‌سازی مونت کارلو (جهت‌ارزیابی پایداری رتبه‌ها در شرایط عدم قطعیت) مورد اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند.

۳- روش‌شناسی و تحلیل یافته‌ها

۳-۱- چارچوب اجرایی پژوهش

معماری روش‌شناسی این پژوهش، در پاسخ به شکاف مطالعاتی شناسایی‌شده مبنی بر لزوم اتخاذ رویکردی پیش‌دستانه و کلان‌نگر جهت آغاز «جهش فناورانه» در بنادر، در قالب یک چارچوب ارزیابی یکپارچه و شش‌مرحله‌ای طراحی شده است. همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، این ساختار اجرایی از فاز شناسایی مفاهیم آغاز شده و تا اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته امتداد می‌یابد. تشریح دقیق گام‌های این چارچوب به شرح زیر است.

گام اول: شناسایی و ساختاردهی معیارهای ارزیابی

در گام نخست، به‌منظور عبور از رویکردهای ارزیابی تک‌بعدی، شبکه‌ای از معیارهای مؤثر بر پتانسیل پیاده‌سازی اکوسیستم بنادر هوشمند شناسایی گردید. با توجه به ضرورت سنجش پتانسیل هوشمندسازی بنادر، عوامل در چهار بعد اصلی استراتژیک شامل «چالش‌های عملیاتی موجود»، «مشخصات و پارامترهای ذاتی و عملکردی»، «ریسک‌های پیاده‌سازی» و «آمادگی‌های زیرساختی» مطابق با جدول ۲ طبقه‌بندی شدند تا تصویری همه‌جانبه از وضعیت بنادر پیش از آغاز گذار ارائه دهند.

جدول ۲. معیارهای ارزیابی پتانسیل پیاده‌سازی اکوسیستم هوشمند در بنادر

	معیارهای اصلی			
	چالش‌های موجود	مشخصات و پارامترهای ذاتی و عملکردی	ریسک‌های پیاده‌سازی	آمادگی‌های زیرساختی
زیرمعیارها	ازدحام ترافیکی	نقش در کریدورهای ترانزیتی	هزینه‌های شکست	وضعیت فعلی شبکه‌ی فناوری
	رسوب کالا	سطح درآمدی	تهدیدات امنیت سایبری	پایداری شبکه‌ی توزیع برق
	دموراژ	دسترسی دریایی	مقاومت سازمانی	قابلیت ارتقای تجهیزات فعلی
	تهدیدات ایمنی	ضریب کانتینری شدن	تعداد ذینفعان	توان بومی منطقه
	معضلات زیست محیطی	حساسیت سیاسی و برندینگ	تبعات اجتماعی	ظرفیت حمل‌ونقل ترکیبی
	خطاها و دوباره کاری‌ها			

دسته اول به‌عنوان موتور محرک و نیروهای پیشران، بنادر را به‌سمت پذیرش فناوری‌های هوشمند سوق می‌دهند. چالش‌هایی نظیر صف‌های طویل کامیونی پشت دروازه‌های ورود/خروج، رسوب کالا، هزینه‌های غیرقابل‌اجتناب ناشی از آلایندگی و دموراژ، تهدیدات جانی و خسارتی حین عملیات تخلیه و بارگیری و اتلاف زمان فزاینده به‌واسطه خطاهای فرایندی و مغایرت‌های اسنادی در این دسته قرار می‌گیرند. تجارب جهانی نشان می‌دهد بنادری که با رویکردی فناورانه به‌دنبال حل این چالش‌های عملیاتی بوده‌اند، با سرعت بیشتری به الگوی جهانی در هوشمندسازی تبدیل شده‌اند.

دسته دوم ویژگی‌هایی هستند که می‌توانند توجیه‌پذیری اقتصادی پروژه را تضمین کرده و مسیر هوشمندسازی را تسهیل کنند. نقش کلیدی در کریدورهای ترانزیتی، دسترسی دریایی مناسب، سطح عملکردی قابل‌اتکا و به‌دنبال آن سطح درآمدی بالا، ضریب بالای کانتینری‌شدن کالا، از جمله پارامترهایی هستند که به‌عنوان یک «کاتالیزور» عمل کرده و اطمینان می‌دهند که سرمایه‌گذاری کلان در هوشمندسازی چنین بندری، با نرخ بازگشت سرمایه بالا و ایجاد مزیت رقابتی پایدار همراه خواهد بود؛ همچنین ذیل این دسته، موضوع حساسیت سیاسی و اهمیت برندینگ ملی بنادر هدف گنجانده شده است تا میزان هم‌راستایی اهداف توسعه‌ای بندر با سیاست‌های کلان ژئوپلیتیک و نقش آن در ارتقای جایگاه بین‌المللی کشور ارزیابی شود؛ چراکه این هم‌سویی و اهمیت استراتژیک، می‌تواند به‌عنوان اهرمی قدرتمند برای تسهیل جذب بودجه‌های ملی، سرمایه‌گذاری‌های کلان دولتی و دریافت حمایت‌های ویژه حاکمیتی عمل نماید.

دسته سوم شامل موانعی است که همانند یک نیروی اصطکاک، روند گذار سیستم به وضعیت هوشمند را کند یا با شکست مواجه می‌سازند. تهدیدات امنیت سایبری، مقاومت سازمانی در برابر تغییر، تبعات اجتماعی ناشی از بیکاری و هزینه‌های بالای شکست از جمله این موارد هستند. پیامدهای سنگین ناشی از هزینه شکست پروژه، تهدیدات و آسیب‌پذیری‌های مرتبط با امنیت سایبری، مقاومت سازمانی در برابر تغییرات تکنولوژیک و همچنین تبعات اجتماعی ناشی از نگرانی‌های کارگری پیرامون کاهش اشتغال، از مهم‌ترین عوامل این بخش به شمار می‌روند. افزون بر این، یکی از پیچیده‌ترین معیارهای این دسته، ساختار حاکمیت بندری و تعدد ذی‌نفعان است. همان‌گونه که بانک جهانی نیز تبیین می‌کند، مدل حاکمیت بندری در واقع نحوه

توزیع نقش‌ها و مسئولیت‌ها میان بخش‌های دولتی و خصوصی را تعیین می‌کند(TOOLKIT,2001) و (Talley,2017). ازآنجاکه عمده بنادر بازرگانی از مدل حاکمیتی مالک-موجر پیروی می‌کنند، این نوع توزیع مسئولیت به شکل‌گیری شبکه‌ای متکثر از سرمایه‌گذاران و اپراتورهای خصوصی در پایانه‌های مختلف می‌انجامد. اگرچه این امر می‌تواند رقابت‌پذیری عملیاتی را ارتقا بخشد، اما در مسیر هوشمندسازی، ایجاد یک پلتفرم یکپارچه دیجیتال به‌منظور تسهیل اشتراک‌گذاری داده‌ها میان این نهادهای مستقل با چالش‌های هماهنگی، مقاومت در تبادل اطلاعات و تضاد منافع جدی روبه‌رو خواهد بود. (Notteboom and Haralambides,2020)

دسته چهارم به‌عنوان فونداسیون و بستر اصلی فیزیکی-فناورانه بندر عمل کرده و پیش‌نیازهای قطعی برای استقرار سیستم‌های هوشمند را ارزیابی می‌کند. در این راستا، پایداری شبکه توزیع برق به‌عنوان شریان حیاتی بندر هوشمند مطرح است؛ زیرا استقرار تجهیزات خودکار (مانند وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار یا AGVها) و سرورهای پردازش ابری، وابستگی مطلقی به جریان پایدار انرژی دارند و هرگونه نوسان می‌تواند به اختلالات بحرانی در عملیات فیزیکی و جریان یکپارچه داده‌ها منجر شود. در کنار زیرساخت انرژی، قابلیت ارتقای تجهیزات فعلی و آمادگی برای اینترنت اشیاء نقش کلیدی در توجیه اقتصادی و سرعت پیشرفت پروژه‌ها ایفا می‌کند. ظرفیت تطبیق‌پذیری دارایی‌های فیزیکی موجود جهت همگام‌سازی با سنسورهای دیجیتال و ارسال داده‌های تله‌متری، نیاز به جایگزینی پرهزینه ماشین‌آلات را برطرف می‌سازد.

در نهایت، ازآنجاکه پلتفرم‌های دیجیتال هوشمند سرعت پردازش و ترخیص کالا را به‌شدت افزایش می‌دهند، ظرفیت شبکه‌های حمل‌ونقل ترکیبی در پس‌کرانه (شامل زیرساخت‌های ریلی و جاده‌ای متصل به بندر) یک پیش‌نیاز اساسی به شمار می‌رود. بدون وجود این ظرفیت فیزیکی متناسب، جریان سریع اطلاعات با جریان کند فیزیکی کالا در تضاد قرار گرفته و گلوگاه‌های ترافیکی صرفاً از اسکله‌ها به دروازه‌های خروجی و پس‌کرانه بندر منتقل می‌شوند که این امر یکپارچگی کل زنجیره تأمین را مختل خواهد کرد.

گام دوم: تدوین ابزار پژوهش مبتنی بر روش بهترین-بدترین

به‌منظور اجتناب از پیچیدگی‌های مقایسات زوجی سنتی و ارتقای پایایی نظرات، ساختار پرسشنامه خبرگان بر پایه منطق روش بهترین-بدترین (BWM) که اولین‌مرتبه در سال ۲۰۱۵ توسط رضایی (Rezaei,2015) معرفی گردید طراحی شد. در این مرحله، ابزار پژوهش به‌کمک پرسشنامه‌های مرتبط در اختیار پنل تخصصی خبرگان بندری قرار گرفت تا با شناسایی مؤثرترین (بهترین) و کم‌اثرترین (بدترین) معیارها در هر بعد، ترجیحات خود را جهت استقرار اکوسیستم هوشمندسازی ثبت نمایند.

گام سوم: تعیین اوزان استراتژیک معیارها

با گردآوری داده‌های حاصل از ارزیابی خبرگان و حل مدل بهینه‌سازی ریاضی روش BWM، وزن و میزان اهمیت استراتژیک هر یک از ابعاد چهارگانه و زیرمعیارهای آن‌ها به‌صورت دقیق محاسبه شد. این اوزان منعکس‌کننده اولویت‌های سیاست‌گذاری کلان برای تخصیص بهینه منابع در مسیر هوشمندسازی بنادر هستند.

گام چهارم: استخراج مشخصات و تشکیل ماتریس تصمیم بنادر

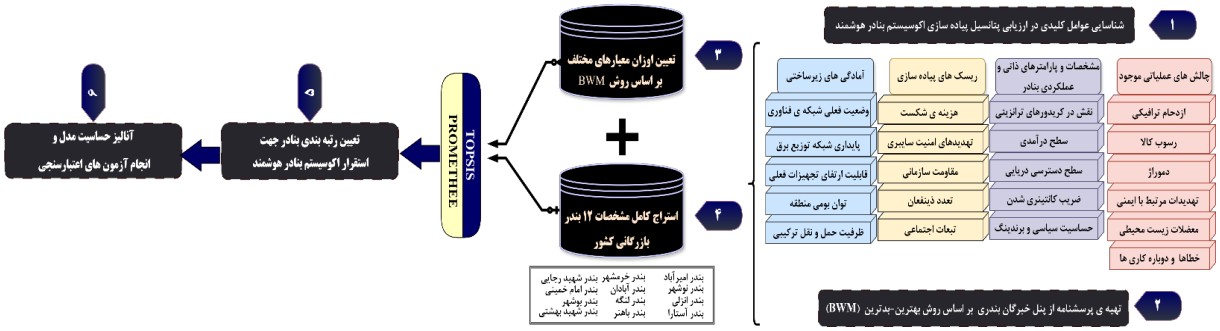
به موازات تعیین اوزان، داده‌های عملکردی، مشخصات فیزیکی و پارامترهای ژئواکونومیک ۱۲ بندر بازرگانی کشور (شامل مجموعه‌ای متنوع از بنادر شمالی و جنوبی) گردآوری و استخراج شد. این داده‌های تجربی، ماتریس تصمیم اولیه مدل پژوهش را شکل دادند تا امکان ارزیابی در سطح کلان و ملی فراهم گردد.

گام پنجم: رتبه‌بندی بنادر جهت استقرار اکوسیستم بنادر هوشمند

در این گام کلیدی، با تلفیق اوزان به‌دست‌آمده (خروجی گام سوم) و ماتریس مشخصات بنادر (خروجی گام چهارم)، ارزیابی نهایی صورت پذیرفت. جهت اجتناب از سوگیری های روش شناختی و افزایش غنای تحلیل، از دو تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل روش سازش‌پذیر تاپسیس (TOPSIS-معرفی‌شده در سال ۱۹۸۱) و روش رتبه‌بندی ترجیحی پرومتی (PROMETHEE-معرفی‌شده در سال ۱۹۸٦) به صورت موازی استفاده شد تا مستعدترین بنادر برای آغاز استراتژی جهش فناورانه اولویت‌بندی شوند.

گام ششم: آنالیز حساسیت و انجام آزمون‌های اعتبارسنجی

در گام نهایی، به‌منظور اثبات استحکام مدل و اطمینان از قابلیت اتکای رتبه‌بندی‌ها در شرایط عدم قطعیت، نتایج تحت آزمون‌های اعتبار سنجی قرار گرفت. این فاز شامل اجرای آنالیز حساسیت گام‌به‌گام و شبیه‌سازی مونت کارلو است که پژوهش را برای تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران کلان، قابل‌اتکا می‌سازد.



شکل ۱. چارچوب اجرایی پژوهش

۳-۲- جامعه آماری و مشارکت‌کنندگان

در پژوهش های مبتنی بر مدل های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و به‌طور خاص روش بهترین-بدترین (BWM)، اتکاپذیری و روایی خروجی‌های مدل بیش از آنکه به حجم انبوه نمونه آماری وابسته باشد، متکی بر عمق دانش، تخصص و احاطه استراتژیک مشارکت‌کنندگان به موضوع پژوهش است. بر این اساس و به‌منظور استخراج قضاوت‌های دقیق پیرامون شاخص‌های هوشمندسازی بنادر، در این پژوهش از روش نمونه‌گیری غیرتصادفی هدفمند جهت تشکیل پنل خبرگان استفاده شده است.

جامعه آماری و مشارکت‌کنندگان این مطالعه را ۱۵ نفر از مدیران ارشد، سیاست‌گذاران کلان و متخصصان مجرب حوزه عملیات و مهندسی بنادر تشکیل می‌دهند. سوابق حرفه‌ای اعضای پنل می‌تواند نشان‌دهنده غنای بالای تجربی و بلوغ عملیاتی این گروه محسوب گردد. توزیع سابقه فعالیت بندری مشارکت‌کنندگان به شرح جدول ۳ است.

حضور غالب مدیران و متخصصانی که دهه‌ها تجربه مواجهه مستقیم با چالش‌های زیرساختی، عملیاتی و استراتژیک بنادر را در کارنامه خود دارند، در کنار متخصصین جوانی که روندهای تکامل فناوری‌های روز مرتبط با بنادر را به‌خوبی رصد کرده‌اند، تضمین‌کننده آن است که فرآیند وزن‌دهی به معیارها و ارزیابی آمادگی بنادر، از خطاهای شناختی و سوگیری‌های صرفاً تئوریک مصون مانده است. این ترکیب خبرگانی که شامل خرد استراتژیک، پویایی و عدم اینرسی در مقابل تغییرات است، باعث می‌شود مقایسات زوجی ساختاریافته در فاز BWM، کاملاً بر واقعیات میدانی و محدودیت‌های منابع در اکوسیستم بنادر منطبق بوده و پایایی مدل یکپارچه پژوهش را در بالاترین سطح علمی قرار دهد.

جدول ۳ . متخصصین مشارکت‌کننده در تکمیل پرسشنامه‌ها

عنوان متخصص	سابقه ی اجرایی	تعداد
متخصصان جوان / کارشناسان نسل دیجیتال	۵ الی ۱۰ سال	۲ نفر
متخصصان و مدیران میانی	۱۰ الی ۲۰ سال	٤ نفر
خبرگان ارشد	۲۰ الی ۳۰ سال	۵ نفر
راهبران و سیاست گذاران کلان	بیش از ۳۰ سال	۵ نفر

۳-۳- تعیین معیار های ارز یابی و وزن‌دهی به روش بهترین-بدترین (BWM)

دلیل اصلی انتخاب این روش در مقایسه با روش‌های سنتی مانند AHP، نیاز به تعداد مقایسه‌های زوجی کمتر (تنها $2n-3$ مقایسه به جای $\frac{n(n-1)}{2}$) و در نتیجه کاهش خطای شناختی خبرگان و تولید نرخ سازگاری به مراتب بالاتر است. در مدل BWM، در شرایط ایده‌آل و با سازگاری کامل، نسبت وزن بهترین معیار به سایر معیارها (w_B/w_j) باید دقیقاً برابر با مقدار ترجیح بیان شده توسط خبره (a_{Bj}) باشد. همچنین این رابطه برای سایر معیارها نسبت به بدترین معیار ($a_{wj} = w_j/w_W$) نیز صادق است. اما در واقعیت، به دلیل خطاهای شناختی انسان در مقایسه‌ها، معمولاً این تساوی‌ها به طور دقیق برقرار نمی‌شوند.

از این رو، هدف یافتن مجموعه‌ای از اوزان است که حداکثر اختلاف مطلق (خطا) بین نسبت اوزان محاسبه شده و ترجیحات ابراز شده توسط خبرگان را کمینه کند. به همین دلیل به این ساختار، «مدل مینی‌ماکس» (Minimax) – به معنای کمینه کردن بیشترین خطا (ξ) – گفته می‌شود. برای رسیدن به این

هدف، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی زیر بر اساس منطق مینی‌ماکس حل می‌شود.

$$Min\ \xi \qquad (۱)$$

$$Min\ Max_j = \left\{ \left| {}^{w_B}/_{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| {}^{w_j}/_{w_W} - a_{Wj} \right| \right\}$$

در شرایطی که :

$$\sum_i w_j = 1$$

$$w_j \geq 0$$

در این پژوهش مطابق با رویه ی مورد اشاره توسط رضایی برای اطمینان از اعتبار و پایایی قضاوت‌های خبرگان، از شاخصی به نام نرخ سازگاری استفاده می‌شود. پس از حل مدل ریاضی مینی‌ماکس، مقدار بهینه خطای حداکثر (ξ) به دست می‌آید. سپس، با استفاده از رابطه زیر، نرخ سازگاری محاسبه می‌گردد.

$$\text{نرخ سازگاری} = \frac{\xi}{\text{شاخص سازگاری}} \qquad (۲)$$

در این رابطه شاخص سازگاری یک مقدار ثابت است که در روش بهترین-بدترین بر اساس حداکثر میزان ترجیح بهترین معیار نسبت به بدترین معیار تعیین می‌شود.

در این پژوهش بر اساس رابطه فوق نرخ سازگاری در ابعاد مختلف مورد محاسبه قرار گرفت که نتایج آن برای خبرگان مختلف ارقامی بسیار پایین و نزدیک به صفر (در بازه ۰٫۰۲ تا ۰٫۰۱) به دست آمد که حاکی از انسجام و دقت بالای مقایسات است. پس از گردآوری نظرات خبرگان، اطمینان از نتایج پرسشنامه‌های تکمیلی و تشکیل بردارهای ترجیحات، مدل ریاضی فوق برای ابعاد اصلی و زیرمعیارها حل و پس از محاسبه، اوزان نهایی اهمیت هر یک از معیارهای اصلی و زیرمعیارها در جدول ٤ درج گردید.

جدول ٤. اوزان نهایی معیارهای تصمیم‌گیری

معیار اصلی	زیرمعیار	عنوان اختصاری	وزن محلی	وزن نهایی*
چالش‌های عملیاتی	ازدحام ترافیکی	Issue 1	۰/۱۷۳	۰/۰۴۸
	رسوب کالا	Issue 2	۰/۱۵۲	۰/۰۴۰
	دموراژ	Issue 3	۰/۲۰۲	۰/۰۵۷
	تهدیدات ایمنی	Issue 4	۰/۱۷۸	۰/۰۴۵
	زیست محیطی	Issue 5	۰/۱۴۴	۰/۰۳۴
	خطاها و دوباره کاری‌ها	Issue 6	۰/۱۵۱	۰/۰۳۵
مشخصات فنی	نقش در کریدورهای ترانزیتی	Spec 1	۰/۲۶۵	۰/۰۷۵
	سطح درآمدی	Spec 2	۰/۱۸۶	۰/۰۴۷
	دسترسی دریایی	Spec 3	۰/۱۶۲	۰/۰۳۹
	ضریب کانتینری شدن	Spec4	۰/۱۸۴	۰/۰۴۷
	حساسیت سیاسی و برندینگ	Spec 5	۰/۲۰۲	۰/۰۴۵
ریسک های پیاده سازی	هزینه‌های شکست	Risk 1	۰/۱۴۶	۰/۰۳۱
	تهدیدات امنیت سایبری	Risk 2	۰/۲۲۸	۰/۰۴۸
	مقاومت سازمانی	Risk 3	۰/۲۷۶	۰/۰۵۵
	تعداد ذینفعان	Risk 4	۰/۱۹۷	۰/۰۴۰
	تبعات اجتماعی	Risk 5	۰/۱۵۳	۰/۰۳۳
آمادگی های زیرساختی	وضعیت فعلی شبکه ی فناوری	Infra 1	۰/۲۲۵	۰/۰۶۳
	پایداری شبکه‌ی توزیع برق	Infra 2	۰/۱۹۷	۰/۰۵۸
	قابلیت ارتقای تجهیزات فعلی	Infra 3	۰/۲۰۰	۰/۰۵۲
	توان بومی منطقه	Infra 4	۰/۲۱۵	۰/۰۵۴
	ظرفیت حمل و نقل ترکیبی	Infra 5	۰/۱۶۳	۰/۰۵۲

*وزن نهایی (Global Weight) هر زیرمعیار نیز از حاصل‌ضرب وزن محلی آن در وزن بُعد اصلی متناظرش به دست آمده است.

۳-٤- متدولوژی‌های رتبه‌بندی بنادر

در این پژوهش، به‌منظور تعیین اولویت بنادر جهت استقرار اکوسیستم هوشمندسازی، از ترکیب دو رویکرد متفاوت در تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. انتخاب هم‌زمان دو روش TOPSIS و PROMETHEE با هدف اعتبارسنجی متقابل نتایج صورت گرفته است تا اطمینان حاصل شود که رتبه‌بندی نهایی، کاملاً پایدار بوده و تحت‌تأثیر ساختار محاسباتی یا سوگیری‌های یک الگوریتم خاص قرار نگرفته است.

برای درک بهتر این رویکرد ترکیبی، باید به تفاوت ماهوی منطق این دو مدل اشاره کرد. روش TOPSIS یک رویکرد «مبتنی بر فاصله» است. منطق این روش بر این اساس استوار است که در یک فضای ارزیابی، یک حالت فرضی و آرمانی به‌عنوان «گزینه ایده‌آل» (دارای بالاترین امتیازات ممکن در همه معیارها) و یک حالت به‌عنوان «گزینه ضد ایده‌آل» (دارای بدترین شرایط ممکن) در نظر گرفته می‌شود. سپس الگوریتم بررسی می‌کند که وضعیت واقعی هر بندر، چقدر به آن شرایط آرمانی نزدیک و از شرایط بدترین حالت ممکن دور است. در این چارچوب،

بندری رتبه اول را کسب می‌کند که بهترین تعادل را در کمترین فاصله از ایده‌آل و بیشترین فاصله از ضد ایده‌آل داشته باشد.

در مقابل، روش PROMETHEE از خانواده روش‌های مبتنی بر مقایسه‌های ترجیحی است. در این روش، به‌جای مقایسه گزینه‌ها با یک نقطه فرضی و ایده‌آل، بنادر به صورت دوجانبه و رودررو با یکدیگر مقایسه می‌شوند. به‌عبارت‌ساده‌تر، این الگوریتم شبیه به یک رقابت مستقیم عمل می‌کند که در آن هر بندر نسبت به تک‌تک بنادر دیگر بر سر هر معیار سنجیده می‌شود تا مشخص گردد یک بندر چقدر بر رقبای خود غلبه دارد و چقدر مغلوب آن‌ها می‌شود. برآیند خالص این تقابل‌های مستقیم و دوجانبه، قدرت واقعی و برتری هر گزینه را در یک محیط رقابتی نشان داده و جایگاه نهایی آن را تثبیت می‌کند.

یکی از ظرافت‌های بسیار مهم در مدل سازی این پژوهش، نحوه تعیین جهت‌گیری و ماهیت معیارها است. در ارزیابی گزینه‌ها، ابعاد «مشخصات بندر»، «آمادگی زیرساختی» و به‌طور ویژه «چالش‌های عملیاتی» به‌عنوان معیارهای سودمند (دارای جهت مثبت) در نظر گرفته شده‌اند. منطق مثبت لحاظ کردن چالش‌ها در این ارزیابی آن است که تأکید گردد هر بندری که با معضلات، گره‌ها و پیچیدگی‌های عملیاتی بیشتری روبه‌رو است، در واقع نیاز مبرم‌تری به راهکارهای هوشمند دارد و اجرای پروژه‌های فناوری در آن، ارزش‌افزوده و بهبود چشمگیرتری خلق می‌کند. در نقطه مقابل، بعد «ریسک‌های پیاده‌سازی» به‌عنوان تنها معیار هزینه‌ای (دارای جهت منفی) تعریف شده است؛ به این معنا که وجود ریسک‌های بالاتر، مانعی در مسیر موفقیت پروژه محسوب شده و جذابیت بندر را برای شروع طرح‌های هوشمندسازی کاهش می‌دهد.

در ادامه این فرایند، نحوه جمع‌آوری داده‌ها و ارزیابی گزینه‌ها نیز از رویکردهای سنتی فاصله گرفته است. در این پژوهش، منطق امتیازدهی به بنادر صرفاً متکی بر پرسشنامه‌های معمول و ذهنی نبوده است؛ بلکه به‌منظور افزایش دقت و انطباق کامل با واقعیت‌های عملیاتی، داده‌های ماتریس تصمیم بر مبنای ترکیبی از دو رویکرد استخراج شده‌اند. نخست، برای ابعادی که ماهیت ملموس، ساختاری و قابل‌اندازه‌گیری داشتند، از «شاخص‌های نیابتی» بهره گرفته شد که مستقیماً از آمارهای عملکردی و مستندات زیرساختی بنادر به دست آمده‌اند.

دوم، برای پارامترهای کیفی، ارزیابی‌ها بر اساس مصاحبه با خبرگان حوزه بندری انجام پذیرفت و امتیاز نهایی این شاخص‌ها از طریق یکپارچه‌سازی و میانگین‌گیری نظرات تخصصی آنان لحاظ گردید. جزئیات دقیق هر معیار و نحوه سنجش آن در جدول ۵ تشریح شده است.

جدول ۵. تشریح شاخص‌های کیفی و نیابتی ارزیابی بنادر

معیار اصلی	زیرمعیار	شاخص نیابتی	تشریح منطق امتیازدهی
چالش‌های عملیاتی	ازدحام ترافیکی	بر مبنای شاخص پیشنهادی CPTCI	$CPTCI_i = \left(\frac{V_{total}}{C_{gate}}\right)_i + (exp(SDFI_i) - 1) + (exp(\theta . BSVI_i) - 1)$ (۳) این فرمول بر پایه ترکیب یک بخش پایه(نسبت تقاضای بار بندر به ظرفیت دروازه‌ها: $\frac{V_{total}}{C_{gate}}$) و «جریمه‌های تصاعدی و نمایی» بنا شده است. به این معنا که اگر بندری با کمبود ظرفیت انبار (شوک کسری انبار یا SDFI) یا هجوم ناگهانی ناوگان بار فله/غلات (شوک حمل یکسره یا BSVI) مواجه شود، اثرات مخرب آن به صورت نمایی و تصاعدی در فرمول اعمال می‌شود. اما اگر زیرساخت بندر کافی باشد (مقادیر شوک برابر صفر باشد)، به دلیل ساختار توابع($e^0 - 1 = 0$) هیچ جریمه کاذبی به بندر تحمیل نمی‌شود. این ساختار تضمین می‌کند که بنادر تنها در صورت بروز بحران و گلوگاه در انبار و نوع کالا جریمه شوند. در این رابطه مقادیر SDFI و BSVI به صورت ذیل محاسبه می‌شوند. $\mathrm{SDFI}_i = \begin{cases} 0 & , l < 0 \\ \text{اختلاف عملکرد و ظرفیت انبارش} & , l \geq 0 \end{cases}$ (٤) $\theta . BSVI_i = 0.25 \times \frac{\text{تناژ سالیانه غلات}}{\text{کل عملکرد سالیانه}}$ (۵)

			در روابط فوق l اختلاف عملکرد و ظرفیت انبارش بندر مورد ارزیابی است و θ ضریب کالیبراسیونی است که به جهت مدلسازی رفتار شوک فصلی غلات و هجوم وسایل حمل به درب های خروج برابر با ۰,۲۵ لحاظ شده است. مثال : بندر امیرآباد در این شاخص، رتبه ی سوم را با کسب امتیاز ۲/۰۳۱ بدست آورده است؛ چرا که : $\frac{V_{total}}{C_{gate}} = \frac{4/08}{2/4} = 1/7$ با توجه به ظرفیت انبارش سالیانه ی ۵/۱۴۷ میلیون تنی بندر امیرآباد و کفاف حجم عملکرد سالانه ی آن مقدار ضریب شوک انبار (SDFI) صفر لحاظ شده است. همچنین به جهت مقدار BSVI ، ۱/۱۹۴ بدست آمده است که بر این اساس مقدار $CPTCI$ از حاصلضرب مقدار ۱/۷ و ۱/۱۹۴، مقدار ۲/۰۳۱ نتیجه داده است و معیار امتیازدهی برای این بندر لحاظ گردیده است.
	رسوب کالا	متوسط زمان ماند کالا در بنادر	در این پژوهش، از معیار متوسط زمان ماند کالا در بندر به عنوان یک شاخص نیابتی برای اندازه‌گیری ناکارآمدی فرآیندهای ترخیص، ضعف اتصال به پس‌کرانه و بروکراسی‌های گمرکی استفاده شده است. بررسی داده‌های عملیاتی نشان می‌دهد که زمان ماند کالا در برخی بنادر استراتژیک به شدت بحرانی است. به عنوان نمونه، ثبت عدد ۶۰ روز برای بندر امام خمینی (Master plan of Imam Khomeini Port,2021) و ۵۱ روز برای بندر امیرآباد(Master plan of Amirabad Port,2021)، عمدتاً ریشه در واردات فله کالاهای اساسی (غلات) دارد که به دلیل زمان‌بر بودن فرآیندهای تخصیص ارز، تاییدیه سازمان‌های استاندارد و قرنطینه و همچنین کمبود ناوگان ریلی و جاده‌ای برای خروج بار، هفته‌ها در سیلوها و انبارها دپو می‌شوند.
	دموراژ	نسبت زمان انتظار کشتی‌ها جهت پهلوگیری به زمان سرویس	با توجه به محرمانگی جزئیات قراردادهای اجاره کشتی و عدم دسترسی عمومی به زمان‌های مجاز توقف توافق‌شده در قراردادها، محاسبه‌ی دقیق هزینه‌ی دموراژ با دشواری همراه است. از این‌رو، در پژوهش حاضر شاخص نسبت زمان انتظار به زمان سرویس (RWT) به‌عنوان یک شاخص نیابتی برای ارزیابی دموراژ معرفی می‌گردد. $RWT = \frac{\text{مدت زمان انتظار}}{\text{مدت زمان سرویس}}$ (۶) استفاده از این نسبت به‌جای استفاده از اعداد مطلق زمان انتظار، «خطای مقیاس» میان بنادر بزرگ و کوچک را خنثی می‌کند. برای نمونه، کشتی‌های اقیانوس‌پیما در بندر شهید رجایی به‌طور طبیعی نیازمند زمان سرویس طولانی‌تری بوده و به‌تبع آن، زمان مجاز بیشتری در قرارداد آن‌ها لحاظ می‌شود. با تقسیم زمان انتظار بر زمان سرویس، شاخصی نرمال‌شده به دست می‌آید که نشان می‌دهد چند درصد از زمان مفید در اختیار شناور، صرف انتظار برای دریافت خدمات شده است. بدیهی است هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی گلوگاه‌های شدیدتر در تخصیص اسکله، کمبود تجهیزات و در نتیجه، افزایش ریسک تحمیل خسارت دموراژ است.
	تهدیدات ایمنی	کیفی	امتیازدهی به این زیرمعیار بر اساس تقاطع چهار عامل «تراکم تجهیزات سنگین و ترافیک»، «حجم عملیات کالاهای خطرناک (IMDG)»، «فرسودگی زیرساخت‌ها» و «تداخل بافت شهری و بندری» انجام شده است: سطح ریسک بسیار بالا (امتیاز ۸ تا ۹): بنادر شهید رجایی (۹) (بالاترین تراکم تجهیزات سنگین، ترافیک کانتینری و کالاهای خطرناک)، امام خمینی (۹) (ریسک بالای انفجار غبار کالاهای فله خشک در کنار حجم عظیم تردد کامیون‌ها و مواد شیمیایی) و بوشهر (۸). دلیل قرارگیری بوشهر در این سطح، محاصره کامل بندر توسط بافت متراکم شهری است که هرگونه حادثه عملیاتی یا حریق را به یک بحران شهری تبدیل می‌کند. سطح ریسک بالا (امتیاز ۶ تا ۷): بنادر خرمشهر (۷) و آبادان (۷) (به دلیل فرسودگی شدید اسکله‌ها، تجهیزات قدیمی و وجود مغروقه‌ها که ریسک عملیاتی دریایی را بالا می‌برد)، چابهار (۷) (اجرای پروژه‌های توسعه‌ای همزمان با عملیات بندری و تأثیرات اقلیمی مونسون) و انزلی (۶) و امیرآباد (۶) (تداخل شبکه

			ریلی و جاده‌ای درون بندر، مانور تجهیزات سنگین در فضای محدود و ریسک‌های ناشی از طوفان‌های فصلی کاسپین). سطح ریسک متوسط و پایین (امتیاز ۲ تا ۵): بنادر شهید باهنر (۵)، لنگه (٤)، نوشهر (۳) و آستارا (۲). در این بنادر به دلیل مقیاس کوچکتر عملیات، عدم وجود پایانه‌های عظیم کانتینری و فله‌بار خطرناک، و تردد کنترل‌شده‌تر، ریسک برخوردها و حوادث زنجیره‌ای در سطح پایین‌تری ارزیابی می‌شود.»
	معضلات زیست محیطی	کیفی	در ارزیابی چالش‌های محیط‌زیستی بنادر، برخلاف رویکردهای سنتی که صرفاً حجم آلاینده‌ها را می‌سنجند، این پژوهش ترکیبی از «شدت آلاینده‌های فعلی» و «آستانه تاب‌آوری زیست‌بوم پیرامونی» را به عنوان معیار اصلی در نظر گرفته است. همان‌طور که در پیشینه تحقیق اشاره شد، فناوری‌های هوشمند ابزاری برای تحقق توسعه پایدار و بنادر سبز هستند Boullauazan (Sys and Vanelslander,2023) و (Philipp,2020) و Schumacher (Nemeth and Sihn , 2019) بنابراین، بنادری که در مجاورت اکوسیستم‌های حساس قرار دارند، در صورت بروز بحران‌های زیست‌محیطی (نشت مواد نفتی، ورود پساب یا آلودگی هوا)، با خسارات جبران‌ناپذیری مواجه می‌شوند و از این رو ضرورت استقرار سیستم‌های پایش هوشمند در آن‌ها حیاتی‌تر است. بر این اساس، بنادر مورد مطالعه به شرح زیر ارزیابی شدند. وضعیت فوق بحرانی (امتیاز ۸ تا ۹): بنادر شهید رجایی (۹) (به دلیل هم‌جواری با جنگل‌های حرا به عنوان زیست‌بوم به‌شدت حساس و حجم عظیم عملیات نفتی/شیمیایی)، امیرآباد (۸) (مجاورت با پناهگاه حیات‌وحش و تالاب بین‌المللی میانکاله)، انزلی (۸) (تأثیر مستقیم بر تالاب انزلی و اکوسیستم بسته دریای کاسپین) و امام خمینی (۸) (تمرکز عظیم صنایع پتروشیمی در مجاورت خور موسی). این بنادر ترکیبی از بالاترین پتانسیل آلایندگی و شکننده‌ترین اکوسیستم‌ها را دارا هستند. وضعیت بحرانی و پرریسک (امتیاز ٦ تا ۷): بنادر خرمشهر (۷) و آبادان (۷) (به دلیل ورود آلاینده‌های فرامرزی، پساب‌های شهری و صایعات جنگی به اروندرود)، بوشهر (۷) (مجاورت با بافت شهری و اکوسیستم کم‌عمق ساحلی) و چابهار (۷) (دسترسی به آب‌های آزاد اما دارای زیست‌بوم حساس مرجانی و لاک‌پشت‌های دریایی که با طرح‌های توسعه‌ای در معرض خطر است). وضعیت با ریسک متوسط و پایین (امتیاز ۲ تا ۵): بنادر شهید باهنر (۵)، لنگه (٤)، نوشهر (٤) و آستارا (۳) که اگرچه با چالش‌های پساب شهری و صایعات شناورها مواجه‌اند، اما تقاطع بحرانی میان حجم عظیم آلاینده‌های صنعتی و مناطق حفاظت‌شده اکولوژیک در آن‌ها به شدت گروه اول نیست.»
	خطاها و دوباره کاری‌ها	کیفی	پیچیدگی فرآیندهای اسنادی، تعداد سازمان‌های درگیر، تنوع کالایی و میزان دیجیتالی سازی، بنادر بزرگ و چندعملکردی نظیر شهید رجایی و امام خمینی موجب بالاترین احتمال بروز مغایرت‌های اسنادی است. این وضعیت ناشی از تعداد بالای تبادل سند بین اپراتورها، گمرک، خطوط کشتیرانی و فرایندهای متنوع تخلیه و بارگیری است. در مقابل، بنادر کوچک با جریان کالایی ساده مانند آستارا، لنگه و نوشهر از کمترین حجم فرایندهای مستندسازی برخوردار بوده و بنابراین ریسک بروز مغایرت در آنها بسیار پایین‌تر است.
مشخصات و پارامترهای ذاتی و عملکردی بنادر	نقش در کریدورهای ترانزیتی	کیفی	این معیار با هدف ارزیابی جایگاه استراتژیک بندر در شبکه‌های تجارت بین‌المللی و کریدورهای کلان حمل‌ونقل کشور تدوین شده است. هوشمندسازی بنادری که گره‌های اصلی ترانزیت بین‌المللی محسوب می‌شوند، به دلیل الزام به تبادل داده با شبکه‌های لجستیکی فرامرزی، ردیابی پیوسته کالا و یکپارچگی گمرکی با سایر کشورها، از اولویت بالاتری برخوردار است.
	سطح درآمدی	تناژ عملکرد سالانه	تناژ عملکرد سالانه ی بنادر مستخرج از طرح های جامع مصوب آنها ملاک شناسایی منابع درآمدی بنادر به شمار آمده است. به عنوان مثال حجم عملکرد سالانه ی بندر شهید رجایی (Master plan of Shahid Rajaei Port,2021)، ۷۳ میلیون تن و حجم عملکرد بندر خرمشهر (Master plan of Khorramshahr Port,2021)، ۳ میلیون و ۱۰۰ هزار تن گزارش شده است و به ترتیب موجب رتبه ی ۱ و رتبه ی ٤ بین بنادر مورد ارزیابی شده است.

	دسترسی دریایی	عمق آبخور	عمق آبخور اسکله های بنادر (مستخرج از طرح های جامع مصوب) و نحوه ی دسترسی به آب های آزاد ملاک ارزیابی سطح دسترسی بنادر به شمار آمده است ، به این روش امکان پذیرش سایز شناورهای بزرگ مقیاس و نسل جدید شناورها به بنادر به عنوان یک شاخص مثبت در ایجاد پتانسیل هوشمندسازی قلمداد گردیده است. به عنوان مثال عمق آبخور بندر انزلی(Master plan of Anzali Port,2021) ۷/٤ متر و عمق آبخور بندر شهید بهشتی چابهار(Master plan of Shahid Beheshti Port,2021) ۱۵,۵ متر گزارش شده است به ترتیب موجب رتبه ی ۱ و رتبه ی ٦ بین بنادر مورد ارزیابی شده است.
	ضریب کانتینری شدن	TEU در سال	عملکرد سالانه کانتینری بنادر بر حسب TEU (مستخرج از طرح های جامع مصوب بنادر)، به عنوان نماینده‌ای از سطح استاندارد سازی کالاها و یکپارچگی با زنجیره تامین جهانی لحاظ شده است. به عنوان مثال حجم عملکرد کانتینری بندر شهید رجایی(Master plan of Shahid Rajaei Port,2021) ۱,۷۵ میلیون TEU و حجم عملکرد کانتینری بندر بوشهر(Master plan of Bushehr Port,2021)۳۷ هزار TEU بوده است و به ترتیب موجب رتبه ی ۱ و ٤ بین بنادر شده است.
	حساسیت سیاسی و برندینگ	کیفی	امتیازدهی این شاخص بر خلاف شاخص‌های عملکردی، بر مبنای «هویت شناخته‌شده بندر» و «جایگاه استراتژیک آن در اسناد بالادستی و افکار عمومی» لحاظ گردیده است بدین منظور پرچم‌داران تجارت ملی حائز بیشترین امتیاز ذیل این معیار شده اند. به طوری که بندر شهید رجایی به عنوان نماد و برند اصلی تجارت کانتینری ایران حائز بالاترین امتیاز و بندر امام خمینی به عنوان قطب استراتژیک و شناخته‌شده‌ی امنیت غذایی و کالای اساسی کشور رتبه‌ی دوم را کسب کرده است.
ریسک‌های پایه سازی	هزینه‌های شکست	کیفی	در این معیار، امتیازدهی بر اساس نقش بندر در تأمین کالای اساسی و تجارت ملی انجام شده است. بنادر شهید رجایی و امام خمینی به عنوان شریان‌های اصلی اقتصاد کشور بالاترین ریسک را دارند، زیرا هرگونه اختلال سیستم در دوران گذار هوشمندسازی، موجب فلج شدن زنجیره تأمین ملی می شود. بنادر منطقه‌ای مانند چابهار، امیرآباد، بوشهر، انزلی و خرمشهر در رده متوسط قرار می‌گیرند؛ اختلال در این بنادر شوک محلی ایجاد می‌کند اما بحران ملی در پی ندارد. در مقابل، بنادر کوچک و محلی مانند نوشهر، باهنر، آبادان، لنگه و آستارا به دلیل حجم پایین‌تر عملیات و امکان جایگزینی سریع مسیر، کمترین هزینه شکست را به خود اختصاص داده‌اند.
	تهدیدات امنیت سایبری	کیفی	سطح این ریسک وابستگی مستقیمی به حجم تبادلات بین‌المللی و میزان تجهیزات مستقر دارد. بنادر شهید رجایی، امام خمینی و امیرآباد به دلیل داشتن شبکه گسترده‌تری از تجهیزات متصل و دیتاسنترهای حساس‌تر، اهداف بسیار جذابی برای حملات سایبری بین‌المللی هستند. بنادر چابهار، بوشهر نیز در سطح تهدیدات متوسط ارزیابی می‌شوند. اما بنادری با زیرساخت‌های سنتی‌تر نظیر خرمشهر، نوشهر، باهنر، آبادان، لنگه و آستارا به دلیل عدم اتصال یکپارچه سایبری ، در پایین‌ترین سطح ریسک حملات سایبری هدفمند قرار داده شده‌اند.
	مقاومت سازمانی	کیفی	این معیار بر اساس قدمت ساختار اداری و ریشه‌دار بودن رویه‌های سنتی نمره‌دهی شده است. بالاترین مقاومت سازمانی در بنادر بوشهر، خرمشهر، آبادان و امام خمینی ارزیابی گردید چرا که ساختارهای کارگری و اداری سنتی‌تری دارند و مطابق با نظر خبرگان در برابر تغییرات اتوماسیون مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. بنادری نظیر انزلی، نوشهر، باهنر، لنگه، امیرآباد و شهید رجایی دارای مقاومت متوسط هستند (تلفیقی از نیروهای سنتی و مدرن). در مقابل، می توان برای بندر چابهار (به دلیل طرح‌های توسعه‌ای) و بندر آستارا (به دلیل مدیریت چابک‌تر بخش خصوصی) ، حداکثر انعطاف و کمترین مقاومت را متصور بود.
	تعداد ذینفعان	کیفی	منطق این شاخص، تعداد اپراتورها و پایانه‌های واگذار شده به بخش خصوصی است که تجمیع داده‌ها را دشوار می‌سازد. بنادر شهید رجایی، امام خمینی و امیرآباد به دلیل حضور ده‌ها شرکت پورت‌اپراتور خصوصی که هر یک از نرم‌افزارهای جزیره‌ای خود استفاده می‌کنند، بدترین وضعیت را در چالش اشتراک داده دارند. بنادر انزلی، بوشهر، چابهار، نوشهر و خرمشهر چالش‌های متوسطی در همگام سازی اپراتورها دارند. اما بنادر آستارا، آبادان، لنگه و باهنر به دلیل مدیریت متمرکزتر، پایانه‌های محدود و اپراتورهای یکپارچه، کمترین مانع را برای تجمیع داده‌ها خواهند داشت.

	تبعات اجتماعی	کیفی	مناطقی که وابستگی معیشتی شهر به بندر بسیار بالاست و جایگزین شغلی محدودی وجود دارد، نظیر امام خمینی، بوشهر، خرمشهر، آبادان و چابهار ، کاهش نیروی کار می‌تواند منجر به بحران‌ها و اعتصابات شدید کارگری شود. در بنادر انزلی، باهنر، لنگه، امیرآباد و شهید رجایی به دلیل مکانیزه بودن نسبی فعلی یا وجود اقتصادهای مکمل (مانند صنایع مجاور)، این حساسیت در سطح متوسط است. در نهایت، بنادر نوشهر و آستارا به دلیل بافت شهری توریستی-تجاری منطقه و عدم اتکای مطلق اقتصاد شهر به کارگران تخلیه و بارگیری ، احتمالاً کمترین ریسک تبعات اجتماعی را در پیاده‌سازی هوشمندسازی تجربه خواهند کرد.
آمادگی های زیرساختی	وضعیت فعلی شبکه‌ی فناوری	کیفی	این شاخص میزان آمادگی زیرساخت‌های فناوری اطلاعات (ICT) بنادر را برای گذر از سیستم‌های جزیره‌ای به پلتفرم‌های نرم‌افزاری یکپارچه ارزیابی می‌کند. منطق امتیازدهی به شرح زیر است: امتیاز بالا (۷ تا ۸): بنادر پیشران دارای زیرساخت شبکه‌ای پایدار که ظرفیت میزبانی از سامانه‌های نوین یکپارچه (مانند سامانه جامع بندری IPAS)، تخصیص هوشمند اسکله و رهگیری برخط کالا را دارند. امتیاز میانی (۵ تا ٦): بنادری که سیستم‌های عملیاتی پایه را مستقر کرده‌اند، اما همچنان در مسیر یکپارچه‌سازی کامل با سایر سازمان‌ها و سامانه‌های پایش هوشمند قرار دارند. امتیاز پایین (۲ تا ٤): بنادری که با محدودیت‌های اساسی در زیر ساخت‌های ارتباطی و تکیه بر فرآیندهای سنتی مواجه‌اند و بستر لازم برای استقرار سریع فناوری‌های یکپارچه را ندارند.
	پایداری شبکه‌ی توزیع برق	منابع تأمین برق	در یک بندر هوشمند، چالش اصلی لزوماً کمبود تولید برق پایه نیست؛ بلکه «استقلال شبکه و تنوع منابع تأمین (تأمین از نیروگاه‌های اختصاصی در کنار شبکه سراسری)»، «تاب‌آوری» و وجود «ظرفیت مازاد» جهت پذیرش فناوری‌های نوین نظیر تجهیزات تمام‌الکتریک، سیستم‌های تأمین برق ساحلی (OPS) و شبکه‌های اینترنت اشیا است. در این راستا، بنادری که دارای ریزشبکه‌های مستقل، منابع پشتیبان قدرتمند و ظرفیت آزاد مناسب نسبت به بار مصرفی فعلی هستند، در مقایسه با بنادری که وابستگی مطلق به شبکه ناپایدار شهری دارند، از آمادگی بالاتری برای گذار به بنادر هوشمند برخوردارند. به عنوام مثال در ارزیابی، بندر امام خمینی به واسطه ی اتصال استاندارد به شبکه ی سراسری و همچنین خرید ۲۰ مگاوات برق صنعتی مستقل از نیروگاه فجر حائز بالاترین امتیاز این معیار بوده است.
	قابلیت ارتقای تجهیزات فعلی	عمر تجهیزات خشکی	معیار «قابلیت ارتقای تجهیزات» با تمرکز بر عمر تجهیزات خشکی و معماری سیستم‌های کنترلی ناوگان بنادر ارزیابی شده است. این شاخص نمایانگر میزان انطباق‌پذیری سخت‌افزارهای موجود با شبکه‌های سنسوری مدرن جهت استخراج داده‌های تله‌متری است. تجهیزات دارای قدمت بالا به دلیل ماهیت آنالوگ و فقدان پروتکل‌های ارتباطی استاندارد صنعتی ، چالش‌های فنی و اقتصادی عمده‌ای برای هوشمندسازی به همراه دارند. در مقابل، بنادری با تجهیزات مدرن‌تر که مجهز به کنترل‌گرهای منطقی برنامه‌پذیر (PLC) هستند، از آمادگی بالاتری برای یکپارچه‌سازی با پلتفرم‌های اینترنت اشیا برخوردارند.
	توان بومی منطقه	کیفی	یکی از ارکان حیاتی در پایداری پروژه‌های هوشمندسازی، دسترسی به سرمایه انسانی متخصص و شرکت‌های دانش‌بنیان بومی در مجاورت بندر است. این معیار ارزیابی می‌کند که آیا در صورت پیاده‌سازی سیستم‌های پیچیده، توانایی نگهداری، پشتیبانی و توسعه نرم‌افزاری/ سخت‌افزاری در منطقه وجود دارد یا خیر. بر این اساس، بنادری که در مجاورت کلان شهرها یا قطب‌های دانشگاهی قرار دارند امتیاز بالاتر و در مقابل، بنادری مانند چابهار یا لنگه، به دلیل فاصله از مراکز اصلی، در شاخص توان تخصصی بومی آسیب‌پذیری بیشتری داشته و نیازمند تمهیدات برای انتقال فناوری و جذب نیروی کارآمد هستند.
	ظرفیت حمل و نقل ترکیبی	کیفی	هوشمندسازی بنادر تنها به داخل محوطه بندر محدود نمی‌شود، بلکه لجستیک پس‌کرانه و یکپارچگی جریان کالا را نیز در بر می‌گیرد. این معیار میزان دسترسی بندر به شقوق مختلف حمل‌ونقل (به‌ویژه اتصال مستقیم به شبکه ریلی سراسری و جاده‌های ترانزیتی استاندارد) را می سنجد. بنادری که دارای زیرساخت قوی حمل‌ونقل ترکیبی هستند (نظیر بندر شهید رجایی، امام خمینی، امیرآباد و خرمشهر که دارای اتصال ریلی فعال می‌باشند)، پتانسیل بسیار بالاتری برای پیاده‌سازی سیستم‌های یکپارچه ردیابی کالا و لجستیک هوشمند دارند.

پس از تشکیل ماتریس تصمیم با این رویکرد واقع‌گرایانه و اجرای هم‌زمان دو الگوریتم، نتایج رتبه‌بندی استخراج گردید. جدول ٦، مقایسه جایگاه ۱۲ بندر مورد مطالعه را در دو روش TOPSIS و PROMETHEE نشان می‌دهد:

جدول ٦. رتبه‌بندی بنادر بازرگانی ایران

بندر	رتبه‌بندی در روش TOPSIS	رتبه‌بندی در روش PROMETHEE
شهید رجایی	۱	۱
امام خمینی	۲	۲
بوشهر	۳	۳
شهید بهشتی چابهار	٤	٤
امیرآباد	٥	٥
باهنر	٦	٨
انزلی	۷	٦
خرمشهر	۸	۷
نوشهر	۹	۹
آبادان	۱۰	۱۱
لنگه	۱۱	۱۰
آستارا	۱۲	۱۲

۳-٥- رویکرد اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت

مدل های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌دلیل اتکا به اوزان تخصیص‌یافته توسط خبرگان و ماهیت متنوع داده‌های کمّی و کیفی، ذاتاً با سطحی از عدم‌قطعیت همراه هستند. به‌منظور حصول اطمینان از صحّت محاسبات، قابلیت اتکای نتایج و پایداری رتبه‌بندی بنادر، در این پژوهش از یک رویکرد اعتبارسنجی سه‌گانه شامل «تحلیل همبستگی»، «شبیه‌سازی مونت‌کارلو» و «تحلیل حساسیت» استفاده شده است که منطق هر یک به شرح زیر تبیین می‌گردد.

۳-٥-۱- تحلیل همبستگی

ازآنجاکه در این پژوهش از دو تکنیک متفاوت TOPSIS و PROMETHEE استفاده شده است، محاسبه ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن به‌عنوان یک آزمون آماری، برای سنجش میزان تطابق نتایج این دو روش به کار گرفته شد. همگرایی بالای نتایج (با مقدار $P - value < 0.001$) نشان‌دهنده آن است که رتبه‌بندی بنادر مستقل از نوع الگوریتم ریاضی به کار رفته بوده و مدل از روایی ساختاری بالایی برخوردار است.

۳-٥-۲- شبیه‌سازی مونت‌کارلو

به‌منظور ارزیابی استحکام رتبه‌بندی‌ها در برابر خطاهای احتمالی یا سوگیری داده‌های کیفی، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شد. این رویکرد با تزریق نویزهای تصادفی به ماتریس تصمیم و تکرار هزاران‌باره محاسبات، توزیع احتمالاتی رتبه هر بندر را استخراج می‌کند؛ به‌طوری‌که انحراف معیار پایین‌تر، نشان‌دهنده پایداری بیشتر رتبه است. خروجی‌های شبیه‌سازی تحت تغییرات تصادفی مقادیر و اوزان، دو الگوی رفتاری متمایز را در بنادر ایران آشکار ساخت.

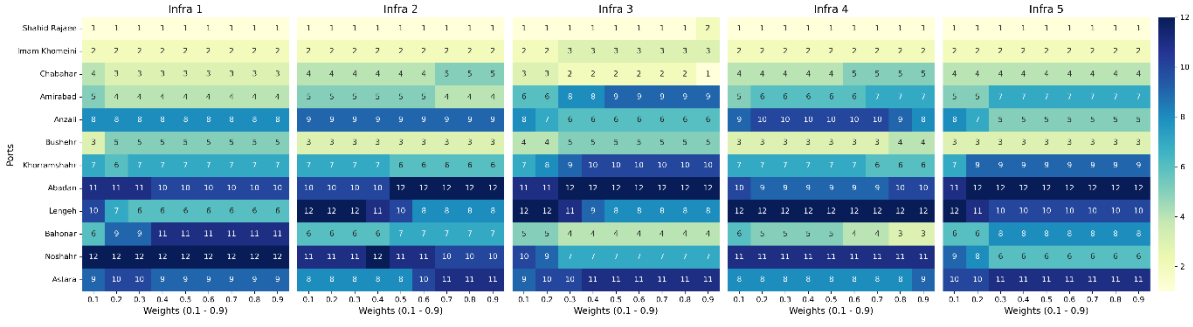
چهار بندر بزرگ کشور (شهید رجایی، امام خمینی، بوشهر و چابهار) با احتمال تغییر رتبه صفر در صد (۰٪)، بالاترین سطح استحکام را نشان دادند. فاصله عملکردی و زیرساختی این بنادر در حوزه هوشمندسازی به‌حدی است که اعمال بالاترین سطوح عدم‌قطعیت نیز جایگاه برتر آن‌ها را تهدید نمی‌کند.

در مقابل، رتبه بنادر در نیمه پایین جدول وابستگی شدیدی به ساختار فعلی اوزان دارد. به‌عنوان‌مثال، بندر امیرآباد (رتبه ٥) شانس بهبود ۲/۷ درصدی را نشان داد.

۳-٥-۳- تحلیل حساسیت

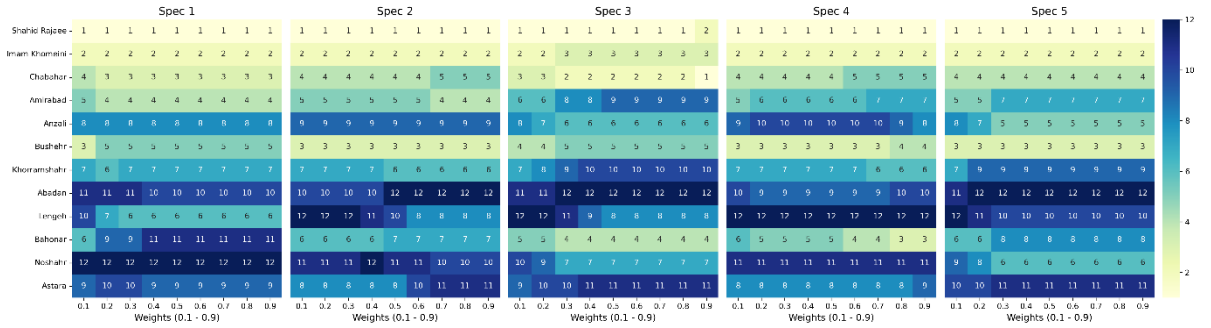
اوزان معیارها بازتاب‌دهنده اولویت‌های فعلی تصمیم‌گیران است؛ در این تحلیل، وزن یک معیار خاص (ارزش نسبی آن در تصمیم‌گیری) به‌صورت پله‌ای از مقادیر بسیار کم (مثلاً ۰/۱) تا مقادیر بسیار بالا (مثلاً ۰/۹) تغییر می‌کند، درحالی‌که وزن سایر معیارها به‌صورت نسبی تعدیل می‌شود. از منظر مفهومی، افزایش وزن یک معیار بدین معناست که ما فرض می‌کنیم در سناریوی جدید، آن شاخص حیاتی‌ترین عامل در هوشمندسازی بنادر است این تحلیل به سیاست‌گذار نشان می‌دهد که با تغییر در اوزان و اهمیت زیرمعیارهای مختلف چه تغییری در رتبه‌بندی‌ها ایجاد می‌گردد و از نگاهی دیگر، تغییر در کدام زیرمعیار می‌تواند موجب تغییرات اساسی در اولویت هوشمندسازی محسوب گردد. در شکل‌های ۲ تا ٥، نمودار چگالی رنگی تغییر رتبه‌بندی بنادر به نمایش درآمده است.

به عنوان مثال آنطور که از شکل ٤ قابل برداشت است چنانچه برای مدیر تصمیم‌گیر تبعات اجتماعی و حساسیت‌های طبقه کارگری دارای اهمیت مضاعف گردید، رتبه بندر رجایی می‌تواند از رتبه ۱ به ٦ تنزل یابد.



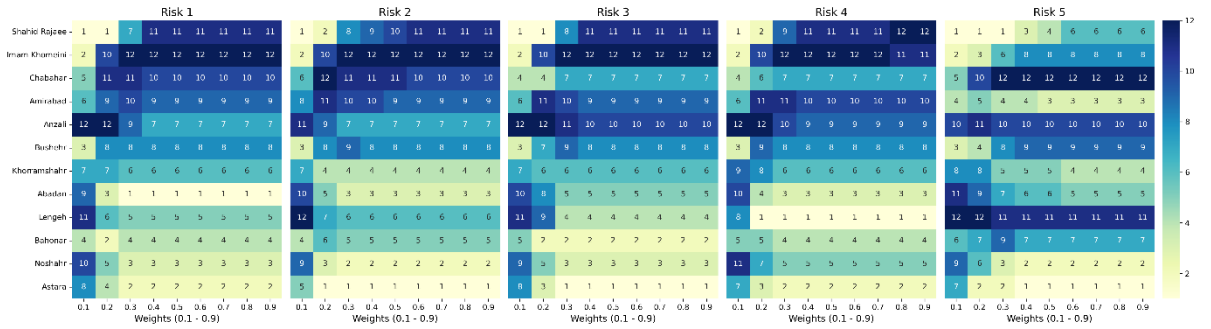
(الف) (ب) (ج) (د) (هـ)

شکل ۲. نمودار چگالی رنگی رتبه‌بندی بنادر مستخرج از تحلیل حساسیت مرتبط با زیرمعیارهای آمادگی زیرساختی: الف) وضعیت فعلی شبکه فناوری. ب)پایداری شبکه توزیع برق. ج)قابلیت ارتقای تجهیزات فعلی. د)توان بومی منطقه. هـ)ظرفیت حمل‌ونقل ترکیبی



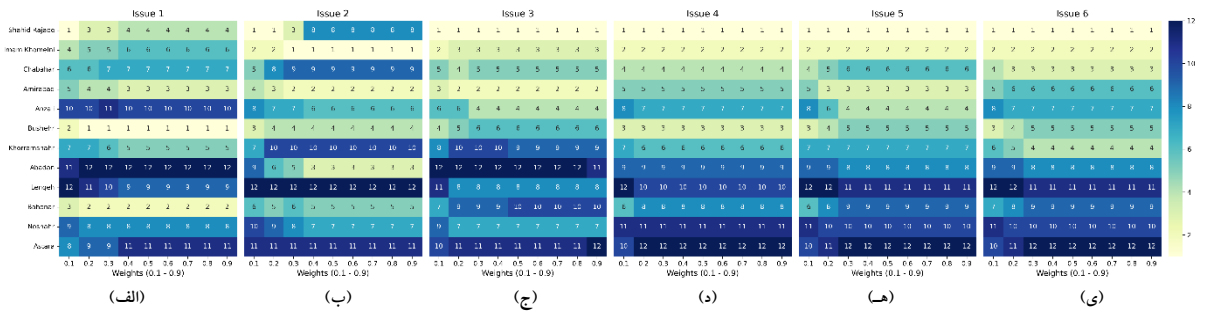
(الف) (ب) (ج) (د) (هـ)

شکل ۳. نمودار چگالی رنگی رتبه‌بندی بنادر مستخرج از تحلیل حساسیت مرتبط با زیرمعیارهای مشخصات و پارامترهای ذاتی الف) نقش در کریدورهای ترانزیتی. ب)سطح درآمدی. ج)دسترسی دریایی. د)ضریب کانتینری‌شدن. هـ)حساسیت سیاسی و برندینگ



(الف) (ب) (ج) (د) (هـ)

شکل ٤. نمودار چگالی رنگی رتبه‌بندی بنادر مستخرج از تحلیل حساسیت مرتبط با زیرمعیارهای ریسک‌های پیاده‌سازی الف) هزینه‌های شکست. ب)تهدیدات امنیت سایبری. ج)مقاومت سازمانی. د)تعداد ذینفعان. هـ)تبعات اجتماعی



(الف) (ب) (ج) (د) (هـ) (ی)

شکل ۵ . نمودار چگالی رنگی رتبه‌بندی بنادر مستخرج از تحلیل حساسیت مرتبط با زیرمعیارهای چالش‌های عملیاتی: الف) ازدحام ترافیکی. ب)رسوب کالا. ج)دموراژ. د)تهدیدات ایمنی. هـ)معضلات زیست‌محیطی. ی)خطاها و دوباره‌کاری‌ها

٤ –تحلیل یافته‌ها

بررسی اوزان نهایی تخصیص‌یافته به چهار گروه اصلی معیارها (چالش‌های عملیاتی، مشخصات و پارامترهای ذاتی بنادر، ریسک‌های پیاده‌سازی و آمادگی‌های زیرساختی) حاکی از توزیع نسبتاً متقارن اهمیت آن‌ها در مدل تصمیم‌گیری است. این تقارب وزنی، نشان‌دهنده ماهیت چندوجهی پروژه‌های هوشمندسازی است؛ بدین معنا که توسعه زیرساخت‌های فناوری بدون در نظر گرفتن پیامدهای جانبی فاقد اثربخشی پایدار خواهد بود و موفقیت در این حوزه را می‌توان منوط به حل چالش‌های عملیاتی بنادر به وسیله‌ی موازنه میان ظرفیت‌های زیرساختی، توان عملیاتی و نقش راهبردی هر بندر در شبکه حمل‌ونقل و تجارت کشور ارزیابی نمود.

با این‌حال، برتری نسبی اهمیت معیار «آمادگی زیرساختی بنادر» جهت آغاز هوشمندسازی نشان می‌دهد که در شرایط بنادر ایران و سایر بنادر کشورهای درحال‌توسعه، پیش‌نیازهای پایه‌ای نظیر شبکه ارتباطی پایدار، زیرساخت‌های ذخیره‌سازی و پردازش داده‌ها، تجهیزات قابل‌اتصال به سامانه‌های هوشمند، پایداری انرژی و امکان یکپارچه‌سازی سامانه‌ها، همچنان از تعیین‌کننده‌ترین عوامل موفقیت در گذار به بنادر هوشمند به شمار می‌آیند و بدین لحاظ شاید بتوان ضعف در زیرساخت‌های پایه و عدم تطابق سامانه‌های عملیاتی را به‌عنوان بزرگ‌ترین مانع قلمداد نمود.

از سوی دیگر، وزن بالای معیار «چالش‌های عملیاتی» نشان می‌دهد که هوشمندسازی در بنادر ایران بیش از آنکه با هدف دستیابی به فناوری‌های نمایشی و پیشرفته دنبال شود، باید در خدمت حل مسائل ملموس روزمره قرار گیرد. مشکلاتی مانند رسوب کالا، کندی در کنترل فرایندهای اسنادی، ازدحام ترافیکی، تأخیر در تخلیه و بارگیری، دموراژ، ناهماهنگی میان ذی‌نفعان و ضعف در رهگیری محموله‌ها، از جمله مسائلی هستند که مستقیماً بر کارایی بندر و هزینه‌های زنجیره تأمین اثر می‌گذارند. بنابراین، در الگوی تصمیم‌گیری خبرگان، هوشمندسازی زمانی ارزشمند تلقی می‌شود که بتواند به کاهش این ناکارآمدی‌ها منجر شود و به‌عنوان ابزاری جهت حل مسائل قلمداد گردد.

در میان ناکارآمدی‌های فوق، «دموراژ» با وزن ۰/۲۰۲ بالاترین اولویت را به خود اختصاص داده است. این نتیجه نشان می‌دهد که تأخیر در گردش کالا و شناور، نه‌تنها یک مشکل عملیاتی، بلکه یک مسئله اقتصادی جدی برای کل زنجیره تأمین کشور است. دموراژ موجب افزایش هزینه واردات و صادرات، کاهش قابلیت پیش‌بینی زنجیره تأمین و افت رقابت‌پذیری بنادر می‌شود. ازاین‌رو، نخستین سطح هوشمندسازی باید بر کاهش زمان توقف کالا، شناور و کامیون در بندر متمرکز شود.

«تهدیدات ایمنی» با وزن ۰/۱۷۸ و «ازدحام ترافیکی» با وزن ۰/۱۷۳ در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. این یافته نشان می‌دهد که هوشمندسازی تنها به‌معنای افزایش سرعت عملیات نیست، بلکه باید موجب کنترل بهتر ریسک‌های ایمنی و مدیریت جریان‌های فیزیکی در محدوده بندر شود. استفاده از سامانه‌های پایش لحظه‌ای، اینترنت اشیا، مدیریت هوشمند ترافیک کامیون‌ها، پایش تجهیزات و تحلیل پیش‌بینانه خرابی‌ها می‌تواند نقش مهمی در کاهش این ریسک‌ها داشته باشد.

«رسوب کالا» نیز با وزن ۰/۱۵۲ یکی دیگر از اولویت‌های مهم هوشمندسازی است. رسوب کالا معمولاً نتیجه ضعف در یکپارچگی اسناد، عدم هماهنگی میان گمرک، اپراتورها، صاحبان کالا، حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی، و نبود شفافیت اطلاعاتی است. بنابراین، حل این مسئله بیش از آنکه نیازمند تجهیزات فیزیکی جدید باشد، مستلزم توسعه سامانه‌های یکپارچه اطلاعاتی، تبادل الکترونیک داده‌ها و اتصال مؤثر میان ذی‌نفعان بندری است.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که مسیر منطقی هوشمندسازی بنادر ایران باید از «هوشمندسازی اطلاعاتی و فرایندی» آغاز شود، سپس به «هوشمندسازی جریان‌های فیزیکی و زنجیره تأمین» گسترش یابد و در نهایت در صورت بلوغ زیرساخت‌ها و کاهش ریسک‌ها، به سمت هوشمندسازی کامل حرکت کند.

همان‌طور که در جدول ۵ و بر اساس خروجی دو روش مورد مطالعه مشخص است، پنج بندر دارای اولویت را می‌توان با توجه به هم‌سویی نتایج دو مدل با قطعیت پیشنهاد نمود.

در این میان قرار گرفتن مهم‌ترین بندر کانتینری کشور و یکی از اصلی‌ترین گره‌های تجارت خارجی ایران یعنی بندر شهید رجایی احتمالاً پیش از انجام ارزیابی قابل‌انتظار بوده است؛ بندری که حجم بالای عملیات، گستردگی زیرساخت‌های فیزیکی، نقش ملی در زنجیره تأمین و سطح بالای تعامل با ذی‌نفعان داخلی و خارجی، ظرفیت بالایی برای بهره‌برداری از مزایای هوشمندسازی در آن ایجاد کرده است. بااین‌حال، همین

مقیاس بزرگ و پیچیدگی ساختاری می‌تواند ریسک اجرای پروژه‌های هوشمندسازی را افزایش دهد.

همچنین بندر امام خمینی نیز به‌دلیل نقش کلیدی در جابه‌جایی کالاهای اساسی و فله خوراکی، جایگاه ویژه‌ای در رتبه‌بندی به دست آورده است. اهمیت این بندر نه‌تنها به‌دلیل حجم عملیات، بلکه به‌دلیل اثرگذاری مستقیم آن بر امنیت تأمین کالاهای اساسی کشور است. یافته‌ها نشان می‌دهد که هوشمندسازی در این بندر به‌ویژه در حوزه مدیریت انبار، کاهش رسوب کالا، اتصال به گمرک، کنترل موجودی و برنامه‌ریزی ورود و خروج کالا می‌تواند آثار ملی قابل‌توجهی داشته باشد.

اما نکته‌قابل توجه، جایگاه بالای بندر بوشهر است. این بندر اگرچه از نظر مقیاس و حجم عملیات با شهید رجایی و امام خمینی قابل‌قیاس نیست، منتها ترکیب مناسبی از انعطاف‌پذیری عملیاتی، ریسک پایین‌تر، امکان اجرای سریع‌تر پروژه‌ها و ظرفیت یادگیری سازمانی را داراست. از این منظر، بوشهر را می‌توان یک بندر چابک در این زمینه به‌شمار آورد؛ چراکه به‌دلیل ابعاد کنترل‌پذیرتر، انعطاف مدیریتی و هزینه شکست پایین‌تر، گزینه مناسب‌تری برای آغاز پروژه‌های آزمایشی و ایجاد الگوی قابل‌تعمیم است.

تطابق کامل رتبه‌های برتر (۱ تا ۵) و رتبه آخر (۱۲) در دو روش TOPSIS و PROMETHEE، نشان‌دهنده برتری و ضعف مطلق این گزینه‌هاست؛ به‌گونه‌ای که در حضور فاصله معنادار عملکردی، تفاوت الگوریتم‌ها بی‌اثر شده و هر دو مدل ابتدا و انتهای لیست را با قاطعیت یکسان می‌چینند. از منظر متدولوژیک، این هم‌گرایی در صدر جدول، بالاترین سطح اعتبارسنجی را به ارمغان آورده و حاشیه امنی برای سیاست‌گذاران فراهم می‌کند تا بودجه‌های کلان و پرریسک هوشمندسازی را با اطمینان کامل به این بنادر تخصیص دهند.

در مقابل، تفاوت رتبه‌های میانی (٦ تا ١١) ریشه در عملکرد نوسانی این بنادر و تفاوت ماهیت دو مدل دارد. مدل TOPSIS کاملاً جبرانی است و اجازه می‌دهد یک نقطه قوت برجسته در یک شاخص، ضعف‌های مهلک در سایر بخش‌ها را بپوشاند. اما PROMETHEE با استفاده از منطق توابع ترجیح و ارزیابی دو به‌دو، اثر داده‌های پرت را کنترل کرده و اجازه جبران‌سازی کاذب را نمی‌دهد. واگرایی این دو مدل در میانه‌ی جدول، یک دستاورد و هشدار متدولوژیک مهم برای مدیریت کلان است؛ چرا که مدل PROMETHEE به خوبی فاش می‌سازد که این بنادر میانی توسعه‌یافتگی متوازنی ندارند و ضعف‌های بنیادین آن‌ها پشت تعدادی نقطه قوت محدود پنهان شده است. در نتیجه، این بنادر پیش از دریافت بودجه‌های توسعه‌ای، نیازمند عارضه‌یابی دقیق‌تر و سرمایه‌گذاری محتاطانه‌تری هستند.

همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که رتبه بنادر در برابر تغییر وزن معیارها رفتار یکسانی ندارد. برخی بنادر در شرایط عادی رتبه بالایی دارند، اما با افزایش وزن ریسک یا تغییر اولویت‌های تصمیم‌گیری، دچار افت شدید می‌شوند. در مقابل، برخی بنادر اگرچه در رتبه‌بندی پایه جایگاه متوسطی دارند، اما در سناریوهای خاص می‌توانند به گزینه‌های راهبردی تبدیل شوند. بر این اساس در جدول ۷ تلاش شده است که پیشنهادهای مدیریتی مشخصی برای بنادر بازرگانی مورد مطالعه به‌عنوان یافته پژوهش ارائه شود.

جدول ۷. پیشنهادهای مدیریتی جهت هوشمندسازی بنادر ایران

بندر	پیشنهاد مدیریتی در راستای هوشمندسازی
شهید رجایی	این بندر در شرایط پایه رتبه نخست را کسب می‌کند، اما در صورت افزایش وزن ریسک‌هایی مانند مقاومت سازمانی، پیچیدگی ذی‌نفعان و تهدیدات امنیت سایبری، رتبه آن به‌شدت افت می‌کند. این یافته بیانگر آن است که هوشمندسازی در شهید رجایی نباید به‌صورت یک پروژه یکپارچه و ناگهانی اجرا شود. مناسب‌ترین رویکرد برای این بندر، اجرای تدریجی، ماژولار و مرحله‌ای پروژه‌هاست؛ به‌گونه‌ای که هر ماژول پس از آزمون، تثبیت و ارزیابی، به بخش‌های دیگر تعمیم داده شود.
امام خمینی	این بندر را می‌توان گلوگاه استراتژیک رسوب کالا توصیف کرد. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که در صورت افزایش اهمیت حل مسئله رسوب کالا، این بندر می‌تواند حتی از شهید رجایی پیشی گیرد. بنابراین، اولویت هوشمندسازی در بندر امام خمینی باید بر سامانه‌های مدیریت هوشمند انبار، اتصال داده‌ای با گمرک، شفاف‌سازی وضعیت کالا، زمان‌بندی خروج کالا و کاهش توقف‌های غیرضروری متمرکز باشد.

بوشهر	این بندر را می توان به عنوان کاندیدای پایلوت ملی شناخت. این بندر در برابر تغییرات وزنی و افزایش ریسک‌ها پایداری بیشتری نشان می‌دهد و نوسان رتبه آن محدودتر است. همچنین در سناریوهایی که مدیریت ترافیک و چابکی عملیاتی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، جایگاه بوشهر به شکل قابل توجهی ارتقا می‌یابد. از این رو، بو شهر گزینه‌ای منا سب برای آغاز پروژه‌های هوشمندسازی فرایندی، اسنادی و مدیریت ترافیک بندری است.
شهید بهشتی چابهار	این بندر را می توان بندر فرصت های ژئوپلیتیک دانست. جایگاه این بندر به شدت به وزن معیارهای استراتژیک و نقش در کریدورهای بین‌المللی وابسته است. در صورتی که سیاست‌گذار بر توسعه کریدورهای منطقه‌ای و اتّصال به شبکه‌های ترانزیتی تمرکز کند، چابهار می‌تواند جایگاه بسیار بالاتری در اولویت هوشمندسازی به دست آورد. نکته مهم آن است که برای چابهار، هوشمندسازی الزاماً نباید با خرید تجهیزات جدید آغاز شود؛ بلکه بهینه‌سازی دارایی‌های موجود و افزایش قابلیت اتصال سامانه‌ها می‌تواند نقطه شروع مناسب‌تری باشد.
امیرآباد	حساسیت این بندر به تغییرات اقلیمی، وضعیت تراز آب خزر و ملاحظات زیست‌محیطی بالاست. با افزایش وزن معیارهای محیط‌زیستی، امیرآباد می‌تواند در اولویت هو شمند سازی قرار گیرد. بنابراین، تمرکز هوشمندسازی در این بندر باید بر پایش محیط‌زیست، مدیریت انرژی، کنترل آلاینده‌ها و توسعه زیرساخت‌های داده‌محور سازگار با الزامات اکولوژیک باشد.
باهنر	این بندر را می‌توان بندر محتاط و منعطف دانست. این بندر در سناریوهایی که هزینه شکست و ریسک سرمایه‌گذاری اهمیت بیشتری می‌یابد، رتبه بالاتری کسب می‌کند. بنابراین، برای پروژه‌هایی که نیازمند آزمایش اولیه با هزینه محدود و ریسک کنترل‌شده هستند، بندر شهید باهنر می‌تواند گزینه‌ای مناسب باشد.
انزلی	بندر انزلی به دلیل وضعیت مناسب‌تر ظرفیت تعاملات منطقه‌ای در حوزه خزر، می‌تواند نقش ویترین برندینگ دیجیتال را ایفا کند. هوشمندسازی در این بندر باید با تمرکز بر تعاملات بین‌المللی، خدمات دیجیتال به مشتریان، تبادل داده با ذی‌نفعان خارجی و ارتقای تصویر رقابتی بندر انجام شود.
خرمشهر	بندر خرمشهر رفتار متفاوتی در تحلیل حساسیت نشان می‌دهد. این بندر در سناریو های مرتبط با امنیت سایبری جایگاه بهتری کسب می‌کند، اما نسبت به رسوب کالا ضعف دارد. بنابراین، رویکرد مناسب برای خرمشهر، توسعه سامانه‌های هوشمند با لایه امنیتی قوی و تمرکز هم‌زمان بر روان‌سازی جریان خروج کالا است.
نوشهر	نوشهر به دلیل محدود یت های فیزیکی، نیازمند بازنگری در مدل درآمدی و تمرکز بر خدمات هوشمند غیرمتکی بر توسعه وسیع عملیات دریایی است.
آبادان	آبادان در سناریوی بحران رسوب کالا می‌تواند اولویت بالاتری پیدا کند و هوشمندسازی در آن باید ماهیتی درمان‌محور داشته باشد.
لنگه	بندر لنگه در مواجهه با پیچیدگی سرمایه‌گذاران و ذی‌نفعان ظرفیت مدیریتی قابل توجهی نشان می‌دهد.
آستارا	آستارا نیز به عنوان یک بندر خصوصی، در سناریوهای دارای ریسک دولتی و پیچیدگی نهادی می‌تواند به دلیل چابکی ساختاری، گزینه مطلوب‌تری باشد.

شناسایی پارادوکس مقیاس در هوشمندسازی بنادر ایران از یافته‌های مشخص این پژوهش است. بر اساس این پارادوکس، بنادر بزرگ‌تر به‌دلیل حجم عملیات، زیر ساخت‌های گسترده و نقش ملی، بیشترین منافع بالقوه را از هوشمندسازی کسب می‌کنند؛ اما هم‌زمان به‌دلیل پیچیدگی ساختاری، تعدد ذی‌نفعان، مقاومت سازمانی، هزینه بالای شکست و ریسک امنیت سایبری، پرخطرترین گزینه ها برای آغاز پروژه های جامع هوشمندسازی هستند. در مقابل، بنادر کوچک‌تر و چابک‌تر ممکن است از نظر اثرگذاری ملی در رتبه پایین‌تری قرار گیرند، اما به‌دلیل کنترل‌پذیری بیشتر، امکان اجرای سریع‌تر، انعطاف سازمانی و هزینه شکست پایین‌تر، گزینه‌های مناسب‌تری برای آغاز فرایند یادگیری و اجرای پایلوت محسوب می‌شوند. این یافته از منظر سیاست‌گذاری اهمیت زیادی دارد؛ زیرا نشان می‌دهد اولویت‌بندی هو شمند سازی نباید تنها بر ا ساس اندازه بندر انجام شود، بلکه باید ترکیبی از اثرگذاری بالقوه و ریسک اجرایی مدنظر قرار گیرد.

پس از عبور از مرحله‌ی استراتژ یک انتخاب بندر جهت هوشمندسازی، نتایج این پژوهش به منظور نیل به اهداف هوشمندسازی با حداقل پذیرش آثار منفی تأکید دارد که نگاه مدیران بنادر می‌بایست از رویکرد فناوری‌محور به رویکرد مسأله‌محور حرکت کند؛ بدین معنا که تمرکز بیش‌ازحد بر

خرید تجهیزات پیشرفته، اتوماسیون فیزیکی و الگوبرداری مستقیم از بنادر پیشرفته جهان موجب نادیده‌گرفتن مسائل پایه‌ای می‌شود. بنابراین، هر پروژه هوشمندسازی باید با این پرسش آغاز شود که کدام گلوگاه عملیاتی را برطرف می‌کند و چه اثری بر کاهش هزینه، زمان، ریسک یا عدم‌قطعیت دارد. بنابراین فناوری‌هایی که ارتباط مستقیمی با حل این مسائل ندارند، حتی اگر از نظر فنی پیشرفته باشند، نباید در اولویت سرمایه‌گذاری قرار گیرند. بدین سبب، نقشه راه پیشنهادی برای هوشمندسازی بنادر ایران (قابل‌تعمیم به بنادر کشورهای درحال‌توسعه) باید در سه فاز اصلی ذیل تعریف و پیاده سازی شود:

فاز اول: هوشمندسازی فرایندی و اسنادی

در فاز نخست، به‌عنوان پیش‌نیاز هرگونه اقدام فیزیکی، تمرکز می‌بایست بر دیجیتالی‌سازی و یکپارچه‌سازی فرایندهای اطلاعاتی جهت ایجاد تقارن اطلاعاتی میان ذینفعان مختلف بنادر باشد. این فاز شامل استقرار یا تکمیل سامانه‌های جامعه بندری، تبادل الکترونیک داده‌ها، اتصال سامانه‌های بندر با گمرک، صاحبان کالا، اپراتورها، شرکت‌های حمل‌ونقل و سایر ذی‌نفعان است. هدف اصلی این فاز، کاهش رسوب کالا، کاهش زمان ترخیص، افزایش شفافیت وضعیت بار و حذف دوباره‌کاری‌های اداری است. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، بندر بوشهر می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای اجرای آزمایشی این فاز باشد.

فاز دوم: اتوماسیون عملیات با هدف شفافیت جریان‌ها:

در این مرحله، تمرکز اصلی بر یکپارچگی لایه‌های فیزیکی و دیجیتال بندر از طریق توسعه زیرساخت‌های اینترنت اشیا (IoT)و استقرار سیستم‌های خودکار است تا شفافیت کاملی بر جریان کالا، تجهیزات و اطلاعات حاکم گردد. استقرار شبکه‌ای از حسگرهای محیطی و عملیاتی در محوطه‌های بندری، همراه با به‌کارگیری فناوری‌های تلفیقی شناسایی نظیر پردازش تصویر (OCR) و امواج رادیویی (RFID) در دروازه‌های ورود/خروج بنادر امکان رصد لحظه‌ای و دقیق دارایی‌ها را فراهم می‌آورد. مهم‌ترین دستاورد این فاز، شکل‌گیری پایگاه‌های کلان‌داده از طریق ثبت سیستماتیک و بدون دخالت انسان در تمامی رویدادهای بندری است. از مصادیق بارز این مرحله می‌توان به اتوماسیون دروازه‌های ورودی و خروجی برای ثبت دقیق ترددها، پیاده‌سازی سیستم‌های دیجیتال نوبت‌دهی ناوگان نقلیه با هدف نظم‌بخشی و پایش زمان انتظار و گردش و همچنین استفاده از حسگرها برای مانیتورینگ وضعیت سلامت تجهیزات اشاره کرد. در واقع، این فاز بستر لازم را برای گذار از مدیریت مبتنی بر حدس و گمان به مدیریت مبتنی بر داده مهیا می‌سازد. با این حال، گذار به این سطح از دیجیتالی‌شدن، سازمان را با ریسک‌های نوظهوری (نظیر چالش‌های یکپارچگی سیستم‌ها و امنیت داده‌ها) مواجه می‌سازد که پایش آن‌ها در این مرحله ضروری است؛ چرا که در این فاز، اگرچه داده‌ها به صورت خودکار جمع‌آوری می‌شوند، اما تحلیل ریسک‌های پیچیده، بهینه‌سازی‌های جامع و اتخاذ تصمیمات نهایی همچنان بر عهده نیروی انسانی قرار دارد.

فاز سوم: هوشمندسازی جهت اتخاذ تصمیم‌های لحظه‌ای بهینه:

این فاز باید به‌عنوان مرحله‌ای تکاملی و در امتداد بلوغ تدریجی نظام هوشمندسازی بندر در نظر گرفته شود؛ مرحله‌ای که در آن داده‌های عظیم تولیدشده در فاز پیشین، فناوری‌های نوین و فرایندهای عملیاتی به سطحی از همگرایی می‌رسند که امکان تصمیم‌گیری لحظه‌ای، پیش‌بینی‌پذیری و بهینه‌سازی مستمر عملکرد را توسط سیستم‌ها فراهم می‌آورد. در این مرحله، الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به هسته مرکزی عملیات متصل شده و با یک رویکرد کاملاً مسئله‌محور، کلان‌داده‌ها را مستقیماً جهت رفع گلوگاه‌های اختصاصی بندر به استراتژی‌های عملیاتی تبدیل می‌کنند. مصادیق این فاز شامل استقرار تجهیزات کاملاً خودکار نظیر وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار (AGV)، جرثقیل‌های هوشمند، پیاده‌سازی مفهوم همزاد دیجیتال برای شبیه‌سازی سناریوهای بحران و ارتقای سیستم نوبت‌دهی ناوگان به یک سیستم بهینه‌ساز دینامیک است (سیستمی که بهینه‌سازی پارکینگ پیش از دروازه‌ها، تنظیم نرخ ورود بهینه ناوگان و اصلاح لحظه‌ای مسیرها را محقق می‌سازد). با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری قابل‌توجه در این فاز، استقرار این فناوری‌ها می‌بایست الزاماً پس از تحلیل دقیق ریسک‌های پدیدآمده در تناسب با هر معیار هوشمندسازی صورت پذیرد تا از اتلاف منابع جلوگیری شود.

همچنین توجه به این نکته ضروری است که در این گام، بندر در راستای حل چالش‌های مشخص و محدودی، هوشمند می‌شود منتها زمانی می توان به معنای واقعی و به‌طور کامل بندری را هوشمند تلقی نمود که فرآیند تفکر، تحلیل و

تصمیم‌گیری در لحظه، با رویکردی سیستمی و جامع در تمامی بخش‌های آن نهادینه شده باشد؛ به‌گونه‌ای که بهینه‌سازی و حل یک چالش در یک بخش، منجر به تشدید چالش ها در بخش‌های دیگر نگردد و تصمیمات ماشین، شبکه‌ای از نتایج بهینه و متوازن را برای کل اکوسیستم بندر به ارمغان آورد.

۵ – نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارائه یک چارچوب راهبردی تصمیم‌ساز برای گذار بنادر ایران(قایل توسعه به سایر کشورهای در حال توسعه) به بنادر هوشمند، مدلی جامع را بر پایه رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره توسعه داد و پایداری آن را از طریق شبیه سازی مونت‌کارلو و تحلیل حساسیت مورد بررسی قرار داد. رسالت بنیادین این مدل، ارزیابی علمی و اولویت‌بندی شبکه‌ی بنادر(تحت حاکمیت مرکزی) جهت تخصیص بهینه منابع در مسیر هوشمندسازی است. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که در این انتخاب استراتژیک، توسعه زیرساخت‌های فناوری بدون در نظر گرفتن پیامدهای جانبی فاقد اثربخشی پایدار خواهد بود و موفقیت در این حوزه را می‌توان منوط به حل چالش های عملیاتی بنادر به وسیله‌ی موازنه میان ظرفیت‌های زیرساختی، ریسک های پیاده سازی و مشخصات ذاتی و نقش راهبردی هر بندر در شبکه حمل‌ونقل و تجارت کشور دانست.

نتایج تحلیل حساسیت مدل رتبه‌بندی ارائه شده در این پژوهش، به پارادوکس مقیاس اشاره دارد. یافته‌ها حاکی از آن است که مگاپورت‌هایی نظیر بندر شهید رجایی، با وجود برخورداری از بالاترین پتانسیل برای ارزش‌آفرینی اقتصادی، به دلیل پیچیدگی های عظیم ساختاری و تعدد ذی‌نفعان، مستعدترین نقاط برای شکست پروژه‌های کلان دیجیتال در صورت اجرای دفعی محسوب می شوند. از این رو، استراتژی شروع کوچک، تفکر بزرگ به‌عنوان منطقی‌ترین خروجی این اولویت‌بندی مطرح می‌گردد؛ رویکردی که در آن بنادری با مقیاس متوسط اما چابک‌تر، به‌عنوان پایلوت انتخاب می‌شوند تا پس از آزمون فناوری‌ها و تثبیت یادگیری سازمانی، این الگو با ضریب اطمینان بالا به بنادر کانونی تسرّی یابد.

افزون بر اولویت‌بندی بنادر، تحلیل عمیق نتایج به‌ویژه وزن و اهمیت بالای معیار ریسک در مدل گویای آن است که تزریق شتاب‌زده‌ی فناوری به ساختار سنتی هر بندری (فارغ از اولویت آن در رتبه‌بندی) با توقف یا شکست مواجه خواهد شد.

بر همین اساس، این پژوهش یک نقشه راه تکاملی و سه‌فازی را به‌عنوان استراتژی مکمل پیاده سازی پیشنهاد می‌دهد. در این مسیر، گذار به بندر هوشمند باید از همگرایی اطلاعاتی و یکپارچه‌سازی زیرساخت‌های داده آغاز شده، با استقرار سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT) جهت ایجاد شفافیت عملیاتی و تولید کلان‌داده‌ها تعمیق یابد و در نهایت، به اتوماسیون جامع و تصمیم‌سازی خودران مبتنی بر هوش مصنوعی ختم گردد.

در نهایت، تحقق پایدار این چارچوب، منوط به آن است که سیاست‌گذاران، نگاه خود را از توسعه‌ی صرفاً سخت‌افزاری به مدیریت یک اکوسیستم تغییر دهند. تثبیت کامل هر فاز پیش از ورود به فاز بعدی، در کنار تمرکز بر متغیرهای تسهیل‌گری نظیر توسعه مهارت‌های دیجیتال نیروی انسانی، ارتقای امنیت سایبری و تدوین قوانین منعطف برای اشتراک‌گذاری امن داده‌ها، ضامن موفقیت در این گذار تاریخی خواهد بود.

٦ –سپاسگزاری

نویسندگان این پژوهش، مراتب سپاس و قدردانی خود را از کلیه مدیران و متخصصان برجسته بنادر کشور که با شکیبایی و دقت‌نظر، تجارب گران‌بهای خود را از طریق پاسخ به پرسشنامه‌ها در اختیار این تحقیق قرار دادند، ابراز می‌دارند. بی شک، مشارکت ارزشمند این خبرگان در دستیابی به اهداف پژوهش و غنای علمی آن، نقشی بی‌بدیل داشته است.

۷ – مراجع

-Ark, Y. B. (2023). A study on the strengthening of port competitiveness through the establishment of smart port (Doctoral dissertation, *Seoul National University,* Graduate School).

-Basulo-Ribeiro, J., Pimentel, C. (2024). What is known about smart ports around the world? A benchmarking study. *Procedia Computer Science*, *232*, 1748-1758.

-Belmoukari, B., Audy, J. F., Forget, P., & Adam, V. (2026). Smart Port and Digital Transition: A Theory-and Experience-Based Roadmap. *Logistics*, *10*(2), 26.

-Boullauazan, Y., Sys, C., & Vanelslander, T. (2023). Developing and demonstrating a maturity model for smart ports. *Maritime Policy & Management*, *50*(4), 447-465.

-Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. In *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications a state-of-the-art Survey,* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 58-191.
-Iris, Ç., & Lam, J. S. L. (2019). A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *112*, 170-182.
-Jun, W. K., Lee, M. K., & Choi, J. Y. (2018). Impact of the smart port industry on the Korean national economy using input-output analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *118*, 480-493.
-Kapkaeva, N., Gurzhiy, A., Maydanova, S., & Levina, A. (2021). Digital platform for maritime port ecosystem: Port of Hamburg case. *Transportation Research Procedia*, *54*, 909-917.
-Karlı, H & Çelikyay, S. (2021). Fuzzy AHP approach to the determinatıon of smart port dimensions: a case study on filyos port. *Duzce University Journal of Science and Technology*, *9*(1), 322-336.
-Kia, M., Shayan, E., & Ghotb, F. (2000). The importance of information technology in port terminal operations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *30*(3-4), 331-344.
-Lacalle, I., Belsa, A., Vaño, R., & Palau, C. E. (2020). Framework and methodology for establishing port-city policies based on real-time composite indicators and IoT: a practical use-case. *Sensors*, *20*(15), 4131.
-Lazaroiu, C., & Roscia, M. (2017, November). Sustainable port through sea wave energy converter. In *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, IEEE. 462-467.
-Li, K. X., Li, M., Zhu, Y., Yuen, K. F., Tong, H., & Zhou, H. (2023). Smart port: A bibliometric review and future research directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *174*, 103098.
-Lin, S. C., Chang, H. K., & Chung, Y. F. (2022). Exploring the impact of different port governances on smart port development strategy in Taiwan and Spain. *Sustainability*, *14*(15), 9158.
-Makkawan, K., & Muangpan, T. (2021). A conceptual model of smart port performance and smart port indicators in Thailand. *Journal*
-Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, *24*(2), 228-238.
-Camarero Orive, A., Santiago, J. I. P., Corral, M. M. E. I., & González-Cancelas, N. (2020). Strategic analysis of the automation of container port terminals through BOT (business observation tool). *Logistics*, *4*(1), 3.
-Canton, H. (2021). Economic and Social Commission for Asia and the Pacific—ESCAP. In *The Europa Directory of International Organizations 2021,* Routledge. 136-141.
-Chen, J., Huang, T., Xie, X., Lee, P. T. W., & Hua, C. (2019). Constructing governance framework of a green and smart port. *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(4), 83.
-Chen, J., Xue, K., Ye, J., Huang, T., Tian, Y., Hua, C., & Zhu, Y. (2019). Simplified neutrosophic exponential similarity measures for evaluation of smart port development. *Symmetry*, *11*(4), 485.

-De la Peña Zarzuelo, I. (2021). Cybersecurity in ports and maritime industry: Reasons for raising awareness on this issue. *Transport Policy*, *100*, 1-4.
-de la Peña Zarzuelo, I., Soeane, M. J. F., & Bermúdez, B. L. (2020). Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review. *Journal of Industrial Information Integration*, *20*, 100173.
-Dominguez, R., Cannella, S., & Framinan, J. M. (2015, October). On the evaluation of arborescent supply chains with inventory errors. In *2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, IEEE, 708-713.
-Fusco Girard, L. (2013). Toward a smart sustainable development of port cities/areas: The role of the "Historic Urban Landscape" approach. *Sustainability*, *5*(10), 4329-4348.
-Gunes, B., Kayisoglu, G., & Bolat, P. (2021). Cyber security risk assessment for seaports: A case study of a container port. *Computers & Security*, *103*, 102196.
-Heikkilä, M., Saarni, J., & Saurama, A. (2022). Innovation in smart ports: Future directions of digitalization in container ports. *Journal of Marine Science and Engineering*, *10*(12), 1925.
-Heilig, L., Lalla-Ruiz, E., & Voß, S. (2017). Digital transformation in maritime ports: analysis and a game theoretic framework. *Netnomics: Economic Research and Electronic Networking*, *18*(2), 227-254.

-Ports and Maritime Organization of Iran (PMO). (2021). Master Plan of Shahid Beheshti Chabahar Port. *Sistan & Baluchestan Ports and Maritime Administration.*
-Ports and Maritime Organization of Iran (PMO). (2021). Master Plan of Bushehr Port. *Bushehr Ports and Maritime Administration*.
-Ports and Maritime Organization of Iran (PMO). (2021). Master plan of Amirabad Port. *Amirabad Ports and Maritime Administration.*
-Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, *53*, 49-57.
-Schumacher, A., Nemeth, T., & Sihn, W. (2019). Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises. *Procedia cirp*, *79*, 409-414.
-Sheikholeslami, A., Babaie, H., & Tabbakhpour Langeroodi, A. (2026). Industry technologies role in port generation to achieve sustainable smart port: A review on applications and challenges. In Proceedings of the 3rd International and 5th National Conference on Marine Sustainable Development. *Khorramshahr University of Marine Science and Technology.*
-Talley, W. K. (2017). Port economics. *Routledge.*
-UNCTAD. (2022). Review of maritime transport 2022. *United Nations Conference on Trade and Development.*
-Yau, K. L. A., Peng, S., Qadir, J., Low, Y. C., & Ling, M. H. (2020). Towards smart port infrastructures: Enhancing port activities using information and communications technology. *Ieee Access*, *8*, 83387-83404.
-Yen, B. T., Huang, M. J., Lai, H. J., Cho, H. H., & Huang, Y. L. (2023). How smart port design influences port efficiency–A DEA-Tobit approach. *Research in Transportation Business & Management*, *46*, 100862.
-Zhang, X., & Lam, J. S. L. (2019). A fuzzy Delphi-AHP-TOPSIS framework to identify barriers in big data analytics adoption: case of maritime organizations. *Maritime Policy & Management*, *46*(7), 781-801.
of International Logistics and Trade, *19*(3), 133-146.
-Meyer, C., Gerlitz, L., Philipp, R., & Paulauskas, V. (2021). A digital or sustainable small and medium-sized port? Sustainable port blueprint in the baltic sea region based on port benchmarking. *Transport and Tele communication*, *22*(3), 332-342.
-Molavi, A., Lim, G. J., & Race, B. (2020). A framework for building a smart port and smart port index. *International Journal of Sustainable Transportation*, *14*(9), 686-700.
-Niu, B., Dong, J., & Wang, H. (2024). Smart port vs. port integration to mitigate congestion: ESG performance and data validation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *191*, 103741.
-Notteboom, T. E., & Haralambides, H. E. (2020). Port management and governance in a post-COVID-19 era: quo vadis? *Maritime Economics & Logistics*, *22*(3), 329-352.
-Othman, A., El Gazzar, S., & Knez, M. (2022). Investigating the influences of smart port practices and technology employment on port sustainable performance: The Egypt case. *Sustainability*, *14*(21), 14014.
-Philipp, R. (2020, June). Digital readiness index assessment towards smart port development. In *Sustainability Management Forum,* Vol. 28, No. 1, 49-60. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
-PORT, A. (2001). Port Reform Toolkit.
-Ports and Maritime Organization of Iran (PMO). (2021). Master plan of Imam Khomeini Port. *Khuzestan Ports and Maritime Administration.*
-Ports and Maritime Organization of Iran (PMO). (2021). Master plan of Shahid Rajaei Port. *Hormozgan Ports and Maritime Administration.*
-Ports and Maritime Organization of Iran (PMO). (2021). Master plan of Khorramshahr Port. *Khorramshahr Ports and Maritime Administration.*
-Ports and Maritime Organization of Iran (PMO). (2021). Master Plan of Anzali Port. *Gilan Ports and Maritime Administration.*

From Traditional to Smart Ports: Evaluation and Ranking of Iranian Commercial Ports Using a Hybrid BWM, TOPSIS, and PROMETHEE Approach

Mohammad Valipour, Ph.D., Candidate in Transportation Planning, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Abdolreza Sheikholeslami, *Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

E-mail: Sheikh@iust.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

The transition toward a smart ecosystem has become an undeniable necessity for maintaining port competitiveness and ensuring supply chain resilience. However, in the context of developing economies, this transition requires moving beyond a purely technology-driven perspective and placing greater emphasis on addressing deep-rooted structural and operational bottlenecks—an objective attainable only through the active engagement of all port stakeholders. Departing from conventional and static maturity assessment models, this study develops a forward-looking Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) framework specifically designed to evaluate port readiness and prioritize ports for smart ecosystem implementation. To this end, the Best–Worst Method (BWM) is employed to derive robust weights for key indicators emerging from the intersection of operational challenges, infrastructural readiness, technology implementation risks, and geoeconomic characteristics. Subsequently, by integrating the TOPSIS and PROMETHEE techniques, a comprehensive network of Iranian commercial ports is ranked and prioritized according to their smart transformation potential. To ensure the robustness of the results under different scenarios, the proposed evaluation framework is further strengthened through Monte Carlo simulation and comprehensive sensitivity analysis. The findings suggest that large-scale resource allocation in this domain must be aligned with each port's absorptive capacity, risk tolerance, and inherent contextual conditions. Accordingly, a one-size-fits-all approach lacks both efficiency and strategic justification. Instead, ports require differentiated policy strategies tailored to local conditions. In this regard, a "big-bang" transformation approach should be avoided in favor of a modular, bottleneck-driven development strategy. Ultimately, the proposed hybrid model provides port authorities and policymakers with a flexible roadmap for designing and implementing smart transformation in developing countries' ports, grounded in resolving operational challenges and guided by a "start small, think big" strategy.

Keywords: Smart Port Ecosystem, Port Prioritization, Best-Worst Method (BWM), Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)