

Analyzing the Factors Affecting Waste Management in Pharmaceutical Cold Supply Chain (Case of Study: Insulin Supply Chain in Iran)

Matin Heydari Rostami

MSc Student of Industrial Management, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

Shahab Bayatzadeh

PhD Student of Industrial Management, Faculty of Industrial Management & Technology, College of Management, University of Tehran, Tehran, Iran.

HamidReza Talaie

* Associate Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, Arak University, Arak, Iran. **(Corresponding Author)** h-Talaie@araku.ac.ir

Abstract

Background and Objective: The pharmaceutical cold supply chain is susceptible to temperature fluctuations and technical failures, and disruptions can lead to drug spoilage and hazardous pharmaceutical waste. This study aimed to identify and prioritize the factors influencing waste management in the cold supply chain of insulin in Iran.

Materials and Methods: This analytical-applied, survey-based research first identified initial factors through a systematic literature review. These factors were then refined using the Fuzzy Delphi method with input from 16 experts, resulting in the confirmation of 12 final factors. Finally, weighting and ranking were performed using the Interval Type-2 Fuzzy Best-Worst Method with the participation of 3 highly experienced experts.

Results: The most important factors, in order of priority, were environmental monitoring and control; technical issues and equipment failure; cold transportation infrastructure; warehousing and storage management; and tracking technologies and blockchain. The technical-technological dimension received the highest weight, followed by the logistical dimension, while the managerial dimension had the lowest weight. Weaknesses in temperature control and equipment performance are mainly responsible for insulin spoilage in Iran.

Conclusion: The primary focus for reducing insulin waste should be on strengthening real-time temperature monitoring, preventive maintenance of cold equipment, and upgrading refrigerated transportation fleets. Managerial and educational factors play a supporting role and will have a limited impact without first addressing technical and logistical infrastructure deficiencies.

Keywords: Cold Supply Chain, Fuzzy Delphi, Interval Type-2 Fuzzy Best-Worst Method, Insulin, Pharmaceutical Waste Management

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 2026/01/29

Accepted: 2026/05/09

Doi:10.22038/jreh.2026.28093

► **Citation:** Heydari Rostami M, Bayatzadeh Sh, Talaie HR. Analyzing the Factors Affecting Waste Management in Pharmaceutical Cold Supply Chain (Case of Study: Insulin Supply Chain in Iran). *Journal of Research in Environmental Health*. 12(1):107-126.

تحلیل عوامل موثر بر مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد دارو (مورد مطالعه: زنجیره تأمین انسولین در ایران)

متین حیدری رستمی

دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

شهاب بیات زاده

دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری، دانشکده‌گان مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

حمیدرضا طلایی

* دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اراک، اراک، ایران. (نویسنده مسئول)
h-Talaie@araku.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: زنجیره تأمین سرد دارو به شدت به نوسانات دمایی و نقص‌های فنی حساس است و هرگونه اختلال در آن باعث فساد دارو و تولید پسماند دارویی خطرناک می‌شود. این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی عوامل موثر بر مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد انسولین در ایران انجام شده است.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر از نوع تحلیلی-کاربردی و پیمایشی است. ابتدا عوامل اولیه از مرور نظام‌مند ادبیات استخراج شد. سپس با روش دلفی فازی و نظر ۱۶ خبره پالایش شدند و ۱۲ عامل نهایی تأیید شد. در نهایت وزن‌دهی و رتبه‌بندی با روش بهترین-بدترین فازی نوع دوم و مشارکت ۳ خبره متخصص انجام گرفت.

یافته‌ها: مهم‌ترین عوامل به‌ترتیب پایش و کنترل محیطی، مسائل فنی و شکست تجهیزات، زیرساخت‌های حمل‌ونقل سرد، مدیریت انبارداری، فناوری‌های ردیابی و بلاکچین شناخته شدند. بعد فنی-فناورانه بیشترین وزن، بعد لجستیکی دوم و بعد مدیریتی کمترین وزن را داشت. فساد انسولین در ایران عمدتاً ناشی از ضعف کنترل دمایی و تجهیزات است.

نتیجه‌گیری: اولویت اصلی برای کاهش پسماند انسولین باید تقویت پایش بلادرنگ دما، نگهداری پیشگیرانه تجهیزات و ناوگان حمل‌ونقل سرد باشد. عوامل مدیریتی و آموزشی نقش مکمل دارند و بدون اصلاح زیرساخت‌های فنی و لجستیکی تأثیر کمی خواهند داشت.

کلیدواژه‌ها: انسولین، بهترین-بدترین فازی نوع دوم، دلفی فازی، زنجیره تأمین سرد، مدیریت پسماند دارویی

◀ **استناد:** حیدری رستمی م، بیات‌زاده ش، طلایی ح.م. تحلیل عوامل موثر بر مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد دارو (مورد مطالعه: زنجیره تأمین انسولین در ایران). فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. بهار ۱۴۰۵؛ ۱۲(۱): ۱۰۷-۱۲۶.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

نوع مقاله: پژوهشی

زنجیره تأمین سرد یکی از مهم‌ترین بخش‌های لجستیک مدرن است که وظیفه نگهداری، حمل و توزیع کالاهای حساس به دما را بر عهده دارد. این زنجیره شامل فرآیندهای متعددی از جمله تولید، بسته‌بندی، انبارداری، حمل‌ونقل و توزیع کالاهای فاسدشدنی مانند محصولات دارویی، غذایی و بیولوژیکی است (۱). کنترل دقیق دما و رطوبت در این زنجیره، نقشی حیاتی در حفظ کیفیت محصولات و کاهش ضایعات دارد (۲). با پیشرفت فناوری‌های دیجیتال، استفاده از اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و بلاکچین باعث بهبود نظارت و کارایی این سیستم شده است (۳). در زنجیره تأمین داروهای حساس مانند انسولین، مدیریت پسماند نقش حیاتی در حفظ کیفیت دارو، کاهش هزینه‌ها و تضمین سلامت بیماران دارد. در سطح جهانی، بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند برای پیش‌بینی زمان انقضا، کنترل شرایط حمل‌ونقل و پایش مداوم وضعیت دمایی، نقش مهمی در کاهش ضایعات داشته است. با این حال، چالش‌هایی مانند نقص در زیرساخت‌های ردیابی و نبود نظارت یکپارچه هنوز در بسیاری از کشورها موجب افزایش نرخ هدررفت دارو می‌شود (۴).

انسولین یکی از حیاتی‌ترین داروها برای بیماران مبتلا به دیابت است که به‌شدت تحت تأثیر شرایط نگهداری و حمل‌ونقل قرار دارد (۵). در ایران، بیش از ۴ میلیون بیمار دیابتی وجود دارد که به این دارو نیاز دارند. با توجه به حساسیت بالای انسولین به تغییرات دمایی، زنجیره تأمین سرد این دارو باید از استانداردهای بسیار دقیقی پیروی کند. هرگونه انحراف از این استانداردها، مانند نگهداری در دمای نامناسب یا توزیع غیر اصولی، نه تنها موجب فساد و کمبود دارو می‌شود، بلکه بخش قابل توجهی از انسولین را به‌صورت پسماند غیر قابل مصرف در می‌آورد و فشار بیشتری بر نظام سلامت کشور وارد می‌کند. علاوه بر این، مسائلی مانند قاچاق، توزیع غیرمجاز و عدم نظارت یکپارچه، میزان هدررفت و تولید پسماند دارویی را افزایش می‌دهد. همین چالش‌ها ضرورت توجه به مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد انسولین و بهره‌گیری از راهکارهای نوآورانه و فناورانه برای کاهش ضایعات را بیش از پیش پررنگ می‌سازد (۶).

مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد به مجموعه اقداماتی گفته می‌شود که به کاهش هدررفت، بازیافت محصولات فاسد و بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرآیندهای لجستیکی می‌پردازد (۷). در زنجیره تأمین داروهای حساس مانند انسولین، مدیریت پسماند از اهمیت دوچندانی برخوردار است، زیرا داروهای تاریخ‌گذشته و یا فاسد می‌توانند عوارض جدی برای بیماران ایجاد کنند (۸). در بسیاری از کشورها، استفاده از تکنولوژی‌های هوشمند برای پیش‌بینی زمان انقضای دارو و کنترل شرایط حمل‌ونقل، به کاهش ضایعات دارویی کمک کرده است (۸). در ایران، نبود زیرساخت‌های پیشرفته برای ردیابی و مدیریت پسماند دارویی موجب افزایش هدررفت انسولین و کاهش بهره‌وری در زنجیره تأمین شده است (۹).

در زنجیره تأمین انسولین، پسماندهای دارویی عمدتاً شامل انسولین‌های فاسدشده، داروهای تاریخ‌گذشته، ضایعات بسته‌بندی و مشکلات ناشی از حمل‌ونقل نامناسب هستند (۱۰). یکی از عوامل مهم در افزایش این پسماندها، عدم شفافیت در توزیع دارو، نبود نظارت دیجیتال بر دمای نگهداری و چالش‌های مدیریتی در انبارداری است (۱۱). راهکارهای مبتنی بر بلاکچین و هوش مصنوعی می‌توانند در کاهش این ضایعات مؤثر باشند، به‌طوری‌که با رهگیری دقیق وضعیت دمایی انسولین در تمام مراحل زنجیره تأمین و استفاده از مدل‌های پیش‌بینی فساد دارویی، می‌توان از هدررفت گسترده این دارو جلوگیری کرد (۱۲).

با وجود اهمیت حیاتی مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد داروهای حساس، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین بیشتر بر بهینه‌سازی هزینه، زمان تحویل یا طراحی شبکه‌های توزیع تمرکز داشته‌اند و کمتر به شناسایی و ارزیابی نظام‌مند عوامل مؤثر بر مدیریت پسماند دارویی به‌ویژه در زنجیره تأمین انسولین پرداخته‌اند. همچنین، مطالعات موجود اغلب به فناوری‌های سردخانه‌ای یا راهکارهای کلی لجستیکی پرداخته‌اند، درحالی‌که نقش عوامل مؤثر کلی کمتر بررسی شده است. این کمبودها یک شکاف پژوهشی مهم را در زمینه مدیریت پسماند دارویی در زنجیره تأمین سرد ایجاد کرده است.

در زنجیره تأمین سرد، امکان رهگیری دقیق شرایط حمل و انبارداری را فراهم کرده و به کاهش هدررفت و افزایش بهره‌وری کمک می‌کند.

ویژگی‌های اصلی زنجیره تأمین سرد شامل پایش مستمر دما، انبارداری در شرایط کنترل‌شده، حمل‌ونقل ایمن، بسته‌بندی محافظتی و رعایت استانداردهای سخت‌گیرانه است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این زنجیره، قابلیت رهگیری و نظارت در زمان واقعی است که با استفاده از اینترنت اشیا و سنسورهای هوشمند انجام می‌شود (۱۵). هم‌چنین، زنجیره نیازمند هماهنگی بالای میان ذینفعان مختلف، از تولیدکنندگان تا مراکز توزیع و مصرف‌کنندگان است تا هرگونه اختلال در فرآیند حمل و نگهداری به سرعت شناسایی و برطرف شود. علاوه بر این، زنجیره تأمین سرد باید دارای انعطاف‌پذیری عملیاتی باشد تا بتواند در شرایط اضطراری، مانند افزایش ناگهانی تقاضا یا مشکلات لجستیکی، بدون آسیب به کیفیت محصول واکنش مناسب نشان دهد (۱۶).

با وجود مزایای فراوان، زنجیره تأمین سرد با چالش‌های متعددی مواجه است که می‌تواند بر کارایی آن تأثیر منفی بگذارد. نوسانات دمایی، هزینه‌های بالای نگهداری و حمل، عدم هماهنگی در شبکه‌های تأمین و مشکلات زیرساختی از جمله موانع اصلی در این حوزه هستند. در بسیاری از کشورها، کمبود تجهیزات مناسب، ضعف در فناوری‌های نظارتی و عدم رعایت استانداردهای بین‌المللی منجر به هدررفت گسترده محصولات حساس می‌شود (۱۷). در حوزه دارویی، فساد داروها، توزیع نامناسب و قاچاق محصولات پزشکی چالش‌های مضاعفی ایجاد کرده که می‌تواند سلامت بیماران را به خطر بیندازد. علاوه بر این، محدودیت‌های زیست‌محیطی و نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، سازمان‌ها را مجبور کرده است تا به دنبال روش‌های پایدارتری برای مدیریت زنجیره تأمین سرد باشند (۱۳).

اهمیت زنجیره تأمین دارویی در تأمین سلامت عمومی و بهبود کیفیت زندگی بیماران غیر قابل انکار است. داروهایی مانند واکسن‌ها، انسولین و محصولات زیستی به شدت وابسته به نگهداری در شرایط کنترل‌شده هستند و هرگونه اختلال در زنجیره تأمین آن‌ها می‌تواند پیامدهای جدی بر سلامت جامعه داشته باشد (۱۸).

نوآوری این پژوهش در آن است که با تمرکز بر زنجیره تأمین سرد انسولین در ایران، مجموعه‌ای جامع از عوامل مؤثر بر مدیریت پسماند دارویی را شناسایی، طبقه‌بندی و اولویت‌بندی می‌کند. در این تحقیق، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، این عوامل از منظر فنی و فناورانه، مدیریتی و لجستیکی ارزیابی شده و میزان اثرگذاری هر یک بر کاهش ضایعات و بهبود عملکرد زنجیره تأمین تعیین می‌شود. دستاورد اصلی این مطالعه، ارائه یک چارچوب تحلیلی برای تصمیم‌سازان و مدیران حوزه سلامت است تا بتوانند براساس معیارهای علمی، راهبردهای مؤثر بر کاهش پسماند انسولین را انتخاب و در زنجیره تأمین سرد کشور پیاده‌سازی کنند. با توجه به چالش‌های موجود در زنجیره تأمین انسولین، این پژوهش به دنبال پاسخ به سؤالات زیر است:

۱. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد انسولین چیست؟

۲. کدام معیارها بیشترین تأثیر را در بهینه‌سازی زنجیره تأمین انسولین دارند و چگونه می‌توان آن‌ها را اولویت‌بندی کرد؟

با پاسخگویی به این سؤالات، پژوهش حاضر می‌تواند راهکارهای عملی و فناورانه برای بهبود زنجیره تأمین انسولین در ایران ارائه دهد و به کاهش ضایعات دارویی و افزایش دسترسی پایدار بیماران به این داروی حیاتی کمک کند.

مرور ادبیات و شناسایی عوامل مؤثر بر مدیریت پسماند در زنجیره تأمین انسولین

زنجیره تأمین سرد به مجموعه‌ای از فرآیندهای هماهنگ و کنترل‌شده در حوزه لجستیک گفته می‌شود که وظیفه نگهداری، حمل‌ونقل و توزیع کالاهای حساس به دما را بر عهده دارد. این سیستم برای حفظ کیفیت و ایمنی محصولات مانند داروها، واکسن‌ها، مواد غذایی و محصولات بیولوژیکی طراحی شده است (۱۳). در زنجیره تأمین سرد، کنترل شرایط محیطی، به‌ویژه دما و رطوبت، در تمامی مراحل از تولید تا مصرف ضروری است، زیرا تغییرات ناگهانی در این عوامل می‌تواند منجر به فساد، کاهش اثرگذاری یا حتی غیرقابل استفاده شدن محصول شود (۱۴). پیشرفت فناوری و توسعه راهکارهای هوشمند

پیامدهای ضایعات دارویی نه تنها از نظر زیست محیطی،

بلکه از ابعاد اقتصادی و اجتماعی نیز قابل توجه هستند. از نظر زیست محیطی، دفع نامناسب داروهای فاسد یا تاریخ گذشته می تواند به آلودگی منابع آبی، خاک و ایجاد مقاومت میکروبی در طبیعت منجر شود. ورود ترکیبات دارویی به محیط، به ویژه آنتی بیوتیک ها و هورمون ها، می تواند باعث تغییر در اکوسیستم ها و آسیب به گونه های زنده شود (۲۲). از منظر اقتصادی، هدررفت داروها منجر به ضررهای مالی برای شرکت های داروسازی، مراکز درمانی و بیماران می شود، به ویژه در کشورهایی مانند ایران که به واردات برخی از داروهای حیاتی وابسته هستند.

برای کاهش پسماند دارویی در زنجیره تأمین سرد، استفاده از فناوری های دیجیتال و روش های مدیریت پیشرفته ضروری است. بهینه سازی پیش بینی تقاضا با کمک هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می تواند به جلوگیری از تولید و توزیع بیش از حد داروها کمک کند. همچنین، بهبود فرآیندهای ذخیره سازی و حمل و نقل از طریق اینترنت اشیا و سیستم های مانیتورینگ دمایی، می تواند از فساد داروهای حساس جلوگیری کند. به کارگیری سیستم های بازگشت و بازیافت دارویی در داروخانه ها و بیمارستان ها می تواند به کاهش هدررفت کمک کند. همچنین، آگاهی بخشی به بیماران و ارائه برنامه های جمع آوری داروهای اضافی یا بلااستفاده می تواند نقش مهمی در کاهش ضایعات دارویی و حفظ سلامت جامعه داشته باشد (۲۳).

پژوهش های پیشین در حوزه زنجیره تأمین داروهای فاسدشدنی عمدتاً بر بهینه سازی عملکرد لجستیکی در شرایط بحرانی متمرکز بوده اند و کمتر به مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد توجه کرده اند. شهرآبادی و همکاران (۲۴) با توسعه یک مدل ریاضی برای زنجیره تأمین کالاهای پزشکی فاسدشدنی، نشان داده اند که عدم قطعیت و زمان ماندگاری اقلام در انبار نقش تعیین کننده ای در افزایش احتمال فساد دارو دارد که نتایج بر اهمیت مدیریت یکپارچه حمل و نقل و

پایداری و کارایی این زنجیره به کاهش ضایعات دارویی، کاهش هزینه های درمانی و افزایش دسترسی بیماران به داروهای حیاتی کمک می کند (۱۳). در کشورهایی مانند ایران، که با چالش های متعددی در تأمین و توزیع دارو مواجه هستند، بهینه سازی زنجیره تأمین دارویی نه تنها یک ضرورت اقتصادی، بلکه یک اقدام استراتژیک برای افزایش امنیت دارویی و بهبود خدمات درمانی محسوب می شود. به همین دلیل، توسعه فناوری های جدید در رهگیری، انبارداری و توزیع داروهای حساس به دما می تواند به افزایش بهره وری این زنجیره و کاهش ریسک های مرتبط با فساد و کمبود دارویی کمک کند.

پسماند دارویی به مجموعه ای از داروهای تاریخ مصرف گذشته، فاسد، استفاده نشده یا معیوب گفته می شود که به دلایل مختلف دیگر قابل مصرف نیستند و باید به شیوه ای ایمن دفع شوند (۱۹). این پسماندها را می توان به چند دسته اصلی تقسیم کرد. پسماندهای غیر قابل استفاده انسانی، پسماندهای تولیدی و پسماندهای ناشی از خطاهای توزیع و نگهداری. علاوه بر این، داروهای برگشتی از مراکز درمانی یا داروخانه ها نیز نوعی از پسماند دارویی محسوب می شوند که در صورت عدم مدیریت صحیح، می توانند منجر به آلودگی محیط زیست و ایجاد مخاطرات بهداشتی شوند (۲۰).

دلایل ایجاد پسماند دارویی در زنجیره تأمین دارو متنوع بوده و به عوامل مدیریتی، لجستیکی و رفتاری وابسته است. یکی از مهم ترین دلایل، عدم برنامه ریزی دقیق در پیش بینی تقاضا و موجودی انبار است که باعث می شود داروها بیش از میزان مورد نیاز تولید یا ذخیره شوند و در نهایت به دلیل انقضای تاریخ مصرف، بلااستفاده بمانند (۱۸). همچنین، نقص در حمل و نقل و نگهداری داروهای حساس مانند انسولین، واکسن ها و آنتی بیوتیک ها، که به شرایط دمایی خاص نیاز دارند، یکی از چالش های مهم در زنجیره تأمین سرد است. نوسانات دمایی یا تأخیر در تحویل داروها می تواند منجر به کاهش اثربخشی یا فساد آن ها شود. علاوه بر این، رفتارهای مصرف کنندگان و کادر درمانی، مانند مصرف نامنظم داروها، انباشت داروهای اضافی در منازل و عدم آگاهی از روش های صحیح بازگرداندن داروهای مازاد، سهم قابل توجهی در افزایش پسماند دارویی دارد (۲۱).

¹ Internet Of Things (IOT)

ذخیره‌سازی تأکید می‌کند. در ادامه این جریان، کوچک‌کاشانی و همکاران (۲۵) مدلی ارائه کرده‌اند که زنجیره تأمین داروهای سرد در شرایط همه‌گیری کووید-۱۹ را به صورت یکپارچه تحلیل می‌کند. استفاده از خوشه‌بندی برای طبقه‌بندی اقلام دارویی و کاهش ابعاد مدل و ارزیابی تأثیر تصمیمات مدیریتی بر هزینه‌ها، از مهم‌ترین دستاوردهای آن‌هاست. مطالعه‌ی موردی در تهران نیز نشان می‌دهد ادغام زنجیره سرد و غیر سرد می‌تواند سطح خدمات و بهره‌وری هزینه‌ای را بهبود دهد. گودرزیان و همکاران (۲۶) تمرکز خود را بر زنجیره تأمین واکسن گذاشته و با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند تأثیر اینترنت اشیا را بر عدالت در توزیع، هزینه و اثرات زیست‌محیطی بررسی کرده‌اند. این مطالعه اهمیت ظرفیت ناوگان حمل‌ونقل را در عملکرد زنجیره تأمین واکسن برجسته می‌کند.

از منظر زیست‌محیطی، باباگل‌زاده و همکاران (۲۷) با توسعه یک مدل دومرحله‌ای تصادفی، اثر سیاست‌های مالیاتی کربن و عدم قطعیت تقاضا را در زنجیره تأمین سرد بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها در استرالیا نشان داده که ناوگان ناهمگن و سیاست‌های تأمین هوشمند می‌تواند هم هزینه‌ها و هم انتشار کربن را کاهش دهد؛ هرچند مالیات کربن همواره منجر به بهبود عملکرد نمی‌شود. در حوزه مدیریت پسماند، سازوار و همکاران (۲۸) یکی از محدود مطالعاتی است که زنجیره تأمین دارویی را در قالب یک سیستم حلقه‌بسته و با تمرکز بر طبقه‌بندی پسماندهای دارویی بررسی کرده است. آن‌ها نشان داده‌اند که تفکیک داروهای منقضی‌شده به سه دسته دورریختنی، قابل بازساخت و قابل بازیافت می‌تواند آثار اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد کند، به‌ویژه در بازارهای رقابتی با تقاضای نامطمئن. هم‌چنین، واسیم احمد و همکاران (۲۹) یک رویکرد مبتنی بر بلاک‌چین برای ردیابی، ذخیره‌سازی ایمن و مدیریت پسماند تجهیزات پزشکی پیشنهاد کرده‌اند. این مدل با استفاده از

قراردادهای هوشمند، شفافیت داده‌ها و قابلیت ردیابی پسماند را افزایش می‌دهد و نمونه‌ای از کاربرد فناوری‌های غیر متمرکز در کنترل پسماند پزشکی است.

در مقیاس کلان، مگان و همکاران (۳۰) وضعیت مدیریت پسماند پزشکی را در کشورهای آفریقایی بررسی کرده و نشان داده‌اند که شکست در جداسازی، ذخیره‌سازی و دفع پسماند می‌تواند تهدیدات جدی زیست‌محیطی ایجاد کند. این مطالعه بر لزوم سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز و ایجاد ساختارهای سیاستی مناسب برای مدیریت پسماند تأکید دارد. دبرا و همکاران (۳۱) نیز چالش‌های آموزشی و فرهنگی مرتبط با مدیریت پسماند را در کشورهای در حال توسعه بررسی کرده‌اند و نشان می‌دهند که شکاف دانش عملی و ضعف توانمندی آموزشی، مانع بهره‌گیری درست از راهکارهای مدیریت پسماند است. این یافته‌ها اهمیت آموزش محیط‌زیستی و تقویت مهارت‌های عملی را برجسته می‌کند. در نهایت، چاهان و همکاران (۳۲) با رویکردی مبتنی بر اقتصاد چرخشی و صنعت ۴٫۰، معیارهای کلیدی برای سیستم‌های هوشمند مدیریت پسماند پزشکی را شناسایی کرده‌اند. اولویت‌بندی این معیارها با روش دیمتل نشان می‌دهد که اتصال دیجیتال میان مراکز درمانی، شرکت‌های دفع پسماند و نهادهای نظارتی، همراه با سازوکارهای بازخورددهی هوشمند، بیشترین نقش را در بهبود سیستم‌های دفع پسماند دارد. عوامل موثر بر مدیریت پسماند دارویی در زنجیره تأمین سرد انسولین در **جدول ۱** مشخص شده است.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که اکثر پژوهش‌ها اگرچه به جنبه‌هایی از فساد دارو، بهینه‌سازی لجستیک یا پسماندهای پزشکی پرداخته‌اند، اما مدیریت پسماند دارویی در زنجیره تأمین سرد و به‌ویژه در داروهای حساس مانند انسولین، همچنان به‌صورت ساختاریافته و مبتنی بر فناوری‌های نوین کمتر بررسی شده است؛ شکافی که پژوهش حاضر به‌دنبال پر کردن آن است.

جدول ۱. عوامل موثر بر مدیریت پسماند دارویی در زنجیره تأمین سرد انسولین

بعد اصلی	عامل	شرح	تمرکز	منبع
فنی و فناوریانه	پایش و کنترل محیطی (دما و رطوبت)	نظارت بلادرنگ بر شرایط محیطی با سنسورها برای جلوگیری از فساد انسولین.	نظارت فنی محیطی	(۱۵،۳۲)
فنی و	فناوری‌های ردیابی	استفاده از بلاکچین و اینترنت اشیا برای رهگیری دقیق دارو بدون تمرکز بر نظارت دمایی.	ردیابی دیجیتال	(۲۶،۲۹،۳۰،۳۲)

فناورانه	فنی و فناورانه	مسائل فنی و شکست تجهیزات	پیشگیری از خرابی تجهیزات سردکننده و فنی برای کاهش ضایعات ناشی از نقص‌ها.	نگهداری فنی	(۲۶،۲۹،۳۰،۳۲)
فنی و فناورانه	فنی و فناورانه	بسته‌بندی پیشرفته و پایدار	طراحی بسته‌بندی‌های حرارتی، قابل بازیافت و محافظتی برای افزایش ماندگاری و کاهش ضایعات زیست‌محیطی.	مواد و طراحی بسته‌بندی	(۲۵،۳۰)
مدیریتی	مدیریتی	پیش‌بینی تقاضا و مدیریت موجودی	استفاده از مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی تقاضا و جلوگیری از بیش تولید یا انباشت موجودی.	برنامه‌ریزی تقاضا	(۲۵،۲۷،۲۸)
مدیریتی	مدیریتی	مدیریت بازگشت و بازیافت دارو	سیستم‌های جمع‌آوری و بازیافت انسولین استفاده‌نشده یا تاریخ گذشته برای دفع ایمن.	مدیریت پسماند پس از مصرف	(۲۶،۲۸)
مدیریتی	مدیریتی	آموزش و آگاهی‌بخشی به ذینفعان	برنامه‌های آموزشی برای بیماران، داروسازان و کارکنان در مورد نگهداری و مصرف صحیح.	جنبه انسانی و رفتاری	(۳۱،۳۲)
مدیریتی	مدیریتی	استانداردهای قانونی و نظارتی	تدوین و اجرای قوانین برای کنترل ضایعات و رعایت استانداردهای ایمنی و زیست‌محیطی.	چارچوب قانونی	(۲۶) - (۲۸،۳۰،۳۲)
مدیریتی	مدیریتی	بهینه‌سازی هزینه‌ها و پایداری اقتصادی	کاهش هزینه‌های عملیاتی از طریق بهره‌وری منابع و جلوگیری از اتلاف مالی.	جنبه اقتصادی	(۲۹-۲۴،۲۷)
مدیریتی	مدیریتی	عدم قطعیت‌های محیطی و خارجی	مدیریت ریسک‌های خارجی مانند تغییرات آب و هوایی یا بحران‌های جهانی که بر زنجیره تأثیر می‌گذارند.	عوامل خارجی	(۲۵،۲۶)
لجستیکی	لجستیکی	زیرساخت‌های حمل‌ونقل	توسعه ناوگان حمل‌ونقل سرد و مقاوم به چالش‌های خارجی مانند آب و هوا.	لجستیک حمل	(۲۵،۲۶)
لجستیکی	لجستیکی	مدیریت انبارداری و ذخیره‌سازی	بهینه‌سازی شرایط و فرآیندهای انبار برای کاهش انقضای تاریخ مصرف.	عملیات انبارداری	(۲۴،۲۶)
لجستیکی	لجستیکی	تأخیرهای تحویل و توزیع	بهینه‌سازی زمان‌بندی تحویل برای جلوگیری از تأخیرهایی که منجر به فساد دارو می‌شوند.	زمان‌بندی توزیع	(۲۵،۲۶)

مواد و روش‌ها

این پژوهش از نظر هدف، ماهیتی تحلیلی-کاربردی دارد و از حیث روش گردآوری داده‌ها، در زمره مطالعات توصیفی-پیمایشی قرار می‌گیرد؛ زیرا به شناسایی، تأیید و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد انسولین می‌پردازد. در گام نخست، با مرور نظام‌مند ادبیات داخلی و خارجی مرتبط با زنجیره تأمین سرد، مدیریت پسماند دارویی و داروهای حساس به دما، مجموعه‌ای اولیه از عوامل مؤثر استخراج شد. این عوامل سپس در قالب یک پرسشنامه دلفی فازی در اختیار خبرگان حوزه‌های لجستیک سرد، داروسازی، مدیریت زنجیره تأمین و فناوری‌های نظارتی قرار گرفت تا روایی محتوایی و اجماع خبرگی آن‌ها ارزیابی و معیارهای نهایی تأیید شوند. در مرحله بعد، به منظور وزن‌دهی و اولویت‌بندی عوامل نهایی، از روش بهترین-بدترین فازی بازه‌ای نوع ۲^۱ استفاده شد تا اهمیت نسبی هر عامل از دید خبرگان تعیین و ارتباط میان مؤلفه‌های فنی و

فناورانه، مدیریتی و لجستیکی در مدیریت پسماند انسولین تحلیل شود. نمونه‌گیری در این پژوهش به صورت هدفمند و قضاوتی انجام گرفته است. بدین‌منظور، ۱۶ نفر از خبرگان که تجربه مستقیم در مدیریت زنجیره تأمین دارو، لجستیک سرد، سیستم‌های ردیابی دیجیتال یا سیاست‌گذاری دارویی داشتند، انتخاب شدند.

در ترکیب خبرگان، ۵ نفر دارای مدرک دکتری، ۶ نفر کارشناسی ارشد و ۵ نفر کارشناسی بوده‌اند. علاوه بر این، حداقل سابقه کاری موردنیاز برای مشارکت، ۵ سال تجربه مرتبط در زنجیره تأمین سلامت یا مدیریت عملیات سرد بوده است. از نظر جنسیت، ترکیب نمونه شامل ۱۰ مرد و ۶ زن بوده که موجب افزایش تنوع دیدگاه‌ها و اعتبار نتایج تحلیل شده است.

روش دلفی با هدف دستیابی به اجماع میان خبرگان در یک حوزه تخصصی به‌کار می‌رود و بر فرایند جمع‌آوری تدریجی نظرات کارشناسان از طریق چندین دور پرسشنامه ناشناس استوار است. در این شیوه، گروهی از

^۱ Interval Type-2 Fuzzy Best-Worst Method

متخصصان که دارای تجربه و دانش عمیق در موضوع مورد بررسی هستند، دیدگاه‌های خود را به صورت مستقل و بدون تأثیرپذیری از سایر اعضا ارائه می‌کنند. پس از هر مرحله، پاسخ‌ها تحلیل شده و خلاصه نتایج به همراه بازخورد لازم در اختیار خبرگان قرار می‌گیرد تا آن‌ها بتوانند در مراحل بعدی، ارزیابی و اصلاحات احتمالی را انجام دهند. این فرایند تکرارشونده تا زمانی ادامه می‌یابد که نهایتاً یک توافق یا همگرایی قابل قبول میان نظرات شکل گیرد (۳۳).

روش دلفی فازی با ترکیب منطق فازی و رویکرد کلاسیک دلفی، به عنوان ابزاری پیشرفته برای تصمیم‌گیری گروهی در شرایط آمیخته با عدم قطعیت توسعه یافته است. در این روش، اصولی همچون ناشناس بودن خبرگان، شکل‌گیری تدریجی اجماع، ارائه بازخورد کنترل‌شده و تجمیع نظرات بر پایه ترجیحات زبانی فازی به کار گرفته می‌شود تا دقت و اعتبار نتایج افزایش یابد. اهمیت استفاده از دلفی فازی به ویژه زمانی برجسته می‌شود که قضاوت‌های ذهنی، اطلاعات مبهم یا داده‌های ناکامل در فرآیند ارزیابی وجود داشته باشد. این روش با فراهم‌سازی امکان بیان دیدگاه‌ها در قالب اصطلاحات زبانی و تبدیل آن‌ها به مقادیر فازی، سطح ابهام موجود در قضاوت انسانی را کاهش داده و تصویری دقیق‌تر از نظر جمعی متخصصان ارائه می‌کند. در نتیجه، دلفی فازی به رویکردی کارآمد برای کاهش عدم قطعیت و بهبود کیفیت تصمیم‌گیری‌های گروهی تبدیل شده و کاربرد گسترده‌ای در تحلیل ریسک، ارزیابی فناوری‌های نوین و برنامه‌ریزی‌های استراتژیک یافته است (۳۴).

مراحل اجرای روش دلفی فازی بدین شکل می‌باشد (۳۵):
گام ۱. مرور نظام‌مند ادبیات داخلی و خارجی در حوزه زنجیره تأمین سرد، مدیریت پسماند دارویی و داروهای حساس به دما با هدف شناسایی و استخراج مجموعه‌ای جامع از عوامل مؤثر بر مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد انسولین.

گام ۲. در این مرحله، مجموعه عوامل استخراج‌شده از مرور ادبیات مرتبط با زنجیره تأمین سرد، مدیریت پسماند دارویی و فناوری‌های نظارتی، به منظور سنجش روایی محتوایی و تأیید ارتباط آن‌ها با مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد انسولین، در قالب یک پرسشنامه دلفی فازی در اختیار خبرگان قرار می‌گیرد. در این فرآیند، خبرگان میزان اهمیت هر عامل را با استفاده از عبارات زبانی فازی ارزیابی می‌کنند تا ابهام موجود در قضاوت‌های انسانی کاملاً لحاظ شود. برای کمی‌سازی این ارزیابی‌ها، از اعداد مثلثی فازی $F = (l, m, u)$ استفاده می‌شود که در آن l بیانگر حداقل مقدار برآوردشده، m مقدار محتمل‌تر و u بیشترین برآورد ممکن است. به کارگیری این رویکرد امکان تحلیل دقیق اجماع خبرگان و تعیین میزان اثرگذاری هر عامل بر مدیریت پسماند انسولین را فراهم می‌سازد و به شناسایی عوامل نهایی و قابل اتکا برای مراحل بعدی پژوهش کمک می‌کند.

جدول ۲. مشخصات خبرگان

شماره	مدرک	سابقه کار (سال)	عنوان شغلی	جنسیت
۱	دکتری	۱۲	عضو هیئت علمی مدیریت صنعتی	مرد
۲	دکتری	۱۰	مدیر لجستیک در شرکت پخش دارو	زن
۳	دکتری	۱۵	پژوهشگر سامانه‌های ردیابی و اینترنت اشیا در سلامت	مرد
۴	دکتری	۹	کارشناس سیاست‌گذاری دارویی وزارت بهداشت	زن
۵	دکتری	۱۳	کارشناس سیاست‌گذاری دارویی وزارت بهداشت	مرد
۶	کارشناسی ارشد	۸	مدیر انبار سردخانه دارویی	مرد
۷	کارشناسی ارشد	۱۱	تحلیل‌گر داده و پیش‌بینی تقاضا در شرکت داروسازی	زن
۸	کارشناسی ارشد	۷	متخصص لجستیک حمل‌ونقل سرد	مرد
۹	کارشناسی ارشد	۹	کارشناس ارشد کنترل کیفیت و ثبات دارو	زن
۱۰	کارشناسی ارشد	۶	متخصص مدیریت پسماند در بیمارستان	مرد

۱۱	کارشناسی ارشد	۵	کارشناس فناوری‌های بلاکچین	مرد
۱۲	کارشناسی	۱۴	مسئول فنی داروخانه و زنجیره توزیع	زن
۱۳	کارشناسی	۸	کارشناس عملیات حمل‌ونقل داروی سرد	مرد
۱۴	کارشناسی	۶	کارشناس انبارداری داروهای حساس به دما	مرد
۱۵	کارشناسی	۵	تکنسین تجهیزات سردخانه‌ای	مرد
۱۶	کارشناسی	۷	کارشناس لجستیک مراکز درمانی	زن

جدول ۳. اعداد فازی مثلثی طیف لیکرت ۵ درجه‌ای

عدد فازی			متغیر کلامی
l	m	u	
۰	۰	۰/۲۵	خیلی کم-VL
۰	۰/۲۵	۰/۵	کم-L
۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	متوسط-M
۰/۵	۰/۷۵	۱	زیاد-H
۰/۷۵	۱	۱	خیلی زیاد-VH

می‌دهد کدام عوامل از منظر خبرگان بیشترین نقش را در کاهش ضایعات دارویی، بهبود کنترل دمایی، ارتقای ردیابی دیجیتال و افزایش کارایی عملیات سرد بر عهده دارند. استفاده از این روش موجب می‌شود عدم قطعیت و ابهام موجود در قضاوت انسانی لحاظ شده و ساختاری منسجم برای رتبه‌بندی عوامل فراهم شود. خروجی این گام، مجموعه‌ای اولویت‌بندی‌شده از عوامل کلیدی است که در تحلیل‌های نهایی و ارائه راهکارهای بهبود زنجیره تأمین سرد انسولین به کار گرفته می‌شود.

$$\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) \text{ for } i = 1 \dots n; j = 1 \dots m \quad (۱)$$

$$\tilde{r}_j = (l_j, m_j, u_j) = \left(\min\{l_{ij}\}, \left(\prod_{i=1}^n m_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, \max\{u_{ij}\} \right) \quad (۲)$$

اعداد فازی نوع دوم بازه‌ای، بر پایه منطق فازی نوع یک و نوع دو توسعه یافته‌اند و رویکردی پیشرفته‌تر برای مدل‌سازی عدم قطعیت در مسائل تصمیم‌گیری پیچیده ارائه می‌کنند. این نوع از اعداد فازی به‌ویژه زمانی کاربرد دارند که خود درجه عضویت با ابهام همراه باشد و نتوان آن را به‌طور دقیق تعیین کرد. با این حال، استفاده از مجموعه‌های فازی نوع دوم کامل، به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالا، همواره عملیاتی نیست؛ از این‌رو اعداد فازی نوع دوم بازه‌ای به‌عنوان یک گزینه ساده‌تر و در عین حال کارآمد، پیشنهاد می‌شوند. این رویکرد امکان نمایش

گام ۳. پس از تأیید مجموعه نهایی عوامل مؤثر بر مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد انسولین از طریق فرایند دلفی فازی، این عوامل با بهره‌گیری از روش بهترین-بدترین فازی نوع ۲ بازه‌ای مورد وزن‌دهی و اولویت‌بندی قرار می‌گیرند. در این مرحله، خبرگان با مقایسه زوجی عامل بهترین و عامل بدترین نسبت به سایر عوامل، شدت ترجیحات خود را در قالب مقادیر فازی ارائه می‌کنند. سپس با حل مدل بهینه‌سازی فازی، وزن نسبی هر عامل استخراج می‌شود تا میزان اهمیت آن در مدیریت پسماند انسولین تعیین گردد. مقایسه وزن‌های به‌دست‌آمده نشان

که در این روابط i نمایانگر خبره و n تعداد کل خبرگان، j عوامل و m تعداد کل عوامل، $\tilde{a}$ ارزش فازی هر عامل توسط خبره و $\tilde{r}$ میانگین ارزش فازی هر عامل می‌باشد. با استفاده از رابطه ۳، میانگین فازی عوامل به روش مرکز ثقل، دی‌فازی محاسبه می‌شود:

$$\text{crisp value} = \frac{l+m+u}{3} \quad (۳)$$

اگر مقدار دی‌فازی شده یک معیار از حد آستانه ۰/۷ بیشتر باشد، آن معیار تأیید می‌شود و در غیر این صورت، معیار مورد تأیید خبرگان قرار نمی‌گیرد.

واقع‌گرایانه‌تر قضاوت‌های مبهم خبرگان را فراهم کرده و می‌تواند دقت و قابلیت اتکای نتایج را افزایش دهد (۳۶).

در منطق فازی نوع یک، هر مقدار دارای یک درجه عضویت مشخص و دقیق در بازه [۰،۱] است. اما در

مجموعه‌های فازی نوع دو، به دلیل وجود عدم قطعیت در تابع عضویت، هر مقدار خود یک تابع عضویت ثانویه دارد. این ویژگی امکان مدل‌سازی واقع‌بینانه شرایط مبهم و بهبود تصمیم‌گیری در محیط‌های نامطمئن را فراهم می‌کند. با این حال، پیچیدگی محاسباتی بالای مجموعه‌های کامل نوع دو، استفاده گسترده از آن‌ها را محدود می‌سازد. برای غلبه بر این چالش، اعداد فازی نوع دوم بازه‌ای معرفی شدند؛ در این رویکرد، تابع عضویت ثانویه مقدار ثابتی دارد و برای هر عنصر یک بازه از درجات عضویت تعریف می‌شود. این روش ضمن کاهش چشمگیر بار محاسباتی، هم‌چنان قابلیت نمایش بخش مهمی از ابهام موجود در داده‌ها و قضاوت‌های انسانی را حفظ می‌کند (۳۷).

یکی از مزیت‌های اصلی به‌کارگیری اعداد فازی نوع دوم بازه‌ای، توانایی بیشتر آن‌ها در بازنمایی دقیق عدم قطعیت در مقایسه‌های زوجی و ارزیابی‌های کیفی است. این ویژگی به‌ویژه در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره که

داده‌های زبانی و قضاوت‌های خبرگان نقش محوری دارند، اهمیت می‌یابد. با استفاده از این رویکرد، می‌توان قضاوت‌های انسانی را با دقت بالاتری مدل‌سازی کرد، به‌طوری که نتایج حاصل از تحلیل‌ها قابل‌اعتمادتر و واقع‌گرایانه‌تر خواهد بود (۳۸).

در روش بهترین-بدترین فازی، معمولاً از مقیاس‌های زبانی برای مقایسه معیارهایی استفاده می‌شود که ماهیتاً با عدم قطعیت همراه هستند. به‌کارگیری مجموعه‌های فازی نوع دوم بازه‌ای در چارچوب بهترین-بدترین امکان نمایش دقیق‌تر ابهام موجود در نظرات خبرگان را فراهم می‌کند، به‌ویژه زمانی که تفاوت قابل توجهی میان دیدگاه‌ها وجود داشته باشد. این رویکرد کمک می‌کند قضاوت‌ها با وفاداری بیشتری به واقعیت مدل‌سازی شوند و وزن‌های نهایی از اعتبار بالاتری برخوردار باشند. گام‌های زیر فرآیند ساختاریافته روش بهترین-بدترین مبتنی بر فازی نوع دوم بازه‌ای را نشان می‌دهند (۳۹).

گام ۱. شناسایی معیارهای بهترین و بدترین. در این مرحله، خبرگان از میان مجموعه معیارهای انتخاب‌شده، مهم‌ترین معیار (بهترین) و کم‌اهمیت‌ترین معیار (بدترین) را تعیین می‌کنند تا مبنایی برای مقایسه و ارزیابی‌های بعدی فراهم شود.

جدول ۴. عبارات کلامی استفاده شده در روش بهترین-بدترین فازی نوع ۲ بازه‌ای

	U				L			Centroids	M
EI	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
VI	۱	۱	۱/۷۱۸	۲/۶۱۷	۱	۱	۱/۹۲۷	۵/۳۱۰	۹/۶۴۸
MI	۱/۴۳۰	۲/۳۵۰	۲/۸۰۰	۳/۳۹۷	۲/۵۱۷	۲/۶۹۴	۳/۰۸۳	۲/۲۳۳	۲/۹۲۴
MP	۲/۱۵۱	۳	۳/۸۵۰	۴/۸۱۱	۳/۳۵۵	۳/۵۳۷	۳/۸۲۸	۲/۸۳۸	۴/۱۴۹
SI	۳/۳۱۰	۴/۲۵۰	۵/۰۵۰	۶/۰۱۱	۴/۴۱۴	۴/۸۹۰	۵/۰۲۸	۴/۰۸۶	۵/۲۶۰
SP	۴/۶۸۹	۵/۵۰۰	۶/۲۰۰	۶/۹۴۹	۵/۶۳۸	۵/۸۸۹	۶/۰۶۲	۵/۳۲۰	۶/۳۵۳
VS	۵/۹۶۸	۶/۷۵۰	۷/۱۰۰	۸/۲۳۱	۶/۷۱۷	۶/۸۸۹	۷/۱۰۴	۶/۵۴۸	۷/۴۶۶
VVS	۷/۰۱۳	۷/۶۵۰	۸	۸/۷۰۷	۷/۵۱۷	۷/۸۱۳	۸/۰۸۳	۷/۵۷۸	۸/۰۸۱
EX	۷/۰۲۵	۸/۸۶۲	۹	۹	۸/۸۶۸	۸/۹۹۱	۹	۷/۹۰۹	۸/۹۵۰

بازنمایی شود. خروجی این مرحله دو بردار است: بردار فازی نوع دوم بازه‌ای بهترین-به-دیگران و بردار فازی نوع دوم بازه‌ای دیگران-به-بدترین.

$$\begin{aligned} \tilde{A}_B &= (\tilde{A}_{B1}, \tilde{A}_{B2}, \dots, \tilde{A}_{Bn}) \\ \tilde{A}_W &= (\tilde{A}_{W1}, \tilde{A}_{W2}, \dots, \tilde{A}_{Wn}) \end{aligned} \quad (۴ و ۵)$$

مشخص است که :

$$\tilde{A}_{BB} = \tilde{A}_{WW} = [(1,1,1,1), (1,1,1)]$$

گام ۲. مقایسه‌های زوجی با استفاده از اعداد فازی نوع دوم بازه‌ای. در این مرحله، خبرگان ارزیابی‌های خود را به‌صورت زبانی ارائه می‌کنند تا معیار بهترین در مقایسه با سایر معیارها و نیز تمامی معیارها در مقایسه با بدترین مورد سنجش قرار گیرد. این قضاوت‌ها با بهره‌گیری از اعداد فازی نوع دوم بازه‌ای ثبت می‌شوند تا ابهام و عدم قطعیت موجود در نظرات تخصصی به‌طور دقیق‌تری

یک ترجیح فازی نوع دوم بازه‌ای $\tilde{A}_{jk}$ سازگار است اگر :

$$\tilde{A}_{Best,j} \times \tilde{A}_{jk} = \tilde{A}_{Best,k}, \tilde{A}_{jk} \times \tilde{A}_k, Worst = \tilde{A}_{jW}, j, k \in N$$

نهایی با در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان و بر اساس چارچوب فازی نوع دوم بازه‌ای تعیین شود.

$$\minmax\{|\tilde{w}_B/\tilde{w}_W = \tilde{A}_{Bj}|, |\tilde{w}_j/\tilde{w}_W = \tilde{A}_{jW}\}$$

s.t.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n C(\tilde{w}_j) = 1 \\ w_{j1}^U \leq w_{j1}^L, w_{j2}^L \leq w_{j4}^U \\ w_{j1}^L \leq w_{j1}^U \leq w_{j3}^L \\ w_{j1}^U \leq w_{j2}^U \leq w_{j3}^U \leq w_{j4}^U \\ w_{j1}^U \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

که: $\tilde{w}_j = [(\tilde{w}_{j1}^U, \tilde{w}_{j2}^U, \tilde{w}_{j3}^U, \tilde{w}_{j4}^U), (\tilde{w}_{j1}^L, \tilde{w}_{j2}^L, \tilde{w}_{j3}^L), \tilde{w}_W[(\tilde{w}_{W1}^U, \tilde{w}_{W2}^U, \tilde{w}_B = [(\tilde{w}_{B1}^U, \tilde{w}_{B2}^U, \tilde{w}_{B3}^U, \tilde{w}_{B4}^U), (\tilde{w}_{B1}^L, \tilde{w}_{B2}^L, \tilde{w}_{B3}^L), \tilde{w}_{W3}^U, \tilde{w}_{W4}^U), (\tilde{w}_{W1}^L, \tilde{w}_{W2}^L, \tilde{w}_{W3}^L)], \tilde{A}_{B,j} = [(\tilde{w}_{B,j1}^U, \tilde{w}_{B,j2}^U, \tilde{w}_{B,j3}^U, \tilde{w}_{B,j4}^U), (\tilde{w}_{B,j1}^L, \tilde{w}_{B,j2}^L, \tilde{w}_{B,j3}^L), \tilde{A}_{j,W}[(\tilde{w}_{j,W1}^U, \tilde{w}_{j,W2}^U, \tilde{w}_{j,W3}^U, \tilde{w}_{j,W4}^U), (\tilde{w}_{j,W1}^L, \tilde{w}_{j,W2}^L, \tilde{w}_{j,W3}^L)]]$

به منظور حل مدل با فرض اینکه بیشینه این شکاف‌ها باید $\delta^* = [(\delta^*, \delta^*, \delta^*, \delta^*), (\delta^*, \delta^*, \delta^*)]$ می‌توان مدل را به صورت زیر بازنویسی و تبدیل کرد.

s.t.

$$\begin{cases} |w_{B1}^U - w_{j1}^U w_{Bj,1}^U| \leq \delta, |w_{B2}^U - w_{j2}^U w_{Bj,2}^U| \leq \delta, |w_{B3}^U - w_{j3}^U w_{Bj,3}^U| \leq \delta, \\ |w_{B4}^U - w_{j4}^U w_{Bj,4}^U| \leq \delta, |w_{B1}^L - w_{j1}^L w_{Bj,1}^L| \leq \delta, |w_{B2}^L - w_{j2}^L w_{Bj,2}^L| \leq \delta, \\ |w_{j3}^U - w_{W3}^U w_{jW,3}^U| \leq \delta, |w_{j4}^U - w_{W4}^U w_{jW,4}^U| \leq \delta, |w_{j1}^L - w_{W1}^L w_{jW,1}^L| \leq \delta, \\ |w_{j2}^L - w_{W2}^L w_{jW,2}^L| \leq \delta, |w_{j3}^L - w_{W3}^L w_{jW,3}^L| \leq \delta, \sum_{j=1}^n C(\tilde{w}_j) = 1, \\ w_{j1}^U \leq w_{j1}^L, w_{j2}^L \leq w_{j4}^U, w_{j1}^U \leq w_{j2}^U \leq w_{j3}^U \leq w_{j4}^U, w_{j1}^U \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

گردد. این مرحله وزن‌های نهایی را برای تفسیر مدیریتی و مقایسه بین معیارها آماده می‌کند.

گام ۶. بررسی سازگاری قضاوت‌ها. در پایان، میزان سازگاری قضاوت‌های خبرگان ارزیابی می‌شود تا از اعتبار و قابلیت اتکای وزن‌های به دست آمده اطمینان حاصل شود. شاخص سازگاری میزان انحراف احتمالی در مقایسه‌ها را بررسی کرده و نشان می‌دهد تا چه حد وزن‌های نهایی با ساختار ترجیحات خبرگان هماهنگ هستند.

تعریف ترجیحات سازگار فازی نوع دوم بازه‌ای به صورت زیر بیان می‌شود:

گام ۳. ساخت مدل. در این مرحله، مقایسه‌های فازی به دست آمده مبنای تشکیل مجموعه‌ای از معادلات بهینه‌سازی قرار می‌گیرند تا بردار وزن‌های بهینه برای معیارها استخراج شود. این فرایند امکان می‌دهد وزن‌دهی

برای جلوگیری از به دست آمدن چندین راه‌حل بهینه در مدل، می‌توان مقدار بیشترین شکاف مطلق میان $\left| \frac{w_j^U}{w_W} \times \tilde{A}_{jW} \right|$ و $\left| \frac{w_B^U}{w_j} \times \tilde{A}_{Bj} \right|$ را حداقل کرد.

گام ۴. حل مدل بهینه‌سازی. در این مرحله، تابع هدف به گونه‌ای تعریف می‌شود که بیشترین میزان انحراف میان مقایسه‌های زوجی فازی و وزن‌های محاسبه شده را حداقل کند. این کار باعث می‌شود وزن‌ها با قضاوت‌های خبرگان بیشترین سازگاری را داشته باشند و ساختار ترجیحات آن‌ها به طور هماهنگ بازتاب یابد.

گام ۵. دی‌فازی‌سازی و نرمال‌سازی وزن‌ها. پس از به دست آوردن وزن‌های فازی نوع دوم بازه‌ای، این وزن‌ها دی‌فازی‌سازی و سپس نرمال‌سازی می‌شوند تا مقادیر قطعی و قابل استفاده برای تحلیل و تصمیم‌گیری فراهم

$$CR = \frac{\delta^*}{ci} \quad (V)$$

به منظور ثبت دقیق تر عدم قطعیت های زبانی و کاهش خطای قضاوت های انسانی، از روش بهترین-بدترین فازی نوع ۲ بازه ای استفاده شد.

ابتدا، این خبرگان با تعیین معیار بهترین و بدترین در هر بعد، مقایسه های زوجی را به صورت اعداد فازی نوع ۲ بازه ای ارائه کردند تا دامنه ای از قضاوت ها (به جای یک مقدار قطعی) در مدل لحاظ شود. برای هر یک از ابعاد اصلی و زیرمعیارهای مرتبط با مدیریت پسماند انسولین، ۱۲ مدل ریاضی تدوین و در محیط لینگو ۲۱۸،۰ حل شد تا وزن های بهینه فازی نوع ۲ بازه ای استخراج شود. در ادامه، به منظور دستیابی به یک مجموعه وزن واحد و کاهش پراکندگی احتمالی میان قضاوت ها، وزن های حاصل از سه خبره با استفاده از میانگین هندسی تجمیع شد. این فرآیند موجب افزایش سازگاری، پایداری و دقت نهایی وزن ها گردید و مجموعه وزن های نهایی را برای تحلیل اهمیت عوامل فنی و فناورانه، مدیریتی و لجستیکی در کاهش پسماند انسولین فراهم ساخت (جدول ۷).

بحث

با توجه به ماهیت زنجیره تأمین سرد انسولین، بیشترین وزن به بعد فنی و فناورانه اختصاص یافته است، زیرا انسولین یکی از حساس ترین داروها نسبت به تغییرات دمایی است و کوچک ترین انحراف از محدوده استاندارد می تواند منجر به فساد کامل، کاهش اثربخشی و تولید پسماند غیر قابل بازگشت شود. بنابراین عواملی مانند پایش و کنترل محیطی، فناوری های ردیابی و بلاکچین (۴۴)، بسته بندی حرارتی و جلوگیری از شکست تجهیزات، مستقیماً کیفیت محصول را تعیین می کنند و نقش آن ها در کاهش پسماند کاملاً حیاتی است. به همین دلیل، خبرگان بیشترین اهمیت را به این بعد داده اند، چون ریشه اصلی هدررفت انسولین در ایران و جهان، خطاهای فنی و ضعف زیرساخت های نظارت دمایی است. پس از آن، بعد لجستیکی در جایگاه دوم قرار گرفته است، زیرا حمل و نقل سرد، انبارداری مناسب و جلوگیری از

مقدار شاخص سازگاری^۱ در بازه ۰ تا ۱ قرار می گیرد؛ به طوری که هرچه مقدار آن به صفر نزدیک تر باشد، میزان سازگاری در قضاوت های خبرگان بالاتر است و هرچه به عدد یک نزدیک شود، بیانگر کاهش سازگاری و افزایش ناهمخوانی در مقایسه ها خواهد بود (۴۰).

یافته ها

پس از شناسایی مجموعه اولیه عوامل مؤثر بر مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد انسولین بر اساس مرور نظام مند ادبیات (جدول ۱)، یک پرسشنامه دلفی فازی طراحی و در اختیار خبرگان قرار گرفت تا میزان اهمیت و ضرورت هر عامل ارزیابی شود. در روش دلفی فازی، حضور دست کم پنج خبره ضروری است و معمولاً مشارکت بین ۵ تا ۲۰ نفر برای دستیابی به اجماع قابل قبول کفایت دارد (۴۱). در این پژوهش، پرسشنامه در میان ۱۶ نفر از خبرگان حوزه های لجستیک سرد، داروسازی، مدیریت زنجیره تأمین و فناوری های ردیابی که همگی بیش از پنج سال سابقه فعالیت مرتبط داشتند، توزیع شد.

فرآیند دلفی فازی طی دو مرحله اجرا گردید و از آن جاکه اختلاف مقادیر دی فازی نظرات کمتر از ۰/۱ بود، روند تکرار متوقف شد که این امر نشان دهنده همگرایی و اجماع خبرگان است (۴۲، ۴۳). از میان ۱۳ عامل اولیه شناسایی شده، پس از اعمال آستانه ۰/۷، ۱۲ عامل مورد تأیید قرار گرفت و تنها عامل عدم قطعیت های محیطی و خارجی به دلیل همپوشانی مفهومی و قابلیت کنترل پذیری پایین، حذف شد. بدین ترتیب، عوامل فنی و فناورانه، مدیریتی و لجستیکی تأیید شده به عنوان معیارهای نهایی برای ارزیابی و اولویت بندی مؤثرترین شاخص ها در مدیریت پسماند انسولین معرفی شدند. به منظور تعیین وزن نسبی ۱۲ عامل تأیید شده در مرحله دلفی فازی، از میان ۱۶ خبره مشارکت کننده، سه نفر از متخصصان آشنا با روش های تصمیم گیری چندمعیاره، منطق فازی و تحلیل زنجیره تأمین سرد (خبره های شماره ۱ تا ۳) برای اجرای مرحله وزن دهی انتخاب شدند. در این مرحله،

² LINGO 18.0

¹ Consistency Ratio (CR)

محصول جلوگیری کنند. بنابراین وزن پایین‌تر این بعد کاملاً منطقی و مطابق با ماهیت زنجیره سرد، شواهد تجربی و الگوی واقعی هدررفت انسولین است.

تأخیرهای توزیع، حلقه‌های عملیاتی کلیدی هستند که مشکلات آن‌ها به سرعت باعث انحراف دما، شکست سرد زنجیره و فساد دارو می‌شود. این بعد اثرگذاری بالایی دارد، اما در مقایسه با فناوری‌های پایش و کنترل، بیشتر نقش عملیاتی دارد. کمترین وزن به بعد مدیریتی اختصاص یافته است، زیرا گرچه آموزش، قوانین، بازیافت و مدیریت هزینه و موجودی برای مدیریت پسماند ضروری هستند، اما تأثیر آن‌ها عمدتاً غیرمستقیم بوده و بدون کارکرد صحیح ابعاد فنی و لجستیکی نمی‌توانند از فساد

جدول ۵. شاخص سازگاری برای روش بهترین-بدترین فازی بازه‌ای نوع ۲

LTs	EI	WI	MI	MP	SI	SP	VS	WS	EX
Centroids	۱	۱/۷۷۵	۳/۳۵۵	۴/۳۴۰	۵/۷۱۸	۶/۵۴۹	۷/۳۹۰	۸/۳۴۷	۸/۴۳۰
CI	۰	۰/۱۸۸	۰/۷۵۳	۱/۳۰۳	۲/۰۷۵	۲/۸۸۴	۳/۷۳۰	۴/۳۴۱	۴/۷۹۳

جدول ۶. نتایج دلفی فازی

نماد	وضعیت پذیرش	مقدار قطعی	l	m	u	عامل	بعد اصلی
C11	تأیید شده	۰/۷۵۸	۰/۲۵	۰/۸۹۱	۱	پایش و کنترل محیطی (دما و رطوبت)	فنی و فناوریانه
C12	تأیید شده	۰/۸۲۴	۰/۵	۰/۸۹۸	۱	فناوری‌های ردیابی	C1
C13	تأیید شده	۰/۷۲۱	۰/۲۵	۰/۸۱۷	۱	مسائل فنی و شکست تجهیزات	
C14	تأیید شده	۰/۷۰۴	۰/۲۵	۰/۷۸۳	۱	بسته‌بندی پیشرفته و پایدار	
C21	تأیید شده	۰/۷۱۷	۰/۲۵	۰/۸۰۹	۱	پیش‌بینی تقاضا و مدیریت موجودی	مدیریتی
C22	تأیید شده	۰/۷۵۵	۰/۲۵	۰/۸۸۵	۱	مدیریت بازگشت و بازیافت دارو	C2
C23	تأیید شده	۰/۷۴۷	۰/۲۵	۰/۸۶۹	۱	آموزش و آگاهی‌بخشی به ذینفعان	
C24	تأیید شده	۰/۷۱۴	۰/۲۵	۰/۸۰۳	۱	استانداردهای قانونی و نظارتی	
C25	تأیید شده	۰/۷۴۲	۰/۲۵	۰/۸۶۰	۱	بهینه‌سازی هزینه‌ها و پایداری اقتصادی	
-	رد شده	۰/۶۵۰	۰/۲۵	۰/۶۷۵	۱	عدم قطعیت‌های محیطی و خارجی	
C31	تأیید شده	۰/۷۶۳	۰/۲۵	۰/۹۰۱	۱	زیرساخت‌های حمل‌ونقل	لجستیکی
C32	تأیید شده	۰/۸۳۲	۰/۵	۰/۹۱۴	۱	مدیریت انبارداری و ذخیره‌سازی	C3
C32	تأیید شده	۰/۷۸۳	۰/۲۵	۰/۹۴۱	۱	تأخیرهای تحویل و توزیع	

شفافیت، رهگیری و ثبت نقاط بحرانی، کنترل‌پذیری زنجیره سرد را افزایش می‌دهند و بنابراین اثری مکمل و غیر مستقیم دارند. در نهایت، بسته‌بندی پیشرفته و پایدار کمترین وزن را به‌دست آورده، زیرا نقش آن بیشتر حمایتی و کوتاه‌مدت است و نمی‌تواند جایگزین تجهیزات یا پایش دمایی شود؛ علاوه بر آن، جنبه‌های زیست‌محیطی آن نسبت به تأثیر مستقیم بر جلوگیری از فساد انسولین برجسته‌تر است.

نتایج وزن‌دهی نشان می‌دهد که در بعد مدیریتی، بهینه‌سازی هزینه‌ها و پایداری اقتصادی با فاصله قابل توجه صدرنشین است. این یافته با شرایط خاص زنجیره تأمین انسولین در ایران هم‌خوانی دارد؛ جایی که

نتایج نشان می‌دهد که پایش و کنترل محیطی مهم‌ترین عامل فنی و فناوریانه در مدیریت پسماند انسولین است، زیرا انسولین به نوسانات دمایی بسیار حساس بوده و حتی چند دقیقه خروج از محدوده دمایی مشخص می‌تواند آن را کاملاً فاسد کند؛ موضوعی که طبق شواهد ادبیات پژوهش، علت بیش از نیمی از ضایعات داروهای سرد است. پس از آن، مسائل فنی و شکست تجهیزات قرار دارد که نقش زیربنایی در حفظ پایداری دمایی دارند، چون خرابی سردخانه‌ها، کمپرسورها یا یخچال‌ها علت ریشه‌ای بسیاری از انحراف‌های دمایی محسوب می‌شود. فناوری‌های ردیابی مانند بلاکچین و اینترنت اشیا اگرچه مستقیماً از فساد جلوگیری نمی‌کنند، اما با ایجاد

هزینه‌های بالای واردات، نگهداری و حمل سرد دارو، فشار شدیدی بر نظام سلامت وارد کرده و هرگونه راهکار مدیریتی که بتواند بهره‌وری منابع و کاهش اتلاف مالی را تضمین کند، تأثیر مستقیم بر پایداری کل زنجیره خواهد داشت. پس از آن، استانداردهای قانونی و نظارتی به‌عنوان دومین عامل مهم، نقش کلیدی در شکل‌دهی رفتار سازمانی و الزام به رعایت شرایط نگهداری و حمل مطابق پروتکل‌ها دارد؛ امری که می‌تواند ریسک فساد و هدررفت انسولین را به‌شدت کاهش دهد. مدیریت بازگشت و بازیافت دارو نیز سهم قابل‌توجهی دارد، زیرا ایجاد سازوکارهای مؤثر برای جمع‌آوری و دفع ایمن

انسولین‌های تاریخ‌گذشته یا بلااستفاده، بخشی از هدررفت پس از مصرف را مهار می‌کند. آموزش و آگاهی‌بخشی به ذینفعان در رتبه چهارم قرار گرفته است و با تأثیرگذاری بر رفتار بیماران، داروسازان و کارکنان، یک اقدام مکمل برای کاهش خطاهای انسانی محسوب می‌شود. در نهایت، پیش‌بینی تقاضا و مدیریت موجودی کمترین وزن را دارد که نشان می‌دهد در این مطالعه، خبرگان بیش‌ازهمه بر مسائل اقتصادی و الزامات قانونی تأکید کرده‌اند و چالش‌های فنی و عملیاتی پیش‌بینی تقاضا، در مقایسه با سایر عوامل، اثر مستقیم کمتری بر جلوگیری از پسماند در زنجیره سرد انسولین دارد.

جدول ۷. وزن نهایی عوامل

اولویت	وزن نهایی	وزن محلی	نماد	عامل	وزن	بعد اصلی
۱	۰/۲۶۱	۰/۴۶۰	C11	پایش و کنترل محیطی (دما و رطوبت)	۰/۵۶۸	فنی و فناوریانه C1
۵	۰/۰۹۱	۰/۱۶۰	C12	فناوری‌های ردیابی		
۲	۰/۱۶۴	۰/۲۸۹	C13	مسائل فنی و شکست تجهیزات		
۸	۰/۰۵۱	۰/۰۹۱	C14	بسته‌بندی پیشرفته و پایدار		
۱۲	۰/۰۰۸	۰/۰۵۳	C21	پیش‌بینی تقاضا و مدیریت موجودی	۰/۱۴۵	مدیریتی C2
۱۰	۰/۰۲۵	۰/۱۷۴	C22	مدیریت بازگشت و بازیافت دارو		
۱۱	۰/۰۱۸	۰/۱۲۳	C23	آموزش و آگاهی‌بخشی به ذینفعان		
۹	۰/۰۳۹	۰/۲۶۸	C24	استانداردهای قانونی و نظارتی		
۶	۰/۰۵۵	۰/۳۸۳	C25	بهینه‌سازی هزینه‌ها و پایداری اقتصادی	۰/۲۸۷	لجستیکی C3
۳	۰/۱۴۱	۰/۴۹۲	C31	زیرساخت‌های حمل‌ونقل		
۴	۰/۰۹۱	۰/۳۱۸	C32	مدیریت انبارداری و ذخیره‌سازی		
۷	۰/۰۵۵	۰/۱۹۰	C33	تأخیرهای تحویل و توزیع		

نتایج وزن‌دهی عوامل لجستیکی نشان می‌دهد که زیرساخت‌های حمل‌ونقل بیشترین اهمیت را در مدیریت پسماند زنجیره سرد انسولین دارد. این یافته کاملاً با ماهیت فساد دمایی انسولین هم‌راستا است؛ زیرا بخش عمده انحرافات دمایی و فساد دارو در مرحله حمل‌ونقل رخ می‌دهد، جایی که ضعف در ناوگان سرد، نبود سنسورهای بلادرنگ و ناتوانی در کنترل شرایط محیطی می‌تواند کیفیت محصول را در مدت‌زمان کوتاهی از بین ببرد. پس از آن، مدیریت انبارداری و ذخیره‌سازی در رتبه دوم قرار می‌گیرد؛ زیرا هرچند انبارها نسبت به حمل‌ونقل محیط‌های کنترل‌پذیرتری هستند، اما مشکلاتی مانند نبود سیستم‌های پایش مستمر، خطاهای انسانی، یا قطعی برق می‌تواند به فساد گروهی داروها منجر شود و سهم قابل‌توجهی در تولید پسماند ایجاد کند. در نهایت، تأخیرهای تحویل و توزیع کمترین وزن را دارد؛ با این‌که

تأخیر می‌تواند در زنجیره سرد بسیار خطرناک باشد، اما از نگاه خبرگان و با توجه به ادبیات پژوهش، این عامل اغلب یک پیامد ثانویه ناشی از مشکلات زیرساختی و انبارداری است و اثر آن به‌صورت غیر مستقیم بر فساد دارویی ظاهر می‌شود. این الگوی وزنی نشان می‌دهد که تمرکز اصلی برای کاهش پسماند باید بر تقویت ناوگان حمل‌ونقل سرد، ایجاد شفافیت دمایی در مسیر و کاهش ریسک‌های لحظه‌ای حمل باشد، درحالی‌که بهبود انبارداری و کاهش تأخیرها می‌تواند نقش تکمیلی در افزایش پایداری زنجیره سرد انسولین ایفا کند.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که شهرآبادی و همکاران (۲۵) نقش عدم قطعیت و زمان ماندگاری را در افزایش فساد دارو نشان داده‌اند و بر مدیریت یکپارچه حمل و ذخیره‌سازی تأکید کرده‌اند؛ یافته‌ای که با نتایج

در مطالعات مگان و همکاران (۳۱) و دبرا و همکاران (۳۲) که بر ضعف در جداسازی پسماند، آموزش و زیرساخت‌های سیاستی تأکید دارند، تمرکز پژوهش بیشتر بر رفتار انسانی، آموزش و مقررات بوده است. اما نتایج پژوهش ما نشان می‌دهد که این عوامل در زنجیره سرد انسولین وزن بسیار پایین‌تری دارند؛ به‌گونه‌ای که آموزش و آگاهی‌بخشی تنها و استانداردهای قانونی و نظارتی وزن اندکی گرفته‌اند. این تفاوت ریشه در ماهیت داروی انسولین دارد که فساد آن عمدتاً فنی-محیطی و وابسته به تجهیزات سرد است، نه رفتاری یا ساختاری. هم‌چنین یافته‌های چاهان و همکاران (۳۳) در خصوص اهمیت اتصال دیجیتال و بازخورددهی هوشمند، بخشی از اهمیت فناوری‌های نظارتی را تأیید می‌کند، اما نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم‌های دیجیتال در زنجیره سرد زمانی مؤثر هستند که زیرساخت‌های کنترل دما و تجهیزات فنی قابل اعتماد باشند.

با توجه به رتبه‌بندی نهایی عوامل، که نشان می‌دهد پایش و کنترل محیطی (دما و رطوبت)، مسائل فنی و شکست تجهیزات و زیرساخت‌های حمل‌ونقل در صدر اهمیت قرار دارند، نخستین اولویت مدیریتی باید سرمایه‌گذاری هدفمند در زیرساخت‌های فنی و لجستیکی باشد. انسولین دارویی با حساسیت حرارتی بسیار بالا است و کوچک‌ترین انحراف دمایی می‌تواند آن را غیر قابل مصرف کند؛ بنابراین سیاست‌گذاران باید به‌سرعت به سمت توسعه سیستم‌های پایش بلادرنگ، نصب سنسورهای دما و رطوبت در تمامی نقاط زنجیره و یکپارچه‌سازی داشبوردهای کنترلی حرکت کنند. علاوه بر این، با توجه به رتبه بالای مسائل فنی و شکست تجهیزات، ایجاد برنامه‌های منظم نگهداری پیشگیرانه، تدوین استانداردهای سخت‌گیرانه برای تجهیزات سرد و تخصیص بودجه کافی برای نوسازی سیستم‌های سرمایشی باید در اولویت قرار گیرد. تقویت ناوگان حمل‌ونقل سرد و الزام شرکت‌های پخش به رعایت پروتکل‌های حمل با کنترل دمای مداوم نیز یک سیاست کلیدی است که مستقیماً از اهمیت بالای عوامل لجستیکی ناشی می‌شود. این اقدامات می‌توانند ریسک فساد دارو را در مراحل حیاتی حمل و نگهداری به‌طور چشمگیری کاهش دهند.

پژوهش حاضر در اهمیت بالای پایش و کنترل محیطی و مسائل فنی و شکست تجهیزات همسو است، زیرا هر دو حوزه به پایداری شرایط دمایی و جلوگیری از فساد ناشی از تجهیزات ناکارآمد اشاره دارند. با این حال، تفاوت مهم این است که پژوهش ما از منظر پسماند و روش تصمیم‌گیری فازی عوامل را اولویت‌بندی کرده، در حالی که مطالعاتی مانند مدل کوچک‌کاشانی و همکاران (۲۶) و مدل شهرآبادی بیشتر ساختار شبکه‌ای و هزینه‌ای زنجیره را تحلیل می‌کنند و کمتر وارد رتبه‌بندی عوامل کیفی مؤثر می‌شوند. هم‌چنین مطالعه گودرزیان و همکاران (۲۷) با تأکید بر ظرفیت ناوگان حمل‌ونقل، نقش زیرساخت‌های حمل را برجسته می‌کند؛ نکته‌ای که در پژوهش ما نیز با وزن قابل توجه زیرساخت‌های حمل‌ونقل تأیید می‌شود، اما نتایج ما نشان می‌دهد که مسائل محیطی و فنی پیش از لجستیک در تعیین پسماند اهمیت بالاتری دارند.

از منظر زیست‌محیطی، پژوهش باباگل‌زاده و همکاران (۲۸) تأثیر سیاست‌های کربنی، ناوگان ناهمگن و تقاضای نامطمئن را بر هزینه و انتشار بررسی کرده است؛ درحالی‌که پژوهش حاضر علی‌رغم اشاره به جنبه اقتصادی، بهینه‌سازی هزینه‌ها و پایداری اقتصادی را تنها با وزن ۰/۰۵۵ در رتبه‌های پایین قرار می‌دهد. این تفاوت نشان می‌دهد که در زنجیره سرد انسولین، برخلاف مدل‌های زیست‌محیطی، جلوگیری از فساد ناشی از شرایط دمایی بسیار مهم‌تر از سیاست‌های اقتصادی یا هزینه‌ای است. مطالعه سازوار و همکاران (۲۹) نیز که بر طبقه‌بندی و مدیریت حلقه‌بسته پسماند دارویی تمرکز دارد با یافته حاضر درباره نقش نسبتاً پایین مدیریت بازگشت و بازیافت هم‌سو است، زیرا نشان می‌دهد پسماند در زنجیره سرد بیشتر در مراحل قبل از مصرف و در اثر فساد فنی رخ می‌دهد، نه در مرحله بازیافت. واسیم احمد و همکاران (۳۰) کاربرد بلاک‌چین را در ردیابی پسماند تجهیزات پزشکی نشان داده‌اند، مشابه یافته ما درباره اهمیت متوسط فناوری‌های ردیابی که نشان می‌دهد اگرچه فناوری برای شفافیت ضروری است، اما اولویت آن پس از کنترل دما و کارایی تجهیزات قرار می‌گیرد.

در سطح منطقه‌ای یا بین‌المللی استفاده کرده، روش‌های کمی مبتنی بر داده‌های عملیاتی و حسگرهای واقعی را برای اعتبارسنجی نتایج به کار گیرند، و اثر متغیرهای محیطی، فنی و اقتصادی را در سناریوهای متفاوت بررسی کنند تا راهبردهای حاصل، جامع‌تر و مقاوم‌تر در برابر شرایط متغیر باشند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر بر مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد انسولین در ایران با مرور ادبیات و بهره‌گیری از نظرات خبرگان تخصصی در حوزه‌های لجستیک سرد، داروسازی و مدیریت زنجیره تأمین شناسایی شد. پس از غربالگری اولیه به کمک روش دلفی فازی، مجموعه‌ای از معیارهای کلیدی با اجماع خبرگان تأیید گردید. در مرحله بعد، سه نفر از خبره‌ترین افراد حاضر در تیم مطالعه، که تخصص ویژه در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره داشتند، با بهره‌گیری از روش بهترین-بدترین فازی نوع دوم، وزن‌دهی دقیق و علمی به این عوامل را انجام دادند.

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت پسماند در زنجیره تأمین سرد انسولین بیش از هر چیز تحت تأثیر عوامل فنی و فناورانه و سپس عوامل لجستیکی قرار دارد. در این میان، پایش و کنترل محیطی، مسائل فنی و شکست تجهیزات و زیرساخت‌های حمل‌ونقل سرد، مهم‌ترین عوامل مؤثر شناخته شدند. بر این اساس، کاهش پسماند انسولین مستلزم تقویت سامانه‌های پایش مستمر دما، اجرای نگهداری پیشگیرانه تجهیزات، توسعه ناوگان حمل‌ونقل سرد و بهبود مدیریت انبارداری است. همچنین، اقدامات مدیریتی، آموزشی و نظارتی باید به‌عنوان مکمل زیرساخت‌های فنی و لجستیکی مورد توجه قرار گیرند تا امکان کاهش ضایعات، حفظ کیفیت دارو و افزایش پایداری زنجیره تأمین انسولین فراهم شود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از تمامی خبرگان و متخصصانی که با اختصاص وقت و ارائه دیدگاه‌های تخصصی خود در مراحل اجرای دلفی فازی و اولویت‌بندی عوامل با پژوهشگران همکاری کردند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنند.

در لایه دوم مدیریت، که شامل مدیریت انبارداری و ذخیره‌سازی، فناوری‌های ردیابی، بهینه‌سازی هزینه‌ها و پایداری اقتصادی، تأخیرهای تحویل و توزیع و بسته‌بندی پیشرفته و پایدار می‌شود، سیاست‌ها باید بر بهبود سیستم‌های پشتیبان و یکپارچه‌سازی داده‌ها متمرکز باشد. اهمیت متوسط این عوامل نشان می‌دهد که اگرچه نقش آن‌ها در کاهش پسماند انسولین غیر قابل انکار است، اما اثرگذاری آن‌ها زمانی حداکثر می‌شود که

زیرساخت فنی و حمل‌ونقل تثبیت شده باشد. از این منظر، توسعه سیستم‌های ردیابی مبتنی بر اینترنت اشیا و بلاکچین برای ایجاد شفافیت کامل در مسیر دارو، آموزش کارکنان برای رعایت اصول انبارداری، و طراحی بسته‌بندی‌های حرارتی پایدار می‌تواند تکمیل‌کننده اقدامات کلیدی در زنجیره سرد باشد. همچنین، با توجه به نقش بهینه‌سازی هزینه‌ها لازم است سیاست‌های حمایتی برای کاهش هزینه‌های فناوری، مدل‌های تشویقی برای شرکت‌های پخش و داروخانه‌ها، و ابزارهای اقتصادی برای مدیریت کارآمد موجودی تدوین شود. کاهش تأخیر در تحویل و توزیع نیز باید از طریق ایجاد شبکه‌های توزیع هوشمند و الگوریتم‌های زمان‌بندی بهبود یابد. این مجموعه سیاست‌ها بر پایه رتبه‌بندی عوامل، یک نقشه راه کاربردی برای کاهش پسماند انسولین و افزایش کارایی زنجیره سرد کشور ارائه می‌کند.

محدودیت‌های مطالعه: این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه است که باید مورد توجه قرار گیرد. نخست، یافته‌ها بر پایه نظرات ۱۶ خبره در حوزه‌های لجستیک سرد، داروسازی و سیاست‌گذاری دارویی شکل گرفته و هرچند ترکیب متنوعی از تخصص‌ها را دربرمی‌گیرد، اما حجم نمونه نسبتاً محدود ممکن است موجب کاهش تعمیم‌پذیری نتایج در سطح ملی یا بین‌المللی شود. دوم، تمرکز مطالعه بر بستر ایران و شرایط خاص زیرساختی، اقتصادی و قانونی آن بوده و احتمال دارد در محیط‌های دیگر با ساختار زنجیره سرد متفاوت، نتایج تغییر یابد. سوم، استفاده از روش بهترین-بدترین فازی بازه‌ای نوع ۲ با وجود دقت بالای وزن‌دهی، نیازمند داده‌های قضاوتی خبرگان است که ممکن است تحت تأثیر سوگیری ذهنی یا تجربه شخصی قرار گیرد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی از نمونه‌های بزرگ‌تر و متنوع‌تر

داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. مشارکت خبرگان در مطالعه داوطلبانه بود و پیش از تکمیل پرسشنامه‌ها، هدف پژوهش و نحوه استفاده از اطلاعات برای آنان تشریح شد.

سهم نویسندگان: همه نویسندگان از سهم برابر در تنظیم و تدوین مقاله برخوردار هستند.

References

1. Aditjandra P, Hussain I, Utomo D, Gripton A, Greening P. Cold chain for sustainable infrastructure planning. *Transportation Research Procedia*. 2025; 82:481–94.
2. Iyer P, Robb D. Cold chain optimisation models: A systematic literature review. *Comput Ind Eng*. 2025;110972.
3. Asim Z, Sorooshian S, Al Shamsi IR, Muniyanayaka D, Al Azzani A. Supply chain 4.0 a source of sustainable initiative across food supply chain: trends and barriers. In: *Human perspectives of industry 40 organizations*. CRC Press; 2025. p. 17–37.
4. Bouazzi IR, Zaidi MM, Shati R, Bedywi L, Alahmari S, Al Qahtani R, et al. Medication cold chain improvement by using IoT-based smart tracking: a case study in KSA. *Engineering Research Express*. 2025;7(1):015266.
5. Heinemann L, Braune K, Carter A, Zayani A, Krämer LA. Insulin storage: a critical reappraisal. *J Diabetes Sci Technol*. 2021;15(1):147–59.
6. Maikawa CL, Mann JL, Kannan A, Meis CM, Grosskopf AK, Ou BS, et al. Engineering insulin cold chain resilience to improve global access. *Biomacromolecules*. 2021;22(8):3386–95.
7. Naderi A, Benis KZ, Dowlati M, Seyedin H, Behnami A, Farzadkia M.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافی در ارتباط با انجام و انتشار این پژوهش وجود ندارد.

حمایت مالی: این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی از هیچ سازمان دولتی، خصوصی یا غیر انتفاعی انجام شده است.

ملاحظات اخلاقی: نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و

Identifying methods and challenges of waste management in natural disasters. *J Environ Manage*. 2025; 373:123514.

8. Hosseini-Motlagh SM, Jazinaninejad M, Nami N. Coordinating a socially concerned reverse supply chain for pharmaceutical waste management considering government role. *Environ Dev Sustain*. 2022;1–26.

9. Mostafanejad R, Ghassab-Abdollahi N, Derakhshani N, Rezapour R. Medication waste and disposal behaviors among Iranian households: A Cross-sectional study. *Sci Rep*. 2025;15(1):15714.

10. Heinemann L, Klonoff DC. Diabetes technology and waste: a complex story. *J Diabetes Sci Technol*. 2022;16(6):1381–4.

11. Haji M, Kerbache L, Sheriff KMM, Al-Ansari T. Critical success factors and traceability technologies for establishing a safe pharmaceutical supply chain. *Methods Protoc*. 2021;4(4):85.

12. Zeng W, Wang Y, Liang K, Li J, Niu X. Advancing Emergency Supplies Management: A Blockchain-Based Traceability System for Cold-Chain Medicine Logistics. *Adv Theory Simul*. 2024;7(4):2300704.

13. Khan AU, Ali Y. Sustainable supplier selection for the cold supply chain

(CSC) in the context of a developing country. *Environ Dev Sustain*. 2021;1–30.

14. Arowosegbe OB, Ballali C, Kofi KR, Adeshina MK, Agbelusi J, Adeshina MA. Combating food waste in the agricultural supply chain: A systematic review of supply chain optimization strategies and their sustainability benefits. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024;24(01):122–40.

15. Alshdadi A, Kamel S, Alsolami E, Lytras MD, Boubaker S. An Iot smart system for cold supply chain storage and transportation management. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2024;14(2):13167–72.

16. Nha Trang NT, Nguyen TT, Pham H V, Anh Cao TT, Trinh Thi TH, Shahreki J. Impacts of collaborative partnership on the performance of cold supply chains of agriculture and foods: literature review. *Sustainability*. 2022;14(11):6462.

17. Bamakan SMH, Moghaddam SG, Manshadi SD. Blockchain-enabled pharmaceutical cold chain: Applications, key challenges, and future trends. *J Clean Prod*. 2021; 302:127021.

Fahrni ML, Ismail IAN, Refi DM, Almaman A, Yaakob NC, Saman KM, et al. Management of COVID-19 vaccines cold chain logistics: a scoping review. *J Pharm Policy Pract*. 2022;15(1):16.

18. Costa F, Lago A, Rocha V, Barros O, Costa L, Vipotnik Z, et al. A review on biological processes for pharmaceuticals wastes abatement—a growing threat to modern society. *Environ Sci Technol*. 2019;53(13):7185–202.

19. Dar MA, Maqbool M, Rasool S. Pharmaceutical wastes and their disposal practice in routine. *Int J Inf Comput Sci*. 2019; 6:76–92.

20. Rogowska J, Zimmermann A, Muszyńska A, Ratajczyk W, Wolska L. Pharmaceutical household waste practices: preliminary findings from a case study in Poland. *Environ Manage*. 2019; 64:97–106.

21. Hui TKL, Mohammed B, Donyai P, McCrindle R, Sherratt RS. Enhancing pharmaceutical packaging through a technology ecosystem to facilitate the reuse of medicines and reduce medicinal waste. *Pharmacy*. 2020;8(2):58.

22. Arden NS, Fisher AC, Tyner K, Lawrence XY, Lee SL, Kopcha M. Industry 4.0 for pharmaceutical manufacturing: Preparing for the smart factories of the future. *Int J Pharm*. 2021; 602:120554.

23. Shahrabadi F, Kia H, Heidari A, Khalilzadeh M. A Fuzzy Bi-objective Mathematical Model for Perishable Medical Goods Supply Chain Network Considering Crisis Situations: An Empirical Study. *Health Serv Insights*. 2024; 17:11786329241288772.

24. Kochakkashani F, Kayvanfar V, Haji A. Supply chain planning of vaccine and pharmaceutical clusters under uncertainty: The case of COVID-19. *Socioecon Plann Sci*. 2023; 87:101602.

25. Goodarzian F, Navaei A, Ehsani B, Ghasemi P, Muñuzuri J. Designing an integrated responsive-green-cold vaccine supply chain network using Internet-of-

Things: artificial intelligence-based solutions. *Ann Oper Res.* 2023;328(1):531–75.

26. Babagolzadeh M, Shrestha A, Abbasi B, Zhang Y, Woodhead A, Zhang A. Sustainable cold supply chain management under demand uncertainty and carbon tax regulation. *Transp Res D Transp Environ.* 2020; 80:102245.

27. Sazvar Z, Zokaee M, Tavakkoli-Moghaddam R, Salari SA sadat, Nayeri S. Designing a sustainable closed-loop pharmaceutical supply chain in a competitive market considering demand uncertainty, manufacturer's brand and waste management. *Ann Oper Res.* 2022;1–32.

28. Ahmad RW, Salah K, Jayaraman R, Yaqoob I, Omar M, Ellahham S. Blockchain-based forward supply chain and waste management for COVID-19 medical equipment and supplies. *Ieee Access.* 2021; 9:44905–27.

29. Chisholm JM, Zamani R, Negm AM, Said N, Abdel daiem MM, Dibaj M, et al. Sustainable waste management of medical waste in African developing countries: A narrative review. *Waste Management & Research.* 2021;39(9):1149–63.

30. Debrah JK, Vidal DG, Dinis MAP. Raising awareness on solid waste management through formal education for sustainability: A developing countries evidence review. *Recycling.* 2021;6(1):6.

31. Chauhan A, Jakhar SK, Chauhan C. The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal. *J Clean Prod.* 2021; 279:123854.

32. Udir KM, Golob U, Podnar K. Exploring public relations' social impact:

Insights from a Delphi study. *Public Relat Rev.* 2025;51(5):102637.

33. Saiyed S, Kumar V, Islam MS, Tedjakusuma AP, Verma P. Advancing sustainability in academic institutions: A GHRM Framework using fuzzy Delphi and DEMATEL method. *Green Technologies and Sustainability.* 2025;100294.

34. Rejeb A, Rejeb K, Keogh JG, Zailani S. Barriers to blockchain adoption in the circular economy: a fuzzy Delphi and best-worst approach. *Sustainability.* 2022;14(6):3611.

35. Liang Q, Mendel JM. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. *IEEE Transactions on Fuzzy systems.* 2000;8(5):535–50.

36. Du Z, Xie X, Qu Z, Hu Y, Stojanovic V. Dynamic event-triggered consensus control for interval type-2 fuzzy multi-agent systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers.* 2024;71(8):3857–66.

37. Mutlu M, Cetin NC, Onder S. A novel risk assessment approach for open-cast coal mines using hybrid MCDM models with interval type-2 fuzzy sets: a case study in Türkiye. *Systems.* 2024;12(8):267.

38. Alimohammadlou M, Sharifian S. Industry 4.0 implementation challenges in small-and medium-sized enterprises: an approach integrating interval type-2 fuzzy BWM and DEMATEL. *Soft comput.* 2023;27(1):169–86.

39. Wu Q, Zhou L, Chen Y, Chen H. An integrated approach to green supplier selection based on the interval type-2 fuzzy best-worst and extended VIKOR methods. *Inf Sci (N Y).* 2019; 502:394–417.

40. Danacı M, Yıldırım U. Comprehensive analysis of lifeboat

accidents using the Fuzzy Delphi method. Ocean Engineering. 2023; 278:114371.

42. Naghipour MS, Rahim ZA, Iqbal MS. A 5G competency model based on the fuzzy Delphi method. Journal of Infrastructure, Policy and Development. 2024;8(10):6788.

43. Bayatzadeh S, Talaie H, Sorourkhah A. Analyzing the quality of digitalization in supply chain collaboration models using an integrated fuzzy BWM-TOPSIS approach. Journal of quality engineering and management. 2024;14(3):224-43. (persian)

44. Talaie H, Ziaei M, Malekinejad P. Designing the establishment and implementation model of quality 4.0 with the integrated approach of interpretive structural modeling and structural equation modeling. Journal of quality engineering and management. 2022; 12(1):51-68. (persian)