



فصلنامه علمی پژوهشی در ایمنی، سلامت و محیط زیست



تحلیل ریسک عوامل تأثیرگذار بر ایمنی و حلال بودن گوشت گاو در زنجیره تأمین با استفاده از شبکه بیزی

جعفر قیدر خلجانی^۱، مهسا اکبری^۲، رضا احمدی^{۳*}

۱- دانشیار مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- دکترای تخصصی مدیریت دولتی گرایش تطبیق و توسعه، گروه آموزشی مدیریت دولتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

۳- نویسنده مسئول: دانشجوی دکترای مهندسی صنایع گرایش کیفیت و بهره‌وری، مجتمع صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

ایمنی و رعایت استانداردهای حلال در زنجیره تأمین گوشت گاو، از اولویتهای راهبردی در حوزه امنیت غذایی محسوب می‌شود. با این وجود، پیچیدگی‌های ساختاری و عدم قطعیت‌های حاکم بر این زنجیره، مدیریت کارآمد ریسک را با چالش‌های جدی مواجه می‌کند. این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب نظام‌مند، از تحلیل شبکه بیزی برای شناسایی، مدل‌سازی روابط علی و ارزیابی کمی مخاطرات بهره گرفته است. فرایند تحقیق شامل استخراج عوامل کلیدی ریسک، تعیین ساختار وابستگی‌های احتمالی و اولویت‌بندی آن‌ها بر پایه اثرگذاری بر شاخص‌های سلامت و حلالیت است؛ در این راستا، داده‌های مستخرج از پنل خبرگان و منابع ثانویه جهت کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل به کار گرفته شد. یافته‌های حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد عواملی نظیر «فقدان پیشینه سلامت دام» و «ترابری غیربهداشتی»، به‌عنوان گره‌های کلیدی، نقشی محوری در انتشار زنجیره‌ای ریسک ایفا می‌کنند. نتایج استنتاج احتمالی مدل حاکی از آن است که تمرکز بر مدیریت این محرک‌های ریشه‌ای، منجر به کاهش سیستماتیک ریسک‌های وابسته در سراسر شبکه می‌گردد. دستاوردهای این پژوهش علاوه بر ارتقای شفافیت و قابلیت ردیابی در زنجیره تأمین، ابزاری پویا جهت پیش‌بینی بحران‌ها و افزایش سطح اعتماد مصرف‌کنندگان فراهم می‌آورد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۲۳

*نویسنده مسئول:

reza_ahmadi@mut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

کل ایمنی غذا، حلال، زنجیره تأمین گوشت

گاو، تحلیل شبکه بیزی، مدیریت ریسک.

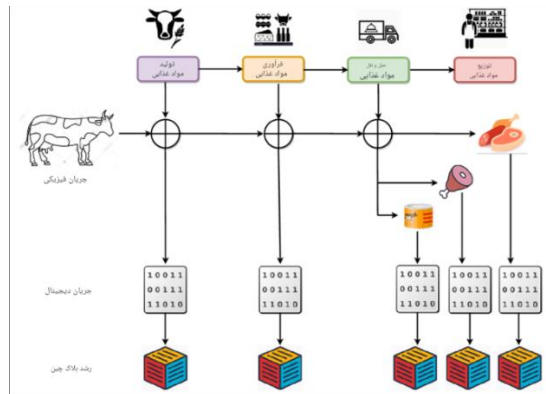


© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License- CC BY) در دسترس شما قرار گرفته است.

است [۷، ۳]. در نهایت، با توجه به ضرورت دفاع غذایی [۲]، ترکیب روش‌های FTA و FMEA [۸] و استفاده از روش‌های نوین تحلیل ریسک طراحی [۱۰]، چارچوبی منسجم برای تضمین کیفیت در زنجیره تأمین ایجاد می‌کند. در شکل شماره ۱ زنجیره تأمین گوشت گاو نشان داده شده است:



شکل ۱- زنجیره تأمین گوشت گاو

با توجه به اهمیت سلامت مصرف‌کنندگان، اطمینان از رعایت اصول حلال، و نیاز به رویکردهای دقیق برای مدیریت ریسک، این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل عوامل ریسک در زنجیره تأمین گوشت گاو با استفاده از شبکه بیزی انجام شد. همچنین تلاش شده است نقش فناوری بلاک‌چین به‌عنوان بستری برای تقویت شفافیت و ردیابی اطلاعات مورد بررسی قرار گیرد.

۲-پیشینه پژوهش و مبانی نظری

مدیریت مخاطرات در زنجیره تأمین گوشت گاو به دلیل الزامات سخت‌گیرانه سلامت و ضرورت رعایت استانداردهای شرعی، نیازمند رویکردهای تحلیلی فراتر از مدل‌های سنتی است. در ادبیات این حوزه، روش «تحلیل حالات شکست و اثرات» (FMEA) «به‌طور گسترده برای رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده شده است [۱۰]، اما پژوهش‌های منتقدانه نشان می‌دهند که این روش به دلیل نادیده‌گیری روابط متقابل میان عوامل ریسک و ناتوانی در مدیریت عدم قطعیت، در سیستم‌های پیچیده کارایی محدودی دارد [۱۸]. به‌طور مشابه، «تحلیل درخت خطا» (FTA) علی‌رغم توانمندی در بازنمایی علل ریسک، در تحلیل همزمان چندین مسیر علی با چالش مواجه است [۸]. از این رو، انتقال به سمت «تحلیل شبکه بیزی» (BN^۳) به‌عنوان رویکردی پیشرفته، امکان مدل‌سازی روابط علی پیچیده و پیش‌بینی اثرات متقابل را فراهم

۱- مقدمه

ایمنی غذا و مدیریت مخاطرات سلامت عمومی در بازارهای مواد غذایی از اولویت‌های اساسی پژوهش‌های اخیر است [۱]. با توجه به تکامل سریع ادبیات حوزه ایمنی، تغلب و دفاع غذایی [۲]، شناسایی الگوهای آلودگی میکروبی و مخمرها در مراحل تولید و انبارداری برای کاهش تهدیدات بهداشتی ضروری است [۳]. در محصولات پروتئینی، معیارهای ذبح حلال و نحوه ارزیابی سلامت دام، مستلزم تعریف دقیق مدیریت زنجیره تأمین حلال است [۴، ۵]. اگرچه استفاده از منطق فازی در تحلیل درخت خطا (FTA) کاربرد دارد [۶]، اما امروزه پذیرش فناوری بلاک‌چین ایزاری کارآمد برای مدیریت ریسک در زنجیره تأمین است [۷]. بهبود کارایی تحلیل شکست از طریق ترکیب روش‌های FTA و FMEA [۸]، و مرور نقش بلاک‌چین در مدیریت ریسک [۹]، نشان‌دهنده رویکردی نوین در تحلیل ریسک طراحی محصول با استفاده از روش‌های توسعه‌یافته است [۱۰].

پذیرش بلاک‌چین نه تنها بر مدیریت ریسک تأثیرگذار است [۷]، بلکه باعث ارتقای انطباق‌پذیری و بهبود عملکرد کلی زنجیره تأمین می‌گردد [۱۱]. این فناوری در کنار مفاهیم دفاع غذایی [۲] و روش‌های نوین [۱۰] FMEA، می‌تواند الگوهای آلودگی در محصولات را به دقت ردیابی کرده و مخاطرات سلامت عمومی را کاهش دهد [۳، ۱]. در واقع، تکامل ادبیات تغلب غذایی [۲] و پایش الگوهای آلودگی میکروبی [۳]، لزوم استفاده از رویکردهای مبتنی بر [۱۰] FMEA و بلاک‌چین [۷] را برای تضمین استانداردهای ذبح حلال [۴] و مدیریت زنجیره تأمین حلال [۵] تبیین می‌کند.

با در نظر گرفتن چالش‌های تغلب در مواد غذایی [۲] و نیاز به بهبود کارایی در تحلیل شکست‌ها [۸]، استفاده از رویکردهای مبتنی بر تحلیل ریسک طراحی [۱۰] ضرورت می‌یابد. در این میان، ادبیات ایمنی و دفاع غذایی به‌طور مستمر در حال توسعه است [۲] و مطالعات نشان می‌دهند که به‌کارگیری بلاک‌چین بر چابکی زنجیره تأمین اثر مثبتی دارد [۱۱]. پایش الگوهای آلودگی میکروبی در کنار استفاده از بلاک‌چین برای مدیریت ریسک عملیاتی، شواهد موثری از بهبود شفافیت ارائه داده

^۱ Fault Tree Analysis

^۲ Failure Mode and Effects Analysis

^۳ Bayesian Network

ترکیب این رویکرد با مدل‌های پیشرفته‌ای نظیر «انتگرال شوکه» برای تحلیل تصمیم‌گیری و استفاده از «قطعات شبکه» برای بازنمایی دانش، دقت مدل را در مواجهه با متغیرهای چندگانه زنجیره تأمین تضمین می‌کند [۱۶، ۱۷]. ابوالقاسمی و همکاران [۲۳] نیز رویکردی برای مدیریت ریسک زنجیره تأمین با نگاشت مدل مرجع SCOR به شبکه بیزی ارائه داده‌اند که قابلیت تعمیم به زنجیره گوشت گاو را دارد.

۳- روش‌شناسی

این پژوهش با استفاده از رویکرد شبکه بیزی (BN) به شناسایی و ارزیابی مخاطرات ایمنی و حلال در زنجیره تأمین گوشت گاو می‌پردازد. فرآیند اجرای تحقیق در ۵ گام زیر عملیاتی شده است:

۳-۱- شناسایی عوامل ریسک

عوامل ریسک کلیدی از طریق مرور سیستماتیک منابع علمی [۱-۱۰] و مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با ۱۰ نفر از کارشناسان صنایع غذایی و متخصصان حلال [۱۸، ۱۷] شناسایی شدند. در نهایت ۳۰ عامل ریسک شامل آلودگی‌های میکروبی، نقص در زنجیره سرد و انحراف از اصول ذبح اسلامی استخراج و کدگذاری گردید [۱۹، ۱۸].

۳-۲- طراحی ساختار شبکه

روابط علی میان گره‌ها (متغیرها) بر اساس دانش خبرگان و پیشینه پژوهش، در قالب یک گراف جهت‌دار بدون دور ترسیم شد. هر گره در این ساختار نشان‌دهنده یک عامل ریسک و یال‌ها مبین وابستگی‌های مستقیم هستند. ساختار اولیه جهت حذف روابط غیرمنطقی توسط تیم کارشناسی بازبینی و اصلاح گردید.

۳-۳- تعیین احتمالات شرطی (CPT^۱)

برای کمی‌سازی مدل، جداول احتمال شرطی بر اساس ترکیب داده‌های تاریخی (گزارش‌های نظارتی صنعت گوشت) و برآورد خبرگان در موارد کمبود داده، تدوین شد [۱۹، ۱۷]. فرآیند تخمین احتمالات با استفاده از روش‌های آماری مرسوم برای ترکیب داده‌های کمی و کیفی صورت گرفت [۱۸، ۱۹]. بوزمبراک و ماروین [۲۴] کاربرد شبکه بیزی را در توسعه سیستم نمونه‌گیری و پایش ایمنی مواد غذایی نشان دادند که رویکرد مشابهی با کالیراسیون مدل در این پژوهش دارد. همچنین نوتا [۲۶] یک ساختار مدولار برای ارزیابی ریسک کمی میکروبیولوژیکی از مزرعه

کرده و نقاط ضعف مدل‌های سنتی را پوشش داده است [۱۴].

در بخش مطالعات تجربی، شواهد حاکی از آن است که آلودگی‌های شیمیایی و میکروبی ناشی از ضعف در لجستیک زنجیره سرد، جدی‌ترین تهدیدات ایمنی غذا هستند که مستقیماً اعتماد مصرف‌کننده را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱، ۳]. این چالش در حوزه محصولات حلال به دلیل حساسیت‌های بالای مذهبی پیرامون آلودگی متقاطع و ذبح اسلامی، ابعاد پیچیده‌تری می‌یابد [۴، ۵]. برای مدیریت این پیچیدگی، استفاده از شبکه بیزی به عنوان یک ابزار استنتاج احتمالی، نه تنها دقت پیش‌بینی خطرات را افزایش داده، بلکه کارایی اقدامات پیشگیرانه را نیز بهبود بخشیده است [۱۹، ۱۸]. پژوهش شفیع و همکاران [۲۸] نیز یک مدل شبکه بیزی برای ارزیابی یکپارچه ریسک ایمنی و حلال در فرآیند تولید مواد غذایی توسعه داده‌اند که با رویکرد پژوهش حاضر همسویی بالایی دارد. همچنین واهیونی و همکاران [۲۱] با تلفیق مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM^۱) و شبکه بیزی، به پیش‌بینی کمی ریسک‌های حلال و ایمنی در زنجیره تأمین گوشت مرغ پرداختند.

از منظر مبانی نظری، این پژوهش بر «نظریه احتمالات بیزی» و «گراف‌های جهت‌دار بدون دور» استوار است که اجازه می‌دهد عدم قطعیت‌ها در ساختارهای غیرخطی مدل‌سازی شوند [۱۵]. برخلاف مدل‌های کلاسیک، در اینجا از استدلال احتمالی برای تحلیل دقیق سناریوها استفاده می‌شود [۱۵، ۱۴]. این چارچوب نظری با بهره‌گیری از یادگیری ساختار و پارامترها، در شناسایی نقاط بحرانی ایمنی و حلال بسیار کارآمد است [۱۹]. آموزش یادگیری شبکه‌های بیزی به طور جامع توسط هکرمن [۳۰] ارائه شده است که مبنای بسیاری از روش‌های یادگیری پارامتر در این حوزه است. مرور جامع کاربردهای شبکه بیزی در مدیریت ریسک زنجیره تأمین نشان می‌دهد که این رویکرد در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است [۲۷]. علاوه بر این، استفاده از «شبکه‌های بیزی پویا» (DBN^۲) امکان ردیابی ریسک در طول زمان را فراهم می‌آورد [۱۳، ۱۴]. ما و همکاران [۲۹] از شبکه بیزی فازی و دینامیک برای ارزیابی ریسک زنجیره سرد استفاده کردند که قابلیت توسعه مدل پیشنهادی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. همچنین،

^۱ Interpretive Structural Modeling

^۲ Dynamic Bayesian Networks

جدول ارزیابی ریسک‌های مرتبط با ایمنی غذا و حلالیت در زنجیره تأمین گوشت گاو ارائه شده است. این جدول شامل محاسباتی است که براساس شدت تأثیر، تکرار وقوع و قابلیت تشخیص برای هر عامل ریسک (کدهای R1 تا R30) انجام شده‌اند. ریسک کلی به‌عنوان معیاری برای اولویت‌بندی عوامل ریسک محاسبه شده و نشان‌دهنده میزان ریسک نهایی هر ریسک در زنجیره تأمین است. این تحلیل ابزاری کاربردی برای شناسایی و مدیریت ریسک‌های بحرانی در سیستم تأمین محسوب می‌شود.

۴-۱-۲- منطق محاسباتی شاخص ریسک

به منظور شفاف‌سازی نحوه محاسبه ستون «ریسک کلی» در جدول ۱ و تبیین منطق ترکیب مؤلفه‌های سه‌گانه، از فرمول نرخ میانگین وزنی نرمال‌شده استفاده گردید. امتیاز ریسک کلی هر عامل (ستون آخر جدول ۱) بر اساس ترکیب سه شاخص شدت^۲ (S)، تکرار^۳ (O) و تشخیص^۴ (D) و با استفاده از روش میانگین وزنی نرمال‌شده محاسبه گردید. از آنجا که هر سه شاخص از دید خبرگان دارای اهمیت یکسانی بودند، وزن برابر به آن‌ها اختصاص یافت. به منظور قرار گرفتن خروجی در بازه عددی ۰ تا ۲ (مطابق با دامنه خروجی مورد انتظار شبکه بیزی)، فرآیند نرمال‌سازی خطی با استفاده از رابطه زیر انجام شد:

فرمول محاسبه ریسک کلی:

$$ریسک\ کلی = (S + O + D) \div 3$$

در این منطق محاسباتی، به جای حاصل‌ضرب خطی (RPN سنتی)، از میانگین مجموع جهت هم‌بسته‌سازی داده‌ها برای ورود به گره‌های شبکه بیزی استفاده شده است. عدد حاصله (TR^۵) بیانگر وزن نسبی هر عامل ریسک در زنجیره تأمین است؛ به طوری که هرچه مقدار آن به سقف عددی (۲,۰) نزدیک‌تر باشد، اولویت آن عامل در تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی شبکه بیزی بالاتر خواهد بود.

تا سفره ارائه داد که مبنای مدل‌سازی زنجیره‌ای در این پژوهش است.

۴-۳- مدل‌سازی و شبیه‌سازی

پس از پیاده‌سازی مدل در نرم‌افزار، تحلیل پیش‌بینی برای برآورد وضعیت فعلی انجام شد. همچنین با هدف شناسایی حیاتی‌ترین متغیرها، تحلیل حساسیت^۱ برای تعیین گره‌هایی که بیشترین تأثیر را بر ریسک نهایی دارند، اجرا گردید [۲۰، ۱۸].

لازم به ذکر است توزیع احتمالات پایه برای گره‌های ریشه در شبکه بیزی، از طریق نرمال‌سازی مقادیر کمی مستخرج از پژوهش واهیونی و همکاران (۲۰۲۴) [۱۲] تعیین شده است. روابط میان متغیرها در قالب جداول احتمالات شرطی و بر اساس توابع توزیع گسسته تنظیم گردیده‌اند. مقادیر نهایی گزارش‌شده در یافته‌ها، خروجی مستقیم به‌کارگیری قضیه بیز و الگوریتم‌های استنتاج احتمالی بر روی شواهد ورودی است. در این فرآیند، تأثیرات متقابل ریسک‌ها از طریق محاسبات ریاضی بر روی بردار احتمالات تعیین شده و ارقام حاصله، برآیند دقیق تعاملات سیستم است که سوگیری‌های ناشی از برآورد ذهنی را حذف می‌کند.

۴- یافته‌ها

برای مدیریت مؤثر ریسک‌ها در زنجیره تأمین گوشت گاو، شناسایی و اولویت‌بندی عوامل ریسک کلیدی ضروری است. در این پژوهش، از تحلیل شبکه بیزی و مدیریت داده‌ها برای ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده شده است. این بخش به توضیح فرآیند اولویت‌بندی ریسک‌ها، ارائه جداول و نمودارهای مرتبط و تحلیل تأثیرات اقدامات کاهش ریسک می‌پردازد.

۴-۱-۱- مدل‌سازی شبکه بیزی

۴-۱-۱-۱- ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌ها

داده‌ها از منابع مختلف، از جمله گزارش‌های تاریخی، نظرات کارشناسان و داده‌های عملیاتی زنجیره تأمین، جمع‌آوری شدند.

این داده‌ها شامل متغیرهایی مانند احتمال وقوع، شدت تأثیر و تأثیرات متقابل عوامل ریسک بودند. در این بخش،

2 Severity
3 Occurrence
4 Detection
5 Risk Priority Number
6 Total Risk

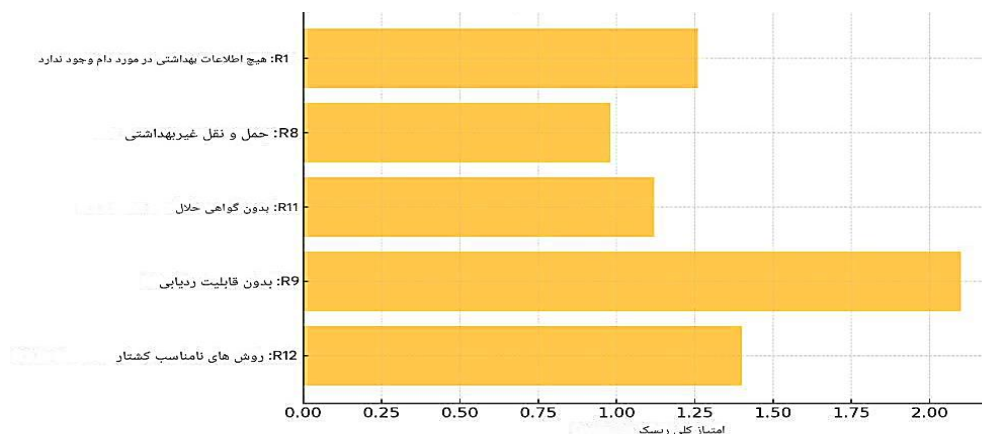
جدول ۱- عوامل ریسک بر ایمنی غذا و حلال در زنجیره تامین گوشت گاو

کد ریسک	عامل ریسک	عوامل زنجیره تأمین	تشخیص	تکرار	شدت	ریسک کلی
R1	عدم وجود اطلاعات سلامت دام	تأمین کننده	7	7	6	1.26
R2	انتقال بیماری از دام به انسان	تأمین کننده	6	4	7	1.12
R3	آسیب فیزیکی	تأمین کننده	7	4	3	0.36
R4	آلودگی با اجسام خارجی مانند شیشه، پلاستیک یا فلز	تأمین کننده	7	2	7	0.42
R5	بقایای مواد دارویی یا شیمیایی	تأمین کننده	8	2	7	0.28
R6	آلودگی شیمیایی یا فلزات سنگین	تأمین کننده	6	3	7	0.84
R7	انبارداری غیربهداشتی	تأمین کننده	7	6	6	1.08
R8	حمل و نقل غیربهداشتی	تأمین کننده	8	7	7	0.98
R9	عدم امکان ردیابی منبع حیوانی	تأمین کننده	3	6	5	2.1
R10	اطلاعات نادرست	تأمین کننده	3	5	3	1.05
R11	عدم داشتن گواهینامه حلال	تأمین کننده	8	7	8	1.12
R12	ذبح مطابق قوانین اسلامی نیست	تأمین کننده	5	4	7	1.4
R13	آلودگی متقابل با محصولات غیرحلال	تأمین کننده	5	2	3	0.3
R14	آلودگی تجهیزات متقابل	سیستم تولید	7	3	7	0.63
R15	آلودگی با استفاده از تجهیزات غیربهداشتی	سیستم تولید	8	5	7	0.7
R16	استفاده از افزودنی های غیرحلال	سیستم تولید	8	8	6	0.96
R17	استفاده از افزودنی های غیرمناسب برای سلامت	سیستم تولید	8	8	5	0.8
R18	دمای نامناسب در محل تولید	سیستم تولید	8	3	8	0.48
R19	محصولات بدون گواهی حلال	سیستم تولید	8	8	8	1.28
R20	آلودگی فیزیکی بسته بندی محصولات	سیستم تولید	6	3	3	0.36
R21	انبار با استاندارد حلال ندارد	سیستم توزیع	8	8	8	1.28
R22	آلودگی متقابل با محصولات غیرحلال	سیستم توزیع	8	6	7	0.84
R23	استفاده از روش های حمل و نقل غیربهداشتی	سیستم توزیع	7	5	3	0.45
R24	کنترل دمای نامناسب در فرایند حمل و نقل	سیستم توزیع	7	6	6	1.08
R25	دمای نامناسب در انبار	سیستم توزیع	5	3	3	0.45
R26	آلودگی متقابل در اتاق انبار	سیستم توزیع	7	5	5	0.75
R27	عرضه محصولات غیربهداشتی	سیستم توزیع	7	6	6	1.08
R28	عرضه محصولات آلوده به غیرحلال	سیستم توزیع	8	4	8	0.64
R29	عدم ثبت تاریخ انقضا	سیستم توزیع	8	6	8	0.96
R30	عدم بررسی وضعیت حلال بودن محصول	سیستم توزیع	9	8	7	0.56

ارتقای سیستم های تشخیص می تواند به کاهش قابل توجه ریسک کلی کمک کند. تمرکز بر کاهش فراوانی وقوع ریسک ها از طریق بهبود فرایندها و نظارت مستمر مؤثر خواهد بود. این جدول و تحلیل های مرتبط، ابزار مفیدی برای اتخاذ تصمیمات آگاهانه و بهینه سازی مدیریت ریسک در زنجیره تأمین گوشت گاو ارائه می دهد. در ادامه در شکل ۲ اولویت بندی ریسک ها مشخص گردید.

همان طور که در جدول مشخص است، ریسک های کلی محاسبه شده براساس شدت تأثیر، تکرار وقوع و قابلیت تشخیص، اولویت های ریسک را برای تصمیم گیری مشخص می کنند. ریسک های بحرانی مانند R8، R11 و R29 دارای ریسک کلی بالاتری بوده و نیازمند توجه بیشتری هستند. این ریسک ها به دلیل شدت بالای تأثیر یا ضعف در تشخیص به عنوان عوامل بحرانی شناسایی شده اند.

براساس این تحلیل، می توان پیشنهاد داد که:

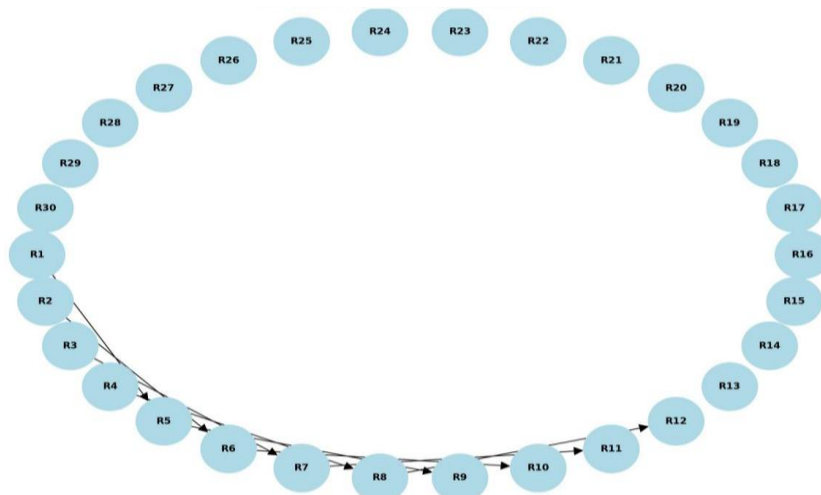


شکل ۲- نمودار اولویت بندی ریسک در زنجیره تامین

جدول احتمال شرطی براساس داده های جمع آوری شده تعیین شد. که در شکل شماره ۳ نشان داده شده است.

۴-۱-۲- ساختار شبکه بیزی

شبکه بیزی طراحی شد تا ارتباطات علی میان عوامل ریسک و تأثیرات آن ها را مدل سازی کند. برای هر گره،



شکل ۳- طرح بندی سلسله مراتبی برای شبکه بیزی

روابط ورودی یا خروجی را دارند، عوامل بحرانی محسوب می شوند. برای نمونه، اگر R8 در مرکز روابط زیادی باشد، به عنوان یک ریسک بحرانی در نظر گرفته شده و این گره ها باید در اولویت بررسی و کاهش ریسک باشند. در این بخش، تحلیل شبکه بیزی برای بررسی تأثیر متقابل عوامل ریسک انجام شد. بر اساس داده ها، احتمال وقوع عوامل و تأثیر وابستگی آن ها محاسبه گردید. به عنوان نمونه، رابطه بین R1 و R5 مورد بررسی قرار گرفت. اگر عامل R1 (عدم وجود اطلاعات سلامت دام) رخ دهد، احتمال وقوع عامل R5 (بقایای مواد دارویی یا شیمیایی) به ۸۲٫۳۵ درصد افزایش می یابد، در حالی که در صورت عدم وقوع R1، این احتمال تنها ۱۷٫۶۵ درصد

۴-۲- تحلیل شبکه بیزی

در شبکه بیزی طراحی شده، هر گره از R1 تا R30 نماینده یک عامل ریسک است و روابط مستقیم (پیکان ها) نشان دهنده اثرگذاری یک عامل بر دیگری می باشند. به عنوان مثال، ارتباط بین R1 (عدم وجود اطلاعات سلامت دام) و R5 (بقایای مواد دارویی یا شیمیایی) نشان می دهد که ریسک عدم وجود اطلاعات سلامت دام ممکن است باعث افزایش ریسک بقایای مواد دارویی یا شیمیایی شود. همچنین ارتباط بین R8 (حمل و نقل غیربهداشتی) و R12 (عدم رعایت اصول حلال در کشتار) بیانگر آن است که حمل و نقل غیربهداشتی می تواند باعث عدم رعایت اصول حلال در کشتار گردد. گره هایی که بیشترین تعداد

۴.۳. مدل سازی و شبیه سازی

۴.۳.۱. سناریوهای محتمل

سناریوی بدبینانه: اگر احتمال وقوع عوامل کلیدی مانند R5 و R8 زیاد باشد، ممکن است سایر ریسک های وابسته (مانند R9 و R12) نیز افزایش یابند.

سناریوی خوش بینانه: بهبود تشخیص یا کاهش احتمال وقوع عوامل کلیدی می تواند به کاهش چشمگیر ریسک های وابسته منجر شود. در جدول شماره ۲ سناریوها نشان داده شده است.

جدول ۲- سناریوها

ریسک کلی	وقوع	سناریو	کد ریسک
1.26	7	وضعیت فعلی	R1
0.9	5	کاهش احتمال وقوع	R1
1.62	9	افزایش احتمال وقوع	R1
0.28	2	وضعیت فعلی	R5
0.14	1	کاهش احتمال وقوع	R5
0.42	3	افزایش احتمال وقوع	R5
0.98	7	وضعیت فعلی	R8
0.7	5	کاهش احتمال وقوع	R8
1.26	9	افزایش احتمال وقوع	R8

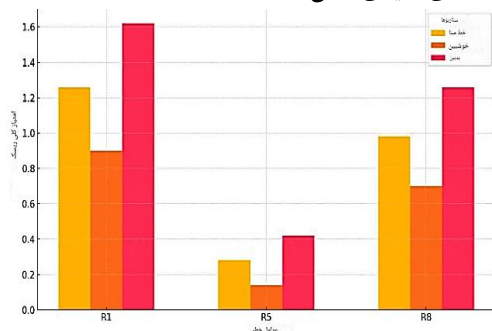
این نمودار شبیه سازی سناریوها، تأثیر تغییرات در سه عامل ریسک کلیدی R5، R8، R1 را در شرایط مختلف نشان می دهد:

وضعیت فعلی.

کاهش احتمال وقوع ریسک.

افزایش احتمال وقوع ریسک.

در شکل شماره ۴ نمودار شبیه سازی سناریو برای عوامل ریسک های کلیدی نشان داده شده است.



شکل ۴- نمودار شبیه سازی سناریو برای عوامل ریسک های کلیدی

است. این نتایج نشان می دهد که R1 تأثیر مستقیمی بر R5 دارد و مدیریت ریسک R1 می تواند نقش کلیدی در کاهش ریسک R5 ایفا کند.

مبنای محاسبات در این شبکه، قانون بیز است که رابطه احتمالی بین متغیرها را به صورت زیر تعریف می کند:

$$P(R_i | R_j) = [P(R_j | R_i) \times P(R_i)] / P(R_j)$$

بر این اساس، محاسبات برای گره های وابسته انجام شد. برای بررسی رابطه بین R1 و R5، ابتدا احتمال کلی وقوع R5 بدون در نظر گرفتن وضعیت R1 برابر ۶۷،۹۹ درصد محاسبه گردید. همچنین اگر R5 رخ دهد، احتمال وقوع R1 برابر ۸۲،۳۵ درصد و احتمال اینکه R1 رخ نداده باشد برابر ۱۷،۶۵ درصد خواهد بود. این محاسبات نشان می دهد که R5 وابستگی زیادی به R1 دارد، به این معنا که وقوع R1 به شدت احتمال وقوع R5 را افزایش می دهد. در نتیجه، مدیریت و کاهش احتمال وقوع R1 می تواند به طور مستقیم احتمال وقوع R5 را کاهش داده و ایمنی زنجیره تأمین را بهبود بخشد. این محاسبات بر اساس قانون بیز انجام شده و نشان دهنده نقش کلیدی عوامل اولیه در کنترل ریسک های وابسته است. در ادامه، با استفاده از قانون بیز، احتمال وقوع عوامل وابسته بر اساس تغییرات در عوامل اولیه محاسبه گردید. برای مثال بین R1 و R5، احتمال کلی وقوع R5 بدون در نظر گرفتن وضعیت R1 برابر ۶۷،۹۹ درصد، احتمال وقوع R1 با فرض وقوع R5 برابر ۸۲،۳۵ درصد و احتمال عدم وقوع R1 با فرض وقوع R5 برابر ۱۷،۶۵ درصد است. در واقع اگر R1 رخ دهد، احتمال وقوع R5 به ۸۲،۳۵ درصد افزایش می یابد و اگر R1 رخ ندهد، احتمال وقوع R5 تنها ۱۷،۶۵ درصد است. این نتایج تأیید می کند که مدیریت ریسک R1 می تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش احتمال وقوع R5 داشته باشد.

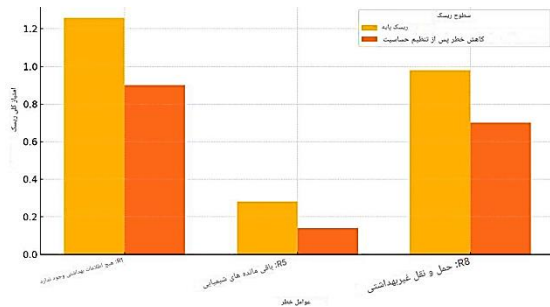
بنابراین ریسک هایی مانند R1 که بر سایر عوامل اثر مستقیم دارند، باید در اولویت مدیریت قرار گیرند. کاهش احتمال وقوع R1 می تواند به کاهش چشمگیر در ریسک های وابسته مانند R5 منجر شود.

این تحلیل شبکه بیزی ابزار مفیدی برای شناسایی و اولویت بندی ریسک ها در زنجیره تأمین گوشت گاو ارائه می دهد و به بهبود تصمیم گیری در مدیریت ریسک کمک می کند.

۴-۳-۲- تحلیل حساسیت

در شکل شماره ۵ تجزیه و تحلیل حساسیت عوامل ریسک های کلیدی نشان داده شده است.

شکل ۵- تجزیه و تحلیل حساسیت عوامل ریسک های کلیدی



تغییرات جهت دار و منطقی در امتیاز ریسک کلی (کاهش از ۱,۲۶ به ۰,۹۰ در سناریوی خوش بینانه و افزایش به ۱,۶۲ در سناریوی بدبینانه) نشان دهنده پاسخگویی درست مدل به تغییرات محیطی است. این حساسیت منطقی، اولین تاییدیه بر صحت احتمالات شرطی وارد شده در نرم افزار محسوب می شود.

۴-۴- اعتبارسنجی مدل

به منظور اطمینان از دقت نتایج، مدل شبکه بیزی از سه منظر مورد آزمون قرار گرفت:

۱- آزمون تحلیل حساسیت: طبق نتایج بخش ۷,۲، مدل در برابر تغییرات پارامترهای ورودی رفتاری پایدار و پیش بینی پذیر نشان داد که حاکی از اعتبار پارامترهای مدل است.

۲- تست شرایط حدی^۱: با قرار دادن احتمالات ورودی در وضعیت بحرانی (مقدار ۱)، خروجی مدل به صورت سیستماتیک افزایش یافت که نشان دهنده اعتبار ساختاری^۲ شبکه است.

۳- اعتبارسنجی مقایسه ای: نتایج اولویت بندی این مدل با رتبه بندی های حاصل از روش FMEA در پژوهش مبنا مقایسه شد. هم سو بودن ریسک های بحرانی شناسایی شده در هر دو روش، اعتبار همگرایی مدل پیشنهادی را تأیید می کند. بوزمبراک و همکاران [۲۵] نیز با تلفیق شبکه بیزی و FMEA، دقت پیش بینی آسیب پذیری قلب غذایی را به بیش از ۹۵٪ رساندند که مؤید کارایی این رویکرد ترکیبی است.

تحلیل حساسیت نشان داد که برخی عوامل ریسک تأثیر بیشتری بر نتایج کلی شبکه بیزی دارند. در این تحلیل، سناریوهای مختلف برای تغییر در احتمال وقوع عوامل کلیدی مانند R1 عدم وجود اطلاعات سلامت دام، R5 (باقیای مواد دارویی یا شیمیایی) و R8 (حمل و نقل غیر بهداشتی) بررسی شدند. نتایج نشان می دهد که برای R1 در حالت وضعیت فعلی ریسک کلی برابر ۱,۲۶ است، در سناریوی کاهش احتمال وقوع به ۰,۹۰ کاهش و در سناریوی افزایش احتمال وقوع به ۱,۶۲ افزایش می یابد؛ بنابراین این عامل یکی از حساس ترین ریسک هاست و باید در اولویت مدیریت قرار گیرد. برای R5، ریسک کلی در حالت وضعیت فعلی برابر ۰,۲۸ است که با کاهش احتمال وقوع به ۰,۱۴ در سناریوی خوش بینانه اثر آن کاهش می یابد و افزایش احتمال وقوع در سناریوی بدبینانه ریسک کلی را به ۰,۴۲ می رساند. برای R8 نیز در وضعیت فعلی ریسک کلی برابر ۰,۹۸ است که کاهش احتمال وقوع می تواند ریسک را به ۰,۷۰ کاهش دهد و افزایش احتمال وقوع می تواند ریسک را به ۱,۲۶ افزایش دهد. این تحلیل نشان می دهد که مدیریت عوامل بحرانی مانند R1، R5 و R8 از طریق کاهش احتمال وقوع و بهبود تشخیص می تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش ریسک کلی داشته باشد و تمرکز بر این عوامل می تواند به افزایش ایمنی غذا و رعایت اصول حلالیت در زنجیره تأمین کمک کند. در سناریوی خوش بینانه، کاهش احتمال وقوع R8 از ۷ به ۵، ریسک کلی را از ۰,۹۸ به ۰,۷۰ کاهش داد و در سناریوی بدبینانه، افزایش احتمال وقوع R8 به ۹، ریسک کلی را به ۱,۲۶ افزایش داد که این تحلیل بر اهمیت مدیریت عوامل بحرانی در کاهش ریسک کلی تأکید می کند. در ادامه شکل ۵ تحلیل حساسیت، تغییرات در امتیاز کلی ریسک برای سه عامل کلیدی (R1)، R5 و R8 را در شرایط فعلی نشان می دهد.

^۱ Extreme Condition Test

^۲ Structural Validity

روابط بین ریسک‌ها	مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل	بررسی مجزا و مستقل هر ریسک
مدیریت داده‌ها	ترکیب نظرات خبره با داده‌های احتمالی	تکیه بر اعداد ثابت مثل RPN
خروجی اصلی	توزیع احتمال وقوع و تحلیل سناریو	رتبه‌بندی ساده بر اساس اولویت

۴-۵- کاهش ریسک

برای کاهش ریسک‌های شناسایی‌شده در زنجیره تأمین گوشت گاو، در قسمت نتیجه‌گیری راهکارهای عملی و پیشنهادات اجرایی ارائه شده است. این راهکارها شامل بهبود فرآیندهای تأمین، تولید، حمل‌ونقل و انبارداری، با هدف ارتقای ایمنی غذا و رعایت استانداردهای حلال است که می‌تواند به کاهش اثرات عوامل بحرانی و بهبود عملکرد کلی زنجیره تأمین منجر شود.

۵- بحث

در این پژوهش، از تحلیل شبکه بیزی برای شناسایی و مدیریت ریسک‌های مرتبط با ایمنی غذا و حلالیت در زنجیره تأمین گوشت گاو استفاده شد. این روش به دلیل توانایی آن در مدل‌سازی روابط علی پیچیده و مدیریت عدم قطعیت، به‌طور ویژه برای شرایط زنجیره تأمین که دارای تعاملات متقابل و متغیرهای متعدد است، مناسب است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که تحلیل شبکه بیزی می‌تواند ابزار کارآمدی برای شفاف‌سازی ریسک‌ها و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی باشد.

۵،۱ مزایای تحلیل شبکه بیزی

شبکه بیزی در مقایسه با روش‌های سنتی مانند تحلیل درخت خطا (FTA^۱) و [۸] تحلیل حالت شکست و اثرات (FMEA^۲) [۱۰]، توانایی بیشتری در مدیریت عدم قطعیت و ترکیب داده‌های کمی و کیفی دارد [۱۵، ۱۸]. برخلاف روش‌های مذکور که ریسک‌ها را به صورت مستقل و ایستا ارزیابی می‌کنند، شبکه بیزی با مدل‌سازی روابط علی، امکان تحلیل اثرات متقابل و زنجیره‌ای ریسک‌ها را فراهم می‌کند. این برتری ساختاری باعث می‌شود که مدل پیشنهادی نه تنها ریسک‌ها را رتبه‌بندی کند، بلکه تأثیر تغییر یک فاکتور را بر کل زنجیره (تحلیل سناریو) به دقت نمایش دهد؛ قابلیت‌هایی که در مدل‌های FMEA و FTA محدود است. جدول شماره ۳ زیر تفاوت‌های کلیدی این رویکردها را خلاصه می‌کند:

جدول ۳- مقایسه ویژگی‌های تحلیلی روش شبکه بیزی با مدل‌های کلاسیک ارزیابی ریسک		
شاخص مقایسه	مدل شبکه بیزی (پژوهش حاضر)	روش FMEA / FTA
نوع تحلیل	احتمالی و پویا	قطعی و ایستا

^۱ Fault Tree Analysis

^۲ Failure mode and effects analysis

۵-۲- ارتقای شفافیت و قابلیت ردیابی

یکی از مزایای کلیدی این روش، افزایش شفافیت و قابلیت ردیابی در زنجیره تأمین است. استفاده از تحلیل شبکه بیزی همراه با فناوری‌های نوین نظیر بلاک‌چین [۷] می‌تواند به کاهش آلودگی متقاطع و تقلب در مواد غذایی منجر شود [۲]. این امر به‌ویژه برای اطمینان از رعایت استانداردهای حلال در زنجیره تأمین محصولات گوشتی اهمیت دارد. بوزمیراک و همکاران [۲۵] نشان داده‌اند که رویکرد ترکیبی شبکه بیزی و FMEA می‌تواند آسیب‌پذیری زنجیره تأمین در برابر تقلب غذایی را با دقت بالایی پیش‌بینی کند.

۵-۳- تحلیل حساسیت و سناریوسازی

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تغییرات در برخی متغیرهای کلیدی مانند شرایط حمل‌ونقل یا دمای ذخیره‌سازی می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر ایمنی و حلالیت محصولات داشته باشد [۱۹]. این قابلیت سناریوسازی به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا اقدامات مؤثری برای کاهش ریسک‌ها اتخاذ کنند [۱۸، ۱۹].

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از تحلیل شبکه بیزی به عنوان یک رویکرد نوین برای شناسایی، تحلیل و مدیریت ریسک‌های مرتبط با ایمنی غذا و حلالیت در زنجیره تأمین گوشت گاو استفاده شد. این روش به دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط علی پیچیده و مدیریت عدم قطعیت، ابزاری مناسب برای زنجیره‌های تأمین پیچیده با تعاملات چندگانه به شمار می‌رود. یافته‌های حاصل از تحلیل حساسیت و

۱. استفاده از فناوری‌های مکمل مانند اینترنت اشیا برای جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ و بهبود دقت مدل‌ها.
۲. توسعه ابزارهای ترکیبی برای ادغام تحلیل شبکه بیزی با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره.
۳. گسترش پژوهش به زنجیره‌های تأمین دیگر مانند محصولات دریایی و لبنیات برای بررسی قابلیت تعمیم این روش.

۹. پیوست کد شبیه‌سازی شبکه بیزی برای تحلیل ریسک

در این پژوهش، به‌منظور توسعه تحلیل ریسک مبتنی بر روش‌های FMEA و FTA، از مدل شبکه بیزی برای مدل‌سازی وابستگی بین عوامل ریسک و محاسبه احتمال وقوع ریسک‌های بحرانی استفاده شده است.

در این راستا، عوامل ریسک شناسایی شده به‌عنوان گره‌های شبکه در نظر گرفته شدند و ساختار روابط بین آن‌ها بر اساس تحلیل درخت خطا (FTA) تعریف گردید. همچنین، احتمالات اولیه گره‌ها با استفاده از نرمال‌سازی مقادیر RPN به‌دست‌آمده از روش FMEA تعیین شد. برای گره نهایی (ریسک کل)، جدول احتمال شرطی بر اساس منطق ترکیبی مشابه دروازه‌های منطقی در FTA تعریف گردید.

مدل شبکه بیزی در محیط Python و با استفاده از کتابخانه pgmpy پیاده‌سازی شده است. کد مربوط به شبیه‌سازی به شرح زیر است:

نصب کتابخانه در صورت نیاز

```
# pip install pgmpy
from pgmpy.models import BayesianNetwork
from pgmpy.factors.discrete import TabularCPD
from pgmpy.inference import VariableElimination
تعریف ساختار شبکه
model = BayesianNetwork([
    ('R1', 'Risk_Total'),
    ('R8', 'Risk_Total'),
    ('R11', 'Risk_Total'),
    ('R19', 'Risk_Total'),
    ('R30', 'Risk_Total')
])
# RPN نرمال‌سازی شده از احتمالات اولیه
cpd_R1 = TabularCPD(variable='R1', variable_card=2,
    values=[[0.4], [0.6]])
cpd_R8 = TabularCPD(variable='R8', variable_card=2,
    values=[[0.3], [0.7]])
cpd_R11 = TabularCPD(variable='R11',
    variable_card=2, values=[[0.2], [0.8]])
```

استنتاج احتمالی نشان داد که عواملی نظیر عدم وجود اطلاعات سلامت دام (R1) و حمل‌ونقل غیربهداشتی (R8) به‌عنوان گره‌های کلیدی، نقش محوری در انتشار زنجیره‌ای ریسک ایفا می‌کنند و مدیریت این عوامل ریشه‌ای می‌تواند منجر به کاهش سیستماتیک ریسک‌های وابسته در سراسر شبکه گردد. همچنین نتایج نشان داد که ریسک‌هایی نظیر بقایای مواد دارویی (R5) و عدم رعایت اصول ذبح اسلامی (R12) به شدت تحت تأثیر عوامل اولیه قرار دارند و با کنترل R1 و R8 می‌توان احتمال وقوع آن‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

استفاده از روش شبکه بیزی نه تنها به شناسایی عوامل بحرانی کمک می‌کند، بلکه امکان ارزیابی سناریوهای مختلف (خوش‌بینانه و بدبینانه) و ارائه راهکارهای بهینه برای کاهش ریسک را نیز فراهم می‌سازد. با وجود مزایای متعدد، این پژوهش با محدودیت‌هایی نظیر دسترسی محدود به داده‌های تاریخی در برخی مراحل زنجیره تأمین و همچنین پیچیدگی مدل‌سازی و نیاز به منابع محاسباتی بالا مواجه بود. برای تحقیقات آینده، استفاده از فناوری‌های مکمل مانند اینترنت اشیا برای جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ، توسعه ابزارهای ترکیبی برای ادغام شبکه بیزی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، و گسترش پژوهش به سایر زنجیره‌های تأمین مانند محصولات دریایی و لبنیات توصیه می‌گردد. دستاوردهای این پژوهش علاوه بر ارتقای شفافیت و قابلیت ردیابی در زنجیره تأمین، ابزاری پویا جهت پیش‌بینی بحران‌ها و افزایش سطح اعتماد مصرف‌کنندگان فراهم می‌آورد.

۷- محدودیت‌ها

با وجود مزایای متعدد، این پژوهش محدودیت‌هایی نیز داشت:

با وجود مزایای متعدد، این پژوهش محدودیت‌هایی نیز دارد. یکی از چالش‌ها، دسترسی محدود به داده‌های تاریخی در برخی مراحل زنجیره تأمین بود که نیاز به استفاده از دانش کارشناسان را برجسته کرد. همچنین، پیچیدگی مدل‌سازی و نیاز به منابع محاسباتی بالا از دیگر محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود.

۸- پیشنهادات برای تحقیقات آینده

[4] A. Fuseini, T. G. Knowles, P. J. Hadley, and S. B. Wotton, "Halal stunning and slaughter: criteria for the assessment of dead animals," *Meat Sci.*, vol. 119, pp. 132–137, 2016.

[5] M. I. Khan, A. Haleem, and S. Khan, "Defining halal supply chain management," *Supply Chain Forum Int. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 122–131, 2018.

[6] E. Akyuz, O. Arslan, and O. Turan, "Application of fuzzy logic to fault tree and event tree analysis of the risk for cargo liquefaction on board ship," *Appl. Ocean Res.*, vol. 101, p. 102238, 2020.

[7] S. Chowdhury, O. Rodriguez-Espindola, P. Dey, and P. Budhwar, "Blockchain technology adoption for managing risks in operations and supply chain management: evidence from the UK," *Ann. Oper. Res.*, vol. 327, no. 1, pp. 539–574, 2023.

[8] J. F. W. Peeters, R. J. I. Basten, and T. Tinga, "Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 172, pp. 36–44, 2018.

[9] Y. Hu and P. Ghadimi, "A review of blockchain technology application on supply chain risk management," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 10, pp. 958–963, 2022.

[10] J. Zhou, Y. Liu, T. Xiahou, and T. Huang, "A novel FMEA-based approach to risk analysis of product design using extended choquet integral," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 71, no. 3, pp. 1264–1280, 2022.

[11] A. Sheel and V. Nath, "Effect of blockchain technology adoption on supply chain adaptability, agility, alignment and performance," *Manag. Res. Rev.*, vol. 42, no. 12, pp. 1353–1374, 2019.

[12] H. C. Wahyuni, M. A. Rosid, R. Azara, and A. Voak, "Blockchain technology design based on food safety and halal risk analysis in the beef supply chain with FMEA-FTA," *J. Eng. Res.*, Feb. 2024.

[13] K. P. Murphy, "Dynamic Bayesian networks: representation, inference and learning," Ph.D. dissertation, Univ. California, Berkeley, CA, USA, 2002.

```
cpd_R19 = TabularCPD(variable='R19',
variable_card=2, values=[[0.25], [0.75]])
cpd_R30 = TabularCPD(variable='R30',
variable_card=2, values=[[0.2], [0.8]])
# جدول احتمال شرطی برای ریسک کل
cpd_total = TabularCPD(
variable='Risk_Total',
variable_card=2,
values=[
[0.9, 0.6, 0.6, 0.3, 0.6, 0.3, 0.3, 0.1,
0.6, 0.3, 0.3, 0.1, 0.3, 0.1, 0.1, 0.01,
0.6, 0.3, 0.3, 0.1, 0.3, 0.1, 0.1, 0.01,
0.3, 0.1, 0.1, 0.01, 0.1, 0.01, 0.01, 0.001],
[0.1, 0.4, 0.4, 0.7, 0.4, 0.7, 0.7, 0.9,
0.4, 0.7, 0.7, 0.9, 0.7, 0.9, 0.9, 0.99,
0.4, 0.7, 0.7, 0.9, 0.7, 0.9, 0.9, 0.99,
0.7, 0.9, 0.9, 0.99, 0.9, 0.99, 0.99, 0.999]
evidence=['R1', 'R8', 'R11', 'R19', 'R30'],
evidence_card=[2, 2, 2, 2, 2])
```

افزودن به مدل

```
model.add_cpds(cpd_R1, cpd_R8, cpd_R11, cpd_R19,
cpd_R30, cpd_total)
```

بررسی مدل

```
model.check_model()
```

استنتاج

```
inference = VariableElimination(model)
```

محاسبه احتمال ریسک کل

```
result = inference.query(variables=['Risk_Total'])
```

```
print(result)
```

تحلیل شرطی (مثال)

```
result_cond =
```

```
inference.query(variables=['Risk_Total'],
```

```
evidence={'R11': 1})
```

```
print(result_cond)
```

این مدل امکان محاسبه احتمال وقوع ریسک کل، انجام

تحلیل شرطی و بررسی تأثیر عوامل ریسک مختلف بر

خروجی سیستم را فراهم می‌سازد.

۱۰- مراجع

[1] Z. Gizaw, "Public health risks related to food safety issues in the food market: a systematic literature review," *Environ. Health Prev. Med.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–21, 2019.

[2] L. Manning and J. M. Soon, "Food safety, food fraud, and food defense: a fast evolving literature," *J. Food Sci.*, vol. 81, no. 4, pp. R123–R132, 2016.

[3] B. C. Britton, I. Sarr, and H. F. Oliver, "Enterobacteriaceae, coliform, yeast, and mold contamination patterns in peanuts compared to production, storage, use practices," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 360, p. 109437, 2021.

- [25] Y. Bouzembrak, N. Liu, W. Mu, A. Gavai, L. Manning, F. Butler, and H. J. P. Marvin, "Data driven food fraud vulnerability assessment using Bayesian Network: spices supply chain," *Food Control*, vol. 164, p. 110616, Oct. 2024.
- [26] M. J. Nauta, "A modular process risk model structure for quantitative microbiological risk assessment and its application in an exposure assessment of *Bacillus cereus* in a REPFED," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 73, no. 2–3, pp. 297–307, Mar. 2002.
- [27] M. R. Amin, M. A. Zaman, and J. N. Bhuiyan, "A comprehensive review of Bayesian network applications in supply chain risk management," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 123456–123470, 2022.
- [28] M. A. Shaffiei, N. A. A. Majid, and N. A. M. Zin, "Integrated risk to food safety and halal using a Bayesian Network model," *Supply Chain Forum*, vol. 21, no. 4, pp. 260–273, Oct. 2020.
- [29] Y. Ma, W. Juan, and S. Wang, "Risk assessment of fresh cold chain logistics based on fuzzy DBN," *J. Transp. Inf. Saf.*, vol. 43, no. 4, pp. 160–167, 2025.
- [30] D. Heckerman, "A tutorial on learning with Bayesian networks," in *Innovations in Bayesian Networks*, Springer, 2008, pp. 33–82.
- [14] F. V. Jensen and T. D. Nielsen, *Bayesian Networks and Decision Graphs*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2007.
- [15] J. Pearl, *Causality: Models, Reasoning, and Inference*, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2009.
- [16] K. B. Laskey and S. M. Mahoney, "Network fragments: representing knowledge for constructing probabilistic models," in *Proc. 13th Conf. Uncertainty Artif. Intell. (UAI)*, Providence, RI, USA, Aug. 1997, pp. 334–341.
- [17] O. Pourret, P. Naim, and B. G. Marcot, *Bayesian Networks: A Practical Guide to Applications*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2008.
- [18] N. Fenton and M. Neil, *Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [19] A. Darwiche, *Modeling and Reasoning with Bayesian Networks*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2009.
- [20] J. Zhou, Y. Liu, T. Xiahou, and T. Huang, "Bayesian analysis for food safety and halal certification," *Int. J. Food Saf.*, vol. 45, no. 2, pp. 75–84, 2023.
- [21] H. C. Wahyuni, I. Vanany, I. Gunawan, and J. Mulyono, "Improving halalness and food safety management systems in the Indonesian broiler supply chain: an interpretive structural modeling and Bayesian network approach," *J. Islamic Mark.*, vol. 16, no. 4, pp. 1145–1173, Dec. 2024.
- [22] S. Carpitella, J. Izquierdo, M. Plajner, and J. Vomlel, "Improved industrial risk analysis via a human factor-driven Bayesian network approach," in *Analytics Modeling in Reliability and Machine Learning and Its Applications*, Springer, 2025, pp. 19–42.
- [23] M. Abolghasemi, V. Khodakarami, and A. Tehranifard, "A new approach for supply chain risk management: mapping SCOR into Bayesian network," *J. Ind. Eng. Manage.*, vol. 8, no. 1, pp. 23–41, 2015.
- [24] Y. Bouzembrak and H. J. P. Marvin, "Application of Bayesian networks in the development of herbs and spices sampling monitoring system," *Food Control*, vol. 83, pp. 38–44, Jan. 2018.

Risk Assessment and Analysis of Safety and Halal Risks in the Cattle Supply Chain Using Bayesian Network

Jafar Gheydar Khalajani¹, Mahsa Akbari², Reza Ahmadi^{3*}

1- Associate Professor, Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2- PhD in Public Administration (Comparative Studies and Development), Department of Public Administration, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran

3- Corresponding Author: PhD Candidate in Industrial Engineering (Quality and Productivity), Faculty of Industrial Engineering and Management, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received:

Received in revised form:

Accepted:

Available online:

*Correspondence:

reza_ahmadi@mut.ac.ir

Keywords:

Food safety

Halal

Beef supply chain

Bayesian network analysis,

Risk management

ABSTRACT

Background and Objective: Food safety and compliance with halal standards constitute strategic priorities within the cattle supply chain. However, structural complexities and inherent uncertainties often render effective risk management a significant challenge. This research aims to develop a systematic framework using Bayesian Network (BN) analysis to identify, model causal relationships, and quantitatively evaluate hazards.

Methodology: The research process involved extracting key risk factors, establishing probabilistic dependency structures via Conditional Probability Tables (CPTs), and prioritizing them based on their impact on safety and halal indicators. Expert panel data and secondary sources were utilized for model calibration and validation.

Findings: Results from sensitivity analysis revealed that factors such as "lack of animal health records" and "unhygienic transportation" serve as critical nodes, playing a pivotal role in the chain-like propagation of risks. Probabilistic inference indicates that focusing on the management of these root drivers leads to a systemic reduction of dependent risks throughout the entire network.

Conclusion: Beyond enhancing transparency and traceability in the supply chain, this approach provides a dynamic tool for crisis prediction and significantly strengthens consumer trust.

Keywords: Food Safety, Halal Standards, Cattle Supply Chain, Bayesian Networks, Risk Management, Probabilistic Inference.