

طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار عنب با رویکرد اقتصاد چرخشی تحت شرایط عدم قطعیت

حامد دارونی، فرناز برزین پور* و امین رضا کلانتری خلیل آباد

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*نویسنده مسئول (barzinpour@iust.ac.ir)

چکیده

زنجیره‌های تأمین کشاورزی با چالش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و نیز عدم قطعیت در عرضه و قیمت مواجه‌اند. این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته عنب مبتنی بر اقتصاد چرخشی ارائه می‌کند. اهداف مدل شامل کمینه‌سازی هزینه کل، بیشینه‌سازی فرصت‌های اشتغال و ارتقای پاسخگویی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان تسهیلات است. تبدیل ضایعات به زغال زیستی و اعمال محدودیت‌های انتشار دی‌اکسید کربن مهم‌ترین مؤلفه‌های زیست‌محیطی مدل هستند. عدم قطعیت ظرفیت باغات و قیمت خرید محصول با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای و سه سناریوی خوش‌بینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه مدل‌سازی شده است. برای حل مدل، روش جدید محدودیت افسیلون تقویت شده (AUGMECON^۲) به کار گرفته شد تا جبهه پارتو و مبادلات میان هزینه، اشتغال و پاسخگویی آشکار شود. نتایج مطالعه موردی استان خراسان جنوبی نشان می‌دهد چارچوب پیشنهادی می‌تواند استقرار تسهیلات و جریان‌ها را به گونه‌ای تعیین کند که ضمن کاهش هزینه، اشتغال و پایداری زیست‌محیطی به طور هم‌زمان بهبود یابد.

کلمات کلیدی: زنجیره تأمین حلقه بسته؛ اقتصاد چرخشی؛ برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای؛ عنب؛ پایداری.

Designing a sustainable jujube supply chain network using a circular economy approach under uncertainty

Hamed Darouni, Farnaz Barzinpour* and Amin Reza Kalantari Khalil Abad

School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*Corresponding author: barzinpour@iust.ac.ir

Abstract

Agricultural supply chains face mounting challenges in balancing economic efficiency with social and environmental sustainability, particularly under conditions of supply and price uncertainty. Jujube is a strategic horticultural product in Iran, but its current supply chain suffers from high waste, weak coordination, and lost value-adding opportunities. This paper presents a multi-objective mixed-integer linear programming model for designing a sustainable closed-loop jujube supply chain based on circular economy principles. The model simultaneously minimizes total cost, maximizes job creation, and improves responsiveness. Responsiveness is measured through the reliability of processing and distribution facilities, so the model selects more reliable nodes when it allocates flows. The environmental dimension is improved by converting all agricultural residues and processing waste into biochar and by imposing a strict CO_2 emission cap on all echelons of the network. Uncertainty in orchard capacity and purchase prices, and their inverse relationship, is modeled by a two-stage stochastic programming approach with optimistic, realistic, and pessimistic scenarios. The proposed framework is applied to a real case study in South Khorasan Province, which produces about 98% of Iran's jujube. The network includes several types of processing facilities and multiple domestic market segments. The stochastic multi-objective model is solved by the AUGMECON² method in order to generate the complete Pareto front and reveal the trade-offs among cost, employment, and responsiveness. Results show that the integrated design can significantly reduce total cost while increasing both job opportunities and environmental performance compared with current fragmented practices. The analysis of Pareto solutions highlights the high social and service-level cost of aggressive cost minimization and helps decision-makers select balanced policies. Sensitivity analyses on demand, shortage cost, transport cost, and the carbon cap, as well as on the presence of the biochar facility, confirm that the results are robust. These tests show that the model is practically useful for strategic decision support in agricultural supply chains under uncertainty.

Keywords: Closed-loop supply chain, Circular economy, Two stage stochastic programming, Jujube, Sustainability.

۱. مقدمه

امروزه زنجیره‌های تأمین کشاورزی با چالش‌های پیچیده‌ای مواجه‌اند که از جمله می‌توان به تغییرات مستمر در تقاضای مصرف‌کنندگان، الزامات پایداری محیطی و اجتماعی، مقررات دولتی و محدودیت‌های مربوط به ردیابی و شفافیت اشاره کرد. پیچیدگی این مسائل در کشورهای در حال توسعه مانند ایران که بخش کشاورزی نقش محوری در اقتصاد و امنیت غذایی دارد، به مراتب بیشتر است. در این راستا، اقتصاد چرخشی با تأکید بر اصول کاهش، استفاده مجدد و بازیافت، رویکردی نوآورانه برای دستیابی به تولید پایدار ارائه می‌دهد [۱].

در میان محصولات باغی ایران، عنب علی‌رغم ارزش غذایی و دارویی فراوان و پتانسیل ایجاد زنجیره ارزش در صنایع مختلف، کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. استان خراسان جنوبی با تولید ۹۸ درصد عنب کشور، قطب اصلی و انحصاری این محصول است. استان‌های خراسان رضوی و کرمان نیز به صورت محدود (کمتر از ۲ درصد) به تولید عنب می‌پردازند. با این حال، زنجیره تأمین عنب در حال حاضر از فقدان یکپارچگی رنج می‌برد که منجر به هدررفت منابع، آسیب‌های زیست‌محیطی، و از دست رفتن فرصت‌های ارزش‌آفرینی شده است.

پایداری در زنجیره‌های تأمین کشاورزی مفهومی چندبُعدی است که سه جنبه اصلی را دربرمی‌گیرد: بُعد اقتصادی که بر بهینه‌سازی هزینه‌ها تأکید دارد، بُعد اجتماعی که به ایجاد فرصت‌های شغلی و بهبود کیفیت زندگی جوامع محلی می‌پردازد، و بُعد زیست‌محیطی که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را هدف قرار می‌دهد [۲]. پژوهش‌های اخیر همچنین بر اهمیت

پاسخگویی به‌عنوان عامل کلیدی در موفقیت زنجیره‌های تأمین تأکید دارند [۳]. پاسخگویی به معنای توانایی سیستم در برآوردن تقاضای مشتریان در زمان مناسب و با کیفیت مطلوب است. در زنجیره‌های تأمین کشاورزی که محصولات فاسدشدنی دارند، این موضوع اهمیت دوجندانی پیدا می‌کند. یکی از رویکردهای مؤثر برای سنجش پاسخگویی، استفاده از قابلیت اطمینان سیستم است [۴]. قابلیت اطمینان به احتمال عملکرد صحیح تسهیلات در بازه زمانی مشخص اشاره دارد و می‌تواند نشان‌دهنده قدرت زنجیره تأمین در تحویل به‌موقع محصول باشد [۵]. این رویکرد به‌ویژه در زنجیره‌های تأمین با تسهیلات متعدد که خرابی یکی از آنها می‌تواند کل سیستم را مختل کند، کاربرد دارد.

یکی از چالش‌های اساسی در طراحی زنجیره‌های تأمین کشاورزی، مدیریت عدم قطعیت‌های ناشی از نوسانات اقلیمی است. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند بر عرضه محصول، قیمت خرید تأثیر بگذارند. برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای با تفکیک تصمیمات استراتژیک که پیش از تحقق عدم قطعیت اتخاذ می‌شوند از تصمیمات عملیاتی که پس از آشکار شدن شرایط گرفته می‌شوند، ابزاری قدرتمند برای ایجاد زنجیره‌های تأمین انعطاف‌پذیر است [۶].

با توجه به چالش‌های مطرح‌شده، این پژوهش مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ای برای زنجیره تأمین حلقه بسته عنب ارائه می‌دهد که سه هدف را به‌طور همزمان دنبال می‌کند: کمینه‌سازی هزینه‌های کل، بیشینه‌سازی فرصت‌های شغلی، و بیشینه‌سازی پاسخگویی از طریق قابلیت اطمینان. نوآوری‌های کلیدی این پژوهش عبارت‌اند از: اول، ادغام اصول اقتصاد چرخشی از طریق تبدیل ضایعات کشاورزی به زغال زیستی که نه تنها آلودگی را کاهش می‌دهد بلکه

محصولی با ارزش افزوده ایجاد می‌کند. دوم، اعمال محدودیت‌های سخت‌گیرانه بر انتشار دی‌اکسید کربن در تمام مراحل زنجیره. سوم، مدیریت عدم قطعیت عرضه و قیمت با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای و در نظر گرفتن سناریوهای مختلف. کارایی مدل پیشنهادی از طریق مطالعه موردی در استان خراسان جنوبی ارزیابی شده است.

با در نظر گرفتن اهمیت موضوع، این پژوهش به دنبال پاسخ به سوالات زیر است:

۱. چگونه می‌توان زنجیره تأمین عنب را به‌گونه‌ای طراحی کرد که اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌طور همزمان محقق شوند؟
۲. اصول اقتصاد چرخشی چگونه می‌توانند در زنجیره تأمین عنب پیاده‌سازی شوند و چه تأثیری بر عملکرد کلی سیستم خواهند داشت؟
۳. استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای در مقایسه با رویکردهای قطعی چه مزیت‌هایی در مدیریت عدم قطعیت‌های زنجیره تأمین عنب دارد؟

ادامه این مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است: بخش ۲ به مرور ادبیات موضوع می‌پردازد. بخش ۳ شرح مسئله و مفروضات را بیان می‌کند. بخش ۴ فرمول‌بندی ریاضی مدل را ارائه می‌دهد. بخش ۵ روش حل مدل را توضیح می‌دهد. بخش ۶ مطالعه موردی و نتایج محاسباتی را تشریح می‌کند. در نهایت، بخش ۷ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای پژوهشی آینده را مطرح می‌کند.

۲. مرور ادبیات

این بخش مطالعات پیشین در حوزه زنجیره‌های تأمین کشاورزی را با تمرکز بر چهار محور اقتصاد چرخشی، پایداری، پاسخگویی و مدل‌سازی عدم قطعیت بررسی می‌کند.

۱.۲. طراحی زنجیره‌های تأمین کشاورزی

زنجیره‌های تأمین کشاورزی نقش حیاتی در تضمین امنیت غذایی دارند. مطالعات مروری اخیر بر برنامه‌ریزی استراتژیک، تخصیص منابع و ایجاد ساختارهای پایدار تأکید داشته‌اند. کالیموتو^۱ و همکاران (۲۰۲۴) چارچوبی جامع برای تصمیم‌گیری هوشمند در زنجیره تأمین کشاورزی ارائه کردند که فرصت‌ها و چالش‌های کشورهای در حال توسعه را شناسایی می‌کند^[۷]. مورنو-میراندا و دریس^۲ (۲۰۲۲) با مرور نظام‌مند ادبیات، مکانیزم‌های هماهنگی را در ارزیابی پایداری زنجیره‌های غذایی یکپارچه کردند و نشان دادند که هماهنگی میان بازیگران زنجیره چگونه می‌تواند به پایداری کمک کند^[۸]. یاداو^۳ و همکاران (۲۰۲۲) مروری سیستماتیک بر زنجیره تأمین محصولات کشاورزی ارائه دادند که چالش‌ها، طراحی شبکه و معیارهای سنجش عملکرد را بررسی می‌کند و شکاف‌های تحقیقاتی را شناسایی می‌کند^[۹].

گذار از اقتصاد خطی به چرخشی تحولی بنیادین در این حوزه ایجاد کرده است. باناسیک^۴ و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی پیشگامانه، مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای زنجیره تأمین قارچ توسعه دادند که اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را به‌طور همزمان در

^۱ Kalimuthu

^۲ Moreno-Miranda and Dries

^۳ Yadav

^۴ Banasik

نظر می‌گیرد^[۱۰]. این مطالعه از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط استفاده کرد و با الگوریتم‌های فراابتکاری حل شد. نتایج نشان داد که بستن حلقه زنجیره از طریق استفاده مجدد از ضایعات می‌تواند هم‌زمان هزینه‌ها را کاهش و اثرات زیست‌محیطی را بهبود دهد. لیائو^۱ و همکاران (۲۰۲۰) مدل شش سطحی برای زنجیره تأمین حلقه بسته مرکبات ارائه کردند که شامل تولیدکنندگان، کارخانه‌های فرآوری، مراکز توزیع، خرده‌فروشان، مشتریان و مراکز بازیافت است^[۱۱]. این مدل دوهدفه هزینه کل و انتشار کربن را بهینه می‌کند و با روش اپسیلون-محدودیت حل شد. یافته‌های آنها امکان تعادل میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را تأیید کرد.

ایجاد ارزش افزوده محور اصلی پژوهش‌های اخیر بوده است. صالحی امیری و همکاران (۲۰۲۱) مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای زنجیره تأمین حلقه بسته گردو معرفی کردند^[۱۲]. این مدل چهار هدف شامل کمینه‌سازی هزینه، کمینه‌سازی انتشار کربن، بیشینه‌سازی اشتغال و بیشینه‌سازی پاسخگویی را دنبال می‌کند. آنها از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای حل استفاده کردند و نشان دادند که طراحی یکپارچه زنجیره می‌تواند تعادل مناسبی میان اهداف متضاد ایجاد کند. چراغعلی‌پور و همکاران (۲۰۱۹) مدل دوسطحی برای زنجیره تأمین برنج توسعه دادند که در آن تصمیمات استراتژیک در سطح بالا و تصمیمات عملیاتی در سطح پایین اتخاذ می‌شوند^[۱۳]. این مدل با الگوریتم‌های تکاملی حل شد و اصول ارزش‌آفرینی را در طراحی زنجیره‌های پایدار گنجانده.

مطالعات روی محصولات دیگر نیز پتانسیل ارزش‌آفرینی در اقتصاد چرخشی را برجسته کرده‌اند. چوهان و همکاران (۲۰۲۱) زنجیره تأمین حلقه بسته نیشکر را با رویکردهای فراابتکاری طراحی کردند و نشان دادند که بازیافت ضایعات می‌تواند منبع درآمد قابل توجهی باشد^[۱۴]. صالحی امیری و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه زنجیره تأمین آووکادو، عوامل اجتماعی را به‌طور صریح در مدل گنجانده و اثر آنها را بر طراحی شبکه بررسی کردند^[۱۵]. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن عوامل اجتماعی مانند ایجاد اشتغال و توسعه مناطق محروم می‌تواند تغییرات قابل توجهی در ساختار بهینه زنجیره ایجاد کند.

۲.۲. پایداری و پاسخگویی در زنجیره‌های تأمین کشاورزی

توجه به ابعاد چندگانه پایداری منجر به توسعه مدل‌های جامع‌تر شده است. چراغعلی‌پور و همکاران (۲۰۱۸) مدل دوهدفه برای زنجیره تأمین مرکبات ارائه کردند که کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی پاسخگویی را هدف قرار داده بود^[۱۶]. این مطالعه از الگوریتم‌های مبتنی بر پارتو برای حل استفاده کرد و جبهه پارتو را برای تصمیم‌گیرندگان ارائه داد. پاسخگویی به‌عنوان تعداد مشتریانی که تقاضایشان به‌طور کامل برآورده می‌شود تعریف شده بود. روغنیان و چراغعلی‌پور (۲۰۱۹) این مدل را با افزودن هدف سوم یعنی کمینه‌سازی انتشار دی‌اکسید کربن گسترش دادند و مدل سه‌هدفه ارائه کردند^[۱۷]. آنها از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه شامل NSGA-II و MOPSO استفاده کردند و عملکرد آنها را مقایسه کردند. نتایج نشان داد که NSGA-II جواب‌های متنوع‌تری تولید می‌کند.

^۱ Liao

رویکردهای جامع‌تر و چندبُعدی شامل مطالعات متعددی است که ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را به‌طور متوازن در نظر گرفته‌اند. سیدانلو^۱ و همکاران (۲۰۲۲) مدل چندهدفه برای زنجیره تأمین حلقه بسته زیتون در صنعت روغن توسعه دادند [۱۸]. این مدل پنج هدف شامل کمینه‌سازی هزینه، کمینه‌سازی انتشار کربن، بیشینه‌سازی اشتغال، بیشینه‌سازی رضایت اجتماعی و بیشینه‌سازی کیفیت محصول را دنبال می‌کرد. آنها از الگوریتم‌های ترکیبی فراابتکاری برای حل مسئله مقیاس بزرگ استفاده کردند. گودرزیان و همکاران (۲۰۲۳) چارچوب جامعی برای زنجیره تأمین مرکبات ارائه دادند که اصول اقتصاد چرخشی و پایداری را یکپارچه می‌کند [۱۹]. آنها از الگوریتم‌های مبتنی بر پارتو استفاده کردند و تأثیر پارامترهای مختلف را بر جبهه پارتو بررسی کردند.

مطالعات اخیر روی محصولات متنوع، طیف وسیعی از معیارهای پایداری را بهینه کرده‌اند. قلیان جویباری و همکاران (۲۰۲۳) زنجیره تأمین حلقه بسته سویا را طراحی کردند که علاوه بر هزینه و انتشار کربن، مصرف آب را نیز بهینه می‌کرد [۲۰]. این مطالعه اهمیت منابع آب در کشاورزی پایدار را برجسته کرد. در مطالعه دیگری، قلیان جویباری و همکاران (۲۰۲۴) مدل جامعی برای زنجیره تأمین محصولات کشاورزی ارائه دادند که شش هدف شامل هزینه، انتشار کربن، رضایت مشتری، اشتغال، کیفیت محصول و مصرف آب را بهینه می‌کرد [۲۱]. آنها از رویکرد فراابتکاری عمیق استفاده کردند که قدرت حل مسائل بسیار پیچیده را داشت. شاهسونی و همکاران (۲۰۲۴) زنجیره تأمین مرکبات را با رویکرد اقتصاد چرخشی طراحی کردند و نشان دادند

که بازیافت و استفاده مجدد از محصولات جانبی می‌تواند سودآوری را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد [۲۲].

این تنوع در محصولات و معیارها نشان‌دهنده بلوغ این حوزه پژوهشی و درک عمیق‌تر از پیچیدگی‌های زنجیره‌های تأمین کشاورزی است. همچنین مشخص می‌کند که هر محصول کشاورزی ویژگی‌های خاص خود را دارد که نیازمند مدل‌سازی اختصاصی است.

۳.۲. عدم قطعیت در زنجیره‌های تأمین کشاورزی

مدیریت عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و نوسانات بازار چالش اساسی در طراحی زنجیره‌های تأمین کشاورزی است. کالیموتو^۲ و همکاران (۲۰۲۴) چارچوبی جامع برای افزایش شفافیت و دید در زنجیره تأمین پس از برداشت ارائه کردند که نقش فناوری‌های دیجیتال را در کاهش عدم قطعیت برجسته می‌کند [۷].

پژوهشگران برای مواجهه با عدم قطعیت، از تکنیک‌های مختلف بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند. بهزادی و همکاران (۲۰۱۸) مروری جامع بر مدل‌های تصمیم کمی برای مدیریت ریسک در زنجیره تأمین کشاورزی ارائه دادند [۲۳]. این مطالعه رویکردهای مختلف شامل برنامه‌ریزی تصادفی، بهینه‌سازی مقاوم و برنامه‌ریزی فازی را مقایسه کرد و مزایا و معایب هر یک را تشریح نمود. بورودین^۳ و همکاران (۲۰۱۶) مروری بر وضعیت هنر مدیریت عدم قطعیت در زنجیره تأمین کشاورزی ارائه دادند و نشان دادند که انتخاب روش مناسب بستگی به نوع عدم قطعیت و اطلاعات موجود دارد [۲۴].

^۱ Kalimuthu

^۲ Borodin

^۳ Seydanlou

بهینه‌سازی مقاوم در برخی مطالعات کاربرد یافته است. کشاورز قربانی و پسندیده (۲۰۲۲) الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای بهینه‌سازی مدل دوهدفه زنجیره تأمین محصولات تازه توسعه دادند [۲۵]. این مدل هزینه و انتشار کربن را کمینه می‌کند و از رویکرد مقاوم برای مدیریت عدم قطعیت در تقاضا و زمان فساد استفاده می‌نمود. قلیان جویباری و همکاران (۲۰۲۳) زنجیره تأمین زعفران را با رویکرد بهینه‌سازی مقاوم طراحی کردند که عدم قطعیت در قیمت، تقاضا و عرضه را مدیریت می‌کرد [۳].

رویکردهای ترکیبی نیز توسط برخی محققان استفاده شده است. حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۱) زنجیره تأمین گندم را با استفاده از بهینه‌سازی استراتژیک تحت عدم قطعیت طراحی کردند [۲۶]. این مطالعه از ترکیب برنامه‌ریزی تصادفی و مقاوم استفاده کرد تا هم از اطلاعات احتمالی بهره‌برد و هم در برابر بدترین حالات محافظت کند. کلانتری خلیل آباد و همکاران (۲۰۲۳) مدل زنجیره تأمین انار را با رویکرد اقتصاد چرخشی تحت عدم قطعیت دینامیک توسعه دادند [۲۷]. آنها از برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای استفاده کردند که امکان تصمیم‌گیری پویا را در طول زمان فراهم می‌کرد.

گیلانی و صاحبی (۲۰۲۱) مدل بهینه‌سازی مقاوم چندهدفه برای زنجیره تأمین نیشکر به ارائه دادند [۲۸]. این مدل سه هدف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را تحت عدم قطعیت بهینه می‌کند. باقی زاده و همکاران (۲۰۲۲) زنجیره تأمین پایدار محصولات کشاورزی را با در نظر گرفتن پیوند آب-انرژی-غذا و استفاده از سیستم صف طراحی کردند [۲۹]. آنها از برنامه‌ریزی مقاوم امکانی ترکیبی برای مدیریت عدم قطعیت فازی و تصادفی استفاده کردند.

نوآوری‌های اخیر در این حوزه شامل توسعه روش‌های جدید است. فروزش و همکاران (۲۰۲۲) برنامه‌ریزی احتمالی مقاوم مبتنی بر منطق فازی نوع ۲ بازه‌ای برای محصولات فاسدشدنی توسعه دادند [۳۰]. این روش امکان مدیریت همزمان عدم قطعیت فازی و تصادفی را فراهم می‌کند. آقاجانی و همکاران (۲۰۲۴) مدل یکپارچه چندهدفه برای برنامه‌ریزی زنجیره تأمین محصولات غذایی تحت پارامترهای نامشخص ارائه دادند که از مطالعه موردی کنسروجات استفاده می‌کرد [۳۱]. در نهایت، رهبری و همکاران (۲۰۲۵) مدل برنامه‌ریزی تصادفی مقاوم چندهدفه مبتنی بر سناریو با محدودیت شانس برای زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار مواد غذایی کنسرو شده طراحی کردند [۳۲]. این مدل ترکیبی از برنامه‌ریزی تصادفی و مقاوم بود که مزایای هر دو رویکرد را داشت.

۴.۲. شکاف‌های تحقیقاتی

با وجود مطالعات گسترده در حوزه زنجیره‌های تأمین محصولات کشاورزی، شکاف‌های قابل توجهی در ادبیات این حوزه وجود دارد. یکی از این شکاف‌ها عدم توجه به محصول عنب است. عنب علی‌رغم اهمیت اقتصادی و اجتماعی در ایران و پتانسیل بالای ارزش‌آفرینی، از مطالعه باقی‌مانده است. شکاف تحقیقاتی تنها به نام محصول محدود نمی‌شود، بلکه عنب ویژگی‌های منحصربه‌فردی دارد که تفاوت‌های ساختاری قابل توجهی در طراحی زنجیره تأمین آن ایجاد می‌کند.

یکی از این تفاوت‌ها، تنوع استثنایی محصولات قابل استخراج از عنب است. برخلاف اکثر محصولات باغی که عمدتاً میوه آنها استفاده می‌شود، عنب دارای پنج جریان محصول مستقل است: میوه در سه سطح

کیفیت، برگ با کاربرد دارویی و آرایشی، چوب برای صنایع مبلمان و آلات موسیقی، روغن هسته، و عصاره مایع. هر جریان نیازمند تسهیلات فرآوری، شرایط نگهداری و بازار متفاوتی است. این تنوع پیچیدگی زیادی در طراحی شبکه ایجاد می‌کند زیرا تصمیمات مکان‌یابی باید امکان پردازش همزمان و بهینه همه این محصولات را فراهم کند. در مطالعات قبلی، حتی آنهایی که محصولات جانبی را در نظر گرفته‌اند، حداکثر دو یا سه جریان محصول داشته‌اند.

علاوه بر این، ساختار فرآوری عنب به مراتب پیچیده‌تر است. در مطالعات کشاورزی معمولاً ۲ تا ۳ نوع تسهیل فرآوری در نظر گرفته می‌شود، اما در عنب نیاز به هشت نوع تسهیل است: مراکز درجه‌بندی، مراکز بسته‌بندی، کارخانه خشک‌کردن، کارخانه استخراج عصاره، کارخانه روغن‌کشی، کارخانه فرآوری برگ، کارخانه فرآوری چوب، و تأسیسات تولید بیوپار. این تنوع فضای تصمیم‌گیری را به‌طور قابل توجهی گسترش می‌دهد و پیچیدگی محاسباتی و مدیریتی مسئله را چندین برابر می‌کند.

همچنین، تمرکز جغرافیایی شدید تولید، چالش‌های لجستیکی خاصی ایجاد می‌کند. با تولید ۹۸ درصد عنب در خراسان جنوبی، این محصول یکی از متمرکزترین محصولات باغی کشور است. این تمرکز دو پیامد مهم دارد: از یک سو، تصمیم‌گیری درباره مکان تسهیلات اهمیت بیشتری پیدا می‌کند زیرا باید بین نزدیکی به منبع تولید و نزدیکی به بازارهای مصرف تعادل ایجاد شود. از سوی دیگر، هزینه‌های حمل‌ونقل به دلیل فاصله زیاد خراسان جنوبی از مراکز اصلی مصرف، نقش تعیین‌کننده‌تری دارد. در مطالعات قبلی روی محصولاتی مانند مرکبات که تولید آنها در چندین استان پراکنده است، این چالش وجود نداشت.

همچنین، الگوی توزیع عنب متفاوت است. در حالی که بیشتر مطالعات قبلی با ۲ الی ۴ بازار هدف روبه‌رو بودند، عنب به هفت بازار کاملاً متفاوت ارسال می‌شود: بازارهای عمومی، صنایع غذایی و نوشیدنی، صنایع آرایشی، صنایع دارویی، صنایع مبلمان، صنایع آلات موسیقی، و بازارهای جانبی برای بیوپار. هر بازار تقاضای خاص خود را دارد که این تنوع پیچیدگی تخصیص محصول را افزایش می‌دهد.

این درحالی است که فرصت اقتصاد چرخشی در عنب به مراتب بالاتر است. اگرچه برخی مطالعات قبلی به بازیافت محدود ضایعات پرداخته‌اند، در عنب امکان تبدیل همه ضایعات به بیوپار وجود دارد. ترکیب شیمیایی خاص چوب و برگ عنب، آن را به ماده اولیه بسیار مناسبی برای تولید بیوپار با کیفیت بالا تبدیل می‌کند. بیوپار تولیدشده علاوه بر کاهش انتشار کربن، می‌تواند در همان باغات عنب استفاده شود که یک چرخه کاملاً حلقه بسته ایجاد می‌کند.

همچنین، اکثر مطالعات قبلی به یک یا دو بُعد پایداری پرداخته‌اند. برخی فقط هزینه و انتشار کربن را بهینه کرده‌اند، برخی دیگر هزینه و اشتغال را در نظر گرفته‌اند. این پژوهش با مدلسازی همزمان هر سه بُعد اقتصادی (کمینه‌سازی هزینه)، اجتماعی (بیشینه‌سازی اشتغال ثابت و متغیر)، و زیست‌محیطی (محدودیت سخت‌گیرانه انتشار کربن)، رویکردی جامع‌تر برای پایداری ارائه می‌دهد. علاوه بر سه بُعد کلاسیک پایداری، این پژوهش بُعد چهارمی را نیز در نظر می‌گیرد که به پاسخگویی و کیفیت خدمات‌رسانی مربوط می‌شود. پاسخگویی از طریق قابلیت اطمینان عملکرد تسهیلات مدلسازی شده است. قابلیت اطمینان به احتمال عملکرد بدون خرابی تسهیلات در بازه زمانی مشخص اشاره دارد و نشان‌دهنده توانایی سیستم در

ارزش آفرینی و بهره‌برداری از محصولات جانبی طراحی شده است.

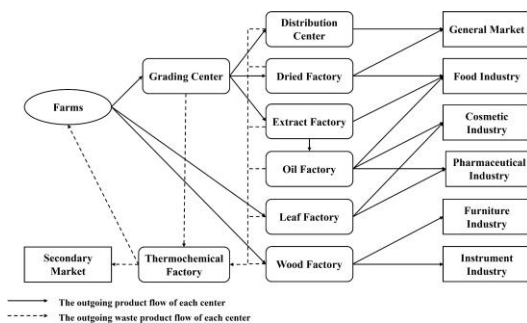


Figure 1. Value-based closed-loop supply chain network for jujube fruit^[۳۳].

شکل ۱. شبکه زنجیره تامین حلقه بسته مبتنی بر ارزش میوه عناب^[۳۳].

هر یک از این دسته‌ها مسیر متفاوتی را در زنجیره تأمین طی می‌کنند. میوه‌های درجه یک پس از ذخیره‌سازی مناسب، به مراکز بسته‌بندی و توزیع ارسال شده و از آنجا راهی بازارهای مصرف می‌شوند. میوه‌های درجه دو که عمدتاً شامل میوه‌های کوچک‌تر یا رسیده‌تر هستند، به کارخانه‌های فرآوری میوه خشک هدایت می‌شوند. محصول نهایی این کارخانه‌ها، یعنی عناب خشک، هم در بازارهای عمومی عرضه می‌شود و هم به عنوان ماده اولیه در صنایع غذایی و نوشیدنی کاربرد دارد.

میوه‌های درجه سه که شامل میوه‌های نارس یا آسیب‌دیده می‌شوند، به کارخانه‌های استخراج منتقل می‌گردند. این کارخانه‌ها عصاره مایع عناب را استخراج کرده و برای صنایع غذایی و نوشیدنی ارسال می‌کنند. هسته‌های باقی‌مانده از این فرآیند نیز دور ریخته نمی‌شوند، بلکه به کارخانه‌های روغن‌کشی فرستاده می‌شوند تا روغن هسته عناب، محصولی با ارزش برای صنایع غذایی، آرایشی و دارویی، از آن‌ها استخراج شود.

تحویل به‌موقع محصول به مشتریان است. این معیار اگرچه مستقیماً جزء سه بُعد کلاسیک پایداری نیست، اما برای پایداری بلندمدت زنجیره تأمین ضروری است زیرا عدم پاسخگویی منجر به از دست رفتن مشتریان و در نهایت شکست اقتصادی و اجتماعی زنجیره می‌شود. مدل با الگوریتم AUGMECON^۲ حل می‌شود که جنبه پارتوی کامل را برای هر چهار هدف تولید کرده و تعاملات میان آنها را نشان می‌دهد.

علاوه بر این، کمبود توجه به مدیریت عدم قطعیت در زنجیره‌های تأمین کشاورزی، به‌ویژه ارتباط متقابل عرضه و قیمت، در مطالعات قبلی مشهود است. این پژوهش با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای و سناریوهایی که همبستگی معکوس عرضه و قیمت را مدل می‌کنند، مدل‌سازی واقع‌گرایانه‌تری ارائه کرده و با مطالعه موردی در خراسان جنوبی، کاربردپذیری رویکرد پیشنهادی را تأیید می‌کند.

۳. شرح مسئله

مدیران زنجیره تأمین کشاورزی، به‌ویژه در صنعت عناب ایران، با چالش استخراج حداکثر ارزش از منابع مواجه‌اند. این صنعت، با وجود پتانسیل بالا، از فقدان زنجیره تأمین یکپارچه و کارآمد رنج می‌برد که منجر به هدررفت منابع، آسیب‌های زیست‌محیطی و از دست رفتن فرصت‌های ارزش‌آفرینی می‌شود. این پژوهش با ارائه یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته مبتنی بر اقتصاد چرخشی، این شکاف را پر می‌کند. این مدل با بهره‌گیری از میوه، برگ و شاخه‌های عناب، ارزش‌آفرینی را در تمامی مراحل چرخه عمر محصول به حداکثر می‌رساند. شکل ۱ ساختار پیشنهادی زنجیره تأمین عناب را نشان می‌دهد که بر پایه اصول

برگ‌های درخت عناب نیز جایگاه ویژه‌ای در این زنجیره دارند. برگ‌های سالم و باکیفیت پس از فرآوری در کارخانه‌های مخصوص، به صنایع آرایشی و دارویی عرضه می‌شوند و در تولید محصولات کاهش وزن و مراقبت از پوست و مو کاربرد دارند. چوب و شاخه‌های درختان نیز به کارخانه‌های فرآوری چوب ارسال می‌شوند و چوب‌های باکیفیت برای استفاده در صنایع مبلمان و ساخت آلات موسیقی به فروش می‌رسند.

یکی از نوآوری‌های کلیدی این زنجیره تأمین، رویکرد آن به مدیریت ضایعات است. تمامی ضایعات تولیدشده در مراکز مختلف، اعم از برگ‌های نامرغوب، شاخه‌های ریز و میوه‌های فاسد، به تأسیسات تصفیه ترموشیمیایی منتقل می‌شوند. در این تأسیسات، ضایعات از طریق فرآیند پیرولیز به زغال زیستی تبدیل می‌شوند. این محصول نه تنها از انتشار گازهای گلخانه‌ای جلوگیری می‌کند، بلکه به عنوان یک بهبوددهنده خاک می‌تواند حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی را افزایش دهد. این رویکرد تجسم عینی اصول اقتصاد چرخشی است که در آن هیچ ماده‌ای به هدر نمی‌رود و از هر جزء زنجیره، حداکثر ارزش استخراج می‌شود.

هدف اصلی این پژوهش، توسعه زنجیره تأمینی است که بتواند به‌طور هم‌زمان سه هدف اساسی را محقق سازد. نخست، پایداری اقتصادی از طریق کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری. دوم، پایداری اجتماعی از طریق ایجاد حداکثر فرصت‌های شغلی، هم به‌صورت مشاغل ثابت و هم مشاغل متغیر. سوم، پایداری زیست‌محیطی از طریق اعمال محدودیت‌های سخت‌گیرانه بر میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در تمامی فعالیت‌های زنجیره؛ به‌طوری‌که ضرایب انتشار و حد بالای مجاز انتشار بر اساس برآوردهای سازمان خواربار

و کشاورزی ملل متحد (FAO) برای ایران تعیین و در مدل اعمال شده است.

یکی دیگر از اهداف اصلی این پژوهش، بهبود پاسخگویی زنجیره تأمین به نیازهای مشتریان است. در زنجیره تأمین عناب که شامل تسهیلات متعدد فرآوری است، عملکرد صحیح هر تسهیل نقش مهمی در تحویل به‌موقع محصول دارد. تسهیلات فرآوری در این زنجیره شامل مراکز درجه‌بندی، مراکز بسته‌بندی، کارخانه‌های خشک‌کردن، کارخانه‌های استخراج عصاره، کارخانه‌های روغن‌کشی، کارخانه‌های فرآوری برگ و چوب و تأسیسات تولید بیوجار هستند. هر یک از این تسهیلات ممکن است به دلایلی مانند قطع برق طولانی‌مدت در مناطق روستایی، خرابی تجهیزات اصلی، نگهداری اضطراری یا مشکلات فنی در سیستم‌های کنترل کیفیت، به‌طور موقت یا دائم از دسترس خارج شوند و قادر به انجام وظایف عملیاتی خود نباشند. چنین توقفاتی می‌تواند جریان محصول را مختل کند و منجر به کمبود در بازار شود. بنابراین، لازم است پاسخگویی سیستم را از منظر قابلیت اطمینان تسهیلات مدلسازی کنیم. تأکید می‌کنیم که در این مدل، منظور از خرابی، توقف یا عدم دسترسی به تسهیلات فرآوری و تولیدی است، نه خرابی ناوگان حمل و نقل. حمل و نقل محصولات در این مدل بر اساس قراردادهای از پیش تعیین‌شده فرض شده و قابلیت اطمینان جداگانه‌ای برای آن در نظر گرفته نشده است.

قابلیت اطمینان به احتمال اینکه یک سیستم در بازه زمانی مشخص بدون خرابی عمل کند تعریف می‌شود. برای مدلسازی ریاضی قابلیت اطمینان، فرض می‌کنیم متغیر تصادفی d_i نشان‌دهنده زمان تا ازکارافتادگی تسهیل i ام است. به عبارت دیگر، d_i مدت زمانی است که تسهیل i ام از ابتدای افق برنامه‌ریزی تا اولین

لحظه خرابی یا توقف جدی، بدون اختلال و به درستی کار می‌کند. قابلیت اطمینان تسهیل i ام در زمان t به صورت احتمال اینکه سیستم تا زمان t بدون خرابی کار کند تعریف می‌شود و به صورت رابطه ۱ نوشته می‌شود که در آن، $R_i(t)$ بیانگر قابلیت اطمینان تسهیل i ام در زمان t است.

$$R(t) = P(d_i > t) \quad (1)$$

برای محاسبه این تابع، فرض می‌شود که زمان خرابی d_i از توزیع نمایی با پارامتر λ_i پیروی می‌کند. این فرض در مطالعات مهندسی قابلیت اطمینان و طراحی زنجیره تأمین به طور گسترده استفاده شده است [۲۳-۲۴]، زیرا توزیع نمایی خاصیت بدون حافظه دارد و برای مدلسازی رویدادهای تصادفی مانند خرابی تجهیزات مناسب است. در این رابطه، پارامتر λ_i نرخ خرابی تسهیل i ام است که به معنی تعداد دفعات خرابی مورد انتظار در واحد زمان است. هرچه این پارامتر کوچک‌تر باشد، تسهیل قابل اطمینان‌تر است و احتمال بیشتری دارد که در طول دوره برنامه‌ریزی بدون مشکل عمل کند. برای مثال، اگر کارخانه‌ای دارای نرخ خرابی λ_i برابر با ۰.۰۸ در سال باشد، قابلیت اطمینان آن در پایان یک سال برابر با ۰.۹۲ خواهد بود، به این معنا که در ۹۲٪ مواقع بدون مشکل کار می‌کند. قابلیت اطمینان را می‌توان با استفاده از فرمول کلی رابطه (۲) نیز محاسبه کرد که در آن $i(t)$ تابع چگالی احتمال برای متغیر تصادفی d_i است.

$$R(t) = 1 - \int_0^t i(t) dt = \int_t^\infty i(t) dt \quad (2)$$

اگر فرض شود که زمان خرابی d_i از توزیع نمایی با پارامتر λ_i پیروی می‌کند، آنگاه تابع قابلیت اطمینان به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$R(t) = 1 - \int_0^t \lambda_i e^{-\lambda_i t} dt = e^{-\lambda_i t} \quad (3)$$

این تابع نمایی نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان با گذشت زمان به طور نمایی کاهش می‌یابد. این مدل برای تسهیلاتی که نرخ خرابی ثابت دارند مناسب است و در ادبیات مهندسی قابلیت اطمینان به طور گسترده استفاده می‌شود.

یکی از واقعیت‌های انکارناپذیر در زنجیره تأمین عذاب وجود عدم قطعیت‌های متعدد به‌ویژه در سمت عرضه است. در این پژوهش، دو پارامتر کلیدی نامطمئن، یعنی ظرفیت باغ‌ها و قیمت خرید میوه از باغداران، به صورت پارامترهای تصادفی سناریومحور مدل شده‌اند. عوامل متعددی از جمله تغییرات اقلیمی، شرایط آب‌وهوایی، آفات و بیماری‌ها و پیشرفت‌های فناوری در روش‌های کاشت و برداشت بر این دو پارامتر تأثیر می‌گذارند. در بازار محصولات کشاورزی، افزایش ظرفیت تولید و عرضه محصول معمولاً منجر به کاهش قیمت خرید می‌شود و کاهش عرضه می‌تواند افزایش قیمت را در پی داشته باشد؛ این رابطه معکوس بین عرضه و قیمت خرید در سناریوهای مشترک ظرفیت-قیمت لحاظ شده است. با این حال، تقاضای بازارها در این مطالعه بر اساس قراردادهای از پیش تعیین‌شده، قطعی فرض شده و در طول افق برنامه‌ریزی تغییر نمی‌کند.

برای طراحی مدلی واقع‌گرایانه و کاربردی، مفروضات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- زنجیره تأمین دارای ماهیت چند

فرآوری، نگهداری، حمل و نقل و کمبود) در طول افق برنامه‌ریزی است. رابطه (۴) این تابع هدف را نشان می‌دهد:

$$Min_{Z1} = Z_{Opening} + Z_{Ordering} + Z_{Operation} + Z_{Holding} + Z_{Transportation} + Z_{Shortage} \quad (4)$$

این معادله شامل هزینه‌های راه‌اندازی بر اساس رابطه (۵)، هزینه‌های خرید بر اساس رابطه (۶)، هزینه‌های عملیاتی در رابطه (۷)، هزینه‌های نگهداری بر اساس رابطه (۸)، هزینه‌های حمل و نقل در رابطه (۹) و هزینه‌های کمبود بر اساس رابطه (۱۰) است:

$$Z_{Opening} = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (Z_i^t - Z_i^{(t-1)}) \times OC_i \quad (5)$$

$$Z_{Ordering} = \sum_{f \in F} \sum_{i \in R \cup L \cup W} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} QT_{(f,i,p)}^t \times PC_{(f,p)}^t \quad (6)$$

$$Z_{Operation} = \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} QM_{(i,p)}^t \times QC_{(i,p)}^t \quad (7)$$

$$Z_{Holding} = \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} QH_{(i,p)}^t \times IC_{(i,p)}^t \quad (8)$$

$$Z_{Transportation} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} QT_{(i,k,p)}^t \times TC_{(i,k,p)}^t \quad (9)$$

$$Z_{Shortage} = \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} QS_{(j,p)}^t \times SC_{(j,p)}^t \quad (10)$$

۲.۴. تابع هدف مزایای اجتماعی

تابع هدف دوم، بیشینه‌سازی اشتغال‌زایی در زنجیره تأمین است. این تابع شامل دو نوع اشتغال است: مشاغل ثابت (دائمی) که با راه‌اندازی تسهیلات ایجاد می‌شوند و مشاغل متغیر که به حجم فعالیت وابسته‌اند^[۴]. رابطه (۱۱) این تابع هدف را بیان می‌کند:

$$Max_{Z2} = FixedJobs + VariableJobs \quad (11)$$

محصولی و چند دوره‌ای است که امکان برنامه‌ریزی بلندمدت را فراهم می‌آورد.

- عتاب در سه سطح کیفیت متفاوت دسته‌بندی می‌شود.
- ظرفیت باغات و قیمت خرید محصول به صورت پارامترهای تصادفی مدل‌سازی می‌شوند که وابستگی آن‌ها نیز لحاظ شده است.
- تقاضای بازارها بر اساس قراردادهای از پیش تعیین‌شده، قطعی در نظر گرفته می‌شود.
- امکان کمبود محصول در بازارها وجود دارد، اما با جریمه‌های مالی همراه است.
- پاسخگویی زنجیره تأمین از طریق قابلیت اطمینان عملکرد سیستم سنجیده می‌شود.
- انتشار دی‌اکسید کربن در تمامی لایه‌های شبکه تحت محدودیت‌های سختگیرانه قرار دارد.
- در حالی که مکان تأمین‌کنندگان (باغات) از پیش مشخص است، مکان بهینه تسهیلات فرآوری باید توسط مدل تعیین شود.

۴. فرمول‌بندی مدل

در این بخش، چارچوب ریاضی مدل پیشنهادی برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته عتاب ارائه می‌شود. ابتدا نمادها و پارامترهای مورد استفاده معرفی می‌گردند (جزئیات کامل در پیوست الف آورده شده است)، سپس مدل قطعی چندهدفه به همراه توابع هدف و محدودیت‌های آن به تفصیل تشریح می‌شود.

۱.۴. تابع هدف هزینه کل

تابع هدف اول، کمینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره تأمین است که شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری (راه‌اندازی تسهیلات) و هزینه‌های عملیاتی (خرید،

در رابطه (۱۲)، FJ_i تعداد مشاغل دائمی هر تسهیلات است. در رابطه (۱۳)، $VJ_{i,p}$ مقدار محصول مورد نیاز برای ایجاد یک شغل موقت است؛ بنابراین تقسیم حجم جابه‌جایی بر $VJ_{i,p}$ تعداد مشاغل موقت را برآورد می‌کند.

$$Z_{Fixjobs} = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (Z_i^t - Z_i^{(t-1)}) \times FJ_i \quad (12)$$

$$Z_{Variablejobs} = \sum_{i \in I \cup F} \sum_{p \in P} \frac{\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Q T_{(i,k,p)}^t}{VJ_{i,p}} \quad (13)$$

۳.۴. تابع هدف پاسخگویی

تابع هدف سوم بر اساس رابطه (۱۴)، پاسخگویی زنجیره تأمین را از طریق قابلیت اطمینان تسهیلات حداکثر می‌کند. این تابع مجموع وزنی حجم محصولات ارسالی از هر تسهیل را ضرب در قابلیت اطمینان آن تسهیل محاسبه می‌کند. به عبارت دیگر، برای هر واحد محصولی که از تسهیل i ام ارسال می‌شود، یک امتیاز برابر با $R_i(t)$ به تابع هدف افزوده می‌شود. این امتیازدهی باعث می‌شود مدل ترجیح دهد محصولات را از تسهیلاتی ارسال کند که احتمال خرابی کمتری دارند.

برای مثال، اگر دو کارخانه خشک‌کن در مکان‌های مختلف وجود داشته باشند، یکی با نرخ خرابی $\lambda = 0.05$ در سال و دیگری با $\lambda = 0.1$ در سال، در صورت تساوی سایر شرایط، مدل ترجیح می‌دهد از کارخانه اول بیشتر استفاده کند زیرا سهم آن در تابع هدف پاسخگویی بالاتر است. این به معنای کنار گذاشتن کارخانه دوم نیست؛ بلکه در حل چندهدفه، الگوریتم

$$\forall i \in R \cup L \cup W, t \in T \quad (15)$$

AUGMECON^۲ trade-off بین سه هدف ایجاد می‌کند و جبهه پارتویی تولید می‌کند که در آن برخی جواب‌ها تأکید بیشتری بر قابلیت اطمینان و برخی دیگر بر کاهش هزینه دارند.

قابلیت اطمینان تنها در این تابع هدف ظاهر می‌شود و در محدودیت‌های مدل به صورت مستقیم وارد نمی‌گردد، اما از طریق بهینه‌سازی چندهدفه، بر تصمیمات مکان‌یابی و تخصیص جریان تأثیر می‌گذارد. پارامتر λ_i برای هر تسهیل بر اساس داده‌های تاریخی عملکرد تسهیلات مشابه در منطقه یا نظر کارشناسان صنعت تعیین شده است.

(۱۴)

$$Max_{Z3} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in I \cup J} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} e^{-\lambda_{i,t}} \times Q T_{(i,k,p)}^t$$

۴.۴. محدودیت‌ها

محدودیت‌های مدل در پنج دسته طبقه‌بندی می‌شوند: محدودیت‌های تعادل جریان و موجودی، محدودیت‌های ظرفیت، محدودیت‌های تولید و نرخ‌های تبدیل، محدودیت‌های مکان‌یابی و زیست‌محیطی و دامنه متغیرها.

محدودیت‌های تعادل جریان و موجودی:

روابط (۱۵) تا (۱۸) تضمین می‌کنند که حجم تولید در هر تسهیلات از مجموع ورودی آن تجاوز نکند. روابط (۱۹) تا (۲۶) معادله تعادل موجودی را برای انواع مختلف تسهیلات پیاده‌سازی می‌کنند. رابطه (۲۷) تأمین تقاضای بازارها را تضمین می‌کند.

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} Q T_{k,i,p}^t \leq \sum_{p \in P} Q M_{i,p}^t$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{p \in P} Q T_{i,i',p}^t \leq \sum_{p \in P} Q M_{i',p}^t \quad \forall i' \in G \cup D \cup E, t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{i \in E} \sum_{p \in P} Q T_{i,i',p}^t \leq \sum_{p \in P} Q M_{i',p}^t \quad \forall i' \in O, t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} Q T_{i,i',p}^t \leq \sum_{p \in P} Q M_{i',p}^t \quad \forall i' \in C, t \in T \quad (18)$$

$$Q H_{i,p}^t = Q H_{i,p}^{t-1} + Q M_{i,p}^t - \sum_{i' \in G \cup D \cup E \cup C} Q T_{i,i',p}^t \quad \forall i \in R, p \in P, t \in T \quad (19)$$

$$Q H_{i,p}^t = Q H_{i,p}^{t-1} + Q M_{i,p}^t - \sum_{k \in C M \cup P M \cup C} Q T_{i,k,p}^t \quad \forall i \in L, p \in P, t \in T \quad (20)$$

$$Q H_{i,p}^t = Q H_{i,p}^{t-1} + Q M_{i,p}^t - \sum_{k \in N M \cup I M \cup C} Q T_{i,k,p}^t \quad \forall i \in W, p \in P, t \in T \quad (21)$$

$$Q H_{i,p}^t = Q H_{i,p}^{t-1} + Q M_{i,p}^t - \sum_{k \in N M \cup I M \cup C} Q T_{i,k,p}^t \quad \forall i \in G, p \in P, t \in T \quad (22)$$

$$Q H_{i,p}^t = Q H_{i,p}^{t-1} + Q M_{i,p}^t - \sum_{k \in N M \cup I M \cup C} Q T_{i,k,p}^t \quad \forall i \in D, p \in P, t \in T \quad (23)$$

$$Q H_{i,p}^t = Q H_{i,p}^{t-1} + Q M_{i,p}^t - \sum_{k \in N M \cup I M \cup C} Q T_{i,k,p}^t \quad \forall i \in E, p \in P, t \in T \quad (24)$$

$$Q H_{i,p}^t = Q H_{i,p}^{t-1} + Q M_{i,p}^t - \sum_{k \in N M \cup I M \cup C} Q T_{i,k,p}^t \quad \forall i \in O, p \in P, t \in T \quad (25)$$

$$Q H_{i,p}^t = Q H_{i,p}^{t-1} + Q M_{i,p}^t - \sum_{k \in F \cup S M} Q T_{i,k,p}^t \quad \forall i \in C, p \in P, t \in T \quad (26)$$

$$\sum_{i \in G \cup D \cup E \cup L \cup W \cup O \cup C} Q T_{i,j,p}^t \geq D M_{j,p}^t \quad \forall j \in J, p \in P, t \in T \quad (27)$$

محدودیت‌های ظرفیت:

رابطه (۲۸) ظرفیت عرضه از باغها، رابطه (۲۹) ظرفیت
فرآوری تسهیلات، و رابطه (۳۰) ظرفیت ذخیره‌سازی را
در زنجیره تامین کنترل می‌کنند.

$$\sum_{i \in R} \sum_{p \in P} QT_{i,i,p}^t \times at_{p,p'} = QM_{i,p'}^t \quad \forall i' \in G \cup D \cup E, p' \in P, p' \neq P, t \in T \quad (32)$$

$$\sum_{i \in E} \sum_{p \in P} QT_{i,i,p}^t \times at_{p,p'} = QM_{i,p'}^t \quad \forall i' \in O, p' \in P, p' \neq P, t \in T \quad (33)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} QT_{i,i,p}^t \times at_{p,p'} = QM_{i,p'}^t \quad \forall i' \in C, p' \in P, p' \neq P, t \in T \quad (34)$$

محدودیت مکان و زیست محیطی:

رابطه (۳۵) تضمین می‌کند که تسهیلات پس از راه‌اندازی، تا پایان افق برنامه‌ریزی فعال بماند. رابطه (۳۶) سقف مجاز انتشار CO_2 را اعمال می‌کند و کل انتشار ناشی از احداث، عملیات، نگهداری و حمل‌ونقل را محدود می‌سازد.

$$Z_i^{(t-1)} \leq Z_i^t \quad \forall i \in I, t \in T \quad (35)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I} OE_i^t \times Z_i^t + \sum_{i \in D \cup E \cup O \cup C} \sum_{p \in P} ME_{i,p}^t \times QM_{i,p}^t \\ & + \sum_{i \in D \cup E \cup O \cup C} \sum_{p \in P} HE_{i,p}^t \times QH_{i,p}^t \\ & + \sum_{i \in I \cup F} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} RE_{i,k,p}^t \times QT_{i,k,p}^t \leq CAPR^t \quad \forall t \in T \quad (36) \end{aligned}$$

$$QT_{i,k,p}^t \geq 0 \quad \forall i \in I \cup F, k \in K, p \in P, t \in T \quad (39)$$

$$QS_{j,p}^t \geq 0 \quad \forall j \in J, p \in P, t \in T \quad (40)$$

۵. روش حل

در این پژوهش، رویکردی برای حل مدل چندهدفه تصادفی ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله، که شامل اهداف متضاد و پارامترهای غیرقطعی است، از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای مدل‌سازی عدم قطعیت در ظرفیت باغات و قیمت خرید محصولات

$$\sum_{i \in R \cup L \cup W} QT_{k,i,p}^t \geq FP_{k,p}^t \quad \forall k \in F, p \in P, t \in T \quad (28)$$

$$QM_{(i,p)}^t \leq CO_{(i,p)}^t \times Z_i^t \quad \forall i \in I, p \in P, t \in T \quad (29)$$

$$\forall i \in I, t \in T \quad (30)$$

$$\sum_{p \in P} QH_{(i,p)}^t \leq HC_i^t \times Z_i^t$$

محدودیت‌های تولید و تبدیل:

این محدودیت‌ها رابطه بین مواد اولیه ورودی و محصولات خروجی را بر اساس نرخ‌های تبدیل فناوریانه $(at_{p,p'})$ مدل می‌کنند. روابط (۳۱) تا (۳۴) این محدودیت‌ها را برای انواع مختلف تسهیلات بیان می‌کنند.

$$\forall i \in R \cup L \cup W, p' \in P, p' \neq P, t \in T \quad (31)$$

$$\sum_{k \in F} \sum_{p \in P} QT_{k,i,p}^t \times at_{p,p'} = QM_{i,p'}^t$$

دامنه متغیرها:

روابط (۳۷) تا (۴۰) نوع و دامنه متغیرهای تصمیم را تعریف می‌کنند. Z متغیر باینری مکان‌یابی، و QM, QS, QT, QH متغیرهای پیوسته غیرمنفی برای تولید، موجودی، حمل‌ونقل و کمبود هستند.

$$Z_i^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (37)$$

$$QM_{i,p}^t, QH_{i,p}^t \geq 0 \quad \forall i \in I, p \in P, t \in T \quad (38)$$

استفاده شده است. همچنین، الگوریتم AUGMECON^۲ به عنوان روشی کارآمد برای حل مسائل بهینه سازی چندهدفه معرفی و چگونگی پیاده سازی آن برای مدل پیشنهادی تشریح شده است.

۱.۵. روش مدیریت عدم قطعیت

طراحی زنجیره تأمین عذاب با چالش تصمیم گیری بلندمدت در محیطی مملو از عدم قطعیت مواجه است. عواملی مانند نوسانات اقلیمی، شیوع آفات و بیماری ها، تغییرات قیمت در بازار، و نوسانات عرضه به طور مستقیم بر ظرفیت تولید باغات و قیمت خرید محصول تأثیر می گذارند. استفاده از مدل های قطعی که مقادیر میانگین پارامترها را فرض می کنند، می تواند به تصمیمات ناکارآمد یا حتی غیرقابل اجرا منجر شود.

برای مدیریت عدم قطعیت در زنجیره های تأمین، سه رویکرد اصلی وجود دارد: برنامه ریزی تصادفی، برنامه ریزی فازی، و برنامه ریزی مقاوم. در این پژوهش، برنامه ریزی تصادفی دومرحله ای به این دلایل انتخاب شده است: اول، ماهیت تصمیمات در زنجیره تأمین عذاب به طور طبیعی دومرحله ای است. تصمیمات استراتژیک مانند مکان بای و تعیین ظرفیت تسهیلات باید قبل از فصل برداشت و پیش از مشخص شدن شرایط اقلیمی و بازار اتخاذ شوند. این تصمیمات بلندمدت بوده و تغییر آنها هزینه بر است. در مقابل، تصمیمات عملیاتی مانند میزان خرید از باغات، مقدار تولید در هر تسهیل، سطح موجودی و برنامه حمل و نقل می توانند پس از آشکار شدن عرضه واقعی و قیمت بازار اتخاذ شوند. این ساختار دقیقاً با چارچوب برنامه ریزی تصادفی دومرحله ای مطابقت دارد و امکان انعطاف پذیری عملیاتی را فراهم می آورد^[۶]. همچنین، عدم قطعیت در زنجیره تأمین عذاب از نوع تصادفی

است. در این مسئله، پارامترهای کلیدی یعنی ظرفیت باغات و قیمت محصول کاملاً تعریف شده و قابل اندازه گیری هستند. عدم قطعیت آنها ناشی از عوامل طبیعی و بازار است که ماهیت تصادفی دارند. بنابراین استفاده از رویکرد تصادفی که بر اساس سناریوها و رویدادهای احتمالی است، منطقی تر از رویکرد فازی می باشد. همچنین، در مقایسه با برنامه ریزی مقاوم که فقط بر اساس بدترین حالت ممکن طراحی می کند، برنامه ریزی تصادفی تعادل بهتری میان محافظه کاری و کارایی اقتصادی ایجاد می کند. برنامه ریزی مقاوم به راه حل های بیش از حد محافظه کارانه منجر می شود که از نظر اقتصادی کارا نیستند. برنامه ریزی تصادفی با در نظر گرفتن چند سناریو و احتمال آنها، راه حلی ارائه می دهد که در برابر انواع شرایط ممکن عملکرد قابل قبولی دارد. همچنین این روش امکان ارزیابی کمی ارزش اطلاعات کامل و هزینه نادیده گرفتن عدم قطعیت را فراهم می کند که ابزار مفیدی برای تصمیم گیری مدیریتی است.

برنامه ریزی تصادفی دومرحله ای با تفکیک تصمیمات استراتژیک که پیش از تحقق عدم قطعیت اتخاذ می شوند از تصمیمات عملیاتی که پس از آشکار شدن شرایط گرفته می شوند، ابزاری قدرتمند برای ایجاد زنجیره های تأمین انعطاف پذیر است. دو پارامتر کلیدی غیرقطعی یعنی ظرفیت تولید باغات و قیمت خرید محصولات، با توجه به همبستگی معکوس آنها (افزایش عرضه با کاهش قیمت و بالعکس) مدلسازی شده اند^[۴]. برای این منظور، سه سناریوی خوشبینانه (عرضه بالا، قیمت پایین)، واقع بینانه (عرضه و قیمت متوسط) و بدبینانه (عرضه پایین، قیمت بالا) تعریف شده اند.

در این پژوهش، احتمال وقوع هر یک از سه سناریو برابر یک سوم در نظر گرفته شده است. این انتخاب بر

اساس ماهیت رویداد تصادفی کلیدی یعنی تغییرات اقلیمی صورت گرفته است^[۳۳]. تغییرات اقلیمی شامل میزان بارندگی، دما، وقوع خشکسالی، یخبندان و سایر پدیده‌های جوی است که به‌طور ذاتی پیش‌بینی‌ناپذیر هستند. این پدیده‌ها در بلندمدت و برای یک افق زمانی چندساله که مدل ما دربرمی‌گیرد، قابل پیش‌بینی دقیق نیستند. نمی‌توان با اطمینان گفت که احتمال وقوع سناریوی خوش‌بینانه بیشتر از سناریوی بدبینانه است یا برعکس. در چنین شرایطی که پیش‌بینی آینده اقلیمی با عدم قطعیت بالا همراه است، استفاده از احتمالات یکسان یک رویکرد بی‌طرفانه و منطقی است. این رویکرد اصل حداکثر آنتروپی را رعایت می‌کند که بیان می‌دارد در غیاب اطلاعات کافی برای تمایز میان سناریوها، نباید سوگیری به سمت هیچ سناریویی داشته باشیم.

به عبارت دیگر، احتمالات یکسان به‌معنای این است که مدل به‌طور متوازن تمام حالات ممکن را در نظر می‌گیرد و راه‌حلی ارائه می‌دهد که در برابر همه سناریوها عملکرد قابل قبولی دارد. این رویکرد سناریومحور ساده، قابل فهم و واقع‌گرایانه بوده و امکان تحلیل اثرات عدم قطعیت را فراهم می‌کند.

۲.۵. روش حل بهینه‌سازی چند هدفه

در طراحی زنجیره تأمین عذاب، تصمیم‌گیرندگان با سه هدف متضاد مواجه‌اند: کمینه‌سازی هزینه، بیشینه‌سازی اشتغال و پاسخگویی. کاهش هزینه‌ها اغلب به کاهش اشتغال و سطح خدمات منجر می‌شود^[۳۹]، در حالی که افزایش پاسخگویی و اشتغال هزینه‌ها را بالا می‌برد. مفهوم بهینگی پارتو، که در آن بهبود یک هدف بدون بدتر شدن دیگری ممکن نیست، برای ایجاد تعادل میان این اهداف کلیدی است^[۴۰].

الگوریتم AUGMECON^۲، توسعه‌یافته توسط ماوروتاس و فلوریوس^۱، با تبدیل مسئله چندهدفه به زیرمسائل تک‌هدفه، جبهه پارتو را به‌طور کارآمد تولید می‌کند.

برای مدل پیشنهادی در این پژوهش، هزینه به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب شده و دو هدف دیگر (اشتغال و پاسخگویی) به صورت محدودیت‌های اسیلون در نظر گرفته می‌شوند. فرمول‌بندی کلی به صورت رابطه (۴۱)، است:

$$Z = f_1(x) + \psi \times \left(\frac{S_i}{R_i} \right)$$

subject to :

$$f_i(x) - s_i \leq \varepsilon_i, \forall i \in \{2, 3\}$$

$$x \in S \text{ \& } s_i \in R^+$$

(۴۱)

در رابطه (۴۱)، ψ یک مقدار کوچک است، که معمولاً بین 10^{-2} تا 10^{-6} متغیر است. متغیر s_i نشان دهنده کمبود یا مازاد است، در حالی که R_i دامنه تابع هدف را نشان می‌دهد. پیاده‌سازی این الگوریتم برای مدل تصادفی چندهدفه پیشنهادی، امکان تولید طیف وسیعی از راه‌حل‌های متوازن را فراهم می‌آورد.

۶. شرح مطالعه موردی و نتایج محاسباتی

این پژوهش کاربرد مدل پیشنهادی زنجیره تأمین عذاب را از طریق مطالعه موردی در استان خراسان جنوبی، قطب تولید ۹۸ درصد عذاب ایران، بررسی می‌کند. این استان، با وجود محدودیت‌های زیرساختی، پتانسیل بالایی برای توسعه صنایع فرآوری و ارزش‌آفرینی دارد. مدل پیشنهادی با هدف بهینه‌سازی

^۱ Mavrotas and Florios

هزینه‌ها، افزایش اشتغال و بهبود پاسخگویی به مشتریان - ساختار بهینه‌ای برای این زنجیره تأمین طراحی نماید.



Figure ۲. The position of jujube producers in South Khorasan.

شکل ۲. موقعیت تولیدکنندگان عناب در خراسان جنوبی. در طراحی زنجیره تأمین عناب، انتخاب مکان مناسب برای تأسیسات فرآوری از اهمیت بسزایی برخوردار است. بر اساس بررسی‌های میدانی و زیرساخت‌های موجود، شش شهرستان خوسف، بیرجند، طبس، سریش، قائن و نهبندان به‌عنوان گزینه‌های بالقوه شناسایی شده‌اند. جدول ۲ اطلاعات مربوط به تعداد تأمین‌کنندگان، تسهیلات بالقوه و بازارهای هدف را ارائه می‌دهد.

جدول ۲. ابعاد داده‌های مطالعه موردی.

Table ۲. Dimensions of case study data.

Symbols	Definition	Numbers
Farms	Khusf, Birjand, Zirkuh, Sarbisheh, Ghaen, Nahbandan, Darmian, Sarayan, Ferdows, Bashruye, Tabas	۱۱
SCs, DCs, DFs, Efs, Ofes, LFs, WFs, TFs	Khusf, Birjand, Tabas, Sarbisheh, Ghaen, Nahbandan	۶
GMs, FMs	South Khorasan, Isfahan, Tehran, Kerman, Mashhad, Shiraz	۶

هزینه‌ها، افزایش اشتغال و بهبود پاسخگویی، ساختاری بهینه برای زنجیره تأمین طراحی می‌کند. چالش اصلی این صنعت، نوسانات شدید ظرفیت تولید و قیمت‌ها به دلیل تغییرات اقلیمی، خشکسالی و نوسانات بازار است. سناریوهای مدل‌سازی عدم قطعیت، بر اساس داده‌های تاریخی وزارت جهاد کشاورزی و نظرات کارشناسان، تدوین شده و در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. محدوده مقادیر پارامترهای نامشخص در مدل زنجیره تأمین عناب پیشنهادی (واحد قیمت: میلیون ریال).

Table ۱. Range of values of uncertain parameters in the proposed jujube supply chain model (price unit: million Rials).

Parameters	Product types	Optimistic scenario	Realistic scenario	Pessimistic scenario
$PC_{f,p}^t$ (Million Rials)	Jujube	۱۵	۳۳	۴۹
	Leaves	۵	۱۰	۱۵
	Branches	۱۰	۱۵	۲۰
$FP_{f,p}^t$ (Tone)	Jujube	۲۱۱۲	۴۶۳	۴۰
	Leaves	۵۰	۲۰	۸
	Branches	۴۵	۲۴	۹

شکل ۲. پراکندگی جغرافیایی باغات عناب در شهرستان‌های مختلف خراسان جنوبی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شهرستان بیرجند به‌عنوان مرکز استان، نقش محوری در این صنعت ایفا می‌کند. مدل پیشنهادی تلاش دارد تا با در نظر گرفتن همزمان سه هدف کلیدی - بهینه‌سازی

CMs, PMs	Isfahan, Tehran ^۱ , Tehran ^۲ , Urmia, Gorgan, Mashhad	۶
NMs, IMs	Tabriz, Tehran, Isfahan, Shiraz, Ahvaz, Qazvin	۶
SMs	Tehran, Isfahan, Shiraz	۳

SCs = Sorting Centers, DCs = Distribution Centers, DFs = Drying Facilities, EFs = Extraction Facilities, OFs = Oil Extraction Facilities, LFs = Leaf Processing Facilities, WFs = Wood Processing Facilities, TFs = Thermochemical Facilities, GMs = General Markets, FMs = Food Industries Markets, CMs = Cosmetic Markets, PMs = Pharmaceutical Markets, NMs = Furniture Markets, IMs = Instrument Markets, SMs = Secondary Markets.

روانشناسی
نشد

پارامترهای ورودی مدل با استفاده از داده‌های واقعی، مطالعات میدانی و نظرات کارشناسان صنعت تعیین شده‌اند. ظرفیت‌های فرآوری بر اساس تکنولوژی‌های موجود، نیروی کار منطقه و پتانسیل‌های توسعه محاسبه شده و هزینه‌های حمل‌ونقل با توجه به فواصل واقعی و نرخ‌های رایج برآورد گردیده است. نرخ تبدیل محصولات، مانند استحصال ۱۵ درصد روغن از هسته عنب، بر اساس استانداردها و تجربیات عملی تعیین شده است. مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده CPLEX روی یک رایانه شخصی با مشخصات معمولی حل شده که نشان‌دهنده قابلیت اجرای آن در شرایط عادی است.

۱.۶. اعتبارسنجی رویکرد

پیش از بررسی نتایج، ضروری است که ارزش افزوده استفاده از رویکرد تصادفی در مقایسه با روش‌های سنتی قطعی نشان داده شود. بسیاری از تصمیم‌گیرندگان به دلیل سادگی ظاهری و سهولت جمع‌آوری داده‌ها، تمایل به استفاده از مدل‌های قطعی دارند. اما آیا این سادگی ارزش ریسک‌های ناشی از نادیده گرفتن عدم قطعیت را دارد؟

برای پاسخ به این پرسش، دو معیار کلیدی محاسبه شده است. نخست، «ارزش مورد انتظار اطلاعات کامل» (EVPI) نشان می‌دهد که پیش‌بینی دقیق آینده می‌تواند تا ۳۴۸۳ میلیون ریال صرفه‌جویی در هزینه‌ها به همراه داشته باشد، که اهمیت سیستم‌های اطلاعاتی و پیش‌بینی را برجسته می‌کند. دوم، «ارزش راه‌حل تصادفی» (VSS) نشان‌دهنده هزینه اضافی ۷۲۸ میلیون ریالی ناشی از استفاده از مدل‌های قطعی با تکیه بر مقادیر میانگین است. این نتایج تأیید می‌کنند

که پیچیدگی مدل‌های تصادفی، با توجه به صرفه‌جویی قابل توجه، سرمایه‌گذاری ارزشمندی است.

۲.۶. نتایج مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای

حل مدل برای سناریوهای مختلف نتایج قابل توجهی ارائه داده است. تصمیمات استراتژیک مکان‌یابی شامل احداث سه مرکز درجه‌بندی و دسته‌بندی در خوسف، سریش و قائن، دو مرکز بسته‌بندی و توزیع در بیرجند و قائن، دو کارخانه خشک‌کردن میوه در سریش و طبس، دو کارخانه استخراج عصاره در خوسف و طبس، یک کارخانه فرآوری برگ در خوسف، یک کارخانه فرآوری چوب در طبس، یک کارخانه روغن‌کشی در خوسف و یک تأسیسات تولید بیوپار در نهبندان است. این پراکندگی، تعادل میان نزدیکی به منابع، دسترسی به بازارها و بهره‌گیری از مزیت‌های محلی را نشان می‌دهد.

تحلیل هزینه‌ها تأثیر عدم قطعیت را روشن می‌کند. در سناریوی خوش‌بینانه (عرضه بالا، قیمت پایین)، هزینه‌های کمبود ۲۵.۵۹ میلیارد ریال است، اما در سناریوی بدبینانه (عرضه پایین، قیمت بالا)، این هزینه به ۱۵۸.۸۲ میلیارد ریال می‌رسد که اهمیت مدیریت ریسک و انعطاف‌پذیری را برجسته می‌کند. هزینه‌های خرید نیز در همه سناریوها بالا بوده و از ۷۵.۲۳ میلیارد ریال در سناریوی خوش‌بینانه تا ۸۰.۳۸ میلیارد ریال در سناریوی واقع‌بینانه متغیر است، که بر ضرورت استراتژی‌های مؤثر خرید و مدیریت روابط با تأمین‌کنندگان تأکید دارد.

تحلیل جبهه پارتو که در شکل ۳ و ۴ نمایش داده شده، روابط پیچیده میان اهداف مختلف را آشکار می‌سازد. شکل ۳ تعامل میان هزینه و اشتغال را نشان

می‌دهد، در حالی که شکل ۴ رابطه میان هزینه و پاسخگویی را نمایش می‌دهد.

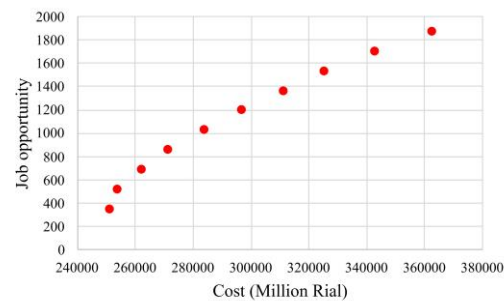


Figure ۳. The trade-off between economic and social goals.

شکل ۳. تعامل بین اهداف اقتصادی و اجتماعی.

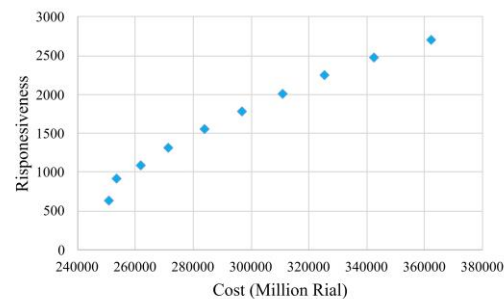


Figure ۴. The trade-off between economic goals and responsiveness.

شکل ۴. تعامل بین اهداف اقتصادی و پاسخگویی.

بررسی جبهه پارتو نشان می‌دهد که در یک سر طیف (تکرار ۱)، با هزینه ۳۶۷ میلیارد ریال، ۱۸۷۰ فرصت شغلی و پاسخگویی ۲۷۰۰ حاصل می‌شود. در مقابل، در تکرار ۱۰، کاهش هزینه به ۲۴۸ میلیارد ریال (۳۲.۴ درصد کمتر) اشتغال را به ۳۵۰ فرصت (کاهش ۸۱.۳ درصد) و پاسخگویی را به ۶۴۰ (کاهش ۷۶.۳ درصد) می‌رساند. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده هزینه‌های سنگین اجتماعی و عملیاتی صرفه‌جویی در هزینه‌هاست. تحلیل دقیق‌تر حاکی از کارایی بالاتر برخی نقاط است؛ به‌عنوان مثال، حرکت از تکرار ۷ به ۸ با ۸.۲ درصد

افزایش هزینه، ۱۶.۵ درصد بهبود در اشتغال و پاسخگویی را به دنبال دارد که مبادله‌ای کارآمد محسوب می‌شود.

برای روشن‌تر شدن نقش قابلیت اطمینان در نتایج، تحلیل جبهه پارتو از این منظر ضروری است. همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده، جبهه پارتو شامل ۱۰ نقطه است که هر کدام مبادلات^{۱۰} متفاوتی بین هزینه، اشتغال و پاسخگویی ارائه می‌دهند. در جواب پارتو اول، که تأکید بر حداکثرسازی پاسخگویی دارد، مقدار تابع هدف سوم برابر با ۲۷۰۰ است. این مقدار نشان‌دهنده مجموع وزنی جریان محصولات ضربدر قابلیت اطمینان تسهیلات است. در این نقطه، مدل ترجیح داده است از تسهیلاتی استفاده کند که نرخ خرابی پایین‌تری دارند، حتی اگر هزینه حمل و نقل به آن‌ها کمی بالاتر باشد. برای مثال، در این جواب، بخش قابل توجهی از فرآوری میوه به کارخانه خشک‌کن سریش اختصاص یافته که بر اساس نظر کارشناسان دارای زیرساخت پایدارتر و تیم تعمیرات مجرب‌تری است.

در مقابل، در جواب پارتو دهم، که تأکید بر کمینه‌سازی هزینه دارد، مقدار تابع هدف پاسخگویی به ۶۴۰ کاهش یافته است. این کاهش ۷۶.۳ درصدی نشان می‌دهد که برای دستیابی به صرفه‌جویی ۳۲.۴ درصدی در هزینه، مدل مجبور شده است از برخی تسهیلات با قابلیت اطمینان کمتر استفاده کند یا جریان محصولات را به گونه‌ای تخصیص دهد که پاسخگویی سیستم کاهش یابد. این یافته برای تصمیم‌گیرندگان اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد تمرکز بیش از حد بر کاهش هزینه، به قیمت کاهش

^{۱۰} Trade-off

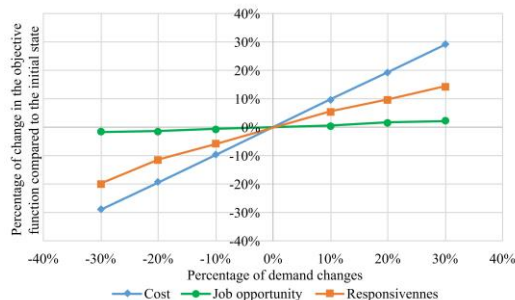


Figure 5. Percentage change in the objective function relative to the initial state with changes in demand.

شکل ۵. درصد تغییرات توابع هدف نسبت به حالت اولیه با تغییرات تقاضا.

نکته جالب توجه، پایداری نسبی فرصت‌های شغلی در برابر تغییرات تقاضا است. حتی با نوسانات ۳۰ درصدی در تقاضا، تغییرات اشتغال کمتر از ۳ درصد است. این یافته نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی برای زنجیره تأمین، از نظر اشتغال‌زایی پایدار است و نوسانات بازار تأثیر محدودی بر نیروی کار دارد. پاسخگویی سیستم رفتار میانه‌ای نشان می‌دهد. کاهش تقاضا به طور طبیعی منجر به کاهش فشار بر سیستم و در نتیجه بهبود نسبی پاسخگویی می‌شود، در حالی که افزایش تقاضا، سیستم را تحت فشار قرار داده و پاسخگویی را کاهش می‌دهد.

۲.۳.۶. تحلیل حساسیت هزینه کمبود

هزینه کمبود به عنوان مکانیزم جریمه برای عدم تأمین تقاضا، نقش مهمی در تعیین رفتار سیستم دارد. شکل ۶ روابط پیچیده‌ای را نشان می‌دهد که نیازمند تحلیل دقیق است.

کیفیت خدمات‌رسانی و پاسخگویی به مشتریان تمام می‌شود.

همچنین در تحلیل نقاط میانی جبهه پارتو مشاهده می‌شود که حرکت از جواب پارتو هفت به جواب پارتو هشت، با افزایش ۸.۲ درصدی در هزینه، منجر به بهبود ۱۶.۵ درصدی در هر دو معیار اشتغال و پاسخگویی می‌شود. این نقطه می‌تواند به عنوان یک مبادله کارآمد در نظر گرفته شود که تعادل مناسبی بین اهداف سه‌گانه ایجاد می‌کند.

۳.۶. تحلیل حساسیت

برای درک بهتر رفتار مدل و استحکام راه‌حل‌های پیشنهادی، تحلیل حساسیت جامعی انجام شده است. این تحلیل بر روی پارامترهای کلیدی که بیشترین تأثیر را بر عملکرد سیستم دارند، متمرکز شده است.

۱.۳.۶. تحلیل حساسیت تقاضا

تقاضا به عنوان محرک اصلی زنجیره تأمین، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد سیستم دارد. شکل ۵ نشان می‌دهد که تابع هدف اقتصادی، حساسیت تقریباً خطی نسبت به تغییرات تقاضا دارد. این رابطه خطی منطقی است، زیرا افزایش تقاضا مستقیماً منجر به افزایش نیاز به خرید، فرآوری و توزیع می‌شود.

است. عدم تعادل تاریخی میان قیمت بنزین و گازوئیل، یارانه‌های پنهان و آشکار، و سیاست‌های متغیر دولت در این حوزه، همگی بر ضرورت این تحلیل می‌افزایند.

شکل‌های ۷ و ۸ جبهه‌های پارتو را برای سناریوهای مختلف افزایش قیمت سوخت نشان می‌دهد. نتایج تحلیل حساسیت هزینه حمل‌ونقل (به‌عنوان نماینده‌ای از بخش سوخت‌محور هزینه‌ها در مدل) نشان می‌دهد که در چارچوب مفروضات مطالعه موردی حاضر، افزایش این پارامتر تا ۱۰۰ درصد نسبت به مقدار پایه، ساختار شبکه را به سمت استفاده بیشتر از مسیرهای کوتاه‌تر و تسهیلات نزدیک به مزارع سوق می‌دهد و در نتیجه، سیستم تا حدی توانایی سازگاری با افزایش هزینه حمل‌ونقل را دارد. بدیهی است که این نتیجه صرفاً در محدوده مفروضات مدل و برای این زنجیره تأمین خاص معتبر بوده و به‌هیچ‌وجه به‌عنوان توصیه‌ای برای افزایش قیمت سوخت در سطح کلان اقتصادی تفسیر نمی‌شود.

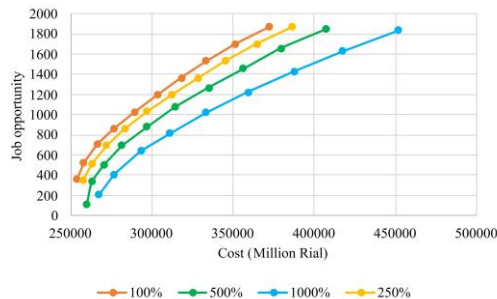


Figure 7. Pareto analysis with increasing transportation cost - cost versus job opportunity.

شکل ۷. تحلیل پارتو با افزایش هزینه حمل و نقل - هزینه در برابر فرصت شغلی.

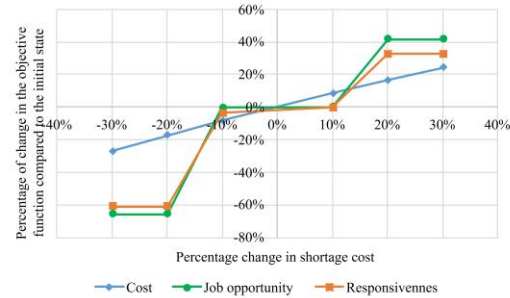


Figure 6. Percentage of changes in objective functions compared to the initial state with changes in shortage cost.

شکل ۶. درصد تغییرات توابع هدف نسبت به حالت اولیه با تغییرات هزینه کمبود.

در این مدل، هزینه کمبود نمایانگر جریمه ناشی از برآورده نشدن تقاضای نهایی در تمامی گره‌های تقاضا است و برای هر واحد تقاضای تأمین‌نشده در بازارهای مختلف، هزینه متناظر در مؤلفه ($Z_{Shortage}$) منظور می‌شود. افزایش هزینه‌های کمبود، سیستم را به سمت ایجاد ظرفیت‌های بیشتر و حفظ سطوح بالاتر موجودی سوق می‌دهد. این امر منجر به افزایش هزینه‌های کل می‌شود، اما به طور همزمان پاسخگویی و اشتغال را نیز بهبود می‌بخشد. در مقابل، کاهش هزینه‌های کمبود، انگیزه سیستم برای تأمین کامل تقاضا را کاهش داده و منجر به افت شدید در عملکرد می‌شود. نکته قابل تأمل، همگامی تغییرات اشتغال و پاسخگویی در واکنش به تغییرات هزینه کمبود است. این همبستگی نشان می‌دهد که سیستمی که برای پاسخگویی بهتر طراحی شده، به طور طبیعی نیازمند نیروی کار بیشتری نیز هست.

۳.۳.۶. تحلیل حساسیت هزینه حمل و نقل

با توجه به چالش‌های ساختاری اقتصاد ایران در حوزه انرژی و نوسانات مکرر قیمت سوخت، تحلیل تأثیر تغییرات هزینه حمل و نقل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار

۴.۳.۶. تحلیل حساسیت محدودیت انتشار دی اکسید کربن

یکی از چالش‌های اساسی در طراحی زنجیره‌های تأمین پایدار، تعیین سطح مناسب محدودیت‌های زیست‌محیطی است به گونه‌ای که ضمن حفظ اهداف اقتصادی و اجتماعی، به کاهش آثار زیست‌محیطی نیز منجر شود. برای ارزیابی حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به تغییرات سقف مجاز انتشار دی اکسید کربن، این پارامتر در بازه کاهش ۳۰ درصد تا افزایش ۳۰ درصد نسبت مقدار پایه با فواصل ۱۰ درصدی تغییر داده شد و اثرات آن بر سه تابع هدف اصلی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ درصد تغییرات نسبی توابع هدف را در واکنش به تغییرات سقف انتشار کربن نشان می‌دهد.

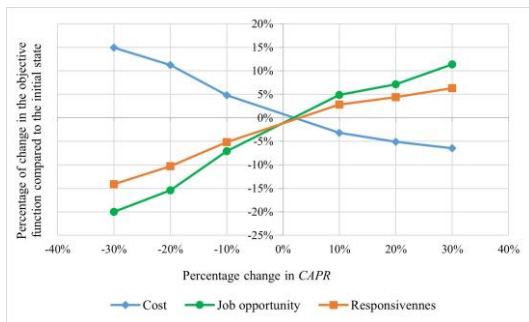


Figure 9. Percentage change in the objective function relative to the initial state with changes in CAPR.

شکل ۹. درصد تغییرات توابع هدف نسبت به حالت اولیه با تغییرات محدودیت انتشار دی اکسید کربن.

نتایج نشان می‌دهد که رابطه‌ای معکوس و غیرخطی بین سخت‌گیری محدودیت‌های زیست‌محیطی و عملکرد اقتصادی-اجتماعی زنجیره تأمین وجود دارد. کاهش سقف انتشار به ۳۰ درصد مقدار پایه، منجر به افزایش ۱۴.۹ درصدی هزینه کل، کاهش ۲۰ درصدی فرصت‌های شغلی و کاهش ۱۴.۱ درصدی پاسخگویی

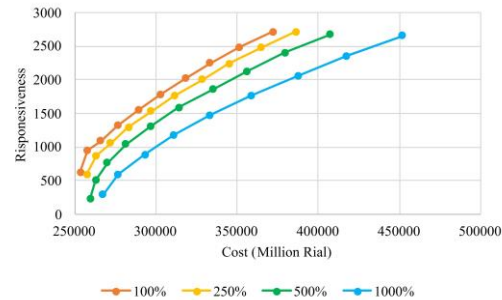


Figure 8. Pareto analysis with increasing transportation cost - cost versus responsiveness.

شکل ۸. تحلیل پارتو با افزایش هزینه حمل و نقل - هزینه در برابر پاسخگویی.

اما افزایش‌های شدیدتر (تا ۱۰۰۰ درصد) تأثیرات مخربی بر عملکرد سیستم دارد. در این شرایط، هزینه‌های حمل و نقل به حدی می‌رسد که حتی با وجود بهینه‌سازی مسیرها، دستیابی به سطوح مطلوب خدمت‌دهی و اشتغال‌زایی با هزینه‌های بسیار بالایی همراه است.

در این مطالعه، پارامتر هزینه حمل‌ونقل به صورت یک پارامتر تجمیعی در نظر گرفته شده است که بخش مهمی از آن از قیمت سوخت تأثیر می‌پذیرد؛ در تحلیل حساسیت، برای بررسی اثر تغییرات هزینه‌های وابسته به سوخت، این پارامتر به صورت یکنواخت در بازه‌ای از ۱۰۰ درصد تا افزایش ۱۰۰۰ درصد نسبت به مقدار پایه تغییر داده می‌شود، در حالی که سایر اجزای هزینه در سطح پایه ثابت فرض شده‌اند. این یافته‌ها پیامدهای مهمی برای سیاست‌گذاری دارد. اصلاح تدریجی و هدفمند قیمت‌های انرژی می‌تواند منجر به بهبود کارایی شود، اما شوک‌های قیمتی شدید، آسیب‌های جبران‌ناپذیری به زنجیره‌های تأمین وارد می‌کند.

سیستم می‌شود. این تغییرات شدید نشان‌دهنده آن است که محدودیت‌های زیست‌محیطی افراطی، انعطاف‌پذیری مدل را به شدت محدود کرده و زنجیره تأمین را مجبور به انتخاب گزینه‌های پرهزینه‌تر می‌سازد. در این شرایط، مدل ناگزیر است از فناوری‌های کم‌کربن‌تر با هزینه سرمایه‌گذاری بالاتر استفاده کند، مسیرهای حمل‌ونقل کوتاه‌تر با هزینه واحد بیشتر را انتخاب نماید و ظرفیت برخی تسهیلات را به دلیل محدودیت انتشار، کاهش دهد که همه این عوامل به افزایش هزینه‌ها و کاهش اشتغال منجر می‌شوند.

در سوی دیگر طیف، افزایش سقف انتشار به ۳۰ درصد مقدار پایه، تنها به کاهش ۶.۵ درصدی هزینه کل و افزایش ۱۱.۴ درصدی اشتغال منجر می‌شود. این عدم تقارن در حساسیت نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی نسبتاً نزدیک به نقطه بهینه اقتصادی-زیست‌محیطی طراحی شده است و آسان‌سازی بیش‌ازحد محدودیت‌های زیست‌محیطی، مزایای اقتصادی قابل‌توجهی ایجاد نمی‌کند. این یافته حاکی از آن است که زنجیره تأمین در سطح فعلی، از ظرفیت‌های اصلی خود برای کاهش هزینه استفاده کرده و عوامل محدودکننده اصلی، دیگر پارامترهایی چون ظرفیت باغات و تقاضای بازار هستند، نه محدودیت انتشار کربن.

از منظر پاسخگویی، تأثیرات نسبتاً متعادل‌تری مشاهده می‌شود. کاهش ۳۰ درصدی سقف، پاسخگویی را ۱۴.۱ درصد کاهش می‌دهد و افزایش ۳۰ درصدی آن، پاسخگویی را ۶.۳ درصد بهبود می‌بخشد. این یافته نشان می‌دهد که محدودیت‌های زیست‌محیطی به‌طور مستقیم بر قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری عملیاتی زنجیره تأمین تأثیر می‌گذارند، زیرا گزینه‌های کمتری

برای مدیریت اختلالات و نوسانات در اختیار سیستم قرار می‌دهند.

این تحلیل نشان می‌دهد که سیاست‌های زیست‌محیطی باید با رویکردی متوازن و تدریجی تدوین شوند. کاهش شدید و یکباره سقف انتشار، نه تنها از نظر فنی دشوار است، بلکه آثار زیان‌باری بر اقتصاد و اشتغال دارد. یک استراتژی مناسب، کاهش تدریجی سقف به ۱۰ درصد در افق میان‌مدت و سپس ادامه کاهش با سرعت کمتر و همراه با سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک‌تر است. این رویکرد، فرصت کافی برای سازگاری تدریجی صنعت و جلوگیری از شوک‌های اقتصادی و اجتماعی را فراهم می‌آورد.

۵.۳.۶. تحلیل حساسیت اقتصاد چرخشی

ادغام اقتصاد چرخشی از طریق تبدیل ضایعات به بیوپار، یکی از نوآوری‌های کلیدی مدل پیشنهادی است که در بخش‌های قبل مقاله بر آن تأکید شده است. برای ارزیابی کمی ارزش افزوده این رویکرد، مدل در دو سناریو اجرا شد: سناریو اول شامل تسهیلات ترموشیمیایی برای تبدیل ضایعات آلی به بیوپار (سناریو پایه) و سناریو دوم بدون این تسهیلات و با فرض دفع سنتی ضایعات.

نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که حذف تسهیلات بیوپار، تأثیرات منفی چندگانه‌ای بر عملکرد زنجیره تأمین دارد. از منظر اقتصادی، حذف اقتصاد چرخشی منجر به افزایش ۶.۹ درصدی هزینه کل (معادل ۱۷,۲۰۰ میلیون ریال) می‌شود که عمدتاً ناشی از دو عامل است: نخست، از دست رفتن درآمد حاصل از فروش بیوپار که سالانه حدود ۸۵۰ میلیون ریال برآورد می‌شود و دوم، هزینه دفع سنتی ضایعات شامل حمل‌ونقل به محل دفن و هزینه‌های عملیاتی دفن که

مجموعاً ۳,۲۰۰ میلیون ریال در سال برآورد می‌شود. در سناریو بدون بیوچار، زنجیره تأمین سالانه حدود ۲,۴۰۰ تن ضایعات آلی شامل برگ‌های نامرغوب، شاخه‌های ریز و میوه‌های فاسد تولید می‌کند که باید به‌صورت سنتی دفع شوند، در حالی که در رویکرد اقتصاد چرخشی، این ضایعات به حدود ۹۶۰ تن بیوچار با ارزش اقتصادی تبدیل می‌شوند.

از بُعد اجتماعی، حذف تسهیلات بیوچار باعث کاهش ۵.۷ درصدی فرصت‌های شغلی می‌شود که معادل از دست رفتن ۲۰ فرصت شغلی است. این کاهش شامل مشاغل ثابت در تسهیلات ترموشیمیایی مانند اپراتورهای فرآیند، تکنسین‌های تعمیرات و کارشناسان کنترل کیفیت و همچنین مشاغل متغیر مرتبط با جمع‌آوری و حمل‌ونقل ضایعات می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که اقتصاد چرخشی علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، نقش مهمی در اشتغال‌زایی پایدار در مناطق روستایی دارد که خود یکی از اهداف توسعه پایدار کشاورزی است.

پاسخگویی سیستم نیز با کاهش ۴.۷ درصدی نسبت به سناریو پایه مواجه می‌شود. این کاهش نشان می‌دهد که حضور تسهیلات بیوچار نه تنها به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی توجیه‌پذیر است، بلکه از منظر عملیاتی نیز با افزودن یک لایه انعطاف‌پذیری به زنجیره تأمین، قابلیت اطمینان کلی سیستم را بهبود می‌بخشد. این بهبود ناشی از کاهش وابستگی به خدمات دفع زباله خارجی و ایجاد یک جریان درآمدی پایدار از محصولات جانبی است.

این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که اقتصاد چرخشی در زنجیره تأمین عنب، تنها یک الزام زیست‌محیطی نیست، بلکه یک فرصت اقتصادی-اجتماعی است که با

تبدیل ضایعات به محصولی ارزشمند، هم‌زمان به کاهش هزینه‌ها، افزایش اشتغال و کاهش قابل‌توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. این یافته با اصول بنیادین اقتصاد چرخشی که بر «بسته شدن حلقه‌ها» و «ارزش‌آفرینی از ضایعات» تأکید دارد، کاملاً همسو است و اثربخشی این رویکرد در زنجیره‌های تأمین کشاورزی را به‌صورت کمی تأیید می‌کند.

۴.۶. بینش‌های مدیریتی

نتایج این پژوهش راهنمایی عملی برای مدیران و سیاست‌گذاران صنعت عنب و محصولات کشاورزی مشابه ارائه می‌دهد:

محلی‌سازی هوشمندانه عملیات: تمرکز تسهیلات فرآوری در نزدیکی مراکز تولید (مانند خوسف، سریشه و قائن) هزینه‌های حمل‌ونقل را کاهش داده، اشتغال محلی را تقویت کرده و از فساد محصول جلوگیری می‌کند.

مدیریت پیشگیرانه عدم قطعیت: ارزش ۳۴۸۳ میلیون ریالی اطلاعات کامل، اهمیت سرمایه‌گذاری در سیستم‌های پیش‌بینی، پایش باغات و تحلیل بازار را نشان می‌دهد.

اقتصاد چرخشی به‌عنوان مزیت رقابتی: تبدیل ضایعات به بیوچار نه تنها الزامی زیست‌محیطی است، بلکه با توجه به تقاضای رو به رشد برای بهبوددهنده‌های خاک، منبع درآمد پایدار ایجاد می‌کند.

آمادگی برای تغییرات ساختاری: تحلیل حساسیت قیمت سوخت بر لزوم آمادگی برای افزایش هزینه‌های انرژی از طریق بهینه‌سازی حمل‌ونقل و بازنگری مکان تسهیلات تأکید دارد.

موفقیت در این صنعت نیازمند نگاهی جامع، بلندمدت و چندبعدی است. رویکردهای سنتی متمرکز بر کاهش هزینه‌های کوتاه‌مدت در محیط پرتلاطم امروز ناکارآمدند و ترکیبی از تفکر استراتژیک، پایداری و انعطاف‌پذیری عملیاتی کلید موفقیت است.

شکاف تحقیقاتی در زنجیره تأمین عناب را پر کرده و الگویی کاربردی برای سایر محصولات کشاورزی در ایران ارائه می‌دهد. تحقیقات آینده می‌تواند تأثیرات بلندمدت اقتصاد چرخه‌ای، پیش‌بینی عرضه و تقاضا، و تغییرات اقلیمی را بررسی کند.

۷. نتیجه‌گیری

این پژوهش با ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندمنظوره برای زنجیره تأمین حلقه بسته عناب در ایران، راهکاری عملی برای دستیابی به پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پیشنهاد کرده است. ادغام اصول اقتصاد چرخه‌ای، از جمله تبدیل ضایعات به بایوچار، نه تنها اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد، بلکه با افزایش حاصلخیزی خاک، ارزش افزوده ایجاد می‌کند. استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با سناریوهای خوش‌بینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه، مدیریت عدم قطعیت عرضه و قیمت را بهبود بخشیده و انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین را تقویت کرده است. مطالعه موردی در خراسان جنوبی کارایی را نشان داد و تحلیل حساسیت تأثیر تقاضا، هزینه‌ها و به‌ویژه هزینه‌های حمل‌ونقل تحت نوسانات قیمت سوخت را برجسته کرد، که برای مدیریت ناترازی انرژی در زنجیره تأمین حیاتی است. علاوه بر آن، تحلیل حساسیت هزینه‌های حمل‌ونقل، تحت تأثیر نوسانات قیمت سوخت، اطلاعات مفیدی را فراهم می‌کند که مدیران می‌توانند از آن برای مدیریت زنجیره‌های تأمین در مناطق با ناترازی انرژی، مانند نوسانات عرضه سوخت، استفاده کنند.

یافته‌ها نشان‌دهنده ضرورت تعادل میان کاهش هزینه‌ها، حداکثر کردن ایجاد شغل و بهبود پاسخگویی است، که با الگوریتم AUGMECON^۲ بهینه شده و از طریق تحلیل حساسیت تأیید شده است. این مطالعه

References-منابع

1. Banerjee, P., Singh, D. and Kunja, S. R., ۲۰۲۴. Circular economy in agro food supply chain: bibliometric and network analysis. *Business Strategy & Development*, 7(۲), e۳۶۰. <https://doi.org/10.1002/bsd۲.۳۶۰>.
۲. Mogale, D. G., Ghadge, A., Cheikhrouhou, N. and Tiwari, M. K., ۲۰۲۳. Designing a food supply chain for enhanced social sustainability in developing countries. *International Journal of Production Research*, 61(۱۰), pp. ۳۱۸۴-۳۲۰۴. <https://doi.org/10.1080/00۲۰۷۵۴۳.۲۰۲۲.۲۰۷۸۷۴۶>.
۳. Gholian-Jouybari, F., Hashemi-Amiri, O., Mosallanezhad, B. and Hajiaghayi-Keshteli, M., ۲۰۲۳. Metaheuristic algorithms for a sustainable agri-food supply chain considering marketing practices under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 213, p. ۱۱۸۸۸۰. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.۲۰۲۲.۱۱۸۸۸۰>.
۴. Darouni, H., Barzinpour, F. and Kalantari Khalil Abad, A. R., ۲۰۲۵. Data-driven stochastic programming for sustainable agricultural supply chain design: toward the circular economy. *Journal of Environmental Management*, 393, p. ۱۲۷۱۲۱. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.۲۰۲۵.۱۲۷۱۲۱>.

- Ruwaard, J. M. and van der Vorst, J. G. A. J., ۲۰۱۷. Closing loops in agricultural supply chains using multi-objective optimization: a case study of an industrial mushroom supply chain. *International Journal of Production Economics*, 183, pp. ۴۰۹–۴۲۰. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.۲۰۱۶.۰۸.۰۱۲>.
۱۱. Liao, Y., Kaviyani-Charati, M., Hajiaghaei-Keshteli, M. and Diabat, A., ۲۰۲۰. Designing a closed-loop supply chain network for citrus fruits crates considering environmental and economic issues. *Journal of Manufacturing Systems*, 55, pp. ۱۹۹–۲۲۰. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.۲۰۲۰.۰۲.۰۰۱>.
 ۱۲. Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., Akbapour, N. and Hajiaghaei-Keshteli, M., ۲۰۲۱. Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, p. ۱۱۰۸۲۱. <https://doi.org/10.1016/j.rser.۲۰۲۱.۱۱.۸۲۱>.
 ۱۳. Cheraghalipour, A., Paydar, M. M. and Hajiaghaei-Keshteli, M., ۲۰۱۹. Designing and solving a bi-level model for rice supply chain using the evolutionary algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, pp. ۶۵۱–۶۶۸. <https://doi.org/10.1016/j.compag.۲۰۱۹.۰۴.۰۴۱>.
 ۱۴. Chouhan, V. K., Khan, S. H. and Hajiaghaei-Keshteli, M., ۲۰۲۱. Metaheuristic approaches to design and address multi-echelon sugarcane closed-loop supply chain network. *Soft Computing*, 25(۱۶), pp. ۱۱۳۷۷–۱۱۴۰۴.
 ۱۵. Izadian, A. B., Pasandideh, S. H. R. and Kalantari Khalil Abad, A. R., ۲۰۲۴. A new approach for reliability modeling in green closed-loop supply chain design under post-pandemic conditions: a case study. *Computers & Chemical Engineering*, 189, p. ۱۰۸۸۰۳. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.۲۰۲۴.۱۰۸۸۰۳>.
 ۱۶. Birge, J. R. and Louveaux, F., ۲۰۱۱. Introduction to stochastic programming. Springer New York, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/۹۷۸-۱-۴۶۱۴-۰۲۳۷-۴>.
 ۱۷. Kalimuthu, T., Kalpana, P., Kuppasamy, S. and Sreedharan, V. R., ۲۰۲۴. Intelligent decision-making framework for agriculture supply chain in emerging economies: research opportunities and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219, p. ۱۰۸۷۶۶. <https://doi.org/10.1016/j.compag.۲۰۲۴.۱۰۸۷۶۶>.
 ۱۸. Moreno-Miranda, C. and Dries, L., ۲۰۲۲. Integrating coordination mechanisms in the sustainability assessment of agri-food chains: from a structured literature review to a comprehensive framework. *Ecological Economics*, 192, p. ۱۰۷۲۶۵. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.۲۰۲۱.۱۰۷۲۶۵>.
 ۱۹. Yadav, V. S., Singh, A. R., Gunasekaran, A., Raut, R. D. and Narkhede, B. E., ۲۰۲۲. A systematic literature review of the agro-food supply chain: challenges, network design, and performance measurement perspectives. *Sustainable Production and Consumption*, 29, pp. ۶۸۵–۷۰۴. <https://doi.org/10.1016/j.spc.۲۰۲۱.۱۱.۰۱۹>.
 ۲۰. Banasik, A., Kanellopoulos, A., Claassen, G. D. H., Bloemhof-

- pareto-based algorithms. *Journal of Environmental Management*, 328, p. 116892.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116892>.
۲۰. Gholian-Jouybari, F., Hajiaghaei-Keshteli, M., Bavar, A., Bavar, A. and Mosallanezhad, B., ۲۰۲۳. A design of a circular closed-loop agri-food supply chain network—a case study of the soybean industry. *Journal of Industrial Information Integration*, 36, p. 100530.
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100530>.
۲۱. Gholian-Jouybari, F., Hajiaghaei-Keshteli, M., Smith, N. R., Rodríguez Calvo, E. Z., Mejía-Argueta, C. and Mosallanezhad, B., ۲۰۲۴. An in-depth metaheuristic approach to design a sustainable closed-loop agri-food supply chain network. *Applied Soft Computing*, 150, p. 111017.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111017>.
۲۲. Shahsavani, I., Goli, A. and Hajiaghaei-Keshteli, M., ۲۰۲۴. A circular economy approach to design a citrus supply chain network. *Annals of Operations Research*.
<https://doi.org/10.1007/s10479-024-05829-0>.
۲۳. Behzadi, G., O'Sullivan, M. J., Olsen, T. L. and Zhang, A., ۲۰۱۸. Agribusiness supply chain risk management: a review of quantitative decision models. *Omega*, 79, pp. 21–42.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.005>.
۲۴. Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F. and Labadie, N., ۲۰۱۶. Handling uncertainty in agricultural supply chain management: a state of the art. *European Journal of Operational Research*, 254(۲), pp. 348–359.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.053>.
۱۵. Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., Gholian-Jouybari, F., Rodríguez Calvo, E. Z. and Hajiaghaei-Keshteli, M., ۲۰۲۲. Designing a closed-loop supply chain network considering social factors; a case study on avocado industry. *Applied Mathematical Modelling*, 101, pp. 600–631.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.08.030>.
۱۶. Cheraghalipour, A., Paydar, M. M. and Hajiaghaei-Keshteli, M., ۲۰۱۸. A bi-objective optimization for citrus closed-loop supply chain using pareto-based algorithms. *Applied Soft Computing*, 69, pp. 33–59.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.04.022>.
۱۷. Roghanian, E. and Cheraghalipour, A., ۲۰۱۹. Addressing a set of meta-heuristics to solve a multi-objective model for closed-loop citrus supply chain considering CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 239, p. 118081.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118081>.
۱۸. Seydanlou, P., Jolai, F., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Fathollahi-Fard, A. M., ۲۰۲۲. A multi-objective optimization framework for a sustainable closed-loop supply chain network in the olive industry: hybrid meta-heuristic algorithms. *Expert Systems with Applications*, 203, p. 117066.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117066>.
۱۹. Goodarzian, F., Ghasemi, P., Santibanez Gonzalez, E. D. R. and Tirkolaee, E. B., ۲۰۲۳. A sustainable-circular citrus closed-loop supply chain configuration:

۳۰. Foroozesh, N., Karimi, B. and Mousavi, S. M., ۲۰۲۲. Green-resilient supply chain network design for perishable products considering route risk and horizontal collaboration under robust interval-valued type-۲ fuzzy uncertainty: a case study in food industry. *Journal of Environmental Management*, 307, p. ۱۱۴۴۷۰. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.۲۰۲۲.۱۱۴۴۷۰>.
۳۱. Aghajani, D., Seraji, H., Kaur, H. and Vilko, J., ۲۰۲۴. A sustainable integrated model for multi-objective planning of an agri-food supply chain under uncertain parameters: a case study. *Computers & Chemical Engineering*, 188, p. ۱۰۸۷۶۶. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.۲۰۲۴.۱۰۸۷۶۶>.
۳۲. Rahbari, M., Arshadi Khamseh, A. and Mohammadi, M., ۲۰۲۳. A novel multi-objective robust fuzzy stochastic programming model for sustainable agri-food supply chain: case study from an emerging economy. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(۲۵), pp. ۶۷۳۹۸-۶۷۴۴۲. <https://doi.org/10.1007/s113۵۶-۰۲۳-۲۶۳۰۵-w>.
۳۳. Darouni, H., Barzinpour, F. and Kalantari Khalil Abad, A. R., ۲۰۲۵. Integrating machine learning and distributionally robust optimization for sustainable agricultural supply chains under global warming uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 194, p. ۱۰۹۴۱۲. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.۲۰۲۵.۱۰۹۴۱۲>.
۳۴. Ebrahimi, S. B. and Bagheri, E., ۲۰۲۲. Optimizing profit and reliability using a bi-objective mathematical model for oil and gas supply chain under disruption risks. *Computers & Industrial* <https://doi.org/10.1016/j.cijor.۲۰۲۲.۰۵۷>.
۳۵. Keshavarz-Ghorbani, F. and Pasandideh, S. H. R., ۲۰۲۲. A lagrangian relaxation algorithm for optimizing a bi-objective agro-supply chain model considering CO₂ emissions. *Annals of Operations Research*, 314(۲), pp. ۴۹۷-۵۲۷. <https://doi.org/10.10۰۷/s1۰۴۷۹-۰۲۱-۰۳۹۳۶-۱>.
۳۶. Hosseini-Motlagh, S. M., Ghatreh Samani, M. R. and Abbasi Saadi, F., ۲۰۲۱. Strategic optimization of wheat supply chain network under uncertainty: a real case study. *Operational Research*, 21(۳), pp. ۱۴۸۷-۱۵۲۷. <https://doi.org/10.10۰۷/s1۲۳۵۱-۰۱۹-۰۰۵۱۵-y>.
۳۷. Kalantari Khalil Abad, A. R., Barzinpour, F. and Pishvae, M. S., ۲۰۲۳. Toward circular economy for pomegranate fruit supply chain under dynamic uncertainty: a case study. *Computers & Chemical Engineering*, 178, p. ۱۰۸۳۶۲. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.۲۰۲۳.۱۰۸۳۶۲>.
۳۸. Gilani, H. and Sahebi, H., ۲۰۲۱. A multi-objective robust optimization model to design sustainable sugarcane-to-biofuel supply network: the case of study. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(۶), pp. ۲۵۲۱-۲۵۴۲. <https://doi.org/10.10۰۷/s1۳۳۹۹-۰۲۰-۰۰۶۳۹-۸>.
۳۹. Baghizadeh, K., Cheikhrouhou, N., Govindan, K. and Ziyarati, M., ۲۰۲۲. Sustainable agriculture supply chain network design considering water-energy-food nexus using queuing system: a hybrid robust possibilistic programming. *Natural Resource Modeling*, 35(۱), e۱۲۳۳۷. <https://doi.org/10.1۱۱۱/nrm.۱۲۳۳۷>.

agricultural support services company. *Sharif Industrial Engineering and Management Journal*, 40(۲), pp. ۳۰-۵۶

[In Persian].
<https://doi.org/10.24200/j.65.2023.6166.2.2335>.

۴۰. Rahmani, M., Sazvar, Z. and Bozorgi-Amiri, A., ۲۰۱۹. Presenting a three-objective mathematical model for sustainable planning of perishable agricultural materials supply chain. *Sharif Industrial Engineering and Management Journal*, 35.1(۱,۲), pp. ۲۵-۳۸ [In Persian].
<https://doi.org/10.24200/j.65.2018.7103.1788>.

۴۱. Mavrotas, G. and Florios, K., ۲۰۱۳. An improved version of the augmented ϵ -constraint method (AUGMECON۲) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219(۱۸), pp. ۹۶۵۲-۹۶۶۹.
<https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.03.002>.

پیوست الف. نمادهای مدل ریاضی چند هدفه

F = مجموعه مزارع عناب؛

R = مجموعه مکان‌های کاندید برای مراکز تأمین؛

G = مجموعه مکان‌های نامزد برای مراکز توزیع؛

E = مجموعه مکان‌های نامزد برای تسهیلات استخراج؛

L = مجموعه مکان‌های نامزد برای تسهیلات برگ؛

W = مجموعه مکان‌های نامزد برای تسهیلات چوب؛

O = مجموعه مکان‌های نامزد برای مراکز روغن؛

C = مجموعه مکان‌های نامزد برای تسهیلات ترموشیمیایی؛

I = مجموعه تمام تسهیلات؛

$(I = R \cup G \cup D \cup E \cup L \cup W \cup O \cup C)$

GM = مجموعه بازارهای عمومی؛

FM = مجموعه صنایع غذایی و نوشیدنی؛

Engineering, 163, p. ۱۰۷۸۴۹.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107849>.

۳۵. Fazli-Khalaf, M., Naderi, B., Mohammadi, M. and Pishvae, M. S., ۲۰۲۰. Design of a sustainable and reliable hydrogen supply chain network under mixed uncertainties: a case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(۵۹), pp. ۳۴۵۰۳-۳۴۵۳۱.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.276>.

۳۶. Alizadeh, M., Kalantari Khalil Abad, A. R., Jahani, H. and Makui, A., ۲۰۲۴. Prevention of post-pandemic crises: a green sustainable and reliable healthcare supply chain network design for emergency medical products. *Journal of Cleaner Production*, 434, p. ۱۳۹۷۰۲.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139702>.

۳۷. Kalantari Khalil Abad, A. R., Barzinpour, F. and Pishvae, M. S., ۲۰۲۳. Green and reliable medical device supply chain network design under deep dynamic uncertainty: a novel approach in the context of COVID-۱۹ outbreak. *Applied Soft Computing*, 149, p. ۱۱۰۹۶۴.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110964>.

۳۸. Pasandideh, S. H. R., Akhavan Niaki, S. T. and Asadi, K., ۲۰۱۵. Optimizing a bi-objective multi-product multi-period three echelon supply chain network with warehouse reliability. *Expert Systems with Applications*, 42(۵), pp. ۲۶۱۵-۲۶۲۳.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.018>.

۳۹. Akbari, F., Yaghoubi, S. and Bahrami, H., ۲۰۲۵. Coordination of biofuel supply chain members considering the level of technology of farmers and

CM = مجموعه صنایع آرایشی صنایع دارویی؛

PM = مجموعه صنایع دارویی؛

NM = مجموعه صنایع مبلمان؛

IM = مجموعه صنایع آلات موسیقی؛

SM = مجموعه بازار های ثانویه؛

J = مجموعه تمام بازارها؛

$$(J = GM \cup FM \cup CM \cup PM \cup NM \cup IM \cup SM)$$

K = مجموعه اعضای زنجیره تأمین؛

$$(K = F \cup I \cup J)$$

P = مجموعه محصولات (عنب، میوه سالم، میوه

متوسط، میوه کم کیفیت، دانه، روغن، برگ، برگ سبز،

چوب، چوب سبز، ضایعات، بایوچار؛

P' = زیرمجموعه ای از P که برای نرخ تولید در هر

مرکز استفاده می شود؛

T = مجموعه دوره ها؛

پارامترهای اقتصادی

$PC_{f,p}^t$ = قیمت خرید هر محصول $p \in P$ از مزارع

$f \in F$ در دوره $t \in T$ ؛

$QC_{i,p}^t$ = هزینه عملیاتی هر محصول $p \in P$ در مرکز

$i \in I$ در دوره $t \in T$ ؛

OC_i^t = هزینه راه اندازی مکان بالقوه مرکز $i \in I$ در

دوره $t \in T$ ؛

$TC_{i,k,p}^t$ = هزینه حمل و نقل هر محصول $p \in P$ از مکان

$i \in I \cup F$ به $k \in K$ در $t \in T$ ؛

$IC_{i,p}^t$ = هزینه نگهداری هر محصول $p \in P$ در مرکز

$i \in I$ در $t \in T$ ؛

$SC_{i,p}^t$ = هزینه کمبود هر محصول $p \in P$ در مرکز

$j \in J$ در دوره $t \in T$ ؛

$DM_{j,p}^t$ = تقاضای مشتری $j \in J$ برای محصول $p \in P$ در

دوره $t \in T$ ؛

$FP_{f,p}^t$ = مقدار محصول $p \in P$ برداشت شده در

مزرعه $f \in F$ در دوره $t \in T$ ؛

$CO_{i,p}^t$ = ظرفیت محصول $p \in P$ در مرکز $i \in I$ که

می تواند در هر دوره فعالیت کند $t \in T$ ؛

HC_i^t = ظرفیت نگهداری موجودی در مرکز $i \in I$ در

دوره $t \in T$ ؛

$at_{p,p}$ = نرخ تبدیل محصول $p \in P$ به محصول

$p' \in P$

$\lambda_{i,t}$ = پارامتر توزیع نمایی، نشان دهنده نرخ شکست

مرکز $i \in I$ در $t \in T$ ؛

پارامترهای اجتماعی

FJ_i = تعداد فرصت های شغلی ثابت ایجاد شده در

مرکز $i \in I$ ؛

$VJ_{i,p}$ = مقدار مورد نیاز محصول فرآوری شده $p \in P$

برای ایجاد یک شغل در مرکز $i \in I \cup F$ ؛

پارامترهای زیست محیطی

OE_i^t = آلودگی زیست محیطی برای احداث مرکز $i \in I$

در دوره $t \in T$ ؛

$ME_{i,p}^t$ = آلودگی زیست محیطی تولید شده توسط

محصول $p \in P$ تولید شده در مرکز $i \in I$ در دوره $t \in T$ ؛

T ؛

$RE_{i,k,p}^t$ = آلودگی زیست محیطی ناشی از حمل و نقل

محصول $p \in P$ بین مرکز $i \in I \cup F$ و $k \in K$ در دوره

$t \in T$ ؛

$HE_{i,p}^t$ = آلودگی زیست محیطی در طول نگهداری

محصول $p \in P$ در مرکز $i \in I$ در دوره $t \in T$ ؛

$CAPR_t$ = حد بالای کل انتشار CO_2 در دوره $t \in T$ ؛

متغیرهای تصمیم

حجم محصول $p \in P$ ارسال شده از $QT_{i,k,p}^t =$

$i \in I \cup F$ به $k \in K$ در دوره $t \in T$ ؛

حجم محصول $p \in P$ ذخیره شده در مرکز $QH_{i,p}^t =$

$i \in I$ در دوره $t \in T$ ؛

حجم محصول $p \in P$ تولید شده در مرکز $i \in I$ $QM_{i,p}^t =$

$i \in I$ در دوره $t \in T$ ؛

کمبود حجم محصول $p \in P$ در مرکز $j \in J$ $QS_{j,p}^t =$

در دوره $t \in T$ ؛

$Z_i^t = 1$ ، اگر مکان بالقوه مرکز $i \in I$ در دوره $t \in T$

افتتاح شود؛ در غیر این صورت ۰.