



یک مدل جدید بهینه سازی طراحی شبکه لجستیک معکوس چند سطحی برای باتری های ضایعاتی با در نظر گرفتن انواع فناوری تاسیسات

آرش آپرناک

دکتری مهندسی صنایع دانشگاه تهران و استادیار دانشگاه معماری و هنر پارس

بهاره رستگاری موحد

کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه معماری و هنر پارس

امیر اشکان صالحیان

کارشناسی مهندسی صنایع دانشگاه هنر و معماری پارس

چکیده

با افزایش روزافزون استفاده از خودروهای برقی¹، پیش بینی می شود که حجم باتری های فرسوده نیز در آینده به طور مداوم افزایش یابد. طراحی شبکه لجستیک معکوس² برای بازیافت این باتری ها به موضوعی مهم و مورد توجه در حوزه های علمی و اجتماعی تبدیل شده است، اما تحقیقات انجام شده در این زمینه هنوز به عمق کافی نرسیده اند. این پژوهش با هدف بهینه سازی یک شبکه چندسطحی لجستیک ارائه می دهد که (MILP)³ معکوس برای باتری های مستعمل، یک مدل برنامه ریزی خطی صحیح ترکیبی از نگاه اقتصاد چرخشی طراحی شده است. مدل پیشنهادی در تلاش است تا از یک سو هزینه ها را به حداقل برساند و از سوی دیگر میزان انتشار کربن را کاهش دهد. برای برقراری تعادل میان این دو هدف متضاد، یک ضریب وزنی پیش بینی شده در مدل لحاظ شده است. در این تحقیق، سطوح مختلف فناوری برای واحدهای پردازشی در نظر گرفته شده تا پایداری زیست محیطی شبکه افزایش یابد. این مدل روی یک مطالعه موردی عددی در منطقه کلان شهری نانجینگ چین اجرا شده و نتایج آن شامل بهترین مکان یابی برای تأسیسات، نوع فناوری های مناسب برای هر مرکز و مسیرهای بهینه حمل و نقل میان آنهاست. یافته ها نشان می دهند که انتخاب درست فناوری برای مراکز فرآوری تأثیر زیادی در کاهش هزینه های بازیافت و کاهش انتشار کربن دارد. همچنین، تحلیل حساسیت انجام شده اهمیت فاکتورهای نامطمئن در طراحی این شبکه ها را نشان می دهد و بر نیاز به نگاهی آینده نگرانه برای توسعه پایدار بلندمدت شرکت ها تأکید دارد. در نهایت، بینش های مدیریتی حاصل از این مطالعه می توانند راهنمایی مؤثری برای شرکت ها و نهادهای دولتی باشند تا با استفاده از فناوری های پیشرفته تر، هم سود بیشتری کسب کنند و هم از میزان آلاینده گی بکاهند

کلمات کلیدی: جستیک معکوس، باتری های مستعمل خودروهای برقی، اقتصاد چرخشی، طراحی شبکه، مکان یابی تأسیسات، فناوری های بازیافت، کاهش انتشار کربن، پایداری زیست محیطی

¹ EV's (electric vehicles)

² RLND (Reverse Logistics Network Design)

³ Mixed-Integer Linear Programming (MILP)

۱. مقدمه

آلودگی هوا و امنیت انرژی به دغدغه‌هایی جهانی تبدیل شده‌اند، و خودروهای برقی (EVs) یکی از راهکارهای مؤثر برای مقابله با این مشکلات محسوب می‌شوند (یو و همکاران، ۲۰۱۹) طی سال‌های اخیر، چین مجموعه‌ای از سیاست‌های صنعتی را برای توسعه پایدار خودروهای برقی وضع کرده و به تدریج نظام سیاست‌گذاری منسجمی را در این حوزه شکل داده است (ژو و همکاران، ۲۰۲۰).^۴ در نتیجه این سیاست‌ها، میزان تولید و فروش خودروهای برقی سال به سال افزایش یافته است. باتری نیرو، که بخش کلیدی این خودروها به‌شمار می‌رود، در اثر استفاده مداوم و چرخه‌های مکرر شارژ و دشارژ، با کاهش ظرفیت شارژدهی و عمر مفید روبه‌رو می‌شود. زمانی که عملکرد باتری‌ها به سطحی مشخص کاهش یابد، باید از خودرو خارج شده و بازنشسته شوند (شارمیلی و همکاران، ۲۰۲۳).^۵ پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵، چین بیش از ۴۵ هزار تن باتری فرسوده تولید کند، که این موضوع نشان‌دهنده ظرفیت عظیم و آینده‌دار این صنعت است (کانگ و همکاران، ۲۰۲۳).^۶ نکته مهم اینجاست که باتری‌های فرسوده معمولاً بین ۶۰ تا ۸۰ درصد ظرفیت باقی‌مانده دارند، و همین امر فرصت‌های خوبی برای استفاده مجدد از آن‌ها فراهم می‌کند. اگر استفاده مرحله‌ای و منطقی از این باتری‌ها صورت گیرد، می‌توان عمر آن‌ها را افزایش داد و هم‌زمان انتشار کربن را کاهش داد (ژو و همکاران، ۲۰۲۰).^۷ باتری‌هایی که بیش از ۴۰ درصد ظرفیت دارند، با انجام تعمیر، بازسازی یا اصلاح، می‌توانند در حوزه‌هایی با نیاز پایین‌تر به عملکرد باتری مثل ذخیره‌سازی انرژی در بخش مخابرات، سیستم‌های قدرت، وسایل نقلیه کم‌سرعت یا منابع برق پشتیبان مورد استفاده قرار گیرند (تانگ و همکاران، ۲۰۱۳).^۸ در مقابل، باتری‌هایی که آسیب جدی دیده‌اند و دیگر قابل استفاده نیستند، قابلیت جداسازی به ماژول‌ها و قطعات مختلف را دارند. قطعات سالم می‌توانند برای تعمیر سایر باتری‌ها به کار روند و ماژول‌هایی مانند الکترودهای مثبت و منفی یا جعبه‌های باتری، می‌توانند بازیافت شده و منابع باارزشی چون نیکل، کبالت، منگنز و سایر فلزات را بازیابی کنند (کوکت و همکاران، ۲۰۲۱).^۹ همچنین، پسماندهایی نظیر الکترولیت‌ها و مایعات خنک‌کننده که در فرایند جداسازی تولید می‌شوند، باید به‌صورت بی‌خطر تصفیه شده و سپس در محل دفن زباله به‌صورت متمرکز دفن شوند (شارمیلی و همکاران، ۲۰۲۳).^{۱۰} بازیافت باتری‌های فرسوده می‌تواند در کاهش کمبود منابع و آلودگی‌های زیست‌محیطی نقش مؤثری ایفا کند.^{۱۱} با این حال، روش‌ها و مدل‌های فعلی بازیافت اغلب از نظر سازگاری با محیط‌زیست و صرفه‌جویی اقتصادی، پاسخ‌گوی نیازها نیستند (لی و همکاران، ۲۰۲۳).^{۱۲} در چین، بخش قابل توجهی از باتری‌های فرسوده وارد بازار سیاه می‌شوند؛ جایی که این باتری‌ها عمدتاً توسط کارگاه‌های غیرمجاز و کوچک برای استخراج فلزات ارزشمند پردازش می‌شوند. این کارگاه‌ها معمولاً از فناوری‌های قدیمی استفاده می‌کنند که باعث اتلاف منابع و افزایش آلودگی در فرایند بازیافت می‌گردد (اوردونز و همکاران، ۲۰۱۶).^{۱۳} به‌طور کلی، صنعت بازیافت باتری در چین با چالش‌های متعددی مواجه است؛ از جمله بی‌نظمی در سیستم بازیافت، نبود مقررات مشخص، و کارایی پایین فرآیندها. بنابراین، ایجاد یک سیستم لجستیک معکوس کارآمد و پایدار برای بازیافت باتری‌ها از اهمیت بالایی برخوردار

⁴ Yu et al., 2019⁵ Zhou et al., 2020⁶ Sharmili et al., 2023⁷ Kang et al., 2023⁸ Xu et al., 2020⁹ Tong et al., 2013¹⁰ Kotak et al., 2021¹¹ Sharmili et al., 2023¹² Li et al., 2023¹³ Ordonez et al., 2016



است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳)^{۱۴} (ژاو و همکاران، ۲۰۰۷)^{۱۵} با تحلیل مشکلات موجود در فرآیند بازیافت باتری در چین، پیشنهادهایی برای ایجاد یک سیستم لجستیک معکوس ارائه کرده‌اند. با این حال، طراحی چنین شبکه‌ای مستلزم در نظر گرفتن عوامل متعددی است؛ از جمله مکان‌یابی گره‌های مختلف در شبکه، تصمیم‌گیری‌های لجستیکی بین این گره‌ها، مدیریت فعالیت‌های پیچیده لجستیکی، و مواجهه با عدم قطعیت‌هایی مانند مقدار و کیفیت محصولات بازیافتی (عزیزی و همکاران، ۲۰۲۳)^{۱۶}. تحقیقات انجام‌شده در زمینه سیستم‌های لجستیک معکوس باتری در چین هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد و بخش زیادی از باتری‌های قابل بازیافت، به‌صورت منطقی و مرحله‌ای استفاده نمی‌شوند). با بهره‌گیری از تجربیات کشورهای دیگر و بومی‌سازی آن‌ها با توجه به شرایط چین، همکاری میان خودروسازان و شرکت‌های لجستیک معکوس شخص ثالث (3PRL)^{۱۷} می‌تواند رویکردی مؤثر باشد. در این روش، شرکت‌های خودروساز مسئول جمع‌آوری باتری‌ها هستند و آن‌ها را به شرکت‌های همکار 3PRL تحویل می‌دهند تا فرآیند استفاده مرحله‌ای و بازیافت انجام شود. این همکاری می‌تواند به شکل‌گیری استانداردهای یکپارچه صنعتی و ایجاد سیستمی منطقی و کارآمد در زمینه بازیافت باتری کمک کند. از این‌رو، این پژوهش در چند محور به توسعه صنعت بازیافت باتری‌های فرسوده کمک می‌کند.

۲. مرور ادبیات

۱.۲. طراحی شبکه لجستیک معکوس (RLND)

لجستیک معکوس شامل فعالیت‌های لجستیکی مرتبط با دفع زباله، بازیافت و مدیریت مواد خطرناک است. این حوزه عمدتاً بر بازیابی کارآمد محصولات زائد و غیر ضروری تمرکز دارد (لاگنا و همکاران، ۲۰۲۲)^{۱۸}. طراحی شبکه لجستیک معکوس (RLND) یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل در زنجیره‌های تأمین لجستیک معکوس است (ملو و همکاران، ۲۰۰۹). پس از سال‌ها تحقیق توسط محققان، پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه‌هایی مانند تجهیزات پزشکی، الکترونیک (قلی زاده و همکاران، ۲۰۲۲)^{۱۹} زباله‌های ساختمانی (احمد و ژانگ، ۲۰۲۱)^{۲۰} و خودروهای پایان عمر (او و همکاران، ۲۰۲۴)^{۲۱} حاصل شده است. (چن و همکاران، ۲۰۲۴)^{۲۲} سیستم‌های تراکنش آفلاین و آنلاین را با توجه به ویژگی‌های چند دوره‌ای، چند محصولی و چند صف برای گوشی‌های موبایل دست دوم یکپارچه کرده و مدل بهینه‌سازی برنامه ریزی غیرخطی صحیح ترکیبی چندهدفه‌ای را ایجاد کردند. آن‌ها الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی سریع و غیرمسلط را برای ارزیابی اثربخشی مدل پیشنهاد دادند (سینگ و جوئل، ۲۰۲۴)^{۲۳} زنجیره تأمین لجستیک معکوس را توسعه دادند که حداکثر کاهش ضایعات نساجی را در شرایط تورمی هدف قرار می‌دهد. به‌طور کلی، تحقیقات موجود در زمینه طراحی شبکه لجستیک معکوس نشان می‌دهد که انتشار کربن و عدم قطعیت‌ها عوامل کلیدی مؤثر بر طراحی شبکه هستند (لی جیزی و همکاران، ۲۰۲۳)^{۲۴}. این مطالعه به مرور ادبیات مرتبط با این دو جنبه می‌پردازد. صنعت لجستیک معکوس بر

¹⁴ Zhang et al., 2023

¹⁵ Zhou et al., 2020

¹⁶ Azizi et al., 2020

¹⁷ Third-Party Reverse Logistics (3PRL)

¹⁸ Lagan`a et al., 2022

¹⁹ Gholizadeh et al., 2022

²⁰ Ahmed and Zhang, 2021

²¹ He et al., 2024

²² Chen et al. 2024

²³ Singh and Goel 2024

²⁴ Li Jizi et al., 2023

استفاده از نظریه‌های توسعه پایدار برای حل مسائل بازیافت و دفع زباله تأکید دارد (پاگلیارو و منگوزو^{۲۵}، ۲۰۱۹)، که پیچیدگی طراحی شبکه لجستیک معکوس (RLND) را افزایش می‌دهد (فرامرزی اغانی و همکاران، ۲۰۲۳)^{۲۶}. کاهش انتشار کربن برای دستیابی به RLND پایدار بسیار حیاتی است (Chen و همکاران، ۲۰۱۷)^{۲۷}. مطالعات موجود عمدتاً به این موضوع پرداخته‌اند که چگونه می‌توان انتشار کربن را به‌طور مؤثر از دیدگاه سیاست‌هایی مانند سهمیه‌های کربن، مالیات‌ها، تجارت، جبران خسارت‌ها و یارانه‌ها کاهش داد (محمد و همکاران^{۲۸}، ۲۰۱۷). در عین حال، تحقیقات کمتری در مورد استراتژی‌های کاهش انتشار کربن از دیدگاه شرکت‌ها وجود دارد. اما شرکت‌ها در خط مقدم اقدامات مرتبط با تغییرات اقلیمی قرار دارند و کاهش انتشار کربن از فعالیت‌های تولیدی آن‌ها برای حفاظت از محیط‌زیست ضروری است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰). این مطالعه یک طرح RLND از دیدگاه شرکت‌های شخص ثالث ارائه می‌دهد. در واقع، شبکه لجستیک معکوس (RLN) یک سیستم پیچیده است (کلیک و همکاران، ۲۰۲۳)^{۲۹} و انتشار کربن ممکن است از فرآیندهایی مانند حمل‌ونقل محصولات، بازیافت، پردازش و استفاده مجدد ناشی شود (لیو و همکاران، ۲۰۲۱)^{۳۰}. هنگام طراحی شبکه، تنها با در نظر گرفتن کامل انتشار کربن از تمام جنبه‌ها می‌توان به طراحی منطقی شبکه لجستیک معکوس دست یافت (ردی و همکاران، ۲۰۲۰)^{۳۱}. اهداف انتشار کربن و هزینه‌ها اغلب متناقض هستند و دشوار است که کاهش هزینه کل شبکه را هم‌زمان با کاهش انتشار کربن انجام داد. برخی از محققان در تلاش‌اند تا تعادلی بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی پیدا کنند (گو و همکاران^{۳۲}، ۲۰۱۷). برخی دیگر بر این باورند که تحت شرایط ایده‌آل، شرکت‌ها می‌توانند با افزایش سود کل، هم‌زمان انتشار کربن را کاهش دهند (لیو و همکاران، ۲۰۱۵)^{۳۳}. به‌عنوان مثال (شیائو و همکاران، ۲۰۱۹)^{۳۴} با یکپارچه‌سازی ارزش اقتصادی و انتشار کربن در ساخت شبکه لجستیک معکوس خودروهایی اسقاطی، به کاهش هم‌زمان هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی دست یافتند. علاوه بر این، محققان دیگر نیز انتشار کربن را از روش‌های مختلف به مدل‌های طراحی شبکه لجستیک معکوس وارد کرده‌اند (احمد و ژانگ^{۳۵}، ۲۰۲۱). هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای در حین فرآیند حمل‌ونقل را در نظر گرفته و شبکه لجستیک معکوس را برای کاهش هزینه‌ها طراحی کردند (کانان و همکاران^{۳۶}، ۲۰۲۵). مدل برنامه‌ریزی صحیح ترکیبی چندهدفه‌ای را برای پیکربندی شبکه‌های لجستیک معکوس با در نظر گرفتن چهار فناوری سبز برای کاهش انتشار کربن پیشنهاد دادند. عدم قطعیت یکی از نگرانی‌های اصلی در طراحی شبکه لجستیک معکوس است، جایی که عواملی مانند زمان برگشت محصول، کیفیت و کمیت از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این عدم قطعیت به‌شمار می‌آیند (سوبولان و همکاران^{۳۷}، ۲۰۱۵) (گوویندان و همکاران^{۳۸}، ۲۰۱۶). رویکردهایی برای مقابله با عدم قطعیت در زنجیره‌های تأمین مورد بررسی قرار دادند و برنامه‌ریزی ریاضی فازی را به‌عنوان

²⁵ Pagliaro and Meneguzzo, 2019

²⁶ Faramarzi-Oghani et al., 2023

²⁷ Chen et al., 2017

²⁸ Mohammed et al., 2017

²⁹ Kilic et al., 2023

³⁰ Liu et al., 2021

³¹ Reddy et al., 2020

³² Guo et al., 2017

³³ Liu et al., 2021

³⁴ Xiao et al. 2019

³⁵ Ahmed and Zhang 2021

³⁶ Kannan et al 2025

³⁷ Subulan et al., 2015

³⁸ Govindan et al.2016

روشی پرکاربرد برای حل چنین موقعیت‌هایی معرفی کردند (سوبولان و همکاران^{۳۹}) عدم قطعیت‌ها را در خصوص کمیت، نرخ برگشت و کیفیت محصولات برگشتی در نظر گرفته و از برنامه‌ریزی فازی برای تحلیل این عدم قطعیت‌ها استفاده کردند. رویکردهای برنامه‌ریزی تصادفی چند سناریویی و برنامه‌ریزی احتمالی برای بررسی مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته برای سیستم‌های باتری اسیدی-سربی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. (کشاورز قربانی و همکاران 2017) دو پارامتر نامشخص، تقاضای مشتری و قابلیت‌های تامین‌کننده را برای طراحی RLND حلقه بسته و حلقه باز در نظر گرفتند (یو و سولوانگ، 2017) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند سطحی و چند محصولی جدید با محدودیت‌های انتشار کربن برای RLND پایدار تحت عدم قطعیت در مقدار محصول و قیمت‌های بازیافت معرفی کردند. (تروچو و همکاران، 2019) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای RLND تحت عدم قطعیت در مکان منبع تامین پیشنهاد کردند و یک روش تقریب میانگین نمونه برای حل مدل تصادفی توسعه دادند. علاوه بر این، الگوریتم‌های ابتکاری مانند الگوریتم خوشه‌بندی (شهبازبگیان و همکاران، 2020^{۴۰}) و (الگوریتم زنبور ترکیبی هاشمی، 2021^{۴۱}) نیز به تدریج در زمینه RLND برای حل مسائل نامشخص به کار گرفته شده‌اند. با این حال، به دلیل محدودیت‌هایی که دارند، نمی‌توانند به طور گسترده مورد استفاده قرار گیرند. با ترکیب تحقیقات موجود در مورد انتشار کربن و عدم قطعیت‌ها در RLND، این مقاله انتشار کربن ناشی از پردازش و حمل و نقل تسهیلات، و همچنین عدم قطعیت‌ها در کمیت و کیفیت بازیافت را با مدل‌سازی این عوامل با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت-فرصت فازی در نظر می‌گیرد.

۲.۲ طراحی شبکه لجستیک معکوس (RLND) برای باتری‌های مستعمل

بازیافت و استفاده مؤثر از باتری‌های نیروگاهی خودروهای الکتریکی (EVs) نقش مهمی در استفاده مجدد از منابع فیزی، کاهش کربن و کاهش تغییرات آب و هوایی ایفا می‌کند (لیو و همکاران ۲۰۲۳) تحقیقات در مورد شبکه‌های بازیافت وسایل نقلیه پایان عمر نسبتاً بالغ است؛ مطالعات اولیه باتری‌ها را به عنوان قطعاتی در نظر می‌گرفتند که به همراه کل وسیله نقلیه اسقاط می‌شوند. (چان و همکاران ۲۰۱۲^{۴۲}) با این حال، باتری‌ها در مقایسه با کل وسیله نقلیه، چرخه‌های اسقاط متفاوتی دارند (رامونی و ژانگ ۲۰۱۳^{۴۳}) و تفاوت‌های قابل توجهی در خواص مواد، کانال‌های بازیافت، مقررات و الزامات زیست‌محیطی وجود دارد. رسیدگی به باتری‌های مستعمل نیازمند تخصص فنی و اقدامات زیست‌محیطی تخصصی تری برای رسیدگی به مواد خطرناک است (کانگ و همکاران، ۲۰۲۳).^{۴۴} مطالعات موجود به بحث در مورد مدیریت بازیافت باتری‌های مستعمل پرداخته‌اند. تانگ و همکاران (۲۰۱۸)^{۴۵} سازوکارهای بازیابی و سیاست‌های باتری را بررسی کردند ژانگ و همکاران (۲۰۱۸)^{۴۶}. عوامل مختلف محدودکننده بازیابی باتری را برجسته کردند. افزایش آگاهی زیست‌محیطی و تغییر الگوهای رفتاری را به عنوان کلید افزایش بازیابی باتری‌های مستعمل شناسایی کردند. ساسیکومار و حق (۲۰۱۰) بازیابی باتری را با تامین‌کنندگان لجستیک معکوس شخص ثالث ادغام کردند و در مورد مقرون به صرفه بودن آنها بحث کردند آلامرو و بریسو (۲۰۲۰). از یک رویکرد پویایی سیستم برای مدل‌سازی و در نظر گرفتن پویای هزینه، درآمد، تصمیمات استراتژیک و نظارتی در مورد باتری‌های مستعمل استفاده کردند و تعاملات بین این عوامل را بررسی کردند (ژانگ و لیو ۲۰۲۳) یک مدل هزینه-فایده با در نظر گرفتن استفاده آبشاری و استخراج فلزات با ارزش ایجاد کردند و

³⁹ Subulan et al., 2015

⁴⁰ Shahbazbegian et al., 2020

⁴¹ Hashemi, 2021

⁴² Chan et al., 2012

⁴³ Ramoni and Zhang, 2013

⁴⁴ Kang et al., 2023

⁴⁵ Tang et al. 2018

⁴⁶ Zhang et al. 2018

مزایای اقتصادی بازیافت باتری‌های مستعمل را محاسبه کردند شرمیلی و همکاران (۲۰۲۳).^{۴۷} کل مراحل چرخه عمر باتری ها را ادغام کردند و مدیریت پسماند از مواد اولیه تا بازیافت و بازتولید در مهندسی صنایع، تولید، مهندسی شیمی، علم مواد، انرژی و حوزه‌های مدیریت پایدار را شرح دادند.

تحقیقات در مورد طراحی شبکه‌های لجستیک معکوس برای باتری‌های مستعمل محدود است و عمدتاً بر ساختار RLN شرمیلی و همکاران (۲۰۲۳) و ساخت و حل مدل‌های بهینه‌سازی شبکه متمرکز است (تاداروس و همکاران، ۲۰۲۰).^{۴۸} ساختار چند سطحی شبکه لجستیک معکوس بازیافت باتری عمدتاً شامل جمع‌آوری باتری‌های مستعمل، تشخیص و توزیع باتری‌های مستعمل، پردازش مجدد و برچیدن باتری‌های مستعمل، دفع زباله و استفاده مجدد از محصول است. یک مدل شبکه لجستیک معکوس زنجیره تامین حلقه بسته برای باتری‌های مستعمل خودروهای الکتریکی مناسب برای ترکیه پیشنهاد کردند (گوان و یانگ (۲۰۲۰).^{۴۹} یک شبکه لجستیک معکوس سه سطحی برای شرکت‌های بازیافت شخص ثالث طراحی کردند و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه برای به حداقل رساندن هزینه‌های شبکه و اثرات منفی اجتماعی ایجاد کردند (وانگ جیانزو و همکاران (۲۰۲۰). یک سیستم بازیافت لجستیک معکوس باتری مستعمل سه سطحی را با در نظر گرفتن استفاده از یارانه‌های دولتی و سازوکارهای پاداش و تنبیه برای بهبود کارایی بازیافت ساخت. ما و لیو (۲۰۲۱) یک شبکه بازیافت باتری مستعمل چهار سطحی شامل انبارهای جمع‌آوری، انبارهای ذخیره‌سازی، مراکز انتقال و شرکت‌های بهره‌برداری آبشاری پیشنهاد کردند.

اکثر محققان تنها انتشار کربن (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰) یا عدم قطعیت‌ها (لین و همکاران، ۲۰۲۳) را هنگام بهینه‌سازی شبکه‌ها در نظر می‌گیرند. برخی از محققان به طور همزمان هر دو نوع عوامل تأثیرگذار را هنگام طراحی شبکه‌ها در نظر می‌گیرند و مدل‌هایی را می‌سازند (هوانگ و همکاران (۲۰۲۲). یک شبکه لجستیک معکوس باتری مستعمل چند ذینفع را با در نظر گرفتن فرآیند بازیافت و بازتولید باتری و انتشار کربن طراحی کردند و عدم قطعیت‌ها را از طریق یک مدل بهینه سازی فازی برای ترویج توسعه پایدار صنعت نشان دادند (روزنبرگ و همکاران (۲۰۲۳).^{۵۰} یک مدل بهینه‌سازی پویا برای زنجیره‌های تامین معکوس باتری پایان عمر برای مقابله با عدم قطعیت‌ها پیشنهاد کردند و امکان برنامه‌ریزی در چندین دوره را فراهم کردند. جدول ادبیات مربوط به RLND برای باتری‌های نیروگاهی را ادغام می‌کند و نشان می‌دهد که تحقیقات موجود به ندرت عدم قطعیت‌ها، انواع فناوری و اثرات زیست‌محیطی را به طور همزمان در نظر می‌گیرند. بنابراین این مقاله به طور جامع این عوامل را در طراحی RLND در نظر می‌گیرد.

مطالعات قبلی تا حدی به مسائل مربوط به RLND در مورد باتری‌های مستعمل پرداخته‌اند، اما به ندرت به طور همزمان شرایط نامشخص، استفاده آبشاری و اثرات زیست‌محیطی را در نظر گرفته‌اند. در واقعیت، سطوح کیفیت باتری‌های بازیابی شده متفاوت است و معمولاً پتانسیل قابل توجهی برای استفاده آبشاری وجود دارد. این مطالعه به بررسی پردازش باتری های با سطوح کیفیت مختلف در تأسیسات مختلف برای ساخت یک RLN می‌پردازد. طراحی RLND باید اثرات زیست محیطی را در نظر بگیرد و گنجاندن فن‌آوری‌های سبز مختلف در تأسیسات پردازش می‌تواند مزایای زیست‌محیطی شبکه لجستیک معکوس را افزایش دهد (کانان و همکاران (۲۰۲۳).^{۵۱} بنابراین، این مطالعه به بررسی تخصیص نمرات مختلف از انواع فناوری برای مراکز آزمایش و برچیدن می‌پردازد و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو هدفه برای به حداقل

⁴⁷ Sharmili et al. (2023)

⁴⁸ Tadaros et al., 2020

⁴⁹ Guan and Yang (2020)

⁵⁰ Rosenberg et al. (2023)

⁵¹ Kannan et al., 2023



رساندن هزینه‌ها و انتشار کربن پیشنهاد می‌کند که برای تعیین محل تأسیسات شبکه و طرح‌های حمل‌ونقل استفاده می‌شود.

۱. شرح مسئله و طراحی شبکه

ضوابط مدیریت بازیافت و استفاده از باتری‌های نیرو برای وسایل نقلیه انرژی نو "که توسط وزارت صنعت و فناوری اطلاعات جمهوری خلق چین صادر شده است، استفاده منطقی چند لایه و چند منظوره از باتری‌های فرسوده نیرو را تشویق می‌کند و از اصل استفاده آبخاری قبل از بازیافت پیروی می‌کند. هدف این است که مصرف کلی انرژی کاهش یابد، راندمان استفاده از انرژی افزایش یابد، سطوح استفاده جامع و مزایای اقتصادی ارتقا یابد و از دفع دوستدار محیط زیست مواد باقیمانده غیرقابل استفاده اطمینان حاصل شود. با توجه به ویژگی‌های باتری‌های فرسوده از وسایل نقلیه الکتریکی، این مقاله چارچوب شبکه لجستیک معکوس چند سطحی را همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، ایجاد می‌کند. هنگامی که ظرفیت باتری‌های نیرو در وسایل نقلیه الکتریکی به سطح مشخصی کاهش می‌یابد، مصرف‌کنندگان معمولاً به فروشگاه‌های 4S نزدیک خود می‌روند تا باتری‌ها را تعویض کنند. باتری‌های فرسوده جایگزین شده توسط مراکز جمع‌آوری منطقه‌ای مربوطه جمع‌آوری می‌شوند. سپس این مراکز جمع‌آوری، باتری‌های فرسوده جمع‌آوری شده را به مراکز تست عملکرد باتری منتقل می‌کنند، جایی که باتری‌های با عملکرد بهتر به مراکز تعمیر برای بازسازی، تعمیر یا اصلاح برای استفاده آبخاری فرستاده می‌شوند. باتری‌های با عملکرد ضعیف‌تر به مراکز جداسازی برای تجزیه فرستاده می‌شوند. پس از جداسازی، اجزای قابل استفاده مجدد برای تعمیر باتری استفاده می‌شوند، در حالی که اجزای غیرقابل استفاده یا حذف شده در حین تعمیر باتری به مراکز بازیافت برای بازیابی مواد فرستاده می‌شوند. مواد بازیابی شده را می‌توان برای تولید مجدد باتری استفاده کرد. زباله‌های تولید شده در طول فرآیندهای جداسازی و بازیافت که غیرقابل استفاده تلقی می‌شوند به مراکز تصفیه برای تصفیه بی‌ضرر منتقل می‌شوند و متعاقباً به محل‌های دفن زباله برای دفع متمرکز منتقل می‌شوند. در سال‌های اخیر، دولت پیوسته بر تولید کم‌کربن تأکید کرده و از شرکت‌ها می‌خواهد که ارتقاء صنعتی را انجام دهند. توسعه فناوری‌های تولید سبز رونق یافته است.

The diagram illustrates the waste management process in Iran, showing the flow from waste generation to final disposal or recycling. The process is divided into several stages:

- Waste Generation:** Represented by an icon of a group of people.
- Waste Collection and Transportation:** Represented by an icon of a house and a truck.
- Waste Treatment:** Represented by a recycling symbol.
- Waste Disposal:** This stage branches into two main paths:
 - Landfill:** Represented by an icon of a pile of waste.
 - Incineration:** Represented by an icon of a factory with smokestacks.
- Waste Recycling:** This stage branches into two main paths:
 - Recycling:** Represented by an icon of a recycling symbol.
 - Waste-to-Energy:** Represented by an icon of a power plant.
- Waste Management:** Represented by a gear icon, which is the final stage of the process.

از منظر توسعه یابد، پس، هدف این مطالعه ساخت یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه است که هزینه‌های شبکه و انتشار



کربن را به حداقل می‌رساند. پارامترها، متغیرها، نمادهای درگیر در این مدل و همچنین ساخت مدل ریاضی در زیر ارائه شده است.

۴.۱. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها :

F_i : هزینه عملیاتی سالانه مرکز جمع‌آوری i	A_i^j : حجم لجستیک از مرکز جمع‌آوری i به مرکز تست j و سپس به فناوری تست j
F_j^* : هزینه عملیاتی سالانه مرکز تست j با استفاده از فناوری تست j	A_i^k : حجم لجستیک از مرکز تست j به مرکز تعمیر k
F_m^* : هزینه عملیاتی سالانه مرکز جداسازی m با استفاده از فناوری جداسازی m	A_i^n : حجم لجستیک از مرکز جداسازی m به مرکز بازیافت n
F_n : هزینه عملیاتی سالانه مرکز بازیافت n	A_i^p : حجم لجستیک از مرکز جداسازی m به مرکز مدیریت زباله p
A_i : مقدار باتری‌های ضایعاتی جمع‌آوری شده توسط مرکز جمع‌آوری i در ناحیه مصرف	A_i^q : حجم لجستیک از مرکز بازیافت n به مرکز تولید q
F_i^* : قیمت جمع‌آوری باتری به ازای هر واحد	α_j^j : اگر مرکز تست j به فناوری تست j انتخاب شود، مقدار آن ۱ است؛ وگرنه ۰ است
F_j^{**} : هزینه تست باتری به ازای هر واحد برای فناوری‌های تست j	α_k^k : اگر مرکز تعمیر k انتخاب شود، مقدار آن ۱ است؛ وگرنه ۰ است
F_k^* : هزینه تعمیر باتری به ازای هر واحد	α_m^m : اگر مرکز جداسازی m به فناوری جداسازی m انتخاب شود، مقدار آن ۱ است؛ وگرنه ۰ است
F_m^* : هزینه تست باتری به ازای هر واحد برای فناوری‌های جداسازی m	
F_n : هزینه بازیافت مواد ضایعاتی به ازای هر واحد	
F_p^* : هزینه مدیریت زباله‌های بی‌فایده به ازای هر واحد	

۴.۲ ساخت مدل تحت شرایط مشخص شده

این مقاله یک مدل ریاضی برای دستیابی به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی RLN می‌سازد. هدف اقتصادی، کمینه‌سازی هزینه است که شامل هزینه تحصیل باتری‌های ضایعاتی (AC)، هزینه ثابت سالانه بهره‌برداری از تأسیسات با انواع فناوری مختلف (FC)، هزینه پردازش باتری‌ها/قطعات ضایعاتی با استفاده از تأسیسات با انواع فناوری مختلف (P) هزینه مدیریت زباله (WC) و هزینه حمل‌ونقل (TC) است. بنابراین، هدف اقتصادی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z_1 = & AC + FC + PC + WC + TC = P_e \sum_{i=1}^I A_i + \sum_{j=1}^J F_j + \sum_{k=1}^K F_k \\
 & \times \sum_{s=1}^{\Pi} \alpha_j^s F_j^s + \sum_{k=1}^K \alpha_k F_k + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \alpha_m^t F_m^t + \sum_{n=1}^N \alpha_n F_n + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \alpha_p^q F_p^q \\
 & \times \sum_{s=1}^{\Pi} \alpha_j^s P_e A_j^s + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_k P_k A_{jk} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \alpha_m^t P_e A_{jm}^t + \sum_{m=1}^M \alpha_m P_m A_{mm} \\
 & \times \sum_{n=1}^N \alpha_n P_n A_{nn} + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \alpha_p^q P_p A_{mp} + S \left(\sum_{i=1}^I A_i d_i + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_j^k A_j^k d_{jk} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \alpha_m^t A_{jm}^t d_{jt} + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \alpha_j^n A_j^n d_{jn} \right. \\
 & \times \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \alpha_p^q A_{mp} d_{mp} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \alpha_m^n A_{mn} d_{mn} + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \alpha_p^q A_{mp} d_{mp} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \alpha_m^n A_{mn} d_{mn} \\
 & \left. \times \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \alpha_p^q A_{mp} d_{pq} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^Q \alpha_m^n A_{mn} d_{nq} \right)
 \end{aligned}$$

هدف زیست‌محیطی به کاهش انتشار کربن در RLN می‌پردازد که شامل انتشار کربن ناشی از پردازش باتری‌های ضایعاتی با استفاده از انواع فناوری‌های تأسیسات مختلف و همچنین انتشار کربن ناشی از فرآیند حمل‌ونقل است. این هدف به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_2 = & \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_i^* C_p A_{ij}^* + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_k C_b A_{jk} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \\ & \times \sum_{p=1}^P \alpha_p^* C_p A_{jm}^* + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \alpha_k C_b A_{km} + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P C_p A_{mp} + \sum_{m=1}^M \\ & \times \sum_{p=1}^P C_p A_{mp} + C \left(\sum_{i=1}^J A_{ii} d_i + \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_i^* A_{ij}^* d_{jk} + \sum_{j=1}^J \right. \\ & \times \sum_{k=1}^K \alpha_k A_{jk} d_k + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K A_{jk} d_{ki} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \alpha_i^* A_{ij}^* d_{pm} + \sum_{m=1}^M \\ & \times \sum_{p=1}^P \alpha_p A_{mp} d_m + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P A_{mp} d_{ip} + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P A_{mp} d_{ip} + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P A_{mp} d_{ip} \left. \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{s.t. } A_i = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_i^* A_{ij}^* \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k A_{jk} = \sum_{i=1}^J \sum_{p=1}^P \alpha_i^* A_{ij}^* \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \alpha_p^* A_{jm}^* = \sum_{i=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_i^* A_{ij}^* \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\alpha_i^* + \alpha_i = 1 \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J A_{jk} = \sum_{j=1}^J \alpha_k A_{jk} \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^M \alpha_p A_{mp} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^J \alpha_i^* A_{ij}^* \quad \forall m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{p=1}^P \alpha_p A_{mp} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^J \alpha_i^* A_{ij}^* \quad \forall m \in M \quad (9)$$

$$J_1^* + J_2^* = 1 \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J A_{jp} = \theta_1 \sum_{m=1}^M \alpha_p A_{mp} \quad \forall n \in N \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M A_{mp} = \theta_2 \sum_{n=1}^N \alpha_p A_{mp} \quad \forall n \in N \quad (12)$$

محدودیت (۳) توازن حجم لجستیک در مرکز جمع‌آوری را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۴) تا (۶) تعادل لجستیک را در مرکز آزمایش ثبت می‌کنند، جایی که محدودیت (۴) انتقال لجستیک از مرکز آزمایش به مرکز تعمیر را مشخص می‌کند و محدودیت (۵) انتقال لجستیک از مرکز آزمایش به مرکز جداسازی را نشان می‌دهد. محدودیت (۷) تعادل لجستیک از مرکز تعمیر به مرکز استفاده زنجیره‌ای را توصیف می‌کند. محدودیت‌های (۸) تا (۱۰) توازن لجستیک در مرکز جداسازی را به تصویر می‌کشند، که در آن محدودیت (۸) لجستیک از مرکز جداسازی به مرکز باز یافت را شرح می‌دهد و محدودیت (۹) لجستیک از مرکز جداسازی به مرکز

$$\theta_1 + \theta_2 = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J A_{ij}^* \leq \alpha_i^* C_{max_i} \quad \forall j \in J, i \in I \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^J A_{jk} \leq \alpha_k C_{max_k} \quad \forall k \in K \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^J A_{jm}^* \leq \alpha_m^* C_{max_m} \quad \forall m \in M, i \in I \quad (16)$$

$$\sum_{m=1}^M A_{mn} \leq \alpha_n C_{max_n} \quad \forall n \in N \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^J \alpha_j^* \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (18)$$

$$\sum_{m=1}^M \alpha_m^* \leq 1 \quad \forall m \in M \quad (19)$$

$$\alpha_j^*, \alpha_k, \alpha_m^*, \alpha_n \in \{0, 1\} \quad (20)$$

$$A_{ij}^*, A_{jk}, A_{jm}^*, A_{ki}, A_{km}, A_{mp}, A_{mn}, A_{np}, A_{mq} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l, m, n, p, q, x, r \quad (21)$$

مدیریت زباله را نشان می‌دهد.

محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۳) تعادل لجستیک را در مرکز باز یافت متمرکز می‌کنند، به طوری که محدودیت (۱۱) لجستیک از مرکز باز یافت به مرکز مدیریت زباله را مشخص می‌کند و محدودیت (۱۲) لجستیک از مرکز باز یافت به مرکز تولید را تعیین می‌کند. این محدودیت جریان توازن لجستیک اطمینان حاصل می‌کند که جریان ورودی به یک تأسیس برابر با جریان خروجی از آن تأسیس باشد. محدودیت‌های (۱۴) تا (۱۷) محدودیت‌های حداکثر ظرفیت پردازش برای مرکز آزمایش، مرکز تعمیر، مرکز جداسازی و مرکز باز یافت را به ترتیب تعیین می‌کنند. این محدودیت ظرفیت پردازش حداکثری اطمینان می‌دهد که جریان ورودی به یک تأسیس از حداکثر ظرفیت پردازش آن فراتر نرود. محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) تعیین می‌کنند که هر مرکز آزمایش و هر مرکز جداسازی به طور یکتا با نوع فناوری مربوطه خود مطابقت دارد. محدودیت (۲۰) یک محدودیت دو حالت است که مکان‌های تأسیسات و نوع فناوری را تنظیم می‌کند. محدودیت

(۲۱) اطمینان از غیرمنفی بودن لجستیک بین تأسیسات را تضمین می‌کند. در تلاش برای به‌دست آوردن مزایای پایدار از طریق کمینه‌سازی هزینه‌های ورودی، شرکت‌ها می‌توانند تأثیرات زیست‌محیطی را نادیده بگیرند. در عین حال، دولت‌ها به‌طور فوری خواستار کاهش انتشار واقعی کربن در حین تولید توسط کسب‌وکارها هستند که یک مجموعه متناقض از اهداف را ایجاد می‌کند. این مطالعه اهداف هزینه و انتشار کربن را در نظر می‌گیرد و نیاز به مصالحه برای دستیابی به بهینه کلی دارد. روش‌های رایج برای مدیریت توابع چند هدفه شامل روش مجموع وزنی، روش ترکیب خطی، روش اولویت، روش محدودیت و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه (داس و همکاران ۲۰۲۰)^{۵۲} است. روش مجموع وزنی به دلیل سادگی و شهودی بودنش به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود و به‌طور مؤثر چندین هدف را به یک هدف واحد تبدیل می‌کند و به هر تابع هدف وزن‌های متفاوتی اختصاص می‌دهد. بنابراین، این تحقیق وزن‌های مورد انتظار p_1 و p_2 ($p_1 + p_2 = 1$) را معرفی می‌کند تا توابع چند هدفه را به یک تابع هدف مجموع وزنی تبدیل کند (کانان و همکاران ۲۰۲۳) که در معادله (۲۲) نشان داده شده است.

4.3 مدل سازی تحت شرایط نامطمئن

در فرآیندهای بازیافت عملی، عدم قطعیت در مقدار و کیفیت بازیافت باتری‌های دور ریخته‌شده وجود دارد. استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت احتمالی فازی برای مدیریت پارامترهای نامطمئن نسبتاً ساده است، چراکه نیاز به تحلیل و محاسبات پیچیده یک تعداد زیاد پارامترها ندارد. این امر به‌دست آوردن راه‌حل‌های مؤثر در کاربردهای عملی را تسهیل می‌کند. بنابراین، این مطالعه عدم قطعیت در مقدار و کیفیت بازیافت را با بازیابی پارامترهای به پارامترهای فازی و مدل سازی آن با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت احتمالی بررسی می‌کند. با توجه به وضعیت متغیرهای نامطمئن در مدل، نیاز به تعیین یک سطح اطمینان خاص وجود دارد. فرآیند تصمیم‌گیری نیاز دارد که احتمال برآورده شدن محدودیت‌ها برابر یا بیشتر از سطح اطمینان مشخص شده باشد. علاوه بر این، باید حداکثر راه‌حل تابع هدف در سطح اطمینان معین به دست آید (کارنرز و کوپر ۱۹۵۷). به‌طور خلاصه، یک مدل برنامه‌ریزی محدودیت احتمالی فازی به‌صورت زیر فرموله شده است:

$$\text{pos} \{ (\rho_1 Z_1 + \rho_2 Z_2) \leq Z \} \geq \alpha \quad (24)$$

$$\text{pos} \left\{ A_i = \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S a_{ij}^s A_i^s \right\} \geq \beta_i \quad (25)$$

$$\text{pos} \left\{ \sum_{k=1}^K a_{ik} A_{ik} = \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S w_{ik}^s a_{ik}^s A_{ik}^s \right\} \geq \beta_2 \quad (26)$$

$$\text{pos} \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^T a_{mn}^s A_{mn}^s = \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S w_{js}^s a_{js}^s A_{js}^s \right\} \geq \beta_3 \quad (27)$$

در اینجا pos نمایانگر احتمال وقوع یک رویداد است، α سطح اطمینان تابع هدف و β_i سطح اطمینان با محدودیت‌های عدد فازی است. این مطالعه فرض می‌کند که سطح‌های اطمینان در تابع هدف و محدودیت‌ها یکسان هستند. پردازش فازی به تابع هدف (۲۲) و محدودیت‌ها (۳)–(۵) اعمال می‌شود و منجر به محدودیت‌های فازی (۲۴)–(۲۷) می‌شود.

بر اساس بحث فوق، دستیابی به راه‌حل بهینه فازی برای مدل برنامه‌ریزی محدودیت احتمالی فازی نیاز به حداکثر کردن توابع عضویت تمامی محدودیت‌ها و تابع هدف دارد، به‌طوری که $\mu(x) \geq \alpha$. بنابراین، مدل برنامه‌ریزی محدودیت احتمالی فازی می‌تواند به مدل قطعی روبه‌رو تبدیل شود:

⁵² Das, et al., 2020

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \rho_1 \left(P_e \sum_{i=1}^I ((1-\alpha)A_d + \alpha A_{im}) + \sum_{i=1}^I \frac{F_i}{\beta_i} + \sum_{j=1}^J \right. \\
 & \times \sum_{k=1}^K \alpha_j^* \frac{F_k}{\beta_k} + \sum_{k=1}^K \alpha_k \frac{F_k}{\beta_k} + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \alpha_m^* \frac{F_i}{\beta_i} + \sum_{m=1}^M \alpha_m \frac{F_m}{\beta_m} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \\
 & \times \sum_{k=1}^K \alpha_j^* P_e A_k^* + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_k P_e A_k + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \alpha_m^* P_e A_{im}^* + \sum_{m=1}^M \\
 & \times \sum_{i=1}^I \alpha_m P_e A_{im} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J P_e A_{mj} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_e A_{ij} + S \cdot \left(\sum_{i=1}^I A_i d_i + \sum_{j=1}^J \right. \\
 & \times \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \alpha_j^* A_k^* d_k + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_k A_k d_k + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I A_{ij} d_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \\
 & \times \sum_{i=1}^I \alpha_m^* A_{im}^* d_{im} + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \alpha_m A_{im} d_{im} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J A_{mj} d_{mj} + \sum_{i=1}^I \\
 & \times \sum_{j=1}^J A_{ij} d_{ij} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J A_{mj} d_{mj} \left. \right) + \rho_2 \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_j^* C_k A_k^* + \sum_{j=1}^J \right. \\
 & \times \sum_{k=1}^K \alpha_k C_k A_k + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \alpha_m^* C_m A_{im}^* + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \alpha_m C_m A_{im} + \sum_{m=1}^M \\
 & \times \sum_{j=1}^J C_p A_{mj} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J C_p A_{mj} + C \cdot \left(\sum_{i=1}^I ((1-\alpha)A_d + \alpha A_{im}) d_i + \sum_{i=1}^I \right. \\
 & \times \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_j^* A_k^* d_k + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \alpha_k A_k d_k + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I A_{ij} d_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \\
 & \times \sum_{i=1}^I \alpha_m^* A_{im}^* d_{im} + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \alpha_m A_{im} d_{im} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J A_{mj} d_{mj} + \sum_{i=1}^I \\
 & \times \sum_{j=1}^J A_{ij} d_{ij} \left. \right) \left. \right) \quad (30)
 \end{aligned}$$

5. مطالعه موردی:

منطقه کلان‌شهری نانجینگ یک کمربند اقتصادی است که حول نانجینگ متمرکز شده و اولین منطقه کلان‌شهری است که به‌طور رسمی توسط کمیسیون توسعه و اصلاحات ملی چین برنامه‌ریزی و تصویب شده است. اعضای آن شامل نانجینگ، ژن‌جیانگ، یانگ‌ژو، هوای‌آن، مان‌شان، چوت‌ژو، وو‌هو، شوان‌چنگ و شهرهای لییانگ و جینتان در چانگ‌ژو می‌باشد. در این مقاله، لییانگ و جینتان در یک منطقه ادغام شده و به‌عنوان چانگ‌ژو* نمایندگی می‌شوند. منطقه کلان‌شهری نانجینگ دارای پایه قوی در صنایع پایه است و مرکز مهمی برای تولید محسوب می‌شود. طرح توسعه منطقه کلان‌شهری نانجینگ به‌صراحت صنعت انرژی‌های نو را به‌عنوان یک تمرکز کلیدی برای توسعه صنعتی در هر شهر و منطقه مشخص می‌کند. بنابراین، تأسیس یک شبکه لجستیک معکوس (RLN) برای بازیافت باتری‌های زباله وسایل نقلیه جدید انرژی در منطقه کلان‌شهری نانجینگ با اهداف سیاست همخوانی دارد. این اقدام می‌تواند روند ادغام کلان‌شهری را تسریع کرده، توسعه زیرساخت‌های فرامرزی را ترویج دهد و همکاری توسعه بین شهرها را تشویق کند، و نقش الگویی و رهبری در توسعه سراسری کشور ایفا کند. این مقاله با استفاده از داده‌های موجود به‌طور معقول حجم‌های آینده بازیافت باتری‌های زباله در هر شهر را پیش‌بینی می‌کند. این مطالعه بر روی شهرهای موجود در منطقه انجام شده و داده‌ها جمع‌آوری می‌شوند و از منابع ادبیات مرتبط برای تعیین مکان‌های کاندید برای تأسیسات و مقادیر مختلف پارامترها استفاده خواهد شد. این پارامترها در مدل گنجانده شده و برای تأیید اثربخشی آن‌ها اعتبارسنجی خواهد شد. منابع داده شامل سالنامه‌های آماری چین، سالنامه‌های آماری استانی و شهری، انجمن صنعت خودروسازی، اتحادیه صنعت باتری قدرت خودروهای چین، اداره ملی آمار، ادبیات مرتبط، پایگاه‌های داده شرکتی و اینترنت است.

5.1 پیش‌بینی حجم بازیافت

این تحقیق سال 2034 را به‌عنوان سال برنامه‌ریزی انتخاب می‌کند و نسبت مالکیت خودروهای الکتریکی (EV) در چین به کل مالکیت خودروهای غیرنظامی را پیش‌بینی می‌کند، که بیانگر نسبت بین این دو در هر شهر است. مالکیت خودروهای غیرنظامی برای تخمین حجم فروش خودروهای الکتریکی و تعداد باتری‌های قدرت بازنشسته استفاده می‌شود. با ارجاع به "گزارش تحلیل بازار و وضعیت فعلی بازیافت باتری‌های خودروی قدرت در سال 2023" که توسط تحقیقات و

بازارها منتشر شده است، فرض بر این است که میانگین عمر باتری‌های قدرت 5 سال است⁵³ (شبکه 2023). به همین دلیل حجم فروش خودروهای الکتریکی در سال 2029 پیش‌بینی می‌شود. پیش‌بینی‌های داده‌ها در این مقاله ویژگی‌های توزیع زمانی متمایزی را نشان می‌دهند، روش‌های زیادی برای پیش‌بینی داده‌های سری زمانی وجود دارد، که از میان آن‌ها، میانگین متحرک، همواری نمایی، مدل خاکستری و روش‌های یادگیری ماشین از جمله روش‌های محبوب‌تر هستند. روش‌های یادگیری ماشین به دلیل دقت بالا و انطباق قوی‌شان به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند، اما تضمین دقت پیش‌بینی به مقدار زیادی داده‌های اولیه با کیفیت بالا نیاز دارد. از آنجا که صنعت خودروهای الکتریکی چین نسبتاً جدید است، دسترسی به داده‌های آماری از طریق کانال‌های رسمی محدود است. در مقایسه، همواری نمایی و مدل‌های خاکستری نیاز کمتری به کیفیت داده‌ها دارند. همچنین، با توجه به تأثیر عوامل خارجی بر دقت پیش‌بینی، مشخص شد که مدل $GM(1, N)$ معمولی دقت پیش‌بینی ضعیفی دارد. بنابراین، مدل بهبود یافته پیشرفته «مدل خاکستری پس زمینه بهینه‌شده» که توسط زنگ و لی در سال 2018 پیشنهاد شده است، برای پیش‌بینی حجم فروش خودروهای الکتریکی با ترکیب چندین عامل تأثیرگذار خارجی استفاده می‌شود. داده‌های مربوط به مالکیت ملی خودروهای الکتریکی (F1) از سال 2014 تا 2022 و عوامل تأثیرگذار مرتبط جمع‌آوری شده است که در جدول 2 نشان داده شده‌اند. عوامل تأثیرگذار شامل مجموع خودروهای غیرنظامی (F2)، تولید (F3) و حجم فروش (F4) خودروهای انرژی نو، تولید ناخالص داخلی (F5) و درآمد قابل تصرف ساکنان شهر (F6) هستند.

پیش‌بینی حجم بازیافت

عامل‌های تأثیرگذار دیگری نیز شامل اندازه جمعیت (F7) و حجم نصب باتری‌های قدرت (F8) هستند. داده‌های اولیه مربوط به عوامل تأثیرگذار مختلف به‌صورت جداگانه تحت مدل‌سازی $GM(1, 1)$ و همواری نمایی سه‌گانه با استفاده از مت‌لب⁵⁴ قرار گرفتند. دقت پیش‌بینی با استفاده از دو معیار عملکرد یعنی خطای مطلق میانگین و ریشه مربع میانگین خطا مقایسه شد. سپس، روش پیش‌بینی با دقت بیشتر برای پیش‌بینی داده‌های سال برنامه‌ریزی هر عامل تأثیرگذار به کار گرفته شد. در مرحله بعد، داده‌های پیش‌بینی‌شده به مدل $OBGM(1, N)$ برای پیش‌بینی موجودی خودروهای الکتریکی وارد شد. نسبت موجودی پیش‌بینی‌شده خودروهای الکتریکی به مجموع موجودی خودروهای غیرنظامی، با نماد ϕ ، محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده از مقادیر ϕ ، با $\phi = 6.33\%$ در سال 2028، در شکل 12 ارائه شده است. استفاده از داده‌های بین سال‌های 2010 تا 2022، مالکیت خودروهای غیرنظامی برای هر شهر در ناحیه کلان‌شهری نانجینگ برای سال برنامه‌ریزی با استفاده از همواری نمایی سه‌گانه پیش‌بینی شد. سپس، نسبت موجودی خودروهای الکتریکی چین به موجودی خودروهای غیرنظامی برای نشان دادن وضعیت در هر شهر به کار گرفته شد و این امر محاسبه موجودی پیش‌بینی‌شده خودروهای الکتریکی برای هر شهر در سال برنامه‌ریزی را تسهیل کرد. با بررسی داده‌های تاریخی، نسبت فروش خودروهای الکتریکی به موجودی به‌طور کلی بین 40% تا 60% متغیر بوده است. این فرض صورت گرفت که نسبت فروش خودروهای الکتریکی به موجودی برای هر شهر در سال برنامه‌ریزی 50% است، که منجر به پیش‌بینی فروش خودروهای الکتریکی برای سال 2029 می‌شود که در جدول 12 ارائه شده است. همچنین فرض شده است که وزن بسته باتری برای هر خودرو الکتریکی 250 کیلوگرم است (هندریکسون و همکاران، 2015)⁵⁵ و نسبت باتری‌های بازنشسته ای که از طریق کانال‌های رسمی بازیافت می‌شوند 30% است (وانگ و یو، 2021)⁵⁶. عامل مقیاس برای متغیرهای فازی بر

⁵³ Network, 2023

⁵⁴ MATLAB

⁵⁵ Hendrickson et al., 2015

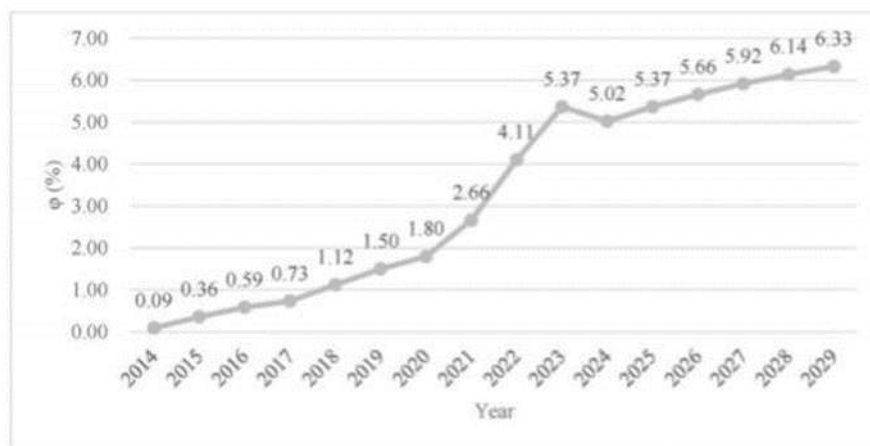
⁵⁶ Wang and Yu, 2021

روی 20% تنظیم شده است که منجر به پیش بینی حجم بازیافت باتری های ضایعاتی برای سال 2034 می شود که به صورت اعداد فازی مثلثی در جدول 3 نمایش داده شده است.

5.2 انتخاب مکان های جایگزین

این مطالعه نانجینگ، ژن جیانگ، یانگ ژو، هوآن، معانشان، سی هوژو، وو هوا، شوان چنگ و چانگ ژو* را در ناحیه کلانشهری نانجینگ به عنوان نواحی بازیافت جداگانه تعیین می کند. هر ناحیه بازیافت مجهز به یک مرکز جمع آوری است که قادر به برآورده کردن نیازهای بازیافت در منطقه مربوطه خود می باشد. مرکز آزمایش به چندین تسهیلات کلیدی، از جمله مراکز جمع آوری، مراکز تعمیر و مراکز تخریب متصل است. راحتی حمل و نقل به طور مستقیم بر کارایی عملیاتی شبکه تأثیر می گذارد. بنابراین، شهرهایی با تعداد بیشتری از پارک های لجستیکی انتخاب می شوند. پارک های لجستیکی که مساحت آن ها بیش از 100 هکتار در هر شهر است، بررسی می شوند. در میان آن ها، شش شهر، یعنی نانجینگ، ژن جیانگ، یانگ ژو، هوآن، سی هوژو و وو هوا، که تعداد بیشتری از پارک های لجستیکی دارند، به عنوان مکان های پیشنهادی برای مرکز آزمایش انتخاب می شوند و به ترتیب با شماره های 1 تا 6 علامت گذاری می شوند. مرکز تعمیر و مرکز تخریب دارای نیازهای زیرساخت خاصی برای تسهیلات باتری هستند. یک بررسی از پایگاه های صنعت باتری لیتیم در هر منطقه، هفت منطقه -نانجینگ، یانگ ژو، مانشان، سی هوژو، وو هوا، شوان چنگ و چانگ ژو را به عنوان مکان های نامزد برای مرکز تعمیر و مرکز تخریب شناسایی کرده و با شماره های 1 تا 7 تعیین کرده است. مرکز بازیافت، به عنوان یک تسهیلات پایین دستی مرکز تخریب با نیازهای کمتری برای تسهیلات پشتیبانی تولید، در تمام نه منطقه در داخل ناحیه کلان شهری مورد نظر قرار می گیرد.

Year	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
$F_1 (\times 10^4)$	12	58	109	153	261	381	492	784	1310
$F_2 (\times 10^5)$	1.46	1.63	1.86	2.09	2.32	2.54	2.73	2.94	3.19
$F_3 (\times 10^4)$	8.39	34.05	51.70	79.40	127.0	124.2	136.6	354.5	705.8
$F_4 (\times 10^4)$	7.48	33.11	50.70	77.70	125.6	120.6	136.7	352.1	688.7
$F_5 (\times 10^{12})$	64.36	68.89	74.64	83.20	91.93	98.65	101.3	114.3	121.0
$F_6 (\times 10^4)$	2.88	3.12	3.36	3.64	3.93	4.24	4.38	4.74	4.93
$F_7 (\times 10^6)$	13.77	13.83	13.92	14.00	14.05	14.10	14.12	14.13	14.12
$F_8 (Gwh)$	3.70	15.70	28.20	36.40	56.90	62.20	63.60	154.5	294.6



شکل ۲ نسبت مالکیت خودروهای الکتریکی (EV) در چین به مالکیت خودروهای غیرنظامی از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۹.

شهر	حمل و نقل EVS (x10)	بازیابی ضایعات باتری (تن)	عدد فازی مثلثی
نانجینگ	10.64	7982.60	(6386,7983,9579)
زنجیانگ	2.98	2231.57	(1785,2232,2678)
یانگزو	4.00	3003.28	(2403,3003,3604)
هوالان	4.15	3112.54	(2490,3113,3735)
مغانشان	1.86	1396.10	(1117,1396,1675)
چوزو	3.45	2586.68	(2069,2587,3104)
وو هو	3.13	2345.40	(1876,2345,2814)
ژوانجنگ	2.72	2042.43	(1634,2042,2451)
چانگزو	1.71	1280.72	(1025,1281,1537)

جدول ۳

در هر شهر برای سال ۲۰۲۹ و مقدار برآورد شده باتری‌های (EV) حجم فروش پیش‌بینی شده خودروهای الکتریکی زباله‌ای که باید در سال ۲۰۳۴ بازیافت شوند. مناطق به‌عنوان مکان‌های نامزد برای مرکز بازیافت تعیین شده و با شماره‌های ۱ تا ۹ علامت‌گذاری شده‌اند. با توجه به برنامه‌های استفاده زنجیره‌ای فعلی که در شهرهای مختلف اجرا می‌شود، نانجینگ، شوان‌چنگ و چانگ‌ژو برای استفاده زنجیره‌ای از باتری‌ها انتخاب شده‌اند. در حال حاضر، نانجینگ و مائشان دارای سایت‌های دفن زباله‌های خطرناک بزرگ و مراکز دفع هستند که زباله‌های تولید شده برای پردازش به آنجا ارسال می‌شود. مواد خام بازیافت شده به نانجینگ، چانگ‌ژو* و وو‌هو که دارای صنایع باتری لیتیم با پایه‌گذاری خوب هستند، به‌منظور ساده‌سازی فرآیند حل، فاصله‌های جاده‌ای بین، منتقل می‌شوند تا در فرآیند مجدد ساخت باتری شرکت کنند مراکز اداری هر شهر، که با استفاده از نقشه‌های گود اندازه‌گیری شده‌اند، به‌عنوان فاصله‌های بین مکان‌های نامزد برای تسهیلات مختلف در نظر گرفته شده‌اند. اگر تسهیلات مختلف در یک شهر قرار داشته باشند، فرض بر این است که فاصله بین آن‌ها ۲۰ کیلومتر است. بنابراین، فاصله‌های بین مکان‌های نامزد برای تسهیلات مختلف به فاصله‌های بین شهرها ساده‌سازی شده است، همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است.

۵.۳. پارامترهای مرتبط

در این مقاله، نوع فناوری ۲ برای مرکز آزمایش و مرکز تخریب به‌عنوان مبنا تعیین شده است. نوع فناوری ۱ معادل کاهش تقریباً ۱۰ درصدی در هزینه‌های ثابت و پردازش بوده، در حالی که ۲۰ درصد افزایش در انتشار کربن به ازای هر واحد وزن باتری پردازش شده را به همراه دارد. نوع فناوری ۳ معادل افزایش حدود ۱۰ درصدی در هزینه‌های ثابت و ظرفیت پردازش بوده و همچنین ۲۰ درصد کاهش در انتشار کربن به ازای هر واحد وزن باتری پردازش شده را نشان می‌دهد. (کانان و همکاران ۲۰۲۳) بر اساس «گزارش تحقیقاتی صنعت بازیافت باتری‌های تامین قدرت ۲۰۲۲»، نسبت باتری‌های خودروهای الکتریکی مستهلک شده که می‌توانند برای استفاده مجدد به شکل زنجیره‌ای استفاده شوند به ۶۰ درصد می‌رسد. بنابراین، به 0.72 و 0.21 به ترتیب 0.6 و 0.4 تخصیص داده شده است. براساس برآوردهای رایج صنعتی، W_{21} و W_{22} مقادیر به 0.3 و 0.7 تنظیم شده‌اند. در حالت پایه، هزینه‌های ثابت عملیاتی سالانه برای θ_1 و θ_2 تعیین می‌شود، و تسهیلاتی که در شهرهای مختلف افتتاح می‌شوند، بر اساس تولید ناخالص داخلی سرانه هر شهر به‌طور منطقی تعیین می‌شود که در جدول ۵ نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای مربوط به انواع مختلف فناوری در جداول ۶ و ۷ ارائه شده و سایر مقادیر پارامترهای مرتبط در جدول ۸ فهرست شده‌اند (هو و همکاران ۲۰۲۲). هزینه حمل و نقل 0.33 (تن/کیلومتر) می‌باشد. CO_2 (تن/کیلومتر) است و انتشار کربن تولیدشده در حین حمل و نقل 0.00026 CNY/تن تعیین شده CNY/ (وانگ و همکاران ۲۰۲۲) قیمت بازیافت باتری‌های زباله‌ای بر اساس قیمت بازار بازیافت، 8500 است.

۶. نتایج و بحث

نسل ۱۲ استفاده از CPU i9 (R) اینتل بر روی کامپیوتری با LINGO 17.0 این بخش از نرم افزار بهینه سازی تجاری می کند و از پارامترهای ارائه شده در فصل قبلی برای حل مدل استفاده می کند. برای تجزیه و تحلیل مقایسه ای، سناریوهایی تعریف شده است که در آن ها فقط یک هدف اقتصادی (۱)، یک هدف محیطی (۴)، یک هدف جمع وزنی (۲۲) و یک هدف فازی (۳۰) به ترتیب به عنوان سناریو ۱، سناریو ۲، سناریو ۳ و سناریو ۴ تعیین شده اند. سناریوهای ۱، ۲ و ۳ تحت ۵۸۴ متغیر و ۱۳۶ قید به دست آمده اند، در حالی که سناریو ۴ تحت ۵۸۴ متغیر و ۱۵۷ قید حل شده است تا برای تحلیل مقایسه ای استفاده شود. حل کننده برای سناریوهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۲۱۹۸، ۴۷۷ و ۱۹۵۹ بار تکرار کرد، در حالی که برای سناریو ۴، ۲۷۵۷ بار با ۷۱۳ متغیر و ۲۰۰ قید تکرار شد. در ادامه، تحلیل های انجام شد. این p_1 ، p_2 ، مقدار بازیافت باتری های زباله و عوامل وزنی مورد انتظار α حساسیت بر روی سطح اطمینان تحلیل به منظور ارائه بینش های مدیریتی ارزشمند برای دستیابی به تعادل بین هزینه و انتشار کربن در شبکه لجستیک. برای مدیریت باتری های زباله صورت می گیرد.



ردیف	سال 94	سال 95	سال 96	سال 97	سال 98
102	72	190	95	81	
182	140	193	36	20	
209	126	160	20	36	
287	184	20	193	160	
48	105	255	154	164	
140	20	105	140	126	
20	140	184	182	209	
73	210	358	199	226	
127	190	296	99	126	

9

هزینه های ثابت صنایع هوافضا

ردیف	سال 94	سال 95	سال 96	سال 97	سال 98	سال 99	سال 100
528	473	504	565	590	504	796	837
528	473	504	565	590	504	796	837
437	391	417	468	450	417	584	692
679	505	591	663	645	591	828	982
504	452	481	539	525	481	674	796

مقایسه پارامتر مربوط به فن

ردیف	سال 94	سال 95	سال 96	سال 97	سال 98	سال 99	سال 100
1	800	1000	1200	800	1000	1200	800
2	0.766	0.84	0.512	0.766	0.84	0.512	0.766
3	7000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
4	0.54	0.6	0.66	0.54	0.6	0.66	0.54
5	0.46	0.4	0.34	0.46	0.4	0.34	0.46

جدول 9

راه حل ها و انتخاب نوع فناوری برای سه سناریو

سناریو	سناریو 1	سناریو 2
جدول 9	47435.85	49995.53
انتخاب فن برای	158654.38	117516.40
انتخاب حالت برای	1.2.4.6	1.2.4.6
گشتاد فناوری	1.1.1.2	3.3.3.2
انتخاب حالت برای	1.3.7	2.3.4
تکنولوژی پروپان	1.1.1	3.3.3
انتخاب حالت برای	2.3.7	1.2.5.6
انتخاب حالت برای	1.2.5	3.4.6

جدول 7

مقایسه پارامتر مربوط به فن آوری های مختلف پروپان

ردیف	سال 94	سال 95	سال 96	سال 97	سال 98	سال 99	سال 100
1	3150	3500	3850	3150	3500	3850	3150
2	4.212	3.51	2.808	4.212	3.51	2.808	4.212
3	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
4	0.648	0.72	0.792	0.648	0.72	0.792	0.648
5	0.352	0.28	0.208	0.352	0.28	0.208	0.352

جدول 8

مقایسه سایر پارامترهای مرتبط

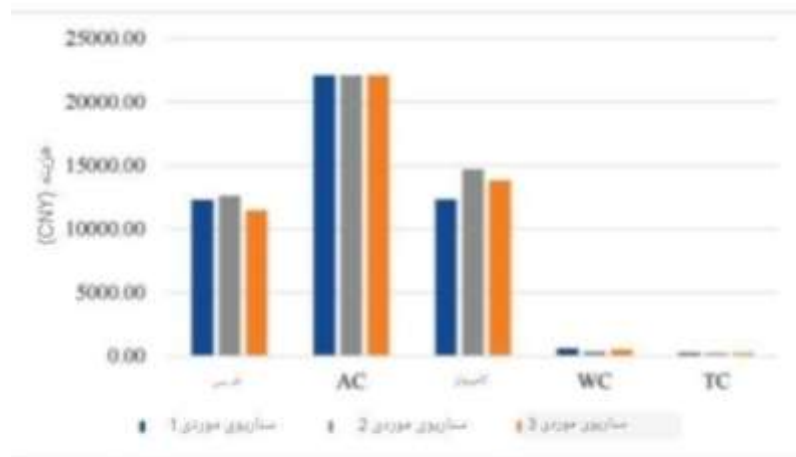
ردیف	سال 94	سال 95	سال 96	سال 97	سال 98	سال 99	سال 100
1	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
2	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
3	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
4	900	900	900	900	900	900	900
5	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33

9

6.1 تحلیل نتایج تحت شرایط مشخص شده

برای هدف وزنی مجموع (22)، طبق تحقیقات موجود، هر دو تابع هدف همان عامل وزن مورد انتظار ($p_1 = p_2 = 0.5$)

را به منظور جستجوی یک راه حل سازش بین اهداف متضاد، اختصاص می دهند . (کانان و همکاران ۲۰۲۳) نتایج هزینه کل شبکه، انتشار کربن، مکان های تأسیسات و انتخاب نوع فناوری برای تأسیسات پس از اجرا در سه سناریو در جدول ۹ ارائه شده است. مقایسه هزینه های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است، که در آن هزینه تأمین بیشترین نسبت را دارد، سپس هزینه پردازش تأسیسات و هزینه حمل و نقل کمترین نسبت را به خود اختصاص داده اند . برای سناریو ۱، بدون در نظر گرفتن تأثیرات زیست محیطی، حداقل هزینه کل شبکه تعیین شد که به حداقل رساندن جنبه اقتصادی را هدف قرار داده است.



شکل ۳. مقایسه هزینه های مختلف در سه سناریو.

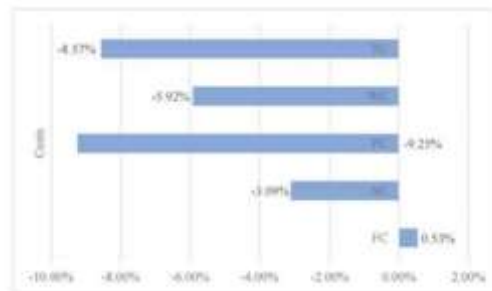
این امر، بار سنگینی بر دوش شرکت های بازیافتی می گذارد. هزینه های پردازش تسهیلات کمترین میزان را دارند، اما هزینه های تصفیه پسماند بیشترین میزان را به خود اختصاص می دهند. دلیل این امر این است که پسماند تولید شده توسط تسهیلات تصفیه پسماند شخص ثالث برای دفع بدون ضرر، مدیریت می شود که نیاز به باز کردن تسهیلات اضافی را از بین می برد و به طور موثری سرمایه گذاری های ثابت را کاهش می دهد. با این حال، تصفیه پسماند، انتشار کربن قابل توجهی را ایجاد می کند. در این سناریو، محیط زیست در ازای مزایای اقتصادی قربانی می شود. در مجموع، ۴ مرکز تست، ۳ مرکز جداسازی، ۳ مرکز تعمیر و ۳ مرکز بازیافت افتتاح شده اند. در میان آن ها، فن آوری های تست متناظر با ۴ مرکز تست، به ترتیب ۱، ۱، ۲ هستند. همه فن آوری با کمترین هزینه را انتخاب نکرده اند، زیرا تحت یک فن آوری تست بهتر، نسبت بالاتری از باتری های پسماند تعمیر شده برای استفاده آبشاری وجود دارد، بنابراین هزینه پردازش جداسازی و هزینه حمل و نقل بین تسهیلات کاهش می یابد. فن آوری های جداسازی برای ۳ مرکز همگی فن آوری ۱، گزینه با کمترین هزینه، بودند. برای سناریو ۲، بدون در نظر گرفتن شرایط اقتصادی، حداقل انتشار کربن شبکه و حداقل تأثیرات زیست محیطی جستجو شدند، به قیمت بالاترین هزینه های اقتصادی برای شرکت ها. فن آوری های تست متناظر با ۴ مرکز تست، به ترتیب ۳، ۳، ۲ هستند. فن آوری های جداسازی برای ۳ مرکز جداسازی، به ترتیب ۱، ۳، ۳ هستند. انتخاب فن آوری های تست بهتر می تواند انتشار کربن تولید شده از جداسازی و بازیافت باتری های پسماند را کاهش دهد، در حالی که انتخاب فن آوری های جداسازی بهتر می تواند انتشار کربن ناشی از تصفیه پسماند را کاهش دهد .

مقایسه سناریو ۱ و سناریو ۲ نشان می دهد که سناریو ۲ یک مرکز تعمیر اضافی باز می کند، زیرا فن آوری های تست بهتر منجر به افزایش نسبت باتری های پسماند می شود که به مراکز تعمیر هدایت می شوند و بنابراین نیاز به یک مرکز تعمیر اضافی برای پاسخگویی به تقاضای تعمیر است. به دلیل افزایش تعداد تسهیلات، سناریو ۲ فاصله بین مواد را افزایش می دهد و منجر به هزینه های حمل و نقل بالاتری نسبت به سناریو ۱ می شود. با این حال، در سناریو ۲، نسبت بالاتری از

باتری‌ها پس از تعمیر برای استفاده آبشاری مورد استفاده قرار می‌گیرد که مقدار مورد استفاده برای جداسازی و بازیافت را کاهش می‌دهد. انتشار کربن ناشی از فرآیند جداسازی و بازیافت به مراتب بیشتر از انتشار ناشی از حمل و نقل است که در نهایت منجر به حداقل انتشار کربن کلی برای شبکه می‌شود. در سناریو ۳، اختصاص وزن برابر به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی منجر به هزینه کل شبکه‌ای بالاتر از سناریو ۱ و پایین‌تر از سناریو ۲ می‌شود، با انتشار کربن کمتر از سناریو ۱ اما بیشتر از سناریو ۲ که نشان دهنده تعادل مؤثر بین این دو است. هزینه کل شبکه در این سناریو ۴۸,۰۰۱.۴۱ میلیون یوان، کاهش ۳.۹۹٪ نسبت به سناریو ۲، و ۱۳۸,۳۹۲.۷۰ تن انتشار کربن است که کاهش ۱۲.۷۷٪ نسبت به سناریو ۱ دارد. در مجموع، ۴ مرکز تست با فن‌آوری‌های تست به ترتیب ۱، ۲، ۱، ۲ افتتاح شده‌اند. علاوه بر این، ۳ مرکز جداسازی با فن‌آوری‌های جداسازی به ترتیب ۲، ۲، ۳، و همچنین ۳ مرکز تعمیر و ۳ مرکز بازیافت دیگر افتتاح شده است. تخصیص فن‌آوری‌های تست و جداسازی در سناریو ۳ بین سناریوهای ۱ و ۲ متوازن شده است تا به بهینه‌سازی کلی هزینه کل شبکه و انتشار کربن تحت همان وزن‌ها دست یابد. تحلیل نشان می‌دهد که در سناریو ۳، مقدار باتری‌های پسماند مورد استفاده برای تعمیر و استفاده آبشاری ۱۴,۹۸۹.۷۳ تن است که نسبت به سناریو ۱ که انتشار کربن در آن در نظر گرفته نشده بود، ۳.۱۰٪ افزایش داشته است. اگر این باتری‌های پسماند برای جداسازی و بازیافت استفاده می‌شدند، انتشار کربن بیشتری تولید می‌شد. بنابراین، سناریو ۳ به‌طور مؤثری نرخ استفاده مجدد از باتری‌های پسماند را افزایش داده و انتشار کربن را کاهش می‌دهد. مقدار پسماند غیرقابل استفاده ناشی از جداسازی نسبت به سناریو ۱ به میزان ۳۲.۵۳٪ کاهش یافته است و اجزای بیشتری برای بازیافت مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد که منجر به صرفه‌جویی در منابع و کاهش آلودگی محیطی می‌شود.

۶.۲. تجزیه و تحلیل نتایج در شرایط نامشخص

این بخش عملکرد مدل شبکه را تحت شرایط نامشخص تجزیه و تحلیل می‌کند. با توجه به عدم قطعیت در مقدار و کیفیت بازیافت باتری، یک سطح اطمینان $\alpha = 0.85$ به تابع هدف (۳۰) و شرایط محدودیت (۳۱) تا (۳۷) اعمال شده است. نتایج هزینه کل شبکه، انتشار کربن، مکان‌یابی تسهیلات، و انتخاب دو نوع فن‌آوری تسهیلات پس از اجرای مدل در جدول ۱۰ نمایش داده شده است. تحت شرایط نامشخص، به دلیل محدودیت‌های نسبتاً شل، هزینه کل شبکه ۳.۷۸٪ نسبت به سناریو ۳ کاهش یافته و انتشار کربن ۵.۹۴٪ کاهش یافته است. در مجموع، ۴ مرکز تست، ۳ مرکز تعمیر، ۲ مرکز جداسازی و ۳ مرکز بازیافت افتتاح شده‌اند. انتخاب‌های فن‌آوری تست برای ۴ مرکز تست به ترتیب ۲، ۲، ۲، ۳ هستند و انتخاب‌های فن‌آوری جداسازی برای ۲ مرکز جداسازی به ترتیب ۲، ۱ هستند. سناریو ۴ یک مرکز جداسازی کمتر از سناریو ۳ باز کرده است، زیرا به منظور دستیابی به بهینه‌سازی دو هدفه تحت وزن‌های مورد انتظار، سناریو ۴ فن‌آوری‌های تست با درجه بالاتر را برای مراکز تست افتتاح شده انتخاب کرده است که منجر به کاهش باتری‌های مورد استفاده برای جداسازی و بازیافت می‌شود. بر اساس شکل ۴، مشاهده می‌شود که سناریو ۴، به جز هزینه‌های عملیاتی ثابت، کاهش نسبی در هزینه‌های مختلف نسبت به سناریو ۳ دارد، به طوری که هزینه پردازش تسهیلات تا ۹.۲۵٪ کاهش یافته است. افزایش اندک در هزینه‌های ثابت عمدتاً به دلیل انتخاب فن‌آوری‌های تست با درجه بالاتر برای مراکز تست افتتاح شده است که منجر به افزایش هزینه‌های ثابت این مراکز می‌شود. علاوه بر این، نرخ‌های بهره‌برداری از تسهیلات برای مراکز تست، مراکز تعمیر، مراکز جداسازی و مراکز بازیافت به ترتیب ۹۰.۰۱٪، ۱۰۰٪، ۹۴.۴۶٪ و ۷۲.۰۱٪ است. نرخ‌های بهره‌برداری بالای تسهیلات، از هدر رفتن منابع جلوگیری کرده و در عین حال فضایی برای دادن مقادیر بازیافت افزایش یافته، حفظ می‌کند. نتایج مکان‌یابی تسهیلات و طرح‌های حمل و نقل بین تسهیلاتی در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مکان‌یابی تسهیلات تمایل به شهرهایی دارد که مقدار باتری‌های پسماند در آنها بیشتر است. اگرچه راه‌اندازی تسهیلات در این شهرها ممکن است منجر به هزینه‌های عملیاتی ثابت بالاتری شود، اما می‌تواند فواصل حمل و نقل را به طور قابل توجهی کاهش دهد و در نتیجه انتشار کربن را کاهش دهد.

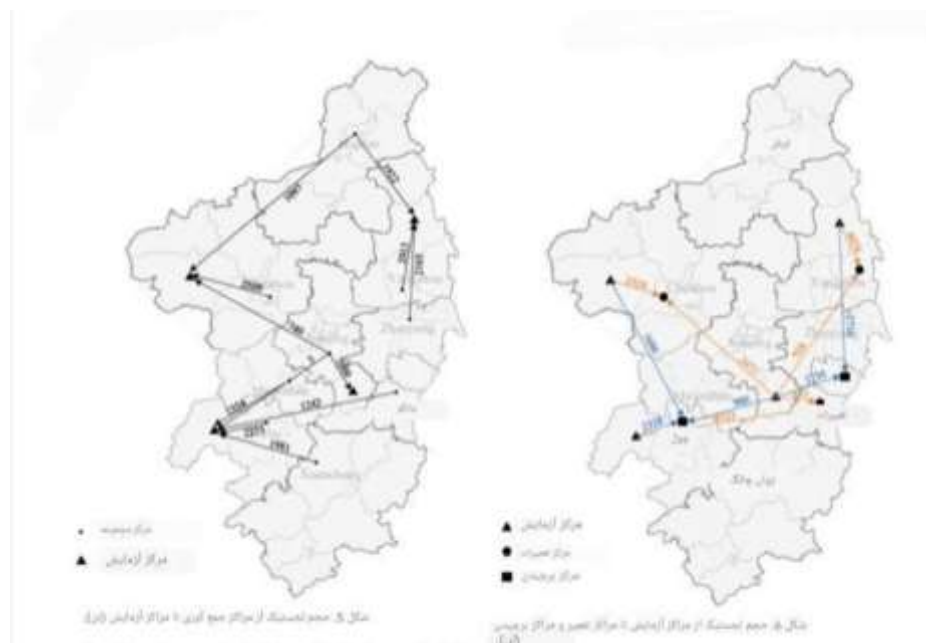


سطح اطمینان، درجه عدم قطعیت برای پارامترها را نشان می‌دهد. برای بحث در مورد تأثیر مقادیر سطح اطمینان بر نتایج در شرایط نامشخص، این مطالعه آزمایش‌هایی را در مقادیر مختلف سطح اطمینان انجام داد. جدول 11 نتایج هزینه کل شبکه، انتشار کربن، مکان‌های تسهیلات و تنظیمات فن‌آوری مربوطه را ارائه می‌دهد. شکل 8 هزینه‌های مختلف را مقایسه می‌کند. هنگامی که سطح اطمینان به مقدار کمتری تنظیم شود که نشان‌دهنده عدم قطعیت بالاتر در مقادیر پارامتر است، هزینه‌ها، انتشار کربن و مکان‌های تسهیلات کمتری در شبکه وجود دارد. برعکس، هنگامی که سطح اطمینان به مقدار بزرگتری تنظیم شود، نتایج برعکس است. در فرآیند طراحی شبکه، انتخاب سطح اطمینان پایین‌تر ممکن است منجر به کمبود ظرفیت خدمات شبکه لجستیکی شود که منجر به برآورده نشدن تقاضاهای بازیافت واقعی می‌شود. سطح اطمینان بالاتر باعث می‌شود پارامترهای فازی تمایل به تعیین شدن داشته باشند و نتایج مورد انتظار شبکه لجستیکی را برآورده کنند. با این حال، در چنین شرایطی، نتایج مورد انتظار اغلب ایده‌آل‌گرایانه‌تر از واقع‌بینانه است و خطر مازاد منابع و کمبود استفاده از ظرفیت تسهیلات را به دنبال دارد. بنابراین، تصمیم‌گیرندگان باید انتخاب منطقی سطح اطمینان را به طور جامع در نظر بگیرند.

شکل 4. درصد تغییر در هزینه‌های مختلف برای سناریو 4، در مقایسه با سناریو 3.

جدول 10
برآورد هزینه‌ها و انتخاب‌های فناوری در شرایط نامشخص

سناریو	هزینه کل (CHF)	انتشار کربن (t/a)	انتخاب سایت برای TC	فناوری انتخاب شده	انتخاب سایت برای EEC	انتخاب سایت برای EEC	انتخاب سایت برای BPC	انتخاب سایت برای BEC
سناریو 4	46189.1	130,169	1,3,5,6	2,2,2,3	5,7	2,1	2,4,7	1,2,9



ارزش‌ها، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بالقوه، برای اطمینان از ظرفیت خدمات شبکه لجستیک و بهینه‌سازی استفاده از منابع در طول طراحی شبکه

(2) مقدار بازیافت

به منظور انجام تحلیل حساسیت بر روی مقدار بازیافت باتری‌های دور ریخته شده، این مطالعه چهار سناریو را آزمایش کرد: کاهش مقدار پیش‌بینی شده بازیافت به میزان ۲۰ درصد، کاهش به میزان ۱۰ درصد، افزایش به میزان ۱۰ درصد و افزایش به میزان ۲۰ درصد. نتایج در جدول ۱۳ نشان داده شده و هزینه‌های مختلف در شکل ۹ به تصویر کشیده شده است. زمانی که مقدار بازیافت در حداقل خود قرار دارد، تعداد تأسیسات باز، هزینه‌های مختلف و انتشار کربن شبکه به حداقل می‌رسند. با افزایش مقدار بازیافت، تعداد تأسیسات باز، هزینه‌های مختلف و انتشار کربن شبکه روند افزایشی را نشان می‌دهند. جدول ۱۲ نشان می‌دهد که تأسیسات که در ابتدا با مقدار کم بازیافت باز شده‌اند، احتمالاً حتی با افزایش مقدار بازیافت، همچنان فعال خواهند ماند. بنابراین، زمانی که تصمیم‌گیرندگان اقدام به طراحی شبکه می‌کنند، با در نظر گرفتن توسعه بلندمدت، می‌توانند برای باتری‌های دور ریخته شده مقدار بازیافت بالایی را فرض کنند. با افزایش تدریجی مقدار بازیافت از کم به زیاد و حل مدل چندین بار، مکان‌های تأسیساتی و انتخاب نوع فناوری باید بر اساس نتایجی که چندین بار ظاهر می‌شوند، انتخاب شوند. این امر امکان برنامه‌ریزی یک شبکه لجستیک برای مقدار بازیافت بالا را فراهم می‌کند. پس از آن، بر اساس این شبکه، نتایج برنامه‌ریزی شبکه تحت مراحل و مقادیر بازیافت مختلف می‌تواند استخراج شود. شرکت‌ها باید سرمایه‌گذاری‌های ساخت تأسیسات را با توجه به وضعیت فعلی صنعت مرحله‌بندی کنند تا اطمینان حاصل شود که تأسیسات نرخ‌های استفاده بالایی را حفظ کنند و به طور مؤثری از اتلاف منابع جلوگیری شود. علاوه بر این، با افزایش مقدار بازیافت، تقویت ظرفیت پردازش تأسیسات موجود می‌تواند.

(3) مقادیر وزنی مورد انتظار :

با تغییر مقادیر عوامل وزنی مورد انتظار، p_1 که نمایانگر انتظارات هدف اقتصادی است و p_2 که نمایانگر انتظارات هدف انتشار کربن است، تأثیر بر طراحی شبکه تحلیل می‌شود. زمانی که $p_1 = 0$ و $p_2 = 1$ ، تابع هدف به هدف زیست‌محیطی تنها در سناریو ۲ مربوط می‌شود. زمانی که $p_1 = 1$ و $p_2 = 0$ ، تابع هدف به هدف اقتصادی تنها در سناریو ۱ مربوط



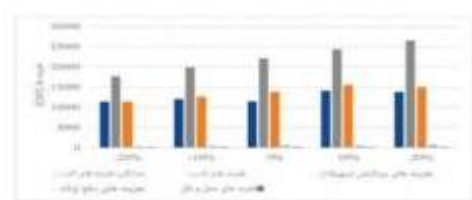
نهمین کنفرانس بین المللی توسعه فناوری در مهندسی مکانیک و هوافضا

9th International Conference on Technology Development in Mechanical and Aerospace Engineering

می‌شود، همانطور که در جدول ۹ نشان داده شده است. مقایسه بین جدول‌های ۹ و ۱۳ نشان می‌دهد که اختصاص وزن بیشتر به هدف اقتصادی منجر به کاهش هزینه‌های کل می‌شود اما به افزایش انتشار کربن منجر می‌شود و بالعکس. ترجیح به اهداف کاهش انتشار منجر به انتخاب فناوری‌های با درجه بالاتر برای فرآیندهای آزمایش و جداسازی می‌شود و بالعکس. بنابراین، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با توجه به ترجیحات خود، عوامل وزنی مورد انتظار را به صورت انعطاف‌پذیر انتخاب کنند و هنگام برنامه‌ریزی یک شبکه لجستیک معقول، بار اقتصادی شرکت و مسئولیت اجتماعی آن در کاهش انتشار را در نظر بگیرند.

۶.۴ بحث

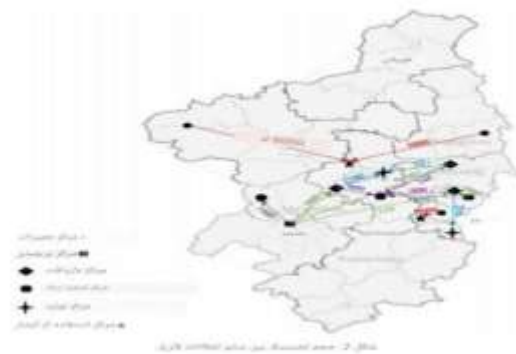
لجستیک معکوس امکان بازگشت محصولات دور ریخته شده به چرخه تولید برای استفاده مجدد را فراهم می‌کند و بدین ترتیب آلودگی زیست‌محیطی و اتلاف منابع را کاهش می‌دهد. انتظار می‌رود که با طراحی یک شبکه لجستیک معکوس با مزایای اکولوژیک، کاهش‌های قابل توجهی در انتشار کربن حاصل شود.



شکل ۹: مقایسه هزینه‌های مختلف در سراسر دوره مطالعه (۲۰۱۵ تا ۲۰۳۵)

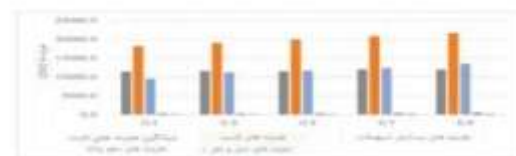
سناریو	2015	2020	2025	2030	2035
Baseline	40408.5	47091.0	48501.4	54093.6	56106.7
Green	101189.8	117791.7	128792.7	146511.6	167713.3
Grey	3.5.6	3.5.6	3.5.6	3.5.6	3.5.6
CO2	3.5.1	3.5.1	3.5.1	3.5.1	3.5.1
Energy	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Water	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Land	1.3.7	1.3.7	1.3.7	1.3.7	1.3.7
Material	3.5.9	3.5.9	3.5.9	3.5.9	3.5.9

سناریو	2015	2020	2025	2030	2035
Baseline	40408.5	47091.0	48501.4	54093.6	56106.7
Green	101189.8	117791.7	128792.7	146511.6	167713.3
Grey	3.5.6	3.5.6	3.5.6	3.5.6	3.5.6
CO2	3.5.1	3.5.1	3.5.1	3.5.1	3.5.1
Energy	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Water	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Land	1.3.7	1.3.7	1.3.7	1.3.7	1.3.7
Material	3.5.9	3.5.9	3.5.9	3.5.9	3.5.9



شکل ۱۰: مقایسه هزینه‌های مختلف در سراسر دوره مطالعه (۲۰۱۵ تا ۲۰۳۵)

سناریو	2015	2020	2025	2030	2035
Baseline	40408.5	47091.0	48501.4	54093.6	56106.7
Green	101189.8	117791.7	128792.7	146511.6	167713.3
Grey	3.5.6	3.5.6	3.5.6	3.5.6	3.5.6
CO2	3.5.1	3.5.1	3.5.1	3.5.1	3.5.1
Energy	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Water	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Land	1.3.7	1.3.7	1.3.7	1.3.7	1.3.7
Material	3.5.9	3.5.9	3.5.9	3.5.9	3.5.9



شکل ۱۱: مقایسه هزینه‌های مختلف در سراسر دوره مطالعه (۲۰۱۵ تا ۲۰۳۵)

تحقیقات نشان می‌دهد که این مطالعه به ادغام انواع مختلف فناوری‌های سبز در طراحی یک شبکه لجستیک بازیافت باتری‌های چندسطحی (RLN) می‌پردازد و بینش‌هایی را برای دستیابی به پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی در RLND ارائه می‌دهد. از طریق یک مطالعه موردی در منطقه کلان‌شهری نانجینگ، مشخص شد که مدل پیشنهادی در این مطالعه تأثیرات قابل توجهی را به همراه داشته است. اصول و روش‌های بنیادی این تحقیق عمومی و قابل انتقال هستند و بنابراین می‌توانند به طور گسترده‌ای در سایر مناطق به کار گرفته شوند. در تحلیل نتایج، ذکر شده است که وقتی فناوری‌های سبز در طراحی مدل مورد توجه قرار می‌گیرد و منافع اقتصادی و زیست‌محیطی در راه‌حل مدل متعادل می‌شوند، هزینه کل شبکه می‌تواند نسبت به سناریوهایی که فقط اهداف

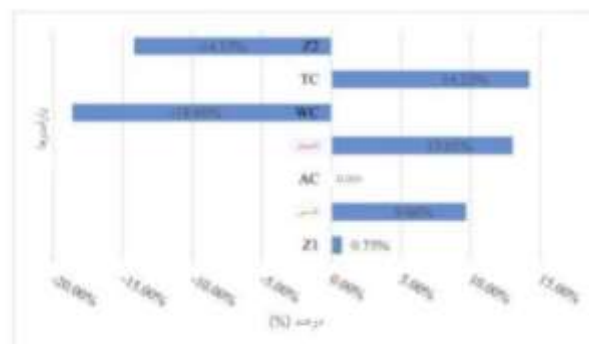
زیست محیطی را دنبال می کنند، ۳.۹۹٪ کاهش یابد و انتشار کربن نیز می تواند نسبت به سناریوهایی که فقط اهداف اقتصادی را دنبال می کنند، ۱۲.۷۷٪ کاهش یابد. در عین حال، تعداد بیشتری از باتری های زائد به طور مؤثری مورد استفاده قرار می گیرند، با افزایش ۳.۱٪ در نسبت استفاده متوالی از باتری های زائد و کاهش ۳۲.۵۳٪ در نسبت زباله تولید شده، در مقایسه با سناریو ۱ که فقط اهداف اقتصادی را دنبال می کند. واضح است که انتخاب انواع فرآیندهای مختلف برای تسهیلات مختلف مفید است و به طور قابل توجهی انتشار کربن شبکه را کاهش می دهد، عمر باتری های زائد را افزایش می دهد، زباله را کاهش می دهد و آلودگی زیست محیطی را کاهش می دهد.

با کنترل متغیرها و فرض اینکه تسهیلات از یک نوع به طور یکسان با نوع فناوری ۱ پیکربندی شده اند، داده های بنیادی این مطالعه به مدل ها ورودی داده شده و با داده هایی که فرآیندهای تسهیلات را در نظر نمی گیرند، مقایسه می شود. نتایج، از جمله تغییرات درصدی در هزینه کل شبکه، انتشار کربن و هزینه های مختلف، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می شود که تحت شرایطی که انواع پیکربندی های فناوری مختلف برای تسهیلات در نظر گرفته شده است، کاهش قابل توجهی در انتشار کربن وجود دارد، که تا ۱۴.۱۷٪ کاهش می یابد، در حالی که هزینه ها تنها ۰.۷۵٪ افزایش می یابد. بنابراین، نتایج نشان می دهد که انتخاب انواع فناوری مناسب برای تسهیلات می تواند به طور قابل توجهی انتشار کربن شبکه را کاهش دهد، با تنها افزایش جزئی در هزینه ها. در راستای تلاش جهانی برای تولید صفر کربن، شرکت هایی که از سطوح بالاتری از فناوری سبز برای دستیابی به کاهش مؤثر کربن در فرآیندهای تولید خود استفاده می کنند، می توانند به سرعت تصویر برند خود را تقویت کنند، که برای عملیات بلندمدت شرکت اهمیت زیادی دارد.

در بخش تحلیل حساسیت جامع، مشخص شده است که سطح اعتماد و مقادیر بازیافتی عوامل تعیین کننده ای در تأثیرگذاری بر تعداد تسهیلات باز شده هستند، کیفیت بازیافت عامل تعیین کننده ای در نسبت انواع مختلف تسهیلات است و وزن های مورد انتظار عوامل مهمی در تأثیرگذاری بر مکان یابی تسهیلات و انتخاب نوع فناوری هستند. بنابراین، این مطالعه بینش های لازم را به مدیران صنعتی ارائه می دهد تا بتوانند به موقع و به طور مؤثر تصمیمات استراتژیک در پاسخ به مقررات اضطراری انتشار کربن اتخاذ کنند، از طریق تحلیل ترجیحات مختلف برای سطوح عدم قطعیت، مقادیر بازیافتی، کیفیت بازیافت، هزینه ها و اهداف انتشار کربن.

۶.۵. بینش های مدیریتی

بر اساس راه حل های مطالعه موردی و تحلیل حساسیت، این بخش توصیه های مدیریتی مفیدی برای شرکت های بازیافت باتری و نهادهای دولتی در طراحی شبکه لجستیک بازیافت باتری های زائد پایدار ارائه می دهد. صنعت بازیافت باتری در سال های اخیر رشد سریعی داشته و محیط کسب و کار به طور مداوم در حال تغییر است.



شکل 10: درصد تغییرات در هزینه و انتشار کربن و بدون در نظر گرفتن انواع فرآیند تأسیسات.



منابع محدود بازار. مدیران صنعت نیاز به یک رویکرد مدیریتی مؤثر دارند تا به سرعت به شرایط متغیر بازار پاسخ دهند. طراحی شبکه لجستیک معکوس (RLND) جنبه‌ای حیاتی است که بر بازیافت باتری تأثیر می‌گذارد و روش طراحی شبکه پیشنهادی در این مطالعه می‌تواند راهنمایی‌هایی برای تصمیم‌گیرندگان در خصوص پیش‌پوزیشنینگ گره‌های لجستیکی و تسهیلات فراهم کند. تشویق به استفاده از انواع فناوری‌های با کیفیت بالا ممکن است بارهای هزینه اضافی را بر دوش شرکت‌ها بگذارد. با این حال، دستیابی به نرخ‌های بالای استفاده مجدد، کاهش زباله و حفظ سطح پایین انتشار کربن می‌تواند منافع اقتصادی بالقوه‌ای برای شرکت‌ها به همراه داشته باشد. در سال‌های اخیر، دولت‌ها تأکید زیادی بر پایداری اکولوژیکی داشته‌اند. با استفاده از انواع فناوری با کیفیت بالا، شرکت‌ها می‌توانند به حفظ منابع و بهبود اکولوژیکی دست یابند و به ساخت یک شهرت مثبت شرکتی و تصویر اجتماعی کمک کنند. این امر به نوبه خود توسعه پایدار بلندمدت شرکت‌ها را ترویج می‌کند. از مثال‌های عددی مشاهده می‌شود که سطوح بالاتر فناوری منجر به مزایای اکولوژیکی بهتر می‌شود. نهادهای نظارتی صنعتی و کارشناسان سیاست می‌توانند به چارچوب ارائه شده در این مطالعه برای تعیین استانداردهای صنعتی و اقدامات سیاستی مرتبط مراجعه کنند، شرکت‌ها را به نوآوری داوطلبانه تشویق کنند و در عین حال مشارکت شرکت‌ها و کارگاه‌های کوچک با کیفیت پایین در بازیافت باتری را محدود کنند و در نهایت پایداری اکولوژیکی را افزایش دهند. علاوه بر این، سیاست‌گذاران باید به طور فعال فعالیت‌های ترویجی را سازماندهی کنند تا آگاهی شرکت‌ها را در مورد پیامدهای بازیافت استاندارد باتری افزایش دهند. تشویق همکاری میان کسب‌وکارهای مرتبط می‌تواند به توسعه با کیفیت بالا در صنعت کمک کند. با تغییر وزن‌های مورد انتظار، مشاهده شد که در نظر گرفتن انتشار کربن بر تصمیمات کسب‌وکار تأثیر می‌گذارد. نهادهای دولتی می‌توانند با تنظیم نرخ‌های مالیات کربن، نوآوری تکنولوژیکی فعالانه را در میان کسب‌وکارها تشویق کنند.

۷. نتیجه‌گیری

استراتژی‌های "اوج کربن" و "کربن خنثی" ضرورت در نظر گرفتن پایداری اکولوژیکی را برجسته می‌کنند. به عنوان یک استراتژی مهم برای توسعه پایدار، طراحی شبکه لجستیک معکوس (RLND) به عنوان بخشی کلیدی از مدیریت بازیافت دیده می‌شود. به دلیل ویژگی‌های خاص خود، باتری‌های زائد از خودروهای برقی توجه بیشتری را در فرآیندهای بازیافت جلب می‌کنند. بنابراین، این مطالعه به استفاده متوالی از باتری‌های زائد خودروهای برقی از منظر اقتصاد چرخشی می‌پردازد. این مطالعه یک شبکه بازیافت لجستیک معکوس چندسطحی را طراحی کرده، یک مدل برنامه‌ریزی مختلط-صحیح با هدف حداقل‌سازی هزینه به عنوان هدف اقتصادی و حداقل‌سازی انتشار کربن به عنوان هدف زیست‌محیطی پیشنهاد می‌دهد، وزن‌های مورد انتظار را برای متعادل‌سازی دو هدف متضاد معرفی می‌کند و تخصیص سطح‌های فناوری مختلف برای تسهیلات پردازش مختلف را در نظر می‌گیرد. این امر به افزایش پایداری شبکه لجستیک معکوس کمک می‌کند. مدل به یک مثال عددی در منطقه کلان‌شهری نانجینگ در چین اعمال شده است. مقدار باتری‌های زائد از خودروهای برقی در سال برنامه‌ریزی شده با استفاده از مدل پیش‌بینی شده و به عنوان یک پارامتر ورودی استفاده می‌شود. مدل با استفاده از نرم‌افزار لینگو ۱۷.۰ حل شده و مکان‌های بهینه تسهیلات شبکه، پیکربندی‌های سطح فناوری مختلف و طرح‌های حمل و نقل بین تسهیلات به دست می‌آید. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که سطح اعتماد و مقدار بازیافت عوامل تعیین‌کننده‌ای برای تعداد تسهیلات باز شده هستند. کیفیت بازیافت عامل تعیین‌کننده‌ای در تأثیرگذاری بر نسبت تسهیلات باز شده است. عوامل وزن‌های مورد انتظار عوامل مهمی در انتخاب مکان تسهیلات هستند و همچنین بر انتخاب فناوری‌های تسهیلات در هنگام در نظر گرفتن فرآیند تسهیلات تأثیر می‌گذارند. یک رویکرد پیشرو در طراحی شبکه ضروری است و تنها با تعیین معقول مقادیر عوامل تأثیرگذار مختلف می‌توان طراحی شبکه لجستیک معکوس را



کارآمد و پایدار کرد. علاوه بر این، این مطالعه بینش‌های مدیریتی و پیشنهادات سیاستی را برای راهنمایی شرکت‌ها و نهادهای دولتی ارائه می‌دهد. که بر انتخاب نوع فناوری و مکان‌یابی تسهیلات تأثیر می‌گذارند. در نهایت، این مطالعه نتایج قابل توجهی را در زمینه طراحی شبکه لجستیک معکوس بازیافت باتری‌های زائد ارائه می‌دهد که به بهبود پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی کمک می‌کند.

Chen, W., Liu, Y., Han, M., 2024. Designing a sustainable reverse logistics network for used cell phones based on offline and online trading systems. J. Environ. Manag. 354, 120417

Faramarzi-Oghani, S., Dolati Neghabadi, P., Talbi, E., Tavakkoli-Moghaddam, R., 2023. Meta-heuristics for sustainable supply chain management: a review. Int. J. Prod. Res. 61 (6), 1979–2009.

Gholizadeh, H., Goh, M., Fazlollahtabar, H., Mamashli, Z., 2022. Modelling uncertainty in sustainable-green integrated reverse logistics network using metaheuristics optimization. Comput. Ind. Eng. 163, 107828.

He, M., Li, Q., Lin, T., Fan, J., Wu, X., Han, X., 2024. Designing a reverse logistics network for end-of-life vehicles in an uncertain environment. World Electric Vehicle Journal 15 (4), 140.

Hu, G., Liao, W., Luo, X., 2022. Collaborative reverse logistics network for electric vehicle batteries management from sustainable perspective. J. Environ. Manag. 324, 116352.

Kang, Z., Huang, Z., Peng, Q., Shi, Z., Xiao, H., Yin, R., Fu, G., Zhao, J., 2023. Recycling technologies, policies, prospects, and challenges for spent batteries. iScience 26 (11), 108072.

Kannan, D., Solanki, R., Darbari, J.D., Govindan, K., 2023. A novel bi-objective optimization model for an eco-efficient reverse logistics network design configuration. J. Clean. Prod. 394, 136357.

Kilic, H.S., Kalender, Z.T., Solmaz, B., Iseri, D., 2023. A two-stage MCDM model for reverse logistics network design of waste batteries in Turkey. Appl. Soft Comput. 143, 110373.

Lagan`a, I.R., Sharifi, S., Khademi, M., Salimi, M., Ferrara, M., 2022. Analysis of some incentives on two-echelon reverse supply chain with a strategic consumer: the case of unwanted medications in households. J. Multi-Criteria Decis. Anal. 29 (1–2), 37–48.

Li, H., Tian, Y., Li, Z., Wu, C., Liu, Y., 2023. Life-cycle economic and environmental impacts of municipal solid waste reverse logistics in residential areas. Waste Manage. (Tucson, Ariz.) 164, 200–208.

Li, J., Liu, F., Zhang, J.Z., Tong, Z., 2023. Optimal configuration of electric vehicle battery recycling system under across-network cooperation. Appl. Energy 338, 120898.

Lin, J., Li, X., Zhao, Y., Chen, W., Wang, M., 2023. Design a reverse logistics network for end-of-life power batteries: a case study of Chengdu in China. Sustain. Cities Soc. 98, 104807.

Liu, F., Tang, J., Rustam, A., Liu, Z., 2023. Evaluation of the central and local power batteries recycling policies in China: a PMC-Index model approach. J. Clean. Prod. 427, 139073.



Network, C.I.R., 2023. Market deep analysis and current situation research report on power car battery recycling industry in 2023. <https://www.chinairn.com/news/20230413/150131221.shtml>.

Rosenberg, S., Gl'oser-Chahoud, S., Huster, S., Schultmann, F., 2023. A dynamic network design model with capacity expansions for EoL traction battery recycling – a case study of an OEM in Germany. *Waste Manage. (Tucson, Ariz.)* 160, 12–22.

Sharmili, N., Nagi, R., Wang, P., 2023. A review of research in the Li-ion battery production and reverse supply chains. *J. Energy Storage* 68, 107622.

Singh, A., Goel, A., 2024. Design of the supply chain network for the management of textile waste using a reverse logistics model under inflation. *Energy* 292, 130615.

Zeng, J., Liu, S., 2023. Research on recycling benefits of spent lithium batteries with parameter uncertain: application to adjust incentive policy. *J. Energy Storage* 74, 109314.

Zhang, X., Feng, X., Jiang, Z., Gong, Q., Wang, Y., 2023. A blockchain-enabled framework for reverse supply chain management of power batteries. *J. Clean. Prod.* 415, 137823.