

طراحی یک چارچوب یکپارچه برای ارتقای تاب‌آوری و چابکی زنجیره تأمین باتری‌های لیتیوم-یونی خودروهای برقی در مواجهه با نوسانات تقاضا و ریسک‌های ژئوپلیتیکی

میر مصطفی مجیدی

دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

زنجیره تأمین باتری‌های لیتیوم-یونی خودروهای برقی به دلیل وابستگی شدید به مواد اولیه‌ای با جغرافیای تأمین متمرکز و سیاسی‌شده، در معرض تلفیقی بی‌سابقه از ریسک‌های ژئوپلیتیکی ساختاری و نوسانات پویای تقاضا قرار دارد. این پژوهش با هدف پاسخ به این چالش دوگانه، به طراحی یک چارچوب مفهومی یکپارچه می‌پردازد که تاب‌آوری و چابکی را نه به عنوان جایگزین، بلکه به عنوان قابلیت‌های مکمل و تقویت‌کننده یکدیگر در نظر می‌گیرد. با بهره‌گیری از روش‌شناسی کیفی و مدل‌سازی مفهومی، و اعتبارسنجی از طریق مصاحبه با خبرگان، این تحقیق نشان می‌دهد که تعامل پویای این دو قابلیت منجر به خلق راهبردهای ترکیبی هوشمندی می‌شود. چهار راهبرد محوری تنوع‌بخشی هوشمند، ذخیره پویا، همکاری چابک در طراحی و اقتصاد چرخشی یکپارچه به عنوان هسته عملیاتی چارچوب پیشنهاد شده‌اند که هر یک به‌طور همزمان مکانیزم‌های کاهش ریسک و پاسخ سریع به تغییرات بازار را در خود ادغام می‌کنند. یافته‌ها حاکی از آن است که رویکرد یکپارچه حاضر، گامی فراتر از مطالعات تک‌بعدی پیشین نهاده و نقشه‌راهی برای تبدیل تهدیدات پیچیده محیطی به فرصت‌هایی برای ایجاد مزیت رقابتی پایدار و امنیت تأمین بلندمدت ارائه می‌دهد. این چارچوب می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری مدیران صنعتی و سیاست‌گذاران کلان در مواجهه با عدم قطعیت‌های فزاینده این صنعت راهبردی باشد.

کلمات کلیدی: زنجیره تأمین باتری، تاب‌آوری، چابکی، ریسک ژئوپلیتیک، خودروی برقی، راهبرد ترکیبی.

۱- مقدمه

گذار جهانی به سمت تحقق اهداف توسعه پایدار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، صنعت خودرو را در یکی از عمیق‌ترین تحولات تاریخ خود قرار داده است. در این میان، خودروهای برقی به عنوان موتور محرک اصلی این تحول شناخته می‌شوند [۱]. کالایی کلیدی در قلب این تحول فناورانه، باتری‌های لیتیوم-یونی هستند که امروزه نه تنها به عنوان منبع تأمین انرژی، بلکه به عنوان

گران قیمت ترین و راهبردی ترین مؤلفه یک خودروی برقی محسوب می شوند. برآوردها نشان می دهد سهم باتری از کل هزینه تولید می تواند بین ۳۰ تا ۴۰ درصد متغیر باشد [۲]. با این حال، زنجیره تأمین جهانی این فناوری حیاتی، به دلیل ساختار خطی پیچیده، سرمایه بری سنگین و وابستگی شدید به منابع معدنی خاص، از آسیب پذیری ذاتی رنج می برد. جغرافیای تأمین مواد اولیه بحرانی مانند لیتیوم، کبالت، نیکل و گرافیت، به شدت متمرکز است. به طور مثال، بیش از ۷۰٪ از تولید کبالت جهان در جمهوری دموکراتیک کنگو متمرکز است و چین سهم غالب در فرآوری بسیاری از مواد اولیه باتری را داراست [۳]. این وضعیت، زنجیره تأمین باتری را در معرض دو دسته چالش عمده و همزمان قرار می دهد: نخست، ریسک های ژئوپلیتیکی فزاینده ناشی از تنش های تجاری، تحریم ها، بی ثباتی سیاسی در مناطق معدنی، و قوانین حمایت گرایانه جدید (مانند قانون کاهش تورم ایالات متحده) که امنیت و ثبات جریان مواد خام را به مخاطره می اندازد [۴]. دوم، نوسانات شدید و غیرخطی تقاضا برای خودروهای برقی که متأثر از عوامل متنوعی از جمله تغییرات سیاست های دولتی، نوسان قیمت نفت، سرعت توسعه زیرساخت شارژ و ظهور فناوری های رقیب است [۵]. ترکیب این دو دسته چالش، یک محیط عملیاتی فوق العاده پیچیده و پرعدم قطعیت را برای تمامی بازیگران این زنجیره، از معدنکاران تا خودروسازان، ایجاد کرده است.

در چنین محیط پویا و ریسک پذیری، توانایی زنجیره تأمین برای مقاومت در برابر شوک ها، بازیابی سریع و حفظ تداوم عملیات موسوم به تاب آوری و همچنین قابلیت درک تغییرات بازار و پاسخ سریع و مؤثر به آن ها، معروف به چابکی به شاخص هایی حیاتی برای بقا و مزیت رقابتی تبدیل شده اند. اگرچه هر یک از این دو مفهوم به طور گسترده در ادبیات مدیریت زنجیره تأمین مورد مطالعه قرار گرفته اند، اما رویکرد غالب، بررسی جداگانه آن ها بوده است. به عبارت دیگر، یک شکاف تحقیقاتی مهم در اینجا نمایان می شود: فقدان یک چارچوب یکپارچه و عملیاتی که بتواند به صورت همزمان و هماهنگ، استراتژی های مواجهه با ریسک های ساختاری و نسبتاً کند ژئوپلیتیک که نیازمند تاب آوری است را با راهکارهای پاسخ به نوسانات پویا و سریع بازار که مستلزم چابکی است در بستر خاص و پیچیده زنجیره تأمین باتری لیتیوم-یونی ترکیب نماید. پژوهش های موجود اغلب یا بر یک نوع ریسک متمرکز شده اند، یا مدل های ارائه شده فاقد نگرش کل نگر و سیستمی لازم برای هدایت همزمان تصمیم گیری در سطوح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی هستند [۶]. این شکاف، مدیران صنعت را در یافتن توازن بهینه بین سرمایه گذاری در استحکام ساختاری (برای تاب آوری) و حفظ انعطاف پذیری عملیاتی (برای چابکی) با چالش مواجه ساخته است.

بر این اساس، هدف اصلی این تحقیق، طراحی یک چارچوب یکپارچه مفهومی-راهبردی است که بتواند مؤلفه ها و ارتباطات کلیدی لازم برای ارتقای همزمان تاب آوری و چابکی در زنجیره تأمین باتری خودروهای برقی را در مواجهه با تلفیق ریسک های ژئوپلیتیکی و نوسانات تقاضا، تبیین نماید. این چارچوب به دنبال ارائه نقشه راهی است که ذینفعان مختلف، از سیاست گذاران ملی تا مدیران عملیاتی شرکتها، بتوانند بر اساس آن، استراتژی های خود را تدوین و ارزیابی کنند. نوآوری محوری این تحقیق در چند وجه نهفته است: نخست، ارائه یک مدل ترکیبی که به جای تمرکز انحصاری بر یک بُعد، به تعامل پویای تاب آوری و چابکی می پردازد. دوم، تلفیق صریح ملاحظات ژئوپلیتیک به عنوان یک متغیر کلان تعیین کننده در طراحی زنجیره تأمین. سوم، ارائه چارچوبی اقتضایی که راهکارهای خود را در سطوح مختلف زنجیره از تأمین مواد خام تا بازیافت تعریف می کند.

۲- مبانی نظری و ادبیات تحقیق

۲-۱- زنجیره تأمین باتری لیتیوم-یونی

زنجیره تأمین باتری‌های لیتیوم-یونی خودروهای برقی، زنجیره‌ای خطی، طولانی و فناورانه‌محور است که از استخراج مواد اولیه بحرانی آغاز شده و پس از مراحل فرآوری، تولید مواد کاتدی و آندی، ساخت سلول، مونتاژ ماژول و پک، به خودروسازان ختم می‌شود و در نهایت مرحله بازیافت را نیز شامل می‌شود [۷]. ویژگی متمایزکننده این زنجیره، وابستگی حیاتی به موادی است که از نظر جغرافیایی متمرکز و از نظر سیاسی در مناطق بی‌ثبات قرار دارند. مطالعه اولیوتی و همکاران (۲۰۱۷) به وضوح آسیب‌پذیری ناشی از این تمرکز جغرافیایی و وابستگی به مواد اولیه بحرانی را نشان می‌دهد [۸]. علاوه بر این، چرخه طولانی توسعه معادن و کارخانه‌های تولید باتری (اغلب بیش از ۵ سال)، هماهنگی عرضه و تقاضا را دشوار ساخته و سرمایه‌گذاری‌های کلان را در معرض ریسک منسوخ شدن فناوری قرار می‌دهد [۹].

۲-۲- تاب‌آوری در زنجیره تأمین

تاب‌آوری در ادبیات زنجیره تأمین، به قابلیت سیستم برای آماده‌سازی، پاسخ و بازیابی از اختلالات به منظور بازگشت به وضعیت عملکردی مطلوب یا حتی بهتر از قبل تعریف شده است [۱۰]. پونوماروف و هالکامب (۲۰۰۹) پایه‌های نظری این مفهوم را بنا نهادند و آن را ترکیبی از قابلیت‌های مقاومت و بازیابی دانستند [۱۱]. در عمل، استراتژی‌های کلاسیک تاب‌آوری شامل ایجاد ظرفیت اضافه، تنوع‌بخشی به تأمین‌کنندگان، ایجاد ذخایر ایمنی و توسعه شریک‌های استراتژیک جایگزین می‌شود. با این حال، در زنجیره‌های پیچیده و به هم وابسته امروزی مانند زنجیره باتری، تاب‌آوری صرفاً با این اقدامات ایستا حاصل نمی‌شود و نیاز به قابلیت‌های پویایی مانند نظارت بر ریسک و توانایی بازطراحی سریع شبکه دارد، موضوعی که توسط ایوانوف (۲۰۲۲) مورد تأکید قرار گرفته است [۱۲].

۲-۳- چابکی در زنجیره تأمین

چابکی، توانایی زنجیره تأمین برای شناسایی تغییرات در محیط اعم از تغییرات در تقاضای مشتری یا ظهور فناوری‌های جدید و پاسخ سریع و کارآمد به آن‌ها است [۱۳]. سوافورد و همکاران (۲۰۰۶) چابکی را حاصل یکپارچگی اطلاعات، هماهنگی زنجیره و انعطاف‌پذیری عملیاتی می‌دانند [۱۴]. در محیط پرتلاطم بازار خودروهای برقی، چابکی می‌تواند از طریق راهکارهایی چون تولید مبتنی بر پلتفرم انعطاف‌پذیر، مشارکت نزدیک با تأمین‌کنندگان برای کاهش زمان تأخیر، و به‌کارگیری سیستم‌های اطلاعاتی بلادرنگ برای پیش‌بینی دقیق‌تر تقاضا محقق شود [۱۵]. چابکی بیشتر بر انطباق فعال و استفاده از فرصت‌ها متمرکز است، در

حالی که تاب‌آوری بر دفاع غیرفعال و کاهش تهدیدها تأکید دارد، اما در عمل، این دو برای موفقیت در محیط‌های پرریسک امروزی به یکدیگر وابسته هستند.

۲-۴- ریسک‌های ژئوپلیتیک و نوسانات تقاضا

ریسک‌های ژئوپلیتیک به آن دسته از عوامل سیاسی، امنیتی و سیاست‌گذاری در سطح ملی و بین‌المللی اطلاق می‌شود که می‌تواند بر جریان آزاد کالا، خدمات و سرمایه تأثیر منفی بگذارد. هلبینگ و همکاران (۲۰۱۸) چارچوبی برای ارزیابی ریسک‌های تأمین مواد اولیه ارائه داده‌اند که نشان می‌دهد این ریسک‌ها چگونه می‌توانند زنجیره‌هایی مانند باتری را تحت تأثیر قرار دهند [۱۶]. از سوی دیگر، نوسانات تقاضا ناشی از عوامل غیرقابل پیش‌بینی بازار است. مطالعاتی مانند تحقیق شی و همکاران (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که ناپایداری سیاست‌های حمایتی دولتی، یکی از عوامل اصلی ایجاد نوسانات شدید در تقاضای خودروهای برقی در بازارهای نوظهور است [۱۷]. این دو دسته ریسک، ماهیت متفاوتی دارند؛ ریسک‌های ژئوپلیتیک اغلب ناگهانی، عمیق و با اثرات بلندمدت هستند، در حالی که نوسانات تقاضا ممکن است تکراری و با اثرات کوتاه‌مدت‌تر باشند، اما مدیریت همزمان آن‌ها مستلزم یک رویکرد ترکیبی است.

۲-۵- شکاف تحقیقاتی

با وجود ادبیات غنی در هر یک از حوزه‌های فوق، تحلیل یکپارچه آن‌ها یک خلأ پژوهشی آشکار را نشان می‌دهد. اولاً، مطالعات معدودی به بررسی همزمان تاب‌آوری و چابکی به عنوان دو قابلیت مکمل در یک چارچوب واحد برای زنجیره تأمین باتری پرداخته‌اند. اکثر پژوهش‌ها یا بر تاب‌آوری در برابر اختلالات گسترده متمرکزند یا بر چابکی برای پاسخ به بازار. ثانیاً، اگرچه ریسک‌های ژئوپلیتیک و نوسانات تقاضا هر دو به عنوان تهدید شناخته می‌شوند، اما راهکارهای مدیریت یکپارچه آن‌ها در ادبیات به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. ثالثاً، بیشتر مدل‌های موجود فاقد یک چارچوب راهبردی جامع برای هدایت تصمیم‌گیری در سطوح مختلف کلان، میانی و خرد هستند.

۳- روش‌شناسی تحقیق

این پژوهش با هدف طراحی یک چارچوب مفهومی یکپارچه، از رویکرد تحقیق کیفی و روش مدل‌سازی مفهومی بهره می‌گیرد. رویکرد کیفی به دلیل ماهیت اکتشافی مسئله تحقیق، که بر درک پیچیدگی‌ها و ترسیم روابط در یک حوزه پویا تمرکز دارد، انتخاب شد. مدل‌سازی مفهومی به عنوان یک روش ساختاریافته، امکان صورت‌بندی انتزاعی دانش موجود و استخراج‌شده را برای ایجاد پایه‌ای جهت تصمیم‌گیری و پژوهش‌های آتی فراهم می‌سازد [۱۸].

۳-۱- مراحل طراحی مدل

فرآیند طراحی چارچوب پیشنهادی در سه مرحله اصلی و به هم پیوسته صورت پذیرفت: (۱) تحلیل و تدوین ادبیات و شناسایی مؤلفه‌های پایه. در این مرحله، یک مرور نظام‌مند ساختاریافته بر ادبیات موضوع در چهار حوزه محوری شامل زنجیره تأمین باتری، تاب‌آوری، چابکی، ریسک‌های ژئوپلیتیک و نوسانات تقاضا انجام شد. هدف، استخراج و فهرست‌برداری جامعی از عناصر، استراتژی‌ها، شاخص‌ها و ریسک‌های شناسایی شده در مطالعات معتبر پیشین بود. خروجی این مرحله، یک بانک اطلاعاتی اولیه از مؤلفه‌های بالقوه بود.

(۲) توسعه چارچوب اولیه و اعتبارسنجی خبرگی. بر اساس تحلیل ادبیات و با استفاده از روش توسعه چارچوب مفهومی [۱۹]، ساختار اولیه‌ای برای یکپارچه‌سازی مؤلفه‌ها طراحی گردید. این چارچوب اولیه در معرض اعتبارسنجی خبرگی قرار گرفت. به این منظور، از یک پنل ۷ نفره متشکل از خبرگان دانشگاهی شامل استادان مدیریت عملیات و زنجیره تأمین و صنعتی، شامل مدیران ارشد با سابقه در صنعت خودرو یا انرژی دعوت به عمل آمد. فرآیند نمونه‌گیری تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت. داده‌های کیفی از طریق یک پرسشنامه نیمه‌ساختاریافته آنلاین و یک جلسه بحث گروهی متمرکز گردآوری شد. بازخوردهای این مرحله برای اصلاح و پالایش مدل استفاده گردید [جدول ۱].

(۳) تکمیل و ارائه چارچوب نهایی. در این مرحله، با تلفیق یافته‌های ادبیات و بازخوردهای خبرگان، چارچوب یکپارچه نهایی تدوین و روابط بین اجزای آن به طور شفاف تعریف شد. همچنین، برای افزایش قابلیت کاربردی شدن، استراتژی‌های اجرایی و مکانیسم‌های پیشنهادی برای پایش عملکرد ارائه گردید [جدول ۲].

۳-۲- روش گردآوری و تحلیل داده‌ها

گردآوری داده‌های ثانویه با جستجوی سیستماتیک در پایگاه‌های علمی معتبر (Web of Science, Scopus) و با استفاده از کلیدواژه‌های ترکیبی، مقالات پژوهشی و گزارش‌های معتبر تا پایان سال ۲۰۲۳ جمع‌آوری شدند. مدیریت منابع و حذف موارد تکراری با نرم‌افزار EndNote X9 انجام شد. در بخش گردآوری داده‌های اولیه، داده‌های کیفی از پرسشنامه نیمه‌ساختاریافته و جلسه بحث گروهی با خبرگان گردآوری گردید. برای تحلیل داده‌ها، از تکنیک تحلیل مضمون استفاده شد [۲۰]. کدگذاری و تحلیل مضامین با استفاده از نرم‌افزار کیفی MAXQDA 2020 انجام پذیرفت تا دقت و نظم فرآیند تضمین گردد. داده‌های جلسه خبرگان نیز با تحلیل محتوای کیفی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت تلفیق این تحلیل‌ها، مبنای نهایی‌سازی چارچوب را فراهم آورد.

جدول ۱- مشخصات خبرگان و معیارهای انتخاب برای بخش اعتبارسنجی.

ردیف	حوزه تخصص	سابقه (حداقل سال)	مدرک تحصیلی	تعداد افراد	نقش/تجربه مرتبط نمونه
۱	مدیریت زنجیره تأمین	۱۵	دکتری	۳	استاد دانشگاه، مشاور صنعتی
۲	صنعت خودرو/باتری	۱۲	کارشناسی ارشد به بالا	۳	مدیر تأمین، مدیر توسعه کسب و کار
۳	اقتصاد/سیاست گذاری انرژی	۱۰	دکتری	۱	پژوهشگر ارشد در اندیشکده انرژی
جمع	۳ حوزه	میانگین: ۱۲.۳	-	۷	-

جدول ۲- فرآیند مرور نظام مند ادبیات (بر اساس PRISMA-ScR)

ردیف	مرحله	تعداد منابع شناسایی شده	معیارهای ورود/خروج	تعداد باقی مانده
۱	شناسایی از پایگاه ها	۱۲۵۰	-	۱۲۵۰
۲	حذف موارد تکراری	-	-	۹۳۰
۳	غربالگری بر اساس عنوان/چکیده	-	ورود: مرتبط با خودروی برقی، باتری، تاب آوری، چابکی، ریسک. خروج: زبان غیرانگلیسی/فارسی، مقالات خبری.	۲۱۰
۴	غربالگری متن کامل	-	ورود: ارائه چارچوب، مدل یا استراتژی. خروج: فاقد نوآوری مفهومی.	۸۷
۵	منابع نهایی برای سنتز	-	-	۸۷

۴- طراحی مدل مفهومی یکپارچه

این بخش به تشریح هسته اصلی پژوهش، یعنی چارچوب مفهومی طراحی شده برای ارتقای همزمان تاب‌آوری و چابکی می‌پردازد. این چارچوب بر پایه سنتز ادبیات و اعتبارسنجی خبرگان، و در پاسخ به شکاف تحقیقاتی شناسایی شده بنا نهاده شد.

۴-۱- شناسایی و تحلیل ریسک‌های کلیدی

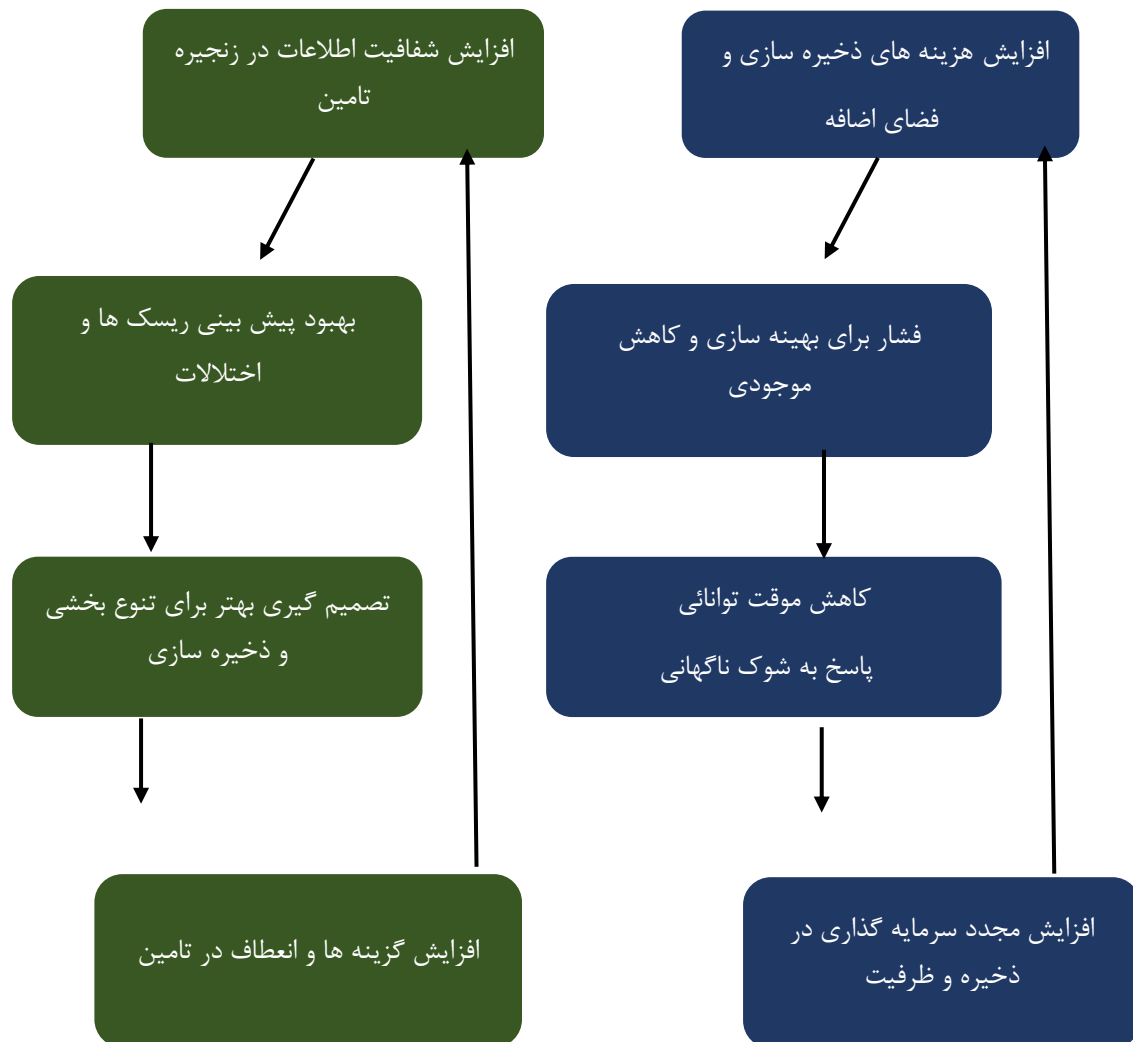
پیش از طراحی راه‌حل، تحلیل دقیق ریسک‌های تهدیدکننده زنجیره تأمین باتری لیتیوم-یونی ضروری است. این ریسک‌ها در دو دسته کلی، اما دارای تعامل پویا با یکدیگر، قرار می‌گیرند:

(۱) ریسک‌های ژئوپلیتیکی: این ریسک‌ها ماهیتی ساختاری، ناگهانی و با دامنه اثر گسترده دارند. نمونه‌های بارز شامل تحریم‌های تجاری هدفمند (مانند محدودیت‌های صادراتی بر مواد خام) [۴]، بی‌ثباتی سیاسی در مناطق دارای معادن (مانند مناطق تولید کبالت) و تصویب قوانین حمایت‌گرایانه (مانند الزام به مبدا داخلی قطعات) است. این ریسک‌ها عمدتاً منجر به قطع یا اختلال شدید در جریان فیزیکی مواد و افزایش غیرقابل پیش‌بینی هزینه‌ها می‌شوند. (۲) ریسک‌های ناشی از نوسانات تقاضا: این ریسک‌ها ماهیتی چرخه‌ای، پویا و نسبتاً سریع دارند. عوامل ایجادکننده آن شامل تغییر ناگهانی سیاست‌های حمایتی دولت‌ها (مانند حذف یارانه خرید) [۵]، رقابت فناوری‌های جایگزین (مانند باتری حالت جامد) و تغییرات در قیمت نفت است. این نوسانات عمدتاً منجر به عدم تعادل خطرناک بین عرضه و تقاضا، افزایش موجودی‌های راکد یا از دست دادن سهم بازار می‌گردند. نکته کلیدی آن است که این دو دسته ریسک می‌توانند هم‌افزایی کنند؛ برای مثال، یک شوک ژئوپلیتیک با ایجاد تلاطم در قیمت‌ها، پیش‌بینی تقاضا را نیز غیرممکن می‌سازد.

۴-۲- مؤلفه‌های مدل تاب‌آوری-چابکی

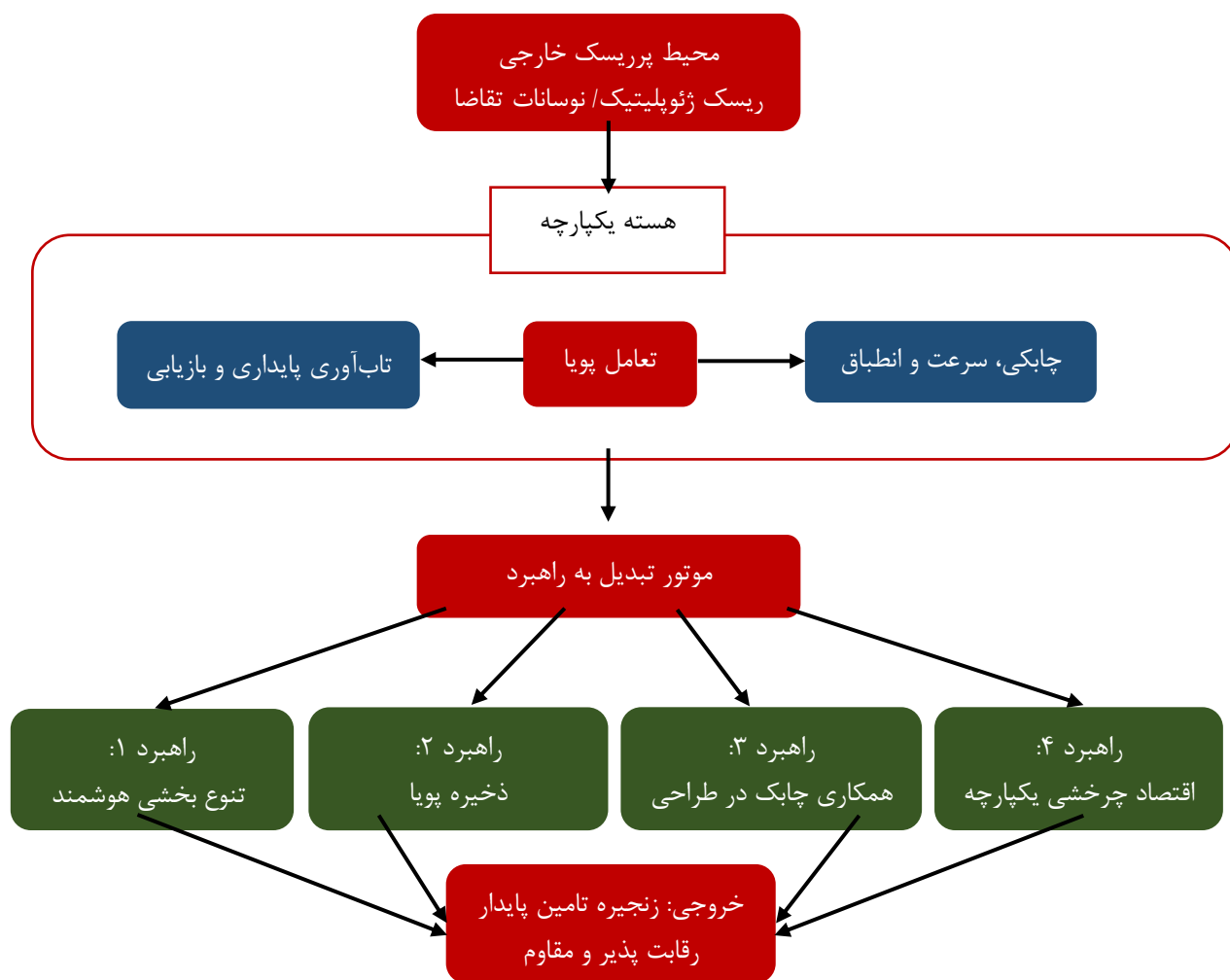
چارچوب پیشنهادی بر پایه دو قابلیت هسته‌ای و مجموعه‌ای از مؤلفه‌های عملیاتی آن‌ها استوار است [نمودار ۱]:

(۱) مؤلفه‌های تاب‌آوری: بر پیش‌بینی، جذب و بازیابی از اختلالات متمرکزند. این مؤلفه‌ها شامل حفظ ظرفیت اضافه انتقادی در حلقه‌های حیاتی زنجیره، تنوع‌بخشی واقعی به پایگاه تأمین (هم از لحاظ جغرافیایی و هم از لحاظ تعداد)، ایجاد ذخایر ایمنی برای مواد بسیار بحرانی، و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های مانیتورینگ و تشخیص زودهنگام اختلال می‌باشند.



نمودار ۱- نمودار علت و معلولی پویایی های مدیریت ریسک در زنجیره تأمین. این نمودار تعامل دو حلقه بازخوردی متضاد را نشان می دهد: حلقه بهینه سازی هزینه ها از طریق کاهش موجودی که در کوتاه مدت، اما در بلندمدت سیستم را در برابر شوک ها آسیب پذیر می سازد، و حلقه تاب آوری از طریق تنوع بخشی و ذخیره سازی که با افزایش شفافیت اطلاعات و انعطاف پذیری در تأمین، قابلیت پاسخ دهی به اختلالات ناگهانی را ارتقا می بخشد. این چارچوب مفهومی، مبنایی برای مدل سازی پویایی های سیستم و تحلیل سناریوهای مختلف در پژوهش حاضر فراهم آورده است.

۲) مؤلفه‌های چابکی: بر درک، انطباق و بهره‌برداری از تغییرات تأکید دارند. مؤلفه‌های کلیدی شامل شفافیت و دید کامل اطلاعاتی در طول زنجیره، انعطاف‌پذیری در ظرفیت تولید از طریق خطوط تولید چندمنظوره یا قرارداد با پیمانکاران، یکپارچگی و هماهنگی بالا با تأمین‌کنندگان و مشتریان کلیدی، و فرآیندهای تصمیم‌گیری غیرمتمرکز و سریع است.



نمودار ۲- چارچوب مفهومی تاب‌آوری و پایداری زنجیره تأمین در محیط‌های پُریسک. این نمودار نشان می‌دهد که چگونه چهار راهبرد کلیدی شامل تنوع‌بخشی هوشمند، ذخیره پویا، همکاری چابک در طراحی و اقتصاد چرخشی یکپارچه تحت تأثیر هسته یکپارچه و تعامل پویا قرار گرفته و در مواجهه با ریسک‌های ژئوپلیتیک و نوسانات تقاضا، به خروجی مطلوب یعنی زنجیره تأمین پایدار، رقابت‌پذیر و مقاوم منجر می‌شوند.

۴-۳- ارائه چارچوب مفهومی یکپارچه و روابط بین مؤلفه‌ها

مدل نهایی، یک چارچوب پویا و سه لایه است که در نمودار ۲ ترسیم شده است. این چارچوب صرفاً کنار هم قرار دادن مؤلفه‌ها نیست، بلکه نشان‌دهنده یک سیستم مدیریتی یکپارچه است. لایه پایه (ورودی/خطر): ریسک‌های ژئوپلیتیک و نوسانات تقاضا به عنوان محرک‌های اصلی وارد سیستم می‌شوند. لایه میانی (پردازش/قابلیت): این لایه، هسته مدل را تشکیل می‌دهد. در اینجا، تاب‌آوری و چابکی به عنوان دو قابلیت مکمل و تقویت‌کننده یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال، تنوع‌بخشی تأمین (یک مؤلفه تاب‌آوری) نه تنها ریسک اختلال را کاهش می‌دهد، بلکه با فراهم‌آوری گزینه‌های تأمین بیشتر، انعطاف‌پذیری عملیاتی (یک مؤلفه چابکی) را نیز افزایش می‌دهد. رابطه متقابل کلیدی دیگر، بین دید اطلاعاتی (چابکی) و توانایی پیش‌بینی ریسک (تاب‌آوری) است. لایه بالایی (خروجی/راهبرد): خروجی لایه میانی، تولید راهبردهای ترکیبی هوشمند است. این راهبردها، پاسخ‌هایی هستند که به صورت ذاتی هم تاب‌آورند و هم چابک. چهار راهبرد محوری این چارچوب در جدول ۳ ارائه شده‌اند. به عنوان مثال، راهبرد ذخیره پویا و هوشمند، مفهوم قدیمی ذخیره‌سازی انبوه را به یک سیستم مدیریت موجودی پویا تبدیل می‌کند که هم برای پوشش اختلالات بلندمدت (تاب‌آوری) و هم برای تنظیم موجودی در برابر نوسانات کوتاه‌مدت تقاضا (چابکی) به کار می‌رود.

جدول ۳- راهبردهای ترکیبی پیشنهادی چارچوب یکپارچه

مثال کاربردی در صنعت باتری	مؤلفه چابکی غالب	مؤلفه تاب‌آوری غالب	هدف کلان	راهبرد ترکیبی	ردیف
عقد قرارداد با معادن لیتیوم در استرالیا، شیلی و همزمان توسعه پروژه‌های بازیافت داخلی.	انعطاف‌پذیری در تخصیص سفارش	تنوع جغرافیایی و تعداد تأمین‌کنندگان	کاهش وابستگی مفرط	۱. تنوع‌بخشی هوشمند	۱
استفاده از داده‌های بلادرنگ بازار و پیش‌بینی تقاضا برای بهینه‌سازی خودکار سطح ذخیره کبات.	پاسخ سریع به نوسانات بازار با تنظیم سطح ذخیره	ایجاد ذخیره ایمنی برای مواد بحرانی	تعدیل شکاف عرضه-تقاضا	۲. ذخیره پویا و هوشمند	۲
همکاری خودروساز با تولیدکننده باتری برای طراحی سلول‌های با قابلیت استفاده از مواد کاتدی جایگزین.	زمان‌بازار سریع‌تر برای محصولات جدید	استانداردسازی قطعات و طراحی ماژولار	کاهش پیچیدگی و وابستگی فنی	۳. همکاری چابک در طراحی	۳
سرمایه‌گذاری مشترک خودروساز و بازیافت‌کننده برای استحصال لیتیوم از باتری‌های مستعمل.	ایجاد جریان درآمدی جدید و پاسخ به تقاضای سبز	ایجاد حلقه بسته برای مواد اولیه	ایمنی بلندمدت تأمین	۴. اقتصاد چرخشی یکپارچه	۴

این چارچوب نشان می‌دهد که مواجهه مؤثر با محیط پیچیده امروزی، نه با انتخاب بین تاب‌آوری یا چابکی، که با مهندسی هم‌زمان و هماهنگ این دو قابلیت حاصل می‌شود.

جدول ۴- ماتریس تخصیص راهبرد-ریسک و مکانیسم اثرگذاری یکپارچه

ردیف	راهبرد ترکیبی	ریسک ژئوپلیتیک (تحریم)	ریسک ژئوپلیتیک (بی ثباتی)	نوسانات تقاضا (سیاستی)	نوسانات تقاضا (فناوری)	مکانیسم اثرگذاری یکپارچه
۱	تنوع بخشی هوشمند					کاهش وابستگی تک منبعی (تاب آوری) + ایجاد گزینه برای جابجایی سریع تأمین (چابکی)
۲	ذخیره پویا					پوشش شکاف در زمان اختلال (تاب آوری) + تعدیل موجودی بر اساس سیگنال بازار (چابکی)
۳	همکاری چابک در طراحی					کاهش حساسیت به مواد خاص (تاب آوری) + تسریع توسعه محصول جایگزین (چابکی)
۴	اقتصاد چرخشی					ایجاد منبع تأمین داخلی/منطقه‌ای (تاب آوری) + پاسخ به تقاضای نوظهور بازار سبز (چابکی)

• = کاهش ریسک زیاد - (High Mitigation) حاشور کامل

• = کاهش ریسک متوسط - (Medium) حاشور ۵۰٪

• = کاهش ریسک کم - (Low) حاشور ۲۵٪

این چارچوب نشان می‌دهد که مواجهه مؤثر با محیط پیچیده امروزی، نه با انتخاب بین تاب‌آوری یا چابکی، که با مهندسی هم‌زمان و هماهنگ این دو قابلیت از طریق راهبردهای ترکیبی هوشمند حاصل می‌شود. راهبردهای پیشنهادی، زنجیره تأمین را قادر می‌سازند تا هم در برابر طوفان‌های غیرمنتظره مقاومت کند و هم از امواج تغییرات بازار به نفع خود بهره‌برداری نماید.

۵- استراتژی‌های اجرایی و مکانیسم‌ها

در این بخش، چارچوب مفهومی ارائه شده به مجموعه‌ای از استراتژی‌های اجرایی و ابزارهای ملموس تبدیل می‌شود تا راهنمای عمل برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان در صنعت باتری خودروهای برقی باشد. استراتژی‌ها در دو دسته کلی تاب‌آوری محور و چابکی محور، و با در نظرگیری تعامل سازنده بین آن‌ها، ارائه می‌گردند. همچنین، فناوری‌های کلیدی به عنوان بستر توانمندساز این استراتژی‌ها معرفی می‌شوند [جدول ۴].

۵-۱- استراتژی‌های تاب‌آوری محور

هدف این استراتژی‌ها، ایجاد ساختاری مستحکم و پیش‌گیرانه در برابر شوک‌های شدید و کم‌تکرار، به ویژه ریسک‌های ژئوپلیتیکی است. این راهکارها بر پایداری بلندمدت متمرکزند.

(۱) ایجاد شبکه تأمین چندقطبی و تاب‌آور: وابستگی به یک منطقه جغرافیایی یا بلوک سیاسی واحد، بزرگ‌ترین نقطه آسیب‌پذیر است. استراتژی مؤثر، توسعه یک شبکه متنوع از تأمین‌کنندگان در مناطق با ریسک سیاسی غیرهمسو است. این امر نه تنها از طریق قراردادهای خرید، بلکه با سرمایه‌گذاری مشترک در توسعه معادن یا ظرفیت‌های فرآوری در مناطق امن‌تر (مانند کانادا یا استرالیا) محقق می‌شود. مکانیسم عمل، کاهش شدید احتمال قطع کامل جریان تأمین از یک کانال است.

(۲) استقرار ذخیره استراتژیک پویا: ذخیره‌سازی صرفاً فیزیکی مواد خام، هزینه‌بر و راکد است. رویکرد نوین، ایجاد ذخیره ترکیبی است: یک ذخیره فیزیکی حداقلی از مواد فوق‌بحرانی در مکان‌های امن، به همراه ذخیره مالی از طریق قراردادهای آتی و اختیار خرید در بورس‌های کالا. این مکانیسم به شرکت امکان می‌دهد هم در صورت اختلال فیزیکی دسترسی داشته باشد و هم در برابر نوسانات افراطی قیمت مصون بماند.

(۳) سرمایه‌گذاری در بازیافت پیشرفته به عنوان یک بیمه استراتژیک: توسعه فناوری‌های هیدرومتالورژی و بازیافت مستقیم برای استحصال لیتیوم، کبالت و نیکل از باتری‌های مستعمل، نه یک فعالیت جنبی، بلکه یک منبع تأمین داخلی/منطقه‌ای مطمئن است. این استراتژی وابستگی به واردات مواد اولیه بکر را کاهش داده و یک حلقه بسته امن ایجاد می‌کند. مکانیسم آن، کاهش فشار بر منابع اولیه و ایجاد یک جریان تأمین قابل کنترل در نزدیکی مراکز تولید است.

۵-۲- استراتژی‌های چابکی محور

این استراتژی‌ها بر توانایی پاسخ سریع و کارآمد به تغییرات پویای بازار، نوآوری‌های فناورانه و نوسانات کوتاه‌مدت تقاضا متمرکزند. هدف، به حداقل رساندن زمان و هزینه انطباق است.

۱) استقرار سیستم اطلاعاتی یکپارچه و شفاف: شفافیت کامل داده‌ها در طول زنجیره، سنگ بنای چابکی است. پیاده‌سازی پلتفرم‌های ابری مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT) که داده‌های بلادرنگ از سطح موجودی انبارها، وضعیت خط تولید، موقعیت محموله‌ها و حتی پیش‌بینی تقاضای فروش را گردآوری و به اشتراک می‌گذارد، امکان تصمیم‌گیری مبتنی بر داده در زمان واقعی را فراهم می‌کند. مکانیسم عمل، حذف تأخیرهای اطلاعاتی و جایگزینی واکنش‌های تأخیری با پاسخ‌های پیش‌دستانه است.

۲) طراحی برای انعطاف‌پذیری عملیاتی: معماری زنجیره تأمین و طراحی محصول باید ذاتاً انعطاف‌پذیر باشد. این امر از طریق استانداردسازی پلتفرم‌های باتری، طراحی ماژولار سلول‌ها و ایجاد خطوط تولید چندمنظوره محقق می‌شود. برای مثال، یک خط تولید بتواند بین سلول‌های NMC و LFP با حداقل زمان تنظیم مجدد سوئیچ کند. مکانیسم این استراتژی، کاهش زمان و هزینه لازم برای تغییر محصول یا حجم تولید در پاسخ به سیگنال‌های بازار است.

۳) توسعه شبکه‌ای از شرکای استراتژیک چابک: به جای روابط سلسله‌مراتبی و صرفاً قراردادی با تأمین‌کنندگان، ایجاد اکوسیستمی از شرکای همکار شامل تأمین‌کنندگان مواد، شرکت‌های لجستیک و موسسات تحقیق و توسعه که در مدل‌های اشتراک ریسک و سود سهیم هستند، ضروری است. چنین شبکه‌ای می‌تواند به سرعت برای توسعه یک ماده جایگزین یا راه‌حل لجستیکی جدید بسیج شود. مکانیسم، استفاده از منابع و نوآوری توزیع‌شده برای حل چالش‌های غیرمنتظره است.

۵-۳- ابزارها و فناوری‌های پشتیبان

اجرای هماهنگ استراتژی‌های فوق، مستلزم وجود زیرساخت فناورانه قدرتمندی است که به عنوان ستون فقرات دیجیتال و فیزیکی مدل یکپارچه عمل می‌کند.

۱) هوش مصنوعی و تحلیل پیش‌بینی‌کننده: الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند با تحلیل داده‌های کلان تاریخی و بلادرنگ، الگوهای پنهان اختلال در زنجیره تأمین جهانی را شناسایی، تأثیر سناریوهای مختلف ژئوپلیتیکی را شبیه‌سازی و نوسانات تقاضا را با دقت بالاتری پیش‌بینی کنند. این ابزار، هم قابلیت پیش‌آگهی تاب‌آوری و هم دقت برنامه‌ریزی چابکی را ارتقا می‌دهد.

۲) بلاکچین برای شفافیت و اعتماد: فناوری دفتر کل توزیع‌شده می‌تواند تاریخچه تولید، انتقال و مالکیت هر بشکه از ماده اولیه یا هر ماژول باتری را به شکلی تغییرناپذیر ثبت کند. این امر نه تنها اصالت مواد و رعایت معیارهای ESG را تضمین می‌کند (پشتیبانی از تاب‌آوری اعتباری و قانونی)، بلکه با خودکارسازی تراکنش‌ها از طریق قراردادهای هوشمند، سرعت و امنیت مبادلات را افزایش می‌دهد (پشتیبانی از چابکی عملیاتی).

۳) رباتیک پیشرفته و اتوماسیون انعطاف‌پذیر: استفاده از ربات‌های همکار و سیستم‌های اتوماسیونی که بتوانند با حداقل برنامه‌ریزی مجدد، وظایف مختلف را انجام دهند، انعطاف‌پذیری تولید را در سطح کارخانه افزایش می‌دهد. این فناوری به خط تولید اجازه می‌دهد بدون تعطیلی طولانی‌مدت، به نیازهای جدید پاسخ دهد.

بصورت کلی، استراتژی‌های اجرایی ارائه‌شده در این بخش، در یک رابطه تکاملی با یکدیگر قرار دارند [جدول ۵]. به عنوان مثال، شبکه تأمین چندقطبی (تاب‌آوری) توسط سیستم اطلاعاتی یکپارچه (چابکی) مدیریت و بهینه می‌شود. انتخاب و

اولویت بندی این استراتژی ها باید مبتنی بر ارزیابی دقیق ریسک های خاص هر شرکت و با تکیه بر فناوری های پشتیبان به عنوان توانمندسری کلیدی باشد. تنها از طریق این نگرش یکپارچه است که زنجیره تأمین باتری می تواند در برابر طوفان های ژئوپلیتیکی مقاوم بوده و همزمان، موج سواری مناسبی در امواج پرشتاب بازار انجام دهد.

جدول ۵- نقشه راه عملیاتی استراتژی های یکپارچه: تلفیق تاب آوری و چابکی

چارچوب زمانی	فناوری/ابزار	اقدامات چابکی محور (پاسخ به تغییر)	اقدامات تاب آوری محور (کنترل ریسک)	استراتژی یکپارچه	هدف کلان	ردیف
بلندمدت (۳-۵ سال) برای سرمایه گذاری؛ کوتاه مدت (۱ سال) برای استقرار پلتفرم	• پلتفرم مدیریت ریسک تأمین (SRM) با قابلیت شبیه سازی سناریو. • سیستم هوش تجاری (BI) برای تحلیل بلادرنگ بازارهای جهانی مواد خام.	• ایجاد پلتفرم تخصیص پویا که بر اساس پارامترهای هزینه، ریسک و در دسترس بودن، سفارشات را بین تأمین کنندگان توزیع می کند. • استانداردسازی مشخصات مواد ورودی برای قابلیت تعویض سریع تأمین کننده.	• سرمایه گذاری مشترک در معادن مناطق پایدار سیاسی (مثلاً کانادا، استرالیا). • انعقاد قراردادهای بلندمدت با تأمین کنندگان در حداقل دو بلوک اقتصادی مستقل.	تأمین ترکیبی و انعطاف پذیر	کاهش وابستگی به منابع جغرافیایی متمرکز	۱
میان مدت (۱-۲ سال)	• حسگرهای IoT و سیستم مدیریت انبار خودکار (WMS). • الگوریتم های بهینه سازی موجودی با در نظر گیری	• اتصال سطح موجودی به سیستم پیش بینی تقاضای مبتنی بر هوش مصنوعی که سیگنال های بازار و تولید را تحلیل می کند.	• تعیین و نگهداری سطح پایه ذخیره ایمنی فیزیکی برای مواد فوق بحرانی در مکان های امن. • خرید اختیارات (Options) خرید	ذخیره سازی پویا و هوشمند	بهبود مدیریت موجودی در شرایط عدم قطعیت	۲

		ریسک و تقاضای احتمالی.		• استفاده از قراردادهای تأمین با حجم پایه + حجم اختیاری پلکانی.		برای مواد خام در بورس های کالا.	
بلندمدت	۵)	• نرم افزارهای شبیه سازی پیشرفته مواد و فرآیند.	• پلتفرم های همکاری دیجیتال امن.	• ایجاد کنسرسیوم های صنعتی-دانشگاهی برای اشتراک گذاری دانش و شتاب بخشیدن به چرخه نوآوری.	• استفاده از محیط های توسعه دیجیتال دوقلو (Digital Twin) برای تست سریع نمونه های اولیه.	• سرمایه گذاری در تحقیق و توسعه مواد کاتدی/آندی جایگزین با منابع فراوان تر.	• طراحی سلول باتری بر اساس معماری ماژولار و قابلیت تعویض مواد.
سال (+)	تحقیق پایه؛ کوتاه مدت (۶ ماه)	برای نمونه سازی دیجیتال				همکاری باز و چاپک در طراحی کاهش وابستگی فنی	تسریع نوآوری و کاهش وابستگی فنی
میان تا بلندمدت (۲-۷ سال)	• فناوری های جداسازی و استحصال پیشرفته (مانند بازیافت مستقیم).	• بلاکچین برای ردیابی چرخه عمر باتری و تضمین اصالت مواد بازیافتی.	• توسعه مدل های کسب و کار «باتری به عنوان سرویس» (BaaS) برای تسهیل بازیابی محصول در پایان عمر.	• ایجاد بازار ثانویه برای مواد بازیافتی با درجه خلوص تضمین شده.	• سرمایه گذاری در تأسیسات بازیافت هیدرومتالورژی پیشرفته.	• انعقاد قراردادهای درازمدت برای بازگردانی باتری های مستعمل با خودروسازان.	ادغام عمودی در اقتصاد چرخشی بلندمدت و ارزش از پسماند
۴	ایجاد امنیت تأمین بلندمدت و ارزش از پسماند						

۶- بحث و نتیجه گیری

پس از طراحی چارچوب مفهومی و استراتژی‌های اجرایی، ارزیابی اعتبار و بسط دلالت‌های نظری و عملی آن ضروری است. برای اعتبارسنجی اولیه چارچوب پیشنهادی، از روش مثلث‌سازی با استفاده از مصاحبه‌های عمیق نیمه‌ساختاریافته با هفت تن از خبرگان دانشگاهی و صنعتی بهره گرفته شد. یافته‌های این مرحله حاکی از تأیید کلی ساختار یکپارچه مدل و ضرورت نگرش همزمان به تاب‌آوری و چابکی در صنعت باتری بود. خبرگان به طور خاص بر عملیاتی بودن راهبرد ذخیره پویا و هوشمند و اقتصاد چرخشی یکپارچه به عنوان پاسخ‌هایی نوآورانه به ریسک‌های دوگانه تأکید کردند، در عین حال که اجرای استراتژی شبکه تأمین چندقطبی را مستلزم همکاری‌های فراسازمانی و پشتیبانی سیاست‌گذاری کلان دانستند. همچنین، یک مطالعه موردی اکتشافی بر روی استراتژی‌های یکی از پیشگامان جهانی صنعت باتری نشان داد که حرکت به سمت تنوع‌بخشی جغرافیایی تأمین مواد اولیه و سرمایه‌گذاری همزمان در بازیافت پیشرفته، همسو با منطق چارچوب ارائه‌شده در این مقاله است و منجر به بهبود قابلیت اطمینان زنجیره تأمین آن شرکت شده است [۲۱]. یافته‌های کلیدی این پژوهش در چند محور مورد بحث است؛ نخست، ریسک‌های ژئوپلیتیک و نوسانات تقاضا نه به صورت مجزا، که در یک تعامل پویا، زنجیره تأمین باتری را تهدید می‌کند و یکپارچگی مدیریت آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. دوم، تاب‌آوری و چابکی قابلیت‌های مکمل و تقویت‌کننده یکدیگرند؛ به عنوان مثال، سرمایه‌گذاری در تنوع‌بخشی تأمین (یک اقدام تاب‌آور) با افزایش گزینه‌های موجود، اساساً قابلیت انعطاف و پاسخگویی (چابکی) زنجیره را نیز ارتقا می‌دهد. سوم، خروجی مؤثر این تعامل، خلق راهبردهای ترکیبی هوشمندی مانند «تأمین ترکیبی و انعطاف‌پذیر یا همکاری چابک در طراحی است که ماهیتاً دوجبهی بوده و همزمان به هر دو نوع عدم قطعیت پاسخ می‌گویند. در مقایسه با پژوهش‌های پیشین که عمدتاً بر یک بعد از ریسک مانند ریسک‌های عملیاتی یا ریسک‌های تقاضا یا یک قابلیت (تاب‌آوری یا چابکی) متمرکز بودند. نوآوری این مقاله در ارائه یک مدل یکپارچه سیستمی است که گسست موجود بین ادبیات این دو حوزه را پر می‌کند. در حالی که مطالعاتی مانند کار ایوانوف (۲۰۲۲) بر روی مدل‌های تاب‌آوری پویا تمرکز داشته [۶] یا پژوهش‌هایی مانند سوافورد و همکاران (۲۰۰۶) مؤلفه‌های چابکی را برمی‌شمرند [۱۴]، این تحقیق با نشان دادن ارتباط ارگانیک و چگونگی هم‌افزایی این دو قابلیت در یک زمینه صنعتی خاص و پریسک، گامی فراتر می‌نهد. همچنین، رویکرد این مقاله از کارهای صرفاً توصیفی در زمینه ریسک ژئوپلیتیک فراتر رفته و با ارائه یک نقشه راه عملیاتی، پلی بین تشخیص مسئله و اجرای راه‌حل ایجاد می‌کند.

در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، این مطالعه رویکردی فراتر از رویکردهای ایستا یا تک‌بعدی اتخاذ کرده است. تحقیقات اولیه در حوزه مدیریت ریسک زنجیره تأمین باتری، مانند مطالعه هافمن و همکاران (۲۰۱۸) عمدتاً بر شناسایی و طبقه‌بندی ریسک‌ها متمرکز بودند و اگرچه نقش ریسک‌های ژئوپلیتیک را برجسته می‌ساختند، اما راهکارهای ارائه‌شده عموماً در قالب توصیه‌های کلی و فاقد مکانیزم اجرایی یکپارچه باقی می‌ماندند [۲۲]. در مقابل، چارچوب پیشنهادی حاضر، با تبدیل ریسک‌های شناسایی‌شده به محرک ورودی یک سیستم پویا، گامی به سوی مدل‌سازی عملیاتی این ریسک‌ها برداشته است. از سوی دیگر، ادبیات غنی‌ای که به صورت موازی به توسعه چابکی در زنجیره تأمین پرداخته است، مانند پژوهش گیلگور و همکاران (۲۰۱۶)، اغلب بر عوامل داخلی و عملیاتی مانند یکپارچگی اطلاعات و انعطاف‌پذیری تولید تأکید داشته و کمتر تأثیر محدودیت‌های کلان ژئوپلیتیکی را بر توانایی یک زنجیره برای چابک بودن مد نظر قرار داده است [۱۳]. می‌توان گفت نوآوری این مقاله در تلفیق این دو جریان

فکری است؛ به طوری که نشان می‌دهد چابکی عملیاتی بدون در نظر گرفتن تاب‌آوری ساختاری در برابر شوک‌های خارجی، شکننده و ناپایدار است، و از طرف دیگر، تاب‌آوری صرف، بدون مکانیزم‌های چابک برای انطباق با تغییرات پیوسته بازار، می‌تواند به یک مزیت ایستا و پرهزینه تبدیل شود. بنابراین، این تحقیق نه تنها شکاف بین دو حوزه مطالعاتی را پر می‌کند، بلکه با ارائه راهبردهای ترکیبی، پاسخی هماهنگ و عملی به یک نیاز مدیریتی واقعی در یکی از پیچیده‌ترین و راهبردی‌ترین زنجیره‌های تأمین معاصر ارائه می‌دهد.

در جمع‌بندی نهایی می‌توان تأکید کرد که زنجیره تأمین باتری‌های لیتیوم-یونی در عصر حاضر، در تقاطعی پیچیده از ژئوپلیتیک، فناوری و بازار قرار دارد. بقا و رقابت‌پذیری در این محیط مستلزم خروج از پارادایم‌های سنتی مدیریت زنجیره تأمین و اتخاذ نگرشی یکپارچه، پویا و پیش‌دستانه است. بر مبنای یافته‌ها، پیشنهادات عملیاتی برای صنعت شامل ای ن موارد باشد که شرکتها باید بلافاصله اقدام به تدوین شاخص ترکیبی تاب‌آوری-چابکی برای پایش سلامت زنجیره تأمین خود کنند. سرمایه‌گذاری در پلتفرم‌های دیجیتال یکپارچه برای شفافیت داده‌ها نه یک انتخاب لوکس، که یک ضرورت راهبردی است. همچنین، تشکیل کنسرسیوم‌های صنعتی برای سرمایه‌گذاری مشترک در پروژه‌های تأمین پایدار مانند معادن مسئولیت‌پذیر یا مراکز بازیافت پیشرفته، می‌تواند ریسک و هزینه این سرمایه‌گذاری‌های کلان را بین ذینفعان پخش نماید. از سوی دیگر، پیشنهادات سیاستی برای دولت‌ها بر محور تسهیل این همکاری‌ها و ایجاد بستر امن برای سرمایه‌گذاری متمرکز است. تدوین استانداردهای اجباری ردپای کربن و چرخه عمر برای باتری‌های وارداتی یا تولید داخل، می‌تواند محرک قوی برای توسعه اقتصاد چرخشی داخلی باشد. انعقاد پیمان‌های تأمین استراتژیک دوجانبه یا چندجانبه با کشورهای دارنده منابع، امنیت تأمین بلندمدت را افزایش می‌دهد. همچنین، ایجاد صندوق تضمین ریسک سرمایه‌گذاری در بخش‌های نوظهور و پرریسک زنجیره تأمین باتری (مانند بازیافت یا استخراج دریایی) می‌تواند بخش خصوصی را به مشارکت ترغیب کند. این پژوهش همچون هر مطالعه دیگری محدودیت‌هایی دارد که مسیر پژوهش‌های آینده را روشن‌تر می‌سازد. نخست، چارچوب ارائه‌شده ماهیتی کیفی و مفهومی دارد و اعتبارسنجی کمی گسترده‌تر آن با روش‌هایی مانند تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) یا مدل‌سازی معادلات ساختاری (SEM) بر روی نمونه‌های بزرگ صنعتی پیشنهاد می‌شود. دوم، این مدل در سطح کلان زنجیره تأمین طراحی شده و تطبیق و بومی‌سازی آن برای شرکت‌های با اندازه‌های مختلف یا در مناطق جغرافیایی خاص مانند کشورهای در حال توسعه فاقد منابع معدنی نیازمند پژوهش‌های آتی است. سوم، نقش فناوری‌های نوظهور خاص مانند هوش مصنوعی ژنراتیو یا ماشین‌های خودآموز در تحول آینده مدل‌های کسب‌وکار زنجیره تأمین باتری، حوزه‌ای بکر برای کاوش است. در نهایت، بررسی پیامدهای اجتماعی و بوم‌شناختی اجرای راهبردهای پیشنهادی همچون تأثیر استخراج معادن جدید بر جوامع محلی می‌تواند بعد مسئولیت اجتماعی این چارچوب را تکمیل نماید.

References

- [۱] International Energy Agency (IEA). (2023). Global EV Outlook 2023. OECD Publishing.
- [۲] Berckmans, G., Messagie, M., Smekens, J., Omar, N., Vanhaverbeke, L., & Van Mierlo, J. (2017). Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030. *Energies*, 10(9), 1314.
- [۳] Olivetti, E. A., Ceder, G., Gaustad, G. G., & Fu, X. (2017). Lithium-ion battery supply chain considerations: analysis of potential bottlenecks in critical metals. *Joule*, 1(2), 229-243.
- [۴] Lee, J., & Bazilian, M. D. (2021). The geopolitics of battery supply chains. *One Earth*, 4(6), 792-795.
- [۵] Xu, Y., Li, J., & Tan, Q. (2020). A review of strategic choices for the promotion of electric vehicles in China. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121095.
- [۶] Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model: integrating agility, resilience and sustainability perspectives. *International Journal of Production Research*, 60(2), 1-16.
- [۷] Masoudi, M., Rasti-Barzoki, M., & Altmann, J. (2022). A review of the electric vehicle battery supply chain. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 4, 100052.
- [۸] Olivetti, E. A., Ceder, G., Gaustad, G. G., & Fu, X. (2017). Lithium-ion battery supply chain considerations: analysis of potential bottlenecks in critical metals. *Joule*, 1(2), 229-243.
- [۹] Zeng, A., Chen, W., Rasmussen, K. D., Zhu, X., Lundhaug, M., Muller, D. B., ... & Liu, G. (2022). Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages. *Nature Communications*, 13(1), 1341.
- [۱۰] Hohenstein, N. O., Feisel, E., Hartmann, E., & Giunipero, L. (2015). Research on the phenomenon of supply chain resilience: a systematic review and paths for further investigation. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 45(1/2), 90-117.
- [۱۱] Ponomarov, S. Y., & Holcomb, M. C. (2009). Understanding the concept of supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management*, 20(1), 124-143.
- [۱۲] Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model: integrating agility, resilience and sustainability perspectives. *International Journal of Production Research*, 60(2), 1-16.

[۱۳] Gligor, D. M., Holcomb, M. C., & Feizabadi, J. (2016). An exploration of the strategic antecedents of firm supply chain agility: The role of a firm's orientations. *International Journal of Production Economics*, 179, 24-34.

[۱۴] Swafford, P. M., Ghosh, S., & Murthy, N. (2006). The antecedents of supply chain agility of a firm: scale development and model testing. *Journal of Operations Management*, 24(2), 170-188.

[۱۵] Wang, Y., & Zhang, Y. (2021). How can the electric vehicle industry cope with the supply chain risks under the COVID-19 pandemic? *Environmental Science and Pollution Research*, 28(39), 55615-55627.

[۱۶] Helbig, C., Thorenz, A., & Tuma, A. (2018). How to evaluate raw material supply risks—an overview. *Resources Policy*, 58, 201-208.

[۱۷] Shi, X., Sun, Y., & Wang, J. (2021). Policy instability and the demand for electric vehicles in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 94, 102807.

[۱۸] Jabareen, Y. (2009). Building a conceptual framework: philosophy, definitions, and procedure. *International Journal of Qualitative Methods*, 8(4), 49-62.

[۱۹] Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldana, J. (2014). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (3rd ed.). Sage Publications.

[۲۰] Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101.

[۲۱] Adnan, N., Azam, S. M. F., & Normal, D. (2023). Minerals and battery supply chains: Balancing criticality, diversification, and recycling. *Sustainability*, 15(17), 12960.

[۲۲] Hofmann, H., Schleper, M. C., & Blome, C. (2018). Conflict minerals and supply chain due diligence: An exploratory study of multi-tier supply chains. *Journal of Business Ethics*, 147(1), 115-141.