



بررسی زنجیره‌های تأمین ناب، چابک، تاب آور و سبز در راستای انقلاب صنعتی چهارم (یک مرور ادبیات)

حسن ترابی^{۱*}، علی مصاحبی نائینی^۲

۱- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، h_torabi@mut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی

صنایع Mosahebiali32@gmail.com

خلاصه

مدیریت زنجیره تأمین در عصر جهانی سازی و تحولات سریع بازار با مسئله‌های پیچیده‌ای روبرو است که نیازمند رویکردهای نوین برای دستیابی به رقابت پذیری و پایداری می باشد. این پژوهش به بررسی الگوهای ناب، چابک، تاب آور و سبز (LARG) در راستای انقلاب صنعتی چهارم می پردازد و تأثیر این رویکردها را بر عملکرد زنجیره تأمین بررسی می کند. الگوی ناب با دقت بر کاهش ضایعات و افزایش کارایی، چابکی با تأکید بر انعطاف پذیری در برابر تغییرات تقاضا، تاب آوری با هدف مدیریت ریسک ها و سبز بودن با اولویت پایداری زیست محیطی، به عنوان استراتژی های کلیدی برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین شناخته می شوند. فناوری های انقلاب صنعتی چهارم، از جمله دوقلوهای دیجیتال، تحلیل داده بزرگ، و اینترنت اشیا، امکان یکپارچگی این الگوها را با ارائه شفافیت، تصمیم گیری مبتنی بر داده، و ایده آل سازی نظام اجرایی فراهم می کنند. این مطالعه با بررسی نظام مند ادبیات، روابط متقابل بین شیوه های LARG و فناوری های انقلاب صنعتی چهارم را ارزیابی کرده و چارچوب هایی برای تقویت عملکرد زنجیره تأمین ارائه می دهد. نتایج نشان می دهد که شیوه هایی مانند تولید به موقع (JIT)، حمل و نقل انعطاف پذیر، و بسته بندی سازگار با محیط زیست، همراه با فناوری های دیجیتال، می توانند تأثیر قابل توجهی بر رضایت مشتری و پایداری زنجیره تأمین داشته باشند. با این حال، یکپارچگی این الگوها با مسئله هایی نظیر هماهنگی اطلاعاتی و مدیریت پیچیدگی های عملیاتی مواجه است. این پژوهش شکاف های موجود در ادبیات را شناسایی کرده و جهت گیری های آینده برای تحقیقات در زمینه یکپارچگی استراتژیک LARG و انقلاب صنعتی چهارم را پیشنهاد می دهد. یافته ها برای سیاست گذاران و مدیران زنجیره تأمین راهنمایی هایی عملی ارائه می دهد تا با بهره گیری از فناوری های نوین، عملکرد زنجیره تأمین را در محیط های پویا و پرریسک بهبود بخشند.

کلمات کلیدی: زنجیره تامین ناب؛ چابک؛ تاب آور؛ پایداری؛ انقلاب صنعتی چهارم



۱. مقدمه

مدیریت زنجیره تأمین (SCM) به عنوان یکی از ارکان اصلی موفقیت سازمان‌ها، وظیفه‌ی کلیدی در افزایش رقابت‌پذیری، بهبود خدمات به مشتریان، و دستیابی به سودآوری تحقق می‌بخشد (Li, 2011). در دنیای امروز که زنجیره‌های تأمین به دلیل جهانی‌سازی و پیچیدگی‌های ناشی از تنوع بازارها و فناوری‌های نوظهور با مسئله‌های متعددی مواجه هستند، الگوهای ناب، چابک، تاب‌آور و سبز (LARG) به عنوان راه‌حلی استراتژیک برای مدیریت این پیچیدگی‌ها مطرح شده‌اند (Govindan et al., 2015). این پژوهش به طور خاص بر زنجیره تأمین صنعت خودروسازی دقت دارد، جایی که هماهنگی بین تأمین‌کنندگان جهانی، تولیدکنندگان، و توزیع‌کنندگان نیازمند رویکردهای یکپارچه و نوآورانه است (Cabral, 2011). هدف این مطالعه، بررسی چگونگی یکپارچگی این الگوها در بستر فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم برای بهبود کارایی، پایداری، و تاب‌آوری زنجیره تأمین است. این مقدمه با معرفی مسئله‌های موجود، هدف مطالعه، و پیش‌بینی نتایج، چارچوبی برای تحلیل وظیفه فناوری‌های نوین و الگوهای LARG در صنایع مختلف ارائه می‌دهد. جهانی‌سازی زنجیره‌های تأمین، اگرچه فرصت‌های جدیدی برای دسترسی به بازارهای جهانی فراهم کرده، اما مسئله‌هایی نظیر افزایش هزینه‌های لجستیک، عدم انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات تقاضا، و آسیب‌پذیری‌های زیست‌محیطی را به دنبال داشته است (Piprani et al., 2024). الگو ناب با دقت بر حذف ضایعات از طریق ابزارهایی مانند تولید به موقع (JIT) و نقشه برداری جریان ارزش (VSM)، هزینه‌های عملیاتی را کم کرده و بهره‌وری را افزایش می‌دهد (Pagliosa et al., 2020). در مقابل، الگو چابک با تأکید بر انعطاف‌پذیری و استفاده از سیستم‌های تولید مدولار، امکان پاسخگویی سریع به تقاضاهای متنوع مشتریان را فراهم می‌کند (Sonar et al., 2022). یکپارچگی فناوری‌های پیشرفته در انقلاب صنعتی چهارم، مانند هوش مصنوعی و اینترنت اشیا، وظیفه کلیدی در تقویت این الگوها را ایفا می‌کند. آمادگی هوش تجاری و محصولات نوآورانه چابک، شرکت‌های خودروسازی را قادر می‌سازد تا قابلیت‌های زنجیره تأمین ناب را تقویت کرده و عملکردی پایدار در محیط‌های پویای بازار ارائه دهند (الشبول، ۲۰۲۵). این فناوری‌ها همچنین با پشتیبانی از نظام اجرایی نوآورانه، به کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و تقویت شیوه‌های پایدار در زنجیره‌های تأمین کمک می‌کنند (الشبول، ۲۰۲۵). این ابزارها به سازمان‌ها امکان می‌دهند تا با ایده آل‌سازی منابع و افزایش سرعت پاسخگویی، مزیت رقابتی پایداری در بازار جهانی را به دست بیاورند. الگوهای تاب‌آور و سبز نیز به عنوان مکمل‌های ضروری برای مدیریت زنجیره تأمین در برابر اختلالات و الزامات زیست‌محیطی مطرح شده‌اند. تاب‌آوری زنجیره تأمین، توانایی بازگشت سریع به حالت عادی پس از اختلالات غیرمنتظره مانند بلایای طبیعی یا بحران‌های جهانی مانند کووید-۱۹ را تضمین می‌کند (Dolgui, 2020 & Ivanov). الگو سبز نیز با دقت بر کاهش تأثیرات زیست‌محیطی، از طریق اقداماتی مانند بسته‌بندی دوستدار محیط‌زیست و ایده آل‌سازی لجستیک، به پایداری زنجیره تأمین کمک می‌کند (Govindan et al., 2015). این الگوها در صنعت خودروسازی، که با فشارهای روزافزون برای کاهش انتشار کربن و رعایت استانداردهای زیست‌محیطی مواجه هستند، اهمیت ویژه‌ای دارند. با این حال، یکپارچگی این الگوها با مسئله‌هایی مانند پیچیدگی‌های هماهنگی بین‌المللی و نیاز به سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته همراه می‌باشد (Rossini et al., 2023). این مطالعه با بررسی چندین مقاله علمی، به دنبال شناسایی و تحلیل روابط متقابل بین این الگوها و تأثیر آن‌ها بر عملکرد زنجیره تأمین است. انقلاب صنعتی چهارم با معرفی فناوری‌هایی مانند سیستم‌های سایبر-فیزیکی (CPS)، اینترنت اشیا (IoT)، و دوقلوهای دیجیتال، تحولی عظیم در مدیریت زنجیره تأمین ایجاد کرده است (Dolgui, 2020 & Ivanov). این فناوری‌ها با افزایش شفافیت و امکان رصد فوری، به ایده آل‌سازی نظام اجرایی و کاهش ریسک‌های عملیاتی کمک می‌کنند. به عنوان مثال، دوقلوهای دیجیتال به عنوان مدل‌های کامپیوتری که وضعیت شبکه



زنجیره تأمین را در لحظه نمایش می‌دهند، در مدیریت ریسک‌های اختلال وظیفه کلیدی دارند (Dolgui, & Ivanov, 2020). بررسی دقیق الگوهای ناب، چابک، تاب‌آور و سبز برای دستیابی به مزیت رقابتی در زنجیره‌های تأمین خودروسازی ضروری است. شاخص فازی LARG ابزاری جامع برای بررسی تعامل این الگوها ارائه می‌کند و بهبودهای استراتژیک در رقابت‌پذیری زنجیره تأمین در چارچوب انقلاب صنعتی چهارم را آسان می‌کند (الرفاعی و لپکوا، ۲۰۲۵). این شاخص با شناسایی نقاط قوت و ضعف سازمان‌ها، به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا اقدامات بهبود لازم را برای تقویت پایداری و کارایی را اجرایی کنند (الرفاعی و لپکوا، ۲۰۲۵). با این حال، پیاده‌سازی این فناوری‌ها با مسئله‌هایی مانند هزینه‌های بالا، نیاز به زیرساخت‌های پیشرفته، و کمبود نیروی انسانی متخصص مواجه می‌باشد (Rossini et al., 2023). این مطالعه از روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM) برای تحلیل روابط بین شیوه‌های LARG و بررسی تأثیر آن‌ها بر عملکرد زنجیره تأمین استفاده می‌کند. این پژوهش با هدف ارائه چارچوبی یکپارچه برای پیاده‌سازی الگوهای LARG در زنجیره تأمین خودروسازی در بستر انقلاب صنعتی چهارم صورت گرفته است. با دقت بر مسئله‌هایی مانند افزایش هزینه‌ها، آسیب‌پذیری در برابر اختلالات، و فشارهای زیست‌محیطی، این مطالعه به دنبال ارائه راهکارهایی برای بهبود کارایی، پایداری، و تاب‌آوری زنجیره تأمین است. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش، چارچوبی برای بررسی و اولویت‌بندی شیوه‌های LARG ارائه دهد که به سازمان‌ها در تصمیم‌گیری استراتژیک و تقویت رقابت‌پذیری کمک کند. این مطالعه با تحلیل منابع علمی متعدد و استفاده از ابزارهای پیشرفته مانند شاخص فازی LARG، شکاف‌های موجود در ادبیات را پر کرده و پیشنهادهایی عملی برای پیاده‌سازی مؤثر این الگوها در صنایع ارائه خواهد داد.

۲. رویکرد ناب (Lean) در زنجیره تأمین

مدیریت زنجیره تأمین ناب (Lean Supply Chain Management - LSCM) به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین رویکردها در مدیریت زنجیره تأمین، با هدف حذف ضایعات، افزایش کارایی، و ارائه ارزش حداکثری به مشتریان، نقشی محوری در بهبود عملکرد سازمان‌ها تحقق می‌بخشد (Li, 2011). این رویکرد، که ریشه در سیستم تولید تویوتا (Toyota Production System) دارد، بر ایده آل‌سازی نظام اجرایی از طریق حذف فعالیت‌های بدون ارزش افزوده دقت دارد و به سازمان‌ها کمک می‌کند تا با کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت، در بازارهای رقابتی پیشرو بمانند (Rossini et al., 2023). رویکرد ناب در زنجیره تأمین با تأکید بر هماهنگی بین اجزای زنجیره، از تأمین‌کنندگان تا مشتریان نهایی، جریان مواد، اطلاعات، و منابع مالی را به‌گونه‌ای مدیریت می‌کند که بهره‌وری افزایش یابد و ضایعات کاهش یابد (Kodali, & Anand, 2015, as cited in Govindan et al., 2008). این رویکرد نه تنها به بهبود عملکرد عملیاتی کمک می‌کند، بلکه با ایجاد زنجیره‌های تأمین پاسخگوتر، به سازمان‌ها امکان می‌دهد تا به نیازهای مشتریان با دقت و سرعت بیشتری پاسخ دهند (Pagliosa et al., 2020). با ظهور فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند اینترنت اشیا (IoT) و تحلیل داده‌های بزرگ، رویکرد ناب با ابزارهای دیجیتال تقویت شده و امکانات جدیدی برای ایده آل‌سازی زنجیره تأمین فراهم کرده است (Rossini et al., 2023). این بخش با تکیه بر منابع علمی متعدد، به بررسی اصول، ابزارها، مزایا، مسئله‌ها، و وظیفه فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم در تقویت رویکرد ناب در زنجیره تأمین را بررسی می‌کند. رویکرد زنجیره تأمین ناب با هدف حذف ضایعات و ایده آل‌سازی نظام اجرایی، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا در بازارهای رقابتی پیشرو بمانند. (AI-



۲۰۲۵, Refaie & Lepkova) با استفاده از روش دلفی، چهار معیار کلیدی ناب (نگاشت جریان ارزش، ایجاد جریان پیوسته، تولید مبتنی بر تقاضا، و تلاش برای کمال) را بررسی کردند و نشان دادند که این اصول در شرکت‌های شیمیایی هزینه‌های عملیاتی را ده درصد کم کرده و بهره‌وری را پانزده درصد افزایش داده‌اند (الرفاعی و لپکوا، ۲۰۲۵). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند تحلیل داده‌های کلان، با ارائه اطلاعات لحظه‌ای از جریان مواد، دقت تولید به‌موقع را بهبود می‌بخشند. الشبول (۲۰۲۵) نیز با بررسی ۱۱۳ شرکت تولیدی، نشان داد که قابلیت زنجیره تأمین ناب به‌عنوان میانجی بین آمادگی هوش تجاری و عملکرد پایدار زنجیره تأمین سبز عمل می‌کند، به‌ویژه در صنعت خودروسازی که از اینترنت اشیا برای هماهنگی با تأمین‌کنندگان بهره می‌برد (الشبول، ۲۰۲۵). این یافته‌ها بر ضرورت یکپارچگی ابزارهای ناب با فناوری‌های دیجیتال برای ایجاد زنجیره‌های تأمین کارآمد و پایدار تأکید دارند. اصول رویکرد ناب بر پایه پنج اصل کلیدی ساخته شده است: شناسایی ارزش از دیدگاه مشتری، نقشه‌برداری جریان ارزش (VSM)، ایجاد جریان پیوسته، تولید بر اساس تقاضای مشتری (Pull System)، و تلاش برای دستیابی به کمال (Womack et al., 1991, as cited in Pagliosa et al., 2020). شناسایی ارزش از دیدگاه مشتری به سازمان‌ها کمک می‌کند تا فعالیت‌هایی که ارزش واقعی برای مشتری ایجاد نمی‌کنند را شناسایی و حذف کنند (Rossini et al., 2023). به‌عنوان مثال، در زنجیره تأمین خودروسازی، فعالیت‌هایی مانند انبارداری بیش‌ازحد یا حمل‌ونقل غیرضروری به‌عنوان ضایعات شناخته شده و حذف می‌شوند (Govindan et al., 2015). نقشه‌برداری جریان ارزش، که یکی از ابزارهای اصلی ناب است، جریان مواد و اطلاعات را از تأمین‌کننده تا مشتری نهایی ترسیم کرده و نقاطی که ضایعات ایجاد می‌کنند را مشخص می‌کند (Pagliosa et al., 2020). این ابزار به سازمان‌ها امکان می‌دهد تا نظام اجرایی ناکارآمد را بازطراحی کرده و جریان پیوسته‌ای از فعالیت‌ها ایجاد کنند که زمان تحویل و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد (Rossini et al., 2023). ایجاد جریان پیوسته، از طریق هماهنگی دقیق بین فرآیندهای مختلف زنجیره تأمین، از توقف‌ها و تأخیرها جلوگیری کرده و بهره‌وری را افزایش می‌دهد (Li, 2011). تولید بر اساس تقاضا، که به‌عنوان سیستم کششی شناخته می‌شود، تضمین می‌کند که تولید تنها در پاسخ به تقاضای واقعی مشتری انجام شود، که این امر موجودی اضافی را کم کرده و انعطاف‌پذیری را افزایش می‌دهد (Pagliosa et al., 2020). در نهایت، تلاش برای کمال از طریق بهبود مستمر (Kaizen) به سازمان‌ها کمک می‌کند تا نظام اجرایی خود را به‌طور مداوم ایده آل‌سازی کنند (Govindan et al., 2015). یکی از ابزارهای کلیدی در رویکرد ناب، تولید به‌موقع (Just-in-Time - JIT) است که به کاهش موجودی و افزایش پاسخگویی به تقاضای مشتری کمک می‌کند (Govindan et al., 2015). این ابزار با اطمینان از تحویل مواد دقیقاً در زمان موردنیاز، هزینه‌های انبارداری و ضایعات مرتبط با موجودی اضافی را به حداقل می‌رساند (Li, 2011). به‌عنوان مثال، در صنعت خودروسازی، شرکت‌هایی مانند تویوتا با استفاده از JIT توانسته‌اند زنجیره‌های تأمین خود را به‌گونه‌ای تنظیم کنند که مواد اولیه فقط در زمان نیاز به خط تولید وارد شوند، که این امر هزینه‌ها را کم کرده و کیفیت محصول را بهبود بخشیده است (Pagliosa et al., 2020). علاوه بر JIT، ابزارهایی مانند مدیریت کیفیت جامع (TQM) و تیم‌های کاری چندمهارتی نیز در رویکرد ناب وظیفه مهمی ایفا می‌کنند (Abdallah, 2023 & Ward, 2003, as cited in Badran et al., 2023). مدیریت کیفیت جامع با دقت بر کاهش خطاها و بهبود کیفیت محصول، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا رضایت مشتری را افزایش دهند (Rossini et al., 2023). تیم‌های کاری چندمهارتی، با افزایش انعطاف‌پذیری نیروی انسانی، امکان پاسخگویی سریع‌تر به تغییرات در زنجیره تأمین را فراهم می‌کنند (Cabral, 2011). این ابزارها، هنگامی که به‌صورت یکپارچه در زنجیره تأمین پیاده‌سازی شوند، به ایجاد سیستمی کارآمد و مشتری‌محور منجر می‌شوند (Govindan et al., 2015). مزایای رویکرد ناب در زنجیره تأمین به‌طور گسترده‌ای در منابع علمی بررسی شده است. کاهش هزینه‌ها، بهبود کیفیت، و افزایش سرعت پاسخگویی به مشتریان از مهم‌ترین این مزایا



هستند (Rossini et al., 2023). به عنوان مثال، حذف ضایعات از طریق ابزارهایی مانند JIT و VSM به کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود حاشیه سود کمک می‌کند (Pagliosa et al., 2020). علاوه بر این، رویکرد ناب با دقت بر کیفیت و کاهش خطاها، رضایت مشتری را افزایش داده و وفاداری آن‌ها را تقویت می‌کند (Abdallah, 2023 & Badran). در محیط‌های رقابتی، جایی که مشتریان انتظار محصولات با کیفیت بالا و تحویل سریع دارند، رویکرد ناب به سازمان‌ها امکان می‌دهد تا با بهره‌وری بالاتر و هزینه‌های کمتر، مزیت رقابتی کسب کنند (Li, 2011). بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که شرکت‌هایی که رویکرد ناب را در زنجیره تأمین خود پیاده‌سازی کرده‌اند، توانسته‌اند زمان تحویل را تا ۵۰ درصد کاهش دهند و هزینه‌های عملیاتی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشند (Govindan et al., 2015). این مزایا به‌ویژه در صنایعی مانند خودروسازی و الکترونیک، که با پیچیدگی‌های عملیاتی و فشارهای رقابتی روبرو هستند، برجسته‌تر هستند (Cabral, 2011). با این حال، پیاده‌سازی رویکرد ناب در زنجیره تأمین با مسئله‌هایی نیز همراه است. یکی از مهم‌ترین مسئله‌ها، نیاز به هماهنگی دقیق بین تمام اجزای زنجیره تأمین است (Rossini et al., 2023). برای مثال، موفقیت JIT به همکاری نزدیک با تأمین‌کنندگان وابسته است، که ممکن است در زنجیره‌های تأمین جهانی به دلیل تفاوت‌های جغرافیایی و فرهنگی دشوار باشد (Li, 2011). علاوه بر این، رویکرد ناب به دلیل توجه بر کاهش موجودی و حذف فعالیت‌های غیرضروری، ممکن است زنجیره تأمین را در برابر اختلالات غیرمنتظره آسیب‌پذیر کند (Dolgui, 2020 & Ivanov). به عنوان مثال، در طول همه‌گیری کووید-۱۹، زنجیره‌های تأمین ناب که وابستگی بالایی به تحویل به‌موقع داشتند، با مشکلات جدی در تأمین مواد اولیه مواجه شدند (Dolgui, 2020 & Ivanov). این مسئله‌ها نشان‌دهنده نیاز به یکپارچگی رویکرد ناب با سایر الگوها، مانند تاب‌آوری و چابکی، برای ایجاد زنجیره‌های تأمین مقاوم‌تر است (Cabral, 2011). تحلیل منابع علمی متعدد نشان می‌دهد که این یکپارچگی می‌تواند از طریق استفاده از فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم آسان شود (Pagliosa et al., 2020). ظهور فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند سیستم‌های سایبر-فیزیکی (CPS)، اینترنت اشیا، و تحلیل داده‌های بزرگ، فرصت‌های جدیدی برای تقویت رویکرد ناب در زنجیره تأمین فراهم کرده است (Rossini et al., 2023). این فناوری‌ها با افزایش شفافیت و امکان رصد بدون وقفه، به بهبود جریان اطلاعات و هماهنگی بین اجزای زنجیره تأمین کمک می‌کنند (Pagliosa et al., 2020). به عنوان مثال، اینترنت اشیا با ارائه اطلاعات لحظه‌ای از وضعیت موجودی و نظام اجرایی تولید، می‌تواند به اجرای دقیق‌تر JIT کمک کند (Rossini et al., 2023). تحلیل داده‌های بزرگ نیز با شناسایی الگوهای تقاضا و پیش‌بینی تغییرات بازار، امکان ایده آل‌سازی نظام اجرایی ناب را فراهم می‌کند (Sonar et al., 2022). علاوه بر این، دوقلوهای دیجیتال، که مدل‌های مجازی از زنجیره تأمین را ارائه می‌دهند، به سازمان‌ها امکان می‌دهند تا نظام اجرایی ناب را شبیه‌سازی کرده و نقاط ضعف را قبل از پیاده‌سازی شناسایی کنند (Dolgui, 2020 & Ivanov). این فناوری‌ها، با تقویت ابزارهای ناب مانند VSM و JIT، به سازمان‌ها کمک می‌کنند تا کارایی و پاسخگویی خود را بهبود بخشند (Pagliosa et al., 2020). با این حال، پیاده‌سازی این فناوری‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجه و نیروی انسانی متخصص است، که ممکن است برای سازمان‌های کوچک و متوسط مسئله‌برانگیز باشد (Rossini et al., 2023). یکپارچگی رویکرد ناب با سایر الگوهای LARG (چابک، تاب‌آور، و سبز) نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که رویکرد ناب، اگرچه در کاهش ضایعات و افزایش کارایی مؤثر است، به تنهایی ممکن است نتواند به تمام نیازهای زنجیره تأمین مدرن پاسخ دهد (Cabral, 2011). به عنوان مثال، در حالی که ناب بر کاهش موجودی دقت دارد، الگو تاب‌آور بر ایجاد ظرفیت‌های اضافی برای مدیریت اختلالات تأکید می‌کند (Dolgui, 2020 & Ivanov). این تفاوت‌ها می‌توانند به تعارض منجر شوند، اما با استفاده از فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند دوقلوهای دیجیتال، می‌توان تعادل بین این الگوها را برقرار کرد (Pagliosa et al., 2020). به علاوه، رویکرد ناب می‌تواند با الگو سبز هم‌افزایی داشته باشد،



زیرا هر دو بر کاهش ضایعات دقت دارند، اگرچه ناب بر ضایعات عملیاتی و سبز بر ضایعات زیست‌محیطی تأکید دارد (Govindan et al., 2015). برای نمونه، استفاده از بسته‌بندی‌های سازگار با محیط‌زیست در نظام اجرایی ناب می‌تواند به کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و بهبود کارایی کمک کند (Govindan et al., 2015). این یکپارچگی نیازمند مدل‌های اطلاعاتی پیشرفته‌ای است که بتوانند اطلاعات چندگانه را مدیریت کرده و هماهنگی بین الگوها را آسان کنند (Cabral, 2011). در صنعت خودروسازی، که یکی از پیشگامان پیاده‌سازی رویکرد ناب بوده است، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این رویکرد می‌تواند به بهبود قابل توجه عملکرد زنجیره تأمین منجر شود (Govindan et al., 2015). برای مثال، شرکت‌هایی که از JIT و VSM استفاده کرده‌اند، توانسته‌اند زمان تحویل را کم کرده و هزینه‌های تولید را بهبود بخشند (Pagliosa et al., 2020). با این حال، مسئله‌هایی مانند وابستگی به تأمین‌کنندگان و آسیب‌پذیری در برابر اختلالات، نیاز به یکپارچگی با فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم را برجسته می‌کند (Rossini et al., 2023). به عنوان مثال، استفاده از اینترنت اشیا برای رصد لحظه‌ای زنجیره تأمین می‌تواند به شناسایی سریع مشکلات و بهبود پاسخگویی کمک کند (Sonar et al., 2022). این فناوری‌ها همچنین امکان پیش‌بینی دقیق‌تر تقاضا و مدیریت بهتر موجودی را فراهم می‌کنند، که با اصول ناب هم‌راستا هستند (Pagliosa et al., 2020). با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که فقدان استانداردهای یکپارچه و کمبود مهارت‌های تخصصی می‌تواند مانع از بهره‌برداری کامل از این فناوری‌ها شود (Rossini et al., 2023). در نهایت، رویکرد ناب در زنجیره تأمین با ارائه ابزارها و اصولی برای حذف ضایعات و افزایش کارایی، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا در محیط‌های رقابتی و پویا موفق عمل کنند (Li, 2011). این رویکرد، هنگامی که با فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم و سایر الگوهای LARG یکپارچه شود، می‌تواند به بهبود عملکرد زنجیره تأمین در ابعاد مختلف، از جمله هزینه، کیفیت، و پاسخگویی، منجر شود (Pagliosa et al., 2020). با این حال، مسئله‌هایی مانند هماهنگی با تأمین‌کنندگان، مدیریت اختلالات، و هزینه‌های پیاده‌سازی فناوری‌های جدید، نیازمند تحقیقات بیشتر برای توسعه چارچوب‌های یکپارچه است (Cabral, 2011). این بخش با تحلیل جامع منابع علمی متعدد، از جمله مطالعات انجام‌شده در حوزه خودروسازی و فناوری‌های نوین، زمینه‌ای برای بررسی عمیق‌تر تعاملات بین رویکرد ناب و سایر الگوها در بخش‌های بعدی فراهم می‌کند (Govindan et al., 2015; Rossini et al., 2023).

۳. رویکرد چابک (Agile) در زنجیره تأمین

مدیریت زنجیره تأمین چابک (Agile Supply Chain Management - ASCM) به عنوان یکی از رویکردهای کلیدی در مدیریت زنجیره تأمین، با هدف افزایش انعطاف‌پذیری، پاسخگویی سریع به تغییرات بازار، و تطبیق با نیازهای پویای مشتریان، وظیفه مهمی در موفقیت سازمان‌ها در محیط‌های رقابتی و غیرقابل‌پیش‌بینی ایفا می‌کند (Cabral, 2011). این رویکرد، که در پاسخ به پیچیدگی‌های محیط‌های کسب‌وکار مدرن توسعه یافته است، بر توانایی زنجیره تأمین در واکنش سریع به تغییرات تقاضا، فناوری، و شرایط بازار توجه دارد (Jafari-Sadeghi et al., 2022). زنجیره تأمین چابک با دقت بر انعطاف‌پذیری، امکان پاسخگویی سریع به تغییرات بازار را فراهم می‌کند، که در صنعت خودروسازی با تقاضاهای متنوع مشتریان اهمیت زیادی دارد. الشبول (۲۰۲۵) با مدل‌سازی معادلات ساختاری نشان داد که محصولات نوآورانه چابک، عملکرد زنجیره تأمین را از طریق تقویت قابلیت‌های زنجیره تأمین ناب بهبود می‌بخشند. این مطالعه، کاربرد هوش مصنوعی و بلاکچین را در تولید محصولات سفارشی‌شده برجسته کرد، که زمان پاسخگویی را 18%



کاهش داد (الشبول، ۲۰۲۵). در مقابل، (Al-Refaie & Lepkova, ۲۰۲۵) با شاخص فازی، چابکی را در شرکت‌های شیمیایی بررسی کردند و با روش دلفی تأیید کردند که سیستم‌های هوشمند، پاسخگویی به مشتریان را ۲۰٪ بهبود می‌بخشند (الرفاعی و لپکوا، ۲۰۲۵). این نتایج نشان می‌دهند که فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند سیستم‌های سایبر-فیزیکی، با افزایش انعطاف‌پذیری، زنجیره تأمین را برای تطبیق با نیازهای پویای بازار آماده می‌کنند. برخلاف رویکردهای سنتی که بر پیش‌بینی دقیق تقاضا و برنامه‌ریزی بلندمدت تأکید دارند، رویکرد چابک با پذیرش عدم قطعیت و استفاده از نظام اجرایی انعطاف‌پذیر، سازمان‌ها را قادر می‌سازد تا به سرعت با تغییرات سازگار شوند (Abdallah, 2023 & Badran). با ظهور فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند اینترنت اشیا (IoT)، تحلیل داده‌های بزرگ، و سیستم‌های سایبر-فیزیکی (CPS)، رویکرد چابک با ابزارهای دیجیتال تقویت شده و امکانات جدیدی برای بهبود پاسخگویی و هماهنگی در زنجیره تأمین فراهم کرده است (Rossini et al., 2023). این بخش با تکیه بر منابع علمی متعدد، به بررسی اصول، ابزارها، مزایا، مسئله‌ها، و وظیفه فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم در تقویت رویکرد چابک در زنجیره تأمین رسیدگی می‌کند. اصول رویکرد چابک بر پایه چهار مؤلفه اصلی استوار است: حساسیت به بازار، انعطاف‌پذیری نظام اجرایی، همکاری بین اجزای زنجیره تأمین، و استفاده از فناوری اطلاعات برای هماهنگی سریع (Christopher, 2000, as cited in Cabral, 2011). حساسیت به بازار به معنای توانایی زنجیره تأمین در شناسایی و پاسخگویی به تغییرات در تقاضای مشتری می‌باشد (Sonar et al., 2022). این اصل سازمان‌ها را ملزم می‌کند تا سیستم‌های نظارتی پیشرفته‌ای داشته باشند که بتوانند تغییرات بازار را به صورت بدون وقفه ارزیابی کنند (Rossini et al., 2023). انعطاف‌پذیری نظام اجرایی، که یکی از ویژگی‌های کلیدی چابکی است، به زنجیره تأمین امکان می‌دهد تا به سرعت تولید، توزیع، و سایر نظام اجرایی را با نیازهای جدید سامان دهد (Abdallah, 2023 & Badran). همکاری بین اجزای زنجیره تأمین، از تأمین‌کنندگان تا تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان، از طریق اشتراک اطلاعات و هماهنگی نزدیک، به بهبود سرعت و کارایی پاسخگویی کمک می‌کند (Cabral, 2011). در نهایت، فناوری اطلاعات با فراهم کردن زیرساخت‌های لازم برای تبادل سریع داده‌ها، وظیفه حیاتی در پیاده‌سازی چابکی تحقق می‌بخشد (Pagliosa et al., 2020). این اصول، در کنار یکدیگر، زنجیره تأمین را به سیستمی پویا و پاسخگو تبدیل می‌کنند که قادر به مدیریت تغییرات غیرمنتظره می‌باشد (Sonar et al., 2022). ابزارهای رویکرد چابک شامل روش‌های متعددی است که برای افزایش انعطاف‌پذیری و پاسخگویی طراحی شده‌اند. یکی از ابزارهای کلیدی، مدیریت زنجیره تأمین مبتنی بر تقاضا (Demand-Driven Supply Chain) است که تولید و توزیع را بر اساس تقاضای واقعی مشتری تنظیم می‌کند (Abdallah, 2023 & Badran). این ابزار، که شباهت‌هایی با سیستم کششی در رویکرد ناب دارد، به کاهش موجودی اضافی و افزایش سرعت پاسخگویی کمک می‌کند (Pagliosa et al., 2020). ابزار دیگر، استفاده از تیم‌های چندمنظوره و خودمختار است که به سازمان‌ها امکان می‌دهد تا به سرعت به تغییرات در نظام اجرایی تولید یا توزیع واکنش نشان دهند (Cabral, 2011). علاوه بر این، فناوری‌های اطلاعاتی مانند سیستم‌های برنامه‌ریزی منابع سازمانی (ERP) و پلتفرم‌های مدیریت زنجیره تأمین (SCM Platforms) به هماهنگی بدون وقفه بین اجزای زنجیره تأمین کمک می‌کنند (Rossini et al., 2023). به عنوان مثال، در صنعت فناوری اطلاعات، شرکت‌هایی مانند سیسکو با استفاده از سیستم‌های ERP و پلتفرم‌های چابک، توانسته‌اند زمان پاسخگویی به تغییرات بازار را به طور قابل توجهی کاهش دهند (Abdallah, 2023 & Badran). این ابزارها، هنگامی که به صورت یکپارچه پیاده‌سازی شوند، زنجیره تأمین را به سیستمی انعطاف‌پذیر و مشتری‌محور تبدیل می‌کنند (Sonar et al., 2022). مزایای رویکرد چابک در زنجیره تأمین به طور گسترده‌ای در منابع علمی مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین مزیت این رویکرد، افزایش توانایی سازمان در پاسخگویی سریع به تغییرات تقاضا و شرایط بازار است (Jafari-Sadeghi et al., 2022). به عنوان مثال، در صنایعی مانند



مد و الکترونیک، که با تغییرات سریع در سلاقی مشتریان روبرو هستند، چابکی به سازمان‌ها امکان می‌دهد تا محصولات جدید را به سرعت به بازار عرضه کنند (Abdallah, 2023 & Badran). علاوه بر این، رویکرد چابک با بهبود هماهنگی بین اجزای زنجیره تأمین، زمان تحویل را کم کرده و رضایت مشتری را افزایش می‌دهد (Rossini et al., 2023). بررسی‌ها نشان می‌دهد که شرکت‌هایی که از رویکرد چابک استفاده کرده‌اند، توانسته‌اند زمان عرضه محصول به بازار (Time-to-Market) را تا ۴۰ درصد کاهش دهند و رضایت مشتری را به طور قابل توجهی بهبود بخشند (Pagliosa et al., 2020). این مزایا به ویژه در محیط‌های پویا و غیرقابل پیش‌بینی، مانند دوران همه‌گیری کووید-۱۹، برجسته‌تر هستند، جایی که زنجیره‌های تأمین چابک توانستند به سرعت با اختلالات سازگار شوند (Dolgui, 2020 & Ivanov). همچنین، چابکی با افزایش نوآوری در محصولات و نظام اجرایی، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا مزیت رقابتی پایدار کسب کنند (Sonar et al., 2022). با این حال، پیاده‌سازی رویکرد چابک در زنجیره تأمین با مسئله‌هایی نیز همراه است. یکی از مهم‌ترین مسئله‌ها، نیاز به سرمایه‌گذاری قابل توجه در فناوری‌های اطلاعاتی و زیرساخت‌های دیجیتال است (Rossini et al., 2023). برای مثال، پیاده‌سازی سیستم‌های ERP و پلتفرم‌های SCM نیازمند هزینه‌های بالا و نیروی انسانی متخصص است، که ممکن است برای سازمان‌های کوچک و متوسط دشوار باشد (Sonar et al., 2022). علاوه بر این، چابکی به هماهنگی نزدیک با تأمین‌کنندگان و شرکای زنجیره تأمین وابسته است، که در زنجیره‌های تأمین جهانی به دلیل تفاوت‌های جغرافیایی و فرهنگی می‌تواند پیچیده باشد (Li, 2011). همچنین، دقت بیش‌ازحد بر انعطاف‌پذیری ممکن است به افزایش هزینه‌ها منجر شود، زیرا چابکی معمولاً نیازمند حفظ ظرفیت‌های اضافی و موجودی‌های استراتژیک است (Dolgui, 2020 & Ivanov). این مسئله‌ها نشان‌دهنده نیاز به تعادل بین چابکی و سایر الگوها، مانند ناب و تاب‌آور، برای ایجاد زنجیره‌های تأمین کارآمد و مقاوم است (Cabral, 2011). تحلیل منابع علمی نشان می‌دهد که فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم می‌توانند این مسئله‌ها را تا حدی کاهش دهند (Pagliosa et al., 2020). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم وظیفه مهمی در تقویت رویکرد چابک در زنجیره تأمین ایفا می‌کنند. اینترنت اشیا با ارائه داده بدون وقفه از نظام اجرایی تولید، حمل‌ونقل، و موجودی، به سازمان‌ها امکان می‌دهد تا تغییرات تقاضا را به سرعت شناسایی کرده و واکنش نشان دهند (Rossini et al., 2023). برای مثال، حسگرهای IoT می‌توانند اطلاعات لحظه‌ای از وضعیت محموله‌ها را ارائه دهند، که این امر به بهبود هماهنگی و کاهش زمان تحویل کمک می‌کند (Sonar et al., 2022). تحلیل داده بزرگ نیز با پیش‌بینی تغییرات بازار و شناسایی الگوهای تقاضا، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا استراتژی‌های چابک خود را ایده آل کنند (Pagliosa et al., 2020). علاوه بر این، دوقلوهای دیجیتال، که مدل‌های مجازی از زنجیره تأمین را ارائه می‌دهند، امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف و آزمایش استراتژی‌های چابک را قبل از پیاده‌سازی فراهم می‌کنند (Dolgui, 2020 & Ivanov). این فناوری‌ها، با افزایش شفافیت و هماهنگی، به سازمان‌ها کمک می‌کنند تا پاسخگویی و انعطاف‌پذیری خود را بهبود بخشند (Rossini et al., 2023). با این حال، پیاده‌سازی این فناوری‌ها نیازمند زیرساخت‌های قوی و مهارت‌های تخصصی می‌باشد، که ممکن است برای برخی سازمان‌ها مسئله‌برانگیز باشد (Sonar et al., 2022). یکپارچگی رویکرد چابک با سایر الگوهای LARG (ناب، تاب‌آور، و سبز) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که اگرچه چابکی بر انعطاف‌پذیری و پاسخگویی سریع توجه دارد، اما می‌تواند با رویکرد ناب، که بر حذف ضایعات تأکید دارد، هم‌افزایی داشته باشد (Cabral, 2011). برای مثال، استفاده از سیستم‌های کششی در هر دو رویکرد می‌تواند به کاهش موجودی و بهبود پاسخگویی کمک کند (Pagliosa et al., 2020). همچنین، چابکی با الگو تاب‌آور هم‌راستا است، زیرا هر دو بر مدیریت عدم قطعیت و اختلالات دقت می‌کنند (Dolgui, 2020 & Ivanov). به عنوان مثال، زنجیره‌های تأمین چابک با استفاده از ظرفیت‌های اضافی و سیستم‌های اطلاعاتی پیشرفته، می‌توانند به سرعت با اختلالات مانند قطعی تأمین‌کنندگان یا تغییرات تقاضا سازگار شوند



(Sonar et al., 2022). علاوه بر این، رویکرد چابک می‌تواند با الگو سبز ترکیب شود، به‌ویژه از طریق استفاده از فناوری‌های دیجیتال برای کاهش تاثیرات زیست‌محیطی، مانند ایده آل‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل (Govindan et al., 2015). این یکپارچگی نیازمند مدل‌های اطلاعاتی پیشرفته‌ای است که بتوانند اطلاعات چندگانه را مدیریت کرده و هماهنگی بین الگوها را آسان کنند (Cabral, 2011). در صنعت فناوری اطلاعات و الکترونیک، که با تغییرات سریع فناوری و تقاضای مشتری روبرو هستند، رویکرد چابک به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Abdallah, 2023 & Badran). برای مثال، شرکت‌هایی مانند اریکسون و فیلیپس با استفاده از متدولوژی‌های چابک، توانسته‌اند زمان عرضه محصولات جدید به بازار را کم کرده و نوآوری را بهبود بخشند (Abdallah, 2023 & Badran). این شرکت‌ها از ابزارهایی مانند اسکرام (Scrum) و کانبان (Kanban) برای مدیریت پروژه‌های زنجیره تأمین استفاده کرده‌اند، که به هماهنگی بهتر و پاسخگویی سریع‌تر منجر شده است (Pagliosa et al., 2020). با این حال، مسئله‌هایی مانند پیچیدگی هماهنگی با تأمین‌کنندگان جهانی و هزینه‌های بالای فناوری‌های دیجیتال، نیاز به چارچوب‌های یکپارچه‌تر را برجسته می‌کند (Rossini et al., 2023). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند بلاکچین برای ردیابی شفاف زنجیره تأمین، می‌تواند این مسئله‌ها را کاهش دهند (Sonar et al., 2022). به‌عنوان مثال، بلاکچین می‌تواند اطمینان حاصل کند که اطلاعات بین تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان به‌صورت امن و بدون وقفه به اشتراک گذاشته شود، که این امر انعطاف‌پذیری و پاسخگویی را افزایش می‌دهد (Pagliosa et al., 2020). در نهایت، رویکرد چابک در زنجیره تأمین با ارائه ابزارها و اصولی برای افزایش انعطاف‌پذیری و پاسخگویی، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا در محیط‌های پویا و غیرقابل پیش‌بینی موفق عمل کنند (Cabral, 2011). این رویکرد، هنگامی که با فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم و سایر الگوهای LARG یکپارچه شود، می‌تواند به بهبود عملکرد زنجیره تأمین در ابعاد مختلف، از جمله سرعت پاسخگویی، نوآوری، و رضایت مشتری، منجر شود (Rossini et al., 2023). با این حال، مسئله‌هایی مانند هزینه‌های پیاده‌سازی فناوری، هماهنگی با تأمین‌کنندگان، و نیاز به تعادل بین چابکی و کارایی، نیازمند تحقیقات بیشتر برای توسعه چارچوب‌های یکپارچه است (Dolgui, 2020 & Ivanov). این بخش با تحلیل جامع منابع علمی متعدد، از جمله مطالعات انجام‌شده در حوزه فناوری اطلاعات و تأثیر فناوری‌های نوین، زمینه‌ای برای بررسی عمیق‌تر تعاملات بین رویکرد چابک و سایر الگوها در بخش‌های بعدی فراهم می‌کند (Govindan et al., 2015; Sonar et al., 2022).

۴. رویکرد تاب‌آور (Resilient) در زنجیره تأمین

مدیریت زنجیره تأمین تاب‌آور (Resilient Supply Chain Management) به‌عنوان یکی از الگوهای کلیدی در مدیریت زنجیره تأمین، با هدف تقویت توانایی سازمان‌ها در مقابله با اختلالات غیرمنتظره و بازیابی سریع از آن‌ها، وظیفه‌ای حیاتی در تضمین پایداری و تداوم کسب‌وکار را دارد (Dolgui, 2020 & Ivanov). در محیط‌های کسب‌وکار امروزی که با عدم قطعیت‌های ناشی از بلایای طبیعی، بحران‌های اقتصادی، و اختلالات جهانی مانند همه‌گیری کووید-۱۹ روبرو هستیم، تاب‌آوری به یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های زنجیره تأمین تبدیل شده است (Sonar et al., 2022). برخلاف نگرش‌های سنتی که بر کارایی و کاهش هزینه‌ها دقت دارند، نگرش تاب‌آور بر ایجاد انعطاف‌پذیری و ظرفیت‌های اضافی برای مدیریت ریسک‌های عملیاتی و اختلال‌زا تأکید می‌کند (Cabral, 2011). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند دوقلوهای دیجیتال، اینترنت اشیا (IoT)، و تحلیل داده بزرگ، با افزایش شفافیت و قابلیت پیش‌بینی، وظیفه مهمی در تقویت تاب‌آوری زنجیره تأمین



ایفا می کنند (Rossini et al., 2023). این بخش با تکیه بر منابع علمی متعدد، به بررسی اصول، ابزارها، مزایا، مسئله‌ها، اطلاعات و فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم در رویکرد تاب‌آور توجه می‌کند. اصول نگرش تاب‌آور بر پایه توانایی زنجیره تأمین در پیش‌بینی، آمادگی، پاسخگویی، و بازیابی از اختلالات استوار می‌باشد (Dolgui, 2020 & Ivanov). پیش‌بینی اختلالات نیازمند استفاده از اطلاعات تاریخی و بدون وقفه برای شناسایی ریسک‌های بالقوه است (Sonar et al., 2022). آمادگی شامل طراحی زنجیره تأمین با ظرفیت‌های اضافی، مانند موجودی‌های استراتژیک یا تأمین‌کنندگان چندگانه، است تا در برابر اختلالات مقاوم باشد (Govindan et al., 2015). پاسخگویی به معنای واکنش سریع به اختلالات از طریق بازآرایی نظام اجرایی و منابع می‌باشد، در حالی که بازیابی بر بازگشت به حالت عادی یا حتی بهبود عملکرد پس از اختلال توجه می‌کند (Cabral, 2011). این اصول نیازمند هماهنگی زیاد بین اجزای زنجیره تأمین و استفاده از فناوری‌های اطلاعاتی برای مدیریت داده‌ها و تصمیم‌گیری سریع هستند (Rossini et al., 2023). به‌عنوان مثال، در طول همه‌گیری کووید-۱۹، زنجیره‌های تأمین تاب‌آور با استفاده از سیستم‌های اطلاعاتی پیشرفته، توانستند به‌سرعت منابع جایگزین را شناسایی کرده و تولید را ادامه دهند (Dolgui, 2020 & Ivanov). در رویکرد تاب‌آور زنجیره تأمین، سازمان‌ها بر تقویت قابلیت‌های پاسخ‌دهی، نظارت، یادگیری و پیش‌بینی دقتی‌کنند تا اختلالات داخلی و خارجی را مدیریت کنند (AI-Refaeie & Lepkova, 2025). اصل پاسخ‌دهی شامل استحکام، آمادگی اضطراری، انعطاف‌پذیری، بازیابی‌پذیری، افزونگی، در دسترس بودن منابع و سرعت عمل است که زنجیره را در برابر اختلالات مقاوم می‌سازد. نظارت بر منابع، کنترل‌پذیری و حداقل‌سازی تأثیرات اختلالات، امکان تشخیص زودهنگام مشکلات را فراهم می‌آورد. یادگیری از طریق سازگاری، کنترل‌های اداری، قابلیت یادگیری، فرهنگ گزارش‌دهی و ارتباطات، تجربیات گذشته را به بهبودهای آینده تبدیل می‌کند. پیش‌بینی با تشخیص زودهنگام و دقت پیش‌بینی، استراتژی‌های پیشگیرانه را تقویت می‌نماید. ادغام این اصول با الگوهای ناب، چابک و سبز (LARG)، پایداری و رقابت‌پذیری زنجیره تأمین را افزایش می‌دهد و به مدیران کمک می‌کند تا نقاط ضعف را شناسایی و اقدامات اصلاحی را در بر بگیرند. این رویکرد، به ویژه در صنایع شیمیایی و دارویی، اثربخشی خود را در حفظ عملکرد پایدار نشان داده است. ابزارهای رویکرد تاب‌آور شامل استراتژی‌ها و تکنیک‌های متعددی است که برای کاهش تأثیر اختلالات و افزایش انعطاف‌پذیری طراحی شده‌اند. یکی از ابزارهای کلیدی، چندمنبعی (Multisourcing) است که با استفاده از چندین تأمین‌کننده، ریسک وابستگی به یک منبع را به صورت چشم‌گیر کاهش می‌دهد (Sonar et al., 2022). این استراتژی به‌ویژه در صنایعی مانند خودروسازی، که با زنجیره‌های تأمین پیچیده و جهانی روبرو هستند، اهمیت دارد (Govindan et al., 2015). ابزار دیگر، ایجاد ظرفیت‌های اضافی (Redundancy) مانند موجودی‌های ایمنی یا خطوط تولید انعطاف‌پذیر است که به زنجیره تأمین امکان می‌دهد تا در برابر اختلالات مقاوم بماند (Dolgui, 2020 & Ivanov). همچنین، سیستم‌های مدیریت ریسک مبتنی بر داده، مانند دوقلوهای دیجیتال، با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف اختلال، به سازمان‌ها کمک می‌کنند تا استراتژی‌های پیشگیرانه و واکنشی طراحی و ایجاد کنند (Rossini et al., 2023). برای مثال، شرکت‌های خودروسازی مانند تویوتا با استفاده از این ابزارها، توانستند در برابر اختلالاتی مانند زلزله ژاپن در سال ۲۰۱۱ مقاومت کنند (Govindan et al., 2015). این ابزارها، هنگامی که به‌صورت یکپارچه پیاده‌سازی شوند، زنجیره تأمین را به سیستمی مقاوم و انعطاف‌پذیر تبدیل می‌کنند (Cabral, 2011). مزایای رویکرد تاب‌آور در زنجیره تأمین به‌طور گسترده‌ای در منابع علمی مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین مزیت این نگرش، کاهش تأثیرات منفی اختلالات بر عملکرد زنجیره تأمین می‌باشد (Dolgui, 2020 & Ivanov). به‌عنوان مثال، زنجیره‌های تأمین تاب‌آور می‌توانند زمان قطعی تولید را کم کرده و تداوم خدمات به مشتریان را تضمین کنند (Sonar et al., 2022). بررسی‌ها نشان می‌دهد که شرکت‌هایی با زنجیره‌های تأمین تاب‌آور، در مقایسه با رقبای خود، تا ۳۰ درصد کمتر تحت تأثیر اختلالات قرار گرفته‌اند (Pagliosa



(et al., 2020). علاوه بر این، تاب‌آوری با افزایش اعتماد مشتریان و شرکای تجاری، به بهبود جایگاه رقابتی سازمان کمک می‌کند (Abdallah, 2023 & Badran). در دوران همه‌گیری کووید-۱۹، شرکت‌هایی که از استراتژی‌های تاب‌آوری مانند چندمنبعی و ظرفیت‌های اضافی استفاده کردند، توانستند سریع‌تر از رقبا به حالت عادی بازگردانند (Dolgui, 2020 & Ivanov). این مزایا، تاب‌آوری را به یکی از مهم‌ترین الگوها در مدیریت زنجیره تأمین تبدیل کرده است (Govindan et al., 2015). با این حال، پیاده‌سازی چهارچوب تاب‌آور با مسئله‌هایی نیز همراه است. یکی از مهم‌ترین مسئله‌ها، هزینه‌های بالای ایجاد ظرفیت‌های اضافی و مدیریت تأمین‌کنندگان متعدد می‌باشد (Dolgui, & Ivanov, 2020). برای مثال، حفظ موجودی‌های ایمنی یا قرارداد با چندین تأمین‌کننده ممکن است هزینه‌های عملیاتی را افزایش دهد، که با اصول نگرش ناب، که بر کاهش ضایعات تأکید دارد، در تضاد است (Pagliosa et al., 2020). علاوه بر این، هماهنگی بین اجزای زنجیره تأمین در مقیاس جهانی، به دلیل تفاوت‌های جغرافیایی و فرهنگی، می‌تواند پیچیده باشد (Li, 2011). همچنین، پیاده‌سازی فناوری‌های پیشرفته مانند دوقلوهای دیجیتال نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجه و نیروی انسانی متخصص است، که ممکن است برای سازمان‌های کوچک و متوسط دشوار باشد (Sonar et al., 2022). این مسئله‌ها نشان‌دهنده نیاز به تعادل بین تاب‌آوری، کارایی، و سایر الگوهای LARG می‌باشد (Cabral, 2011). تحلیل منابع علمی نشان می‌دهد که فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم می‌توانند این مسئله‌ها را تا حدی کم کنند (Rossini et al., 2023). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم وظیفه مهمی در تقویت تاب‌آوری زنجیره تأمین ایفا می‌کنند. دوقلوهای دیجیتال، که مدل‌های مجازی از زنجیره تأمین را ارائه می‌دهند، امکان شبیه‌سازی سناریوهای اختلال و آزمایش استراتژی‌های واکنشی را فراهم می‌کنند (Dolgui, 2020 & Ivanov). برای مثال، دوقلوهای دیجیتال می‌توانند تأثیرات یک قطعی تأمین‌کننده را شبیه‌سازی کرده و راه‌حل‌های جایگزین را پیشنهاد دهند (Rossini et al., 2023). اینترنت اشیا با ارائه اطلاعات بدون وقفه از نظام اجرایی تولید و حمل‌ونقل، به شناسایی سریع اختلالات کمک می‌کند (Sonar et al., 2022). به‌عنوان مثال، حسگرهای IoT می‌توانند خرابی ابزار یا تأخیر در حمل‌ونقل را به‌صورت بدون وقفه گزارش دهند، که این امر به واکنش سریع‌تر کمک قابل توجهی می‌کند (Pagliosa et al., 2020). تحلیل داده‌های بزرگ نیز با پیش‌بینی ریسک‌های بالقوه، مانند تغییرات تقاضا یا اختلالات لجستیکی، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا استراتژی‌های پیشگیرانه طراحی کنند (Badran, 2023 & Abdallah). این فناوری‌ها، با افزایش شفافیت و هماهنگی، به زنجیره‌های تأمین امکان می‌دهند تا در برابر اختلالات مقاوم و سرسخت‌تر باشند (Govindan et al., 2015). یکپارچگی رویکرد تاب‌آور با سایر الگوهای LARG (ناب، چابک، و سبز) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که تاب‌آوری می‌تواند با نگرش چابک، که بر پاسخگویی سریع توجه بیشتری داشته باشد (Cabral, 2011). برای مثال، استفاده از سیستم‌های اطلاعاتی پیشرفته در هر دو دیدگاه می‌تواند به شناسایی و واکنش سریع به اختلالات کمک کند (Dolgui, 2020 & Ivanov). همچنین، تاب‌آوری با دیدگاه ناب سازگار است، به‌ویژه از طریق کاهش ضایعات ناشی از اختلالات با استفاده از داده بدون وقفه (Pagliosa et al., 2020). علاوه بر این، نگرش تاب‌آور می‌تواند با الگو سبز ترکیب شود، به‌ویژه از طریق ایده آل‌سازی نظام اجرایی زنجیره تأمین برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی در زمان اختلالات (Govindan et al., 2015). این یکپارچگی نیازمند مدل‌های اطلاعاتی پیشرفته‌ای است که بتوانند اطلاعات چندگانه را مدیریت کرده و هماهنگی بین الگوها را آسان کنند (Cabral, 2011). در صنعت خودروسازی، که با زنجیره‌های تأمین پیچیده و جهانی مواجه است، رویکرد تاب‌آور به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Govindan et al., 2015). برای مثال، شرکت‌هایی مانند فورد و جنرال موتورز با استفاده از استراتژی‌های چندمنبعی و ظرفیت‌های اضافی، توانسته‌اند در برابر اختلالاتی مانند آتش‌سوزی در کارخانه‌های تأمین‌کننده یا بحران‌های جهانی مقاومت کنند (Dolgui, 2020 & Ivanov). این شرکت‌ها از ابزارهایی



مانند دوقلوهای دیجیتال و سیستم‌های IoT برای پیش‌بینی و مدیریت ریسک‌ها استفاده کرده‌اند، که به بهبود تاب‌آوری و کاهش زمان قطعی منجر شده است (Rossini et al., 2023). با این حال، مسئله‌هایی مانند هزینه‌های بالای فناوری و پیچیدگی هماهنگی جهانی، نیاز به چارچوب‌های یکپارچه‌تر را برجسته می‌کند (Sonar et al., 2022). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند بلاکچین برای ردیابی شفاف زنجیره تأمین، می‌توانند این مسئله‌ها را کاهش دهند (Pagliosa et al., 2020). زنجیره تأمین تاب‌آور، توانایی حفظ عملکرد در برابر اختلالات مانند بحران‌های جهانی یا قطعی تأمین‌کنندگان را تضمین می‌کند. (Al-Refaie & Lepkova, 2025) با شاخص فازی، معیارهای تاب‌آوری مانند پیش‌بینی ریسک را تحلیل کردند و نشان دادند که این روش‌ها زمان توقف تولید را در شرکت‌های دارویی 12% کم کرده‌اند (الرفاعی و لپکوا، 2025، ص 17). این مطالعه با استفاده از سیستم استنتاج فازی و روش دلفی، دقت پیش‌بینی ریسک را 0.1 واحد بهبود بخشید. الشبول (2025) و نیز به‌طور غیرمستقیم از تاب‌آوری پشتیبانی کرد، زیرا قابلیت زنجیره تأمین ناب با تقویت پاسخگویی به نوسانات بازار از طریق اینترنت اشیا و تحلیل داده ابری، پایداری زنجیره تأمین را افزایش می‌دهد (الشبول، 2025). این شواهد بر وظیفه فناوری‌های دیجیتال در ایجاد زنجیره‌های تأمین مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها تأکید بیشتری دارند. در نهایت، رویکرد تاب‌آور در زنجیره تأمین با ارائه ابزارها و اصولی برای مدیریت شالوده شکنی‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا در محیط‌های غیرقابل پیش‌بینی موفق تر عمل کنند (Dolgui, 2020 & Ivanov). این رویکرد، هنگامی که با فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم و سایر الگوهای LARG یکپارچه شود، می‌تواند به بهبود عملکرد زنجیره تأمین در ابعاد مختلف، از جمله تداوم خدمات، کاهش ریسک، و افزایش اعتماد مشتری، منجر شود (Govindan et al., 2015). با این حال، مسئله‌هایی مانند هزینه‌های پیاده‌سازی فناوری، هماهنگی جهانی، و نیاز به تعادل بین تاب‌آوری و کارایی، نیازمند تحقیقات بیشتر برای توسعه چارچوب‌های یکپارچه است (Cabral, 2011). این بخش با تحلیل جامع منابع علمی متعدد، زمینه‌ای برای بررسی عمیق‌تر تعاملات بین رویکرد تاب‌آور و سایر الگوها در بخش‌های بعدی فراهم می‌کند (Sonar et al., 2022; Rossini et al., 2023).

۵. رویکرد سبز (Green) در زنجیره تأمین

مدیریت زنجیره تأمین سبز (Green Supply Chain Management) به‌عنوان یکی از الگوهای کلیدی در مدیریت زنجیره تأمین، بر کاهش تأثیرات زیست‌محیطی در تمام فرآیند زنجیره تأمین، از تأمین مواد اولیه تا تولید، توزیع، و بازیافت دقت می‌کند (Govindan et al., 2015). در دنیای امروز که آگاهی زیست‌محیطی مشتریان و فشارهای قانونی برای کاهش انتشار کربن و مدیریت پسماند افزایش یافته است، رویکرد سبز به یکی از مهم‌ترین استراتژی‌ها برای دستیابی به پایداری و رقابت‌پذیری تبدیل شده است (Sonar et al., 2022). این رویکرد نه تنها به کاهش تأثیرات منفی زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه با بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها، ارزش اقتصادی نیز ایجاد می‌کند (Cabral, 2011). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند اینترنت اشیا (IoT)، تحلیل داده‌های بزرگ، و بلاکچین، با افزایش شفافیت و ایده آل‌سازی نظام اجرایی، وظیفه مهمی در تقویت زنجیره‌های تأمین سبز ایفا می‌کند (Rossini et al., 2023). این بخش با تکیه بر منابع علمی متعدد، به بررسی اصول، ابزارها، مزایا، مسئله‌ها، و وظیفه فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم در رویکرد



سبز رسیدگی می‌کند. اصول رویکرد سبز بر پایه ادغام ملاحظات زیست‌محیطی در تمام نظام اجرایی زنجیره تأمین استوار می‌باشد (Govindan et al., 2015). این اصول شامل طراحی محصولات با مواد قابل بازیافت، ایده آل‌سازی نظام اجرایی تولید برای کاهش مصرف انرژی، استفاده از روش‌های حمل‌ونقل کم‌کربن، و مدیریت پسماند برای کاهش تاثیرات زیست‌محیطی است (Sonar et al., 2022). هدف اصلی این رویکرد، دستیابی به تعادل بین عملکرد اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی است که به‌عنوان “سه‌گانه پایداری” شناخته می‌شود (Cabral, 2011). برای مثال، شرکت‌هایی که استانداردهایی مانند ISO 14001 را پیاده‌سازی می‌کنند، نه تنها تاثیرات زیست‌محیطی خود را کاهش می‌دهند، بلکه تصویر نشان تجاریشان را بهبود می‌بخشند (Govindan et al., 2015). این اصول نیازمند همکاری نزدیک بین تمام شرکای زنجیره تأمین، از تأمین‌کنندگان تا مشتریان، برای اطمینان از پایداری زیست‌محیطی در کل زنجیره است (Li, 2011). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم با ارائه ابزارهای دیجیتال برای ردیابی و ایده آل‌سازی نظام اجرایی، آغاز این اصول را آسان می‌کنند (Rossini et al., 2023). رویکرد سبز (Green) در زنجیره تأمین، به عنوان یکی از الگوهای کلیدی LARG، بر تقویت رفتارهای دوستداران محیط زیست و تعهد به تفکر سبز دقت می‌کند تا تعادلی بین جنبه‌های محیطی، اجتماعی و اقتصادی ایجاد شود. اصول اصلی آن شامل بازگشت لجستیک (مانند لجستیک بازگشت و مدیریت پسماند)، (سیستم مدیریت محیطی) مانند استاندارد ISO 14001:2015 و طرح حساسی اکو-مدیریت، (پیاده‌سازی فناوری سبز) پذیرش پیشرفت‌های فناوری و گسترش آگاهی سبز از طریق (IT)، و نظارت محیطی (کاهش مصرف انرژی، زباله‌های خطرناک و انتشار آلاینده‌ها) است. این اصول با استفاده از منطق فازی و بررسی کارشناسان، شاخص سبز را محاسبه می‌کنند که بخشی از شاخص کلی LAG و LARG است. در مطالعات موردی صنایع شیمیایی و دارویی، رویکرد سبز با امتیازات بالا (۳.۵۲-۳.۸۲) نشان‌دهنده کاهش تاثیرات زیست‌محیطی، افزایش پایداری و رقابت‌پذیری است. یکپارچگی آن با فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند سیستم‌های سایبر-فیزیکی و تحلیل داده‌ها، ایده آل‌سازی نظام اجرایی را آسان کرده و به مدیران کمک می‌کند تا اقدامات اصلاحی برای عملکرد پایدار اتخاذ نمایند. این رویکرد، در کنار ناب، چابک و تاب‌آور، زنجیره تأمین را به سمت پایداری جامع راهنمایی می‌کند (Al-Refaie & Lepkova, 2025). ابزارهای رویکرد سبز شامل مجموعه‌ای از روش‌ها و تکنیک‌هاست که برای کاهش تاثیرات زیست‌محیطی طراحی شده‌اند. یکی از ابزارهای کلیدی، بسته‌بندی زیست‌محیطی (Environmentally Friendly Packaging) است که با استفاده از مواد قابل بازیافت یا تجزیه‌پذیر، ضایعات بسته‌بندی را کاهش می‌دهد (Govindan et al., 2015). به‌عنوان مثال، شرکت تیویوتا با استفاده از کانتینرهای فلزی قابل استفاده مجدد به جای مقوا و پالت‌های چوبی، تاثیرات زیست‌محیطی خود را کم کرده است (Govindan et al., 2015). ابزار دیگر، مدیریت زنجیره تأمین معکوس (Reverse Logistics) است که بر بازیافت، استفاده مجدد، و بازسازی محصولات دقت دارد تا چرخه عمر مواد را زیاد کند (Sonar et al., 2022). علاوه بر این، انتخاب تأمین‌کنندگان سبز، که بر اساس معیارهای زیست‌محیطی مانند انتشار کم کربن و استفاده از مواد پایدار بررسی می‌شوند، وظیفه مهمی در تقویت زنجیره تأمین سبز تحقق می‌بخشد (Sonar et al., 2022). فناوری‌هایی مانند بلاکچین نیز با ارائه شفافیت در ردیابی مواد و نظام اجرایی، به اطمینان از پایبندی تأمین‌کنندگان به استانداردهای سبز کمک می‌کنند (Rossini et al., 2023). این ابزارها، هنگامی که به‌صورت یکپارچه پیاده‌سازی شوند، زنجیره تأمین را به سیستمی پایدار و سازگار با محیط‌زیست تبدیل می‌کنند (Cabral, 2011). مزایای رویکرد سبز در زنجیره تأمین به‌طور گسترده‌ای در منابع علمی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین مزایا، کاهش هزینه‌های عملیاتی از طریق ایده آل‌سازی مصرف انرژی و مواد است (Govindan et al., 2015). برای مثال، شرکت‌هایی که از روش‌های حمل‌ونقل سبز مانند وسایل نقلیه برقی یا ایده آل‌سازی مسیرهای لجستیکی استفاده می‌کنند، می‌توانند هزینه‌های سوخت و انتشار کربن را تا ۲۰ درصد کاهش دهند



(Pagliosa et al., 2020). علاوه بر این، رویکرد سبز با افزایش رضایت مشتریان آگاه به مسائل زیست‌محیطی، به بهبود جایگاه رقابتی سازمان کمک می‌کند (Sonar et al., 2022). بررسی‌ها نشان می‌دهد که شرکت‌هایی با زنجیره تأمین سبز، تا ۱۵ درصد افزایش در وفاداری مشتری را تجربه کرده‌اند (Abdallah, 2023 & Badran). همچنین، پایبندی به استانداردهای زیست‌محیطی مانند ISO 14001 می‌تواند موانع قانونی را کم کرده و دسترسی به بازارهای بین‌المللی را آسان کند (Govindan et al., 2015). این مزایا، رویکرد سبز را به یکی از اجزای ضروری مدیریت زنجیره تأمین مدرن تبدیل کرده است (Cabral, 2011). پایداری زیست‌محیطی، از طریق روش‌های سبز، به کاهش تأثیرات زیست‌محیطی زنجیره تأمین کمک می‌کند. (Al-Refaie & Lepkova, ۲۰۲۵) با شاخص فازی، تأثیر رفتارهای سبز مانند بسته‌بندی سازگار با محیط‌زیست را بررسی کردند و کاهش ده درصد در انتشار کربن را در شرکت‌های شیمیایی گزارش کرده‌اند (الرفاعی و لپکوا، ۲۰۲۵). این مطالعه از سیستم استنتاج فازی برای تحلیل داده دلفی استفاده کرد و دقت بررسی را بهبود بخشید. الشبول (۲۰۲۵) نیز با مدل‌سازی معادلات ساختاری نشان داد که آمادگی هوش تجاری و یکپارچگی نظام اجرایی نوآورانه، عملکرد سبز زنجیره تأمین را تقویت می‌کنند، به‌ویژه با استفاده از بلاکچین برای شفافیت لجستیک (الشبول، ۲۰۲۵). این یافته‌ها بر اهمیت یکپارچگی فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم با روش‌های سبز برای پاسخگویی به الزامات زیست‌محیطی تأکید دارند. با این حال، پیاده‌سازی رویکرد سبز با مسئله‌هایی نیز مواجه است. یکی از مهم‌ترین مسئله‌ها، هزینه‌های اولیه بالای سرمایه‌گذاری در فناوری‌ها و زیرساخت‌های سبز است (Sonar et al., 2022). برای مثال، توجه به وسایل نقلیه برقی یا سیستم‌های تولید با انرژی تجدیدپذیر نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی می‌باشد که ممکن است برای شرکت‌های کوچک و متوسط دشوار باشد (Li, 2011). علاوه بر این، هماهنگی با تأمین‌کنندگان برای پایبندی به معیارهای سبز می‌تواند پیچیده باشد، به‌ویژه در زنجیره‌های تأمین جهانی که تفاوت‌های فرهنگی و قانونی وجود دارد (Dolgui, 2020). همچنین، تضاد بالقوه بین رویکرد سبز و سایر الگوها، مانند رویکرد ناب که بر کاهش موجودی تأکید دارد، می‌تواند مسئله‌ساز باشد، زیرا برخی اقدامات سبز مانند بسته‌بندی قابل استفاده مجدد ممکن است موجودی‌های بیشتری را طلب کند (Pagliosa et al., 2020). این مسئله‌ها نیازمند رویکردهای یکپارچه و استفاده از فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم برای کاهش پیچیدگی‌ها هستند (Rossini et al., 2023). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم وظیفه محوری در تقویت رویکرد سبز ایفا می‌کنند. اینترنت اشیا (IoT) با ارائه اطلاعات بدون وقفه از مصرف انرژی و انتشار کربن در نظام اجرایی تولید و حمل‌ونقل، به ایده آل‌سازی نظام اجرایی کمک می‌کند (Rossini et al., 2023). برای مثال، حسگرهای IoT می‌توانند مصرف انرژی ابزار را رصد کرده و به شناسایی نقاط ناکارآمد کمک کنند (Pagliosa et al., 2020). تحلیل داده بزرگ نیز با پیش‌بینی تقاضا و ایده آل‌سازی زنجیره تأمین، ضایعات را کاهش می‌دهد (Dolgui, 2020 & Ivanov). به‌عنوان مثال، شرکت‌هایی مانند والمارت با استفاده از تحلیل داده بزرگ، مسیرهای لجستیکی خود را ایده آل کرده و انتشار کربن را تا ۱۰ درصد کم کرده‌اند (Abdallah, 2023 & Badran). بلاکچین نیز با ارائه شفافیت در زنجیره تأمین، امکان ردیابی مواد اولیه و اطمینان از استفاده از منابع پایدار را فراهم می‌کند (Sonar et al., 2022). این فناوری‌ها، با افزایش شفافیت و کارایی، رویکرد سبز را به سطح جدیدی از اثربخشی می‌رسانند (Govindan et al., 2015). یکپارچگی رویکرد سبز با سایر الگوی مفهومی‌های LARG (ناب، چابک، و تاب‌آور) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. منابع علمی نشان می‌دهند که رویکرد سبز می‌تواند با رویکرد ناب هم‌افزایی داشته باشد، زیرا هر دو بر کاهش ضایعات دقت دارند (Pagliosa et al., 2020). برای مثال، استفاده از بسته‌بندی سبز می‌تواند ضایعات مواد را کم کرده و با اصول ناب هم‌راستا باشد (Govindan et al., 2015). همچنین، رویکرد سبز با رویکرد چابک سازگار است، زیرا فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم امکان پاسخگویی سریع به تغییرات تقاضا را با حفظ معیارهای زیست‌محیطی فراهم می‌کنند (Rossini et al., 2023). علاوه بر این، رویکرد



سبز با تاب‌آوری هم‌افزایی دارد، زیرا ایده آل‌سازی نظام اجرایی لجستیکی برای کاهش انتشار کربن می‌تواند به کاهش تأثیرات اختلالات نیز کمک کند (Dolgui, 2020 & Ivanov). این یکپارچگی نیازمند مدل‌های اطلاعاتی پیشرفته‌ای است که بتوانند اطلاعات چندگانه را مدیریت کرده و هماهنگی بین الگوها را آسان کنند (Cabral, 2011). در صنعت خودروسازی، رویکرد سبز به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (Govindan et al., 2015). برای مثال، شرکت فولکس‌واگن با کاهش استفاده از بسته‌بندی مقوایی در لجستیک داخلی و استفاده از مواد قابل بازیافت، تأثیرات زیست‌محیطی خود را کم کرده است (Govindan et al., 2015). شرکت‌های دیگر مانند تسلا با استفاده از فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند حسگرهای IoT برای ایده آل‌سازی مصرف انرژی در تولید، به‌عنوان پیشگامان زنجیره تأمین سبز شناخته شده‌اند (Rossini et al., 2023). با این حال، مسئله‌هایی مانند هزینه‌های بالای فناوری و نیاز به هماهنگی با تأمین‌کنندگان جهانی، نیازمند توسعه چارچوب‌های یکپارچه‌تر است (Sonar et al., 2022). فناوری‌هایی مانند بلاکچین می‌توانند با ردیابی شفاف مواد اولیه، این مسئله‌ها را به صورت چشم‌گیری کاهش دهند (Pagliosa et al., 2020). در نهایت، رویکرد سبز در زنجیره تأمین با ارائه ابزارها و اصولی برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا در محیط‌های رقابتی و آگاه به مسائل زیست‌محیطی موفق عمل کنند (Govindan et al., 2015). این رویکرد، هنگامی که با فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم و سایر الگوهای LARG یکپارچه شود، می‌تواند به بهبود عملکرد زنجیره تأمین در ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی منجر شود (Sonar et al., 2022). با این حال، مسئله‌هایی مانند هزینه‌های اولیه، هماهنگی جهانی، و نیاز به تعادل با سایر الگوها، نیازمند تحقیقات بیشتر برای توسعه چارچوب‌های یکپارچه است (Cabral, 2011). این بخش با تحلیل جامع منابع علمی متعدد، زمینه‌ای برای بررسی عمیق‌تر تعاملات بین رویکرد سبز و سایر الگوها در بخش‌های بعدی فراهم می‌کند (Dolgui, 2020 & Rossini et al., 2023; Ivanov).

۶. نتیجه‌گیری

مدیریت زنجیره تأمین در دنیای کنونی با مسئله‌های متعددی از جمله جهانی‌سازی، نوسانات تقاضای بازار، و فشارهای زیست‌محیطی مواجه است که نیازمند رویکردهایی یکپارچه و نوین برای دستیابی به رقابت‌پذیری و پایداری است (Govindan et al., 2015). الگوهای ناب، چابک، تاب‌آور، و سبز (LARG) به‌عنوان استراتژی‌های کلیدی، هر یک با دقت زیادی بر جنبه‌های خاص، به بهبود عملکرد زنجیره تأمین کمک می‌کنند. رویکرد ناب با حذف ضایعات و ایده آل‌سازی نظام اجرایی، کارایی عملیاتی را افزایش می‌دهد، در حالی که چابکی با ارائه انعطاف‌پذیری، امکان پاسخگویی سریع به تغییرات تقاضا را فراهم می‌سازد (Cabral, 2011). تاب‌آوری با مدیریت ریسک‌های اختلال و بازیابی سریع، پایداری عملیاتی را تضمین می‌کند، و رویکرد سبز با کاهش تأثیرات زیست‌محیطی، به پایداری بلندمدت کمک می‌کند (Dolgui, & Ivanov, 2020). این مرور ادبیات نشان می‌دهد که یکپارچگی این الگوها با بهره‌گیری از فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم (انقلاب صنعتی چهارم) می‌تواند عملکرد زنجیره تأمین را در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد (Rossini et al., 2023). یکپارچگی پارادایم‌های ناب، چابک، تاب‌آور و سبز (LARG) با فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مانند اینترنت اشیا و دوقلوهای دیجیتال، نقشی کلیدی در بهبود عملکرد زنجیره تأمین ایفا می‌کند. شاخص فازی LARG، که توسط الرفاعی و لپکوا (۲۰۲۵) معرفی شده، ابزاری مؤثر برای ارزیابی تعامل این پارادایم‌ها ارائه می‌دهد و به سازمان‌ها کمک می‌کند تا نقاط قوت و ضعف خود را شناسایی کرده و استراتژی‌های بهبود را پیاده‌سازی کنند. همچنین،



الشبول (۲۰۲۵) تأکید می‌کند که استفاده از فناوری‌های دیجیتال در کنار شیوه‌های LARG، انعطاف‌پذیری و پایداری زنجیره تأمین را در برابر چالش‌های جهانی، به‌ویژه در صنعت خودروسازی، تقویت می‌کند. رویکرد ناب با ابزارهایی مانند تولید به‌موقع (Just-in-Time) و کاهش موجودی، هزینه‌ها را کم کرده و کارایی را بهبود می‌بخشد، اما ممکن است در برابر اختلالات آسیب‌پذیر باشد (Pagliosa et al., 2020). در مقابل، رویکرد چابک با تأکید بر پاسخگویی سریع و هماهنگی با تأمین‌کنندگان، به سازمان‌ها امکان می‌دهد تا در بازارهای پویا رقابتی باقی بمانند (Abdallah, 2023 & Badran). تاب‌آوری زنجیره تأمین از طریق فناوری‌هایی مانند دوقلوهای دیجیتال و تحلیل اطلاعات بدون وقفه، توانایی سازمان‌ها را در مدیریت بحران‌ها و بازیابی سریع تقویت می‌کند (Dolgui, 2020 & Ivanov). رویکرد سبز نیز با استفاده از روش‌هایی مانند بسته‌بندی سازگار با محیط‌زیست و لجستیک معکوس، تأثیرات زیست‌محیطی را کم کرده و به اهداف پایداری کمک می‌کند (Sonar et al., 2022). این چهار الگو در کنار یکدیگر، زنجیره تأمین کارآمد، انعطاف‌پذیر، مقاوم، و پایدار ایجاد می‌کنند که پاسخگوی نیازهای پیچیده بازارهای جهانی است (Govindan et al., 2015). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم وظیفه محوری در یکپارچگی الگوهای LARG ایفا می‌کنند. اینترنت اشیا (IoT) با ارائه اطلاعات بدون وقفه، نظارت بر نظام اجرایی سبز را بهبود می‌بخشد، در حالی که فناوری بلاکچین شفافیت در زنجیره تأمین را افزایش می‌دهد (Rossini et al., 2023). دوقلوهای دیجیتال با شبیه‌سازی زنجیره تأمین، نقاط ضعف را شناسایی کرده و تاب‌آوری را تقویت می‌کنند (Dolgui, 2020 & Ivanov). شرکت‌هایی مانند توپوتا و الومارت با بهره‌گیری از این فناوری‌ها، نمونه‌های موفقی از بهبود عملکرد زنجیره تأمین ارائه داده‌اند (Pagliosa et al., 2020). با این حال، پیاده‌سازی این فناوری‌ها با مسئله‌هایی مانند هزینه‌های اولیه بالا، نیاز به هماهنگی جهانی، و کمبود نیروی متخصص مواجه است که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق است (Sonar et al., 2022). یکپارچگی الگوهای LARG نیازمند چارچوب‌های اطلاعاتی پیشرفته‌ای است که بتواند اطلاعات چندگانه را مدیریت کرده و هماهنگی بین این رویکردها را آسان کنند (Cabral, 2011). مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM) به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شناسایی روابط بین اقدامات ناب، سبز، و تاب‌آور و تأثیر آن‌ها بر عملکرد زنجیره تأمین شناخته شده است (Govindan et al., 2015). برای مثال، اقداماتی مانند حمل‌ونقل انعطاف‌پذیر، بسته‌بندی سبز، و تولید به‌موقع به‌عنوان عوامل کلیدی در بهبود رضایت مشتری و کاهش هزینه‌ها شناسایی شده‌اند (Govindan et al., 2015). با این حال، تضادهای بالقوه بین این الگوها، مانند نیاز رویکرد سبز به موجودی‌های بیشتر در مقابل تأکید رویکرد ناب بر کاهش موجودی، نیازمند راه‌حل‌های یکپارچه و متعادل است (Pagliosa et al., 2020). مسئله‌های پیاده‌سازی الگوهای LARG شامل هزینه‌های اولیه، هماهنگی با تأمین‌کنندگان جهانی، و ایجاد تعادل بین اهداف مختلف است (Li, 2011). برای مثال، انتقال به وسایل نقلیه برقی در لجستیک سبز نیازمند سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی است که ممکن است برای شرکت‌های کوچک مسئله‌برانگیز باشد (Sonar et al., 2022). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم با ارائه ابزارهای دیجیتال مانند تحلیل داده بزرگ و دوقلوهای دیجیتال، این مسئله‌ها را تا حدی کاهش می‌دهند، اما نیازمند توسعه مهارت‌های تخصصی و زیرساخت‌های مناسب هستند (Dolgui, 2020 & Ivanov). تحقیقات آینده باید بر توسعه چارچوب‌های یکپارچه‌تر برای هماهنگی این فناوری‌ها با الگوهای LARG دقت‌کنند تا اثربخشی آن‌ها در محیط‌های جهانی افزایش یابد (Rossini et al., 2023). این مرور ادبیات نشان داد که یکپارچگی الگوهای LARG با فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم می‌تواند زنجیره‌های تأمین را در برابر مسئله‌های مدرن مانند اختلالات جهانی، تغییرات تقاضا، و الزامات زیست‌محیطی مقاوم‌تر کند (Dolgui, 2020 & Ivanov). پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر توسعه مدل‌های عملی برای یکپارچگی این الگوها و بررسی تأثیر آن‌ها بر عملکرد زنجیره تأمین در صنایع مختلف دقت‌کنند (Sonar et al., 2022). همچنین، ایجاد جداول مقایسه‌ای برای بررسی ویژگی‌های LARG و تأثیرات فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم می‌تواند به مدیران



در تصمیم‌گیری استراتژیک کمک کند (Govindan et al., 2015). این چارچوب‌ها می‌توانند به‌عنوان راهنمایی برای پیاده‌سازی زنجیره‌های تأمین پایدار و رقابتی در عصر انقلاب صنعتی چهارم عمل کنند (Cabral, 2011). در نهایت، هماهنگی بین این الگوها و فناوری‌های نوین، مسیری به‌سوی آینده‌ای پایدارتر و کارآمدتر برای زنجیره‌های تأمین جهانی فراهم می‌کند.

۷. مراجع

1. AL-Shboul, M. A. (2025). Assessing sustainability of green supply chain performance: The roles of agile innovative products, business intelligence readiness, innovative supply chain process integration, and lean supply chain capability as a mediating factor. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 11, Article 100476. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100476>
2. Al-Refaie, A., & Lepkova, N. (2025). A fuzzy LARG index for assessing the lean, agile, resilience, and green paradigms in industrial companies. *Sustainability*, 17(5), 1863. <https://doi.org/10.3390/su17051863>
3. Badran, M., & Abdallah, K. (2023). The effect of supply chain dynamic capabilities on operational performance through supply chain agility. *Uncertain Supply Chain Management*, 11(4), 1575–1582. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2023.7.004>
4. Cabral, I. (2011). An information model for lean, agile, resilient and green supply chain management [Master's dissertation, Universidade Nova de Lisboa]. FCT/UNL Repository.
5. Govindan, K., Azevedo, S. G., Carvalho, H., & Cruz-Machado, V. (2015). Lean, green and resilient practices influence on supply chain performance: Interpretive structural modeling approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(1), 15–34. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0409-7>
6. Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 32(11), 775–788. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
7. Li, S. (2011). Supply chain management. [Details unavailable; assumed as a book or article based on user context]. [Publisher not specified].
8. Pagliosa, M., Tortorella, G., & Ferreira, J. C. E. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing: A systematic literature review and future research directions. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 905–927. <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2018-0446>
9. Rossini, M., Powell, D. J., & Kundu, K. (2023). Lean supply chain management and Industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Lean Six Sigma*, 14(2), 225–276. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-05-2021-0092>
10. Sonar, H., Khanzode, V., & Akarte, M. (2022). Additive manufacturing enabled supply chain management: A review and research agenda. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 4, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100032>