

Designing Structure Evaluation Model at the Upstream of Automotive Supply Chains by an Adapted Spectral Clustering

Mostafa Ziyaei Hajipirlu

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Houshang Taghizadeh*

Professor, Department of Industrial Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Morteza Honarmand Azimi

Assistant Professor, Department of Industrial Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Abstract

The purpose of this study is to design supply chains' upstream structure evaluation model in the automotive industry with spectral clustering based on the theory of complex adaptive systems. In this research, a method for evaluating the intersectionalities related to the structural complexity (horizontal, vertical, and spatial) of supply chains by considering the functional characteristics of its components based on the resilience paradigm is presented. In this regard, a set of algebraic calculations and computational algorithms have been adapted to evaluate the structural design from the perspective of complex components. In the structural design evaluation model through spectral clustering, it is possible to enter information about supply chains in terms of interactions between components in the form of a network as a comprehensive model called similarity graph. According to the field findings, supply chain characteristics in terms of complexity can have interaction with component resilience performance. This means that according to the concept of entanglement, the lack of a favorable environmental structure in supply chains can also negatively affect the resilience performance of its components. Findings from the perspective of achieving a supply chain evaluation model as an integrated whole have provided a suitable practical tool for evaluation and pathology of supply chains from the perspective of risk management.

Keywords: Complex Adaptive Systems, Supply Chain Resilience, Complexity, Spectral Clustering, Automotive Industry.

* Corresponding Author: taghizadeh@iaut.ac.ir
How to Cite: Vol.19 No 61, Summer 2021



طراحی مدل ارزیابی ساختار بالادستی زنجیره‌های تأمین در صنعت خودروسازی با رویکرد تطبیقی خوشه‌بندی طیفی

مصطفی ضیائی حاجی پیرلو
 دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

هوشنگ تقی‌زاده*
 استاد گروه مدیریت صنعتی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

مرتضی هنرمند عظیمی
 استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

هدف از انجام این پژوهش، ارائه مدل ارزیابی طرح ساختاری در بالادست زنجیره‌های تأمین در صنعت خودروسازی با رویکرد تطبیقی خوشه‌بندی طیفی بر اساس نظریه سیستم‌های پیچیده تطبیق‌پذیر می‌باشد. در این پژوهش، روشی برای ارزیابی درهم‌تنیدگی‌های مربوط به پیچیدگی ساختاری (افقی، عمودی و فضایی) با لحاظ نمودن ویژگی‌های عملکردی اجزای آن بر اساس پارادایم تاب‌آوری ارائه شده است. در این راستا، پیش‌پردازش داده‌ها، مجموعه محاسبات جبری و الگوریتم‌های محاسبات برای ارزیابی طرح ساختاری از منظر مؤلفه‌های پیچیدگی با لحاظ نمودن ماهیت داده‌ها تطبیق داده شده است. در مدل ارائه شده برای ارزیابی طرح ساختاری از طریق خوشه‌بندی طیفی، امکان ورود اطلاعات مربوط به تعاملات مابین اجزای زنجیره‌های تأمین در کنار وضعیت عملکردی اجزاء در قالب یک شبکه به صورت گراف تشابه فراهم شده است. یافته‌های میدانی بر اساس پیاده‌سازی مدل نشان داد که ویژگی‌های زنجیره‌های تأمین از منظر مؤلفه‌های پیچیدگی می‌تواند برهم‌کنشی متقابل بر عملکرد تاب‌آوری اجزای آن داشته باشد. این امر بدان معنی است که مطابق با مفهوم درهم‌تنیدگی، عدم وجود محیطی مساعد در زنجیره‌های تأمین، می‌تواند بر عملکرد تاب‌آوری اجزای آن نیز اثر منفی گذارد. یافته‌های پژوهش از منظر دستیابی به مدل ارزیابی زنجیره‌های تأمین به‌عنوان کلیتی یکپارچه، ابزار کاربردی مناسبی برای بررسی و آسیب‌شناسی آن از منظر مدیریت ریسک در اختیار تصمیم‌گیران در این زمینه قرار داده است.

کلیدواژه‌ها: سیستم‌های پیچیده تطبیق‌پذیر، تاب‌آوری زنجیره تأمین، پیچیدگی، خوشه‌بندی طیفی، صنعت خودروسازی.

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مدیریت صنعتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز است.

* نویسنده مسئول: هوشنگ تقی‌زاده taghizadeh@iaut.ac.ir

مقدمه

فضای نا امن و پرتلاطم در محیط‌های کسب و کارهای کنونی، زنجیره‌های تأمین را ناگزیر می‌کند که بخش قابل توجهی از منابع خود را در راستای ارتقای قابلیت‌ها در مدیریت ریسک و مخاطرات هزینه کنند. این امر به گونه‌ای است که سازمان‌های پیشرو و اثرگذار در داخل زنجیره‌های تأمین، سرمایه‌گذاری‌های بسیار هنگفتی در زمینه پژوهش در خصوص طرح و تعاملات مابین اجزاء با هدف ارتقای دانش از مخاطرات مرتبط با ساختار و قابلیت‌های پیشگیری از آن‌ها انجام می‌دهند (ملت‌پرست^۱، ۲۰۲۰؛ پتیت، کروکستون و فیکسل^۲، ۲۰۱۹). به دلیل وجود پیچیدگی‌های ذاتی در زنجیره‌های تأمین، تلاش در راستای درک ماهیت اختلال و ماهیت متفاوت آن بر زنجیره‌های تأمین اهمیت بالایی داشته و بر همین اساس، زمینه پژوهشی نسبتاً جدیدی را برای محققین ایجاد کرده است. در این راستا، نظریه سیستم‌های پیچیده تطبیق‌پذیر^۳ (CAS)، به واسطه ترکیب نظریه‌های پیچیدگی، تئوری کنترل و تئوری سیستم‌ها برای بررسی و ارزیابی طرح و ساختار زنجیره‌های تأمین ارائه شده است. برخی از پژوهشگران عقیده دارند که با استفاده از CAS می‌توان به چارچوب تحلیلی مناسب در تبیین روابط بین اجزای مختلف در قالب محتوا و کلیت زنجیره‌های تأمین به صورت ساختارهای شبکه‌ای در قالب یک کلیت یکپارچه همگام با بررسی وضعیت اجزا دست یافت (پورنادر و همکاران^۴، ۲۰۱۶). نظریه CAS چهارچوب مناسبی برای ارزیابی طرح ساختاری سیستم‌های پیچیده مانند زنجیره‌های تأمین از منظر اختلال و تاب‌آوری را فراهم آورده است (کیم، چن و لیندرمان^۵، ۲۰۱۵؛ ریس لوال و نوف^۶، ۲۰۱۷). علاوه بر آن، با استفاده از مبانی CAS می‌توان تأثیر وسعت و گستردگی شبکه، تفاوت در عملکرد و توانایی اجزاء و نحوه تعامل هر کدام با همدیگر را در چهارچوب زنجیره از منظر آسیب‌شناسی طرح و ساختار به صورت یکجا مورد تحلیل و ارزیابی قرار داد (سینگ و همکاران^۷، ۲۰۱۹).

با لحاظ نمودن پیشرفت‌های اخیر مرتبط با تحلیل کلان‌داده و تنوع ایجاد شده در روش‌های دسته‌بندی و پالایش کیفی و کمی داده‌های گردآوری شده به کمک رایانه،

- 1 . Pettit, Croxton, & Fiksel
- 2 . Mellat Parast
- 3 . Complex Adaptive Systems Theory (CAS)
- 4 . Pournader et al.,
- 5 . Kim, Chen, & Linderman,
- 6 . Reyes Levalle & Nof
- 7 . Singh et al.,

اهمیت استفاده از روش‌های خوشه‌بندی طیفی در استخراج و تشخیص خصوصیات مشترک و ملموس در چهارچوب نظریه گراف، بیش از پیش آشکار شده است. با توجه به امکان استخراج کاربردهای فراوان در تحلیل و ارزیابی مسائل دنیای واقعی از طریق به‌کارگیری خوشه‌بندی طیفی، هنوز توانایی بالقوه آن برای پژوهشگران در حوزه‌های مختلف بخصوص در زمینه مطالعات مدیریت زنجیره تأمین به طور کامل معلوم نمی‌باشد؛ با این‌همه، اخیراً مطالعاتی در سایر زمینه‌های علمی با استفاده از روش‌های مختلف خوشه‌بندی طیفی انجام شده است (زو و همکاران^۱، ۲۰۲۰). به‌کارگیری خوشه‌بندی طیفی در تحلیل و مدل‌سازی لایه‌های مختلف داده‌های مرتبط با طرح، کلیت و ساختار در کنار داده‌های مرتبط با اجزای زنجیره‌های تأمین می‌تواند دریچه جدیدی در شناخت پیچیدگی‌های مربوط به مسائل مرتبط با آن، همراه با لحاظ نمودن ارزیابی ساختار در کنار ارزیابی اجزاء در قالب یک کلیت یکپارچه بگشاید. بر این اساس، هدف از انجام تحقیق حاضر، ارائه مدلی بر پایه داده‌کاوی با رویکرد خوشه‌بندی طیفی است که بتوان از طریق آن، داده‌های چندلایه و تعاملی مربوط به وضعیت اجزاء در بالادست زنجیره‌های تأمین در صنعت خودروسازی را از منظر بررسی و تحلیل ساختار زنجیره با استفاده از مبانی CAS و اثر آن بر عملکرد تاب‌آوری اجزاء و برعکس را تحلیل نمود. سؤال پژوهش هم می‌تواند بدین گونه مطرح شود: پیچیدگی‌های طرح ساختاری در بالادست زنجیره‌های تأمین (افقی عمودی و فضایی) و برهم‌کنش آن با عملکرد تاب‌آوری اجزای متعامل در زنجیره را چگونه می‌توان با استفاده از خوشه‌بندی طیفی مدل‌سازی و تحلیل نمود؟

پیشینه پژوهش

تاکنون پژوهش‌هایی در راستای ارزیابی طرح ساختاری زنجیره‌های تأمین با استفاده مدل‌سازی با تئوری گراف برای ارزیابی زنجیره‌های تأمین انجام شده است. یکی از ابزارهای اصلی در تصویرسازی و تبیین CAS، تئوری گراف و مفاهیم مرتبط با آن است که برای بررسی شبکه‌های پیچیده مورد استفاده واقع می‌شود. مطابق با پژوهش کیم و همکاران (۲۰۱۵)، بر مبنای تئوری گراف، ساختار شبکه‌ای در زنجیره‌های تأمین از مجموعه گره‌ها (امکانات) و یال‌های اتصال (حمل‌ونقل) تشکیل شده است. از این منظر، رویدادهای کوچکی که گره یا یال‌ها را در شبکه مختل می‌کنند، می‌تواند پیامدهای

1 . Xu et al.,

ناخوشایندی برای زنجیره‌های تأمین به همراه داشته باشد. هر گونه اختلال در عملکرد گره‌ها یا زنجیره‌ی اتصالات مابین آن‌ها می‌تواند به طور بالقوه جریان‌های مواد را در زنجیره تأمین متوقف کند.

وانگر و نشاط^۱ (۲۰۱۰) با استفاده از مدل‌سازی زنجیره تأمین بر اساس تئوری گراف، چهارچوبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری زنجیره بر مبنای تحلیل ماتریس همسایگی^۲ ارائه داده است. کیم و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از مفاهیم پایه‌ای CAS به بررسی چگونگی تأثیر ساختار در زنجیره‌های تأمین بر وقوع اختلال پرداخته‌اند. یافته‌های آن‌ها در قالب مفاهیم اولیه، چهارچوبی کلی برای استفاده از تئوری گراف را در بررسی ساختاری زنجیره‌های تأمین فراهم نموده است. تورکمانووا^۳ (۲۰۱۵) نیز، بر اهمیت استفاده از CAS در تبیین و تفسیر داده‌های تاب‌آوری زنجیره‌های تأمین بر مبنای ساختار زنجیره و شرایط محیطی اشاره داشته است. همچنین، سولوکوف و همکاران^۴ (۲۰۱۶) از طریق اصول و مبانی تئوری گراف، به تبیین اثرات موجی^۵ اختلال و تغییرات در عملکرد زنجیره تأمین پرداخته‌اند. از دیدگاه محققین مزبور، ساختار زنجیره‌های تأمین از منظر وقوع اثر موجی ناشی از اختلال، وابسته به دو مؤلفه سطح خدمات و هزینه تمام‌شده می‌باشد. یافته‌ها نشان داد که پس از وقوع اثرات موجی ناشی از اختلال، سطح خدمات و هزینه‌های تمام‌شده برای محصولات در سطوح مختلف زنجیره تأمین دچار تغییر و نوسان می‌شوند.

علیرغم امکان بررسی اجزاء و کلیت زنجیره‌های تأمین از طریق CAS مطابق با تحقیقات اشاره شده در پاراگراف قبلی، فراهم آمدن امکان بررسی دقیق‌تر خصوصیات اجزاء در تعامل با ساختار، نیازمند دستیابی به درکی مناسب از طرح زنجیره‌های تأمین با بهره‌گیری دقیق‌تر از مفاهیم و تعاریف و انجام نوعی تطبیق و قیاس مفاهیم با سایر سیستم‌های اجتماعی دارای پیچیدگی نسبتاً کمتر می‌باشد. بوده و وانگر^۶ (۲۰۱۵) با بهره‌گیری از این استدلال و از طریق ایجاد تشابه و تطابق با ویژگی‌های ساختاری سازمان با زنجیره‌های تأمین، سه مفهوم پیچیدگی افقی^۷، پیچیدگی عمودی^۸ و پیچیدگی فضایی^۹ را برای بررسی

- 1 . Wagner & Neshat
- 2 . Adjacency Matrix
- 3 . Tukamuhabwa
- 4 . Sokolov et al.
- 5 . Ripple Effect
- 6 . Bode & Wagner
- 7 . Horizontal Supply Chain Complexity
- 8 . Vertical Supply Chain Complexity
- 9 . Spatial Supply Chain Complexity

و ارزیابی زنجیره‌ها را در راستای تلاش برای پیش‌بینی اختلال از منظر طرح ساختاری و از طریق تطبیق مفاهیم مربوط به طرح و ساختار سازمانی در نظریه‌های مدیریت ارائه نموده است.

در نظریه سازمان و مدیریت، پیچیدگی افقی به تنوع مهارت‌ها و دانش پراکنده شده در بخش‌های مختلف تخصصی در یک سازمان گفته می‌شود. از منظر مفاهیم مدیریت در زنجیره تأمین نیز، پیچیدگی افقی در بالادستی زنجیره تأمین بر تأمین‌کننده‌های لایه اول نسبت به کارخانه کانونی اشاره دارد. بدیهی است که تأمین‌کننده‌هایی که تبادل بیشتری با سازمان دارند، در فرآیند تولید محصول نقش بیشتری ایفا می‌کنند و موفقیت سازمان در عرضه محصول به مهارت و دانش آن‌ها وابستگی بیشتری دارد (سولوکوف و همکاران، ۲۰۱۶).

پیچیدگی عمودی یا سلسله‌مراتبی، به موقعیت شرکت در داخل زنجیره تأمین، با در نظر گرفتن لایه‌های زنجیره اشاره دارد. اساس این مفهوم نیز از نظریه سازمان و مدیریت اخذ شده و با مفهوم سلسله‌مراتب در سازمان قابل معادل‌سازی می‌باشد. پیچیدگی سلسله‌مراتبی در زنجیره‌تأمین مرتبط با پتانسیل واکنش‌های زنجیره‌ای (به عنوان مثال، اثر موجی^۱ اختلال‌های ناشی از سطوح بالادست زنجیره تأمین) اشاره دارد. عدم توانایی در تأمین به موقع قطعات یا تولید قطعات دارای نقص فنی، دو مورد از اختلال‌های رایج در زنجیره تأمین مختلف بوده است. در سال ۲۰۰۵، کارخانه کانونی تولید خودروهای آ.یو.دی، بی.ام.و و دایملر اختلال‌هایی به دلیل وجود پیچیدگی عمودی در زنجیره‌های تأمین خود تجربه کردند؛ علت وجودی این اختلال‌ها در خطای طراحی و تولید پوشش تفلونی پمپ‌های تزریق سوخت توسط یکی از تأمین‌کننده‌های مشترک در بالادست بوده است که خروجی نهایی زنجیره‌های تأمین مربوط به تولید خودروهای مزبور را تحت تأثیر قرار داد. عدم آگاهی از سطح حساسیت قطعه از سوی تأمین‌کننده و استفاده از مواد ارزان قیمت تر در تولید پوشش پمپ در محدوده زمانی مشخص دلیل ظاهری این امر بوده است. وجود نقص در محصول نهایی پس از تکمیل توسط کارخانه‌های کانونی و توزیع آن در پایین‌رده شناسایی شد و خسارت بالایی به تولیدکننده‌ها و کل زنجیره‌های تأمین مرتبط با تأمین‌کننده مزبور وارد نمود (بوده و وانگر^۲، ۲۰۱۵). برای پیشگیری از وقوع چنین

1 . Ripple Effect
2 . Bode & Wagner

خساراتی، روش‌های ارتقای سطح شفافیت در زنجیره تأمین از منظر ردیابی جریان مواد مورد نیاز در تولید محصول، یکی از مهم‌ترین مباحثی است که در چهارچوب ارتقای سطح تاب‌آوری از منظر مفهوم پیچیدگی عمودی در زنجیره تأمین مورد توجه محققین بوده است.

پیچیدگی فضایی به پراکندگی جغرافیایی تأمین‌کننده‌هایی که با شرکت در ارتباط هستند، اشاره دارد. یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی پیچیدگی فضایی، توزیع حجم تبادل یا خرید مواد از تأمین‌کننده‌های مستقر در لایه اول شرکت بر اساس فاصله از شرکت است. اگر میزان تبادل با تأمین‌کننده‌ها در فواصل نزدیکتر به شرکت نسبت به تأمین‌کننده‌های دورتر بیشتر باشد، پیچیدگی فضایی کمتر است. وجود تبادل بیشتر با تأمین‌کننده‌های دورتر نسبت به تأمین‌کننده‌ها در فواصل نزدیک، احتمال وقوع اختلال را بالا می‌برد. وجود سطح بالای پیچیدگی فضایی در بالادست زنجیره‌های تأمین، معمولاً به تأمین منابع و مواد مورد نیاز در زنجیره از منابع متنوع و در سطح جغرافیایی وسیع اشاره دارد. یافته‌های برخی از تحقیقات میدانی نشان داده‌اند که بالا بودن میزان پیچیدگی فضایی در سطوح مختلف، خطر ایجاد اختلال در زنجیره تأمین را افزایش می‌دهد (بوده و وانگر، ۲۰۱۵؛ پودل، ماروفوزمن و بیان^۱، ۲۰۱۶). بدین گونه که بالا بودن وسعت زنجیره تأمین از منظر پراکندگی جغرافیایی، به معنای وجود جریان‌های فیزیکی کالاها با مسیرهای طولانی و زمان‌های طولانی‌تر از منظر دریافت سفارش است. به علاوه، امکان بیشتری برای وقوع اختلال و عدم اطمینان ایجاد می‌شود.

جنبه‌های نوآوری پژوهش

مهم‌ترین جنبه نوآوری پژوهش حاضر، ارائه مدلی برای ارزیابی اثرات عوامل ساختاری در زنجیره‌های تأمین از منظر پیچیدگی بر عملکرد تاب‌آوری بر مبنای رویکرد داده‌کاوی می‌باشد که در آن، علاوه بر لحاظ نمودن وضعیت اجزای زنجیره از منظر تاب‌آوری، کیفیت روابط تعاملی مابین اجزاء با هم‌دیگر نیز، در قالب کلیت‌هایی یکپارچه و منسجم لحاظ شده است. علاوه بر آن، جنبه نوآوری دیگر پژوهش حاضر، امکان ورود همزمان داده‌های مربوط به اجزای زنجیره در کنار داده‌های تعاملی مرتبط با ساختار از جنبه مؤلفه‌های پیچیدگی در یک سیستم منسجم و یکپارچه بوده است. به علاوه، فراهم آمدن امکان تجزیه و تحلیل شاخص‌های پیچیدگی برای اجزای مختلف زنجیره‌های تأمین در

1 . Poudel, Marufuzzaman, & Bian

قالب مدل‌های در هم تنیده، یکی دیگر از نوآوری‌های پژوهش حاضر می‌باشد. بدین معنی که در مدل‌های تحلیل پیچیدگی اجزاء، یک قطعه ساز مشخص تنها به عنوان عضو یک زنجیره لحاظ نشده است؛ بلکه، این امکان فراهم آمده است که همزمان بتواند در چند زنجیره تأمین مجزاً و در لایه‌های مختلف میانی نقش آفرینی کند. این امر، به وضعیت واقعی روند تولید قطعات توسط قطعه‌سازان فعال صنعت قطعه‌سازی در ایران نزدیکتر می‌باشد. نهایتاً، بسط و توسعه چهار مؤلفه اصلی مدل ارزیابی عملکرد تاب‌آوری تأمین‌کننده کوستا گوویندان و فیگوئریا^۱ (۲۰۱۸) در قالب ۲۵ معرف اصلی و ۶۷ گویه فرعی نیز می‌تواند به عنوان یکی دیگر از جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر به شمار آید.

روش پژوهش

در این پژوهش، مدل ارزیابی طرح ساختاری در بالادست زنجیره‌های تأمین با در نظر گرفتن شبکه روابط مابین اجزاء در چهارچوب مفاهیم مربوط به زنجیره‌های تأمین و از منظر ارزیابی عملکرد تاب‌آوری در صنعت خودروسازی با رویکرد خوشه‌بندی طیفی طراحی و ارائه شده است. در این راستا، روشی برای ارزیابی اثر عوامل ساختاری در زنجیره‌های تأمین از منظر سه مؤلفه پیچیدگی (افقی عمودی و فضایی) بر عملکرد تاب‌آوری بر پایه توسعه پژوهش‌های انجام شده قبلی و با لحاظ نمودن محدودیت‌های گردآوری داده‌های میدانی و مدل‌سازی آن‌ها طراحی گردید. در مدل مزبور، داده‌های مرتبط با سطح شفافیت عناصر در زنجیره‌های تأمین برای بررسی و ارزیابی پیچیدگی عمودی لحاظ نشده است. همچنین، در پژوهش حاضر از مفاهیم مربوط به نظریه گراف برای مدل‌سازی روابط مابین اجزای زنجیره بهره گرفته شده است. با این توضیح که مفاهیم پایه‌ای و بنیادین مربوط به تطبیق نظریه گراف در ارزیابی ویژگی‌های ساختار از منظر پیچیدگی زنجیره‌های تأمین، قبلاً در پژوهش‌های مختلف ارائه شده است (بوده و وانگر، ۲۰۱۵؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۵؛ سولوکوف و همکاران، ۲۰۱۶). در ادامه، نحوه شناسایی جهت جریان مواد در شبکه، ریشه‌های گراف، بالادست نسبی و تأمین‌کننده‌های لایه اول به‌عنوان مباحث تکمیلی در انجام مدل‌سازی و همچنین نحوه تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس رویکرد خوشه‌بندی طیفی ارائه شده است.

1 . Costa, Govindan, & Figueira

بالادست نسبی و تأمین‌کننده‌های لایه اول: با توجه به این که تمرکز پژوهش حاضر بر بالادست زنجیره‌های تأمین می‌باشد، در ادامه برای ارتقای دقت در تبیین و ارائه مطالب در تشکیل مدل، تعریف مفهوم بالادست نسبی، در چهارچوب منطق ارزیابی شبکه‌ها، تبیین و ارائه شده است. اگر $V = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ به‌عنوان مجموعه گره‌ها (رأس‌ها) یا تأمین‌کننده‌ها در زنجیره‌های تأمین مختلف و E مجموعه یال‌های ارتباط‌دهنده مابین گره‌ها لحاظ شود، دو گره دلخواه s_i و s_j از آن که به صورت مستقیم یا به واسطه چند گره دیگر با هم مرتبط باشند را در چهارچوب گراف $Gr = (V, E)$ در نظر می‌گیریم. اگر اعداد مسیر از s_i به s_j برابر با تعداد یال‌های ارتباط‌دهنده آن‌ها تعریف شود، کوتاه‌ترین مسیر مابین s_i و s_j نسبت به یک ریشه دلخواه (کارخانه کانونی) مانند Foc_i قابل استخراج است. اگر m و n به ترتیب تعداد یال کوتاه‌ترین مسیر برای هر کدام از s_i و s_j نسبت به Foc_i لحاظ شود، در صورتی که $m > n$ باشد، آن‌گاه گره s_i به‌عنوان بالادست نسبی برای s_j با لحاظ نمودن ریشه Foc_i قابل تعریف است. به همین ترتیب، برای باقی گره‌ها مفهوم بالادست نسبی قابل تعمیم می‌باشد. بدین طریق، مفهوم تأمین‌کننده‌های لایه اول در بالادست نسبی برای s_i نسبت به یک کارخانه کانونی Foc_i نیز، تمامی گره‌های مرتبط با s_i که تنها به واسطه یک یال با آن در ارتباط بوده و کوتاه‌ترین مسیر آن‌ها با Foc_i که از گره s_i گذر کند، قابل تعریف است.

تعیین جهت جریان و ریشه‌های گراف: برای ارائه تعریف دقیق از شبکه، بایستی جهت جریان‌های مواد همواره نسبت به یک کارخانه کانونی دلخواه (Foc_i) و گره‌های متصل با آن تعریف شود. برای انجام این کار، هر کدام از Foc_i ها به‌عنوان یک ریشه گراف در نظر گرفته می‌شود. جریان‌های مواد همواره از سمت دورترین گره نسبت به Foc_i آغاز و به سمت گره‌های سطوح بالاتر ادامه یافته و نهایتاً در Foc_i خاتمه می‌یابد. با توجه به این که یک گره می‌تواند در بیش از یک زنجیره تأمین عضو باشد، بنابراین جریان‌های مواد مختلفی می‌تواند از یک گره عبور کند. در چهارچوب یک زنجیره مشخص، گره دلخواه s_i می‌تواند نسبت به گره s_j در مشارکت برای تولید محصول نهایی برای یک کارخانه کانونی (Foc_i)، بالادست نسبی محسوب شده و در تولید یک محصول متفاوت برای یک کارخانه کانونی دیگر، در پایین‌رده نسبی (تأمین‌کننده لایه پایین‌تر) قرار بگیرد.

مدل سازی و تجزیه و تحلیل بر اساس خوشه‌بندی طیفی: در این پژوهش، چهارچوب اصلی فرایند خوشه‌بندی طیفی در تشکیل افرازهای شباهت، با رویکرد استخراج گراف

لاپلاس بهنجار شده^۱ و در سه مرحله اصلی صورت پذیرفته است: (۱) پیش‌پردازش و آماده‌سازی ورودی‌ها، (۲) محاسبات جبری خوشه‌بندی طیفی، افراز و نگاشت طیفی و (۳) استخراج بصری، پس‌پردازش و تجزیه و تحلیل یافته‌ها. در ادامه مطالب، مراحل مزبور تشریح شده است.

پیش‌پردازش و آماده‌سازی ورودی‌ها: خروجی‌های این مرحله شامل گراف (های) تشابه، ماتریس (های) فواصل^۲ $D_{n \times n}$ در توپولوژی گراف و ماتریس (های) تشابه یا وابستگی^۳ می‌باشد. با توجه به این که هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی و تحلیل اثر سه مؤلفه پیچیدگی ساختاری (افقی عمودی و فضایی) بر عملکرد تاب‌آوری زنجیره‌های تأمین می‌باشد، سه گراف تشابه بر مبنای ترکیب داده‌های لایه‌ای دارای ماهیت و مقیاس متنوع توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشینی تشکیل شده است. در این پژوهش برای ترکیب داده‌های لایه‌ای، تشکیل گراف‌ها و ماتریس‌های تشابه و فواصل مربوط به آن‌ها، از الگوریتم یادگیری پت‌فایندر^۴ پارتل و همکاران^۵ (۲۰۱۶) در محیط پایتون بهره گرفته شده است.

برای انجام خوشه‌بندی طیفی، وجود داده‌های مناسب جهت تشکیل گراف‌های شباهت الزامی می‌باشد. آماده‌سازی ورودی‌ها باهدف تبدیل داده‌ها به گراف‌های شباهت $G_i = (V, E)$ انجام می‌شود. ورودی‌های $G_i = (V, E)$ شامل مجموعه گره‌ها ($V = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$) و اطلاعات مرتبط با ویژگی‌های هر کدام به صورت فردی و متعامل با همدیگر و مجموعه یال‌ها (E) می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات داده‌های گردآوری شده در تشکیل گراف‌ها و ماتریس‌های شباهت مرتبط با ارزیابی طرح ساختاری از منظر پیچیدگی افقی، پیچیدگی عمودی و پیچیدگی فضایی، به تفکیک مشخص شده است.

-
- 1 . Laplacian Normalized Graph
 - 2 . Distance Matrix
 - 3 . Similarity or Affinity Matrix
 - 4 . Pathfinder Network Scaling (PFNet)
 - 5 . Partl et al.,

جدول ۱. لایه‌های داده در محاسبات پیش‌فرآیند برای الگوریتم تشکیل گراف‌ها و ماتریس‌های شباهت

علامت	محتوای داده	نوع / مقیاس	استفاده مستقیم در تشکیل ماتریس‌های شباهت		
			پیچیدگی افقی	پیچیدگی عمودی	پیچیدگی فضایی
$D_{n \times n}^G$	ماتریس فواصل (مستقیم) جغرافیایی (فاصله مابین دو گره دلخواه S_i و S_j به صورت درایه d_{ij}^G)	کمی (کیلومتر تر)	✓	✓	✓
$M_{n \times n}$	ماتریس حجم خرید دوره‌ای (حجم خرید دوره‌ای S_i از S_j به صورت درایه m_{ij})	کمی (واحد پولی)	✓	✓	✓
$C_{n \times n}$	ماتریس همسایگی-تعیین وجود یا عدم وجود ارتباط مابین دو گره S_i و S_j (تشکیل یال‌ها در گراف)	کمی (صفر و یک)	✓	✓	✓
نام مکان	نام (نزدیکترین) شهرستان به محل استقرار تأمین‌کننده	کیفی (داده متنی)	✓	✓	✓
Foc_i	کارخانه کانونی i ام (ریشه‌های گراف) ($i = 1, 2, \dots, Z$)	کیفی (داده متنی)	✓	✓	✓
Ma_i	نام محصول (محصولات) نهایی Foc_i که در تولید آن‌ها از خروجی‌های S_i استفاده شده است	کیفی (داده متنی)	✓	✓	✓
RA	امتیاز آگاهی از ریسک S_i (سطح هوشیاری در قبال مخاطرات)	کمی (طیف)	✓	✓	✓
Re	امتیاز واکنش‌پذیری S_i (عکس‌العمل مقابله با اختلال)	کمی (طیف)	✓	✓	✓
SRP	امتیاز برنامه‌ریزی راهبردی مدیریت ریسک S_i	کمی (طیف)	✓	✓	✓
Fle	امتیاز انعطاف‌پذیری S_i	کمی (طیف)	✓	✓	✓
$CC_{n \times n}$	ماتریس نسبت تبادل S_i به S_j	کمی	-	-	-
$HC_{n \times n}$	پیچیدگی افقی گره S_i (ماتریس قطری)	کمی	✓	-	-
$C_{n \times n}^{Foc_i}$	ماتریس همسایگی توسعه یافته نسبت به Foc_i	کمی	-	-	-
$C_{n \times n}^{Foc}$	ماتریس همسایگی توسعه یافته $C_{n \times n}^{Foc_i}$ ($i = 1, 2, \dots, Z$)	کمی	-	-	-
$VC_{n \times n}$	پیچیدگی عمودی گره S_i (ماتریس قطری)	کمی	-	✓	-
$SC_{n \times n}$ ج	ماتریس پیچیدگی فضایی	کمی	✓	-	-

مطابق با جدول (۱)، برای تشکیل اطلاعات تکمیلی مربوط به یال‌ها در گراف‌های شباهت، مجموعه $\{Foc_i | i = 1, 2, \dots, Z\}$ به‌عنوان ریشه‌های گراف (کارخانه‌های کانونی) در نظر گرفته شده است. در این مجموعه، Z تعداد ریشه‌ها می‌باشد. با توجه به این که یک روش برای تشخیص زنجیره‌های تأمین از همدیگر ارتباط با کارخانه کانونی می‌باشد، لذا مقدار Z تعداد زنجیره‌ها را نیز نشان می‌دهد. برای تشکیل گراف‌های شباهت سه دسته از داده‌ها مورد استفاده واقع شده است. دسته اول، داده‌هایی است که به‌صورت مستقیم وارد الگوریتم تشکیل گراف شده و برای تشکیل تمامی گراف‌ها به صورت یکسان و مشترک به کارگیری شده است. در جدول (۱)، داده‌های دسته اول در ستون‌های مربوط به تشکیل تمامی گراف‌ها علامت خورده است. از جمله داده‌های دسته اول می‌توان به ماتریس فواصل مستقیم جغرافیایی مابین بنگاه‌های صنعتی $D_{n \times n}^G$ می‌باشد که اطلاعات آن از طریق نرم‌افزار برخط GDS^۱ گردآوری و تشکیل شده است. دسته دوم، ماتریس‌هایی است که به‌طور اختصاصی در تشکیل گراف‌های شباهت و تنها برای یکی از مؤلفه‌های پیچیدگی (افقی، عمودی و فضایی) در الگوریتم یادگیری پت‌فایندر وارد شده است. از جمله داده‌های دسته دوم می‌توان به ماتریس‌های $HC_{n \times n}$ ، $VC_{n \times n}$ و $SC_{n \times n}$ اشاره نمود. دسته سوم، داده‌هایی است که به صورت مستقیم در الگوریتم تشکیل گراف‌ها و ماتریس‌های فواصل و تشابه وارد نشده‌است؛ در عوض، از آن‌ها برای تشکیل داده‌های اختصاصی مربوط به تشکیل معیارهای شباهت مؤلفه‌های پیچیدگی (داده‌های دسته دوم) به کارگیری شده است. ماتریس‌های $CC_{n \times n}$ ، $C_{n \times n}^{Foc_i}$ و $C_{n \times n}^{Foc}$ در این دسته قرار می‌گیرند.

بر اساس اطلاعات جدول (۱)، محتوای بخشی از داده‌ها از نوع تعاملی و به‌صورت زوج مرتب نبوده است؛ بلکه، برای هر کدام از s_i ‌ها به صورت مجزا گردآوری و وارد مدل شده است. این گونه از داده‌ها عمدتاً در دسته اول قرار دارند. از جمله آن‌ها می‌توان به داده‌های متنی مکان جغرافیایی، اطلاعات متنی ردیابی نام محصول (محصولات) نهایی مرتبط با هر کدام از گره‌ها و اطلاعات مربوط به ریشه‌ها یا کارخانه (های) کانونی (Foc_i) مرتبط با هر کدام از گره‌ها اشاره نمود. داده‌های مربوط به وضعیت تأمین‌کننده‌ها (s_i) از منظر مؤلفه‌های ارزیابی تاب‌آوری (آگاهی از ریسک^۲ (RA)، واکنش‌پذیری^۳ (Re)،

1 . <https://www.geodatasource.com/distance-calculator>

2 . Risk Awareness

3 . Responsiveness

راهبردهای مدیریت ریسک^۱ (SRP) و انعطاف‌پذیری^۲ (Flex) نیز در دسته اول قرار می‌گیرند که بر اساس توسعه مؤلفه‌های مدل ارزیابی تأمین‌کننده‌های کوستا، گوویندان و فیگوئریا (۲۰۱۸) به قرار جدول (۲) گردآوری و وارد مدل شده است.

جدول ۲. مدل توسعه یافته ارزیابی تاب‌آوری تأمین‌کننده‌ها در زنجیره تأمین

مؤلفه تاب‌آوری	معرف‌های ارزیابی
آگاهی از ریسک (هوشیاری در قبال مخاطرات) (RA)	ارزیابی و تحلیل مخاطرات درون شرکتی
	ارزیابی و تحلیل مخاطرات بین شرکتی (مرتبط با سایر اجزای زنجیره)
	میزان سودمندی جریان‌های دانشی شرکت مبدأ (از شرکت به سوی لایه‌های بالادست زنجیره)
	سودمندی جریان‌های اطلاعاتی شرکت مقصد (از زنجیره به سوی شرکت)
	(به‌کارگیری) سیستم‌های اطلاعاتی زمان واقعی ^۳ (در طول زنجیره)
	شناسایی و پیش‌بینی تغییرات عرضه (در بالادست نسبی زنجیره)
	حساسیت و دقت در شناسایی تغییرات تقاضا (در پایین‌رده نسبی زنجیره)
	واکنش در قبال وقوع اختلال تقاضا در زنجیره تأمین (در پایین‌رده نسبی)
سطح واکنش‌پذیری (عکس‌العمل در مقابله با ریسک-اختلال) (Re)	واکنش در مقابله با اختلال در بالادست
	واکنش در قبال وقوع اختلال‌های فرآیندی
	واکنش در قبال وقوع تغییرات ناگهانی تکنولوژی (در پایین‌رده نسبی)
	واکنش در قبال اختلال در حمل و نقل
	واکنش‌پذیری در قبال وقوع اختلال‌های آنی اطلاعاتی
	واکنش‌پذیری در قبال وقوع اختلال آنی با منشأ محیطی
برنامه‌ریزی راهبردی مدیریت ریسک (SRP)	فرهنگ مدیریت ریسک (برنامه‌ریزی آموزشی مدیریت ریسک)
	سطح شفافیت در زنجیره تأمین
	ارزیابی و کنترل مستمر اجزای بالادست (تأمین‌کننده‌های نسبی)
	اجرای (راهبردهای) تعویق
	افزونگی در نظارت و کنترل
	(راهبردهای) پشتیبان‌گیری

- 1 . Strategic risk planning
- 2 . Flexibility
- 3 . Real Time Information System

مؤلفه تاب‌آوری	معرف‌های ارزیابی
	(راهبردهای) عملکرد چند وظیفه‌ای
	راهبرد(های) افزونگی تکثیر
انعطاف‌پذیری (Fle)	منبع‌یابی انعطاف‌پذیر
	انعطاف‌پذیری فرآیندی
	انعطاف‌پذیری در تکمیل سفارش

در ادامه، نحوه تشکیل داده‌های دسته دوم و دسته سوم به تفکیک گراف‌های شباهت مرتبط با هر کدام از آن‌ها تشریح شده است.

ماتریس‌های اختصاصی در تشکیل گراف شباهت از منظر پیچیدگی افقی: در این پژوهش، پیچیدگی افقی از منظر عملیاتی سطح تبادل و درگیری شرکت با تأمین‌کننده‌های لایه اول در بالادست (نسبی) زنجیره تأمین را بر اساس حجم کل جریان مواد نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر برای محاسبه ماتریس پیچیدگی افقی ($HC_{n \times n}$)، ابتدا ماتریس نسبت تبادل $CC_{n \times n}$ به قرار ذیل تشکیل شده است:

برای جفت گره دلخواه s_i و s_j ، اگر s_j به عنوان تأمین‌کننده لایه اول s_i باشد، مقادیر عددی شاخص پیچیدگی افقی CC_{ij} به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$CC_{ij} = \frac{m_{ij}}{m_{i,Total}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $m_{i,Total}$ حجم کل خرید دوره‌ای (به واحد پولی) s_i از تمامی تأمین‌کننده‌های لایه اول در دوره زمانی معین و m_{ij} حجم کل خرید s_i از s_j می‌باشد که از مجموع سطری ماتریس حجم خرید دوره‌ای (M) حاصل می‌شود. در صورتی که s_j به عنوان تأمین‌کننده لایه اول بنگاه صنعتی s_i نباشد، مقدار CC_{ij} برابر صفر لحاظ می‌گردد. بدیهی است در این حالت، بنگاه s_i از s_j خریدی انجام نداده و $m_{ij} = 0$. بدین گونه تمامی درایه‌های ماتریس $CC_{n \times n}$ قابل محاسبه و استخراج می‌باشد. همچنین، مقادیر درایه‌های قطر اصلی $CC_{n \times n}$ همواره برابر صفر است. در ادامه، درایه‌های ماتریس $HC_{n \times n}$ با کمک اطلاعات $CC_{n \times n}$ ، از طریق رابطه (۲) تشکیل می‌شود.

$$\begin{cases} hc_{ii} = \sum_{j=1}^n cc_{ji} & \text{if } i = j \\ hc_{ij} = 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

در $HC_{n \times n}$ ، به غیر از قطر اصلی، بقیه درایه‌ها مقادیر صفر اخذ می‌کنند. درایه قطر اصلی برای هر سطر نیز از جمع درایه‌های همان سطر در ماتریس $CC_{n \times n}$ مطابق با رابطه (۱) حاصل می‌شود.

ماتریس‌های اختصاصی در تشکیل گراف شباهت از منظر پیچیدگی عمودی: در این پژوهش پیچیدگی عمودی هر گره، تعداد لایه‌های طولانی‌ترین رشته بالارده نسبی و مرتبط با تأمین‌کننده‌ها لحاظ شده است. برای تشکیل ماتریس $VC_{n \times n}$ ، تعداد لایه‌ها (یا یال‌ها) برای طولانی‌ترین رشته ارتباط دهنده مابین هر جفت گره دلخواه s_i و s_j استخراج می‌شود. برای انجام این کار نیاز است گره‌ها بر اساس یک یا چند مسیر مشخص در داخل گراف از منظر استخراج طولانی‌ترین رشته‌ها مورد بررسی قرار گیرند و ماتریس (های) همسایگی توسعه یافته بر مبنای آن‌ها تشکیل شوند. مطابق با تئوری گراف، می‌توان برای تشکیل ماتریس (های) همسایگی توسعه یافته $C_{n \times n}^{Foc_i}$ ، یک (یا چند) گره را به عنوان ریشه برای گراف انتخاب نمود (در این پژوهش، گره‌های نماینده بعنوان ریشه، کارخانه‌های کانونی (Foc_i) لحاظ شده است)؛ سپس، برای هر کدام از ریشه‌های منتخب، یک ماتریس همسایگی توسعه یافته به صورت ذیل ایجاد می‌شود: در گام اول، نزدیک‌ترین گره‌ها به ریشه توسط الگوریتم تشخیص مسیر در گراف انتخاب شده و یک‌به‌یک برای هر کدام، تعداد گره‌های ارتباط دهنده مابین آن‌ها و بقیه گره‌های موجود در گراف استخراج می‌شود. گره‌های موجود در لایه‌های بعدی نسبت به Foc_i نیز به همان ترتیب بر مبنای الگوریتم مسیریابی بررسی شده و تعداد گره‌های مرتبط با آن‌ها استخراج می‌شود. نهایتاً، مقدار عددی درایه دلخواه $c_{ij}^{Foc_i}$ از $C_{n \times n}^{Foc_i}$ ، بیشترین مقدار استخراج شده از طریق الگوریتم تشریح شده است که تعداد گره‌های ارتباط دهنده مابین s_i و s_j با لحاظ نمودن مسیر ارتباطی نسبت به ریشه Foc_i را نشان می‌دهد. همچنین، اگر بیشتر از یک ریشه (مثلاً به تعداد Z ریشه) برای یک فضای توپولوژیک بر پایه مفاهیم شبکه تعریف شود، تفکیک ارائه شده در فوق برای تمامی ریشه‌ها پیاده‌سازی شده و برای هر کدام از آن‌ها یک ماتریس $C_{n \times n}^{Foc_i}$ قابل تشکیل است. سپس، درایه‌های برآیند ماتریس‌های همسایگی توسعه یافته $C_{n \times n}^{Foc}$ با استفاده از رابطه (۳) ایجاد می‌شود:

$$C_{ij}^{Foc} = \text{Max} \{ c_{ij}^{Foc_1}, c_{ij}^{Foc_2}, \dots, c_{ij}^{Foc_i}, \dots, c_{ij}^{Foc_z} \} \quad (3)$$

در پژوهش حاضر، موقعیت کارخانه‌های کانونی بعنوان گره‌های ریشه لحاظ و ماتریس همسایگی توسعه یافته برای هر کدام، بر مبنای مسیرهای جریان مرتبط با آن‌ها

تشکیل شد و ماتریس $C_{n \times n}^{Foc}$ ایجاد گردید. نهایتاً، ماتریس $VC_{n \times n}$ که حاوی تعداد لایه های طولانی ترین رشته مرتبط با هر کدام از شرکت های قطعه ساز است، از طریق رابطه (۴) و با استفاده از اطلاعات ماتریس $C_{n \times n}^{Foc}$ استخراج شده است.

$$VC_{ij} = \begin{cases} \text{Max} \{c_{i_1}^{Foc}, c_{i_2}^{Foc}, \dots, c_{i_n}^{Foc}\} & \text{if } i = j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

مطابق با رابطه (۴)، در $VC_{n \times n}$ به غیر از قطر اصلی، بقیه درایه ها مقادیر صفر را اخذ می کنند. مقادیر درایه های قطر اصلی برای هر سطر نیز ماکسیم مقدار درایه های همان سطر در ماتریس $C_{n \times n}^{Foc}$ می باشند. این مقدار نیز، همان تعداد لایه های طولانی ترین رشته مرتبط با گره را ارائه می دهد.

ماتریس های اختصاصی در تشکیل گراف شباهت از منظر پیچیدگی فضایی: از منظر عملیاتی، پیچیدگی فضایی مانند پیچیدگی افقی، بایستی بر اساس میزان تبادلات شرکت با تأمین کننده های لایه اول (نسبی) در بالادست زنجیره تأمین و با در نظر گرفتن حجم جریان مواد با آن ها ارزیابی شود. از سوی دیگر، به نظر می رسد ارزیابی شاخص مزبور بدون در نظر گرفتن پراکندگی جغرافیایی تأمین کننده های لایه اول، از منظر تبیین صحیح آن، از اعتبار کمتری برخوردار باشد. در این تحقیق برای جفت گره دلخواه S_i و S_j ، شاخص پیچیدگی فضایی به صورت رابطه (۵) محاسبه می شود.

$$SC_{ij} = d'_{ij} \times \frac{m_{ij}}{m_{i,Total}} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، d'_{ij} ضریب وزنی فاصله مابین S_i و S_j می باشد. همچنین، مطابق با تعریف پیچیدگی فضایی، ضریب فاصله جغرافیایی d'_{ij} بدین گونه در رابطه مزبور اعمال شده است: در صورتی که دو بنگاه صنعتی S_i و S_j در فاصله جغرافیایی ۵ کیلومتری هم دیگر باشند $d'_{ij} = 0/1$ ، اگر فاصله جغرافیایی S_i و S_j مابین ۵ تا ۵۰ کیلومتر باشد $d'_{ij} = 0/2$ ، در صورتی که فاصله S_i و S_j مابین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتر باشد $d'_{ij} = 0/3$ ، همچنین برای فاصله مابین ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر، $d'_{ij} = 0/6$ و در صورتی که فاصله S_i و S_j بیشتر از ۳۰۰ کیلومتر باشد $d'_{ij} = 0/9$ لحاظ شده است. m_{ij} حجم خرید انجام شده S_i از S_j و $m_{i,Total}$ کل ارزش خرید دوره ای از تأمین کننده های نسبی توسط S_i می باشد. همچنین، در صورتی که S_j به عنوان تأمین کننده لایه اول بنگاه صنعتی S_i نباشد، مقدار SC_{ij} برابر صفر لحاظ می شود. نهایتاً، با توجه به روند ارائه شده، ماتریس غیرمقارن

$SC_{n \times n}$ که مقادیر قطر اصلی آن صفر است، تشکیل می‌گردد. با توجه به توضیحات ارائه شده، اگر s_j به عنوان تأمین‌کننده نسبی در لایه اول s_i باشد، $SC_{ij} \neq 0$ و در غیر این صورت $SC_{ij} = 0$ خواهد بود.

تشکیل ماتریس (های) فواصل $D_{n \times n}$ در توپولوژی گراف و ماتریس (های) تشابه: پس از اجرای الگوریتم پت‌فایندر، ماتریس‌های فواصل $D_{n \times n}$ را می‌توان با توجه به موقعیت گره‌ها نسبت به هم‌دیگر برای هر کدام از گراف‌های تشابه به صورت مجزا تشکیل و استخراج نمود. یک $D_{n \times n}$ ، ماتریس مربعی و متقارن نسبت به قطر اصلی است که مقادیر قطر اصلی آن صفر می‌باشد. هر کدام از درایه‌های ماتریس $D_{n \times n}$ یعنی d_{ij} ، نشانگر فاصله دو گره s_i و s_j در فضای Ω بعدی است که بر پایه ترکیب داده‌های تشکیل دهنده گراف شباهت تشکیل می‌شود. پایه فواصل در تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعات و فضای ایجاد شده با الگوریتم پت‌فایندر، با لحاظ نمودن مفروضات فاصله‌ای مینکوسکی^۱ بر مبنای دو پارامتر Γ و Ω به قرار رابطه (۶) محاسبه می‌شود. در رابطه مزبور، همواره $n \geq 1$ و $s_i \neq s_j$ می‌باشد.

$$d_{ij} = \left[\sum_{a=1}^r |s_{ia} - s_{ja}|^n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

در این پژوهش، برای تشکیل ماتریس‌های تشابه یا وابستگی از اطلاعات ماتریس فواصل و با عملگر تشابه گاوسی^۲ به‌قرار رابطه (۷) بهره گرفته شده‌است. بر همین اساس، درایه دلخواه w_{ij} مقدار شاخص شباهت مابین زوج مرتب (s_i, s_j) از گره‌های یک گراف تشابه را مشخص می‌کنند.

$$w_{ij} = e^{-\left(\frac{d_{ij}}{\sqrt{\sigma^2}}\right)} \quad (7)$$

در رابطه فوق، مقیاس σ با توجه به حدود تعیین شده در تنظیم مقیاس فاصله‌ای مابین گره‌ها و با توجه به توپولوژی از پیش تعیین شده در نرم‌افزار تصویرسازی مفاهیم و مقیاس‌های فضای شبکه‌ای تعیین می‌شود (چن و موریس،^۳ ۲۰۰۳).

1 . Minkowski Distance
2. Gaussian Similarity Function
3 - Chen & Morris

محاسبات جبری خوشه‌بندی طیفی، افراز و الگوریتم نگاشت

روند انجام خوشه‌بندی طیفی شامل محاسبات جبری تشکیل ماتریس تشابه بهنجار شده $Q_{n \times n}$ ، تشکیل ماتریس لاپلاس بهنجار شده $L_{n \times n}$ و استخراج k بزرگ‌ترین مقادیر ویژه و بردارهای ویژه از آن و نهایتاً افراز گره‌ها و تصویرسازی خوشه‌ها می‌باشد. در ادامه، نحوه پیاده‌سازی هر کدام از مراحل مزبور تشریح شده است.

الف) تشکیل ماتریس تشابه بهنجار شده قطری $Q_{n \times n}$: در واقع، $Q_{n \times n}$ به صورت یک ماتریس قطری است که درایه‌های آن (q_{ij}) از تحویل درایه‌های $W_{n \times n}$ با استفاده از رابطه (۸) ایجاد می‌شود. بنا بر رابطه مزبور، در $Q_{n \times n}$ به غیر از قطر اصلی، بقیه درایه‌ها مقادیر صفر اخذ می‌کنند. درایه‌های قطر اصلی $Q_{n \times n}$ نیز از جمع درایه‌های همان سطر در ماتریس $W_{n \times n}$ حاصل می‌شود.

$$Q_{n \times n} = \begin{cases} q_{ii} = \sum_{j=1}^n w_{ji} & \text{if } i = j \\ q_{ij} = 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

ج) محاسبه ماتریس لاپلاس بهنجار شده $L_{n \times n}$: در این پژوهش، $L_{n \times n}$ از طریق رابطه (۹) به صورت جبری محاسبه شده است. در رابطه مزبور، $I_{n \times n}$ ماتریس همانی در بعد n می‌باشد.

$$L_{n \times n} = I_{n \times n} - Q_{n \times n}^{-\frac{1}{2}} W_{n \times n} Q_{n \times n}^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

د) استخراج k بزرگ‌ترین مقدار ویژه از $L_{n \times n}$ و بردارهای ویژه مرتبط با هر کدام: برای انجام این کار، مجموعه‌ای k عضوی (که $k \in \mathbb{N}$, $1 < k < n$) از مقادیر ویژه از ماتریس لاپلاس بهنجار $L_{n \times n}$ استخراج می‌شود. مجموعه مزبور به صورت $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$ می‌باشد که بایستی حاوی بزرگ‌ترین مقادیر ویژه $L_{n \times n}$ باشد که در آن داشته باشیم: $0 = \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_k$. در ادامه، بردارهای ویژه متناظر با هر کدام از مقادیر ویژه با لحاظ نمودن ترتیب نزولی مقادیر ویژه به صورت v_1, v_2, \dots, v_k و قابل استخراج است.

ه) تشکیل ماتریس بلوکی خوش ترتیب و ستونی از بردارهای ویژه: با توجه به یافته‌های بند قبل، ماتریس بلوکی، خوش ترتیب و ستونی از بردارهای ویژه، می‌تواند از طریق چینش بردارهای ویژه در داخل آن مطابق با رابطه (۱۰) تشکیل شود:

$$A_{n \times k} = [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_k]_{n \times k} \quad (10)$$

و) بهنجارسازی ماتریس $A_{n \times k}$: در این گام، درایه‌های ماتریس $A_{n \times k}$ با روش نرم اقلیدسی بی‌مقیاس می‌شود. اگر a_{ij} درایه دلخواه از $A_{n \times k}$ باشد، $T_{n \times k}$ به‌عنوان ماتریس بهنجارشده $A_{n \times k}$ به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که درایه‌های آن (t_{ij}) از طریق نرم اقلیدسی به‌قرار رابطه (۱۱) استخراج شود.

$$t_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_j a_{ij}}} \quad (11)$$

ز) افراز گره‌ها: با بهنجارسازی‌های انجام یافته در مراحل قبلی، ابعاد و پیچیدگی مسئله کاهش یافته است و به‌راحتی می‌توان داده‌های تبدیل یافته توسط رابطه (۱۱) را با روش‌های ساده‌تر مانند K-means به تعداد k خوشه، افراز نمود. برای انجام این کار، کافی است هر سطر از ماتریس $T_{n \times k}$ به‌عنوان مختصات یک نقطه (گره) از گراف در فضای k بعدی لحاظ شود. با توجه به اینکه برای هر کدام از n گره، یک مختصات برداری متناظر در $T_{n \times k}$ تولید شده است، بنابراین، به‌راحتی می‌توان گره‌ها را با استفاده از K-means به k خوشه تولید شده Cl_1, \dots, Cl_k افراز نمود.

استخراج بصری خوشه‌ها، پس‌پردازش و تجزیه و تحلیل یافته‌ها: پس‌پردازش شامل شامل تفکیک و افراز رئوس گراف با در نظر گرفتن یافته‌های خوشه‌بندی طیفی می‌باشد. در این گام، همگام با استخراج بصری افرازاها، مرز خوشه‌ها در گراف نیز مشخص می‌شود. با توجه به مشخص شدن اجزای اصلی هر خوشه در گام قبل، ابتدا اجزای هر خوشه در گراف اصلی مشخص می‌شود؛ سپس، گراف با یکی از رویکردهای مرسوم مانند برش بهنجارشده^۱ بخش‌بندی می‌شود. برای انجام این کار، در حالت کلی مدل برنامه‌ریزی خطی با هدف مینیم کردن مقدار اثر ماتریس $A_{k \times n} \times L_{n \times n} \times A_{n \times k}$ با محدودیتی به‌صورت $A_{k \times n}^T A_{n \times k} = I_{k \times k}$ تشکیل و حل می‌شود. به دلیل حجم بالای مطالب، از تشریح کامل نحوه بخش‌بندی گراف بر پایه برش بهنجار، خودداری شده است. علاقمندان برای کسب اطلاعات بیشتر می‌توانند به پژوهش‌هایی نظیر شی و مالک^۲ (۲۰۰۰)، ون لوکسبورگ^۱

1 . Normalized Cut

2 . Shi & Malik

(۲۰۰۷) و دینگ و همکاران^۲ (۲۰۱۸) مراجعه نمایند. روش‌های مختلفی برای نشان دادن خوشه‌ها در تصویر گراف وجود دارد که بر مبنای برش‌های ایجاد شده، مرز خوشه‌ها از هم‌دیگر را معلوم می‌کند. در تحقیق حاضر با توجه به این که در تنظیم نرم‌افزار داده کاوی برای انجام برش، همپوشانی مابین خوشه‌ها مجاز شمرده نشده است، لزوماً تمامی گره‌ها در داخل خوشه‌های اصلی واقع نگردیده است.

تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها در خوشه‌بندی طیفی: تاکنون روش‌های متنوعی برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها برای روش‌های خوشه‌بندی طیفی ارائه شده است (مور و همکاران^۳، ۲۰۱۶). در این پژوهش برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها (k) در بند (د) از محاسبات جبری خوشه‌بندی طیفی، افراز و الگوریتم نگاشت، با توجه به پیاده‌سازی روش جبری خوشه‌بندی طیفی خودتنظیم^۴ مطابق با لی و گو^۵ (۲۰۱۲) از رویکرد ابتکاری محاسبه و استخراج قدرمطلق ماکسیمم اختلاف مابین مقادیر ویژه متوالی^۶ مستخرج از ماتریس لاپلاس بهنجار شده در رابطه (۹) $(|\lambda_k - \lambda_{k-1}|)$ استفاده شده است.

روند گردآوری داده‌های میدانی و ابزار گردآوری داده‌ها

با توجه به مدل پژوهش، گردآوری داده‌های میدانی بایستی بر مبنای شناسایی زنجیره‌های تأمین بالادستی پایه‌ریزی گردد. برای انجام این کار، جامعه تحقیق شامل تمامی قطعه‌سازان فعال در زنجیره‌های تأمین مرتبط با تولید خودرو در شمال و شمال غرب کشور در قلمرو زمانی اول فروردین تا آخر اسفند ماه ۱۳۹۷ لحاظ گردید. برای شناسایی نمونه آماری، از روش نمونه‌گیری گلوله برفی استفاده شد. برای انجام این کار، ابتدا آدرس و مشخصات ۱۱ واحد صنعتی مستقر در استان‌های شمال و شمال غرب کشور (آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، گیلان، زنجان، البرز و قزوین) که با کارخانه‌ها کانونی تولید خودرو در داخل و خارج از محدوده استان‌های مزبور در ارتباط بوده‌اند، به عنوان تأمین‌کننده‌های لایه‌های اول در بالادست زنجیره‌های تولید خودروهای سواری از منابع موثق آماری استخراج شد و به صورت حضوری جهت دریافت اطلاعات مورد نیاز پژوهش

-
- 1 . Von Luxburg
 - 2 . Ding et al.
 - 3 . Mur et al.
 - 4 . Self-tuning Spectral Clustering
 - 5 . Li & Guo
 - 6 . Eigengap Heuristic Computing

بدانها مراجعه گردید. سپس، اطلاعات مکانی و حجم دوره‌ای خریدها (به واحد پولی و در قلمرو زمانی پژوهش) از تأمین‌کننده‌های مواد و قطعاتی که با ۱۱ واحد صنعتی مزبور ارتباط داشته‌اند، گردآوری شد. پس از بررسی اطلاعات مربوط به برون‌سپاری مواد و قطعات و شناسایی مکان جغرافیایی تأمین‌کننده‌های لایه بعدی، به صورت حضوری و یا ارسال درخواست همکاری و توزیع اولیه پرسش‌نامه‌ها از طریق پست الکترونیکی بدانها مراجعه گردید. روند گردآوری اولیه اطلاعات به همین ترتیب و به صورت مراجعه لایه‌ای به تأمین‌کننده‌ها و جلب رضایت جهت همکاریشان در روند گردآوری داده‌ها برای پژوهش در چندین نوبت تا رسیدن به تهیه‌کننده‌های مواد خام در زنجیره تأمین تکرار گردید. بدین طریق، روند شناسایی مسیر تأمین و تولید قطعات مختلف از طریق ادامه روند مزبور تا دستیابی به همه تهیه‌کننده‌های مواد خام مورد نیاز تولید انجام شد. نهایتاً، تهیه‌کننده‌های مواد خام به عنوان لایه آخر در زنجیره تأمین از نمونه آماری کنار گذاشته شد.

با توجه به اطلاعات گردآوری شده از زنجیره‌های تأمین، ضمن کنار گذاشتن واحدهای صنعتی که حاضر به همکاری نشدند، تعداد ۲۶۸ شرکت قطعه‌سازی در لایه‌های مختلف در زنجیره‌های تأمین شناسایی شد. سپس، پرسش‌نامه پژوهش برای بار آخر مابین تمامی شرکت‌های مزبور توزیع گردید. بدنه اصلی پرسش‌نامه، علاوه بر پرسش وضعیت آمار توصیفی شرکت‌ها، شامل دو بخش: گویه‌های ارزیابی وضعیت قطعه‌سازان از منظر شاخص‌های تاب‌آوری زنجیره تأمین (شامل ۶۷ سؤال تنظیم شده در قالب طیف ۹ گزینه‌ای لیکرت) و ۹ پرسش برای تعیین وضعیت قطعه‌سازان در زنجیره (های) تأمین مرتبط با آنها جهت تشکیل داده‌های ماتریسی از منظر شاخص‌های مختلف پیچیدگی بوده است. پس از توزیع پرسش‌نامه مزبور، با رعایت توصیه‌های ارائه شده توسط توماسکوویچ-دوری و همکاران^۱ (۱۹۹۴) در خصوص نحوه گردآوری داده‌های سازمانی، پس از ۲ دور پیگیری در خصوص گردآوری پاسخ‌ها با فاصله زمانی ۱ ماه، تعداد ۲۵۷ فقره پرسش‌نامه تکمیل شده و معتبر توسط اعضای نمونه آماری گردآوری شد. با توجه به این که بیشتر از ۹۵٪ از پرسش‌نامه‌ها از سوی قطعه‌سازان به صورت تکمیل شده به محققین عودت داده شد، لذا به دلیل محدودیت زمانی از پیگیری باقی موارد صرف‌نظر شد و داده‌های مربوط به ۲۵۷ قطعه‌ساز به عنوان نمونه آماری پژوهش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

در پژوهش حاضر و در مراحل گردآوری، تجمیع، آماده‌سازی داده‌ها و پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و انجام محاسبات جبری، از نرم‌افزارهای جی دی اس^۱، نوت‌پد پلاس پلاس^۲، اکسل، متلب و پایتون استفاده شده است.

یافته‌ها

بخش یافته‌های پژوهش حاضر در دو قسمت ارائه شده است: یافته‌های آمار توصیفی داده‌های میدانی و یافته‌های مرتبط با پیاده‌سازی الگوریتم‌های داده‌کاوی خوشه‌بندی طیفی. همچنین، جهت ایجاد درک عمیق‌تر از خوشه‌های تشکیل شده، یافته‌ها با کمک آمار توصیفی تشریح و تحلیل شده است.

الف) توصیف داده‌های میدانی

در جدول (۳) مشخصات توصیفی بنگاه‌های صنعتی به عنوان تأمین‌کننده‌های بالادست در زنجیره‌ها از منظر محدوده سنوات فعالیت و تعداد کارکنان ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات توصیفی بنگاه‌های صنعتی از منظر محدوده سنوات فعالیت و تعداد کارکنان

نوع فعالیت و تولیدات اصلی تأمین‌کننده‌ها	فراوانی	محدوده سنوات فعالیت	تعداد کارکنان
قطعات و متعلقات تخصصی موتور و گیربکس	۶۵	۱۵-۴۸	۱۹-۸۵۰
قطعات و متعلقات بدنه، اتاق و شاسی	۵۸	۱۱-۴۸	۳۵-۸۸۰
متعلقات سیستم انتقال قدرت (به غیر از موتور و گیربکس)	۳۱	۹-۴۶	۴۵-۷۰۰
قطعات پلاستیکی و لاستیکی خودرو	۵۵	۵-۱۷	۳۵-۱۹۴
قطعات الکترونیکی خودرو	۳۲	۶-۳۶	۳۹-۱۸۰
قطعات شیشه‌ای، آینه‌ها و چراغ‌ها	۱۱	۱۰-۲۸	۲۶-۵۵
سایر قطعات و متعلقات مربوط به تولید خودرو	۵	۷-۳۰	۲۹-۵۲
مجموع	۲۵۷	-	-

اطلاعات توصیفی مربوط به ۲۵۷ قطعه‌ساز در چهارچوب نمونه آماری، نشان داد که خروجی و تولیدات آن‌ها در تولید شش نوع خودرو سواری $\{Ma_1, Ma_2, \dots, Ma_6\}$ توسط مجموعه کارخانه‌های کانونی مجزا $\{Foc_i | i = 1, 2, \dots, 9\}$ استفاده شده است. برای تفکیک دقیق‌تر اعضای زنجیره‌های تأمین، از معیار ارتباط گره‌ها با Foc_i (کارخانه‌های

1 . GDS

2 . Notepad++

کانونی که در آن محصول سرهم‌بندی نهایی شده و به پایین رده زنجیره تأمین تزریق می‌شود) لحاظ شده است. بنابراین، بر اساس تفکیک محصولات نهایی ارائه شده به بازار، ۹ زنجیره تأمین را می‌توان در شبکه مشخص نمود. البته این امر لزوماً بدین معنی نبوده است که هر کدام از تأمین‌کننده‌ها با همه ۹ کارخانه کانونی ارتباط (مستقیم یا با واسطه) داشته‌اند. بررسی داده‌های مرتبط با ماتریس فواصل مستقیم جغرافیایی مابین بنگاه‌های صنعتی نشان‌دهنده آن بوده است که از میان ۳۲۸۹۶ داده غیرتکراری و مربوط به فواصل مستقیم مابین زوج‌های مرتب از تأمین‌کننده‌ها، تنها ۹۲۴۵ داده فاصله مربوط به بنگاه‌های صنعتی است که در داخل زنجیره‌های تأمین مشترک بوده‌اند که در چهارچوب سلسله مراتب عمودی و لایه‌های مختلف زنجیره با هم‌دیگر ارتباط مستقیم و غیرمستقیم (با واسطه) داشته‌اند. در میان داده‌های فواصل اشاره شده، کمی بیشتر از ۲۷ درصد در فاصله جغرافیایی ۵ کیلومتری از هم‌دیگر قرار داشته‌اند. همچنین، حدود ۳۴ درصد در محدوده فاصله‌ای مابین ۵ تا ۵۰ کیلومتر از هم‌دیگر بودند. به علاوه، ۲۶ درصد بنگاه‌ها در فاصله جغرافیایی مابین ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر از هم‌دیگر قرار داشته‌اند. نهایتاً، حدود ۱۱ درصد از بنگاه‌های متصل به هم در چهارچوب لایه‌های مختلف زنجیره تأمین، در فواصل بیشتر از ۳۰۰ کیلومتر از هم‌دیگر قرار داشته‌اند.

یافته‌های توصیفی مربوط به نسبت حجم خرید دوره‌ای بر حجم کل خرید در ماتریس $CC_{n \times n}$ ، نشان دهنده آن بوده است که حدود ۲۲ درصد از داده‌ها کمتر از ۰/۳، ۲۳/۷۲ درصد دارای مقدار شاخص مابین ۰/۳ تا ۰/۵ بودند. همچنین، ۲۳/۶۱ درصد دارای مقدار شاخص مابین ۰/۵ تا ۰/۸ و حدود ۲۹ درصد دارای مقدار شاخص بیشتر از ۰/۸ داشته است. بررسی داده‌های مربوط به یال‌های گراف (ماتریس همسایگی $C_{n \times n}$) نشان داد که قطعه‌سازان از طریق یک یا چند واسطه و در چهارچوب شبکه تأمین خود، تنها با یک یا چند کارخانه تولیدکننده محصول نهایی در ارتباط بوده‌اند. بر اساس آمار مشخص گردید که در قلمرو زمانی تحقیق، هر کدام از قطعه‌سازان به صورت مستقیم (یا غیرمستقیم) در تولید قطعات مختلف برای حداقل ۱ و حداکثر ۶ کارخانه کانونی (Foc_i) شرکت داشته‌اند. همچنین، مجموعه کارخانه‌های کانونی $\{Foc_i | i = 1, 2, \dots, 9\}$ ، مرتبط با تولید محصولات سه گروه اصلی خودروسازی: ایران خودرو، سایپا و پارس خودرو بوده است. با توجه به امکان شرکت تأمین‌کننده‌ها در تأمین قطعات مورد نیاز برای بیشتر از یک زنجیره تأمین، تعداد تأمین‌کننده‌های لایه اول در بالادست (نسبی) مربوط به یک

تأمین کننده در یک زنجیره تأمین مشخص، حداقل ۱ و حداکثر ۱۵ بوده است. همچنین، بررسی مجموع سطری درایه‌ها در ماتریس‌های $C_{n \times n}^{Foc_i}$ نشان داد که کوتاه‌ترین و طولانی‌ترین رشته در بالارده نسبی مرتبط با هر کدام از تأمین کنندگان (در ارتباط با یک زنجیره تأمین مشخص)، حداقل ۱ و حداکثر ۷ لایه را شامل شده است. در جدول (۴)، داده‌های توصیفی مرتبط با وضعیت مؤلفه‌های ارزیابی تاب‌آوری اجزای بالادست آورده شده است.

جدول ۴. داده‌های توصیفی مرتبط با وضعیت مؤلفه‌های ارزیابی تاب‌آوری اجزای بالارده در زنجیره تأمین

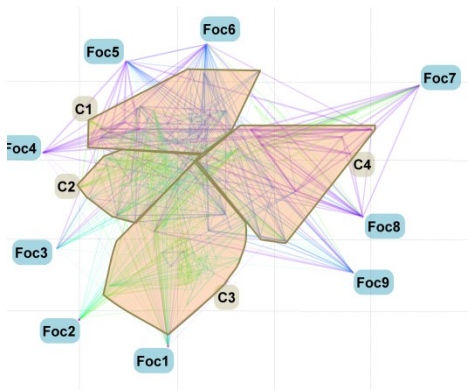
شاخص‌های آماری	آگاهی از ریسک (RA)	واکنش پذیری (آمادگی برای اختلال) (Re)	برنامه راهبردی مدیریت ریسک (SRP)	انعطاف‌پذیری (Flex)	شاخص میانگین (تاب‌آوری) (RES)
میانگین	۳,۱۶۷	۴,۰۵	۳,۹۹۳	۴,۰۲۵	۳,۸۰۹
انحراف معیار	۱,۳۶۳	۱,۸۱۲	۱,۵۱۸	۱,۶۴۲	۰,۹۸۹
واریانس	۱,۸۵۸	۳,۲۸۲	۲,۳۰۶	۲,۶۹۷	۰,۹۷۸
ضریب چولگی	۱,۲۴۱	۰,۵۴۶	۰,۴۵۱	۰,۴۱۸	۰,۵۵۱
ضریب کشیدگی	۲,۲۶۷	-۰,۵۴۸	-۰,۷۰۲	-۰,۴۸۴	-۰,۱۲۶
مینیمم	۱,۲۷۶	۱,۳۲۵	۱,۵۷۵	۱,۲۲۷	۱,۸۹
ماکسیمم	۸,۳۷۵	۸,۹۹۱	۸,۰۱۸	۸,۲۳۵	۶,۴
$P_{۲۵}$	۲,۰۱۷	۲,۳۹۴	۲,۸۱۲	۲,۴۵۹	۲,۹۵۱
$P_{۵۰}$	۲,۹۹۳	۳,۹۴	۳,۵۹۱	۴,۰۰۱	۳,۶۷۷
$P_{۷۵}$	۳,۸۹۵	۵,۲۲۱	۵,۲۵	۵,۰۰۱	۴,۴۰۴

در پژوهش حاضر، مطابق با مدل عملکرد تاب‌آوری تأمین کننده کوستا گوویندان و فیگوئریا (۲۰۱۸)، امتیاز مربوط به مؤلفه‌های ارزیابی تاب‌آوری قطعه‌سازان در ۴ بخش ارزیابی شده است. همچنین، شاخص میانگین تاب‌آوری (RES) از طریق اخذ میانگین از داده‌های مؤلفه‌ها به تفکیک گره‌ها تشکیل شده است. با توجه به این که آمادگی زنجیره‌های تأمین از منظر تاب‌آوری با توجه به پیچیدگی و عدم اطمینان محیطی انجام می‌شود، برای بررسی دقیق‌تر تاب‌آوری، مرز چارک‌ها برای نمرات میانگین وضعیت تاب‌آوری برای تمامی شرکت‌ها استخراج شده و داده‌های مربوط به خوشه‌ها در بخش بعدی، بر اساس آن‌ها نیز بررسی و ارزیابی شده است. با توجه به اطلاعات جدول (۴) و بدون استفاده از آمار استنباطی، می‌توان با نگاه اول و به وضوح مشاهده نمود که در

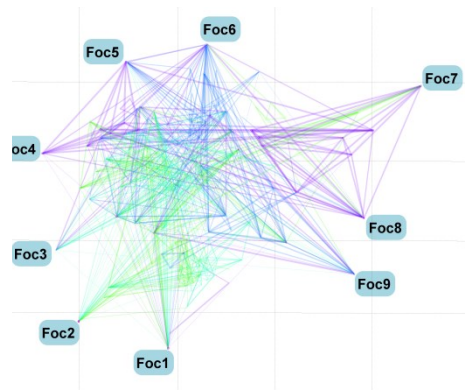
امتیازهای میانگین عملکرد مؤلفه‌های تاب‌آوری تأمین‌کننده‌ها در چهارچوب نمونه آماری نسبت به وضعیت ایده‌آل آن، فاصله وجود دارد.

ب) یافته‌ها و تحلیل‌های مرتبط با پیاده‌سازی خوشه‌بندی طیفی

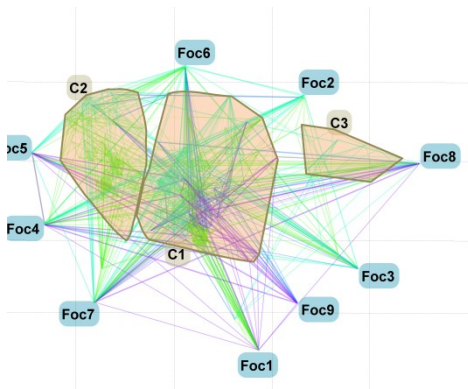
همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، در پژوهش حاضر از خوشه‌بندی طیفی از گونه خودتنظیم و بهنجارشده برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. همچنین، تنظیمات اعمال شده بر نوع افزاز، اجازه همپوشانی مابین اعضای متعلق به خوشه‌ها را فراهم نکرده است. دلیل این امر دستیابی به یافته‌های دارای قابلیت تفسیر بر مبنای ویژگی‌های متعامل مابین اجزاء در قالب یک کلیت و خصوصیات تک تک آن‌ها به صورت منحصر بفرد می‌باشد. در ادامه، یافته‌های مربوط به خروجی‌های الگوریتم یادگیری برای تشکیل گراف‌های شباهت (Gr) و خوشه‌بندی طیفی آن‌ها برای مدل‌سازی پیچیدگی افقی (Gr_{HC} در شکل ۲ و خوشه‌بندی در شکل ۳)، پیچیدگی عمودی (Gr_{VC} در شکل ۴ و خوشه‌بندی آن در شکل ۵) و پیچیدگی فضایی (Gr_{SC} در شکل ۶ و خوشه‌بندی آن در شکل ۷) ارائه شده است.



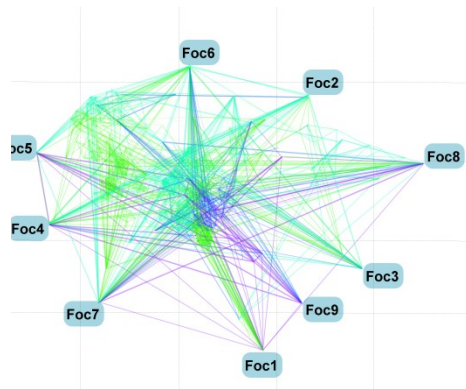
شکل ۳. خوشه‌بندی Gr_{HC}



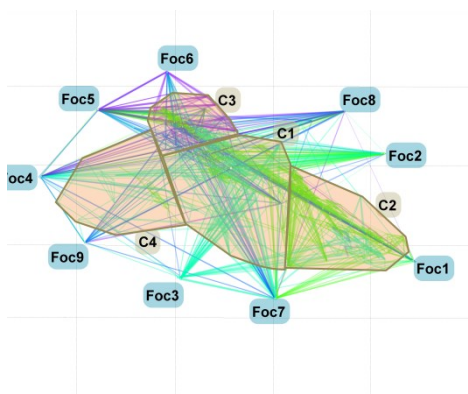
شکل ۲. Gr_{HC}



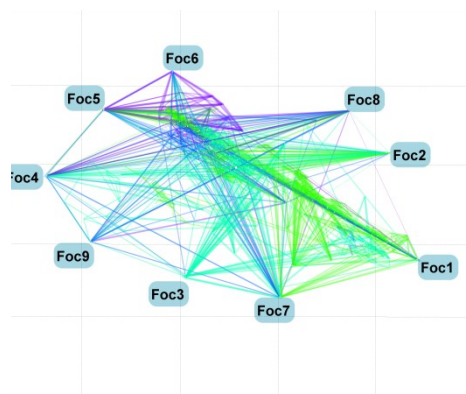
شکل ۵. خوشه‌بندی Gr_{VC}



شکل ۴. Gr_{VC}



شکل ۷. خوشه‌بندی Gr_{SC}



شکل ۶. Gr_{SC}

با اندکی دقت به شکل‌های ۲ تا ۷، ملاحظه می‌شود که هیچکدام از ریشه‌ها در مرز و داخل محدوده خوشه‌ها ظاهر نشده است. همان گونه که قبلاً هم اشاره گردید، این امر بدان دلیل است که اطلاعات مربوط به ریشه‌ها (Foc_i) یا کارخانه‌های کانونی در ماتریس‌های نهایی جدول ۱ قبل از ورود به محاسبات جبری حذف شده‌اند؛ در نتیجه خوشه‌بندی نشده‌اند (داده‌های Foc_i در محاسبات نهایی مربوط به ماتریس تشابه لحاظ نشده است). بنابراین، اطلاعات Foc_i در شکل‌های مزبور تنها شامل یال‌های ارتباط دهنده و لحاظ نمودن حداکثر فاصله با قطعه‌سازان مرتبط در لایه اول در محاسبات اولیه تشکیل گراف تشابه بوده است. برای انجام مرحله پس‌پردازش و تجزیه و تحلیل یافته‌ها بر اساس معیار وضعیت تعلق استخراج شده برای هر کدام از گره‌ها نسبت به خوشه‌ها، مقدار RES از طریق اخذ میانگین از امتیازهای ۴ مؤلفه عملکرد تاب‌آوری (آگاهی از

ریسک (RA)، واکنش پذیری (Re)، راهبردهای مدیریت ریسک (SRP) و انعطاف پذیری (Flex))، به تفکیک اعضای خوشه‌ها محاسبه و استخراج شده است. همچنین، این روند برای مؤلفه‌های عملکرد تاب‌آوری نیز اجرا شد. به علاوه، مقادیر قطر اصلی مربوط به شاخص پیچیدگی افقی (hc) به تفکیک خوشه‌ها استخراج و میانگین آن‌ها اخذ گردید. در جدول (۵)، وضعیت شاخص‌های تاب‌آوری در چهارچوب افرازی تأمین‌کننده‌ها بر مبنای گراف HC ارائه شده است.

جدول ۵. وضعیت شاخص‌های تاب‌آوری در افرازی تأمین‌کننده‌ها بر مبنای گراف HC

خوشه	شاخص	RA	Re	SRP	Flex	RES	hc	تعداد در خوشه درصد از کل
۱	میانگین در خوشه	۲۳۱,۵۲۸۳	۳,۵۲۸۳	۱,۶۴۳	۳,۴۲۴	۳,۵۱۱۳	۲,۵۰۸۳	۷۵
	رتبه بین خوشه‌ها	۲	۳	۲	۳	۳	۲	۲۹,۱۸
۲	میانگین در خوشه	۳۹۸,۲۸۹۲	۳,۲۸۹۲	۳,۸۶۴	۳,۰۴۱۲	۳,۰۱۲۳	۳,۹۷۷۳	۶۹
	رتبه بین خوشه‌ها	۴	۴	۳	۴	۴	۱	۲۶,۸۵
۳	میانگین در خوشه	۱۳۰,۴۰۵۳	۴,۴۰۵۳	۲,۸۵۹	۲,۰۹۰	۲,۷۰۱	۱,۶۰۲۳	۵۵
	رتبه بین خوشه‌ها	۳	۱	۴	۱	۲	۳	۲۱,۴
۴	میانگین در خوشه	۰,۷۹	۳,۹۴۸	۳,۳۱۹	۳,۹۸۰	۳,۰۷۱	۰,۹۶۱	۵۲
	رتبه بین خوشه‌ها	۱	۲	۱	۲	۱	۴	۲۰,۲۳

اطلاعات جدول (۵) یافته‌های افرازی تأمین‌کننده‌ها با خوشه‌بندی طیفی با استفاده از ترکیب اطلاعات لایه‌ای در قالب گراف شباهت Gr_{HC} (شکل ۲ و شکل ۳) از منظر مؤلفه‌های تاب‌آوری را نشان می‌دهد. مطابق با یافته‌ها، ۹۷/۶۷ درصد از گره‌ها یعنی تعداد ۲۵۱ تأمین‌کننده در ۴ خوشه اصلی نسبت به گراف شباهت پیچیدگی افقی افرازی شده است؛ مطابق با یافته‌ها، ۶ گره در خارج از خوشه‌ها و بدون افرازی شدن به خوشه‌های اصلی باقی مانده است. یافته‌های افرازی خوشه‌بندی Gr_{HC} نشان می‌دهد که بزرگترین خوشه دارای ۷۵ گره می‌باشد و از منظر وضعیت مؤلفه‌های تاب‌آوری (آگاهی از ریسک (RA)، واکنش‌پذیری (Re)، راهبردهای مدیریت ریسک (SRP) و انعطاف‌پذیری (Flex)) به ترتیب رتبه‌های دوم، سوم، دوم و سوم را در میان ۴ خوشه به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر، خوشه چهارم از منظر شاخص‌های عملکرد تاب‌آوری بخصوص در مؤلفه‌های RA و SRP و برآیند شاخص تاب‌آوری (RES) وضعیت نسبتاً بهتری نسبت به بقیه خوشه‌ها داشته است. به علاوه، خوشه سوم نیز تنها در Re و Flex نسبت به بقیه خوشه‌ها وضعیت بهتری داشته است. این امر در صورتی است که وضعیت اعضای خوشه

سوم از دو مؤلفه RA و SRP در رتبه‌های آخر قرار گرفته است. به علاوه، مقادیر میانگین درایه‌های مربوط به گره‌های خوشه سوم و چهارم در ماتریس قطری پیچیدگی افقی (hc_{ii}) به ترتیب ۱/۶۰۲ و ۰/۹۶۱ بوده است. مقایسه مقادیر شاخص مزبور با مقادیر استخراج شده برای خوشه‌های اول و دوم نشان دهنده بالا بودن مقدار این شاخص نسبت به خوشه‌های سوم و چهارم می‌باشد. از طریق نگرش تحلیلی از منظر مبانی نظری و روند محاسبات hc_{ii} در مدل ارائه شده، اگر تعاملات مابین کلیت و اجزاء با رویکرد نسبی گرا و داخل چهارچوب یک سیستم لحاظ گردد، آن‌گاه می‌توان نحوه تحلیل شاخص را بدین گونه ارائه نمود: اگر افزایش اول از گره‌ها دارای مقدار بیشتر شاخص hc_{ii} نسبت به افزایش دوم باشند، این امر نشان دهنده وقوع یکی از دو حالت ذیل است: ۱) وجود تکاثر بالای تعداد تأمین‌کننده‌ها در لایه اول مابین اعضای افزایش اول نسبت به اعضای افزایش دوم و ۲) زیاد بودن میزان خرید دوره‌ای از تأمین‌کننده‌های لایه اول نسبی در افزایش اول نسبت به افزایش دوم. با توجه به رویکرد تحلیلی ارائه شده، می‌توان گفت که تأمین‌کننده‌های افزایش شده در دو خوشه سوم و چهارم، نسبت به دو خوشه اول و دوم با تأمین‌کننده‌های لایه اول بالارده خود تبادل کمتری داشته‌اند. این امر نشان دهنده وجود میزان کمتر اثر تأمین‌کننده‌ها در روند تولید محصولات در خوشه‌های سوم و چهارم نسبت به خوشه‌های اول و دوم می‌باشد. لذا، می‌توان بدین گونه تعبیر نمود که تأمین‌کننده‌های افزایش شده در دو خوشه اول و دوم از ساختار تخصصی و مهارتی پهن‌تر و عریض‌تری نسبت به دو خوشه سوم و چهارم برخوردار بوده‌اند. از سوی دیگر، داده‌های مربوط به میانگین مؤلفه‌های تاب‌آوری در جدول (۱) نیز نشان می‌دهد که دو خوشه سوم و چهارم نسبت به خوشه‌های اول و دوم در وضعیت بهتری از لحاظ تاب‌آوری قرار داشته است. خوشه‌های سوم و چهارم مجموعاً ۱۰۷ گره (تأمین‌کننده) را در بر دارد که حدود ۴۱٪ از کل تأمین‌کننده‌های نمونه آماری را شامل شده است. همچنین، بررسی وضعیت تأمین‌کننده‌ها نسبت به ارتباط با ریشه‌های گراف نشان داد که خوشه‌های سوم و چهارم بیشترین فراوانی عضویت را (به ترتیب) با کارخانه‌های کانونی Foc_v ، Foc_1 ، Foc_2 و Foc_8 داشته‌اند. در این میان، خوشه چهارم میزان شاخص تاب‌آوری بالاتری نسبت به سایر خوشه‌ها داشته است.

در جدول (۶)، وضعیت شاخص‌های تاب‌آوری در افزایش‌های تأمین‌کننده‌ها بر مبنای گراف VC (برای بررسی اثر پیچیدگی عمودی) ارائه شده است. یافته‌های افزایش‌بندی نشان داد که حدود ۹۸٪ از گره‌ها یعنی تعداد ۲۵۲ تأمین‌کننده در ۳ خوشه اصلی افزایش شده است

و ۵ گره به صورت افراز نشده باقی مانده است. اعضای خوشه اول بدترین وضعیت از منظر مؤلفه‌های تاب‌آوری را به خود اختصاص داده‌اند. از سوی دیگر، خوشه اول از منظر پیچیدگی سلسله‌مراتبی رتبه اول را به خود اختصاص داده است. تمامی مؤلفه‌های تاب‌آوری برای خوشه سوم، در رتبه اول نسبت به سایر خوشه‌ها قرار داشته و مقدار عددی میانگین تاب‌آوری مابین گره‌های حاضر در این خوشه ۵/۱۸۸ بوده است. همچنین، بررسی گره‌های خوشه مزبور پیرامون به ارتباط با ریشه‌های گراف نشان داد که خوشه سوم بیشترین فراوانی عضویت را (به ترتیب) با کارخانه‌های کانونی Foc_8 و Foc_1 داشته است.

جدول ۶. وضعیت شاخص‌های تاب‌آوری در افراز تأمین‌کننده‌ها بر مبنای گراف شباهت VC

خوشه	شاخص	RA	Re	SRP	Flex	RES	vc	تعداد در خوشه	درصد از کل
۱	میانگین در خوشه	۲,۸۷۲	۳,۹۱۱	۳,۱۹۱	۳,۸۷۲	۳,۱۱۳	۳,۸۱۳	۱۱۹	۴۶,۳
	رتبه در بین خوشه‌ها	۳	۳	۳	۳	۳	۱		
۲	میانگین در خوشه	۳,۵۲۵	۳,۹۵۴	۴,۰۹۳	۳,۸۸۷	۳,۶۶۲	۴,۴۹	۱۱۴	۴۴,۳۶
	رتبه در بین خوشه‌ها	۲	۲	۲	۲	۳	۲		
۳	میانگین در خوشه	۵,۱۴۸	۴,۱۶۰	۵,۹۶۹	۵,۱۱۵	۵,۱۸۸	۲,۱۶	۱۹	۷,۳۹
	رتبه در بین خوشه‌ها	۱	۱	۱	۱	۱	۳		

پیچیدگی عمودی یا سلسله‌مراتبی، موقعیت بالادست گره‌ها با در نظر گرفتن تعداد کل لایه‌های آن در داخل زنجیره تأمین را نشان می‌دهد. از منظر نظری، ادعا می‌شود که هر میزان تعداد لایه‌ها زیادتر باشد، منجر به افزایش پیچیدگی سلسله‌مراتبی شده و میزان واکنش‌های بالقوه زنجیره‌ای و وقوع اختلال افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن نحوه محاسبه مقادیر vc_{ii} و یافته‌های ستون VC در جدول (۶) می‌توان گفت که ارتباط معکوس مابین عملکرد تاب‌آوری اجزاء و میزان پیچیدگی سلسله‌مراتبی در محیط پیرامون برای تأمین‌کننده‌ها، بخصوص با در نظر گرفتن وضعیت خوشه دوم قابل مشاهده و استنتاج می‌باشد. البته این واقعیت که تعداد اعضای خوشه سوم تنها ۷/۳۹ درصد از کل گره‌ها می‌باشد، از اعتبار استنتاج ارائه شده کم نمی‌کند. این امر به دلیل فاصله نسبتاً بالای مابین مقدارهای شاخص VC خوشه دوم در مقایسه با سایر خوشه‌ها با در نظر گرفتن این که مقدار بیشینه برای طولانی‌ترین رشته در بالارده نسبی مرتبط با هر کدام از تأمین‌کننده‌ها (در ارتباط با یک زنجیره تأمین مشخص)، حداکثر ۷ لایه گزارش شده است.

با توجه به این که درایه‌های شاخص پیچیدگی فضایی در $SC_{n \times n}$ مانند دو ماتریس قبلی ($VC_{n \times n}$ و $HC_{n \times n}$) در قالب ماتریس قطری وارد گراف تشابه نشده است، لذا برای تشکیل شاخص پیچیدگی فضایی و تحلیل آن در سطح تأمین‌کننده‌ها، از جمع سطری درایه‌های $SC_{n \times n}$ به صورت $Lsc_{ii} = \sum_{j=1}^n SC_{ji}$ استفاده شده است. بدین گونه می‌توان معیاری مشخص در ارزیابی پیچیدگی فضایی برای هر کدام از گره‌ها ارائه نمود. در جدول (۷)، وضعیت شاخص‌های تاب‌آوری اجزای زنجیره تأمین مطابق با افرازهای تشکیل شده در خوشه‌بندی طیفی بر مبنای گراف شباهت تشکیل شده مربوط به ارزیابی پیچیدگی فضایی (Gr_{SC}) در تعاملات اجزای سیستم ارائه شده است. بر اساس یافته‌های مرتبط با وضعیت شاخص‌های تاب‌آوری در افراز تأمین‌کننده‌ها بر مبنای گراف شباهت پیچیدگی فضایی (Gr_{SC})، ۹۵/۷۱ درصد از گره‌ها یعنی ۲۴۶ تأمین‌کننده در ۴ خوشه اصلی در Gr_{SC} افراز شده‌است.

جدول ۷. وضعیت شاخص‌های تاب‌آوری در افراز تأمین‌کننده‌ها بر مبنای گراف SC

خوشه	شاخص	RA	Re	SRP	Flex	RES	Lsc	تعداد در خوشه درصد از کل
۱	میانگین در خوشه	۲,۳۹۵	۳,۱۹۲	۳,۸۵۲	۳,۷۶۹	۳,۳۹۵	۱,۹۵۰	۸۹
	رتبه در بین خوشه‌ها	۴	۴	۳	۳	۳	۲	
۲	میانگین در خوشه	۳,۱۱۲	۳,۸۷۳	۴,۱۴۴	۳,۹۲۲	۳,۶۹۱	۱,۱۰۷	۷۵
	رتبه در بین خوشه‌ها	۲	۲	۲	۲	۲	۳	
۳	میانگین در خوشه	۴,۵۹۳	۵,۲۲۹	۵,۲۰۸	۵,۱۹۵	۵,۱۰۱	۰/۴۲۷	۴۹
	رتبه در بین خوشه‌ها	۱	۱	۱	۱	۱	۴	
۴	میانگین در خوشه	۲,۸۶۹	۳,۲۷۵	۲,۹۶۷	۲,۹۵۲	۲,۹۰۲	۳,۲۴۰	۳۳
	رتبه در بین خوشه‌ها	۳	۳	۴	۴	۴	۱	

بررسی یافته‌های مربوط به وضعیت مؤلفه‌ها با لحاظ نمودن افرازهای استخراج شده بر مبنای گراف پیچیدگی فضایی نشان‌دهنده آن است که خوشه سوم وضعیت بهتری از منظر تاب‌آوری نسبت به باقی خوشه‌ها داشته است. به علاوه، بررسی ستون LSC برای خوشه سوم نشان‌دهنده آن است که گره‌های این خوشه پایین‌ترین مقدار تجمعی شاخص پیچیدگی فضایی را به خود اختصاص داده‌اند. اعضای خوشه سوم حدود ۱۹٪ از کل خوشه‌های نمونه‌گیری شده را تشکیل داده‌اند که مطابق با آمار جدول ۱، وضعیت شاخص‌های

تاب آوری برای همه آن‌ها در حول و حوش مرز چارک سوم (P_{vh}) نسبت به سایر داده‌های مربوط به تأمین‌کننده‌های دیگر بوده است. از سوی دیگر، خوشه چهارم که شامل ۱۲/۸۴٪ از گره‌ها بوده است، بالاترین مقدار شاخص تجمعی پیچیدگی فضایی را به خود اختصاص داده است. با توجه به این که خوشه مزبور پایین‌ترین رتبه تاب آوری (RES) را در میان خوشه‌های دیگر اخذ نموده است، لذا می‌توان استدلال کرد که وجود پیچیدگی فضایی بر عملکرد اعضای خوشه چهارم تأثیر معکوس داشته و عملکرد تاب آوری آن را کاهش داده است.

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر مدل ارزیابی اثرات متقابل مابین طرح ساختاری و اجزای بالادست زنجیره‌های تأمین از منظر عملکرد تاب آوری با رویکرد داده‌کاوی ارائه شده است. با استفاده از مدل ارائه شده، روشی برای ارزیابی تأثیر ساختار زنجیره‌های تأمین از منظر سه مؤلفه پیچیدگی (افقی، عمودی و فضایی) بر عملکرد اجزای آن از منظر تاب آوری با رویکرد داده‌کاوی ارائه شده است. در راستای ارائه یک جمع‌بندی، دستاوردهای پژوهش را می‌توان به دو بخش عمده تقسیم‌بندی نمود. بخش اول مربوط به چگونگی تشکیل روابط و ماتریس‌های داده‌ها در قالب مدل ارزیابی طرح ساختاری بخصوص از منظر پیچیدگی افقی، عمودی و فضایی بوده است. در پژوهش حاضر، به تطبیق نسبی مفهوم پیچیدگی سازمان در تئوری‌های مدیریت عمومی ساختار بر زنجیره‌های تأمین پرداخته شده است. رویکرد تجزیه و تحلیل داده‌ها از نوع داده‌کاوی و با روش خوشه‌بندی طیفی خودتنظیم بر مبنای ماتریس لاپلاس بهنجار شده انجام شده است. نوآوری مرتبط با بخش اول این پژوهش، ایجاد مدلی بر پایه استفاده توأم از داده‌های تعاملی (در چهارچوب سیستم) و داده‌های اجزای سیستم برای ورود به سیستم یادگیری ماشینی و استخراج یافته‌ها از آن بوده است.

بخش دوم از دستاوردهای پژوهش، یافته‌های میدانی آن می‌باشد. داده‌های میدانی پژوهش در طی یک روند نسبتاً طولانی از میان قطعه‌سازان مرتبط با کارخانه‌های کانونی در بالادست صنعت قطعه‌سازی خودرو گردآوری شده است. یافته‌ها، تأثیر متقابل و در هم‌تنیده ساختار زنجیره‌های تأمین مرتبط با تأمین‌کننده‌ها با امتیاز عملکرد تاب آوری آن‌ها را نشان داده است. با در نظر گرفتن این امر که سطح مناسب از عملکرد تاب آوری در محیط‌های کسب و کار مختلف، بر اساس میزان عدم اطمینان محیطی می‌تواند تغییر کند، عملکرد اجزاء با حالت ایده‌آل مقایسه نشد؛ به‌جای آن، وضعیت نسبی مؤلفه‌های عملکرد

تاب‌آوری بر مبنای معیارهای ارزیابی پیچیدگی ساختار، مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به یافته‌ها، به صورت کلی می‌توان گفت که رابطه معکوسی مابین مؤلفه‌های پیچیدگی (افقی، عمودی و فضایی) با عملکرد تاب‌آوری تأمین‌کننده‌ها وجود داشته است. همچنین، ضعف‌های ساختاری زنجیره‌ها به تفکیک تأمین‌کننده‌ها از یافته‌های مدل پژوهش حاضر در راستای انجام اقدامات اصلاحی ساختار و تقویت اجزاء و نهایتاً تقویت زنجیره‌های تأمین قابل استخراج و تحلیل می‌باشد.

در این پژوهش روشی برای ارزیابی کمی درهم‌تنیدگی‌های مربوط به ویژگی‌های ساختار زنجیره‌های تأمین به همراه لحاظ نمودن ویژگی‌های عملکردی اجزای آن بر اساس پارادایم تاب‌آوری ارائه شده است. با توجه به ذات و ماهیت پیچیده زنجیره‌های تأمین، پیش‌بینی می‌شود استفاده از رویکردهای تحلیلی مبتنی بر داده‌کاوی و یادگیری ماشینی در آینده در خصوص ارزیابی مدل‌های مختلف طرح و ساختار زنجیره‌های تأمین گسترده‌تر شود. این امر با توجه به نیاز سازمان‌ها در خصوص آسیب‌شناسی عملی و کارکردگرا از زنجیره‌ها در راستای تلاش برای ارتقای تاب‌آوری و کاستن از ریسک‌ها و مخاطرات ناشی از کلیت سیستم و اجزای آن ناشی می‌شود. کاوش و پژوهش در خصوص ساختار زنجیره‌های تأمین به همراه لحاظ نمودن ویژگی‌های اجزاء، یکی از رویکردهای نسبتاً نوین است که می‌تواند پیچیدگی و درهم‌تنیدگی‌های مربوط به سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی در چهارچوب زنجیره‌های تأمین را بیش از پیش آشکار نماید. استفاده از رویکردهای کاربردی و نوین داده‌کاوی همچون روش‌های خوشه‌بندی طیفی، این امکان را فراهم می‌کند که داده‌های مشترک و مابین اجزای به هم پیوسته و متعامل در چهارچوب زنجیره‌های تأمین، در کنار داده‌های غیرمتعامل و تفکیک شده و در مقیاس‌های متنوع از جمله اعداد، متون، نمادها (مانند نماد ارتباط و عدم ارتباط شبکه‌ای در چهارچوب همسایگی) و داده‌های دیگر را با هم ترکیب کرد. پژوهشگران با تکیه بر چهارچوب محکم جبری در خوشه‌بندی طیفی، بدون این که مشکلاتی نظیر گیر افتادن در دام بهینه‌های محلی و یا پیش‌فرض‌های محدب یا مقعر بودن شکل خوشه‌ها را داشته باشند، به راحتی می‌توانند افرازهای مورد نیاز را با لحاظ نمودن داده‌های مرتبط با تعاملات اجزاء در شبکه‌ها استخراج نمایند. این برتری روش‌های خوشه‌بندی طیفی نسبت به روش‌های متداول مانند افراز میانگین یا رویکرد سلسله‌مراتبی، آن را برای استخراج کاربردهایش در مباحث بین‌رشته‌ای نظیر پژوهش و مطالعه در خصوص زنجیره‌های تأمین جذاب نموده است.

References

- Bode, C., & Wagner, S. M. (2015). Structural drivers of upstream supply chain complexity and the frequency of supply chain disruptions. *Journal of operations Management*, 36, 215-228.
- Chen, C., & Morris, S. (2003). *Visualizing evolving networks: minimum spanning trees versus pathfinder networks*. Paper presented at the Symposium on Information Visualization (IEEE Cat. No.03TH8714), 19-21 Oct. 2003, USA, 67-74.
- Costa, A. S., Govindan, K., & Figueira, J. R. (2018). Supplier classification in emerging economies using the ELECTRE TRI-nC method: A case study considering sustainability aspects. *Journal of Cleaner Production*, 201, 925-947. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.285>
- Ding, S., Jia, H., Du, M., & Xue, Y. (2018). A semi-supervised approximate spectral clustering algorithm based on HMRf model. *Information Sciences*, 429, 215-228. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.11.016>
- Kim, Y., Chen, Y.-S., & Linderman, K. (2015). Supply network disruption and resilience: A network structural perspective. *Journal of operations Management*, 33, 43-59.
- Li, X.-Y., & Guo, L.-J. (2012). Constructing affinity matrix in spectral clustering based on neighbor propagation. *Neurocomputing*, 97, 125-130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.06.023>
- Mellat Parast, M. (2020). The impact of R&D investment on mitigating supply chain disruptions: Empirical evidence from U.S. firms. *International Journal of Production Economics*, 227, 107671. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107671>
- Partl, C., Gratzl, S., Streit, M., Wassermann, A. M., Pfister, H., Schmalstieg, D., & Lex, A. (2016). *Pathfinder: Visual analysis of paths in graphs*. Paper presented at the Computer Graphics Forum.
- Pettit, T. J., Croxton, K. L., & Fiksel, J. (2019). The Evolution of Resilience in Supply Chain Management: A Retrospective on Ensuring Supply Chain Resilience. *Journal of Business Logistics*, 40(1), 56-65.
- Poudel, S. R., Marufuzzaman, M., & Bian, L. (2016). Designing a reliable bio-fuel supply chain network considering link failure probabilities. *Computers & Industrial Engineering*, 91, 85-99. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.11.002>

- Pournader, M., Rotaru, K., Kach, A. P., & Hajiagha, S. H. R. (2016). An analytical model for system-wide and tier-specific assessment of resilience to supply chain risks. *Supply Chain Management: An International Journal*, 21(5), 589-609. doi:doi:10.1108/SCM-11-2015-0430
- Shi, J., & Malik, J. (2000). Normalized cuts and image segmentation. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(8), 888-905.
- Sokolov, B., Ivanov, D., Dolgui, A., & Pavlov, A. (2016). Structural quantification of the ripple effect in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 54(1), 152-169. doi:10.1080/00207543.2015.1055347
- Tomaskovic-Devey, D., Leiter, J., & Thompson, S. (1994). Organizational survey nonresponse. *Administrative Science Quarterly*, 439-457.
- Tukamuhabwa Rwakira, B., Busby, J., & Stevenson, M. (2015). *Supply chain resilience: a case study analysis of a supply network in a developing country context*. (Ph.D), Lancaster University.
- Von Luxburg, U. (2007). A tutorial on spectral clustering. *Statistics and computing*, 17(4), 395-416.
- Wagner, S. M., & Neshat, N. (2010). Assessing the vulnerability of supply chains using graph theory. *International Journal of Production Economics*, 126(1), 121-129. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.10.007
- Xu, S., Zhang, X., Feng, L., & Yang, W. (2020). Disruption risks in supply chain management: a literature review based on bibliometric analysis. *International Journal of Production Research*, 58(11), 3508-3526. doi:10.1080/00207543.2020.1717011