Journal of Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2423-6950
Vol. 12, Issue 3, No. 26, Autumn 2021
http://dx.doi.org/10.22108/jpom.2022.127587.1377

(Research Paper)

Proposing an optimization model by simultaneous consideration of the interactions between modules and the relationships among suppliers, With a case study on the electro-optical camera

Seyed Mohammad Sajadiyan
Faculty of Management & Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran, sajadiyan@pnu.ac.ir
Reza Hosnavi *
Faculty of Management & Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran, hosnavi@mut.ac.ir
Mahdi Karbasian
Faculty of Management & Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran, mkarbasi@mut-es.ac.ir
Morteza Abbasi
Faculty of Management & Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran, mabbasi@mut.ac.ir

Purpose: To address problems in product development, decisions about product architecture and supply chain, and specially supplier network, are usually sequenced. This study aims to propose a model considering the product architecture and the supplier network at the same time in the early stages of product design for two optimization goals: i) to increase the weight of the supplier cooperation network; and to minimize the total cost of transactions and the proposed modules' cost. The relationship between suppliers and within and between modules has been also considered in the early stages of design. The cost of interactions has been estimated, using clustering to obtain the Design Structure Matrix (DSM). The proposed solution was examined in an artificial network and on the electro-optical camera. This research aims to minimize interaction costs and maximize suppliers' collaboration networks.

* Corresponding author

2423-6950 / © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Design/methodology/approach: In the first step, a DSM was developed for Product Architecture. Then the mathematical optimization MO_MINLP with a two objective model was developed. The proposed model was solved by GAMS software using Weighted Sum, LP metric, and augmented epsilon constraint methods. Consequently, the results were compared and a sensitivity analysis was performed.

Findings: The model aimed to minimize costs, including the total cost of internal and external transactions. The module proposed cost and maximized the weight of the supplier cooperation network. To evaluate the model, an artificial numerical problem and a real problem on the electro-optical camera were studied. The experimental results confirmed that the proposed model can effectively design supplier networks and assign modules to the best suppliers. The analysis of the results indicated that considering the transactions cost and supplier cooperation network simultaneously in a bi-objective model more effectively optimizes and designs the supplier network. The model's solution results implied reduced redesign and rework with minimum cost. The results also highlighted:

i) Simultaneous consideration of product architecture and supplier network in the form of a team and network of suppliers.
ii) Nonlinear bi-objective model: to increase the weight of the supplier cooperation network; and to minimize the total cost of internal and external interactions for the realization of product modules for the main manufacturer and the module proposed cost by the supplier, taking into account the skills and capacity and supporting suppliers.
iii) Considering the relationship between suppliers and within and between modules
iv) Assisting in the selection of the right supplier in the early stages of design
v) Estimation of the cost of interactions, using DSM clustering.

Research limitations/implications: In the case study, the most critical limitation in collecting necessary information and developing a computational model was the lack of historical data for product architecture and parameters.

Practical implications: Applying the proposed approach reduced the cost of product design and its associated operations. Practitioners can use this approach in selecting the best supplier and modules. The proposed approach reduced rework and redesign and supplier network costs in early product design processes.

Social implications: Implementation of the proposed approach decreased social costs by reduced rework and redesign and supplier network costs in early product design processes. Such an achievement was also related to the social network of suppliers.

Originality/value: The proposed mathematical model innovatively integrated product architecture and supplier network using MO_MINLP and used the results to optimize a typical industrial product.

Keywords: Product architecture, Design Structure Matrix (DSM), Collaborative costs; Supply chain design; Collaboration network; Relationships between suppliers; Optimization

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۲، شماره ۳، پیاپی ۲۶، پاییز ۱۴۰۰
دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱ ص ۴۱-۶۴
http://dx.doi.org/10.22108/jpom.2022.127587.1377

(مقالهٔ پژوهشی)

مدل بهینه‌سازی دوهدفهٔ پیوند معماری محصول و شبکهٔ تأمین‌کنندگان، با در نظر گرفتن همزمان ارتباطات بین تأمین‌کنندگان و بین ماژول‌ها (مطالعهٔ کاربردی دوربین الکترواپتیکی)

سید محمد سجادیان[۱]، رضا حسنوی*[۲]، مهدی کرباسیان[۳]، مرتضی عباسی[۴]

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، sajadiyan@pnu.ac.ir
۲- استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، hosnavi@mut.ac.ir
۳- دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، mkarbasi@mut-es.ac.ir
۴- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، mabbasi@mut.ac.ir

چکیده: هدف از این پژوهش، ارائهٔ مدل بهینه‌سازی دوهدفهٔ برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی جدید، برای انطباق و پیوند معماری محصول و شبکهٔ تأمین‌کنندگان در قالب انتخاب تیمی از تأمین‌کنندگان کلیدی، در ابتدای مراحل و فرایند طراحی و توسعهٔ محصول، برای واگذاری ماژول‌های محصولات، با کمترین هزینهٔ تعاملات است که تعداد معینی مهارت (شایستگی، قابلیت و دانش) و بهترین سابقهٔ همکاری را با یکدیگر دارند و ارتباطات بین تأمین‌کنندگان و نیز ظرفیت و تخصیص سفارش را در نظر می‌گیرند. معمولاً در توسعهٔ محصول، تصمیمات دربارهٔ معماری محصول و شبکهٔ تأمین‌کنندگان به‌ترتیب توالی گرفته می‌شود. مدل ریاضی پیشنهادی، تعداد تأمین‌کنندگان تیم اصلی را پویا در نظر گرفت و برای هریک از تأمین‌کنندگان اصلی، حداقل یک و حداکثر دو پشتیبان ارائه داد و تیمی از تأمین‌کنندگان را به‌عنوان اصلی و پشتیبان در نظر گرفت. بنابراین برتری این پژوهش، در نظر گرفتن همزمان معماری محصول و شبکهٔ تأمین‌کنندگان، در قالب تیمی از تأمین‌کنندگان با دو هدف است: ۱) بیشینه‌کردن وزن شبکهٔ همکاری تأمین‌کنندگان؛ ۲) کمینه‌کردن مجموع کل هزینهٔ تعاملات داخلی و خارجی برای تحقق ماژول‌های محصول و برای تولیدکنندهٔ اصلی و هزینهٔ پیشنهادی ماژول توسط تأمین‌کننده، با در نظر گرفتن مهارت، ظرفیت، سفارش و تأمین‌کنندگان پشتیبان. همچنین ارتباط بین تأمین‌کنندگان و درون و بین ماژول‌ها را در نظر گرفت و در فازهای اولیهٔ طراحی، تخمینی از هزینهٔ تعاملات را با استفاده از خوشه‌بندی ماتریس ساختار طراحی به دست آورد. این مدل با یک مطالعهٔ عددی در یک مجموعه دادهٔ مصنوعی و یک دادهٔ واقعی برای یک محصول صنعتی، دوربین الکترواپتیکی ارزیابی شد و با روش‌های مجموع وزنی، الپی‌متریک و محدودیت اپسیلون تقویت‌شده حل و نتایج مقایسه شد و تحلیل حساسیت نیز انجام شد. ترکیب بهینهٔ تأمین‌کنندگان در اوایل فازهای طراحی، با توجه به مهارت‌ها، شبکهٔ همکاری، ظرفیت، پشتیبان و تخصیص سفارش به شرکت‌های تولیدی در انجام پروژه‌ها یا عملیات خود کمک خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: معماری محصول ماژولار، هزینه‌های تعاملات، طراحی شبکهٔ تأمین‌کنندگان، شبکهٔ همکاری، ارتباطات بین تأمین‌کنندگان، مدل بهینه‌سازی

* نویسنده مسئول

2423-6950 / © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

۱- مقدمه

بنگاه‌ها و شرکت‌های تولیدی بر توانایی‌ها و شایستگی‌های اصلی خود متمرکز می‌شوند تا در رقابت شدید پیروز شوند (نپال[۱] و همکاران، ۲۰۱۲). این تمرکز باعث می‌شود شرکت‌های تولیدی سهم زیادی را از ارزش‌آفرینی خود در توسعه و تولید، به تأمین‌کنندگان خود منتقل کنند (باردی[۲]، ۲۰۰۲)؛ درنتیجه شبکهٔ تأمین با سه اقدام گزارش‌شده (بنکه[۳] و همکاران، ۲۰۱۴) عملکرد اقتصادی شرکت‌های تولیدی را پیش می‌برد: (۱) عملکرد فردی تأمین‌کنندگان انتخاب‌شده؛ (۲) ترتیب آنها و ساختار شبکهٔ تأمین؛ (۳) مطابقت بین شبکهٔ تأمین و معماری محصول (وانتددو[۴] و دیگران، ۲۰۱۱). مقالهٔ حاضر بر تطبیق بین معماری محصول و شبکهٔ تأمین‌کنندگان، با مدل برنامه‌ریزی ریاضی تمرکز دارد. در توسعهٔ محصول، تصمیمات دربارهٔ معماری محصول و شبکهٔ تأمین، معمولاً به‌ترتیب توالی گرفته می‌شود و این امر به تصمیمات غیر بهینه منجر می‌شود؛ زیرا رویکردهای موجود، راه‌حل‌های بهینهٔ محلی را برای مراحل مختلف توالی تصمیم ارائه می‌دهد (نپال[۵] و همکاران، ۲۰۱۲). تصمیم‌گیری هم‌زمان ازطریق طراحی هم‌زمان معماری محصول و شبکهٔ تأمین، نوید یک عملکرد ایده‌آل را برای کل شبکهٔ تأمین می‌دهد (گان و گرونو، ۲۰۱۳)؛ درنتیجه توانایی طراحی معماری محصول به‌موازات شبکهٔ تأمین، به‌عنوان صلاحیت اصلی شرکت‌های تولیدی تکامل می‌یابد. انتخاب تأمین‌کننده، یکی از گسترده‌ترین مسائل موجود در پژوهش است (آیسائویی[۶] و همکاران، ۲۰۰۷ ؛ عوادنی[۷] و همکاران، ۲۰۱۹؛ نصر[۷] و همکاران، ۲۰۲۱). مناسب‌ترین ابزار تصمیم‌گیرندگان برای فرمول‌بندی مسئلهٔ انتخاب تأمین‌کنندگان، برنامه‌ریزی ریاضی است (آیسائویی و همکاران، ۲۰۰۷ ؛ جدیدی[۸] و همکاران، ۲۰۱۴). مسئلهٔ انتخاب تأمین‌کنندهٔ مناسب (ماهرو شایسته) از دغدغه‌های هر شرکت تولیدی، به‌ویژه در مراحل اولیهٔ طراحی محصولات است. همچنین ارتباط میان تأمین‌کنندگان حوزهٔ مهمی است که توجه زیادی را به خود جلب کرده است (کریم‌میان و همکاران، ۲۰۱۸). انتخاب پشتیبان نیز درخور توجه برخی از پژوهشگران قرار گرفته است (هو[۹] و همکاران، ۲۰۱۰؛ آکلا[۱۰] و همکاران، ۲۰۰۲؛ ترابی[۱۱] و همکاران، ۲۰۱۵؛ رضائی[۱۲] و همکاران، ۲۰۲۰).

بنابراین در این پژوهش، یک محصول مانند دوربین الکترواپتیکی در ابتدای فازهای طراحی محصول در نظر گرفته شده است که معماری محصول در قالب ماتریس ساختار طراحی، که تعاملات فیزیکی را بین اجزای محصول در بر دارد، قبلاً ایجاد شده است. بنابراین تعداد ماژول‌ها پس از خوشه‌بندی مشخص است. ماتریس ساختار طراحی برای تخمین هزینه‌های تعاملات داخلی و خارجی، برای تحقق طراحی محصول استفاده می‌شود. همچنین تعداد تأمین‌کنندگان بالقوه وجود دارد که سابقه و شبکهٔ همکاری آنها، براساسِ سوابق همکاری‌هایی در دسترس است که قبلاً با یکدیگر داشته‌اند. همچنین مهارت موجود تأمین‌کنندگان، مهارت‌ها و سفارش‌های لازم برای هر ماژول و ظرفیت موجود هر تأمین‌کننده برای هر ماژول نیز مشخص است. هدف تشکیل و انتخاب شبکهٔ تأمین‌کنندگان کلیدی برای واگذاری ماژول‌های محصولات، با کمترین هزینهٔ تعاملات است که تعداد معینی مهارت (شایستگی، قابلیت و دانش) و بهترین سابقهٔ همکاری را با یکدیگر دارند و ارتباطات بین تأمین‌کنندگان و نیز ظرفیت را در نظر می‌گیرند. مدل ریاضی پیشنهادی، غیرخطی با دو هدف متناقض است که تعداد تأمین‌کنندگان تیم اصلی را پویا در نظر می‌گیرد؛ یعنی تعداد تأمین‌کننده برای هر ماژول در تیم اصلی، توسط شرکت اصلی تعیین‌شدنی است و برای هریک از تأمین‌کنندگان اصلی، حداقل یک و حداکثر دو پشتیبان ارائه می‌دهد و تیمی از تأمین‌کنندگان را به‌عنوان

اصلی و تیمی را به‌عنوان پشتیبان در نظر می‌گیرد. دو هدف اصلی: ۱) بیشینه‌کردن وزن شبکهٔ همکاری تأمین‌کنندگان؛ ۲) کمینه‌کردن مجموع کل هزینهٔ تعاملات داخلی و خارجی برای تحقق ماژول‌های محصول، برای تولیدکنندهٔ اصلی و هزینهٔ پیشنهادی ماژول توسط تأمین‌کننده، با در نظر گرفتن مهارت، سفارش، ظرفیت و تأمین‌کنندگان پشتیبان است.

با توجه به مرور مطالعات، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه، دو موضوع معماری محصول و شبکهٔ تأمین‌کنندگان را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند. مقاله‌ای یافت نشد که هم‌زمان در مدل ریاضی، ارتباطات ماژول‌های محصول و نیز شبکهٔ همکاری را در نظر گرفته باشد. همچنین بیشتر آنها الگوی راهنما ارائه داده‌اند و از مدل تک‌هدفه و حل دقیق و فضای حل محدود استفاده کرده‌اند، در حالی که در پژوهش حاضر، هر دو نوع از ارتباطات بین تأمین‌کنندگان و ماژول‌ها بررسی شده و مهارت‌ها، ظرفیت، تخصیص سفارش و تیم پشتیبان هم‌زمان در مدل در نظر گرفته شده است. این مدل دوهدفه با روش‌های مجموع وزنی، الپی‌متریک و محدودیت اپسیلون تقویت‌شده با استفاده از نرم‌افزار گمز، دقیق حل شده است و هدف‌های بیشینه‌کردن وزن شبکهٔ همکاری، هزینهٔ تعاملات و هزینهٔ پیشنهادی ماژول‌ها کمینه شده و محدودیت‌ها و مفروضات مدل، همچون مهارت‌ها، ظرفیت، تخصیص سفارش و تیم پشتیبان برآورده شده است. نوآوری اصلی، در نظر گرفتن هم‌زمان شبکهٔ همکاری بین تأمین‌کنندگان، هزینهٔ ارتباطات و تعاملات و درون و بین ماژول‌ها برای تخصیص ماژول و سفارش به تأمین‌کننده است. همچنین به مدل دوهدفهٔ غیرخطی اشاره می‌شود: ۱) بیشینه‌کردن وزن شبکهٔ همکاری تأمین کنندگان؛ ۲) کمینه کردن مجموع کل هزینهٔ تعاملات داخلی و خارجی و هزینهٔ پیشنهادی ماژول، در نظر گرفتن مهارت و ظرفیت و تأمین‌کنندگان پشتیبان، کمک به انتخاب تأمین‌کنندهٔ مناسب در فازهای اولیهٔ طراحی، تخمینی از هزینهٔ تعاملات با استفاده از خوشه‌بندی ماتریس ساختار طراحی. پس از مقدمه، مبانی نظری و پیشینهٔ پژوهش ارائه خواهد شد. بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش و بخش چهارم، مدل پیشنهادی را براساسِ مفروضات توصیف می‌کند. در بخش پنجم، مثال عددی، مطالعهٔ نتایج مربوطه و روش حل و تحلیل حساسیت ارائه می‌شود، در بخش پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی نیز برای تحقیقات آتی مطرح می‌شود.

۲- پیشینه و مبانی نظری

مدل پایه برای توسعه دربارهٔ شبکهٔ همکاری تأمین‌کنندگان، مقالهٔ (فتحیان[۱۳] و همکاران، ۲۰۱۷) و برای هزینهٔ تعاملات، مقالهٔ (آتاکولو[۱۴] و همکاران، ۲۰۱۹) است. ایلهامی و همکاران در سه پژوهش در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و۲۰۲۰، موضوع 3DCE را بررسی کرده‌اند. (ایلهامی و همکاران، ۲۰۲۰) به مطالعه و تحلیل کتاب‌سنجی 3DCE پرداخته و (ایلهامی و مسرورو، ۲۰۲۰) یک مدل ریاضی برای 3DCE ارائه داده‌اند.

در سال ۲۰۱۷ اولین پژوهش دربارهٔ تشکیل تیم مطمئن، با در نظر گرفتن شبکهٔ همکاری و مهارت خبرگان در قالب مدل RTFP را فتحیان و همکاران ارائه دادند (فتحیان و همکاران، ۲۰۱۷). مدل MILP آنها تک‌هدفه، با سه فاکتور اصلی: ۱) مهارت، شبکه و قابلیت اعتماد، شامل ۱۰ متغیر و۱۶ محدودیت در۳ نوع ارتباطات، واگذاری و مهارت‌ها بود که با دو مثال موردی و نرم‌افزار گمز مدل را حل کردند. نتایج آنها تأیید کرد مدل پیشنهادی، به‌طور

مؤثر تیم تشکیل می‌دهد. یک محدودیت مدل آنها این بود که احتمال مساوی را برای هر متخصص غیرمطمئن در نظر می‌گرفت. همچنین در نظر نگرفتن هزینه و نیز تک‌هدفه‌بودن آن است (فتحیان و همکاران، ۲۰۱۷).

آتاکولو و همکاران (۲۰۱۹) در مقالهٔ خود، یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای کمک به حداقل‌رساندن کل هزینه‌ها، برای‌سازمان‌های درگیر در توسعهٔ محصول مشترک توسعه داده‌اند که این مدل هم‌زمان با به حداقل‌رساندن هزینه‌های مشترک، پیکربندی مطلوب و سطح تجمع ماژول‌ها را تعیین می‌کند. کاربرد مدل با استفاده از مطالعهٔ موردی چاپگر، نشان داده شده است. مشکل مدل آنها ساده‌سازی با در نظر گرفتن یک هدف و دو متغیر تصمیم و نیز یک محدودیت است، هرچند از DSM[۱۵] برای معماری محصول استفاده کرده‌اند. از دیگر مشکلات، وزن برابر درDSM برای هزینه‌های مشارکت خارجی است؛ همچنین خوشه‌بندی نیز دستی در نظر گرفته شده است. بنابراین با توجه به هدف این پژوهش که در نظر گرفتن هم‌زمان معماری محصول و شبکهٔ تأمین‌کنندگان، با لحاظ شبکهٔ همکاری، تیم‌سازی، تأمین‌کنندگان پشتیبان است، موضوعات مرتبط به‌طور خلاصه ارائه می‌شود.

معماری محصول را می‌توان عناصر شناسایی‌شدهٔ یک محصول و روابط آنها تعریف کرد (اریکستاد[۱۷]، ۲۰۱۹): آرایشی از تعاملات بین اجزا برای انجام یک عملکرد خاص، معماری یک محصول در اجزا، روابط بینابین و محیط محصول گنجانده‌شده است (اپینگروبرونینگ[۱۸]، ۲۰۱۲). معمولاً دو نوع معماری یکپارچه و ماژولار وجود دارد. این مقاله بر نوع معماری مدولار متمرکز است. نمایش تعاملات درطی فرایند تولید محصول، با استفاده از ابزارهای مختلف مانند ماتریس ساختار طراحی تسهیل می‌شود که در ادامه به‌طور خلاصه شرح داده می‌شود. استوارد[۱۶] DSM را ابزاری برای مدل‌سازی پروژه معرفی کرد که روابطی از قبیل اجزای سیستم‌های فرعی را به‌صورت ماتریسی ضبط و درنتیجه معماری محصول را ترسیم می‌کند (استوارد، ۱۹۸۱). DSM در این تحقیق به دو روش اعمال می‌شود: به‌عنوان یک ابزار تجزیه برای تعیین معماری محصول و تعاملات داخلی و به‌عنوان یک ابزار یکپارچه‌سازی به‌منظور گروه‌بندی قطعات در ماژول‌ها. برای اطلاعات بیشتر دربارهٔ DSM خوانندگان، به (اپینگروبرانینگ، ۲۰۱۲) مراجعه کنید.

تاکنون چندین طبقه‌بندی و مقالات مروری به مسئلهٔ انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش[۱۷] اختصاص داده شده است (آیسائویی[۱۸] و همکاران، ۲۰۰۷؛ چای[۱۹] و همکاران، ۲۰۱۳؛ چای‌وانگای[۲۰]، ۲۰۲۰؛ چای و همکاران، ۲۰۱۳ ؛ هو[۲۱] و همکاران، ۲۰۱۰؛ و تزشتین[۲۲] و همکاران، ۲۰۱۶). هرچند تخصیص سفارش به‌تازگی درخور توجه قرار گرفته است. دربارهٔ ارتباط بین تأمین‌کنندگان[۲۳] به پژوهش روزریا[۲۴] و همکاران (۲۰۱۰) اشاره می‌شود که سه‌گانهٔ خریدار، تأمین‌کننده، تأمین‌کننده را به‌عنوان محصول جانبی دوگانهٔ خریدار تأمین‌کننده در شبکه‌های تأمین، در دو شرکت بزرگ بررسی کرده است. همچنین ویلهلم[۲۵] (۲۰۱۱) با لحاظ رقابت، برهم‌کنش‌های تأمین‌کنندگان را در ارتباطات تأمین‌کننده، تأمین‌کننده بررسی کرده است. هونگ وهارتلی[۲۶] (۲۰۱۱)، سه راهکار را که خریدار برای مدیریت ارتباطات میان تأمین‌کنندگان استفاده می‌کند، به‌صورت زیر معرفی کرده است: استفاده از تیم‌های ترکیبی، ترغیب تأمین‌کنندگان به برقراری ارتباط با یکدیگر و طراحی‌های ماژولار. کیم و واگنر[۲۷] (۲۰۱۲) مطرح کرده‌اند که ارتباطات تأمین‌کننده، تأمین‌کننده باید طی فرایند انتخاب تأمین‌کننده در نظر قرار گیرد. شی[۲۸] و همکاران (۲۰۱۲)، مسئلهٔ تبادل اطلاعات میان دو تأمین‌کننده را تحلیل کرده‌اند. کافی و فاطمی قمی[۲۹] (۲۰۱۴) با یک مدل نظریه‌بازی

برای تحلیل ارتباطات خریدار، تأمین‌کننده وتأمین‌کننده_ تأمین‌کننده، خلاق ارزش را در زنجیرهٔ تأمین بررسی کرده‌اند. کاپور و مک‌گرث[۳۰] (۲۰۱۴) تحقیق و توسعهٔ مبتنی بر ادغام تکنولوژی را بررسی کرده‌اند. آنها اهمیت ارتباطات میان تأمین‌کنندگان را ناشی از وابستگی‌های متقابل در سیستم‌های نوآوری دانسته‌اند. کریم میان[۳۱] و همکاران (۲۰۱۸) به انتخاب تأمین‌کننده، با در نظر گرفتن ارتباطات میان تأمین‌کنندگان، با ریسک اختلال برای محصول پیچیده پرداختند.

در این پژوهش، مسئلهٔ طراحی شبکهٔ تأمین‌کنندگان را به‌صورت یک مسئلهٔ تیم‌سازی در نظر می‌گیریم. مسائل مرتبط با تیم‌سازی[۳۲] به انتخاب زیرمجموعه‌ای از افراد ماهر موجود اشاره دارد که در این مقاله، تأمین‌کنندگان در نظر گرفته شده است؛ به‌طوری که آنها مجموعه‌ای از مهارت‌های از پیش تعریف‌شده را پوشش می‌دهند. تعداد درخور توجهی از مطالعات در این زمینه، دربارهٔ زمینهٔ تحقیق در عملیات صحبت کردند (بایکاس اوغلو[۳۳] و همکاران، ۲۰۰۷).

در مسائل واقعی، هرچند ارتباط ماژول‌ها را می‌توان به‌صورت ماشین‌هایی در نظر گرفت که با یکدیگر در ارتباط‌اند، ولی نمی‌توان تأمین‌کنندگانی را که به‌صورت تیمی کار می‌کنند، ماشین قلمداد کرد که فقط برای انجام وظایف با یکدیگر در ارتباط‌اند. آنها سازمان‌هایی متشکل از منابع انسانی با خصوصیات انسانی‌اند. بنابراین برای تشکیل یک تیم مناسب از تأمین‌کنندگان، در نظر گرفتن ماهیت تأمین‌کنندگان ضروری است. بنابراین باید ارتباط، تعامل و همکاری بین تأمین‌کنندگان و بین ماژول‌ها و درون ماژول‌ها هم‌زمان در نظر گرفته شود. موضوع ساختار ارتباطی اعضا در تیم را برای اولین‌بار گاستون ودس ژاردین[۳۴] (۲۰۰۸) ذکر کرد. مسئلهٔ تشکیل تیم را ابتدا لاپاس و همکاران با تأکید بر اهمیت در نظر گرفتن شبکه‌های اجتماعی خبرگان و هزینه‌های ارتباط در بین آنها مطرح کردند (لاپاس[۳۵] و همکاران، ۲۰۰۹).

محمودی نژاد و همکاران (۲۰۱۸) برای انتخاب اعضای تیم چندتخصصی با معیارهای ارتباطات، انطباق و هماهنگی، توانایی‌های فردی، تخصص و هزینه، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفهٔ صفر و یکِ غیرخطی طراحی کردند و در مرکز آمار ایران به کار بردند.

تاکنون مرور پژوهش‌های جامع مربوطبه تشکیل تیم کمتر ارائه شده است که به (کرری و هارپر[۳۶]، ۲۰۱۹ ؛ یو و همکاران[۳۷]، ۲۰۱۹) اشاره می‌شود. حسینی و اخوان[۳۸] (۲۰۱۷) برای تشکیل تیم در پروژه‌های پیچیدهٔ مهندسی، یک مدل برنامه‌ریزی صحیح ۰-۱ سه هدفهٔ فازی ارائه دادند و با NSGA ll آن را حل کردند.

برخی از مطالعات نیز به انتخاب تأمین کنندهٔ پشتیبان[۳۹] پرداخته‌اند، در ادامه خلاصهٔ آنها را بیان می‌کنیم. هو[۴۰] و همکاران (۲۰۱۰) هنگامی‌که تأمین‌کنندهٔ اصلی شرکت در معرض خطرات اخلال قرار گرفت، قرارداد خرید مجدد بین یک شرکت و یک تأمین‌کنندهٔ پشتیبان را ارائه کردند. هو و همکاران (۲۰۱۰)، یک مسئلهٔ واحد را در نظر گرفتند که در آن خریدار، تقاضای ثابت را برآورده می‌کند و دو منبع تأمین دارد: تأمین‌کنندهٔ اصلی و تأمین‌کنندهٔ پشتیبان. آکلا[۴۱] و همکاران (۲۰۰۲)، یک مدل تک‌دوره‌ای را پیشنهاد کردند که شامل خرید از بازارهای محلی و رزرو از تهیه‌کنندهٔ پشتیبان ازطریق قراردادهای اختیاری است. ترابی[۴۲] و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مختلط احتمالی دوهدفه را برای انتخاب تأمین‌کننده و مسئلهٔ تخصیص سفارش برای ساخت انعطاف‌پذیر ارائه می‌دهند. رضائی[۴۳] و همکاران (۲۰۲۰) برای بیان بی‌اطمینانی، از مدل برنامه‌نویسی تصادفی

دومرحله‌ای استفاده کردند. در پژوهش‌هایی که تأمین‌کنندهٔ پشتیبان را در نظر گرفتند، فرض کرده‌اند که تأمین‌کننده‌های اصلی و پشتیبان قبلاً انتخاب شده و یا به‌صورت پارامتر در مدل لحاظ کرده و به‌صورت متغیر کمتر در نظر گرفته‌اند. در مطالعات قبلی، کمتر تأمین‌کننده‌های پشتیبان را خود مدل محاسبه و انتخاب می‌کند و به‌صورت متغیر تصمیم آن را در نظر می‌گیرد که به پژوهش ترابی و همکاران (۲۰۱۵) اشاره می‌شود. بنابراین پژوهش حاضر با در نظر گرفتن تأمین‌کنندهٔ اصلی و پشتیبان به‌عنوان متغیر در مدل، این مسئله را حل کرده است.

پنج مقالهٔ مروری (پاشایی[۴۴] و اولهاگ[۴۵]، ۲۰۱۵) و (گان[۴۶] و گرونو[۴۷]، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶) و (یائوواسکین[۴۸]، ۲۰۱۹) و (بنکه[۴۹] و همکاران، ۲۰۱۴) بررسی جامع پژوهش مربوط‌به رابطهٔ معماری محصول و زنجیرهٔ تأمین را بررسی کرده‌اند.

المرغی[۵۰] و محمودی (۲۰۰۹) یک مدل پشتیبانی تصمیم را برای تعیین هم‌زمان ساختار ماژول مطلوب یک محصول و پیکربندی مربوط‌به زنجیرهٔ تأمین در یک سیستم سه‌سطحی ارائه دادند. این رویکرد کل فضای جواب معماری محصول و زنجیرهٔ تأمین را در نظر نمی‌گیرد. (المرغی و محمودی، ۲۰۰۹). اولکو و اشمیت[۵۱] (۲۰۱۱) دستورالعمل‌های طراحی برای هماهنگی معماری محصول و زنجیرهٔ تأمین را ارائه می‌دهند. طبق مقالهٔ آنها درجهٔ ماژولارسازی باید عالمانه انتخاب شود، زیرا ماژولارسازی عملکرد فردی محصول را کاهش می‌دهد (اولکو و اشمیت، ۲۰۱۱). نپال و همکاران (۲۰۱۲) یک رویکرد چندهدفه را برای بهینه‌سازی تطابق معماری محصول و طرح زنجیرهٔ تأمین ارائه می‌دهند (نپال و همکاران، ۲۰۱۲). گان و گرونو (۲۰۱۳ و ۲۰۱۶) چارچوبی به نام ویژگی طراحی هم‌زمان–هرم توازن CDA- TOP را برای ساختار هم‌زمان تولید محصول و طراحی زنجیرهٔ تأمین و همچنین، برای نشان‌دادن حوزه‌های توازن معرفی می‌کنند. (گان و گرونو، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶). علاوه بر این (گان و گرونو، ۲۰۱۳) یک بررسی پژوهش ارائه می‌دهند. طبق گفتهٔ چیوواوکودان (۲۰۱۴)، یک معماری محصول ماژولار باید با یک طرح زنجیرهٔ تأمین ماژولار هماهنگ شود (چیوواوکودان، ۲۰۱۴). بنکه و همکاران (۲۰۱۴) روش چهارمرحله‌ای را برای هماهنگی (یا تطبیق) هم‌زمان معماری محصول و زنجیرهٔ تأمین ارائه دادند (بنکه و همکاران، ۲۰۱۴). مدل پیشنهادی ایلهامی و همکاران (۲۰۲۰) تک‌هدفهٔ مختلط عدد صحیحMINLP، تصمیم‌گیری دربارهٔ ساخت یا خرید اجزا را برای بهینه‌سازی سود تولید عملیاتی حاصل از محصول جدید، با مطالعهٔ موردی تعیین می‌کند (ایلهامی و همکاران،۲۰۲۰).

جدول ۱ درک روشنی از مطالعات مرتبط 2dce و جایگاه پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۱- دسته‌بندی از پیشینهٔ تحقیق و مطالعات مرتبط رویکردها و روش‌های طراحی زنجیرهٔ تأمین- طراحی محصول و جایگاه مدل حاضر

نویسنده	رویکرد		دامنه	روابط بین تأمین‌کنندگان	تخصیص سفارش	توالی دو بعد	فضای راه‌حل	تابع‌هدف		روش حل			ابعد		محیط مسئله	
	راهنما	مدل ریاضی		پشتیبان				چند هدفه	تک هدفه	دقیق	غیر قیق ابتکاری	فرا ابتکاری	معماری‌محصول	زنجیره تأمین	قطعی	غیر قطعی
(المرغی و محمودی، ۲۰۰۹)		مدل ریاضی	محصول و زنجیرهٔ تأمین			قبلاً تعریف‌شدهٔ معماری‌محصول	محدود		✓	✓			✓	✓	✓	
(اولکو و اشمیت، ۲۰۱۱)	راهنما		محصول و زنجیرهٔ تأمین			قبلاً تعریف‌شدهٔ معماری‌محصول	-								✓	
(نپال و همکاران، ۲۰۱۲)		مدل ریاضی	محصول و زنجیرهٔ تأمین			قبلاً تعریف‌شدهٔ معماری‌محصول	محدود	✓		✓			✓	✓		✓
(گان و گرونو، ۲۰۱۶)	راهنما		محصول و زنجیرهٔ تأمین			هم‌زمان	-									
(چیو و اوکودان، ۲۰۱۴)		مدل ریاضی	طراحی تأمین و تولید			قبلاً تعریف‌شدهٔ معماری‌محصول	محدود		✓	✓			✓	✓	✓	
(بنکه و والتر، ۲۰۱۴)		ماتریس چندد امنه‌ای MDM	محصول و زنجیرهٔ تأمین			قبلاً تعریف‌شدهٔ معماری‌محصول	محدود			✓			✓	✓	✓	
(فتحیان، ۲۰۱۷)		مدل ریاضی	تیم‌سازی	✓			محدود		✓	✓			✓	✓	✓	
آتاکولو و همکاران (۲۰۱۹)		مدل ریاضی	محصول و زنجیرهٔ تأمین			قبلاً تعریف‌شدهٔ معماری‌محصول	محدود		✓	✓			✓	✓	✓	
(ایلهامی، ۲۰۲۰)		مدل ریاضی	محصول و زنجیرهٔ تأمین			هم‌زمان	محدود		✓	✓		✓	✓	✓	✓	
پژوهش حاضر		مدل ریاضی	محصول و زنجیرهٔ تأمین	✓	✓	قبلاً تعریف‌شدهٔ معماری‌محصول	محدود	✓		✓		✓	✓	✓	✓	

بررسی پژوهش های انجام‌شده نشان می دهد تاکنون طراحی شبکهٔ تأمین‌کنندگان برای تخصیص ماژول، در فازهای ابتدایی طراحی محصول ماژولار با در نظر گرفتن هم‌زمان مهارت، تخصیص سفارش، شبکهٔ همکاری، ظرفیت و پشتیبان بررسی نشده است. از این رو با هدف حل مسائل دنیای واقعی در این پژوهش با استفاده از مدل بهینه‌سازی، موارد اشاره‌شده هم‌زمان در نظر گرفته شده است. از جدول۱ دریافت می‌شود که تنها یک مقاله (فتحیان و همکاران، ۲۰۱۷) تیم پشتیبان را بررسی کرده‌اند، هرچند در حوزهٔ تیم‌سازی است و در حوزهٔ محصول و زنجیرهٔ تأمین نیست و بیشتر از روش حل دقیق استفاده کرده‌اند. همچنین هیچ‌کدام روابط بین تأمین‌کنندگان و شبکهٔ همکاری را بررسی نکرده‌اند. بیشتر مطالعات نیز تک‌هدفه است و به‌صورت هم‌زمان شبکهٔ همکاری و تعاملات درون و بین ماژول‌ها را در نظر نگرفته است. بنابراین چنین موضوعی اگرچه در واقعیت مطرح است، توجه نیست و به‌عنوان یک شکاف پژوهشی موضوعیت دارد.

۳- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نوع کمی-کیفی است، به‌علت استفاده از نظرهای خبرگان و پژوهش‌های قبلی برای گردآوری-داده‌ها، کیفی و به‌دلیل استفاده از مدل ریاضی از نوع کمّی است، روش پژوهش نیز از نوع تحلیلی است. هدف این پژوهش، ارائهٔ مدل ریاضی برای تخصیص بهینهٔ سفارش و انتخاب تأمین‌کنندگان به ماژول‌هاست. بنابراین پرسش اصلی پژوهش این است که چگونه با استفاده از مدل بهینه‌سازی ریاضی در ابتدای مراحل طراحی محصول ماژولار، هم‌زمان شبکهٔ تأمین‌کنندگان مناسب را با در نظر گرفتن هزینهٔ تعاملات داخلی و خارجی بین ماژول‌ها و شبکه و سابقهٔ همکاری بین تأمین‌کنندگان، با در نظر گرفتن پشتیبان، مهارت و تخصیص سفارش طراحی کنیم و ماژول‌ها را به آنها تخصیص دهیم. به این منظور، ابتدا شاخص‌ها، متغیرها و پارامترهای مؤثر تعیین و اندازه‌گیری و مدل مناسب انتخاب و اجرا می‌شود. برای جمع‌آوری اطلاعات دربارهٔ مؤلفه‌ها و ابعاد مدل، مطالعات به‌صورت نظری و میدانی، انجام و اطلاعات لازم از کارشناسان، خبرگان، گزارش‌های رسمی و مستندات موجود واحد تولیدی صنعتی جمع‌آوری شده است. در پژوهش از روش مدل‌سازی دوهدفهٔ غیرخطی مختلط عدد صحیح(MO-MINLP) استفاده شده و برای حل این روش از نرم‌افزارهای گمز و وسویوور واکسل استفاده شده است. در شکل ۱، مراحل پژوهش ارائه شده است.

شکل ۱- مراحل پژوهش

۴- مدل ریاضی پیشنهادی MO-MINLP

مدل پایه برای توسعهٔ مدل RM-SS&OA، دربارهٔ شبکهٔ همکاری تأمین‌کنندگان، مقالهٔ (فتحیان[۵۲] و همکاران، ۲۰۱۷) و برای هزینهٔ تعاملات، پژوهش مقالهٔ (آتاکولو[۵۳]، ۲۰۲۰) است.

این مدل، یک مدل دوهدفهٔ برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی است. نمادگذاری مدل در پیوست یک موجود است.

۴-۱- مفروضات مدل

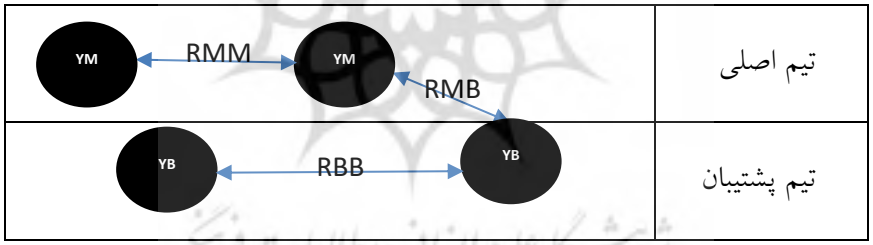
- مجموعهٔ تأمین‌کنندگان متشکل از اجتماع تأمین‌کنندگان داخلی شرکت (تولیدکنندهٔ) اصلی IS و تأمین‌کنندگان خارجی ES است. $I = IS \cup ES$
- در تیم اصلی، تعداد تأمین‌کنندگان لازم برای هر ماژول توسط $N(m)$ در نظر گرفته شده است که توسط شرکت اصلی انتخاب‌شدنی است، ولی برای تعداد تأمین‌کنندگان پشتیبان، حداقل یک و حداکثر دو تأمین‌کنندهٔ پشتیبان در نظر گرفته شده است.
- معماری محصول در قالب ماژول‌ها قبلاً مشخص شده است و هزینهٔ تعاملات داخلی (ارتباطات داخل یک ماژول) و خارجی (ارتباطات بین ماژول‌ها) محاسبه شده است.
- تعداد ماژول‌ها (زیرسیستم‌های بهینه) قبلاً مشخص شده است.
- هر تأمین‌کننده یک یا چند مهارت (شایستگی، قابلیت و دانش) مشخص دارد.
- هر ماژول بسته به ظرفیت تأمین‌کننده، به چند تأمین‌کننده تخصیص می‌یابد.
- یک ماژول در آن واحد، تنها به یک تأمین‌کننده تخصیص می‌یابد، هرچند به یک تأمین‌کننده چند ماژول واگذار می‌شود.
- برای کاهش ریسک اختلال تأمین و در نظر گرفتن ظرفیت در تیم اصلی، تعداد تأمین‌کننده برای هر ماژول را شرکت اصلی انتخاب می‌کند، ولی در تیم پشتیبان، برای هر ماژول حداقل ۱و حداکثر۲ تأمین‌کنندهٔ پشتیبان در نظر گرفته می‌شود.
- اعضای تیم به دو دستهٔ اصلی، M و پشتیبان، B تقسیم می‌شوند.
- میزان سابقهٔ همکاری میان دو تأمین‌کننده به‌صورت وزن همکاری در نظر گرفته می‌شود؛ به‌گونه‌ای که هرچه میزان سابقهٔ همکاری میان دو تأمین‌کننده بیشتر باشد، وزن ارتباط نیز بیشتر است.
- مهارت‌های موجود هر تأمین‌کننده و لازم برای هر ماژول، باید از قبل مشخص باشد.
- ظرفیت موجود هر تأمین‌کننده و سفارش لازم برای هر ماژول، باید از قبل مشخص باشد.

این بخش، مدل ریاضی پیشنهادی را توصیف می‌کند که در حل مسئلهٔ تشکیل تیم تأمین‌کنندگان استفاده می‌شود، جایی که همکاری بین تأمین‌کنندگان، شایستگی و مهارت آنها و تعاملات بین و درون ماژول‌ها، یک مسئلهٔ مهم ظاهر می‌شود. این مدل، انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش–ارتباطات ماژول[۵۴] نامیده می‌شود.

با توجه به مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان، I به‌عنوان نامزدهای انتخاب، ما مجموعه‌ای از ماژول را داریم که M نامیده می شود. علاوه بر این، مجموعه‌ای از مهارت‌های لازم برای هریک از تأمین‌کنندگان، نامزد به نام S وجود دارد. هر تأمین‌کننده به‌صورت یک گره و رابطه و سابقهٔ همکاری بین آنها با یک لبه (یال) نشان داده می‌شود، پارامتر ارتباطات تأمین‌کنندگان W(i,j) نام دارد. در RM-SS&OA، سه مجموعهٔ متغیر تصمیم وجود دارد: ۱) متغیرهای واگذاری یا تخصیص؛ ۲) متغیرهای رابطه (سابقهٔ همکاری)؛ ۳) متغیرهای ظرفیت. متغیرهای تخصیص با YM، YB و Y نشان داده می شوند که اگر تأمین‌کنندهٔ i به تیم اختصاص یابد، برابر با ۱ است؛ در حالی که متغیرهای رابطه با R نشان داده می‌شوند که اگر تأمین‌کنندهٔ i به ماژول m اختصاص یابد، برابر با ۱ است. دو گروه از تأمین‌کنندگان فرض می شوند: ۱. نوع اول مربوط‌به تأمین‌کنندگان اصلی تیم است که با M مشخص می‌شود؛ ۲. تأمین‌کنندگان پشتیبان است که با B نشان داده می‌شود. پس از آن، دو متغیر برای این دو نوع تعریف می‌شود: YM که برابر با ۱ است، اگر i به‌عنوان تأمین‌کنندهٔ اصلی به m اختصاص یابد و اگر تأمین‌کنندهٔ i به‌عنوان تأمین‌کنندهٔ پشتیبان به m اختصاص یابد، برابر YB می‌شود.

با توجه به نوع تأمین‌کنندگان تیم (اصلی یا پشتیبان)، سه نوع رابطه وجود دارد. سه متغیر باینری YMM و YMB و YBB برای روابط در نظر گرفته می‌شود. روابط بین تأمین‌کنندگان اصلی با اصلی، اصلی با پشتیبان و پشتیبان با پشتیبان است. جدول ۲- سه نوع ارتباط بین اعضای تیم اصلی، بین اعضای تیم پشتیبان و بین اعضای اصلی و پشتیبان را نشان می‌دهد.

جدول ۲- سه نوع ارتباط بین اعضای تیم اصلی، بین اعضای تیم پشتیبان و بین اعضای اصلی و پشتیبان



متغیر نوع سوم، متغیر ظرفیت X_{mi} است که یک متغیر بزرگ‌تر مساوی صفر است و اگر یک باشد، نشان می‌دهد در صورت واگذاری ماژول تنها به یک تأمین‌کننده، سفارش لازم برابر ظرفیت موجود است. اگر کمتر از یک مثلاً ۰/۸ باشد، نشان می‌دهد تأمین‌کننده تنها ۰٫۸ ظرفیت لازم را دارد و اگر بزرگ‌تر از یک مثلاً ۱/۵ باشد، نشان می‌دهد تأمین‌کننده ۵۰ درصد بیشتر از نیاز است. این متغیر به این منظور تعریف شد که شرکت اصلی دربارهٔ واگذاری یا اتحاد همکاری تأمین‌کنندگان و پیشنهاد تغییر ظرفیت تصمیم‌گیری کند.

در مدل حاضر، پارامتر SAsi تخصیص مهارت موجود s را برای تأمین‌کنندهٔ i نشان می دهد و PSps که مهارت‌های لازم برای هر ماژول را نشان می‌دهد. وزن رابطهٔ بین هر جفت تأمین‌کننده با Wij ∀i.j ∈ I تعریف می‌شود و در آخر، Ks حداقل تعداد مهارت‌های لازم برای یک تیم در نظر گرفته می‌شود.

$capm_m$ سفارش لازم شرکت اصلی برای ماژول m و cap_{mi} ظرفیت موجود هر تأمین‌کنندهٔ i، برای ماژول m است، هزینهٔ پیشنهادی هر تأمین‌کننده برای هر ماژول m، cp_{mi} و هزینهٔ داخلی هر ماژول m، C_m است. U_{mm} نیز هزینهٔ تعاملات خارجی (بین ماژول‌ها) است.

الف – توابع هدف ۱و۲

مدل نهایی این مقاله به‌عنوان RM-SS&OA، یک مدل دوهدفه است که هم‌زمان دو هدف شبکهٔ همکاری تأمین‌کنندگان و هزینهٔ تعاملات و هزینهٔ ماژول‌ها را ابتدای مراحل طراحی محصول در نظر می‌گیرد.

تابع هدف۱: بیشینه‌سازی وزن شبکهٔ همکاری و تعامل تأمین‌کنندگان

تابع هدف۲: کمینه‌سازی مجموع هزینهٔ کل تعاملات داخلی هر ماژول و هزینهٔ بین ماژول‌ها (تعامل خارجی) و هزینهٔ پیشنهادی ماژول‌ها

مدل پیشنهادی: RM-SS&OA

$$MAX\ Z_1 = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}(W_{ij} * (RMM_{ij} + RMB_{ij} + RBB_{ij}) \quad (۱)$$

$$MIN\ Z_2 = TCC + \text{PCC} \quad (۲)$$

هدف اول: انتخاب و تشکیل تیمی از تأمین‌کنندگان با بیشترین وزن شبکهٔ همکاری بین انواع تأمین‌کنندگان و سابقهٔ ارتباط آنهاست.

هدف دوم: کمینه‌کردن مجموع کل هزینهٔ همکاری تولیدکنندهٔ اصلی و هزینهٔ پیشنهادی ماژول با تأمین‌کننده است.

کل هزینهٔ همکاریTCC برابر مجموع هزینهٔ همکاری داخلی ICC و هزینهٔ همکاری خارجیECC است.

به علت اینکه ابتدای مراحل طراحی هزینهٔ نهایی ماژول مشخص نیست، برای انتخاب ماژول با کمترین هزینه، هزینهٔ پیشنهادی ماژول توسط تأمین‌کننده، هزینهٔ پیشنهادی ماژول PCC در نظر گرفته شد. هزینهٔ تعاملات داخلی و خارجی نیز از مطالعهٔ (نواک‌واپینگر[۵۵]، ۲۰۰۱) استفاده شد؛ به این صورت که برای هزینهٔ تعاملات داخلی ماژول، مجموع تعداد ارتباطات و تعداد اجزای ماژول به‌عنوان پیچیدگی و هزینهٔ تعاملات داخلی محاسبه شد و برای هزینهٔ تعاملات خارجی، مجموع تعداد ارتباطات بین ماژول‌ها و تعداد ماژول به‌عنوان پیچیدگی و هزینهٔ تعاملات خارجی در نظر گرفته و محاسبه شد. هزینهٔ تعاملات به‌صورت کوادراتیک و درجه‌دو در نظر گرفته شده است، زیرا طبق (Ülkü & Schmidt, 2011)، ارتباط تعداد ماژول‌ها و هزینهٔ تعاملات داخلی و خارجی غیرخطی و از درجه‌دو است. کل هزینهٔ همکاری TCC، برابر مجموع هزینهٔ همکاری و تعاملات داخلیICC و هزینهٔ همکاری و تعاملات خارجیECC است.

معادلهٔ ریاضی محاسبهٔ هزینهٔ تعاملات داخلی و خارجی به‌صورت زیر است.

$$TCC = ICC + ECC$$

$$ICC = \sum_{i\in I}\sum_{m\in M}(YM_{mi} * C_{mi})$$

$$ECC = \sum_{m\in M}(\sum_{s\in S}(YM_{mi} * \sum_{m\in M}(U_{mm} * (Y_{mi} - 1))))$$

$$PCC = \sum_{i\in I}\sum_{m\in M}(YM_{mi} * CC_{mi})$$

ب- محدودیت‌ها

در مدل RM-SS&OA، ۱۵ محدودیت تعریف شده است که در چهار دسته توصیف می‌شود: محدودیت‌های تخصیص (انتساب یا واگذاری)، محدودیت‌های رابطه، محدودیت‌های مهارت و محدودیت‌های ظرفیت و سفارش(تقاضا).

۱) محدودیت‌های واگذاری و تخصیص ماژول:۳-۵

در مدل RM-SS&OA، محدودیت (۳) بیان می‌کند برای هر ماژولm، بسته به سیاست شرکت اصلی، باید حتماً تعداد $N(m)$تأمین‌کنندهٔ اصلی تعیین شود و تعداد تأمین‌کننده برای هر ماژول مشخص شود و همهٔ ماژول‌ها تخصیص یابد. محدودیت (۴) اظهار می‌دارد که حداقل یک تأمین‌کننده و حداکثر دو تأمین‌کننده باید به‌عنوان پشتیبان برای هر ماژول تعیین شود، محدودیت (۵) مجموعهٔ Y_i از اجتماع تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان، یعنی تیم نهایی را تشکیل می‌دهد.

محدودیت (۶) تضمین می‌کند که یک ماژول، مثلاً در ماژول یک‌به‌یک تأمین‌کنندهٔ خاص، تأمین‌کنندهٔ دو در تیم اصلی و پشتیبان، هم‌زمان اختصاص نیابد.

$$\sum_{i\in I} YM_{mi} = N(m)\ \forall\, m \in M \qquad (۳)$$

$$0 < \sum_{i\in I} YB_{mi} \le 2\ \forall\, m \in M \qquad (۴)$$

$$Y_i = \sum_{m\in M} YM_{mi} + \sum_{m\in M} YB_{mj}\ \forall\, i \in I \qquad (۵)$$

$$YB_{m_1 i} * YB_{m_2 i} \le 0\ \forall\, i \in I\ \&\ m_1 \& m_2 \in M\ \&\ m_1 = m_2 \qquad (۶)$$

۲) محدودیت‌های رابطهٔ بین تأمین‌کنندگان (شبکهٔ تأمین‌کنندگان) : ۷-۹

همان‌طور که در جدول ۲- سه نوع ارتباط بین اعضای تیم اصلی، بین اعضای تیم پشتیبان و بین اعضای اصلی و پشتیبان نشان داده شده است، سه نوع رابطه بین دو تأمین‌کننده در مدل RM-SS&OA وجود دارد. بنابراین محدودیت‌های (۷) - (۹) برای این روابط تعریف شده است.

محدودیت ۷ تضمین می‌کند که حداقل یک ارتباط و همکاری بین تأمین‌کنندگان اصلی در تشکیل تیم وجود داشته باشد. محدودیت ۸ تضمین می‌کند که حداقل یک ارتباط و همکاری بین تأمین‌کنندگان اصلی و تأمین‌کنندگان پشتیبان در تشکیل تیم وجود داشته باشد. محدودیت ۹ تضمین می‌کند که حداقل یک ارتباط و همکاری بین تأمین‌کنندگان پشتیبان در تشکیل تیم وجود داشته باشد.

$$2 * RMM_{ij} \le \sum_{m\in M} YM_{mi} + \sum_{m\in M} YM_{mj}\ \forall\, m \in M\ \&\ i < j \qquad (۷)$$

$$2 * RMB_{ij} \le \sum_{m\in M} YM_{mi} + \sum_{m\in M} YB_{mj}\ \forall\, m \in M\ \&\ i < j \qquad (۸)$$

$$2 * RBB_{ij} \le \sum_{m\in M} YB_{mi} + \sum_{m\in M} YB_{mj}\ \forall\, m \in M\ \&\ i < j \qquad (۹)$$

۳) محدودیت‌های مهارت: ۱۰-۱۳

محدودیت (۱۰)، حداقل تعداد تأمین‌کنندگان لازم را از هر مهارت در نظر می‌گیرد. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که تیم باید حداقل یکی از مهارت‌ها را داشته باشد و بنابراین تأمین‌کنندگان بدون مهارت را حذف می‌کند. محدودیت (۱۲)، پارامتر PSms را برای شکیل تیم در نظر می‌گیرد و تأمین‌کنندگان تیم با مهارت‌های خاص را اختصاص می‌دهد که با PSms در تأمین‌کنندگان اصلی تیم تعریف می‌شود؛ در حالی که محدودیت (۱۳) این محدودیت را برای تأمین‌کنندگان پشتیبان در نظر می‌گیرد.

$$K_s \leq \sum_{i\in I} SA_{si} * Y_i \; \forall \; s \in S \qquad (۱۰)$$

$$Y_i \leq \sum_{i\in I} SA_{si} \; \forall \; i \in I \qquad (۱۱)$$

$$PS_{ms} \leq \sum_{i\in I} SA_{si} * YM_{mi} \; \forall \; s \in S \; \& \; m \in M \qquad (۱۲)$$

$$PS_{ms} \leq \sum_{i\in I} SA_{si} * YB_{mi} \; \forall \; s \in S \; \& \; m \in M \qquad (۱۳)$$

۴) محدودیت‌های ظرفیت: ۱۴-۱۷

$$\sum_{i\in I} (X_{mi} * YM_{mi} * CAP_{mi}) \geq CAPM_m \; \forall \; m \in M \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{i\in I} (YB_{mi} * CAP_{mi}) \geq CAPM_m \; \forall \; m \in M \qquad (۱۵)$$

$$YM_{mi} \leq CAP_{mi} \; \forall \; m \in M \; \& \; \forall \; i \in I \qquad (۱۶)$$

$$YB_{mi} \leq CAP_{mi} \; \forall \; m \in M \; \& \; \forall \; i \in I \qquad (۱۷)$$

محدودیت ۱۴، مجموع ظرفیت تأمین‌کنندگان مختلف و سفارش لازم را برای هر ماژول، برای تیم اصلی در نظر می‌گیرد. همچنین متغیر X_{mi} اگر برابر یک باشد، نشان‌دهندهٔ ظرفیت برابر برای یک تأمین‌کننده است و اگر کمتر از یک باشد مثلاً ۰٫۵، نشان می‌دهد یک تأمین‌کننده اگر بخواهد به‌تنهایی ماژول را به دست آورد، باید ظرفیت موجودش را دوبرابر کند و اگر بیشتر از یک باشد مثلاً ۱٫۵، نشان می‌دهد ظرفیت موجود برای این ماژول ۵۰درصد بیشتر از نیاز است. درواقع این متغیر نشان می‌دهد اگر تنها یک تأمین‌کننده برای هر ماژول در نظر بگیریم، وضعیت موجود آن برای تأمین ماژول چگونه است. محدودیت ۱۵ تضمین می‌کند که مجموع ظرفیت تأمین‌کنندگان مختلف سفارش لازم را برای هر ماژول، برای تیم پشتیبان در نظر بگیرد. محدودیت ۱۶ تضمین می‌کند که تنها تأمین‌کنندگان با ظرفیت بزگ‌تر از صفر در تیم اصلی باشند (حذف تأمین‌کنندگان بدون ظرفیت در تیم اصلی). محدودیت ۱۷ تضمین می‌کند که تنها تأمین‌کنندگان با ظرفیت بزگ‌تر از صفر در تیم پشتیبان باشند (حذف تأمین‌کنندگان بدون ظرفیت در تیم پشتیبان).

۴-۲- روش‌های حل، نتایج محاسباتی، تحلیل و ارزیابی مدل

در نظر گرفتن چند هدف، به واقعی‌شدن مدل و انعطاف‌پذیری آن کمک می‌کند، مدل در این پژوهش دوهدفه در نظر گرفته شده است. در این مسائل، اهداف در تضاد و تناقض با یکدیگرند و تعریف مجموعهٔ جواب غیر

مسلط ضروری است، به‌طوری که تابع هدف را بهینه کند و با محدودکردن دیگر توابع هدف به بدترشدن دیگر اهداف منجر نشود. دو هدف این پژوهش در تضاد با یکدیگرند؛ زیرا هرچه همکاری و سابقهٔ قبلی تأمین‌کنندگان با یکدیگر کمتر باشد، برای تحقق محصول و ماژول نیاز به هزینهٔ تعاملات داخلی و خارجی بیشتری است.

مدل با استفاده از سه روش حل دقیق محدودیت اپسیلون تقویت شده، الپی‌متریک و مجموع وزنی حل و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. یکی از روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، روش محدویت اپسیلون تقویت‌شده است، برای جزئیات و شرح این روش به مقالهٔ (ماورتاز و فلوریز[۵۶]،۲۰۱۳) مراجعه کنید.

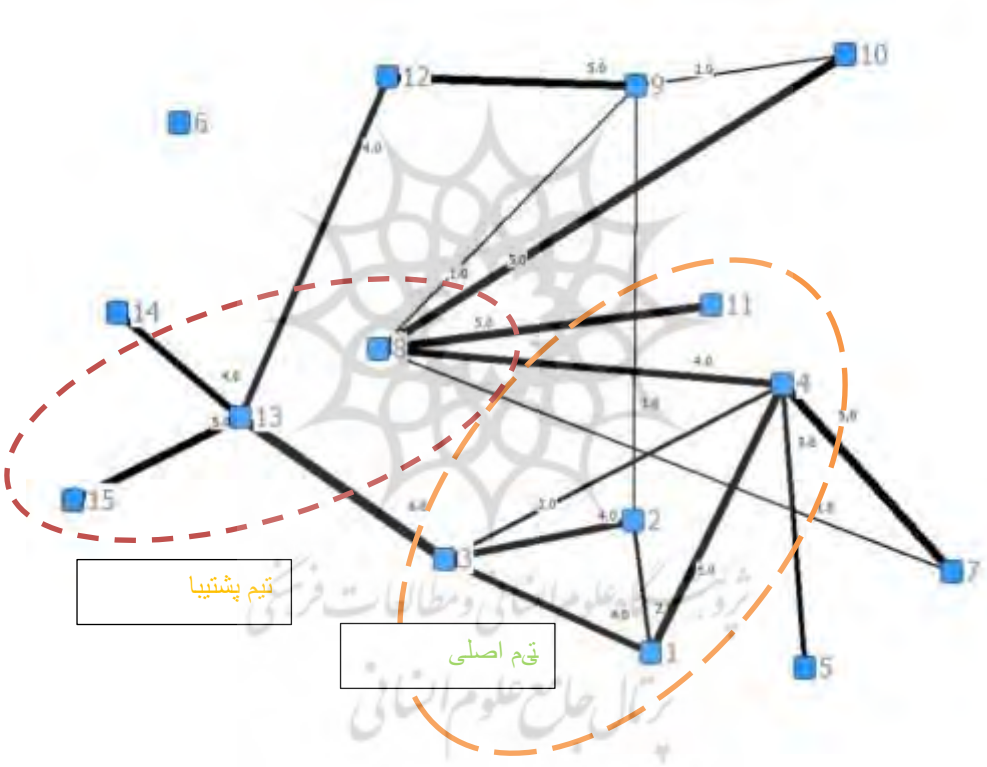
برای ارزیابی مدل، ابتدا نتایج حل یک مسئلهٔ شبیه‌سازی‌شده با سه روش حل دقیق محدودیت اپسیلون تقویت شد، الپی متریک و مجموع وزنی مقایسه شد که نشان داد نتایج تقریباً منطبق با یکدیگر بودند. در این پژوهش برای تعیین وزن‌های هزینه‌های پیشنهادی ماژول و هزینهٔ تعاملات داخلی و خارجی از تکنینک مقایسات زوجی توسط اکسپرت چویس استفاده شد و میزان ناسازگاری مقدار پذیرفتنی ۰,۰۸۴ به دست آمد. بنابراین وزن‌ها به‌صورت $w_1=0.5$ $w_2=0.25$ $w_3=0.25$ به دست آمد.

۵- بحث و نتایج تجربی

به‌منظور بررسی اثربخشی و ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، از دو روش استفاده می‌شود. روش اول، ارزیابی مدل با استفاده از مجموعهٔ دادهٔ آماده یا شبیه‌سازی‌شده و ارزیابی نتایج آن است. روش دوم، ارزیابی عملکرد مدل در یک محیط واقعی است. به‌منظور درک نحوهٔ کارکرد مدل و ارزیابی مدل، از هر دو روش استفاده می‌شود . بنابراین، این بخش دو آزمایش عددی را ارائه داد. اولین آزمایش یک شبکهٔ مصنوعی کوچک از ۱۵ تأمین‌کننده و ۴ ماژول را با مهارت‌های محدود به کار گرفت. آزمایش دوم در یک محیط واقعی و محصول صنعتی، ۱۰ تأمین‌کننده و ۶ ماژول را در نظر گرفت. پس از آن، مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز در کامپیوتری با پردازندهٔ ۲,۶ و ۴ گیگابایت رم بر هر دو مجموعهٔ داده اجرا شد و نتایج اجرای مدل برای هر مسئله در بخش‌های بعدی ارائه شده است. در مقایسهٔ نتایج مدل پیشنهادی با مقالهٔ (فتحیان و همکاران، ۲۰۱۷)، مشخص شد هر دو مدل با گمز حل شده است و برای تشکیل تیم کاراست و در هر دو داده‌ها قطعی است، هرچند مدل (فتحیان و همکاران، ۲۰۱۷) تک‌هدفهٔ خطی بود و تنها شبکهٔ همکاری را در نظر گرفته است و همچنین هزینه نیز که در طراحی شبکهٔ تأمین کنندگان فاکتور مهمی است، برخلاف پژوهش حاضر در نظر گرفته نشده است. همچنین تخصیص آنها یک‌به‌یک است، یعنی برای هر موقعیت تنها یک انتخاب در نظر می‌گیرد، ولی در مدل پیشنهادی ما، تخصیص یک‌به‌چند است، یعنی یک تأمین‌کننده بسته به مفروضات، بیش از یک ماژول را اختیار می‌کند. در مقایسه با پژوهش (آتاکولو[۵۷] و همکاران، ۲۰۲۰) مدل آنها ساده و تک‌هدفهٔ غیرخطی بود و تنها هدف هزینهٔ تعاملات را با یک محدودیت در نظر گرفت، ولی در پژوهش حاضر مدل دوهدفهٔ غیرخطی با در نظر گرفتن محدودیت های انتساب، ارتباطات، هزینهٔ تعاملات، ظرفیت و تخصیص سفارش است. همچنین طبق جدول ۱، نتایج مدل حاضر با دیگر مطالعات پیشین مقایسه‌شدنی است.

الف. مسئلهٔ شبیه‌سازی‌شده و مصنوعی

۱) مجموعهٔ داده‌ها: مجموعه‌ای متشکل از ۱۵ تأمین‌کننده با دو مهارت در نظر گرفته شد که هر تأمین‌کننده مهارت ۱، مهارت ۲ و هر دو مهارت ۱و۲ دارد یا مهارت ندارد. برخی از این تأمین‌کنندگان در گذشته با هم همکاری داشته‌اند. این همکاری در شکل ۲ با لبه‌ها و گره‌ها نشان داده شده است. گره‌ها نمایندهٔ تأمین‌کنندگان‌اند، در حالی که لبه‌ها نمایانگر همکاری قبلی بین آنهایند. اعداد نشان داده‌شده در لبه‌ها، نشان‌دهندهٔ وزن همکاری بین آنهاست، به‌طوری که تعداد بیشتر نشان‌دهندهٔ همکاری بیشتر بین آنهاست. مهارت‌های هر تأمین‌کننده در شکل۲ نشان داده شده است. S.1وS.2 به‌ترتیب نمایانگر تأمین‌کنندگان با مهارت ۱و تأمین‌کنندگان با مهارت ۲ هستند و هر مهارت فردی را نشان می‌دهند. ماتریس SAsi، هر مهارت تأمین‌کننده را نشان می‌دهد. برای هر تأمین‌کننده چهار جایگاه تعریف شده است که هریک از اعضا مهارت‌های خاصی دارد. ماتریس PSps مهارت‌های لازم برای ماژول هریک از اعضا را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شبکهٔ همکاری اولیه و بهترین تیم حاصل از روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده

۲) نتایج: پس از حل مدل پیشنهادی RM-SS&OA، تیم به دست آمد. تیم اصلی، اعضا با توجه به ماژول خود، yM بودند؛ از این رو، تیم تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان y_l =[1,2,3,4,11,8,13,15] به دست آمد. [1,2,3,4,11,8]= y_mو[8,13,15]= y_b براساس راه‌حل‌های به‌دست‌آمده، می‌توان دریافت که تمام مفروضات انجام‌شده در این مطالعه پوشش داده شده است. همچنین، می‌توان دریافت که اولین اولویت، انتخاب یک تأمین‌کننده از تأمین‌کنندگان معتبر بود و مدل بهترین پشتیبان‌گیری را برای هریک از تأمین‌کنندگان، داشتن همکاری خوب با دیگران و داشتن مهارت‌های مشابه با تأمین‌کنندگان اصلی آنها ارائه می‌دهد.

در جدول ۳، نتایج سه روش حل مجموع وزنی، الپی‌متریک و محدودیت اپسیلون تقویت‌شده، با یکدیگر مقایسه شد.

همان‌گونه که مشخص است نتایج به هم نزدیک است و نشان از اعتبار مدل دارد.

جدول ۳- مقایسهٔ نتایج حاصل از حل مدل ریاضی پیشنهادی و الگوریتم‌های پیشنهادی

ردیف	روش حل	تیم تأمین‌کنندگان پشتیبان Yi	تیم تأمین‌کنندگان اصلی YM_i	تیم تأمین‌کنندگان پشتیبان YB_i	تابع هدف۱ Z1	تابع هدف۲ Z2	تخصیص ماژول‌ها به تیم اصلی	تخصیص ماژول‌ها به تیم پشتیبان	PCC	ICC	ECC	وزن‌ها W_i	تابع
۱	محدودیت اپسیلون تقویت‌شده	{۱۳و۱۵}	{۱و۲و۳و۴و۸و۱۱}	{۸و۱۳و۱۵}	۱۲۳	۴۹	M(1,1)=1 M(2,2)=1 M(2,4)=1 M(3,11)=1 M(4,3)=1	M(1,15)=1 M(2,8)=1 M(3,8)=1 M(4,11)=1	۷۰	۱۳	۴۰	تابع هدف یک اصلی	۴۹ =k2 ۱۲۳ =k1
۲	الپی متریک	{۱و۳و۸}	{۲و۳و۴و۸و۱۱و۱۳و۱۵}	{۱و۳و۸}	۱۲۱	۴۹	M(1,15)=1 M(2,2)=1 M(2,4)=1 M(3,13)=1 M(4,11)=1	M(1,1)=1 M(2,8)=1 M(3,8)=1 M(4,3)=1	۱۵۰	۱۳	۴۰	$W_1=W_2=$ ۰/۵	۳۵/۱۶
۳	مجموع وزنی	{۱و۸و۱۱و۱۵}	{۱و۲و۳و۴و۸و۱۱و۱۳و۱۵}	{۱و۸و۱۱و۱۵}	۱۲۳	۴۹	M(1,1)=1 M(2,2)=1 M(2,4)=1 M(3,3)=1 M(3,13)=1	M(1,15)=1 M(2,8)=1 M(3,8)=1 M(4,11)=1	۷۰	۱۳	۴۰	$W_1=W_2=$ ۰/۵	۸۰/۷۵

ب - مسئلهٔ واقعی (مطالعهٔ کاربردی دوربین الکترواپتیکی)

با توجه به مفروضات مدل، باید محصولی انتخاب شود که نیازمند مهارت‌ها و ویژگی‌های طراحی محصول در سطوح مختلف باشد؛ بنابراین اطلاعات حاصل از این پژوهش بر دوربین الکترواپتیکی سداد در یک صنعت مهندسی اجرا شد و نتایج حاصل از آن در اختیار طراحان و مهندسان این صنعت قرار گرفت.

سیستم‌های نظارت الکترواپتیکی، سیستم‌های خودکار و کامپیوتری‌اند که برای نظارت بر مرزها در روز و شب طراحی شده‌اند و اجزای آن شامل کاربر، دوربین حرارتی، دوربین تلویزیونی، مانیتور و واحد کنترل است. سامانهٔ نظارتی سداد در پنج نوع و براساس اهداف و راهبردهای مختلف، توسط وزارت دفاع و پشتیبانی نیروی مسلح تولید می‌شود. سامانهٔ مدنظر، یک سامانهٔ شناسایی و مراقبت است که در مدل‌های مختلف سیار و ثابت و در کارایی‌های مختلف نظامی و غیرنظامی و کنترل و مراقبت استفاده می‌شود. دوربین فیلم‌برداری با وضوح بالا و مجهز به موتور زوم و فوکوس متغیر، نمایشگر حرارتی با کیفیت بالا که ازجمله ویژگی‌های سیستم نظارت الکترواپتیکی است و با یک واحد مرکزی کنترل می‌شود و همچنین مجهز به دوربین‌های مرئی و حرارتی است.

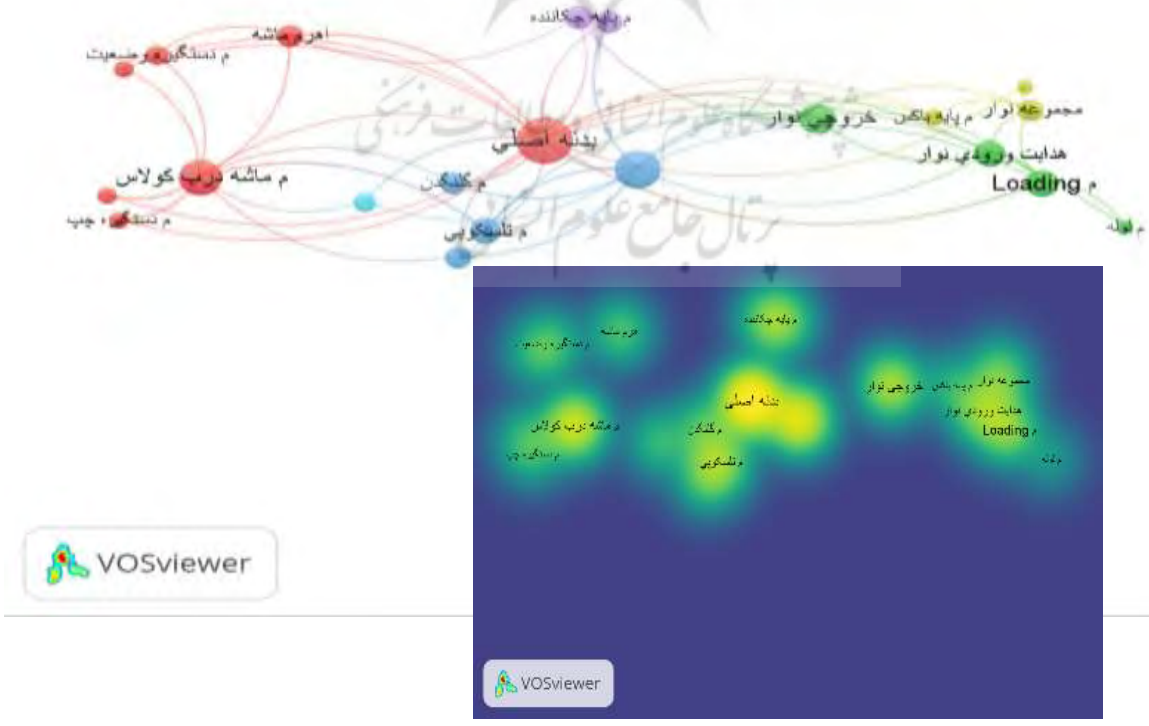
برای داده‌های مدل ازنظر خبرگان و اطلاعات در دسترس طراحان و مدیران استفاده شد. ابتدا ماتریس ساختار طراحی براساس تعاملات فیزیکی اجزای محصول، در قالب ماتریس ۲۵*۲۵ ایجاد شد، سپس با استفاده از

خوشه‌بندی نرم‌افزار وسویورو حداقل تعداد تعاملات دو، بهترین خوشه‌بندی با نظر خبرگان به تعداد شش خوشه (ماژول) (فاصله‌یاب، دوربین IR، Serial، M.B، پایه، موتور گشتاور) مطابق شکل ۳- نتایج خوشه‌بندی حاصل از نرم‌افزار وسویوور تأیید شد. سپس مقادیر پارامترهای موردنیاز مدل تعیین و مدل حل شد، نتایج به شرح جدول زیر است. به‌منظور هزینهٔ تعاملات داخلی و خارجی از مطالعهٔ (نواک‌واپینگر[۵۸]، ۲۰۰۱) استفاده شد؛ به این صورت که برای هزینهٔ تعاملات داخلی ماژول، مجموع تعداد ارتباطات و تعداد اجزای ماژول به‌عنوان پیچیدگی و هزینهٔ تعاملات داخلی محاسبه شد و برای هزینهٔ تعاملات خارجی، مجموع تعداد ارتباطات بین ماژول‌ها و تعداد ماژول به‌عنوان پیچیدگی و هزینهٔ تعاملات خارجی در نظر گرفته و محاسبه شد.

۱) مجموعهٔ داده‌ها: ۱۰ تأمین‌کننده با دو مهارت در نظر گرفته شد که هر تأمین‌کننده مهارت ۱، مهارت ۲ و هر دو مهارت ۱ و ۲ دارد یا مهارت ندارد. از بین ۱۰ تأمین‌کننده و ۶ ماژول، بهترین تیم اصلی و پشتیبان انتخابی معرفی شد. نتایج نشان داد تیم اصلی و پشتیبان در هر سه روش یکسان‌اند، ولی ترکیب تیم اصلی و پشتیبان، طبق جدول با یکدیگر تفاوت اندکی دارند.

۲) نتایج: پس از حل مدل پیشنهادی RM-SS&OA، تیم به دست آمد. تیم اصلی، اعضا با توجه به ماژول خود، yM بودند؛ از این رو، تیم تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان yI =[1,2,3,4,8,9,10] به دست آمد. [2,4,9]= ym و yb=[1,3,8,10]

مقایسهٔ نتایج با وضعیت موجود، نشان داد تفاوت معناداری وجود دارد؛ زیرا قبلاً صرفاً تأمین‌کنندگان با بیشترین سوابق قبلی و یا با نظر مساعد مدیریت انتخاب شده بودند. با توجه به اینکه مدل پیشنهادی کلیهٔ مفروضات و محدودیت‌ها و نیز دوهدفه، هم‌زمان همکاری و هزینهٔ پیشنهادی و هزینهٔ تعاملات را در نظر گرفته بود و با روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده جواب‌های بهینهٔ پارتویی را ارائه می‌داد، مدیر پروژه و تصمیم‌گیران بر آن شدند تا در پروژه‌های آتی طراحی، از این مدل استفاده کنند.



شکل ۳- نتایج خوشه‌بندی حاصل از نرم‌افزار وسویوور

در نتایج حاصل از سه روش حل مجموع وزنی، ال‌پی‌متریک و محدودیت اپسیلون تقویت‌شده با یکدیگر مقایسه شد. همان‌گونه که مشخص است، نتایج به هم نزدیک‌اند و نشان از اعتبار مدل دارند.

جدول ۴- مقایسهٔ نتایج حاصل از حل مدل ریاضی پیشنهادی و الگوریتم‌های پیشنهادی

ردیف	روش حل	تیم تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان Yi	تیم تأمین‌کنندگان اصلی YM_i	تیم تأمین‌کنندگان پشتیبان YB_i	تابع هدف ۱ Z1	تابع هدف ۲ Z2	تخصیص ماژول‌ها به تیم اصلی	تخصیص ماژول‌ها به تیم پشتیبان	هزینهٔ ماژول پیشنهادی PCC	هزینهٔ تعاملات داخلی ICC	هزینهٔ تعاملات خارجی ECC	وزن‌ها W_i	مقدار تابع هدف الگوریتم
۱	محدودیت اپسیلون تقویت‌شده	{۱و۲و۳و۴و۸و۹و۱۰}	{۲و۴و۹}	{۱و۳و۸و۱۰}	۱۱۲	۱۴۰	M(1,4)=1 M(2,2)=1 M(3,2)=1 M(4,1)=1 M(5,9)=1 M(6,9=1	M(1,10)=1 M(2,1)=1 M(3,10)=1 M(4,8)=1 M(5,8)=1 M(6,3)=1	۷۸	۱۹	۴۳	تابع هدف یک اصلی	=k1 ۱۴۰ =k2 ۱۳۲
۲	ال پی متریک	{۱و۲و۳و۴و۸و۹و۱۰}	{۱و۳و۹و۱۰}	{۲و۴و۸و۹و۱۰}	۱۳۱	۱۳۵	M(1,4)=1 M(2,1)=1 M(3,10)=1 M(4,2)=1 M(5,9)=1 M(6,3)=1	M(1,10)=1 M(2,2)=1 M(3,4)=1 M(4,281 M(5,8)=1 M(6,9)=1	۱۵۰	۱۹	۵۳	$W_1=W_2=$ ۰/۵	۲۲۲
۳	مجموع وزنی	{۱و۲و۳و۴و۸و۹و۱۰}	{۲و۳و۸}	{۱و۸و۹و۱۰}	۱۳۱	۱۳۵	M(1,4)=1 M(2,2)=1 M(3,2)=1 M(4,4)=1 M(5,8)=1 M(6,3)=1	M(1,10)=1 M(2,1)=1 M(3,10)=1 M(4,8)=1 M(5,9)=1 M(6,9)=1	۶۸	۱۹	۴۴	$W_1=W_2=$ ۰/۵	۱۳۱

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۵-۱- روش اعتبارسنجی نتایج

برای اعتبارسنجی نتایج، نظر به اینکه هدف، آزمودنی و مقایسه‌شدنی است، در صورت نبود جواب بهینهٔ کلی، با مقایسهٔ جواب الگوریتم‌های مختلف از ارتقای کیفیت جواب‌ها اطمینان حاصل می‌شود. های بهینه‌سازی در صورت منطقی‌بودن مدل، به‌خودی‌خود معتبرند. بنابراین گزینهٔ اصلی این پژوهش روش بالا خواهد بود، ولی برای ارزیابی کاربردی مدل، یک مسئلهٔ واقعی را مدل نهایی اجرا خواهد کرد. حل این مسئله با نرم‌افزار Core دریک رایانه گمز i5 4GB RAM صورت گرفته است.

۵-۲- تحلیل حساسیت مدل

برای ارزیابی بهتر مدل در مسئلهٔ مطالعهٔ موردی و همچنین، ارزیابی میزان اثر تغییر برخی پارامترهای استفاده‌شده در نتایج، آنالیز حساسیت بر مدل انجام گرفته است. بنابراین تحلیل حساسیت بر پارامتر تعداد تأمین‌کنندگان تیم اصلی و وزن‌های تابع هدف دوم، هزینهٔ پیشنهادی و تعاملات مدل انجام شد. مشاهده شد با افزایش N(m) در اغلب

مواقع، مدل غیرشدنی می‌شود. یکی دیگر از مقادیری که ارزیابی شده است، تغییر وزن‌های تابع هدف دوم، هزینهٔ پیشنهادی و تعاملات داخلی و خارجی است. نتایج نشان می‌دهد تغییر وزن، اثر مشخصی بر تغییر تیم نهایی نمی‌گذارد.

جدول ۵- نتایج تحلیل حساسیت

N(m)تعداد تأمین‌کنندگان تیم اصلی برای هر ماژول	شدنی/نشدنی
m1= 1,m2= 2,m3= 1,m4= 1	شدنی
m1= 2,m2= 2,m3= 1,m4= 1	شدنی
m1= 2,m2= 2,m3= 2,m4= 1	شدنی
m1= 3,m2= 2,m3= 2,m4= 1	نشدنی
m1= 2,m2= 2,m3= 2,m4= 3	نشدنی

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مقاله دربارهٔ مسئلهٔ تشکیل یک تیم و شبکهٔ تأمین‌کنندگان برای تخصیص و واگذاری ماژول‌ها در ابتدای طراحی محصول، برای پوشش مجموعه‌ای از مهارت‌ها، شایستگی‌ها و قابلیت‌های لازم و ظرفیت و تخصیص سفارش بحث کرد، شبکهٔ همکاری آنها را در نظر گرفت و یک مدل ریاضی دوهدفه را معرفی کرد که دو تیم اصلی و پشتیبان را از تأمین‌کنندگان تشکیل می‌دهد و هم‌زمان ارتباطات بین تأمین‌کنندگان و ارتباط بین و داخل ماژول‌ها را برای برآوردی از هزینهٔ تعاملات در نظر گرفت. برخلاف دیگر مدل‌ها که بیشتر بر هزینه‌های زنجیرهٔ تأمین تمرکز دارند، هدف این مقاله بررسی هم‌زمان دو هدف متناقض همکاری بین تأمین‌کنندگان و هزینهٔ تعاملات بادر نظر گرفتن مهارت و ظرفیت و پشتیبان است. بنابراین مدل برای هر نوع محصولات، خدمات و سیستم‌های خدمت محصول با معماری ماژولار کاربرد دارد. همچنین این مدل برای کلیهٔ سازمان‌ها و تولیدکنندگانی مناسب است که تأمین‌کنندگان داخلی دارند و نیز برخی از زیرسیستم‌ها و ماژول‌های خود را به خارج از سازمان، برون‌سپاری می‌کنند. از کاربردهای دیگر مدل، استفاده در محصولات پیچیده و با هزینهٔ بالاست که انتخاب تأمین‌کنندهٔ مناسب ابتدای فازهای طراحی و چرخهٔ عمر، اثر زیادی در زمان طراحی و هزینه و جلوگیری از مشکلات بعدی دارد . برای ارزیابی مدل، از یک مسئلهٔ عددی مصنوعی و یک مسئلهٔ واقعی با داده‌های یک محصول صنعتی، دوربین الکترواپتیکی سداد استفاده شد. نتایج تجربی تأیید کرد مدل پیشنهادی به‌طور مؤثر، شبکه و تیم تأمین‌کنندگان را تشکیل می‌دهد. یکی از مزیت‌های مدل در مقایسه با مدل‌های پیشین در سابقهٔ پژوهش این است که هزینه و هزینهٔ ماژول‌ها به علت اینکه در ابتدای فازهای طراحی، دقیق یا قابل تخمین دقیق نیست، با استفاده از شاخص پیچیدگی و تعاملات درون و بین ماژول‌ها تخمین زده می‌شود. همچنین با مدل ریاضی، هم‌زمان هزینه‌ها و شبکهٔ همکاری در انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش در نظر گرفته شد.

از ضعف‌های مدل، به نیاز به داده‌های بیشتر در مقایسه با مدل‌های مشابه و نیز به مشکل جمع‌آوری داده‌های دقیق در فازهای ابتدایی طراحی اشاره می‌شود. قبل از اجرای مدل، تنها تأمین‌کنندگان با بیشترین سابقهٔ قبلی یا با نظر مدیریت انتخاب می‌شدند؛ به عبارت دیگر انتخاب تأمین‌کنندگان براساسِ سوابق و روابط بوده و برای انتخاب تأمین‌کنندگان از روش علمی و صحیح استفاده نشده است. با اجرای مدل، تأمین‌کنندگان مناسب با توجه به

مفروضات انتخاب شدند. با توجه به نتایج و توجیه علمی، مدیر پروژه و تصمیم‌گیرندگان، تصمیم گرفتند از این مدل در پروژه‌های آتی استفاده کنند. از طرفی استفاده‌نکردن از روش مناسب، مشکلات زیادی را به همراه داشته است. به این ترتیب مشکلات پروژه‌های قبلی، مانند تحویل‌ندادن به‌موقع و خروج از پروژه در طول پروژه، به‌دلیل انتخاب تأمین کنندهٔ نامعتبر و با مهارت و شایستگی مناسب و رعایت نکردن معیارهای سابقهٔ همکاری در انتخاب تأمین‌کنندگان کاهش یافت. تجزیه‌وتحلیل نتایج مدل اثر درخور توجهی بر زمان و هزینه و کاهش مشکلات داشت.

در تحقیقات آتی فازهای طراحی و زمان و دیگر شایستگی‌ها همچون توسعه، ساخت، مونتاژ، خرید در نظر گرفته می‌شود. استفاده از داده‌های غیرقطعی و روش‌های ترکیبی برای پیش‌انتخاب نیز مؤثر است. پیشنهاد می‌شود برای حل، از انواع متداول الگوریتم‌های جست‌وجو، مانند الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری و نیز از الگوریتم فرا ابتکاری NSGA lll استفاده شود.

References

Aissaoui, N., Haouari, M., & Hassini, E. (2007). Supplier selection and order lot sizing modeling: A review. *Computers & Operations Research*, 34(12), 3516-3540

Akella, R., Araman, V. F., & Kleinknecht, J. (2002). B2B Markets: Procuremen and supplier risk management in E-Business. In Supply chain management: Models, applications, and research directions (pp. 33-66): Springer.

Aouadni, S., Aouadni, I., & Rebaï, A. (2019). A systematic review on supplier selection and order allocation problems. *Journal of Industrial Engineering International*, 15(1), 267-289.

Atakulu, I. N. (2019). Integration Model To Support Configuration Of Product Architecture And Supply Chain Design. Paper presented at the Proceedings of the 21st International DSM Conference.

Bardi, A. (2002). Corporate Strategies and Organisational Models. Lines of Development and Evolutionary Trends in the Automobile Sector.

Baykasoglu, A., Dereli, T., & Das, S. (2007). PROJECT TEAM SELECTION USING FUZZY OPTIMIZATION APPROACH. *Cybernetics and Systems*, 38(2), 155-185.

Behncke, F. G. H., Walter, F. M. A., & Lindemann, U. (2014). Procedure to Match the Supply Chain Network Design with a Products' Architecture. *Procedia CIRP*, 17, 272-277

Browning, T. R. (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering management*, 48(3), 292-306.

Chai, J., Liu, J. N. K., & Ngai, E. W. T. (2013). Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. *Expert Systems with Applications*, 40(10), 3872-3885.

Chai, J. Y., & Ngai, E. W. T. (2020). Decision-making techniques in supplier selection: Recent accomplishments and what lies ahead. Expert Systems with Applications, 140, 16.

Chiu, M.-C., & Okudan, G. (2014). An investigation on the impact of product modularity level on supply chain performance metrics: an industrial case study. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(1), 129-145.

ElMaraghy, H. A., & Mahmoudi, N. (2009). Concurrent design of product modules structure and global supply chain configurations. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(6), 483-493.

Eppinger, S. D., & Browning, T. R. (2012). Design Structure Matrix Methods and Applications. In: The MIT Press.

Erikstad, S. O. (2019). Design for modularity. In A Holistic Approach to Ship Design (pp. 329-356): Springer.

Fathian, M., Saei-Shahi, M., & Makui, A. (2017). A new optimization model for reliable team formation problem considering experts' collaboration network. *IEEE Transactions on Engineering management*, 64(4), 586-593.

Gan, T.-S., & Grunow, M. (2013). Concurrent Product – Supply Chain Design: A Conceptual Framework & Literature Review. *Procedia CIRP*, 7, 91-96

Gan, T.-S., & Grunow, M. (2016). Concurrent product and supply chain design: a literature review, an exploratory research framework and a process for modularity design. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(12), 1255-1271.

Gaston, M. E., & desJardins, M. (2008). THE EFFECT OF NETWORK STRUCTURE ON DYNAMIC TEAM FORMATION IN MULTI-AGENT SYSTEMS. *Computational Intelligence*, 24(2), 122-157.

Ho, W., Xu, X. W., & Dey, P. K. (2010). Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 202(1), 16-24.

Hong, Y., & Hartley, J. L. (2011). MANAGING THE SUPPLIER-SUPPLIER INTERFACE IN PRODUCT DEVELOPMENT: THE MODERATING ROLE OF TECHNOLOGICAL NEWNESS. *Journal of Supply Chain Management*, 47(3), 43-62.

Hosseini, S. M., & Akhavan, P. (2017). A model for project team formation in complex engineering projects under uncertainty. Kybernetes.

Hou, J., Zeng, A. Z., & Zhao, L. D. (2010). Coordination with a backup supplier through buy-back contract under supply disruption. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 46(6), 881-895.

Ilhami, M., & Masruroh, N. (2018). Trade-offs mathematical modelling of 3DCE in new product development: real three dimensions and directions for development. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Ilhami, M., & Masruroh, N. (2019). Bibliometric analysis of the term 'Three-Dimensional Concurrent Engineering'. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Ilhami, M. A., & Masruroh, N. A. (2020). A mathematical model at the detailed design phase in the 3DCE new product development. *Computers & Industrial Engineering*, 146, 106617.

Jadidi, O., Zolfaghari, S., & Cavalieri, S. (2014). A new normalized goal programming model for multi-objective problems: A case of supplier selection and order allocation. *International Journal of Production Economics*, 148, 158-165.

Kafi, F., & Fatemi Ghomi, S. M. T. (2014). A Game-Theoretic Model to Analyze Value Creation with Simultaneous Cooperation and Competition of Supply Chain Partners. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-10.

Kapoor, R., & McGrath, P. J. (2014). Unmasking the interplay between technology evolution and R&D collaboration: Evidence from the global semiconductor manufacturing industry, 1990–2010. *Research Policy*, 43(3), 555-569.

Karimmian, Z., Ghodsypour, S. H., & Gheidar-Kheljani, J. (2018). Supplier Selection Problem Considering Relationships between Suppliers and Supply Disruption Risk in complex products. *Journal of Production and Operations Management*, 8(2), 135-150.

Kereri, J. O., & Harper, C. M. (2019). Social Networks and Construction Teams: Literature Review. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(4), 10.

Kim, D. Y., & Wagner, S. M. (2012). Supplier selection problem revisited from the perspective of product configuration. *International Journal of Production Research*, 50(11), 2864-2876.

Lappas, T., Liu, K., & Terzi, E. (2009). Finding a team of experts in social networks. Paper presented at the Proceedings of the 15th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining-KDD '09.

Mahmudinejad, E., Azar, A., Rajabzadeh, A., & Rezaei Pandari, A. (2018). Multi-objective modeling for Member Selection of Cross-functional Teams. *Journal of Production and Operations Management*, 9(2), 99-113.

Mavrotas, G., & Florios, K. (2013). An improved version of the augmented ε-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219(18), 9652-9669.

Nasr, A. K., Tavana, M., Alavi, B., & Mina, H. (2021). A novel fuzzy multi-objective circular supplier selection and order allocation model for sustainable closed-loop supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 287, 124994.

Nepal, B., Monplaisir, L., & Famuyiwa, O. (2012). Matching product architecture with supply chain design. *European Journal of Operational Research*, 216(2), 312-325.

Novak, S., & Eppinger, S. D. (2001). Sourcing By Design: Product Complexity and the Supply Chain. *Management Science*, 47(1), 189-204.

Pashaei, S., & Olhager, J. (2015). Product architecture and supply chain design: a systematic review and research agenda. Supply Chain Management*: An International Journal*, 20(1), 98-112.

Rezaei, S., Ghalehkhondabi, I., Rafiee, M., & Zanganeh, S. N. (2020). Supplier selection and order allocation in CLSC configuration with various supply strategies under disruption risk. *Opsearch*, 57(3), 908-934.

Roseira, C., Brito, C., & Henneberg, S. C. (2010). Managing interdependencies in supplier networks. *Industrial Marketing Management*, 39(6), 925-935.

Shi, N., Zhou, S., Wang, F., Xu, S., & Xiong, S. (2013). Horizontal cooperation and information sharing between suppliers in the manufacturer–supplier triad. *International Journal of Production Research*, 52(15), 4526-4547.

Steward, D. V. (1981). The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE Transactions on Engineering management*, EM-28(3), 71-74.

Torabi, S. A., Baghersad, M., & Mansouri, S. A. (2015). Resilient supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 79, 22-48.

Ülkü, S., & Schmidt, G. M. (2011). Matching Product Architecture and Supply Chain Configuration. *Production and Operations Management*, 20(1), 16-31

Vanteddu, G., Chinnam, R. B., & Gushikin, O. (2011). Supply chain focus dependent supplier selection problem. *International Journal of Production Economics*, 129(1), 204-216.

Wetzstein, A., Hartmann, E., Benton, W. C., & Hohenstein, N. O. (2016). A systematic assessment of supplier selection literature - State-of-the-art and future scope. *International Journal of Production Economics*, 182, 304-323

Wilhelm, M. M. (2011). Managing coopetition through horizontal supply chain relations: Linking dyadic and network levels of analysis. *Journal of Operations Management*, 29(7-8), 663-676

Yao, X., & Askin, R. (2019). Review of supply chain configuration and design decision-making for new product. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2226-2246

Yu, S., Bedru, H. D., Lee, I., & Xia, F. (2019). Science of scientific team science: a survey. *Computer Science Review*, 31, 72-83.

پیوست ۱_ نمادگذاری مدل‌ریاضی

اندیس‌ها:		
تعریف		عنوان
مجموعهٔ تأمین‌کنندگان	$i \in \{1, 2, , I\} = IS \cup ES$	I
مجموعهٔ تأمین‌کنندگان داخلی	$is \in \{1, 2, , IS\}$	IS
مجموعهٔ تأمین‌کنندگان خارجی	$es \in \{1, 2, , ES\}$	ES
مجموعهٔ ماژول‌های محصول	$m \in \{1, 2, , M\}$	M
مجموعهٔ مهارت‌ها	$s \in \{1, 2, , S\}$	S
پارامترها:		
ماتریس ارتباطات بین تأمین‌کنندگان i و j	ماتریس صفر و یک	W_{iJ}
تعداد تأمین‌کنندگان تیم اصلی برای هر ماژول	عدد صحیح بزرگ‌تر از صفر	N_m
هزینهٔ تعاملات و ارتباطات بین ماژول‌ها	عدد صحیح بزرگ‌تر از صفر	$U_{m1\ m2}$
سفارش و تقاضای مورد نیاز شرکت اصلی برای ماژول m	صفر و یک	$CAPM_m$
ظرفیت موجود هر تأمین‌کننده i برای ماژول m	صفر و یک	CAP_{mi}
هزینهٔ پیشنهادی هر تأمین‌کننده برای هر ماژول m	عدد صحیح بزرگ‌تر از صفر	CP_{mi}
هزینهٔ داخلی هر ماژول m	عدد صحیح بزرگ‌تر از صفر	C_m
حداقل تعداد مهارت برای تأمین‌کنندگان اصلی		KS_s
اگر تأمین‌کنندهٔ i مهارت موجود s دارد یک وگرنه صفر	صفر و یک	SA_{si}
مهارت s لازم برای ماژول m		PS_{ms}
اگر تأمین‌کنندهٔ i سطح مهارت موجود s دارد عددی بین ۱ تا ۱۰ وگرنه صفر		$SA2_{si}$
متغیرهای تصمیم :		
اگر تأمین‌کننده i برای شبکهٔ تأمین‌کنندگان اصلی و یا پشتیبان انتخاب شود، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است (مجموع تأمین‌کنندگان انتخاب‌شدهٔ اصلی و پشتیبان).	$Yi = YMmi + YBmi$	Y_i
اگر تأمین‌کنندهٔ اصلی i برای ماژول m انتخاب‌شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.	صفر و یک	YM_{mi}
اگر تأمین‌کنندهٔ پشتیبان i برای ماژول m انتخاب شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.	صفر و یک	YB_{mi}
اگر ارتباطی بین تأمین‌کنندگان اصلی i و j وجود داشته باشد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.	صفر و یک	RMM_{iJ}
اگر ارتباطی بین تأمین‌کنندگان اصلی i و پشتیبان j وجود داشته باشد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.	صفر و یک	RMB_{iJ}
اگر ارتباطی بین تأمین‌کنندگان پشتیبان i و j وجود داشته باشد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.	صفر و یک	RBB_{Ij}
چندبرابر سفارش مورد نیاز تأمین‌کنندهٔ اصلی i برای هر ماژول m، تا به‌عنوان تأمین‌کنندهٔ اصلی انتخاب شود. مقدار یک نشان‌دهندهٔ مقدار دقیق معادل تقاضاست. مقدار کمتر از یک مثلا ۰٫۸، یعنی تأمین‌کننده ۸۰ درصد ظرفیت را برای تأمین این ماژول دارد و مقدار بیشتر از یک مثلا ۱٫۵، یعنی تأمین‌کننده ۵۰ درصد ظرفیت بیشتر برای تأمین سفارش این ماژول دارد.	مثبت	X_{mi}

[1] Nepal
[2] Bardi
[3] Behncke
[4] Vanteddu
[5] Nepal
[6] Aissaoui
[7] Nasr
[8] Jadidi
[9] Hou
[10] Akella
[11] Torabi
[12] Rezaei
[13] Fathian
[14] Atakulu
[15] Design Structure Matrix
[16] Steward
[17] ًSS&OA: Supplier Selection and Order Allocation
[18] Aissaoui
[19] chai
[20] Ngai
[21] Ho
[22] Wetzstein
[23] Relationship Between Suupliers
[24] Roseira
[25] Wilhelm
[26] Hong & Hartley
[27] Kim & Wagner
[28] Shi
[29] Kafi & Fatemi Ghomi
[30] Kapoor & McGrath
[31] Karimmian
[32] TFP: Team Formation Problem
[33] Baykasoglu
[34] Gaston & desJardins
[35] Lappas
[36] Kereri, J. O., & Harper
[37] Yu
[38] Hosseini & Akhavan
[39] Backup Supplier Selection
[40] Hou
[41] Akella
[42] Torabi
[43] Rezaei
[44] Pashaei
[45] Olhager
[46] Gan
[47] Grunow
[48] Yao & Askin
[49] Behncke
[50] ElMaraghy & Mahmoudi
[51] Ülkü & Schmidt
[52] Fathian
[53] Atakulu
[54] RM-SS&OA: Relationship Module- Supplier Selection and Order Allocation
[55] Novak & Eppinger
[56] Mavrotas, G., & Florios
[57] Atakulu
[58] Novak & Eppinger

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی