

## Multi-Objective Optimization and Simulation Model To Design The Withdrawal Kanban Systems

Vahid Baradaran\*

Assistant Professor, Industrial Engineering Department, Islamic Azad University, Tehran North Branch, Tehran, Iran, v\_baradaran@iau-tnb.ac.ir

**Abstract:** The withdrawal Kanban system, by capability of data transferring in supply chain reduces different types of the waists such as inventories level and unnecessary movements. To achieve the aims of lean production, the parameters of the Kanban system such as the number of Kanban should be determined properly. The number of Kanban problem is a multi-objective problem which should meet the aims of producers and suppliers simultaneously. In this paper, the objectives and constraints of withdrawal Kanban problem has been determined based on a case study in automobile supply chain. A mathematical integer multi-objective model with non-linear objects has been developed. Two sets of solutions are generated by the optimization model. A simulation model is developed to check the possibility and validity of solutions. The simulation studies show that one of the solutions can reduce up to 46 percent the inventory costs while increase 11 percent transportation costs compared to the current state.

**Keywords:** Design Kanban System, Withdrawal Kanban, Optimal Number of Kanban, Simulation, Multi-Objective Optimization

**Introduction:** Kanban as a scheduling system is an effective tool in lean manufacturing and pull production systems Kanban which helps to determine and order the quantity of allowed production and the amount of Semi-manufactured product allowed movement between workstations or supply chain components. By controlling the inventories at any point in the production and supply chain, Kanban could improve the efficiency. There are two types of Kanban: production Kanban and withdrawal Kanban. The production Kanban determines what to produce, when to produce it, and how much to produce in the workstations of manufacturing systems. While, the withdrawal Kanban determines the transfer time of different parts between various stations of the production line, or between the supply chain components. To be effective, the Kanban systems should be designed for a production system. The number of Kanban in cycle, the volume of each Kanban and the ordering point are the designing elements of Kanban. In this paper, designing the withdrawal Kanban including determining the optimal number of Kanban in cycle in supply chains is examined. Designing the withdrawal Kanban system in a supply chains affects the performance and satisfaction of supply chain components. The main contributions of this paper are: (1) Analysis of withdrawal Kanban in supply chains to identify the effects of the Kanban parameters on components of supply chain. (2) Developing a multi-objective optimization model to determine the optimal number of withdrawal Kanban by considering the objectives and constraints of the main manufacturer and supplies in the supply chain. (3) A discrete-event simulation model is constructed to compare the results of optimization model and other solutions in terms of performance indexes.

**Materials and Methods:** A non-linear multi-objective mathematical model with four objectives is developed to determine the optimal number of withdrawal Kanban and type of vehicles which transport the Kanbans between supplies and manufacturer. The inventory, transportation, capital costs are the objective functions of the mathematical optimization model. The constraints such as vehicle capacities are considered in the mathematical model. The L-P metric method is used to convert the

---

\* Corresponding author

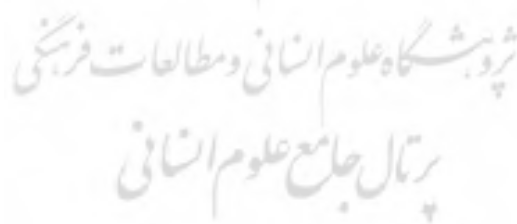
multi-objective model to single-objective mathematical model. The proposed model is used to design the withdrawal Kanban system in the production of an automobile component in Iran-Khodro. To evaluate the results of mathematical model and other models, a simulation model is developed. The case study are simulated with different scenarios based on the results of the proposed model, existing conditions, and other solutions. Finally, the results of simulation studies are compared

**Results and Discussion:** The simulation studies show the solutions which obtained the proposed model compared to the current state, which can reduce up to 28 and 46 percent the capital and inventory costs, respectively. While the transportation costs will increase 11 percent.

**Conclusion:** The Kanban system increase the efficiency of production system, if the Kanban system design properly. The design parameters of withdrawal Kanban system affect the performance and costs in a supply chain. By minimizing the capital, transportation and inventory costs in main manufacturer and suppliers of a supply chain, the optimal number of withdrawal Kanban in cycle is determined. The simulation model is proposed to evaluate the results of optimization model and measure the performance indexes of Kanban system before implementation.

### References

- Abdul Rahman, N. A., Sharif S. M. & Mashitah M. E. (2013) "Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation". *Procedia Economics and Finance*, 7, 174 – 180.
- Azadeh, A., Layegh, J & Pourankooch, R(2010a). "Optimal Model for Supply Chain Controlled+by+kanban under JIT Philosophy by Integration of computer Simulation and Genetic Algorithm". *Basic and Applied Sciences*, 4(3), 370-378.
- Belisario, L. S. & Pierreval, H. (2015). "Using genetic programming and simulation to learn how to dynamically adapt the number of cards in reactive pull systems", *Expert Systems with Applications*, 42 (6), 3129-3141..



مدیریت تولید و عملیات، دوره ۹، پیاپی ۱۶، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۷

دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۲۹ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۰

صص: ۲۰۳-۱۸۱

## تعیین تعداد بهینه کانبان در سیستم‌های کانبان حمل با رویکردهای برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه و شبیه‌سازی

وحید برادران\*

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران،

v\_baradaran@iaui-tnb.ac.ir

**چکیده:** سیستم کانبان حمل در زنجیره‌های تأمین با انتقال مناسب اطلاعات باعث کاهش انواع اتلاف‌ها می‌شود. تحقق اهداف تولید ناب مستلزم تعیین مناسب مؤلفه‌هایی مانند تعداد کانبان در سیکل است. مسئله تعیین تعداد کانبان در سیکل، مسأله‌ای چندهدفه است که باید اهداف تولیدکننده و تأمین‌کنندگان را با توجه به شرایط زنجیره تأمین برآورده کند. در این مقاله براساس مطالعه زنجیره تأمین خودرو، اهداف و محدودیت‌های مسأله در سیستم کانبان حمل تعیین شده است. مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح چندهدفه با توابع هدف غیرخطی برای تعیین تعداد کانبان و هدف کاهش هزینه‌های موجودی و حمل و نقل توسعه داده شده است. قابلیت اجرا و اثربخشی مجموعه جواب‌های مدل ریاضی با توسعه یک مدل شبیه‌سازی بررسی شده است. یکی از جواب‌های بهینه می‌تواند ۴۴ درصد هزینه‌های موجودی را نسبت به وضع موجود کاهش دهد در حالیکه باعث افزایش ۱۱ درصدی هزینه حمل و نقل می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی چندهدفه، تعداد بهینه کانبان، تصمیم‌گیری‌های چندهدفه، تولید به موقع، زنجیره تأمین، کانبان حمل

## مقدمه

تأمین کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع کنندگان و مشتریان اجزای یک زنجیره تأمین را تشکیل می‌دهند. کارایی یک زنجیره تأمین علاوه بر کارایی تک تک اجزای آن، منوط به کارایی یکپارچه و با در نظر گرفتن ارتباط بین اجزای زنجیره تأمین است. استفاده از مبانی رویکرد تولید ناب در زنجیره‌های تأمین علاوه بر افزایش بهره‌وری اجزاء زنجیره، به بهبود یکپارچگی اجزاء زنجیره کمک خواهد کرد. براساس رویکرد تولید ناب، هر فعالیتی که ارزش افزوده برای محصول نداشته باشد، زائد است و باید حذف شود (کریشناجاستی و گدالیب، ۲۰۱۵).

موجودی‌های در جریان ساخت و حمل‌ونقل‌های زائد از مهم‌ترین انواع اتلاف است. با حذف یا کاهش این اتلاف‌ها، هزینه اجزاء و کل زنجیره کاهش یافته است؛ درنهایت به بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری زنجیره تأمین منجر می‌شود. شناسایی، طراحی و پیاده‌سازی سیستم موجودی مناسب در زنجیره تأمین اهمیت زیادی دارد. سیستم موجودی مناسب باید توانایی مدیریت و کنترل انواع موجودی‌ها را در همه زنجیره داشته باشد و درعین حال باعث کاهش هزینه‌ها به‌خصوص هزینه‌های حمل‌ونقل در زنجیره تأمین شود (عرب و همکاران، ۱۳۹۲). یکی از ارکان رویکرد تولید ناب در زنجیره تأمین، تولید براساس سیستم کششی<sup>۱</sup> است. این سیستم به تولیدکنندگان این امکان را می‌دهد تا ارزش مورد انتظار مشتری را از فرآیند تولید بیرون بکشند. سیستم کششی در مقابل سیستم فشاری<sup>۲</sup> قرار دارد. در سیستم کششی، تأمین و تولید در شرایطی اتفاق می‌افتد که مشتریان نهایی آن را درخواست کنند و این موضوع باعث کاهش موجودی‌های در جریان ساخت می‌شود؛ درحالی‌که تولیدکنندگان در سیستم فشاری، تولید را مبتنی بر پیش‌بینی تقاضا انجام می‌دهند؛ به‌همین دلیل در این سیستم، سطح موجودی‌های در جریان ساخت افزایش می‌یابد (انکار و ونگ، ۱۹۹۲). یکی از روش‌های مؤثر در پیاده‌سازی سیاست تولید کششی، سیستم کانبان است. در زبان ژاپنی کانبان در لغت به معنی کارت است و در اصطلاح، دربردارنده اطلاعاتی است که دستور تولید یا انتقال کالا را به ایستگاه قبلی یا تأمین‌کننده صادر می‌کند (مارخام<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۸). به کمک کانبان، میزان مجاز تولید در هر ایستگاه کاری و میزان جابجایی مجاز کالای نیمه‌ساخته بین ایستگاه‌های کاری یا اجزاء زنجیره تأمین تعیین و ابلاغ می‌شود (جُدیشانکار و ونگ، ۱۹۹۲؛ جونیور و فیلهو<sup>۴</sup>، ۲۰۱۰). این سیستم اولین بار در شرکت تویوتا طراحی و اجرا شد. کانبان، قابلیت انتقال به موقع اطلاعات و ارقام موجودی در طول زنجیره‌های تأمین و امکان برقراری ارتباطات در سطح‌های مختلف زنجیره را فراهم می‌کند (زیپکین<sup>۵</sup>، ۱۹۹۱؛ موتابیان، ۱۳۸۶)؛ به‌همین علت استفاده از این سیستم در سایر کشورها و صنایع در حال افزایش است (مارخام و همکاران، ۱۹۹۸؛ فیلیپوم<sup>۶</sup> و همکاران، ۱۹۸۷). در صنایع خودروسازی به سیستم کششی و کانبان بیشتر توجه شده است. این توجه به دلیل هزینه‌های زیاد حمل‌ونقل، نیاز به فضاهاى بیشتر و تنوع زیاد قطعات و محصولات نیاز است (سالتگلو و اوسان<sup>۷</sup>، ۲۰۱۵). سیستم کانبان با سفارش‌گذاری در زمان معین و با مقدار مناسب علاوه بر کاهش تولید مازاد، سطح موجودی‌های نیمه‌ساخته را در زنجیره تأمین کاهش می‌دهد. این کار به برنامه‌ریزان امکان می‌دهد تا از تجهیزات حمل‌ونقل مناسب برای کاهش حمل‌ونقل‌های زائد و رسیدن به اهداف نگرش تولید ناب استفاده کنند (عبدالرحمان<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۳).

به‌طور کلی دو نوع کانبان در تولید استفاده می‌شود (چارسوقی و ساجدی‌نژاد<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۰)؛ کانبان تولید<sup>۱۱</sup> که نوع و میزان تولید را به ایستگاه‌های کاری یا اجزاء زنجیره تأمین ابلاغ می‌کند و کانبان انتقال<sup>۱۲</sup> (حمل) که نقش مجوز جابجایی برای میزان معینی از یک کالای خاص را بین بخش‌های مختلف بر عهده دارد. کانبان حمل، زمان انتقال قطعات بین ایستگاه‌های مختلف خط تولید یا بین اجزاء زنجیره تأمین را تعیین می‌کنند (مارخام و همکاران، ۱۹۹۸). علاوه بر مشخص کردن قطعه و مقدار، کانبان حمل مشخص می‌کند قطعه از کجا می‌آید و به کجا می‌رود. نحوه به‌کارگیری کانبان در تولید معمولاً تابع دو شیوه تک‌کانبان و دوکانبان است. در شیوه تک‌کانبان که به‌طور معمول از نوع انتقال هستند به‌میزان قطعاتی که مجوز انتقال می‌گیرند، قطعه در همان ایستگاه، تولید و جایگزین قطعات منتقل شده می‌شوند. در سیستم دوکانبان مقدار کالایی که در هر ایستگاه، مجوز تولید می‌گیرد با مقدار کالای منتقل شده از آن ایستگاه برابر نیست.

سیستم کانبان زمانی که به‌طور مناسب طراحی شود اثربخش است و اهداف تولید ناب را تضمین می‌کند (خجسته و ساتو<sup>۱۳</sup>، ۲۰۱۵؛ پدریلی<sup>۱۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). این سیستم نیز مانند سایر سیستم‌ها باید با توجه به محدودیت‌ها و شرایط موجود در هر صنعت طراحی شود تا کارایی لازم را داشته باشد (جونپور و فیلهو، ۲۰۱۰). مطالعات شبیه‌سازی خجسته و ساتو (۲۰۱۵) اهمیت طراحی سیستم کنترل کانبان را در سیستم‌های تولید با ویژگی‌های متفاوت نشان داد. آنها نشان دادند کانبان در محیط‌های تولیدی مختلف عملکرد متفاوتی دارد و پارامترهای آن برای هر سیستم تولیدی خاص تعیین می‌شود.

تعیین پارامترهایی مانند تعداد کانبان در سیکل، حجم هر کانبان و تعیین نقطه سفارش از جمله مؤلفه‌هایی هستند که باید به‌طور مناسب در مرحله طراحی تعیین شوند (چان<sup>۱۵</sup>، ۲۰۰۱). پارامتر حجم کانبان به‌خصوص در صنایع خودروسازی با توجه به طرح بسته‌بندی و ظرفیت پالت‌ها تعیین می‌شود. نقطه سفارش کانبان بستگی به میزان مصرف قطعات درون کانبان و فاصله زمانی سفارش تا دریافت دارد؛ اما مهم‌ترین پارامتر طراحی سیستم کانبان حمل، تعداد کانبان در گردش است. تعیین نادرست این پارامتر به‌طور مستقیم هزینه‌های نگهداری موجودی‌ها و حمل و نقل زنجیره تأمین را افزایش خواهد داد و بر عملکرد زنجیره تأمین تأثیر خواهد گذاشت (رئانی<sup>۱۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۹؛ فوکوکاوا و هانگ<sup>۱۷</sup>، ۱۹۹۳). این مسأله یکی از مسائل حیاتی و مهم در سیستم‌های JIT<sup>۱۸</sup> مطرح است (هیو و هو<sup>۱۹</sup>، ۲۰۱۱).

هرچند در گذشته روش‌ها و مدل‌های متفاوتی مانند رویکرد شبیه‌سازی، مدل‌های صف، مدل‌های ریاضی، مدل‌های ابتکاری و رویکرد هوش مصنوعی برای تعیین تعداد بهینه کانبان توسعه داده شده است (فاسیو<sup>۲۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۳)، به دلیل محدودیت‌هایی که در آنها وجود دارد، قابلیت استفاده در محیط‌های واقعی مانند تأمین قطعات صنعت خودروسازی را ندارند. غیرعملی بودن این مدل‌ها در مطالعه موردی این پژوهش مشهود است. از جمله این محدودیت‌ها در نظر گرفتن اهداف و محدودیت‌های تولیدکننده اصلی در زنجیره تأمین و توجه نکردن به اهداف و محدودیت‌های سایر اعضای زنجیره تأمین (تأمین‌کنندگان) در این مدل‌ها یا توجه نکردن به مسئله کانبان حمل (بیشتر پژوهش‌ها در حوزه کانبان تولید می‌باشد) و در نظر نگرفتن اهداف و محدودیت‌های حمل و نقل در زنجیره تأمین است. فاسیو و همکاران (۲۰۱۳) با توجه به ادبیات پژوهش، اهداف مسئله تعیین تعداد کانبان را

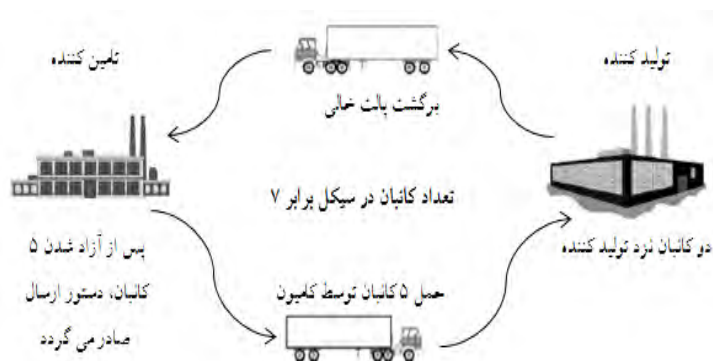
حداکثرکردن میزان خروجی تولید، حداقل کردن فاصله تاخیر<sup>۲۲</sup> و آماده‌سازی، حداقل کردن موجودی در ساخت و حداکثرکردن بهره‌برداری از امکانات تولید دسته‌بندی کردند؛ بنابراین روش‌های تعیین تعداد کانبان، محدود به تبادل هزینه‌های موجودی و کمبود می‌شود و تنها در پژوهش‌هایی مانند: لولی<sup>۲۳</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، فاسیو و همکاران (۲۰۱۳)، ربّانی (۲۰۰۹) و ویدیدانا<sup>۲۴</sup> و همکاران (۲۰۱۰) هزینه‌های حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است.

در این مقاله بر مبنای برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه، مدلی مبتنی بر شرایط واقعی زنجیره‌های تأمین صنعت خودرو در ایران ارائه شده است. در این مدل با توجه به اهداف و محدودیت‌های سازنده اصلی و تأمین‌کننده فرعی در زنجیره، تعداد کانبان در کانبان‌های حمل تعیین می‌شود. برای اعتبارسنجی نتایج مدل ریاضی و بررسی قابلیت پیاده‌سازی آنها مدل شبیه‌سازی طراحی شده است تا معیارهای عملکردی سیستم کانبان را در دو شرایط فعلی، تأمین یکی از قطعات صنعت خودرو و مدل بهینه‌سازی شده اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل کند.

در بخش دوم، مسئله پژوهش شفاف‌تر توضیح داده شده است. بخش سوم به پیشینه پژوهش اختصاص یافته و در بخش چهارم مدل‌سازی مسئله ارائه شده است. بخش پنجم مطالعه موردی این پژوهش تشریح شده و عملکرد مدل پیشنهادی در این بخش با مدل شبیه‌سازی ارزیابی شده است. بخش پایانی نتیجه‌گیری و جمع‌بندی است.

## بیان مسأله

سیستم کانبان نقش مدیریت فعالیت‌ها را در زنجیره تأمین برعهده دارد. این سیستم را سیستم عصبی تولید ناب می‌نامند. در صورتی که این سیستم به‌طور مناسب طرح‌ریزی و اجرا شود، زنجیره تأمین ناب محقق خواهد شد. شکل (۱)، نحوه عملکرد کانبان حمل را نشان می‌دهد. کانبان حمل به‌طور معمول بین دو عضو زنجیره تأمین اجرا می‌شود (ربّانی، ۲۰۰۹). زنجیره تأمین شکل (۱) از دو جزء تولیدکننده و تأمین‌کننده منفرد برای تأمین یک نوع قطعه تشکیل شده است. در سیستم کانبان حمل این زنجیره، هفت کانبان در گردش تعیبه شده است. مانند بیشتر سیستم‌های کانبان، هر ظرف از قطعات<sup>۲۵</sup> معادل یک کارت کانبان در نظر گرفته می‌شود (فاسیو و همکاران، ۲۰۱۳). پس از آزاد شدن پنج کانبان (وجود دو کانبان ذخیره احتیاطی نزد تولیدکننده)، تأمین‌کننده موظف است تعدادی یا همه کانبان‌های آزاد شده به تولیدکننده را بارگیری و ارسال کند. پس از تحویل کانبان‌ها، وسیله نقلیه ارسال شده از طرف تأمین‌کننده پالت‌های خالی را برای آماده‌سازی دوره بعدی سفارش حمل می‌کند.



شکل ۱- نحوه کارکرد کانبان حمل

سیم‌نوسولوسکی و بُرر<sup>۲۶</sup> (۲۰۱۳) نشان دادند در مسئله کانبان تعداد کانبان در گردش و ظرفیت وسایل نقلیه نسبت به سایر پارامترها اهمیت بیشتری دارد و بر کمبود قطعات در ایستگاه‌های کاری تأثیرگذارتر است. اگر تعداد کانبان تنها با در نظر گرفتن منافع تولیدکننده تعیین شود، تولیدکننده ترجیح می‌دهد تا قطعات نیمه‌ساخته خود را به مقدار لازم تولید ساعتی خط مونتاژ، تأمین کند تا علاوه بر کاهش هزینه کالای در گردش، موجودی انبارهای خود را به حداقل برساند (فاسیو و همکاران، ۲۰۱۳). در این حالت تعداد دفعات ارسال و هزینه‌های حمل‌ونقل برای تأمین‌کننده غیراقتصادی خواهد شد؛ زیرا ممکن است تأمین‌کننده مجبور شود تا قطعات را به صورت پی‌درپی با وسیله نقلیه‌ای ارسال کند که ظرفیت آن تکمیل نشده است. از طرف دیگر از دیدگاه تأمین‌کننده، افزایش تعداد کانبان در سیکل مقرون به صرفه‌تر خواهد بود؛ زیرا در این حالت تواتر بارگیری‌های و قدرت مانور بیشتر برای استفاده از وسایل نقلیه بزرگتر با ظرفیت تکمیل فراهم و باعث افزایش موجودی‌ها خواهد شد (سالتنگلو و اوسان، ۲۰۱۵). اگرچه در مطالعات گذشته و روش‌های موجود تعداد کانبان تنها با در نظر گرفتن اهداف تولیدکننده تعیین می‌شود، لازمه تعیین تعداد بهینه کانبان حمل، در نظر گرفتن اهداف و محدودیت‌های هر دو جزء زنجیره تأمین یعنی تولیدکننده و تأمین‌کننده است.

در این مقاله مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی چندهدفه غیرخطی از نوع عدد صحیح (INLMOP<sup>۲۷</sup>) توسعه داده شده است. در این مدل با در نظر گرفتن اهداف و محدودیت‌های هر دو جزء زنجیره تأمین تعداد بهینه کانبان تعیین می‌شود. برای اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی از داده‌های یکی از تأمین‌کنندگان زنجیره تأمین خودرو در ایران (شرکت ایران خودرو) استفاده و عملکرد مدل پیشنهادی با طراحی و توسعه یک مدل شبیه‌سازی ارزیابی شده است.

### پیشینه پژوهش

در سال‌های گذشته به دلیل اهمیت بحث تولید بهنگام و تولید ناب و لزوم اجرای سیاست تولید کششی، پژوهشگرانی به صورت محدود، اما روبه رشد در زمینه مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین کششی و طراحی انواع کانبان فعالیت کرده‌اند (چن و سرکر<sup>۲۸</sup>، ۲۰۱۵). جونیور و فیلهو (۲۰۱۰) علاوه بر معرفی انواع مسائل کانبان، مقالات ارائه شده در این حوزه را تا سال ۲۰۱۰ مطالعه و دسته‌بندی کرده‌اند. موریس و مواسیر<sup>۲۹</sup> (۲۰۱۰) مسئله طراحی و مدیریت کانبان را مرور و دسته‌بندی کرده‌اند. بیشتر پژوهش‌های مسئله کانبان در حوزه کانبان‌های تولید است و در سال‌های اخیر به مسئله تعیین تعداد بهینه کانبان حمل توجه شده است (چان، ۲۰۰۱). در این بخش بر مهم‌ترین پژوهش‌های مرتبط با مسئله تعیین تعداد کانبان در دوره، در دو نوع کانبان تولید و حمل مروری شده است.

کیمورا و ترادا<sup>۳۰</sup> (۱۹۸۱) از رویکرد شبیه‌سازی برای تعیین تعداد کانبان در دوره در کانبان‌های تولید استفاده کردند. آنها یک خط تولید چندمرحله‌ای را شبیه‌سازی کردند. در این خط تولید سیستم کانبان تولید، حجم تولید در هر ایستگاه و انتقال قطعات بین ایستگاه‌ها را تعیین می‌کند. با تعیین و تغییر تعداد کانبان در هر ایستگاه حالت بهینه برای هر ایستگاه مشخص می‌شود. فیلیپوم و همکاران (۱۹۸۷) عوامل مؤثر بر تعداد کانبان تولید را بررسی و از شبیه‌سازی برای حل مسئله تعداد کانبان استفاده کردند.

مویمی و چانگ<sup>۳۱</sup> (۱۹۹۰) روش ابتکاری را برای مسئله کانبان‌های تولید ارائه کردند. آنها این روش را با فرض اینکه ظرفیت تولید در هر ایستگاه نامحدود است و کمبود تقاضا معجز نیست ارائه داده‌اند. ونگ و ونگ<sup>۳۲</sup> (۱۹۹۰) با استفاده از رویکرد فرایندهای مارکوف در نظریه صف تعداد کانبان بین دو ایستگاه را تعیین کردند. جُدیشانکار و ونگ (۱۹۹۲) از رویکرد شبکه‌های پتری<sup>۳۳</sup> برای تعیین تعداد کانبان تولید با هدف حداقل کردن هزینه‌های کمبود و نگهداری موجودی استفاده کردند.

پرایس<sup>۳۴</sup> و همکاران (۱۹۹۲) مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی ارائه دادند که تعداد کانبان در سیکل را برای سیستم‌های کانبان تولید  $n$  مرحله‌ای در حالت قطعی تعیین می‌کند. هدف مدل پیشنهادی آنها حداقل کردن موجودی‌ها و هزینه‌های نگهداری آنها در کارگاه‌های مونتاژ است. موندن<sup>۳۵</sup> (۱۹۹۳) با فرض ثابت بودن حجم کانبان برای تعیین تعداد کانبان حمل، حاصل ضرب تقاضای روزانه، فاصله تأخیر و فاکتور ذخیره احتیاطی را بر حجم پالت حمل کالا تقسیم کرد. فوکوکاوا و هانگ (۱۹۹۳) مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ادغامی آرمانی را برای کانبان‌های تولید با هدف حداقل کردن هزینه‌های موجودی و نیروی انسانی ارائه کردند. برکلی<sup>۳۶</sup> (۱۹۹۶) از رویکرد شبیه‌سازی برای تعیین حداقل تعداد کانبان و تأمین میزان تولید ثابت استفاده کرد. تعداد بهینه کانبان از برابری هزینه‌های تواتر حمل و نقل و درآمد حاصل از کاهش سطوح موجودی‌های نیمه‌ساخته تعیین می‌شود. تاکاهاشی<sup>۳۷</sup> (۱۹۹۴) مسئله تعداد کانبان تولید را در شرایط تصادفی در سیستم‌های تولید سری نامتعادل<sup>۳۸</sup> با رویکرد شبیه‌سازی بررسی کردند.

نوری و سرکر<sup>۳۹</sup> (۱۹۹۸) مدل برنامه ریاضی را برای کاهش هزینه‌های نگهداری موجودی و هزینه‌های کمبود ارائه دادند. این مدل تعداد بهینه کانبان بین دو ایستگاه تولید را تعیین می‌کند. بسیاری از پژوهش‌ها از رابطه پیشنهادی شرکت تویوتا (رابطه (۱)) برای محاسبه تعداد کانبان ( $n$ ) استفاده کردند (چان، ۲۰۰۱؛ جُدیشانکار و ونگ، ۱۹۹۲):

$$n = \frac{d_{ave}(t_w + t_{pc})(s)}{k} \quad (1)$$

که در آن  $d_{ave}$  میانگین تقاضای روزانه،  $t_w$  و  $t_{pc}$  به ترتیب زمان انتظار و زمان پردازش یک کانتینر هستند.  $s$  ضریب احتیاطی و  $k$  ظرفیت کانتینر است. چان (۲۰۰۱) تأثیر تعداد کانبان را بر سایر سیستم‌های تولید به موقع (JIT) با استفاده از دو مدل شبیه‌سازی مطالعه کردند. معطر حسینی و حسینی (۱۳۸۳) برای تعیین تعداد بهینه کانبان در سیستم تولید بهنگام با شرایط پویا نوعی مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ارائه دادند که هزینه نگهداری موجودی و هزینه‌های رویارویی با کمبود را حداقل می‌کند. سپس براساس مدل اولیه برای کنترل تغییرات پارامترهای تولید مدل دیگری را ارائه دادند که قابلیت تعیین تعداد کانبان متغیر و انعطاف پذیر را دارد. ونگ و سرکر<sup>۴۰</sup> (۲۰۰۶) سیستم موجودی یک زنجیره تأمین شامل سیاست سفارش مواد اولیه و سیاست تحویل محصول نهایی را بررسی کردند. آنها مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح برای تعیین اندازه دسته تولید، تعداد کانبان در هر ایستگاه، سیاست سفارش دهی و سیاست تحویل ارائه دادند و برای حل مدل ریاضی آن



از روش شاخه و کران توسعه یافته استفاده کردند. طارقیان و همکاران (۱۳۸۷) برای تعیین تعداد بهینه کانبان از الگوریتم ابتکاری جستجوی پراکنده استفاده کردند. آنها تعداد کانبان را به گونه‌ای محاسبه کردند که میانگین زمان توقف سفارش‌ها در خط و میزان موجودی نیمه‌ساخته حداقل شود. در نهایت مسئله نمونه را با مدل ارائه شده بررسی و نتایج به دست آمده را با مدل الگوریتم جستجوی ممنوع مقایسه کردند. آنها در این پژوهش نشان دادند مدل جستجوی پراکنده کارایی بیشتری دارد. ربانی و همکاران (۲۰۰۹) براساس توسعه مدل ونگ و سرکر (۲۰۰۶) مسئله کانبان حمل را در زنجیره تأمین چندمرحله‌ای بررسی کردند و از الگوریتم فرا ابتکاری اندازه‌ای<sup>۴۱</sup> برای تعیین تعداد کانبان، اندازه دسته، نقطه سفارش و مقدار تولید محصول نهایی در زنجیره تأمین استفاده کردند. ویدادانا و همکاران (۲۰۱۰) برای زنجیره تأمین چندمرحله‌ای و چندمحصولی مدلی ریاضی ارائه دادند.

آزاده<sup>۴۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰a) مدلی برای تعیین حجم کانبان در زنجیره تأمین چندمرحله‌ای با استفاده از شبیه‌سازی با الگوریتم ژنتیک ارائه دادند. با توجه به رفتار تصادفی پارامترهای زنجیره تأمین از شبیه‌سازی و مدل ابتکاری بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. چهارسوقی و ساجدی‌نژاد (۲۰۱۰) مدلی برای کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین چندسطحی مانند هزینه‌های نگهداری موجودی‌ها، نگهداری ذخیره احتیاطی و موجودی‌های اضافی ارائه دادند. در این مدل علاوه بر کاهش هزینه‌ها، تعداد و اندازه کانبان در شرایط تصادفی بودن تقاضا تعیین می‌شود. آزاد و همکاران (۲۰۱۰b) الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری و مدل شبیه‌سازی را برای بهبود عملکرد خطوط مونتاژ خودرو براساس رویکرد تولید به موقع ارائه کردند. هیو و هو (۲۰۱۱) مدلی چندهدفه و یکپارچه با الگوریتم ژنتیک (MOGA<sup>۴۳</sup>) برای تعیین تعداد و حجم کانبان در سیستم تولید بهنگام ارائه دادند. بهینه کردن هم‌زمان حجم کانبان و تعداد کانبان یک مسئله چندهدفه است که با استفاده از الگوریتم ژنتیک در یک زنجیره تأمین چندمرحله‌ای مدل‌سازی و تحلیل شده است. زمانی که حجم کانبان زیاد باشد، تعداد کانبان کمتر می‌شود؛ به همین دلیل لازم است حجم و تعداد کانبان به طور هم‌زمان بهینه شود. با توجه به خصوصیت بیشتر خطوط تولید و مونتاژ طرح بسته‌بندی، اندازه پالت‌ها و حجم کانبان به طور معمول ثابت است؛ به همین دلیل مدل ارائه شده برای این زنجیره تأمین قابل استفاده نیست. برخی پژوهشگران مانند گزالیز<sup>۴۴</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، فرامینن و پیروال<sup>۴۵</sup> (۲۰۱۲) و بلیساریو و پیروال<sup>۴۶</sup> (۲۰۱۵) مسئله تعیین تعداد کانبان را در شرایط پویا مانند تغییرات مداوم تقاضا بررسی کرده‌اند. به نظر آنها لازم است تعداد کانبان در دوره با توجه به شرایط، در طول زمان تغییر کند. چن و سرکر<sup>۴۷</sup> (۲۰۱۵) مسئله بهینه‌سازی کانبان‌های تولید چندمرحله‌ای را زمانی که تقاضا وابسته به قیمت است، در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی مدل‌سازی کردند. سیم‌نوسزلوسکی و بُزر (۲۰۱۳) در کانبان‌های تولید به شرطی که پارامترهای سیستم قطعی (غیراحتمالی) باشد، حد پایینی برای تعداد کانبان تعیین کردند؛ به نحوی که ایستگاه‌های کاری با کمبود قطعه مواجه نشوند. فاسیو و همکاران (۲۰۱۳) و لولی و همکاران (۲۰۱۵) مدل‌های ریاضی برای تعیین تعداد کانبان، تعداد اپراتور و زمان تولید در سیستم خط مونتاژ ارائه کردند. این مدل زمانی کاربرد دارد که از ابزار سوپرمارکت استفاده شود. تابع هدف مدل‌های آنها هزینه کل سیستم شامل هزینه‌های مربوط به موجودی و حمل و نقل است.

کاگشیمیا و اینوی<sup>۸</sup> (۲۰۱۴) از رویکردهای جستجوی ممنوع<sup>۹</sup> و شبیه‌سازی برای بهینه‌کردن پارامترهای کانبان حمل و تولید (تعداد کانبان‌های حمل و تولید، مقدار تولید و ذخیره احتیاطی) با هدف حداقل کردن متوسط هزینه‌ها (هزینه نگهداری موجودی و فروش از دست‌رفته) استفاده کردند. پدریلی و همکاران (۲۰۱۵) برای تعیین پارامترهای کانبان تولید از رویکرد بهینه‌سازی-شبیه‌سازی<sup>۱۰</sup> استفاده کردند. تابع هدف آنها حداقل کردن هزینه موجودی‌ها، زمان‌های انتظار، مشتری از دست‌رفته، کمبود و حداکثر کردن میزان خروجی هستند.

همچنین پژوهشگرانی در زمینه برنامه‌ریزی حمل و نقل، تخصیص بهینه کالاها به وسایل نقلیه در زنجیره تأمین و حداکثر استفاده از ناوگان حمل و نقل مدل‌هایی ارائه کرده‌اند. در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است. ذگردی و بهشتی‌نیا (۱۳۸۸) مدلی برای یکپارچگی زمان‌بندی حمل و نقل در یک زنجیره تأمین سه‌مرحله‌ای با وسایل نقلیه دارای ظرفیت‌های متفاوت ارائه کردند. در این پژوهش تخصیص کارها به تأمین‌کنندگان و ناوگان حمل به صورتی انجام خواهد شد که قطعات سریع‌تر و با هزینه حمل اقتصادی‌تر به شرکت تولیدکننده تحویل داده می‌شود. برای حل این مدل از الگوریتم ژنتیک پویا با کروموزوم‌هایی با ساختار متغیر استفاده شده است. توکلی‌مقدم و نوروزی (۱۳۹۰)، مدلی برای ایجاد توازن در مقدار کالای توزیع‌شده نسبت به ظرفیت وسایل نقلیه در یک ناوگان ناهمگن ارائه دادند. هدف این مدل حداکثر کردن رضایت رانندگان برای حمل کالاها، کاهش هزینه‌های حمل و نقل و افزایش سود ناشی از توزیع است. برای حل این مسأله در ابعاد بزرگ از روش بهبودیافته بهینه‌سازی انبوه ذرات (IPSO<sup>۱۱</sup>) استفاده شده است. برای نشان‌دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی تعدادی از مسائل در ابعاد کوچک و بزرگ با این الگوریتم و روش شاخه و کران حل و نتایج آن با هم مقایسه شده است. حسن‌نایی و کیانفر (۱۳۹۱) مسئله تعیین توالی اعزام و توقف قطارها را برای حداکثر استفاده از ظرفیت شبکه ریلی موجود بررسی کرده‌اند. هدف این مسأله، تعیین ترتیب اعزام قطارها از ایستگاه مبدا و مکان توقف برنامه‌ای قطارها با حداقل کردن طول افق زمان‌بندی است. این مسأله حالت خاصی از مسئله جریان کارگاهی منعطف است.

بررسی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد مسئله تعیین تعداد بهینه کانبان مسأله‌ای مهم و به‌روز است و ارائه راه‌حل برای مسأله در صنایع مختلف با توجه به ویژگی‌های آنها نوآوری لازم را دارد. بیشتر پژوهشگران هزینه‌های مرتبط با موجودی یا حمل و نقل را به‌تنهایی (لولی و همکاران، ۲۰۱۵) بررسی کرده‌اند؛ در حالی که در این مقاله با توجه به شرایط مطالعه موردی، به‌طور هم‌زمان اهداف ذی‌نفعان مختلف زنجیره تأمین (تولیدکننده و عرضه‌کننده) در نظر گرفته شده است. ارائه یک مدل جدید چندهدفه و اضافه‌کردن نوع و ظرفیت وسایل نقلیه و هزینه‌های خاص حمل و نقل متناسب با مطالعه موردی پژوهش وجه تمایز مدل این مقاله با پژوهش‌های مشابه مانند ویدادانا و همکاران، ۲۰۱۰؛ ونگ و سرکر، ۲۰۰۶ و ربانی، ۲۰۰۹ است.

## مدلسازی ریاضی مسأله

مسئله کانبان حمل به‌طور معمول بین دو جزء زنجیره تأمین یعنی تولیدکننده اصلی و تأمین‌کننده منفرد مطرح می‌شود. همان‌طور که اشاره شد در این مسأله هر دو جزء سعی در تحقق اهداف خود با در نظر گرفتن محدودیت‌های مجموعه خود هستند؛ در حالی که اهداف هر دو جزء با یکدیگر متناقض است؛ بنابراین تعیین تعداد

بهینه کانبان در دوره که تعادلی بین اهداف تولیدکننده و تأمین‌کننده ایجاد کند یکی از مسائل طراحی کانبان حمل است. در این بخش جزئیات مدل ریاضی چندهدفه ارائه شده برای حل مسئله کانبان حمل بیان می‌شود.

**مفروضات مدل پیشنهادی:** در توسعه مدل ریاضی تقاضای (مصرف کالا) تولیدکننده و زمان حمل از تأمین‌کننده به تولیدکننده قطعی و ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است برای تولیدکننده و تأمین‌کننده فقط یک نوع قطعه در برنامه کانبان با قیمت ثابت وجود دارد. وسایل حملی که در اختیار تأمین‌کننده است، ظرفیت ثابتی دارند و در دوره برنامه‌ریزی نوع، ظرفیت و هزینه استفاده از آنها تغییری نمی‌کند. همچنین زمان بارگیری و تخلیه کامیون‌ها در زمان حمل در نظر گرفته شده است و هزینه‌ای بابت نگهداری کالا نزد تأمین‌کننده وجود ندارد.

**تعریف پارامترها و متغیرهای مدل پیشنهادی:** پارامترهای مدل به همراه علائم اختصاری و واحد اندازه‌گیری آنها در جدول (۱) معرفی شده‌اند. در مسئله کانبان حمل تعیین سه متغیر تصمیم در اولویت قرار دارد. تعداد کانبان در سیکل ( $N$ ) که شامل تعداد کانبان‌های نزد تولیدکننده، تأمین‌کننده و در راه است. این متغیر، متغیر مهم طراحی کانبان حمل است که بر هزینه‌های موجودی، حمل و نقل‌ها و سرمایه در گردش تأثیر مستقیم دارد. دیگر متغیر تصمیم نوع وسیله نقلیه ( $y_j$ ) است که بر هزینه‌های حمل و نقل تأمین‌کننده مؤثر است. هرچند استفاده از وسایل نقلیه بزرگتر با ظرفیت حمل تعداد بیشتری کانبان، هزینه واحد بیشتری نسبت به وسایل نقلیه کوچکتر دارد؛ اما استفاده از آنها تواتر سرویس‌دهی را در یک دوره کاهش می‌دهد.

متغیر  $z$  یک متغیر صفر و یک است و زمانی مقدار این متغیر یک است که از وسیله نوع  $z$  (وانت، کامیون، تریلی و ...) در سیستم کانبان حمل استفاده شود. تعداد کانبانی که در هر بار حمل از تأمین‌کننده به تولیدکننده در وسیله نقلیه انتخابی قرار می‌گیرد، (متغیر تصمیم  $X$ ) بر اساس متغیرها و پارامترهایی مانند تعداد کانبان در سیکل، نقطه سفارش، نوع و ظرفیت وسیله نقلیه، میزان مصرف و فاصله زمانی حمل و نقل بین تولیدکننده و تأمین‌کننده تعیین می‌شود. با توجه به مقدار  $X$  و ظرفیت وسیله حمل، درصد استفاده از ظرفیت وسیله نقلیه تعیین خواهد شد که حداکثر کردن آن یکی از اهداف مسئله کانبان حمل است.

جدول ۱- تعریف پارامترهای مدل پیشنهادی

علامت اختصاری	نام پارامتر	واحد اندازه‌گیری	تعریف پارامتر
$Q$	حجم کانبان	تعداد قطعه	حجم کانبان عبارت است از: تعداد واحد قطعه‌ای که در یک کانبان قرار دارد.
$C_1$	قیمت قطعه	قطعه/ریال	قیمت واحد هر قطعه که مبنای محاسبه سرمایه در گردش است.
$C_2$	هزینه نگهداری قطعه	قطعه-ساعت/ریال	هزینه نگهداری یک قطعه نزد تولیدکننده طی ساعت
$A_j$	هزینه اجاره وسیله نقلیه	وسيله نقلیه/ریال	هزینه رفت و برگشت وسیله نقلیه نوع $z$ از تأمین‌کننده (قطعه‌ساز) به تولیدکننده. تأمین‌کننده می‌تواند وسایل نقلیه متفاوتی مانند وانت، کامیون، تریلی و ... را برای وسیله حمل انتخاب کند.
$K_j$	ظرفیت وسیله نقلیه	وسيله /تعداد کانبان	ظرفیت وسیله نقلیه نوع $z$ برحسب تعداد کانبان قابل حمل.
$J$	تنوع وسایل نقلیه	تعداد	تعداد انواع وسیله نقلیه قابل استفاده در سیستم حمل و نقل.
$D$	میزان مصرف	ساعت/تعداد قطعه	تقاضا (مصرف) قطعه نزد تولیدکننده به ازاء هر ساعت.
$N_s$	ذخیره احتیاطی	تعداد کانبان	تعداد کانبان ذخیره احتیاطی نزد تولیدکننده (نقطه سفارش کانبان حمل).

مدل ریاضی چندهدفه پیشنهادی: مدل ریاضی توسعه داده شده براساس مطالعه زنجیره تأمین خودرو و منطبق بر شرایط موجود در این صنعت به شرح زیر است.

$$Z_1 \quad N \quad Q \quad C_1 \quad (2)$$

$$Z_2 \quad \frac{(Q \quad X)^2 \quad C_2}{2D} \quad (3)$$

$$Z_3 \quad \sum_{j=1}^J (A_j \quad y_j \quad \frac{D}{Q \quad X}) \quad (4)$$

$$Z_4 \quad 1 \quad \sum_{j=1}^J (y_j \quad \frac{X}{K_j}) \quad (5)$$

St:

$$N \quad N_s \quad (6)$$

$$X \quad N \quad N_s \quad (7)$$

$$X \quad N_s \quad (8)$$

$$X \quad K_j \quad y_j \quad j \quad 1, \dots, J \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J y_j \quad 1 \quad (10)$$

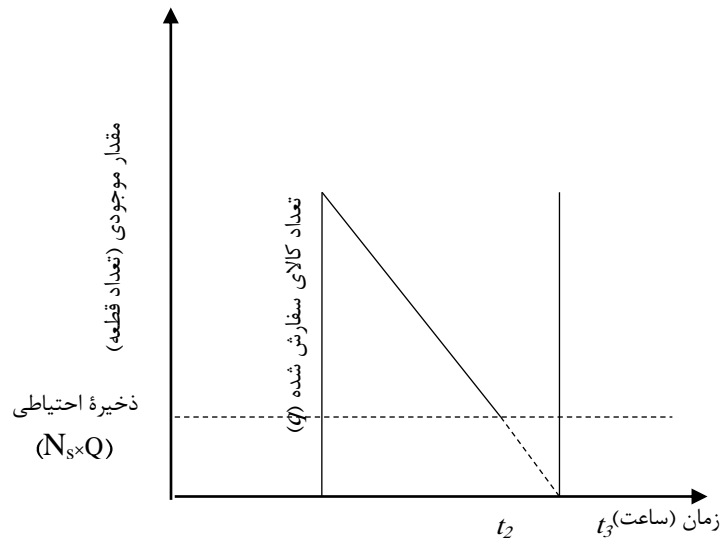
$$X \quad 0, \quad N \quad 0, \quad (11)$$

$X \ \& \ N \ \text{Integer}$

$$y_j \quad (0,1) \quad j \quad 1, \dots, J$$

توابع هدف و محدودیت‌های مدل پیشنهادی در ادامه تشریح می‌شود.

**تشریح توابع هدف:** اهداف مسئله کانبان حمل شامل اهداف مربوط به دو گروه تولیدکننده و تأمین‌کننده در زنجیره تأمین است. هر گروه در این مسأله اهداف مختص به خود را دارند. تولیدکننده مادر در زنجیره تأمین به دنبال کاهش ظرفیت‌های انبارهای خود و پیامد آن کاهش هزینه‌های نگهداری موجودی و کاهش سرمایه در گردش سیستم است. هر دو هدف تولیدکننده با کاهش تعداد کانبان در دوره، محقق می‌شود. از ضرب تعداد کانبان در سیکل ( $N$ )، تعداد قطعه موجود در هر کانبان ( $Q$ ) و قیمت هر واحد کالا ( $C_1$ )، سرمایه در گردش سیستم کانبان حمل محاسبه می‌شود؛ بنابراین یکی از اهداف مسأله به صورت  $Z_1 \quad N \quad Q \quad C_1$  مطابق (۲) تعریف شده است. با حداقل کردن این هدف یکی از اهداف زنجیره تأمین به دست می‌آید. این هدف کاهش تعداد کانبان در دوره و هزینه‌های در گردش است. همچنین از ضرب میزان بهره در تابع هدف، هزینه سرمایه در گردش مانند تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. این تغییر بر جواب بهینه تأثیری ندارد.



شکل ۲- مدل موجودی کالا نزد تولیدکننده

برای اندازه‌گیری هزینه‌های نگهداری کالا نزد تولیدکننده از مدل‌های متداول برنامه‌ریزی و کنترل موجودی‌ها در سیستم‌های تولید استفاده شده است. شکل (۲) فرایند سفارش‌دهی و نگهداری موجودی را در مسئله کانبان حمل در شرکت مادر نشان می‌دهد. محور عمودی و افقی در این شکل به ترتیب مقدار موجودی برحسب قطعه و زمان برحسب ساعت است. در لحظه  $t_1$  سفارشی برابر  $q$  (تعداد قطعات درون کانبان‌های ارسالی از تأمین‌کننده) به تولیدکننده خواهد رسید که با میزان ثابت  $D$  قطعه در ساعت مصرف می‌شوند. در زمان  $t_2$ ، لحظه رسیدن موجودی به نقطه سفارش  $(N_s \times Q)$ ، سفارشی صادر می‌شود تا در فاصله  $t_3 - t_2$  که برابر زمان سفارش تا دریافت کالا است، کانبان‌های آزاد شده دریافت شوند. این فرایند منطبق بر یکی از مدل‌های کنترل موجودی با شرایط مصرف یکنواخت و ثابت و ورود یکباره کالا به انبار است (حاج‌شیرمحمدی، ۱۳۷۳). متوسط موجودی انبار ( $E(I)$ ) در این مدل برابر مساحت زیر منحنی مصرف (شکل (۲)) است و از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$E(I) = \frac{q(t_3 - t_1)}{2} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، مقدار کالای سفارش شده ( $q$ ) در مسئله کانبان حمل از ضرب تعداد کانبان رسیده در یک سفارش ( $X$ ) در حجم هر کانبان ( $Q$ ) به صورت  $q = Q \times X$  حاصل می‌شود و فاصله زمانی تا ورود سفارش بعدی ( $t_3 - t_1$ ) در این رابطه برابر زمان مصرف مقدار کالای سفارش شده است؛ بنابراین مقدار سفارش رسیده  $Q \times X$  با میزان مصرف  $D$  (قطعه در ساعت) در فاصله زمانی  $\frac{Q \times X}{D}$  مصرف خواهد شد. با جایگزینی تعاریف فوق در رابطه (۱۲)، رابطه زیر برای محاسبه متوسط موجودی نزد تولیدکننده در مسئله کانبان حمل برحسب قطعه در ساعت حاصل خواهد شد.

$$E(I) = \frac{1}{2} \frac{(Q - X) \frac{Q}{D} X}{(Q - X)^2} \quad (13)$$

در صورتی که هزینه نگهداری واحد قطعه در یک ساعت برابر  $C_2$  باشد متوسط هزینه نگهداری نزد تولیدکننده از رابطه (۱۴) حاصل می‌شود. این رابطه یکی دیگر از اهداف تولیدکننده است که با حداقل کردن آن تولیدکننده نیاز به فضای نگهداری کمتری برای کالای خود خواهد داشت.

$$Z_2 = E(I) C_2 = \frac{(Q - X)^2 C_2}{2D} \quad (14)$$

یکی دیگر از اجزای کانبان حمل که باید مؤلفه‌های آن تعیین شوند، سیستم حمل و نقل استفاده شده در سیستم کانبان حمل است. انتخاب وسیله حمل و نقل مناسب با هدف حداقل کردن متوسط هزینه حمل و نقل و استفاده حداکثری از ظرفیت وسیله نقلیه از جمله تصمیمی است که هزینه‌های آن برعهده تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین است؛ به همین دلیل دو تابع هدف مرتبط با سیستم حمل و نقل یعنی هزینه حمل و نقل و درصد استفاده از ظرفیت وسیله نقلیه در مسأله در نظر گرفته شده است. متوسط هزینه حمل و نقل سیستم، تابع هزینه هر بار رفت و برگشت از تأمین‌کننده به تولیدکننده و تواتر سرویس‌دهی است (حاج شیر محمدی، ۱۳۷۳). همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شد، فاصله زمانی دو سفارش متوالی در مدل کانبان حمل یا فاصله بین دو کامیون ارسالی از تأمین‌کننده برابر  $\frac{Q}{D} X$  است؛ بنابراین تواتر مراجعه وسایل نقلیه معکوس فاصله زمانی دو مراجعه و برابر  $\frac{D}{Q X}$  خواهد بود. از ضرب تواتر خدمت‌دهی در هزینه حمل وسیله حمل نوع  $j$  ( $A_j$ ) و متغیر انتخاب وسیله نوع  $j$  ( $y_j$ )، متوسط هزینه سیستم حمل و نقل در سیستم کانبان حمل مطابق رابطه (۴) (تابع هدف سوم مسأله) حاصل خواهد شد.

انتخاب وسیله نقلیه‌ای با ظرفیت حمل  $K_j$  کانبان و تعداد  $X$  کانبانی که در آن قرار می‌گیرند، متغیرهای تصمیم هستند و باید به گونه‌ای انتخاب شوند که از ظرفیت وسیله نقلیه به بهترین شکل استفاده شود؛ بنابراین تابع هدف دیگری برای حداکثر استفاده از ظرفیت وسیله نقلیه در مسأله در نظر گرفته شده است. برای تبدیل این تابع هدف به حداقل، تابع هدف درصد استفاده از ظرفیت وسیله نقلیه از یک کسر شده و به صورت رابطه (۵) تبدیل شده است.

در نهایت چهار تابع ریاضی  $Z_1$  تا  $Z_4$  برای توابع هدف مسئله کانبان حمل تحت مفروضات ذکر شده در نظر گرفته شده است. برآوردن توابع هدف، اهداف تولیدکننده و تأمین‌کننده را در استقرار و راه‌اندازی این سیستم تأمین خواهد کرد.

**تشریح محدودیت‌های ریاضی مسأله:** محدودیت‌های ریاضی، دامنه تغییرات متغیرهای تصمیم مسأله را تحت شرایط واقعی مسأله تعیین می‌کنند. محدودیت‌های مسئله کانبان حمل در روابط (۶) تا (۱۰) نشان داده شده‌اند. نامساوی (۶) بیانگر آن است که نباید تعداد کانبان در دوره از تعداد کانبان ذخیره احتیاطی کمتر باشد.

همان‌طور که اشاره شد تعداد کانبان ذخیره احتیاطی (نقطه سفارش کانبان) از جمله پارامترهای مسأله است که براساس میزان مصرف و فاصله سفارش تا دریافت تعیین می‌شود. تعداد کانبان‌هایی که در هر بار سفارش از تأمین‌کننده بارگیری و ارسال می‌شوند (متغیر  $X$ ) باید کمتر از تعداد کل کانبان‌ها منهای ذخیره احتیاطی باشند. این محدودیت در نامعادله (۷) به صورت ریاضی نشان داده شده است. همچنین مقدار سفارش در راه نباید از ذخیره احتیاطی کمتر باشد تا در دوره بعدی سفارش سیستم دچار کمبود نشود. این محدودیت در نامساوی (۸) نشان داده شده است. محدودیت ذکر شده در (۹) تضمین‌کننده تعیین تعداد کانبان‌های حمل ( $X$ ) به اندازه ظرفیت وسیله نقلیه انتخابی ( $K_j$ ) است. رابطه (۱۰) نیز بیانگر آن است که باید یک نوع وسیله نقلیه برای حمل انتخاب شود. علاوه بر محدودیت‌های فوق محدودیت‌های ضمنی مسأله شامل نوع متغیرهای تصمیم و جهت تغییرات آنها باید به مسأله اضافه شوند. همه متغیرهای تصمیم مسأله از نوع عدد صحیح و غیرمنفی هستند. این محدودیت‌ها در روابط (۱۱) نشان داده شده‌اند.

### مطالعه موردی

برای بررسی عملکرد مدل پیشنهادی و قابلیت آن برای حل مسئله کانبان حمل در دنیای واقعی، زنجیره تأمین صنعت خودرو مطالعه شده است. همچنین اطلاعات واقعی تأمین‌کننده‌ای جمع‌آوری شده است که از این سیستم برای تأمین یکی از قطعات گروه صنعتی ایران خودرو (مجموعه جک خودرو) استفاده می‌کند. مدل پیشنهادی براساس اطلاعات تأمین‌کننده مطالعه شده ساخته و پس از حل آن تعداد مناسب کانبان حمل تعیین شده است. در این بخش علاوه بر معرفی مطالعه موردی و ساخت مدل پیشنهادی، حل مدل و ارزیابی عملکرد مدل تشریح شده است.

**معرفی فضای کسب و کار:** زنجیره تأمین گروه صنعتی ایران خودرو بزرگترین زنجیره تأمین در کشور محسوب می‌شود که تاکنون موفق به طراحی و پیاده‌سازی انواع سیستم‌های تأمین از جمله کانبان‌های تولید و حمل شده است. شرکت سایکو، شرکت تأمین قطعات این گروه صنعتی وظیفه طراحی، مدیریت و نظارت بر سیستم‌های کانبان حمل را برعهده دارد. تأمین‌کنندگان تحت نظارت سایکو به دو گروه تأمین‌کنندگان مواد اولیه و تأمین‌کنندگان قطعات و مجموعه‌های آماده نصب بر خودرو تقسیم می‌شوند. از آنجایی که پروژه کانبان الکترونیکی در این شرکت اجرا شده است سفارشات و مدیریت کانبان‌ها به صورت الکترونیکی اجرا می‌شود و بیشتر تأمین‌کنندگان قطعات و مجموعه‌های آماده نصب در این سیستم فعال هستند.

بنابراین یکی از تأمین‌کنندگان فعال این مجموعه که تأمین‌کننده قطعه جک خودرو است برای مطالعه موردی انتخاب شده است. این محصول از مجموعه گروه B (برای تسهیل در برنامه‌ریزی قطعات براساس قانون پارتو به سه گروه A، B و C تقسیم‌بندی شده‌اند) است. این مجموعه، اقلامی با حجم، وزن و قیمت متوسط دارد. وضعیت موجود کانبان حمل: مسئله کانبان حمل که در بخش‌های قبلی معرفی شد براساس رویدادها و فرآیند این سیستم در شرکت مورد مطالعه است. همچنین اهداف و محدودیت‌هایی که در مدل‌سازی این مسأله ذکر

شد، برگرفته از واقعیت‌های سیستم کانبان حمل در شرکت سایکو و تأمین‌کننده مورد مطالعه است.

جدول ۲- پارامترهای کانبان حمل در شرکت مورد مطالعه

علامت اختصاری	نام پارامتر	مقدار
Q	حجم کانبان	در هر پالت (کانبان)، ۶۰ قطعه جک قرار دارد.
C <sub>1</sub>	قیمت قطعه	قیمت هر جک، ۳۰۰۰۰۰ ریال است.
C <sub>2</sub>	هزینه نگهداری قطعه	هزینه نگهداری یک قطعه نزد تولیدکننده ۱۰۰ ریال در ساعت.
J	تنوع وسایل نقلیه	چهار نوع وسیله نقلیه در تأمین‌کننده برای حمل وجود دارد که عبارتند از: وانت (j=1)، خاور (j=2)، کامیون (j=3) و تریلی (j=4).
A <sub>j</sub>	هزینه اجاره وسیله نقلیه	هزینه رفت و برگشت هر نوع وسایل نقلیه بر حسب ریال عبارتند از: A <sub>1</sub> =2,000,000, A <sub>2</sub> =3,000,000, A <sub>3</sub> =3,500,000 و A <sub>4</sub> =4,500,000
K <sub>j</sub>	ظرفیت وسیله نقلیه	ظرفیت وانت ۳ کانبان، خاور ۶ کانبان، کامیون ۸ کانبان و تریلی ۱۲ کانبان است.
D	میزان مصرف	متوسط میزان مصرف قطعه، ۸۴۰ جک در ۲۴ ساعت یا ۳۵ قطعه در ساعت است.
N <sub>s</sub>	ذخیره احتیاطی	باتوجه به فاصله زمانی سه ساعته بین تأمین‌کننده و تولیدکننده و میزان مصرف ۳۵ قطعه در ساعت نقطه سفارش ۱۲۰ قطعه معادل دو کانبان (N <sub>s</sub> =2) در نظر گرفته شده است.

جدول (۲) مقادیر پارامترهای کانبان حمل را بین تولیدکننده (شرکت ایران خودرو) و تأمین‌کننده جک خودرو (شرکت مددرویان) در زنجیره تأمین خودرو نشان می‌دهد.

در حال حاضر تعداد کانبان در سیکل براساس رابطه پیشنهادی شرکت تویوتا، با رابطه (۱۵) تعیین می‌شود. در این رابطه  $N$  بیانگر تعداد کانبان در سیکل (متغیر تصمیم)،  $D$  میزان مصرف قطعه،  $\alpha$  ضریب اطمینان،  $T$  مدت زمان انتظار برای تأمین مجدد و  $Q$  حجم ظرفیت کانبان است.

$$N = \frac{D T (1 + \alpha)}{Q} \quad (15)$$

براساس اطلاعات جدول (۲) و رابطه (۱۵) تعداد کانبان در سیکل با ضریب اطمینان ۳ (3)، ۷ تعیین شده است. در حال حاضر تأمین‌کننده از وسیله نقلیه خاور با ظرفیت حمل ۶ کانبان برای ارسال کالا استفاده می‌کند و در هر بار سفارش تعداد ۵ کانبان را حمل می‌کند. جزئیات بیشتر عملکرد این سیستم در شرایط فعلی در جدول (۳) نشان شده است.

مدل ریاضی پیشنهادی و حل آن: مطابق جزئیات بیان شده درباره مدل ریاضی مسأله و پارامترهای اخذ شده از مطالعه موردی، مدل چندهدفه مسأله به صورت زیر بازنویسی شده است.



$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z_1 & 1,800,000N \\
 \text{Min } Z_2 & 5,143X^2 \\
 \text{Min } Z_3 & \frac{1}{X}(1,166,667y_1 + 1,750,000y_2 \\
 & \quad 2,041,667y_3 + 2,625,000y_4) \\
 \text{Min } Z_4 & 1 \left( \frac{y_1 X}{3} + \frac{y_2 X}{6} \right. \\
 & \quad \left. \frac{y_3 X}{8} + \frac{y_4 X}{12} \right) \\
 \text{St :} & \\
 N & \geq 2 \\
 X & \geq N - 2 \\
 X & \geq 2 \\
 X & \geq (3y_1 + 6y_2 + 8y_3 + 12y_4) \\
 y_j & \geq 1 \quad j=1, 2, 3, 4 \\
 N, X & \geq 0, y_j \in (0,1), X \text{ \& } N \text{ Integer}
 \end{aligned}$$

در بیشتر مواقع برای مدل‌های ریاضی چندهدفه راه‌حلی منحصر به فرد برای بهینه‌کردن همه اهداف وجود ندارد. از حل این مسائل، مجموعه جواب‌های بهینه با نام Optimal Pareto front حاصل می‌شود (برانک<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). جواب  $\hat{X}$  از فضای موجه  $S$  یک جواب بهینه پارتو برای مسئله چندهدفه با اهداف حداقل است؛ اگر هیچ  $S$  وجود نداشته باشد که در رابطه  $f(X) = f(\hat{X})$  صدق کند.

یکی از روش‌های تولید جواب‌های بهینه پارتو که نیازی به کسب اطلاعات از تصمیم‌گیرنده نیست، روش ارزش متریک (L-P) است (اصغرپور، ۱۳۷۷). در این روش، جمع انحراف توابع هدف از مقدار هدف ایدئال خودشان زمانی که به تنهایی در مدل باشند حداقل می‌شود. با توجه به اینکه اهداف مسئله کانبان حمل، واحد و مقیاس یکسان ندارند، قراردادن آنها در یک تابع هدف به فرم روش ارزش متریک مناسب نیست. بدین منظور تابع هدفی به فرم رابطه (۱۶) در نظر گرفته شده است که علاوه بر تبدیل مسئله چندهدفه به مسئله تک‌هدفه، امکان هم‌مقیاس و هم‌واحدسازی توابع هدف را فراهم کرده است.

$$F = \sum_{i=1}^4 w_i \left( \frac{z_i - z_i^*}{z_i - \tilde{z}_i} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (16)$$

در رابطه فوق، تابع  $F$  تابع یکپارچه است. این تابع ترکیب وزنی از توابع نرمال‌شده اهداف مسئله است. همچنین  $z_i$  معرف تابع هدف  $i$ ام (حداکثر  $i$  برابر تعداد اهداف مسئله)؛  $z_i^*$  مقدار بهینه تابع  $i$ ام در صورتی که به تنهایی در مسئله باشد (در مسئله مورد نظر حداقل هر تابع هدف به تنهایی)؛  $\tilde{z}_i$  مقدار ایدئال منفی برای تابع هدف  $i$  (حداکثر مقدار هر تابع هدف به تنهایی)؛  $w_i$  درجه اهمیت هر تابع هدف در تابع یکپارچه جدید و پارامتر  $p$  درجه تأکید بیشتر بر بزرگترین انحراف (عموماً ۲ در نظر گرفته می‌شود) است. با تغییر وزن‌ها در رابطه (۱۶) و حل مسئله

تک هدفه، مجموعه جواب‌های بهینه پارتو برای مسئله چندهدفه حاصل می‌شود. پس از محاسبه مقادیر ایدئال مثبت (مینیم هر تابع،  $Z_i^*$ ) و ایدئال منفی (ماکزیمم هر تابع،  $\bar{Z}_i$ ) و تشکیل تابع هدف یکپارچه تحت دو سیاست مختلف وزندهی به توابع هدف (دستیابی به دو جواب بهینه پارتو)، از نرم‌افزار بهینه‌سازی لینگو<sup>۸</sup> استفاده شده است تا تابع هدف جدید تحت محدودیت‌های مسأله حاصل شود. در سیاست اول، وزن (اهمیت) اهداف نسبت به یکدیگر یکسان در نظر گرفته شده است ( $w_1 = 0.25, w_2 = 0.25, w_3 = 0.25, w_4 = 0.25$ ). در سیاست دوم با توجه به سیاست شرکت ساپکو در کاهش هزینه‌های حمل و نقل و کاهش تواتر ورود وسایل نقلیه به کارخانه بر هزینه‌های حمل و نقل تاکید شده است و اهداف به نسبت‌های  $w_1 = 0.125, w_2 = 0.125, w_3 = 0.75, w_4 = 0.125$  ترکیب شده‌اند. جدول (۳)، جواب‌های بهینه پارتو و مقدار تابع هدف هر دو سیاست را در کنار وضع موجود برای مطالعه موردی نشان می‌دهد. در جدول (۳) مقدار توابع هدف به ازاء سه مجموعه جواب محاسبه شده است. سیاست اول نسبت به وضع موجود شرایط بهتری دارد؛ زیرا علاوه بر کاهش ۳۷/۵ درصدی هزینه‌های سرمایه در گردش، هزینه‌های موجودی را نسبت به وضع موجود تا ۷۵ درصد کاهش می‌دهد و درصد استفاده از ظرفیت وسیله نقلیه به اندازه بیش از ۱۸ درصد رشد داشته است.

جدول ۳- پارامترهای کانبان حمل در شرکت مورد مطالعه

متغیرها و توابع هدف	وضع موجود	جواب بهینه با اهداف اهمیت یکسان (سیاست اول)	جواب بهینه با تاکید بر هزینه‌های حمل و نقل (سیاست دوم)
متغیرهای تصمیم	تعداد کانبان در سیکل ( $N$ )	۷	۸
	تعداد کانبان در هر بار سفارش ( $X$ )	۵	۶
تابع هدف	نوع وسیله نقلیه ( $Y$ )	خاور با ظرفیت ۶ کانبان	خاور با ظرفیت حمل ۶ کانبان
	هزینه سرمایه در گردش (ریال)	۱۲,۶۰۰,۰۰۰	۹,۰۰۰,۰۰۰
	هزینه نگهداری (ریال)	۱۲۸,۵۷۷	۴۶,۲۸۷
	هزینه حمل (ریال)	۳۵۰,۰۰۰	۳۸۸,۸۸۹
	تواتر حمل (تکرار در ساعت)	۰/۱۱	۰/۱۹
درصد استفاده از ظرفیت وسیله	٪۸۴,۳۳	٪۱۰۰	٪۱۰۰

هزینه‌های حمل و نقل اندکی (۱۱ درصد) و تواتر حمل به درون کارخانه تولیدکننده در سیاست اول نسبت به وضع موجود افزایش یافته که البته با مفهوم بهینه‌سازی چندهدفه، این راه‌حل مناسب‌تر است؛ زیرا در مجموع راه‌حل پیشنهادی برای این سیاست تابع هدف تجمعی را نسبت به وضع موجود کمتر کرده است. اما در مقابل، سیاست دوم که با تاکید بر کاهش هزینه‌های حمل و نقل و تواتر ورود وسایل نقلیه طراحی شده است، هزینه‌های سرمایه در گردش و هزینه‌های موجودی نسبت به وضع موجود افزایش یافته است؛ در حالی که هزینه‌های حمل و نقل و تواتر تردد کاهش یافته است. این هزینه‌ها معرف ازدحام وسیله نقلیه در تولید است.

مدل شبیه‌سازی: مقایسه مقادیر توابع هدف ریاضی به ازاء راه‌حل‌های بهینه ارائه‌شده و مقادیر وضع موجود، بیانگر بهبود وضع موجود است؛ اما از آنجا که مسئله پژوهش، شرایط مسأله و راه‌حل پیشنهادی برگرفته از مشکلات دنیای واقعی در حوزه زنجیره تأمین صنعت خودرو است، در این بخش برای اندازه‌گیری سایر شاخص‌های عملکردی سیستم کانبان و قابلیت اطمینان از عملیاتی بودن راه‌حل‌های پیشنهادی، مدل شبیه‌سازی از سیستم کانبان حمل و براساس اطلاعات موجود از مطالعه موردی در محیط نرم‌افزار ED<sup>3</sup> ساخته شده است. در مدل شبیه‌سازی، فعالیت‌های سازمان تولیدکننده، تأمین‌کننده و سیستم حمل‌ونقل بین آنها شامل نگهداری موجودی به‌شکل پالت، تولید و مصرف قطعات با نرخ‌های قابل تنظیم، حمل قطعات در پالت‌هایی با ظرفیت ثابت، وسیله حمل‌کننده با ظرفیت‌های قابل تنظیم، تنظیم زمان‌های بارگیری و تخلیه، سرعت قابل تنظیم، تعریف مسیر و فاصله بین دو عضو زنجیره تأمین است. این مدل مطابق با شیوه عملکرد سیستم کانبان حمل (بیان شده در شکل (۱)) با استفاده از شی‌های<sup>۳۳</sup> مناسب (هر شیء در نرم‌افزار ED اتم نامیده می‌شود و وظیفه مدل‌سازی اجزای سیستم را برعهده دارد) مدل‌سازی شده است. منطق تولید، بارگیری و تخلیه، مصرف قطعات، ارسال پالت‌های پُر و خالی و کانبان‌های آزادشده با نوشتن و اجرای کدهای مناسب در این نرم‌افزار پیاده‌سازی شده است. صحت و دقت مدل شبیه‌سازی با طرح سناریوهای مختلف (مانند تک بودن یا زیاد بودن تعداد کانبان حمل) و اندازه‌گیری معیارهایی مانند زمان حمل‌ونقل و زمان سفارش‌دهی با مدل شبیه‌سازی و مقایسه آنها با داده‌های جمع‌آوری‌شده از مطالعه موردی، بررسی شده است. برای مثال، اجرای مدل شبیه‌سازی تحت شرایط وضع موجود، متوسط زمان سفر وسایل نقلیه بین سازمان تولیدکننده و تأمین‌کننده را ۲/۹۴ ساعت برآورد کرده است که با مقدار واقعی آن در مطالعه موردی (حدود ۳ ساعت) مطابقت دارد. پس از اطمینان از صحت و دقت مدل شبیه‌سازی، مدل به‌ازاء پارامترهای وضع موجود و دو سیاست بهینه ارائه‌شده در جدول (۳)، به‌صورت سه سناریوی مجزا به‌مدت ۷۲۰ ساعت (۳۰ روز) اجرا شده است. نتایج شبیه‌سازی و معیارهای عملکردی سیستم کانبان در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج مدل شبیه‌سازی

معیار	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
درصد بیکاری تولیدکننده	۰/۴۱٪	۱۲/۹۹٪	۰/۴۱٪
درصد خالی‌بودن وسیله نقلیه	۱۶/۴۶٪	۰٪	۰٪
متوسط تعداد رفت و برگشت در یک روز	۲/۸	۴/۰۶	۲/۳
درصد بیکاری وسیله نقلیه	۳۱/۲۶٪	۰٪	۴۲/۶۶
متوسط زمان بیکاری وسیله نقلیه در روز	۷/۴۵ ساعت	۰/۱۱ ساعت	۱۰/۲۴ ساعت
متوسط انتظار هر پالت در انبار تولیدکننده	۳/۹ ساعت	۱/۷۲ ساعت	۴/۷۵ ساعت
متوسط انتظار هر پالت ارسالی از تأمین‌کننده	۳/۳۸ ساعت	۳/۴۲ ساعت	۴/۲۳ ساعت

مقدار درصد بیکاری تولیدکننده در جدول (۴)، بیانگر درصد مواقعی است که به‌دلیل نبود قطعه در سازمان تولیدکننده، تولید متوقف شده است. اجرای مدل شبیه‌سازی به‌ازای پارامترهای سناریوی ۱ (وضع موجود) و ۳

نزدیک صفر است (انحراف اندک از صفر به دلیل شرایط ناپایدار ابتدای شبیه‌سازی است) اگر تعداد کانبان حمل در مطالعه موردی ۵ در نظر گرفته شود حدود ۱۳ درصد اوقات، سازمان تأمین‌کننده با کمبود مواجه خواهد شد. هرچند راه‌حل سناریوی ۲ که از مدل بهینه‌سازی به دست آمده از نظر مدل ریاضی بهتر از وضع موجود است، با مطالعه شبیه‌سازی و با توجه به محدودیت‌های زنجیره تأمین خودرو مشخص است که قابلیت اجرا ندارد و این نتیجه مهمی است که از مطالعه شبیه‌سازی مشخص می‌شود. همان‌طور که مشخص است بیش از ۱۶ درصد از ظرفیت وسیله نقلیه در هر حمل و نقل خالی است و این مقدار برای دو سناریوی دیگر صفر است. تواتر سفر در یک روز در سناریوی ۳ از ۱ کمتر است و پیامد آن تردد کمتر وسیله نقلیه در شرکت ایران خودرو است.

استفاده از سناریوی ۳، درصد و متوسط زمان بیکاری وسیله نقلیه را افزایش می‌دهد. تأمین‌کننده برای برخورد با این مشکل می‌تواند از خدمات بیرون از سازمان خود استفاده کند. نتایج شبیه‌سازی تحت سناریوی ۳، زمان نگهداری یک پالت را در انبار تولیدکننده حدود یک ساعت (حدود ۲۲ درصد) بیشتر از وضع موجود برآورد می‌کند. به‌طور مشابه متوسط زمان نگهداری پالت نزد تأمین‌کننده تا رسیدن وسیله نقلیه برای بارگیری حدود یک ساعت در سناریوی ۳ بیشتر از سناریوی ۱ است؛ بنابراین نتایج شبیه‌سازی ضمن رد سناریوی دوم (تعداد کانبان ۵) به دلیل پیش آمدن کمبود در سازمان تولیدکننده، قابلیت پیاده‌سازی سناریوی سوم را تایید می‌کند. همچنین طراحی سیستم کانبان حمل براساس پارامترهای سناریوی سوم باعث استفاده بهتر از امکانات حمل و نقل می‌شود؛ درحالی‌که هزینه‌های نگهداری کالا را به مقدار کمی افزایش می‌دهد.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تعیین تعداد بهینه کانبان در سیکل به‌خصوص برای کانبان‌های حمل که با دو نوع مهم از اتلاف‌ها (موجودی‌های نیمه‌ساخته و حمل و نقل‌های اضافه) ارتباط دارند یکی از مسائل مهم در افزایش اثربخشی استفاده از سیستم کانبان حمل است. در نظر گرفتن منافع تولیدکننده و تأمین‌کننده به‌صورت هم‌زمان در تعیین تعداد بهینه کانبان باعث افزایش کارایی زنجیره تأمین می‌شود. پس از مطالعه زنجیره تأمین صنعت خودرو (بزرگ‌ترین زنجیره تأمین در کشور)، اهداف و محدودیت‌های موجود در تعیین تعداد بهینه کانبان در سیکل از دیدگاه تولیدکننده اصلی و تأمین‌کننده‌ها شناسایی شده‌اند. برای برآورد هم‌زمان اهداف تولیدکننده و تأمین‌کننده در زنجیره تأمین مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح چندهدفه از نوع غیرخطی توسعه داده شده است. اهداف تولیدکننده و تأمین‌کننده شامل کاهش (هزینه) سرمایه در گردش زنجیره، کاهش موجودی‌های نزد تولیدکننده مادر، هزینه‌های حمل و نقل، تواتر حمل و نقل‌ها بین تأمین‌کننده و تولیدکننده و افزایش استفاده از ظرفیت وسایل نقلیه است. مدل ریاضی پیشنهادی با استفاده از داده‌های یکی از کانبان‌های حمل در شرکت ایران خودرو ساخته و اجرا شده است. از آنجا که مسائل چندهدفه به‌طور معمول جواب منحصر به فرد بهینه ندارند، برای مسئله مذکور تحت دو سیاست مختلف (اهمیت یکسان برآوردن اهداف و تاکید بر هزینه‌های حمل و نقل) دو مجموعه جواب حاصل شده است؛ اما لازم است قابلیت اجرای هر مجموعه جواب با مدل شبیه‌سازی کنترل و عملکرد سیستم کانبان با هر مجموعه جواب

بررسی شود. به این منظور مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار ED طراحی و اجرا شده است. اجرای مدل شبیه‌سازی تحت پارامترهای سیاست اول نشان می‌دهد مجموعه جواب بهینه اول در محیط عملیاتی، شرکت ایران خودرو را با کمبود و توقف خط مواجه می‌کند؛ در حالی که استفاده از سیاست دوم قابلیت اجرا دارد. جواب بهینه دوم علاوه بر افزایش بهره‌برداری از ظرفیت وسایل نقلیه (افزایش ۱۶ درصد)، تواتر ورود به کارخانه ایران خودرو را تا ۱۲ درصد کاهش می‌دهد. از طرفی این راه‌حل باعث افزایش ۴۴ درصدی هزینه‌های نگهداری موجودی‌ها در ایران خودرو و افزایش ۱۴ درصدی هزینه سرمایه در گردش می‌شود؛ بنابراین در مدل ریاضی توسعه داده شده با تغییر پارامتر درجه اهمیت اهداف، تعداد بهینه کانبان با تاکید بر هر یک از اهداف تولیدکننده یا تأمین‌کننده محاسبه می‌شود. مدل شبیه‌سازی ارائه شده نیز قابلیت اجرای جواب‌های پیشنهادی را برای یک سیستم کانبان حمل مشخص می‌کند. پژوهشگران می‌توانند مدل پیشنهادی را برای سیستم‌های کانبان با تعداد قطعه بیشتر بین تولیدکننده و تأمین‌کننده یا در نظر گرفتن شرایط احتمالی توسعه دهند.

## بحث

تعیین تعداد کانبان در کانبان‌های حمل براساس شرایط زنجیره تأمین خودرو و لحاظ کردن هزینه‌های حمل و نقل تحمیل شده به تأمین‌کنندگان که در کمتر پژوهشی در نظر گرفته شده است این پژوهش را از پژوهش‌های مشابه مانند جدیشانکار و ونگ (۱۹۹۲)، ونگ و ونگ (۱۹۹۰)، مویمی و چانگ<sup>۱۰</sup> (۱۹۹۰)، پرایس و همکاران (۱۹۹۲)، موندن (۱۹۹۳)، نوری و سرکر (۱۹۹۸)، معطر حسینی و حسینی (۱۳۸۳)، طارقیان و همکاران (۱۳۸۷)، ونگ و سرکر (۲۰۰۶) و فوکوکاوا و هانگ (۱۹۹۳) متمایز می‌کند. در حال حاضر برای تعیین تعداد کانبان حمل از رابطه پیشنهادی شرکت تویوتا استفاده می‌شود؛ اما مطالعه شبیه‌سازی در مقایسه مدل پیشنهادی این پژوهش با رابطه پیشنهادی شرکت تویوتا (چان، ۲۰۰۱) نشان داد، در مدل این پژوهش از ظرفیت وسایل نقلیه بهتر استفاده می‌شود و نتیجه آن کاهش ۱۲ درصدی تردد وسایل نقلیه است.

## منابع

- اصغریور، محمدجواد. (۱۳۷۷). «تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره»، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول.
- توکلی مقدم، رضا و نوروزی، نرگس. (۱۳۹۰). «مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن ایجاد توازن در توزیع کالاها»، پژوهشنامه حمل و نقل، سال هشتم، ۴، زمستان ۱۳۹۰، ۳۶۳-۳۷۵.
- حاج شیرمحمدی، علی. (۱۳۷۳). «برنامه‌ریزی و کنترل تولید و موجودی‌ها»، اصفهان: انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه اصفهان، چاپ سوم.
- حسن نایبی، عرفان و کیانفر، فریدون. (۱۳۹۱). «تعیین توالی اعزام و برنامه توقف قطارها به کمک الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی تصادفی»، پژوهشنامه حمل و نقل، سال نهم، ۳، پاییز ۱۳۹۱، ۲۵۷-۲۳۵.

- ذگردی، سیدحسام الدین و بهشتی نیا، محمدعلی. (۱۳۸۸). «یکپارچگی زمانبندی حمل و نقل در زنجیره تأمین با وسایل نقلیه دارای ظرفیت متفاوت»، پژوهشنامه حمل و نقل، سال ششم، ۳، پاییز ۱۳۸۸، ۲۴۴-۲۳۳.
- طارقیان، حامد رضا؛ فراهی، محمد هادی و مدرسی، طاهره. (۱۳۸۷). «تعیین تعداد بهیة کانبان به کمک الگوریتم جستجوی پراکنده»، نشریه دانشگاه چمران، اهواز، ۲۱، زمستان ۸۷، ۶۰-۴۷.
- عرب، رحمت؛ توکلی مقدم، رضا و فرقانی، محسن. (۱۳۹۲). «حل یک مدل ریاضی جدید برای زمانبندی در شبکه های توزیع با بهینه سازی ذرات انبوه چندهدفه»، مدیریت تولید و عملیات، اصفهان، دوره چهارم، پیاپی (۷)، شماره (۲)، ۹۵-۱۱۲.
- معطر حسینی، سید محمد و حسینی، سید تقی. (۱۳۸۳). «تعیین تعداد کانبان در سیستم تولید JIT (تولید بهنگام) با شرایط پویا»، نشریه دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۸، زمستان ۸۳، ۱۷-۳۴.
- موتابیان، کاظم. (۱۳۸۶). سیستم تولید تویوتا گذار از تولید انبوه به تولید ناب، تهران: انتشارات آموزه، چاپ سوم.
- Abdul Rahman, N. A., Sharif S. M. & Mashitah M. E. (2013). "Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation" *Procedia Economics and Finance*, 7, 174 – 180.
- Azadeh, A., Layegh, J. & Pourankooch, P. (2010a). "Optimal Model for Supply Chain Controlled by kanban under JIT Philosophy by Integration of computer Simulation and Genetic Algorithm". *Basic and Applied Sciences*, 4(3), 370-378.
- Azadeh, A., V. Ebrahimipour, & Bavar, P. (2010b). "A hybrid GA-simulation approach to improve JIT systems." *International Journal of Production Research*, 48 (8), 2323–2344.
- Belisario, L. S. & Pierreval, H. (2015). "Using genetic programming and simulation to learn how to dynamically adapt the number of cards in reactive pull systems", *Expert Systems with Applications*, 42 (6), 3129-3141.
- Berkley, B. J. (1996). "A Simulation Study of Container Size in two-card kanban Systems", *International Journal of Production Research*, 34 (12), 3417-3445.
- Branke, J", Deb, K. & Miettinen, K. (2008). "Multiobjective Optimization Interactive and Evolutionary Approaches". Springer Berlin Heidelberg.
- Chaharsooghi S. K. & Sajedinejad A. (2010). "Determination of the Number of Kanbans and Batch Sizes in a JIT Supply Chain System". *Transaction E: Industrial Engineering*, 17 (2), 143-149.
- Chan, F.T.S, (2001). "Effect of Kanban Size on Just-in-Time Manufacturing System". *Journal of Materials Processing Technology*, 116, 146-160.
- Chen, Z. & Sarker, B.R. (2015). "Optimisation of multi-stage JIT production-pricing decision: centralised and decentralized models and algorithms". *International Journal of Production Research*, 53(20), 210-6230.
- Ciernoczołowski, D. D. & Bozer, Y. A. (2013). "Performance evaluation of small-batch container delivery systems used in lean manufacturing – Part 2: number of Kanban and workstation starvation". *International Journal of Production Research*, 51(2), 568–581.
- Faccio, M., Gamberi, M. & Persona, A" (2013). "Kanban number optimisation in a supermarket warehouse feeding a mixed-model assembly system". *International Journal of Production Research*, 51(10), 2997-3017.

- Framinan, J. M., & Pierreval, H. (2012). "Special issue on pull strategies in manufacturing systems and supply chains: Recent advances". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(1), 1–3.
- Fukukawa, T. & Hong, S. C. (1993). "The determination of the optimal number of kanbans in a just-in-time production System". *Computers and Industrial Engineering*, 24(4), 551-559.
- Gonzalez, R. P. L., Framinan, J. M., & Ruiz-Usanu, R. (2011). "A response surface methodology for parameter setting in a dynamic ConWIP production control system". *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 23(1–2), 16–33.
- Hou, T.H. & Hu, W.C. (2011). "An Integrated MOGA approach to determine the Pareto-optimal kanban number and size for a JIT system", *Expert Systems with Applications*, 38, 5912-5918.
- Jothishankar, M.C. & Wang, H.P. (1992). "Determination of optimal number of Kanbans using stochastic petri nets". *Journal of Manufacturing Systems*, 11(6), 449-461.
- Junior, M. L. and Filho M. G. (2010). "Review Variations of the kanban system: Literature review and classification", *International Journal Production Economics*, 125, 13–21.
- Kageshima, R. & Inoie, A. (2014). "Simulation-based Optimization Approach for an Extended-kanban Control System". International Conference on Computational Science and Computational Intelligence, Las Vegas, USA, 10-13 March, 315-316.
- Khojasteh, Y. & Sato, R. (2015). "Selection of a pull production control system in multistage
- Kimura, O. & Terada, H. (1981). "Design and Analysis of Pull System: a Method of Multi Stage Production Control", *International Journal of Production Research*, 19 (3), 241-253.
- Krishna Jasti, N. V. & Kodalib, R. (2015). "Lean production: literature review and trends". *International Journal of Production Research*, 53(3), 867-885.
- Lolli, F., Gamberini, R., Giberti, C., Rimini, B. & Bondi, F. (2015). "A simulative approach for evaluating alternative feeding scenarios in a Kanban system". *International Journal of Production*, In Press.
- Markham, I.S., Mathieu, R.G., Wray, B.A. (1998). "A Rule Induction Approach for Determining the Number of Kanban in Just In Time Production System". *Computers & Industrial Engineering*, 34(4), 717-727.
- Moemi, F. & Chang, Y.L. (1990). "An approximate solution to deterministic kanban systems". *Decision Sciences*, 21(3), 596-607.
- Monden, Y. (1993). "Toyota production system: An integrated approach to just-in-time" Industrial Engineering and Management Press, 2nd ed., 279–290.
- Muris, L. J., & Moacir, G. F. (2010). "Variations of the Kanban System: Literature Review and Classification", *International Journal of Production Economics*, 125 (1), 13–21.
- Nori, V. S., & Sarker, B. R. (1998). "Optimum number of kanbans between two adjacent stations". *Production Planning and Control*, 9(1), 60–65.
- Pedrielli, G., Alfieri, A. & Matta, A. (2015). "Integrated simulation-optimisation of pull control systems". *International Journal of Production Research*, 53(14), 4317-4336.
- Philipoom, P.R., Rees, L.P., Taylor III, B. W., & Huang, P. Y. (1987) "An Investigation of the Factors Influencing the Number of Kanbans Required in the Implementation of the JIT Technique with Kanbans". *International Journal Production Research*, 25(3), 457-472.
- Price, W.L., Gravel, M. & Cantin, F. (1992). "A Mathematical Programming Model of a Kanban Job-shop", *International Journal of production Research*, 26 (6), 1105-1118.

- production processes”. *International Journal of Production Research*, 53(14), 4363-4379.
- Rabbani, M., Layegh, J. & Mohammad Ebrahim, R. (2009). “Determination of number of kanbans in a supply chain system via Memetic algorithm”. *Advances in Engineering Software*, 40, 431-437.
- Satoglu, S.I. & Ucan, K. (2015). “Redesigning the material supply system of the automotive suppliers based on lean principles and an application” International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), Dubai, 3-5 March, 1-6.
- Takahashi, K. (1994). “Determining the Number of Kanbans for Unbalanced Serial Production Systems”. *Computers & Industrial Engineering*, 27 (1-4), 213-216.
- Wang, S. & Sarker B. R. (2006). “Optimal models for a multi-stage supply chain system controlled by kanban under just-in-time philosophy”. *European Journal of Operational Research*, 172, 179-200.
- Wang, H. & Wang, H.P. (1990). “Determining the Number of Kanbans: A Step Toward Non-Stock-Production”. *International Journal of Production Research*, 28 (11), 2101-2115.
- Widyadana, G.A., Wee, H.M. & Chang, J.Y. (2010). “Determining the optimal number of Kanban in multiproducts supply chain system”. *International Journal of Systems Science*, 41(2), 189-201.
- Zipkin, H.P. (1991). “Does Manufacturing Need a JIT Revolution?”. *Harvard Business Review*, 69 (1), 40-46.

- 
- 1- Krishna Jasti & Kodlib
  - 2- Pull System
  - 3- Push System
  - 4- Jothishankar & Wang
  - 5- Markham
  - 6- Junior & Filho
  - 7- Zipkin
  - 8- Philipoom
  - 9- Satoglu & Ucan
  - 10- Abdul Rahman
  - 11- Chaharsooghi & Sajedinejad
  - 12- Production Kanban
  - 13- Withdrawal Kanban
  - 14- Khojasteh & Sato
  - 15- Pedrielli
  - 16- Chan
  - 17- Rabbani
  - 18- Fukukawa & Hong
  - 19- Just in Time
  - 20- Hou & Hu
  - 21- Faccio
  - 22- Lead Time
  - 23- Lolli
  - 24- Widyadana
  - 25- Container
  - 26- Ciemnoczowski & Bozer
  - 27- Integer Non Linear Multi Objective Programming
  - 28- Chen & Serker
  - 29- Muris & Moacir
  - 30- Kimura & Terada
  - 31- Moeemi & Chang
  - 32- Wang & Wang
  - 33- Petri nets
  - 34- Price
  - 35- Monden
  - 36- Berkley
  - 37- Takahashi
  - 38- Unbalanced serial production system





- 39- Nori & Sarker
- 40- Wang and Sarker
- 41- Meta-heuristic Metric Algorithm
- 42- Azadeh
- 43- Multi Objective Genetic Algorithm
- 44- Gonzalez
- 45- Framinan & Pierreval
- 46- Belisario & Pierreval
- 47- Chen & Serker
- 48- Kageshima & Inoie
- 49- Tabu Search
- 50- Simulation-Optimization
- 51- Improved Particle Swarm Optimization
- 52- Branke
- 53- Enterprise Dynamics
- 54- Object
- 55- Moeemi & Chang

