

بهینه‌سازی زنجیره تأمین مواد اولیه در صنعت تایر با استفاده از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

پریسا خوشکام

کارشناس برنامه‌ریزی تولید، مجتمع صنایع لاستیک یزد

Parisakhoshkam31375@gmail.com

چکیده: صنعت تایر به‌عنوان یکی از بخش‌های راهبردی در حوزه خودروسازی و حمل‌ونقل، به‌شدت به تأمین پایدار مواد اولیه‌ای نظیر کائوچو طبیعی و مصنوعی، دوده و سیم وابسته است. این صنعت با چالش‌هایی از جمله نوسانات قیمت، محدودیت ظرفیت تولید، هزینه‌های بالای انبارداری و عدم قطعیت در زمان تحویل روبه‌رو است که مدیریت زنجیره تأمین آن را پیچیده و پرهزینه می‌سازد. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه توسعه داده شده است که هم‌زمان به بهینه‌سازی هزینه‌های کل تأمین و نگهداری مواد اولیه و کاهش زمان تحویل می‌پردازد. نوآوری اصلی این مدل در ترکیب ملاحظات اقتصادی و عملیاتی با رویکرد سناریو محور برای مواجهه با عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات تقاضا، قیمت خرید و ظرفیت تأمین‌کنندگان است. مدل پیشنهادی در محیط نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شده و نتایج نشان می‌دهد این رویکرد می‌تواند با ایجاد توازن میان اهداف اقتصادی و عملیاتی، کارایی زنجیره تأمین، پایداری تولید و انعطاف‌پذیری صنعت تایر در برابر نوسانات بازار را ارتقا دهد.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین مواد اولیه تایر، عدم قطعیت، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MILP)

مقدمه

صنعت تایر به‌دلیل وابستگی شدید به مواد اولیه‌ای همچون کائوچو طبیعی و مصنوعی، دوده و سیم، در معرض نوسانات قیمت، محدودیت‌های عرضه و تأخیرهای حمل‌ونقل قرار دارد. این عوامل، مدیریت زنجیره تأمین را به یکی از چالش‌های اساسی این صنعت تبدیل کرده و ضرورت بهره‌گیری از روش‌های علمی برای تصمیم‌گیری بهینه را آشکار ساخته است. مدل‌های ریاضی چندهدفه می‌توانند ابزار مؤثری برای ایجاد توازن میان کاهش هزینه‌های کل و کاهش زمان تحویل باشند. با این حال، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های گذشته تنها بر یک بعد از مسئله متمرکز بوده‌اند و کمتر به ترکیب هم‌زمان معیارهای اقتصادی و عملیاتی در شرایط عدم قطعیت پرداخته‌اند. این پژوهش باهدف پر کردن این خلأ، مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه می‌کند که عدم قطعیت‌های مربوط به تقاضا، قیمت و ظرفیت تأمین‌کنندگان را در نظر گرفته و بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌ها و زمان تحویل را دنبال می‌کند.

مرور ادبیاتی

نادری و احمدی (۱۳۹۷) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین مواد اولیه در صنایع تولیدی ارائه می‌دهند. در این مطالعه، افزون بر هزینه‌های تأمین، محدودیت‌های ظرفیت و انبارداری نیز در نظر گرفته شده است. Klibi و همکاران (۲۰۱۰) به طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین مقاوم پرداختند و نشان دادند که ایجاد سناریوهای مختلف و طراحی انعطاف‌پذیر شبکه می‌تواند تاب‌آوری زنجیره در برابر نوسانات محیطی را بهبود دهد. این رویکرد اهمیت مدیریت ریسک و تحلیل سناریویی در زنجیره‌های تأمین پیچیده را برجسته می‌کند. Torabi و Pishvae (۲۰۱۰) از برنامه‌ریزی فازی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته استفاده کردند. مدل ارائه شده عدم قطعیت‌های پارامترهایی مانند تقاضا و زمان تحویل را به‌طور انعطاف‌پذیر لحاظ می‌کند و امکان تحلیل تصمیمات تحت شرایط عدم قطعیت را فراهم می‌آورد. Maranas و Gupta (۲۰۰۳) اهمیت مدیریت عدم قطعیت تقاضا در برنامه‌ریزی زنجیره تأمین را بررسی کردند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های چندهدفه در محیط‌های صنعتی پویا، امکان ایجاد توازن بین کارایی اقتصادی و عملکرد عملیاتی را فراهم می‌کند. Sharma و Singh (۲۰۱۷) یک

مدل برنامه‌ریزی خطی برای تعیین سیاست‌های خرید مواد اولیه در صنعت تایر ارائه کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تصمیمات خرید بر هزینه نهایی، میزان ضایعات و کیفیت محصول تأثیر مستقیم دارد و برنامه‌ریزی بهینه می‌تواند مزیت رقابتی ایجاد کند.

مدل ریاضی

۱- مجموعه‌ها و اندیس‌ها

I : مجموعه مواد اولیه، S : مجموعه تأمین‌کنندگان، T : مجموعه دوره‌های زمانی، Ω : مجموعه سناریوهای عدم قطعیت

۲- پارامترها و متغیرها

پارامترها (Parameters)

$A_{i,t}^{\omega}$: ظرفیت عرضه توسط تأمین‌کننده s برای ماده i در دوره t در سناریوی ω
 $D_{i,t}^{\omega}$: تقاضای ماده اولیه i در دوره t برای سناریوی ω
 INV_i^0 : موجودی اولیه ماده i در کارخانه
 $C_{i,t}^{\omega}$: قیمت واحد خرید ماده i از تأمین‌کننده s در سناریوی ω
 $LT_{i,s,\omega}$: زمان تحویل ماده اولیه i
 $TSC_{i,s}$: هزینه حمل ماده i از s به کارخانه
 B_i : بودجه تخصیص‌یافته برای دوره t
 H_i : هزینه انبارداری ماده اولیه i در کارخانه به ازای هر دوره
 $T\omega_{i,s,t,\omega}$: امکان‌پذیری ارسال در زمان t (۰ ممنوع، ۱ مجاز)
 p^{ω} : احتمال وقوع سناریو ω
 $M_{i,s,t}$: عدد بزرگ
 W_i : ظرفیت انبار برای ماده اولیه i
 α : وزن تابع هدف برای هزینه (۰ تا ۱)

متغیرهای تصمیم (Decision Variables)

$X_{i,s,t}^{\omega}$: مقدار ماده اولیه i ارسال شده از تأمین‌کننده s به کارخانه در دوره t در سناریوی ω
 $INV_{i,t}^{\omega}$: موجودی ماده i در کارخانه در پایان دوره t در سناریوی ω

نوع ماده اولیه آمده است.

$Y_{i,s,t}^{\omega}$: متغیر باینری که نشان می‌دهد آیا از تأمین‌کننده s برای ماده اولیه i در دوره t تحت سناریوی ω سفارش ارسال می‌شود یا خیر.

جدول ۱- اطلاعات اولیه مسأله

پارامتر	کاتوجو SBR - 1502	دوده N-220	واحد
$D_{i,t}^{\omega}$	۹,۵۰۰-۹,۲۰۰	۳۵۰-۴۵۰	تن - روز
$A_{i,t}^{\omega}$	۱۲۰,۰۰۰-۶۵,۰۰۰	۱۹۰-۲۵۰	
$C_{i,t}^{\omega}$	۱,۱۳۰,۰۰۰-۱,۲۵۰,۰۰۰	۸۰۰,۰۰۰-۹۳۰,۰۰۰	ریال
$TSC_{i,s}$	۳۶۰,۰۰۰-۴۰۰,۰۰۰	۲۲۰,۰۰۰-۲۴۰,۰۰۰	
H_i	۲۰,۰۰۰,۰۰۰	۳۰,۰۰۰,۰۰۰	
W_i	۴۰۰,۰۰۰	۱۲۰,۰۰۰	تن
INV_i^0	۵۵۰,۰۰۰	۳۵۰,۰۰۰	
B_t	۱۲,۷۰۰,۰۰۰,۰۰۰		ریال
$LT_{i,s,\omega}$	۲۵-۴۰	۲۵-۴۰	روز

۳- تابع هدف

تابع هدف کلی شامل کمینه‌سازی هزینه کل و کمینه‌سازی زمان تحویل است. تابع هدف اول به دنبال کاهش مجموع هزینه‌های زنجیره تأمین شامل هزینه خرید مواد اولیه، هزینه حمل‌ونقل و هزینه نگهداری موجودی است. هدف از این بخش، بهینه‌سازی اقتصادی سیستم و استفاده کارآمد از منابع مالی است. تابع هدف دوم بر کاهش کل زمان تحویل سفارش‌ها تمرکز دارد. با در نظر گرفتن تأخیرها و زمان‌های حمل‌ونقل، مدل می‌کوشد سرعت پاسخ‌گویی به تقاضا را افزایش داده و سطح خدمت‌دهی به مشتریان را بهبود بخشد.

$$\min \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} [\alpha z_1 + (1 - \alpha) z_2]$$

$$Z_1^{\omega} = \sum_{i,s,t} x_{i,s,t}^{\omega} \cdot (C_{i,s}^{\omega} + TSC_{i,s}) + \sum_{i,t} inv_{i,t}^{\omega} \cdot H_i$$

$$Z_2^{\omega} = \sum_{i,s,t} x_{i,s,t}^{\omega} \cdot LT_{i,s}$$

۴- محدودیت‌ها

$$D_{i,t}^{\omega} - \sum_s x_{i,s,t}^{\omega} + Inv_{i,t-1}^{\omega} = Inv_{i,t}^{\omega} \quad \forall i, \omega \quad (1)$$

$$W_i \geq Inv_{i,t}^{\omega} \quad \forall i, t, \omega \quad (2)$$

$$A_{i,s,t}^{\omega} y_{i,s,t}^{\omega} \geq \sum_i x_{i,s,t}^{\omega} \quad (3)$$

$$M_{i,s,t} y_{i,s,t}^{\omega} \geq x_{i,s,t}^{\omega} \quad \forall i, s, t, \omega \quad (4)$$

$$B_t \geq \sum_{i,s} x_{i,s,t}^{\omega} (C_{i,s}^{\omega} + TSC_{i,s}) \quad \forall t, \omega \quad (5)$$

$$TW_{i,s,t} \geq y_{i,s,t}^{\omega} \quad \forall i, s, t, \omega \quad (6)$$

محدودیت ۱ بیان می‌کند که موجودی پایان هر دوره برابر با موجودی ابتدای دوره به علاوه سفارش‌های دریافت‌شده و منهای تقاضای همان دوره است و به عنوان معادله جریان مواد عمل می‌کند. محدودیت ۲ تضمین می‌کند که سطح موجودی هیچ ماده‌ای در هیچ دوره‌ای از ظرفیت انبار فراتر نرود و بدین ترتیب محدودیت‌های لجستیکی لحاظ می‌شود. محدودیت ۳ مقرر می‌دارد که هزینه کل سفارش‌ها (خرید و حمل‌ونقل) در هر دوره نباید از بودجه تخصیص‌یافته تجاوز کند تا واقع‌گرایی مالی مدل حفظ شود. محدودیت ۴ بیان می‌کند که حجم سفارش از هر تأمین‌کننده در هر سناریو نباید بیش از ظرفیت عرضه او باشد و توان عملیاتی واقعی منعکس شود. محدودیت ۵ ارتباط بین متغیرهای باینری و پیوسته را برقرار کرده و تصریح می‌کند که در صورت عدم انتخاب تأمین‌کننده، مقدار سفارش الزاماً صفر خواهد بود. در نهایت، محدودیت ۶ تضمین می‌کند شاخص‌های زمان تحویل تنها در صورت ثبت سفارش فعال شوند تا از ایجاد مقادیر غیرواقعی جلوگیری شود.

حل مدل و مثال عددی

به منظور ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی و نشان دادن قابلیت‌های آن در شرایط عملی، یک مثال عددی طراحی و مورد استفاده قرار گرفته است. در این مثال، داده‌های مربوط به تقاضا، ظرفیت تأمین‌کنندگان، هزینه‌های خرید، حمل‌ونقل و نگهداری، بودجه در هر دوره و هم‌چنین زمان‌های تحویل در قالب چند سناریوی مختلف در نظر گرفته شده‌اند. این اطلاعات به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که پیچیدگی‌های واقعی زنجیره تأمین را شبیه‌سازی کرده و امکان تحلیل رفتار مدل در شرایط عدم قطعیت را فراهم سازند. در جدول ۱ اطلاعات اولیه مسأله برای دو

برای حل مدل دوهدفه، از روش ϵ -constraint استفاده شده است. در این روش، یکی از توابع هدف (هزینه کل) به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود و تابع هدف دیگر (زمان تحویل کل) به صورت یک محدودیت با کران بالا ϵ در نظر گرفته می‌شود.

مجموعه سناریوهای عدم قطعیت نقش کلیدی در مدل‌های تصادفی (Stochastic Programming) دارد. این سناریوها به ما کمک می‌کنند تا رفتار مدل را در مواجهه با آینده‌های مختلف پیش‌بینی کنیم. پارامترهایی که ممکن است دارای عدم قطعیت باشند به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲- پارامترهای دارای عدم قطعیت و احتمال هر سناریو

سناریو	$D_{i,t}$	$C_{i,s}$	$A_{i,s,t}$	$LT_{i,s}$	احتمال
ω_1	سطح تقاضای کم	قیمت پایین	عرضه زیاد	مدت‌زمان تحویل زیاد	۰٫۴
ω_2	تقاضای متوسط	قیمت متوسط	عرضه متوسط	مدت‌زمان تحویل متوسط	۰٫۳۵
ω_3	تقاضای بالا	قیمت بالا	عرضه کم	مدت‌زمان تحویل کم	۰٫۲۵

حل مدل برنامه‌ریزی چندهدفه زنجیره تأمین برای مثال عددی ارائه شده نشان داد که مدل قادر است تصمیمات بهینه در شرایط عدم قطعیت ارائه دهد. نتایج نشان می‌دهد که هزینه کل مورد انتظار زنجیره تأمین برابر با ۱۲٫۰۷ میلیارد ریال و زمان تحویل مورد انتظار برابر با ۳۰ روز است. تحلیل سناریوها مشخص کرد که: در سناریوی sc1، هزینه کل ۱۲٫۳ میلیارد ریال و زمان تحویل ۲۶ روز بود؛ در سناریوی sc2، هزینه کل ۱۱٫۸ میلیارد ریال و زمان تحویل ۳۸ روز بود؛ و در سناریوی sc3، هزینه کل ۱۲٫۱ میلیارد ریال و زمان تحویل ۳۰ روز به دست آمد. نکته قابل توجه این است که هرچند سناریوی sc1 با عنوان «مدت‌زمان تحویل زیاد» تعریف شده است، اما در نتیجه محاسبات کمترین زمان تحویل (۲۶ روز) حاصل شد. علت این امر آن است که مدل در این سناریو با بهره‌گیری از ظرفیت بالای عرضه، قیمت پایین و نیز امکان استفاده از موجودی اولیه یا انتخاب تأمین‌کنندگان با زمان تحویل کوتاه‌تر، توانسته میانگین مؤثر زمان تحویل را کاهش دهد. به عبارت دیگر، برچسب کلی سناریو لزوماً به معنای زمان تحویل بالای نهایی نیست و ترکیب تصمیمات بهینه در تأمین‌کننده و زمان‌بندی سفارش، نتیجه واقعی را مشخص می‌کند. هم‌چنین، استفاده از روش وزن‌دهی با وزن $\alpha = ۰٫۷$ برای هزینه و $۰٫۳$ برای زمان تحویل، تعادل مناسبی بین اهداف اقتصادی و زمان خدمت‌دهی فراهم کرد. این نتایج نشان می‌دهد که مدل توانایی مدیریت trade-off میان هزینه و زمان تحویل را دارد و می‌تواند به عنوان یک ابزار

کارآمد برای تصمیم‌گیری در محیط‌های پیچیده و چندانرویایی زنجیره تأمین به‌کار گرفته شود.

نتیجه‌گیری

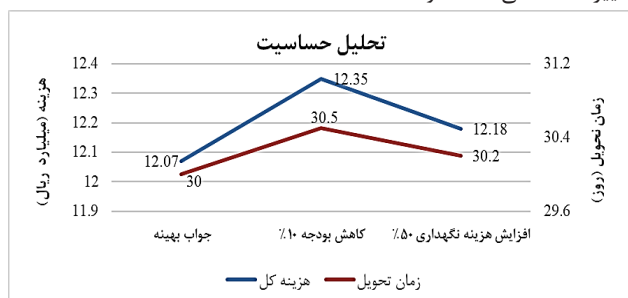
در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه تحت عدم قطعیت برای مدیریت زنجیره تأمین مواد اولیه ارائه شد که هم‌زمان هزینه کل زنجیره تأمین و زمان تحویل را بهینه می‌کند. چهار رویکرد شامل حداقل سازی هزینه، حداقل سازی زمان، ترکیب وزن‌دار اهداف و روش ϵ -Constraint به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد کاهش هزینه معمولاً با افزایش زمان تحویل همراه است و روش ϵ -Constraint امکان کاهش هزینه‌ها بدون نقض محدودیت زمان را فراهم می‌کند. مدل ارائه‌شده ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری چندهدفه است و می‌تواند مدیریت سفارش‌دهی و موجودی را بهبود بخشد. به‌عنوان پیشنهاد آتی، می‌توان محدودیت‌های عملیاتی و ظرفیت‌های تولید را به مدل افزود و تابع هدف را با معیارهای عملیاتی مانند کاهش ضایعات و ارتقای بهره‌وری گسترش داد.

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت برای بررسی پایداری مدل نسبت به تغییرات پارامترهای کلیدی

انجام شد:

- کاهش ۱۰٪ بودجه هر دوره: هزینه کل مورد انتظار از ۱۲,۰۷ به ۱۲,۳۵ میلیارد ریال افزایش یافت. (۲,۳٪+) و زمان تحویل مورد انتظار از ۳۰ به ۳۰,۵ روز افزایش یافت. (۱,۷٪+)
 - افزایش ۵۰٪ هزینه نگهداری: هزینه کل از ۱۲,۰۷ به ۱۲,۱۸ میلیارد ریال افزایش یافت. (۰,۹٪+). و زمان تحویل از ۳۰ به ۳۰,۲ روز افزایش یافت. (۰,۷٪+)
- این نتایج نشان می‌دهد که بودجه و هزینه نگهداری موجودی، بیشترین تأثیر را بر عملکرد زنجیره تأمین دارند و تصمیمات مدیریتی باید با در نظر گرفتن این تغییرات احتمالی اتخاذ شوند.



مراجع

- [۱] نادری، م.، و احمدی، ع. (۱۳۹۷). «مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین مواد اولیه در صنایع تولیدی با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت». فصلنامه مهندسی صنایع ایران، ۶۲-۴۵، (۳) ۱۴.
- [2] Klibi, W., Martel, A., & Guitouni, A., "The design of robust value-creating supply chain networks," European Journal of Operational Research, vol. 203, no. 2, pp. 283–293, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.029>
- [3] Pishvae, M. S., & Torabi, S. A., "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design," Applied Mathematical Modelling, vol. 34, no. 10, pp. 2950–2966, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.12.018>
- [4] Gupta, A., & Maranas, C. D., "Managing demand uncertainty in supply chain planning," Computers & Chemical Engineering, vol. 27, no. 8, pp. 1219–1227, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(03\)00138-1](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(03)00138-1)
- [5] Singh, S., & Sharma, R., "A linear programming model for supplier selection and order allocation in the tire industry," International Journal of Production Research, vol. 55, no. 3, pp. 1–15, 2017. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1214410>