زمانبندی کامیون‌ها در یک انبار متقاطع با در نظر گرفتن لجستیک معکوس و مرتب‌سازی محموله‌ها در محیط خاکستری

حمیدرضا قیاسی[۱]، سید میثم موسوی[۲]، فرزاد عظیمی[۳]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران؛ hamidrezaghiasi64@gmail.com
[۲]دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران؛ sm.mousavi@shahed.ac.ir
[۳] کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران؛ farzadazimi90@yahoo.com
* نویسنده مسئول: حمیدرضا قیاسی

چکیده

در شبکه‌های توزیع زنجیره‌های تأمین، جابجایی و تحویل به موقع محصولات به دست مشتریان بسیار مهم می‌باشد. بنابراین، زمانبندی کامیون‌ها و تخصیص آن‌ها به درب‌های بارانداز، دو سطح مهم از تصمیمات عملیاتی انبارداری متقاطع برای شرکت‌های لجستیکی است که در طی دهه گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، یک مسئله زمانبندی کامیون‌ها با به‌کارگیری ملاحظه لجستیک معکوس در انبار متقاطع تحت شرایط عدم قطعیت برخی پارامترها ارائه می‌شود. علاوه بر این، ملاحظاتی مانند مرتب‌سازی محموله‌ها درون کامیون‌های ورودی، تعیین مهلت مقرر به عنوان یک محدودیت سخت برای کامیون‌های خروجی و برون‌سپاری محموله‌هایی که پس از پایان مهلت مقرر بارگیری کامیون‌های خروجی به باراندازهای ارسال منتقل می‌شوند؛ در این پژوهش به‌کار گرفته شده است. یک مدل برنامه‌ریزی آمیخته عدد صحیح به منظور حداقل نمودن کل هزینه‌های جریمه و تاخیر در تحویل محموله‌ها به خرده فروشان و بازارهای ثانویه ارائه شده است. با توجه به عدم قطعیت موجود در برخی از عوامل مربوط به زمان مدل برنامه‌ریزی ریاضی، این پارامترها در قالب اعداد خاکستری در نظر گرفته شده‌اند. بر همین اساس، از رویکرد خوش‌بینانه و بدبینانه برای مدل برنامه‌ریزی ریاضی خاکستری جهت به‌دست آوردن مدل معادل قطعی به‌کار گرفته شده است. در ادامه یک مثال کاربردی در یکی از فروشگاه‌های زنجیره‌ای برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی بهره گرفته شده است. همچنین اعتبار سنجی نتایج با تحلیل حساسیت روی پارامترهای اصلی مدل ریاضی، نشان از کارکرد مطلوب روش پیشنهادی داشته است.

کلمات کلیدی

انبار متقاطع، لجستیک معکوس، انبار متقاطع معکوس، زمانبندی کامیون، برون‌سپاری، تئوری خاکستری

۱- مقدمه

لجستیک معکوس مفهومی است که به دلیل بازیابی محصولات بازگشتی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است و از این نظر مدت‌هاست که به عنوان یک عنصر اصلی در زنجیره‌های تأمین شناخته شده است. لجستیک معکوس فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل موثر جریان‌های ورودی، ذخیره‌سازی کالاهای استفاده شده و اطلاعات مرتبط با آن‌ها در جهت معکوس زنجیره تأمین با هدف بازیابی ارزش یا دفع مناسب می‌باشد [۱]. انبار متقاطع یکی از استراتژی‌های سیستم‌های توزیع است که محموله‌هایی از محصولات را از چندین تأمین‌کننده به‌وسیله کامیون‌های ورودی دریافت می‌کند و پس از مرتب‌سازی محصولات، آن‌ها را بر اساس نیازهای مشتریان ادغام کرده و درنهایت محصولات بعد از بارگیری بر روی کامیون‌های خروجی به سمت خرده فروشان ارسال می‌شوند. عملکرد این تسهیل برای حداقل کردن هزینه‌های موجودی بدین شکل است که کالایی بیش از ۲۴ ساعت درون انبار نگهداری نمی‌شود [۲]. از مزایای انبارداری متقاطع نسبت به انبارهای سنتی می‌توان به کاهش هزینه‌های سیستم از جمله هزینه‌های موجودی و هزینه‌های انتقال‌ها و جابجایی‌ها، عملکرد بهتر در پاسخگویی به مشتریان، کاهش فضای ذخیره‌سازی برای نگهداری محصولات و حداقل نمودن زمان

تحویل محصولات از تأمین کنندگان به مشتریان اشاره نمود [۳]. در مطالعه بوزار و کارلو [۴]، مسئله زمانبندی کامیون‌های ورودی و خروجی و تخصیص آن‌ها به درب‌های بارانداز در یک انبار متقاطع بررسی شد. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف حداقل کردن کل جابجایی محموله‌ها در انبار متقاطع ارائه دادند. همچنین مدل این مسئله با استفاده از یک روش ابتکاری مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید شده حل شد.

وحدانی و زندیه[۵] با درنظر گرفتن مفروضات مدل یو و اگبلو [۲]، یک مسئله زمانبندی کامیون‌ها در انبار متقاطع با لحاظ کردن ناحیه ذخیره موقت به یافتن بهترین توالی باراندازها برای کامیون‌های ورودی و خروجی پرداختند. ویستی پانیچ و هنگ مکای [۶] یک مسئله زمانبندی کامیون‌ها را به منظور تعیین درب بارانداز و توالی کامیون‌های ورودی و خروجی در سیستم انبارداری متقاطع چند درب بررسی نمودند. شاهمردان و سجادیه [۷] در یک مسئله زمانبندی کامیون‌ها در انبار متقاطع به منظور پیدا کردن درب بارانداز بهینه برای کامیون‌های ترکیبی و خروجی و تخصیص محموله‌ها به مقصد، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط زمانبندی کامیون‌ها با هدف حداقل کردن کل زمان عملیات پیشنهاد دادند. کبودانی و همکاران [۸] برای اولین بار یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در یک مرکز انبار متقاطع با درنظر گرفتن همزمان لجستیک رو به‌جلو و معکوس را ارائه دادند. در مطالعه خورشیدیان و همکاران [۹]، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو هدفه را برای مسئله ادغام شده زمانبندی کامیون و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در یک سیستم انبار متقاطع در جریان رو به جلو و معکوس با اهداف حداقل کردن کل هزینه عملیات (شامل هزینه‌های زودرسیدن و دیر رسیدن کامیون‌های خروجی، هزینه محموله‌های ناهمگن، بارگیری کمتر از ظرفیت کامیون و هزینه ثابت استفاده از کامیون‌های ورودی و خروجی) و کل زمان عملیات ارائه نمودند. زولوگا و همکاران [۱۰] با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف کاهش کل هزینه‌های مربوط به تصمیم‌گیری واگذاری کالاها (بازارهای ثانویه یا انبارداری سنتی) انبار متقاطع و لجستیک معکوس را به سیستم انبار متقاطع معکوس ادغام کردند.

همانطور که از ادبیات موضوع مشخص است، مسئله زمانبندی کامیون‌ها در انبار متقاطع طی سال‌های اخیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. انبار متقاطع بیشتر در لجستیک رو به جلو بررسی شده که منجر به نتایج بسیار ارزشمندی شده است. لجستیک معکوس در انبارداری متقاطع در سال‌های گذشته بسیار کم به‌کار گرفته شده است. با توجه به مرور ادبیاتی که در این بخش ارائه شد، خورشیدیان و همکاران [۹] فقط بازگشت محصولات استفاده شده در منطقه مشتریان به انبار متقاطع را درنظر گرفته‌اند و همینطور ارسال مجدد محصولات به بازارهای ثانویه را بررسی نکرده‌اند. در این مطالعه، یک مسئله زمانبندی کامیون‌ها در انبار متقاطع با درنظر گرفتن ملاحظات لجستیک معکوس و برون‌سپاری انتقال محصولات پس از پایان افق برنامه‌ریزی پیشنهاد شده است. یک مهلت مقرر به‌عنوان زمان خروج کامیون‌های خروجی از انبار متقاطع درنظر گرفته شده است. در صورتی که محصولات حداکثر تا این زمان تعیین شده بر روی کامیون‌های خروجی بارگیری نشوند؛ در انتهای افق برنامه‌ریزی برون‌سپاری شده و توسط کامیون‌های دیگری به مناطق بازار فروش و بازارهای ثانویه انتقال داده می‌شوند.

همچنین در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح با هدف حداقل کردن کل هزینه‌های تأخیر تحویل محموله‌ها ارائه شده است. در این مدلسازی ملاحظات جدیدی نسبت به مطالعات گذشته صورت گرفته است که عبارتند از: مهلت مقرر کامیون‌های خروجی، چند محصولی بودن محموله‌ها، برون‌سپاری انتقال محصولات، مرتب‌سازی محموله‌ها در کامیون‌های ورودی و انتقال سریع محصولات به کامیون‌های خروجی به محض تخلیه شدن از کامیون‌های ورودی. عدم قطعیت در اینگونه مسائل از موارد مهمی است که در پژوهش‌های گذشته توجه کمی به آن شده است. در دسترس نبودن اطلاعات کافی، منجر به عدم قطعیت در دنیای واقعی می‌شود. در این مطالعه برای مواجهه با عدم‌قطعیت، یک رویکرد مورد استفاده قرار گرفته و مسئله با استفاده از آن حل شده است. در ادامه این پژوهش، در بخش دوم به بیان مسئله و مدلسازی ریاضی پرداخته، در بخش سوم رویکرد پیشنهادی مواجهه با عدم قطعیت تشریح داده شده و در بخش چهارم و پنجم نیز به ترتیب نتایج حاصل از حل یک مثال کاربردی و جمع‌بندی موضوع ارائه شده است.

۲- بیان مسئله و مدلسازی

۲.۱- بیان مسئله

مسئله مورد مطالعه عبارت است از زمانبندی کامیون‌ها در انبار متقاطع تحت شرایط عدم قطعیت با درنظر گرفتن ملاحظات لجستیک معکوس و برون‌سپاری انتقال محصولات به مناطق بازار فروش و بازارهای ثانویه پس از پایان افق برنامه‌ریزی. در این مسئله زمانبندی و توالی کامیون‌های ورودی و خروجی با در نظر گرفتن درب‌های چندگانه بارانداز دریافت و ارسال در تسهیل انبار متقاطع ارائه شده است. هدف به حداقل رساندن

هزینه‌های مربوط به تاخیر محموله‌ها می‌باشد. همچنین کامیون‌های خروجی باید مطابق زمان‌های از پیش تعیین شده بدون توجه به بارگیری کامل محموله‌ها، انبار متقاطع را ترک نمایند. اگر هر محموله‌ای با مهلت‌های مقرر تعیین شده مطابقت نداشته باشند، از کامیون‌های دیگری در پایان افق برنامه‌ریزی برای حمل آن‌ها استفاده می‌شود.

۲.۲- مدلسازی ریاضی

مجموعه‌ها

I: کلیه کامیون‌های ورودی $(i,i' \in I)$	$i, i' = 1,2, \dots, I$
K: کلیه کامیون‌های خروجی $(k,k' \in K)$	$k, k' = 1,2, \dots, K$
J: کلیه درب‌های بارانداز دریافت $(j,j' \in J)$	$j, j' = 1,2, \dots, J$
L: کلیه درب‌های بارانداز ارسال $(l,l' \in L)$	$l, l' = 1,2, \dots, L$
G: انواع محصول	$g = 1,2, \dots, G$
H: انواع وسیله نقلیه برای دریافت محموله‌های دچار تاخیر شده در پایان افق برنامه‌ریزی	$h = 1,2, \dots, H$
O: کلیه بازارهای ثانویه	$o = 1,2, \dots, O$

پارامترها

a_i : زمان رسیدن کامیون ورودی i

b_k : زمان رسیدن کامیون خروجی k

d_k: زمان مقرر کامیون خروجی k

m_{hk} : هزینه وسیله نقلیه نوع h برای دریافت محموله‌های دچار تاخیر شده کامیون خروجی k در پایان افق برنامه‌ریزی.

cap_h : ظرفیت وسیله نقلیه نوع h

θ_{ik} : جایگاه محموله موردنیاز کامیون خروجی k درون کامیون ورودی i؛ یعنی توالی تخلیه محموله‌هایی که درون کامیون ورودی i بارگیری شده‌اند را نشان می‌دهد.

w_{ik} : وزن اهمیت هر محموله از کامیون ورودی i به کامیون خروجی k

ρ_{ik} : زمان موردنیاز برای گذاشتن یک محصول از یک محموله از کامیون ورودی i به کامیون خروجی k بر روی نوار نقاله

t_{jl} : زمان سفر بین بارانداز دریافت j و بارانداز ارسال l

T_{ik}: زمان مورد نیاز برای تخلیه/ بارگیری یک محصول در محموله‌ای که توسط کامیون ورودی i فراهم شده است و باید به کامیون خروجی k تحویل داده شود.

TC: زمان تغییر کامیون

M: یک عدد مثبت بزرگ

متغیرهای مثبت

α_i: زمان تخصیص کامیون ورودی i به درب بارانداز دریافت

β_k: زمان تخصیص کامیون خروجی k به درب بارانداز ارسال

D_i: زمان تکمیل کامیون ورودی i

c_k: زمان تکمیل کامیون خروجی k

λ_{ik}: زمان شروع ارسال محموله‌های تخلیه شده از کامیون ورودی i به کامیون خروجی k

μ_{ik}: زمان موردنیاز برای انتقال محموله از کامیون ورودی i به کامیون خروجی k تا رسیدن به درب بارانداز ارسال مناسب

σ_{ik}: زمان شروع فرآیند بارگیری محموله از کامیون ورودی i به کامیون خروجی k

متغیرهای عدد صحیح

f_{ikg}: مقدار محصول نوع g منتقل شده از کامیون ورودی i به کامیون خروجی k

fu_{ikg}: مقدار محصول نوع g که باید از کامیون ورودی i به کامیون خروجی k منتقل می‌شده اما دچار تاخیر شده است.

متغیرهای باینری

X_{ij}
۱ : اگر کامیون ورودی i به درب بارانداز دریافت j تخصیص یابد
۰ : در غیر اینصورت

y_{kl}
۱ : اگر کامیون خروجی k به درب بارانداز ارسال l تخصیص یابد
۰ : در غیر اینصورت

Z_{ijkl}
۱ : اگر کامیون ورودی i به درب بارانداز دریافت j و کامیون خروجی k به درب بارانداز ارسال l تخصیص یابد
۰ : در غیر اینصورت

$\gamma_{ii'k}$
۱ : اگر محموله تهیه شده از کامیون ورودی i بر محموله کامیون ورودی i' در فرآیند بارگیری کامیون خروجی k تقدم داشته باشد
۰ : در غیر اینصورت

R_{hk}
۱ : اگر وسیله نقلیه نوع h برای دریافت محموله‌های دچار تاخیر شده‌ی کامیون خروجی k استفاده شود.
۰ : در غیر اینصورت

LI_{i}
۱ : اگر کامیون ورودی i به‌عنوان آخرین کامیون تخصیص داده شده به درب بارانداز، پردازش شود.
۰ : در غیر اینصورت

LO_{k}
۱ : اگر کامیون خروجی k به‌عنوان آخرین کامیون تخصیص داده شده به درب بارانداز، پردازش شود.
۰ : در غیر اینصورت

φ_{ko}
۱ : اگر کامیون خروجی k به‌سمت بازار ثانویه o برود.
۰ : در غیر اینصورت

$P_{ii'}$
۱ : اگر کامیون ورودی i و i' به یک درب بارانداز دریافت مشابه تخصیص پیدا کنند و کامیون ورودی i به i' تقدم داشته باشد.
۰ : در غیر اینصورت

Q_{ik}
۱ : اگر کامیون خروجی k و k' به یک درب بارانداز ارسال مشابه تخصیص پیدا کنند و کامیون خروجی k به k' تقدم داشته باشد.
۰ : در غیر اینصورت

U_{ik}
۱ : اگر محموله فراهم شده از کامیون ورودی i دچار تاخیر شده و قبل از زمان موعد مقرر بر روی کامیون خروجی k بارگیری نشود.
۰ : در غیر اینصورت

FI_{i}
۱ : اگر کامیون ورودی i به‌عنوان اولین کامیون تخصیص داده شده به درب بارانداز، پردازش شود.
۰ : در غیر اینصورت

FO_{k}
۱ : اگر کامیون خروجی k به‌عنوان اولین کامیون تخصیص داده شده به درب بارانداز، پردازش شود.
۰ : در غیر اینصورت

$R\varphi_{kho}$
۱ : اگر محصولات دچار تاخیر شده کامیون خروجی k توسط وسیله نقلیه نوع h به‌سمت بازار ثانویه o برود.
۰ : در غیر اینصورت

مدل ریاضی

$$Min\ Z = \sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\otimes\, w_{ik}\times f_{ikg}\times U_{ik} + \sum_{h\in H}\sum_{k\in K}\otimes\, m_{hk}\times R_{hk}$$ (۱)

Subject to:

$$\sum_{j\in J} X_{ij} = 1 \qquad \forall i\in I$$ (۲)

$$\sum_{l\in L} Y_{kl} = 1 \qquad \forall k\in K$$ (۳)

$$2Z_{ijkl}\le X_{ij}+Y_{kl} \qquad \forall i\in I.j\in J.k\in K.l\in L$$ (۴)

$$M\times Z_{ijkl}\ge \sum_{g\,\in G} f_{ikg} \qquad \forall i\in I.j\in J.k\in K.l\in L$$ (۵)

$$FI_i + \sum_{i'\in I.i'\neq i} P_{i'i} = 1 \qquad \forall i\in I$$ (۶)

$$LI_i + \sum_{i'\in I.i'\neq i} P_{ii'} = 1 \qquad \forall i\in I$$ (۷)

$$P_{ii'} - 1 \le X_{ij} - X_{i'j} \qquad \forall i.i'\in I.j\in J.i\neq i'$$ (۸)

$$X_{ij} - X_{i'j} \le 1 - P_{ii'} \qquad \forall i.i'\in I.j\in J.i\neq i'$$ (۹)

$$FI_i + FI_{i'} \le 3 - X_{ij} - X_{i'j} \qquad \forall i.i'\in I.j\in J.i\neq i'$$ (۱۰)

$$LI_i + LI_{i'} \le 3 - X_{ij} - X_{i'j} \qquad \forall i.i'\in I.j\in J.i\neq i'$$ (۱۱)

$$FO_k + \sum_{k'\in K.k'\neq k} Q_{k'k} = 1 \qquad \forall k\in K$$ (۱۲)

$$LO_k + \sum_{k'\in K.k'\neq k} Q_{kk'} = 1 \qquad \forall k\in K$$ (۱۳)

$$Q_{kk'} - 1 \le Y_{kl} - Y_{k'l} \qquad \forall l\in L.k.k'\in K.k\neq k'$$ (۱۴)

$$Y_{kl} - Y_{k'l} \le 1 - Q_{kk'} \qquad \forall l\in L.k.k'\in K.k\neq k'$$ (۱۵)

$$FO_k + FO_{k'} \le 3 - Y_{kl} - Y_{k'l} \qquad \forall l\in L.k.k'\in K.k\neq k'$$ (۱۶)

$$LO_k + LO_{k'} \le 3 - Y_{kl} - Y_{k'l} \qquad \forall l\in L.k.k'\in K.k\neq k'$$ (۱۷)

$$\alpha_i \ge\otimes\, a_i \qquad \forall i\in I$$ (۱۸)

$$\alpha_i \ge D_{i'} + TC - M\times(1 - P_{i'i}) \qquad \forall i.i'\in I\,.i\neq i'$$ (۱۹)

$$D_i \ge \alpha_i + \sum_{k\in K}\sum_{g\,\in G} f_{ikg}\times\otimes\, T_{ik} \qquad \forall i\in I$$ (۲۰)

$$\beta_k \ge\otimes\, b_k \qquad \forall k\in K$$ (۲۱)

$$\beta_k \ge C_{k'} + TC - M\times(1 - Q_{k'k}) \qquad \forall k.k'\in K\,.k\neq k'$$ (۲۲)

$$\lambda_{ik} \geq \alpha_i + \sum_{\substack{k' \in K \\ \theta_{jk'} \leq \theta_{ik}}} \sum_{g \in G} f_{ik'g} \times \otimes T_{ik'} \qquad \forall i \in I.k.k' \in K \tag{۲۳}$$

$$\mu_{ik} \geq \lambda_{ik} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \otimes t_{jl} \times Z_{ijkl} + \sum_{g \in G} f_{ikg} \times \otimes \rho_{ik} \qquad \forall i \in I.k \in K \tag{۲۴}$$

$$\gamma_{ii'k} \geq \frac{\mu_{i'k} - \mu_{ik}}{M} \qquad \forall i.i' \in I.i \neq i'.k \in K \tag{۲۵}$$

$$\gamma_{ii'k} \leq 1 + \frac{\mu_{i'k} - \mu_{ik}}{M} \qquad \forall i.i' \in I.i \neq i'.k \in K \tag{۲۶}$$

$$\sigma_{ik} \geq \mu_{ik} \qquad \forall i \in I.k \in K \tag{۲۷}$$

$$\sigma_{ik} \geq \beta_k \qquad \forall i \in I.k \in K \tag{۲۸}$$

$$\sigma_{ik} \geq \sigma_{i'k} + \sum_{g \in G} f_{i'kg} \times \otimes T_{i'kg} - M \times (1 - U_{i'k}) - M \times (1 - \gamma_{i'ik}) \qquad \forall i, i' \in I.i \neq i'.k \in K \tag{۲۹}$$

$$M \times U_{ik} \geq \sigma_{ik} + \sum_{g \in G} f_{ikg} \times \otimes T_{ik} - \otimes d_k \qquad \forall i \in I.k \in K \tag{۳۰}$$

$$C_k \leq \otimes d_k \qquad \forall k \in K \tag{۳۱}$$

$$C_k \geq \beta_k \qquad \forall k \in K \tag{۳۲}$$

$$C_k \geq \sum_{g \in G} f_{ikg} \times \otimes T_{ik} + \sigma_{ik} - M \times U_{ik} \qquad \forall i \in I.k \in K \tag{۳۳}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{g \in G} fu_{ikg} \leq \sum_{h \in H} Cap_h \times R_{hk} \qquad \forall k \in K \tag{۳۴}$$

$$\sum_{h \in H} R_{hk} \leq 1 \qquad \forall k \in K \tag{۳۵}$$

$$\sum_{o \in O} \phi_{ko} \leq 1 \qquad \forall k \in K \tag{۳۶}$$

$$\sum_{k \in K} \phi_{ko} \leq 1 \qquad \forall o \in O \tag{۳۷}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{o \in O} R\phi_{kho} \leq 1 \qquad \forall h \in H \tag{۳۸}$$

$$R\phi_{kho} \leq R_{hk} \qquad \forall k \in K.h \in H.o \in O \tag{۳۹}$$

$$R\phi_{kho} \leq \phi_{ko} \qquad \forall k \in K.h \in H.o \in O \tag{۴۰}$$

$$R\phi_{kho} \geq R_{hk} + \phi_{ko} - 1 \qquad \forall k \in K.h \in H.o \in O \tag{۴۱}$$

$$\alpha_i.\beta_k.D_i.C_k.\lambda_{ik}.\mu_{ik}.\sigma_{ik}.f_{ikg}.fu_{ikg} \geq 0 \qquad \forall i \in I.k \in K.g \in G \tag{۴۲}$$

$$X_{ij}.Y_{kl}.Z_{ijkl}.P_{ii'}.\gamma_{ii'k}.U_{ik}.FI_i.LI_i \in \{0.1\} \qquad \forall i.i' \in I.i \neq i'.k \in K.j \in J.l \in L \tag{۴۳}$$

$$Q_{kk'}.FO_k.LO_k.R_{hk}.\phi_{ko}.R\phi_{kho} \in \{0.1\} \qquad \forall k.k' \in K.k \neq k'.h \in H \tag{۴۴}$$

رابطه (۱) بیانگر تابع هدف است. این تابع حداقل کردن کل هزینه‌های مربوط به تاخیر تحویل محموله‌ها را نمایش می‌دهد. روابط (۲) و (۳) نشان می‌دهند که هر کامیون ورودی و خروجی دقیقا به یک درب تخصیص داده می‌شود. روابط (۴) و (۵) با نشان دادن رابطه‌های مربوط به متغیر

Z_{ijkl}، نحوه و شرط انتقال محصولات از طریق اتصال همزمان کامیون‌های ورودی و خروجی را نمایش می‌دهند. روابط (۶) و (۷) به‌ترتیب پردازش هر کامیون ورودی به عنوان اولین/ آخرین کامیون را بیان می‌کنند. روابط (۸) و (۹) برای توالی کامیون‌های ورودی در درب‌های تخصیص داده شده خود درصورتی که به یک درب یکسان تخصیص داده شده باشند، در نظر گرفته شده‌اند. روابط (۱۰) و (۱۱) اطمینان حاصل می‌کنند که دقیقا یک کامیون به‌عنوان اولین و آخرین توالی کامیون در درب‌های بارانداز پردازش می‌شوند. روابط (۱۲) تا (۱۷) همانند روابط (۶) تا (۱۱) هستند با این تفاوت که برای کامیون‌های خروجی درنظر گرفته شده‌اند. محدودیت (۱۸) تاکید می‌کند که یک کامیون ورودی پس از زمان ورودش به یک درب بارانداز دریافت تخصیص داده می‌شود. رابطه (۱۹) بیان می‌کند که یک کامیون ورودی فرآیند تخلیه بار خود را پس از اتمام فرآیند تخلیه بار کامیون قبلی و ترک درب بارانداز توسط آن، آغاز می‌نماید. زمان اتمام عملیات هر کامیون ورودی توسط محدودیت (۲۰) نشان داده شده است. روابط (۲۱) و (۲۲) همانند محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) می‌باشند با این تفاوت که این روابط برای کامیون‌های خروجی درنظر گرفته شده‌اند. محدودیت (۲۳) شرایط تخلیه بار یک کامیون ورودی را با تخصیص آن کامیون به درب بارانداز و تخلیه محموله‌های قبلی نشان می‌دهد. محدودیت (۲۴) اعلام می‌کند که یک محموله پس از تخلیه و حمل‌ونقل در انبار متقاطع، به درب بارانداز ارسال می‌رسد. روابط (۲۵) و (۲۶) توالی محموله‌های بارگیری شده بر روی یک کامیون خروجی خاص بر اساس سیاست FIFO را بیان می‌کنند. معادله‌های (۲۷) و (۲۸) تضمین می‌نمایند که در صورتی یک محموله بر روی کامیون خروجی بارگیری می‌شوند که اولاً به درب بارانداز رسیده باشد و دوماً کامیون خروجی مربوطه فرآیند بارگیری خود را آغاز کرده باشد. محدودیت (۲۹) تضمین می‌کند محموله‌ای می‌تواند بارگیری شود که محموله‌های مقدم بر آن روی کامیون خروجی بارگیری شده باشند. رابطه (۳۰) نشان می‌دهد یک محموله در صورتی که فرآیند بارگیری آن قبل از زمان مقرر باشد؛ می‌تواند درون کامیون خروجی بارگیری شود. رابطه (۳۱) ضمانت می‌کند که روند بارگیری هر کامیون خروجی قبل از موعد مقرر به پایان می‌رسد. شرط بزرگتر بودن زمان تکمیل فرآیند هر کامیون خروجی از زمان تخصیص آن به درب بارانداز در معادله (۳۲) نشان داده است. رابطه (۳۳) زمان تکمیل فرآیند هر کامیون خروجی را محاسبه می‌نماید. محدودیت (۳۴) اطمینان حاصل می‌کند که مقدار محموله های بارگیری شده در یک کامیون در پایان افق برنامه‌ریزی بیش از ظرفیت آن کامیون نیست. معادله (۳۵) بیانگر این است که برای تحویل محموله‌های باقیمانده از هر کامیون خروجی در پایان افق برنامه‌ریزی، باید حداکثر از یک نوع کامیون استفاده شود. روابط (۳۶) و (۳۷) به ترتیب نشان می‌دهند که هر کامیون خروجی فقط به یک بازار ثانویه و هر بازار ثانویه تنها به یک کامیون خروجی تخصیص داده می‌شود. رابطه (۳۸) تاکید دارد که هر کامیون نوع h فقط به یک بازار ثانویه برای انتقال محصولات دچار تاخیر شده تخصیص پیدا می‌کند. محدودیت‌های (۳۹) و (۴۰) اشاره به محدودیت تعداد کامیون‌هایی دارد که در پایان افق برنامه‌ریزی، محصولاتی که دچار تاخیر شده‌اند را به بازارهای ثانویه می‌برند. معادله (۴۱)، رابطه بین متغیرهای مربوط به تعداد هر نوع از کامیون‌ها و اولویت بکارگیری آن‌ها را نشان می‌دهد. در نهایت محدودیت (۴۲) متغیرهای پیوسته و مثبت و روابط (۴۳) و (۴۴) متغیرهای باینری مدل ریاضی را معرفی می‌کنند.

۳- رویکرد مواجهه با عدم‌قطعیت

همانطور که گفته شد، در مدل پیشنهادی جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در برخی پارامترها از اعداد خاکستری استفاده شده است که همواره مقداری در بین حالت خوشبینانه و بدبینانه به خود می‌گیرند. رویکرد خوشبینانه نسبت به وقایع، دیدگاهی مثبت دارد و همچنین در این دیدگاه نتایج مورد انتظار، مطلوب خواهد بود. اما رویکرد بدبینانه نسبت به اتفاقات، دیدگاهی منفی دارد و همچنین نتایج نامطلوب حاصل از این دیدگاه می‌باشد.

مدل برنامه‌ریزی خاکستری زیر را در نظر بگیرید:

$$
\begin{aligned}
&maxZ = \otimes Cx\\
&s.t.:\\
&\otimes Ax \geq \otimes b\\
&X \geq 0 \qquad (۳۹)
\end{aligned}
$$

در این مدل برنامه‌ریزی ریاضی خاکستری، پارامتر $\otimes C$ اصطلاحاً بردار سود خاکستری، پارامتر $\otimes A$ بردار ضرایب محدودیت‌های خاکستری، پارامتر $\otimes b$ بردار منابع خاکستری و متغیر X متغیر تصمیم خاکستری نامیده می‌شود.

طبق روش پیشنهادی دنگ و فورست [۱۱] داریم:

$$C = \rho\overline{C} + (1-\rho)\underline{C} \qquad (۴۰)$$

$$b = \beta\overline{b} + (1-\beta)\,\underline{b} \qquad (۴۱)$$

$$a_{ij}=\delta_{ij}\,\overline{a}_{ij}+(1-\delta_{ij})\underline{a}_{ij} \qquad \forall\, i=1,2,\ldots,m;\ j=1,2,\ldots,n$$ (۴۲)

که پارامترهای b،c و a_{ij} به ترتیب معادل قطعی پارامترهای $\otimes C$، $\otimes b$ و $\otimes A$ می‌باشند. همچنین ρ ضریب موقعیت بردار سود، β ضریب موقعیت بردار ضرایب محدودیت‌ها و δ_{ij} ضریب موقعیت بردار منابع می‌باشند. در این پژوهش دو رویکرد خوشبینانه و بدبینانه برای حل مسئله در نظر گرفته شده است. در رویکرد بدبینانه، هدف در نظر گرفتن بدترین حالت در تابع هدف و کوچک کردن فضای جواب مسئله است و برای این منظور برای معادل‌سازی مدل غیرقطعی می‌بایست پارامترهای تابع هدف و مقادیر سمت راست در حد پایین خود و ضرایب محدودیت‌ها را در حد بالای خود قرار داد که در این صورت خواهیم داشت (ρ,β,δ_{ij})= (۰،۰،۱) بنابراین مدل معادل بدبینانه مدل خاکستری به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\max Z=\underline{C}x$$
$$s.t.:$$
$$\underline{A}x\geq\overline{b}$$
$$X\geq 0$$ (۴۳)

به همین ترتیب در رویکرد خوشبینانه پارامترهای سمت راست و تابع هدف بزرگ و ضرایب محدودیت‌ها را کوچک کرده تا با بزرگ کردن فضای جواب در خوشبینانه ترین حالت قرار گیرد و بهترین مقدار برای تابع هدف نیز فرض می‌شود. در این صورت خواهیم داشت (۱،۱،۰) =(ρ,β,δ_{ij}).

در این حالت مدل خاکستری به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\max Z=\underline{C}x$$
$$s.t.:$$
$$\underline{A}x\geq\overline{b}$$
$$X\geq 0$$
$$x\geq x_p^*$$ (۴۴)

در رویکرد بدبینانه، با در نظر گرفتن بدترین سناریوها جواب نهایی مسئله تحت بررسی به دست می‌آید و تصمیم‌گیرندگان با رویکرد محافظه کارانه از این روش استفاده می‌کنند، اما در مقابل، در رویکرد خوشبینانه بهترین سناریوها در رویکردی تهاجمی جهت رسیدن به پاسخ در دستور کار قرار می‌گیرند. در این پژوهش برنامه‌ریزی به گونه‌ای انجام شده است تا نتایج حاصل از حل مدل، در بدترین سناریوها کارا باشد. در ادامه با بهره‌گیری از رویکرد خوشبینانه تلاش شده است نتایج حاصل تا حد امکان با حفظ رویکرد محافظه کارانه بهبود یابد. بنابراین در ابتدا مدل معادل بدبینانه حل شده و سپس با استفاده از نتایج آن مدل معادل خوشبینانه به قرار زیر نوشته و حل می‌شود.

مدل معادل بدبینانه:

$$Min\ Z=\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\underline{w}_{ik}\times f_{ikg}\times U_{ik}+\sum_{h\in H}\sum_{k\in K}\underline{m}_{hk}\times R_{hk}$$ (۴۵)

$$\alpha_i\geq\overline{a}_i \qquad \forall i\in I$$ (۴۶)

$$D_i\geq\alpha_i+\sum_{k\in K}\sum_{g\in G}f_{ikg}\times\overline{T}_{ik} \qquad \forall i\in I$$ (۴۷)

$$\beta_k\geq\overline{b}_k \qquad \forall k\in K$$ (۴۸)

$$\lambda_{ik}\geq\alpha_i+\sum_{\substack{k'\in K\\ \theta_{jk'}\leq\theta_{ik}}}\sum_{g\in G}f_{ik'g}\times\overline{T}_{ik'} \qquad \forall i\in I.k.k'\in K$$ (۴۹)

$$\mu_{ik}\geq\lambda_{ik}+\sum_{j\in J}\sum_{l\in L}\overline{t}_{jl}\times Z_{ijkl}+\sum_{g\in G}f_{ikg}\times\overline{\rho}_{ik} \qquad \forall i\in I.k\in K$$ (۵۰)

$$\sigma_{ik}\geq\sigma_{i'k}+\sum_{g\in G}f_{i'kg}\times\overline{T}_{i'kg}-M\times(1-U_{i'k})-M\times(1-\gamma_{i'ik}) \qquad \forall i,i'\in I.i\neq i'.k\in K$$ (۵۱)

$$M\times U_{ik}\geq\sigma_{ik}+\sum_{g\in G}f_{ikg}\times\overline{T}_{ik}-\overline{d}_k \qquad \forall i\in I.k\in K$$ (۵۲)

$$C_k \leq \overline{d}_k \qquad \forall k \in K \qquad (۵۳)$$

$$C_k \geq \sum_{g\in G} f_{ikg} \times \overline{T}_{ik} + \sigma_{ik} - M \times U_{ik} \qquad \forall i \in I. k \in K \qquad (۵۴)$$

محدودیت‌های (۱) تا (۱۷)، (۱۹)، (۲۲)، (۲۵) تا (۲۸)، (۳۲) و (۳۴) تا (۴۴).

در مدل معادل خوشبینانه هم تمامی پارامترهای درنظر گرفته شده در حالت عدم قطعیت مدل بدبینانه، پارامترهای مربوطه در بهترین حالت تابع هدف قرار گرفته و همچنین پارامترهای سمت راست نیز مقدار بزرگ به خود اختصاص می‌دهند.

۴- مثال کاربردی

در این بخش به منظور بررسی مدل ارائه شده و رویکرد عدم قطعیت یک مثال کاربردی از یک فروشگاه زنجیره‌ای ارائه و حل شده است. در این فروشگاه، ۵ محصول اصلی توسط کامیون‌های ورودی (کامیون‌های ۱ تا ۵) تامین و به وسیله کامیون‌های خروجی (کامیون‌های ۶ تا ۱۰) برای مناطق خرده فروش‌ها و بازارهای ثانویه ارسال می‌گردند. جدول (۱) برخی از پارامترهای مدل را نشان می‌دهد. در جدول (۲) نتایج حاصل از حل مدل نشان داده شده است. مقدار برخی از متغیرهای تصمیم مسئله نیز در جدول (۳) نمایش داده شده است. وجود عدم قطعیت می‌تواند نتایج حاصل از مدل را بهبود بخشد یا نتایج بدتری ارائه دهد. همانطور که از مقادیر مشخص است، مقدار هزینه تاخیر محموله‌ها در حالت عدم قطعیت نسبت به شرایط قطعی کمتر شده است.

جدول(۱): برخی از پارامترهای قطعی مسئله

کامیون ورودی (I)	زمان رسیدن کامیون ورودی (a_i)	کامیون خروجی (K)	زمان رسیدن کامیون خروجی (b_k)	موعد تحویل کامیون خروجی (d_k)
۱	۱	۶	۲۰	۳۱
۲	۵	۷	۳۰	۳۸
۳	۱۱	۸	۳۲	۴۰
۴	۱۵	۹	۳۲	۴۰
۵	۲۲	۱۰	۴۰	۵۰

جدول(۲): نتایج حاصل از حل مدل

مقدار تابع هدف در رویکرد عدم‌قطعیت		**مقدار تابع هدف در حالت قطعی**
حالت خوش‌بینانه	حالت بدبینانه	
۴۶	۷۲.۵	۱۶۹

جدول(۳): مقدار برخی از متغیرهای تصمیم مسئله

کامیون خروجی ۱۰	کامیون خروجی ۹	کامیون خروجی ۸	کامیون خروجی ۷	کامیون خروجی ۶	کامیون ورودی ۵	کامیون ورودی ۴	کامیون ورودی ۳	کامیون ورودی ۲	کامیون ورودی ۱	کامیون‌های ورودی و خروجی متغیرهای تصمیم
–	–	–	–	–	۲۳	۱۵,۸	۱۱,۳	۵	۱	α_i
–	–	–	–	–	۳۱	۲۰,۷	۱۷,۴	۸,۱	۸	D_i
۴۰	۳۴,۸	۳۳,۱	۳۰	۲۰	–	–	–	–	–	β_k
۴۳	۴۴,۸	۳۶,۷	۴۳,۱	۳۰	–	–	–	–	–	c_k

۵- نتیجه و جمع‌بندی

با توجه به اهمیت زمانبندی کامیون‌ها در انبار متقاطع، در این پژوهش به این مسئله با برخی از ملاحظات جدید که در مطالعات گذشته مورد توجه نبوده است؛ پرداخته شد. در این مطالعه، محموله ها پس از تخلیه از کامیون های ورودی به درهای بارانداز حمل می شوند یک مهلت مقرر برای کامیون‌های خروجی در نظر گرفته شده تا قبل از این زمان، کامیون‌ها انبار متقاطع را ترک نمایند. همچنین لجستیک معکوس به منظور فروش

مجدد محصولات بازگردانده شده به انبار متقاطع و به طبع آن افزایش کارایی انبار عبوری بکار گرفته شد. علاوه بر ملاحظه لجستیک معکوس، چند محصولی در نظر گرفتن محصولات ورودی به انبار متقاطع نیز از دیگر توسعه‌های این پژوهش بود. به منظور مواجهه با عدم‌قطعیت مدل با استفاده از یک رویکرد عدم‌قطعیت و با یک مثال کاربردی حل و نتایج ارائه شد. نتایج حاصل از حل مدل در رویکرد عدم‌قطعیت پیشنهادی، بهبود در نتایج را نشان می‌دهد و نتایج مدل را به نتایج حاصل از حالت بهینه نزدیک می‌کند. به منظور پیشنهاد برای مطالعات آینده می‌توان درب‌های انبار متقاطع را به صورت منعطف در نظر گرفت. همچنین درنظر گرفتن سایر موضوعات انبار متقاطع مثل مکان‌یابی، مسیریابی وسایل نقلیه و غیره به بهبود این مدل کمک شایانی خواهند نمود.

۶- مراجع

[1] Mahaboob Sheriff, K. M., Gunasekaran, A., & Nachiappan, S.; “Reverse logistics network design: a review on strategic perspective”, *International Journal of Logistics Systems and Management*, No. *12*(2), pp. 171-194, 2012.

[2] Yu, W., & Egbelu, P. J.; “Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage”, *European journal of operational research*, No. *184*(1), pp. 377-396, 2008.

[3] Boysen, N.; “Truck scheduling at zero-inventory cross docking terminals”, *Computers & Operations Research*, No. *37*(1), pp. 32-41, 2010.

[4] Bozer, Y. A., & Carlo, H. J.; “Optimizing inbound and outbound door assignments in less-than-truckload cross docks”, *IIE Transactions*, No. *40*(11), pp. 1007-1018, 2008.

[5] Vahdani, B., Zandieh, M.; “Scheduling trucks in cross-docking systems: Robust meta-heuristics”, *Computers & Industrial Engineering*, No. *58*(1), pp. 12-24, 2010.

[6] Wisittipanich, W., & Hengmeechai, P.; “Truck scheduling in multi-door cross docking terminal by modified particle swarm optimization”, *Computers & Industrial Engineering*, No. *113*, pp. 793-802, 2017.

[7] Shahmardan, A., & Sajadieh, M. S.; “Truck scheduling in a multi door cross docking center with partial unloading Reinforcement learning-based simulated annealing approaches”, *Computers & Industrial Engineering*, No. *139*, pp. 106-134, 2020.

[8] Kaboudani, Y., Ghodsypour, S. H., Kia, H., & Shahmardan, A.; “Vehicle routing and scheduling in cross docks with forward and reverse logistics”, *Operational Research*, No. *20*(3), pp. 1589-1622, 2020.

[9] Khorshidian, H., Shirazi, M. A., & Ghomi, S. F.; “An intelligent truck scheduling and transportation planning optimization model for product portfolio in a cross-dock”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, No. *30*(1), pp. 163-184, 2019.

[10] Zuluaga, J. P. S., Thiell, M., & Perales, R. C.; “Reverse cross-docking”, *Omega*, No. *66*, pp. 48-57, 2017.

[11] Dang, S. L. Y., & Forrest, J.; “On positioned solution of linear programming with grey parameters”, In *2009 IEEE International Conference on Systems*, pp. 751-756, 2009.