

مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین معکوس چند رده‌ای و حل توسط الگوریتم ترکیبی

عرفان شفیعی رودباری^۱، سید محمد تقی فاطمی قمی^{۲*}، محسن شیخ سجادیه^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲. استاد، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۳. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

خلاصه

با توجه به نگرانی جهانی در خصوص محیط‌زیست، ایجاد زنجیره تأمین معکوس به‌عنوان یک استراتژی مهم در راستای کاهش برداشت از منابع طبیعی شناخته می‌شود. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته خطی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس توسعه یافته است. در این مدل لایه‌های زنجیره به‌صورت چندگانه تعریف شده است. نیز هدف این مدل بیشینه‌سازی درآمد ناشی از فروش محصولات بازیابی شده از فرایندهای استفاده مجدد، بازیابی، بازتولید، بازیافت و فروش قطعات یدکی است. همچنین در نظر گرفتن تنوع محصولات و لیست قطعات هر محصول از جمله ویژگی‌های مدل توسعه داده شده است. برای حل این گونه مسائل نیز الگوریتم ترکیبی بر پایه الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شاخه و کران توسعه یافته است. اعتبارسنجی این الگوریتم با کمک داده‌های تصادفی ایجاد شده در ابعاد مختلف، بررسی شده است. همچنین در انتها، تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به تغییرات پارامترهای کلیدی ارزیابی شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۲۴

پذیرش ۱۳۹۹/۰۲/۱۱

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

طراحی شبکه زنجیره تأمین

لجستیک معکوس

الگوریتم ترکیبی

بازتولید و استفاده مجدد

بازسازی و بازیافت

۱. مقدمه

از جمله تعمیر، دمونتاژ، بازتولید، بازیافت و دفع برخی ماژول‌ها که در راستای حفظ محیط‌زیست است [۱]. در نظر گرفتن حجم کالاهای مرجوعی مشتریان تأثیر زیادی در طراحی شبکه و استراتژی جمع‌آوری دارد [۲]. کیفیت کالاهای بازگشتی در بسیاری از مقالات زنجیره تأمین معکوس ملاحظه می‌شود [۳]. تحقیقات در زمینه زنجیره تأمین معکوس شامل مقالات مروری فراوانی است که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیق گویندان و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۴] اشاره نمود. ایشان تعداد ۸۳ مقاله را به‌صورت دسته‌بندی شده مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آنها نشان می‌دهد که بیشتر مقالات در حوزه تصمیم‌گیری و مدیریتی به این موضوع پرداخته‌اند (۶۰ مقاله از ۸۳ مقاله) و تنها ۲ مقاله از ۸۳ مقاله در زمینه مدل‌سازی ریاضی تحقیق کرده‌اند. نیز سوزا

همواره برای پاسخگویی به تقاضا نیاز به منابع وجود داشته است. با وجود محدودیت منابع در دسترس، با گذر زمان برداشت بیشتر از این منابع ضروری است؛ مگر در حالتی که کالاهای تولید شده در گذشته مجدداً به زنجیره تأمین بازگردد. در صورت ایجاد این شبکه زنجیره تأمین، نیاز به منابع اولیه قابل برداشت کاهش یافته و تأمین آن بر دوش کالاهای مستهلک و بازگشتی به چرخه قرار می‌گیرد.

طراحی این شبکه از سال‌های گذشته به‌عنوان موضوع تحقیقات مطرح شده است. در ادامه به مشخصات شبکه و جزئیات تحقیقات این حوزه پرداخته شده است. نقطه ابتدایی در این شبکه همان نقطه پایانی در زنجیره تأمین مستقیم یعنی مشتری است. محصولات از مشتریان جمع‌آوری می‌شود و عملیات مختلفی روی آن‌ها صورت می‌گیرد؛

* نویسنده مسئول: سید محمد تقی فاطمی قمی

تلفن: ۰۲۱-۶۴۵۴۵۳۸۱-۲۱؛ پست الکترونیکی: fatemi@aut.ac.ir

زنجیره تأمین معکوس را با فرایند بازیافت و در شرایط قطعی بررسی کرده‌اند و سپس توسط روش‌های دقیق پاسخ یک مسئله واقعی را محاسبه کرده‌اند. الشمسی و دیابات [۱۲] با در نظر گرفتن فرایند بازتولید و بازیافت در شبکه زنجیره تأمین معکوس، پاسخ یک مسئله واقعی را توسط روش‌های دقیق محاسبه کرده‌اند.

در سال ۲۰۱۳ [۵] مقالات با محور مشکلات در سطح تصمیم‌های استراتژی و تاکتیکی را بررسی کرده است. سریواستاوا [۶] نیز یک مدل زنجیره تأمین معکوس قطعی با فرایند بازتولید را توسعه داده است. فونسکا و همکاران [۷] مدل زنجیره تأمین معکوس با فرایند بازیافت را در شرایط قطعی بررسی کرده‌اند. گومز و همکاران [۸] نیز شبکه

جدول (۱): مقایسه تحقیقات طراحی شبکه زنجیره تأمین طی ۱۰ سال گذشته (۲۰۰۹-۲۰۱۸)

نویسنده	نوع مدل	نوع شبکه			تنوع تسهیلات			م محصولات		تابع هدف		داده ارزیابی		نوع ابزار
		مستقیم	معکوس	محدود	استفاده	بازیافت	بازتولید	بازیافت	بازتولید	بازتولید	بازتولید	واقعی	تصادفی	
هانفی و همکاران [14]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	گمز
فتاحی و گویندان [15]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	سیپلکس
ژو و همکاران [16]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	لینگو
لیائو [17]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	C++
رحیمی و قضاوتی [18]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	گمز
یو و سلونگ [19]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	لینگو
تحقیق فعلی	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	متلب

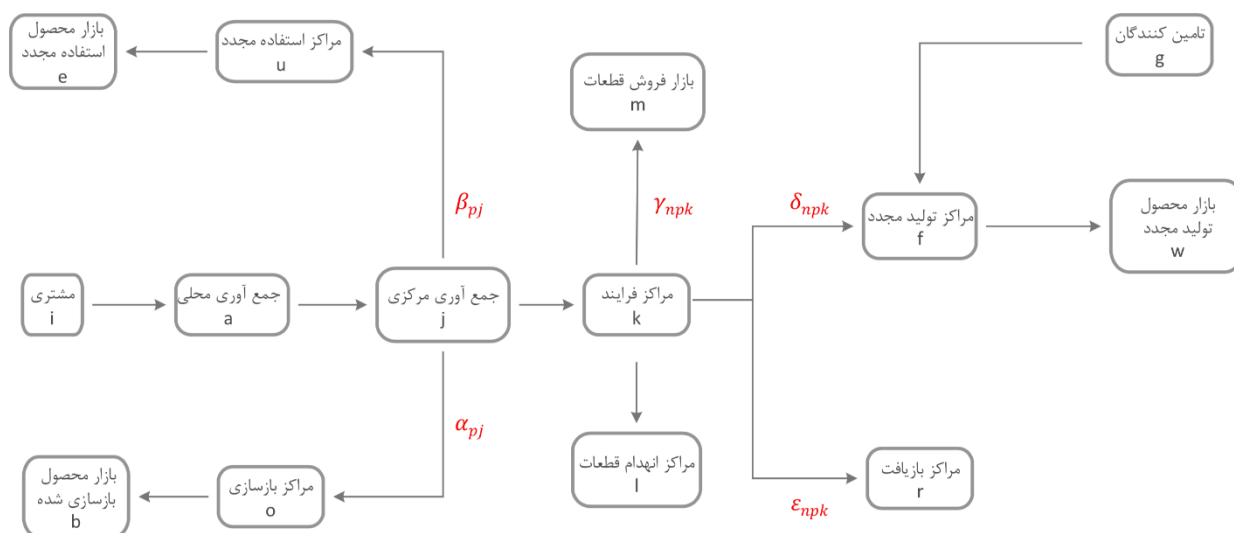
دهد. همچنین به دلیل پیچیدگی محاسبات این گونه مسائل در ابعاد بزرگ، الگوریتم ترکیبی توسعه یافته است تا زمان حل مسائل را کاهش دهد.

۲. شرح مسئله

این مقاله به مدل‌سازی و طراحی شبکه لجستیک معکوس در شرایط قطعی می‌پردازد و کاربرد آن در صناعی است که محصولات قابلیت بازیابی، بازتولید، بازیافت و یا استفاده مجدد دارند؛ از جمله این صنایع می‌توان به صنایع لوازم الکترونیکی مانند تلفن همراه، رایانه و ...، لوازم خانه، صنعت کانتینر و کانکس‌سازی، پوشاک، خودروسازی و بسیاری از صنایع دیگر اشاره نمود. همچنین از ویژگی‌های این مدل می‌توان به چند محصولی و چند رده‌ای بودن با در نظر گرفتن لیست اجزا و قطعات اشاره کرد. شرح جریان شبکه مورد مطالعه در ادامه آورده شده است. در گام اول مشتریان کالای خود را به دلایل مختلف (تغییر تکنولوژی، استهلاک و ...) به جایگاه‌های عمومی تحویل می‌دهند و به ازای آن مبلغی تحت عنوان تشویق به مشتری پرداخت می‌گردد. سپس کالاها با هزینه مشخصی به سمت مراکز جمع‌آوری فرستاده می‌شود و کارشناس وضعیت کیفی کالا را در سه دسته زیر تقسیم‌بندی می‌کند:

۱. کالای در دست با انجام فعالیت‌هایی تحت عنوان بازسازی (پرداخت سطح و نظافت) قابلیت فروش خواهد داشت.
۲. کالا را می‌توان تغییر کاربری داده و نسبت به فروش آن اقدام کرد.
۳. ممکن است کالا شامل قطعات یا ماژول‌های قابل استفاده در فرایند بازتولید و یا بازیافت باشد و به همین دلیل به مرکز بازرسی که شامل باز نمودن کالا و جداسازی قطعات است، انتقال یابد.

در ادامه به بررسی جزئی‌تر مقالات ۱۰ سال اخیر پرداخته شده است. آلامور و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۹] با ارائه یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای زنجیره تأمین معکوس در شرایط قطعی چند محصولی و در نظر گرفتن فرایند بازتولید و بازیافت اقدام به حل دقیق مسئله‌ای کرده‌اند. فهیم‌نیا و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۰] یک مدل چند محصولی با جایگاه بازیافت و هدف کمینه‌سازی هزینه را مورد بررسی قرار داده‌اند. ایواز و بولات در سال ۲۰۱۴ [۱۱] دو مدل در شرایط قطعی و غیر قطعی را بررسی کرده‌اند و نتایج را با روش دقیق گزارش داده‌اند. بی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۳] مدل غیرقطعی را در یک زنجیره تأمین بسته (رفت و برگشت) توسعه داده و با در نظر گرفتن شرایط تک‌محصولی، مسئله را توسط الگوریتم فراابتکاری حل کرده‌اند. لیائو سال ۲۰۱۸ [۱۷] با در نظر گرفتن فرایند بازتولید، بازیافت و تعمیر در شرایط قطعی و چند محصولی، یک مسئله با اندازه کوچک را با الگوریتم ترکیبی حل کرده است. در نهایت برخی از مقالاتی که طی پنج سال گذشته منتشر شده‌اند مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و نتایج به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. از جدول یک و سایر مقالات بررسی شده می‌توان نتیجه گرفت که تاکنون تمامی تسهیلات ذکر شده در یک شبکه زنجیره تأمین معکوس به صورت همزمان مورد بررسی قرار نگرفته است. این خلا در حالی وجود دارد که امروزه به دلیل سرعت بالای تغییرات تکنولوژی، بسیاری از لوازم و کالاهای استفاده شده در کشورهای پیشرفته برای استفاده مجدد و بازسازی در کشورهای ضعیف‌تر به کار گرفته می‌شود. از این رو این تحقیق قصد دارد با بررسی همزمان تسهیلات استفاده مجدد، بازسازی، بازتولید و بازیافت، مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس توسعه



شکل (۱): مثالی از جریان شبکه در زنجیره تأمین معکوس (تعریف اندیس و پارامترها در ادامه آورده شده است).

اندیس‌های مدل:

$i=1, \dots, I$	اندیس مشتریان	i
$a=1, \dots, A$	اندیس جایگاه‌های جمع‌آوری محلی	a
$j=1, \dots, J$	اندیس جایگاه‌های جمع‌آوری مرکزی	j
$k=1, \dots, K$	اندیس مراکز فرایند	k
$o=1, \dots, O$	اندیس مراکز بازسازی	o
$r=1, \dots, R$	اندیس مراکز بازبافت	r
$f=1, \dots, F$	اندیس مراکز تولید مجدد	f
$u=1, \dots, U$	اندیس مراکز استفاده مجدد	u
$l=1, \dots, L$	اندیس مراکز دفن مازول‌ها	l
$m=1, \dots, M$	اندیس بازارهای فروش مازول‌های یدکی	m
$b=1, \dots, B$	اندیس بازارهای فروش محصول بازسازی شده	b
$w=1, \dots, W$	اندیس بازارهای فروش محصول تولید مجدد شده	w
$e=1, \dots, E$	اندیس بازارهای فروش محصول استفاده مجدد	e
$g=1, \dots, G$	اندیس تأمین‌کنندگان	g
$p=1, \dots, P$	اندیس محصولات	p
$n=1, \dots, N$	اندیس مازول‌ها (اجزای محصولات)	n

پارامترهای مدل:

F_a	هزینه ثابت جایگاه‌های جمع‌آوری محلی
F_j	هزینه ثابت جایگاه‌های جمع‌آوری مرکزی
F_k	هزینه ثابت مراکز فرایند
F_o	هزینه ثابت مراکز بازسازی
F_f	هزینه ثابت مراکز تولید مجدد
F_u	هزینه ثابت مراکز استفاده مجدد
T_{pia}	هزینه حمل محصول p از مشتری i به جایگاه جمع‌آوری محلی a
T_{paj}	هزینه حمل محصول p از جایگاه جمع‌آوری محلی a به جایگاه جمع‌آوری مرکزی j

حال در صورتی که حالت شماره ۳ رخ دهد پس از بازرسی چهار حالت ذیل احتمال وقوع دارند:

۴-۱. بخشی از کالا سالم است و قابلیت بازتولید دارد و سپس قابل فروش است.

۴-۲. کالا قابلیت بازبافت دارد.

۴-۳. کالا بایستی منهدم شود.

۴-۴. مازول‌هایی (قطعاتی) از کالای دمونتاز شده را می‌توان در بازار یدکی به فروش رساند.

۲-۱. معرفی اجزا مدل

مفروضات زیر برای مدل سازی در نظر گرفته شده است:

۱. جایگاه عمومی برای جمع‌آوری، تشویق مشتریان و ایجاد سهولت دسترسی برای بازگرداندن کالا است.

۲. جایگاه متمرکز برای جمع‌آوری، تجمیع کالاهای بازگشتی از چند جایگاه عمومی و تعیین وضعیت کالا برای سه حالت مختلف استفاده مجدد، بازسازی و یا ارسال به مرکز فرایند است.

۱. مجموعه نقاط بالقوه تمامی مراکز، مشخص است، به‌عبارت‌دیگر مکانیابی بین این نقاط انجام می‌شود.

۲. فرایند استفاده مجدد برای تغییر کاربری محصول است. این کار به‌دلیل عدم توجیه اقتصادی فرایندهای بازتولید، بازبافت و یا بازسازی صورت می‌گیرد.

۳. ظرفیت تسهیلات و عرضه کالاها توسط مشتریان قطعی و مشخص است.

۴. محصولات خروجی از زنجیره معکوس، به‌صورت کامل فروخته خواهد شد.

۵. حداقل یک مرکز جمع‌آوری محلی در حداکثر فاصله مجاز مشتری تا مرکز قرار دارد.

اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل مسئله در ادامه معرفی شده‌اند.

T_{pjk}	هزینه حمل محصول p از جایگاه جمع‌آوری مرکزی z به مرکز فرایند k	D_{max}	بیشینه فاصله مجاز میان مشتری و جایگاه جمع‌آوری عمومی
T_{pjo}	هزینه حمل محصول p از جایگاه جمع‌آوری مرکزی z به مرکز بازسازی o	α_{pj}	درصد جریان محصول p از جایگاه جمع‌آوری مرکزی به مراکز بازسازی
T_{pju}	هزینه حمل محصول p از جایگاه جمع‌آوری مرکزی z به مرکز استفاده مجدد u	β_{pj}	درصد جریان محصول p از جایگاه جمع‌آوری مرکزی به مراکز استفاده مجدد
T_{pob}	هزینه حمل محصول p از مرکز بازسازی o به بازار فروش محصولات بازسازی شده b	γ_{npk}	درصد جریان ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به بازار ماژول‌های یدکی
T_{pue}	هزینه حمل محصول p از مرکز استفاده مجدد u به بازار فروش محصولات استفاده مجدد e	δ_{npk}	درصد جریان ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به مرکز تولید مجدد
T_{npkm}	هزینه حمل ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به بازار فروش ماژول‌های یدکی m	ϵ_{npk}	درصد جریان ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به مرکز بازیافت
T_{npkl}	هزینه حمل ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به مرکز دفن ماژول‌ها l	V_p	حجم واحد محصول p
T_{npkr}	هزینه حمل ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به مرکز بازیافت r	V_{np}	حجم واحد ماژول n محصول p
T_{npkf}	هزینه حمل ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به مرکز تولید مجدد f	M	عددی بزرگ
T_{npf}^g	هزینه حمل ماژول n محصول p از تأمین‌کننده g به مرکز تولید مجدد f	M_{np}	تعداد ماژول n محصول p
T_{pfw}	هزینه حمل محصول p از مرکز تولید f به بازار فروش محصول تولید مجدد شده w	\bar{S}_x	حداکثر ظرفیت تسهیلات $x(x=a,j,k,o,u,f)$
P_{pb}	قیمت واحد محصول p در بازار فروش محصول بازسازی شده b	\underline{S}_x	حداقل ظرفیت تسهیلات $x(x=a,j,k,o,u,f)$
P_{pe}	قیمت واحد محصول p در بازار فروش محصول استفاده مجدد e	متغیرهای تصمیم:	
P_{npm}	قیمت واحد ماژول n محصول p در بازار فروش ماژول‌های یدکی m	Y_x	متغیر باینری؛ در صورت فعال بودن تسهیلات a, j, k, o, u عدد ۱ و در غیر این صورت ۰
P_{npr}	قیمت واحد ماژول n محصول p در مرکز بازیافت r	Y_{ia}	متغیر باینری؛ در صورت فعال بودن ارتباط بین مشتری i و جایگاه محلی a، عدد ۱ و در غیر این صورت ۰
P_{pw}	قیمت واحد محصول p در بازار فروش محصول تولید مجدد شده w	Q_{pia}	میزان جریان محصول p از مشتری i به جایگاه جمع‌آوری محلی a
UC_p	هزینه خرید محصول p از مشتریان	Q_{paj}	میزان جریان محصول p از جایگاه جمع‌آوری محلی a به جایگاه جمع‌آوری مرکزی j
HC_{pj}	هزینه رسیدگی به محصول p در جایگاه جمع‌آوری مرکزی j	Q_{pjo}	میزان جریان محصول p از جایگاه جمع‌آوری مرکزی z به مرکز بازسازی o
HC_{pk}	هزینه رسیدگی به محصول p در مرکز فرایند k	Q_{pjk}	میزان جریان محصول p از جایگاه جمع‌آوری مرکزی z به مرکز فرایند k
HC_{npl}	هزینه رسیدگی به ماژول n محصول p در مرکز دفن ماژول‌ها l	Q_{pju}	میزان جریان محصول p از جایگاه جمع‌آوری مرکزی z به مرکز استفاده مجدد u
MC_{po}	هزینه بازسازی محصول p در مرکز بازسازی o	RQ_{pob}	میزان جریان محصول p از مرکز بازسازی o به بازار فروش محصول بازسازی شده b
MC_{pu}	هزینه استفاده مجدد محصول p در مرکز استفاده مجدد u	RQ_{pue}	میزان جریان محصول p از مرکز استفاده مجدد u به بازار فروش محصول استفاده مجدد e
MC_{pf}	هزینه ساخت مجدد محصول p در مرکز تولید مجدد f	$NQ_{npj k}$	میزان جریان ماژول n محصول p از جایگاه جمع‌آوری مرکزی z به مرکز فرایند k
GC_{npf}^g	هزینه خرید واحد ماژول n محصول p از تأمین‌کننده g برای مرکز تولید مجدد f	NQ_{npkm}	میزان جریان ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به بازار فروش ماژول‌های یدکی m
Q_{pi}	میزان محصول بازگشتی p توسط مشتری i	NQ_{npkr}	میزان جریان ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به مرکز بازیافت r
D_{ia}	فاصله مشتری i از جایگاه جمع‌آوری محلی a		

$$FC = \sum_a F_a Y_a + \sum_j F_j Y_j + \sum_o F_o Y_o + \sum_u F_u Y_u + \sum_k F_k Y_k + \sum_f F_f Y_f \quad (7)$$

$$CC = \sum_p \sum_i \sum_a UC_p Q_{pia} \quad (8)$$

$$TRC = \sum_p \sum_i \sum_a T_{pia} Q_{pia} + \sum_p \sum_a \sum_j T_{paj} Q_{paj} + \sum_p \sum_j \sum_o T_{pjo} Q_{pjo} + \sum_p \sum_j \sum_u T_{pju} Q_{pju} + \sum_p \sum_j \sum_k T_{pjk} Q_{pjk} + \sum_p \sum_o \sum_b T_{pob} RQ_{pob} + \sum_p \sum_u \sum_e T_{pue} RQ_{pue} + \sum_n \sum_p \sum_k \sum_l T_{npkl} NQ_{npkl} + \sum_n \sum_p \sum_k \sum_m T_{npkm} NQ_{npkm} + \sum_n \sum_p \sum_k \sum_f T_{npkf} NQ_{npkf} + \sum_n \sum_p \sum_k \sum_r T_{npkr} NQ_{npkr} + \sum_n \sum_p \sum_g \sum_f T_{npf}^g GQ_{npf}^g + \sum_p \sum_f \sum_w T_{pfw} MQ_{pfw}$$

$$HC = \sum_p \sum_a \sum_j HC_{pj} Q_{paj} + \sum_p \sum_j \sum_k HC_{pk} Q_{pjk} + \sum_n \sum_p \sum_k \sum_l HC_{npl} NQ_{npkl} \quad (9)$$

$$RC = \sum_p \sum_j \sum_o MC_{po} Q_{pjo} \quad (10)$$

$$UC = \sum_p \sum_j \sum_u MC_{pu} Q_{pju} \quad (11)$$

$$RMC = \sum_p \sum_f MC_{pf} FQ_{pff} \quad (12)$$

$$GC = \sum_n \sum_p \sum_f \sum_g GC_{npf}^g GQ_{npf}^g \quad (13)$$

$$GC = \sum_n \sum_p \sum_f \sum_g GC_{npf}^g GQ_{npf}^g \quad (14)$$

NQ_{npkf} میزان جریان ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به مرکز تولید مجدد f

NQ_{npkl} میزان جریان ماژول n محصول p از مرکز فرایند k به مرکز دفن ماژولها l

FQ_{pff} تعداد محصول p تولید مجدد شده در مرکز تولید مجدد f

MQ_{pffw} میزان جریان محصول p از مرکز تولید مجدد f به بازار فروش محصول تولید مجدد شده w

GQ_{npf}^g میزان ماژول n محصول p دریافت شده از تأمین‌کننده g توسط تولید مجدد کننده f

Z_{npf} متغیر صفر و یک کمکی خطی سازی محدودیت غیر خطی

U_{pff} متغیر کمکی خطی سازی محدودیت غیر خطی

۲-۲. مدل طراحی شبکه

با توجه به اندیس، پارامتر و متغیرهای تصمیم تعریف شده در بخش قبل، در ادامه حل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته شبکه زنجیره‌تأمین معکوس آورده شده است. از ویژگی‌های این مدل در نظر گرفتن تسهیلات بازیابی، استفاده مجدد، بازیافت و بازتولید و پارامتر کیفیت محصول بازگشتی به شبکه است. ضمناً هدف مدل حداکثرسازی سود است.

"سود" ذکر شده در تابع هدف، تفاضل درآمد (جریان مالی مثبت) و هزینه‌های شبکه زنجیره‌تأمین (جریان مالی منفی) است.

- جریان‌های مالی مثبت: درآمد حاصل از فروش کالاهای بازیابی، بازتولید، استفاده مجدد، بازیافت و بازار ماژول‌های یدکی
- جریان‌های مالی منفی: هزینه ثابت احداث مراکز، هزینه حمل و نقل بین مراکز، هزینه خرید کالای بازگشتی، هزینه خرید ماژول‌های مورد نیاز برای بازتولید، هزینه فرایند مراکز، هزینه دفع ماژول‌های غیرقابل‌استفاده نیز توضیح لازم برای هر کدام از بخش‌های تابع هدف و محدودیت‌ها بعد از مدل آورده شده است.

$$Max TP = RFP + RUP + MP + RCP + RMP - (FC + CC + TRC + HC + RC + UC + RMC + GC) \quad (1)$$

$$RFP = \sum_p \sum_o \sum_b P_{pb} RQ_{pob} \quad (2)$$

$$RUP = \sum_p \sum_u \sum_e P_{pe} RQ_{pue} \quad (3)$$

$$MP = \sum_n \sum_p \sum_k \sum_m P_{npm} NQ_{npkm} \quad (4)$$

$$RCP = \sum_n \sum_p \sum_k \sum_r P_{npr} NQ_{npkr} \quad (5)$$

$$RMP = \sum_p \sum_f \sum_w P_{pww} MQ_{pffw} \quad (6)$$

$U_{pf} \leq \frac{\sum_k NQ_{npkf}}{M_{np}} + M * Z_{npf} \quad \forall n, p, f \quad (۲-۳۰)$ $\sum_n Z_{npf} \leq N - 1 \quad \forall p, f \quad (۳-۳۰)$ $FQ_{pf} = U_{pf} \quad \forall p, f \quad (۴-۳۰)$ $\sum_g GQ_{npf}^g = \max \left\{ FQ_{pf} \times M_{np} - \sum_k NQ_{npkf}, 0 \right\} \quad \forall n, p, f \quad (۳۱)$ $\sum_g GQ_{npf}^g \geq FQ_{pf} \times M_{np} - \sum_k NQ_{npkf} \quad \forall n, p, f \quad (۱-۳۱)$ $FQ_{pf} \geq \sum_w MQ_{pfw} \quad \forall p, f \quad (۳۲)$ $\underline{S}_a Y_a \leq \sum_p \sum_i Q_{pia} V_p \leq \bar{S}_a Y_a \quad \forall a \quad (۳۳)$ $\underline{S}_j Y_j \leq \sum_p \sum_a Q_{paj} V_p \leq \bar{S}_j Y_j \quad \forall j \quad (۳۴)$ $\underline{S}_o Y_o \leq \sum_p \sum_j Q_{pjo} V_p \leq \bar{S}_o Y_o \quad \forall o \quad (۳۵)$ $\underline{S}_u Y_u \leq \sum_p \sum_j Q_{pju} V_p \leq \bar{S}_u Y_u \quad \forall u \quad (۳۶)$ $\underline{S}_k Y_k \leq \sum_p \sum_j Q_{pjk} V_p \leq \bar{S}_k Y_k \quad \forall k \quad (۳۷)$ $\underline{S}_f Y_f \leq \sum_n \sum_p \sum_k NQ_{npkf} V_{np} + \sum_p FQ_{pff} V_p \leq \bar{S}_f Y_f \quad \forall f \quad (۳۸)$ $Y_a, Y_j, Y_o, Y_u, Y_k, Y_f, Y_{ia}, Z_{npf} \in \{0,1\} \quad \forall a, j, o, u, \quad (۳۹)$	<p style="text-align: right;">محدودیت‌های مدل:</p> $\sum_a Y_{ia} = 1 \quad \forall i \quad (۱۵)$ $\sum_i Y_{ia} \leq MY_a \quad \forall a \quad (۱۶)$ $D_{ia} Y_{ia} \leq D_{Max} \quad \forall i, a \quad (۱۷)$ $\sum_i \sum_a Q_{pi} Y_{ia} = \sum_i \sum_a Q_{pia} \quad \forall p \quad (۱۸)$ $\sum_i Q_{pia} = \sum_j Q_{paj} \quad \forall p, a \quad (۱۹)$ $\sum_o Q_{pjo} = \alpha_{pj} \sum_a Q_{paj} \quad \forall p, j \quad (۲۰)$ $\sum_j \sum_o Q_{pjo} = \sum_o \sum_b RQ_{pob} \quad \forall p \quad (۲۱)$ $\sum_u Q_{pju} = \beta_{pj} \sum_a Q_{paj} \quad \forall p, j \quad (۲۲)$ $\sum_j \sum_u Q_{pju} = \sum_u \sum_e RQ_{pue} \quad \forall p \quad (۲۳)$ $\sum_k Q_{pjk} = (1 - \alpha_{pj} - \beta_{pj}) \sum_a Q_{paj} \quad \forall p, j \quad (۲۴)$ $NQ_{npj} = M_{np} Q_{pjk} \quad \forall n, p, j, k \quad (۲۵)$ $\sum_f NQ_{npkf} = \delta_{npk} \sum_j NQ_{npj} \quad \forall n, p, k \quad (۲۶)$ $\sum_r NQ_{npkr} = \varepsilon_{npk} \sum_j NQ_{npj} \quad \forall n, p, k \quad (۲۷)$ $\sum_m NQ_{npkm} = \gamma_{npk} \sum_j NQ_{npj} \quad \forall n, p, k \quad (۲۸)$ $\sum_l NQ_{npkl} = (1 - \delta_{npk} - \varepsilon_{npk} - \gamma_{npk}) \sum_j NQ_{npj} \quad \forall n, p, k \quad (۲۹)$ $FQ_{pf} = \max_n \left\{ \frac{\sum_k NQ_{npkf}}{M_{np}} \right\} \quad \forall p, f \quad (۳۰)$ $U_{pf} \geq \frac{\sum_k NQ_{npkf}}{M_{np}} \quad \forall n, p, f \quad (۱-۳۰)$
---	---

شرح اجزای تابع هدف و محدودیت‌های مدل:

- (۱) تابع هدف مسئله؛ حداکثر سود (تفاضل درآمدها از هزینه‌ها)
- (۲) درآمد ناشی از فروش محصول بازسازی شده

- (۳) درآمد ناشی از فروش محصول استفاده مجدد
- (۴) درآمد ناشی از فروش ماژول‌ها در بازار ماژول‌های یدکی
- (۵) درآمد ناشی از فروش ماژول‌ها در مرکز بازیافت
- (۶) درآمد ناشی از فروش محصول تولید مجدد شده
- (۷) هزینه ثابت مراکز احداث شده
- (۸) هزینه خرید محصولات از مشتریان
- (۹) هزینه حمل‌ونقل محصولات و ماژول‌ها میان مراکز مختلف
- (۱۰) هزینه رسیدگی به محصولات و ماژول‌ها در جایگاه‌های جمع‌آوری مرکزی، مراکز فرآیند و مراکز دفن ماژول‌ها
- (۱۱) هزینه بازسازی محصولات در مراکز بازسازی
- (۱۲) هزینه استفاده مجدد از محصولات در مراکز استفاده مجدد
- (۱۳) هزینه تولید مجدد محصولات در مراکز تولید مجدد
- (۱۴) هزینه خرید ماژول‌های مورد نیاز از تامین کنندگان
- (۱۵) هر مشتری اجازه ارتباط با تنها یک جایگاه جمع‌آوری عمومی دارد.
- (۱۶) برقراری ارتباط میان مشتری و جایگاه جمع‌آوری عمومی به شرط احداث جایگاه جمع‌آوری عمومی است.
- (۱۷) برقراری ارتباط میان مشتری و جایگاه جمع‌آوری عمومی به شرط رعایت حداقل فاصله مجاز است.
- (۱۸) برقراری معادله جریان میان مشتری و جایگاه جمع‌آوری عمومی
- (۱۹) برقراری معادله جریان میان جایگاه جمع‌آوری عمومی و جایگاه جمع‌آوری مرکزی
- (۲۰) برقراری معادله جریان میان جایگاه جمع‌آوری مرکزی و مرکز بازسازی
- (۲۱) برقراری معادله جریان میان مرکز بازسازی و بازار فروش محصول بازسازی شده
- (۲۲) نشان‌دهنده جریان از جایگاه جمع‌آوری مرکزی به مرکز استفاده مجدد است.
- (۲۳) نشان‌دهنده جریان از مرکز استفاده مجدد به بازار فروش محصول استفاده مجدد است.
- (۲۴) برقراری معادله جریان میان جایگاه جمع‌آوری مرکزی و مرکز فرآیند
- (۲۵) تعیین تعداد ماژول‌های هر محصول دمونتاژ شده در مرکز فرآیند
- (۲۶) شرط معادله جریان میان مرکز فرآیند و مرکز تولید مجدد
- (۲۷) شرط معادله جریان میان مرکز فرآیند و مرکز بازیافت
- (۲۸) شرط معادله جریان میان مرکز فرآیند و بازار فروش ماژول‌های یدکی
- (۲۹) شرط معادله جریان میان مرکز فرآیند و مرکز دفن ماژول‌ها
- (۳۰) بیشترین تعداد محصول قابل تولید مجدد که با توجه به ماژول‌های سالم بازگشتی مراکز فرآیند محاسبه می‌شود.
- (۱-۳۰) خطی‌سازی محدودیت ۳۰
- (۲-۳۰) خطی‌سازی محدودیت ۳۰
- (۳-۳۰) خطی‌سازی محدودیت ۳۰
- (۳۱) تعداد سفارش ماژول از تأمین‌کنندگان برابر کسری ماژول برای تولید مجدد است.
- (۱-۳۱) خطی‌سازی محدودیت ۳۱
- (۳۲) محصولات تولید مجدد ارسال شده به بازار فروش، کوچک‌تر مساوی میزان محصولات تولید مجدد شده است.
- (۳۳) موجودی محصولات در مرکز جمع‌آوری محلی بین حداقل و حداکثر ظرفیت آن باید باشد.
- (۳۴) موجودی محصولات در مرکز جمع‌آوری مرکزی بین حداقل و حداکثر ظرفیت آن باید باشد.
- (۳۵) موجودی محصولات در مرکز بازسازی بین حداقل و حداکثر ظرفیت آن باید باشد.
- (۳۶) موجودی محصولات در مرکز استفاده مجدد بین حداقل و حداکثر ظرفیت آن باید باشد.
- (۳۷) موجودی محصولات در مرکز فرآیند بین حداقل و حداکثر ظرفیت آن باید باشد.
- (۳۸) موجودی محصولات در مرکز تولید مجدد بین حداقل و حداکثر ظرفیت آن باید باشد.
- (۳۹) تعریف بازه متغیرهای تصمیم‌باینری
- (۴۰) تعریف بازه سایر متغیرهای تصمیم

۳. حل مدل

حال پس از توسعه مدل برنامه‌ریزی می‌بایست مدل توسط داده‌ها و پارامترهای تصادفی ارزیابی شود. ابتدا مدل در نرم‌افزار سیپلکس نسخه ۱۲٫۶ کد شد تا پاسخ به‌صورت دقیق ارزیابی شود. اما با توجه به پیچیده بودن محاسبات در مقیاس‌های بزرگ، امکان به‌دست آوردن جواب بهینه در زمان کوتاه وجود ندارد. از این رو از الگوریتم ترکیبی استفاده شده است که جواب مناسب ارائه می‌دهد. توضیحات تکمیلی در بخش ۳-۳ آورده شده است.

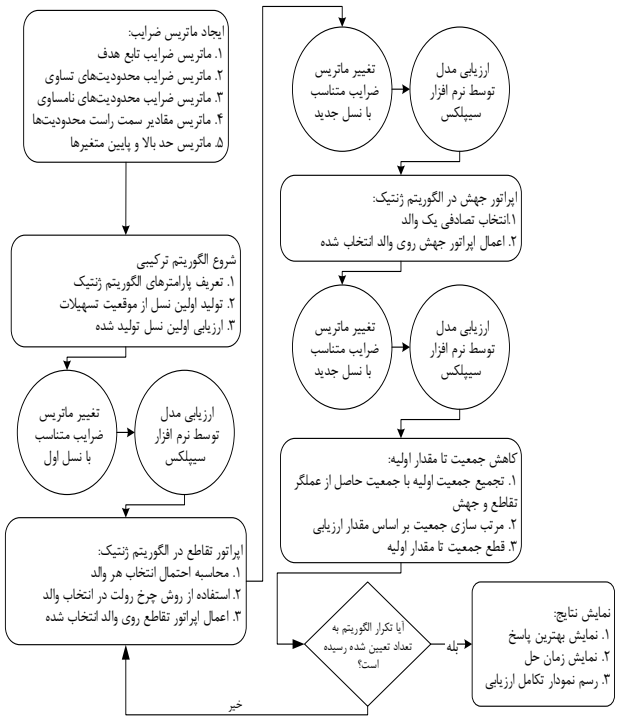
۳-۱. مقداردهی پارامترها

حل مدل به روش دقیق و الگوریتم ترکیبی نیازمند ایجاد داده تصادفی برای مسئله است. از این رو جدول ۲ به‌عنوان مبنای ارزیابی ارائه شده است. قابل‌ذکر است اعداد تصادفی با استفاده از توزیع یکنواخت در بازه مشخص شده ایجاد شده است. داده‌های جدول یاد شده با توجه به تعداد اندیس‌های مشخص هر مسئله توسط نرم‌افزار اکسل تولید شده و به‌عنوان ورودی ابتدا در نرم‌افزار سیپلکس و سپس در نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

۳-۲. حل دقیق

نرم‌افزارهای متنوعی به صورت تجاری برای حل مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود. از میان این نرم‌افزارها، برنامه سیپلکس نسخه ۱۲٫۶ به عنوان حل مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته انتخاب شده

کاهش یافته است.



شکل (۳): جزئیات الگوریتم ترکیبی

۵. تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت مدل با هدف تغییر یکی از پارامترهای ورودی و بررسی تاثیر آن روی تابع هدف انجام می‌شود. همانگونه که در بخش مقدمه ذکر شد، میزان جریان ورودی شبکه و کیفیت کالاهای بازگشتی تاثیر زیادی روی سود آوری زنجیره تأمین معکوس دارد. شکل‌های ۴ و ۵ نتایج تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به تغییر پارامترهای میزان جریان بازگشتی و نرخ بازتولید است. از شکل ۵ دریافت می‌شود که تابع هدف نسبت به کیفیت کالای بازگشتی حساسیت بالایی دارد.

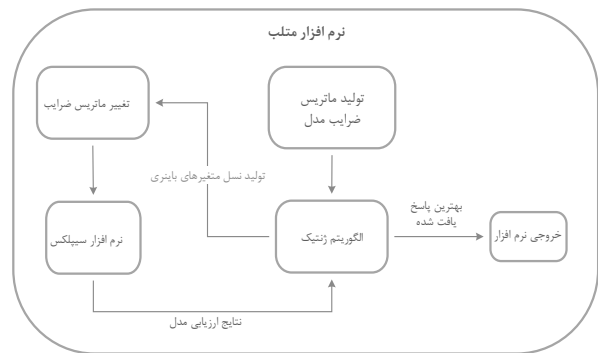
۵-۱. توصیه‌های مدیریتی

طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس جزء تصمیم‌های استراتژیک مدیران است؛ از این رو توسعه مدل با در نظر گرفتن جزئیات مسائل دنیای واقعی می‌تواند به دقتی بودن تصمیم نهایی کمک کند. به همین دلیل سعی شده تا مدل پیشنهادی با پوشش طیف وسیعی از تسهیلات و جزئیات در پارامترها بتواند موجب تصمیم‌گیری مؤثر شود. ضمن اینکه توجه به کاهش زمان حل از دیگر نوآوری‌های تحقیق بوده و امکان بررسی سناریوهای مختلف در زمان قابل قبول وجود دارد. برای مثال، حل دقیق این مسائل برای سناریوهای مختلف با پارامترها متنوع می‌تواند زمان بسیار زیادی را مشغول خود کند درحالی‌که الگوریتم ارائه شده قابلیت کاهش زمان تا ۱۰٪ زمان مورد نیاز روش دقیق را دارد.

است. نظر به اینکه این نرم‌افزار قادر به حل مدل‌های غیرخطی نیست، محدودیت‌های غیرخطی شماره ۳۰ و ۳۱ مدل بخش ۲-۲ با محدودیت‌های ۱-۳۰، ۲-۳۰، ۳-۳۰ و ۴-۳۰ و محدودیت ۱-۳۱ جابه‌جا شده‌اند. در جدول ۳ نتایج روش حل دقیق مسئله در ابعاد مختلف مشخص شده است. آشکار است که روش دقیق می‌تواند مسائل اندازه کوچک را به خوبی حل کند اما برای مسائل دنیای واقعی (مقیاس بزرگ) توانایی خوبی ندارد. به همین دلیل از الگوریتم ترکیبی برای کاهش زمان رسیدن به پاسخ استفاده شده است.

۳-۳. الگوریتم ترکیبی

این مقاله از الگوریتم ترکیبی استفاده می‌کند تا مسائل در ابعاد مختلف را حل کند. در این تحقیق با فراخوانی نرم‌افزار سیپلکس در نرم‌افزار متلب شرایط پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک فراهم شده است. شکل ۲ فرایند حل این الگوریتم را به صورت خلاصه نشان می‌دهد. نکته قابل توجه آن است که مطابق این شکل، تعیین متغیرهای باینری مکانیابی در الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود و متغیرهای تخصیص و متغیرهای پیوسته در نرم‌افزار سیپلکس محاسبه می‌شود.



شکل (۲): فرایند حل مسئله با الگوریتم ترکیبی

الگوریتم ژنتیک استفاده شده نسل اولیه را توسط اعداد تصادفی تولید کرده و سپس در تکرارهای مختلف عملگرهای جهش و تقاطع با نرخ‌های مشخص عمل می‌کنند. قابل ذکر است عملگر تقاطع با توزیع یکنواخت بین تقاطع یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و چند نقطه‌ای جابه‌جا می‌شود. جزئیات گام‌های الگوریتم ترکیبی در شکل (۳) آورده شده است.

۳-۴ نتایج ارزیابی

در این بخش مقایسه میان روش حل دقیق و الگوریتم ترکیبی انجام می‌شود. قابل ذکر است که ابعاد مسئله و داده‌ها برای روش دقیق و الگوریتم ترکیبی یکسان هستند. (جدول ۳ ردیف‌های ۴، ۵ و ۶ را ملاحظه کنید). نتایج در جدول ۴ آمده است. نیز این جدول درصد خطای پاسخ دقیق نسبت به پاسخ ترکیبی را ارائه می‌دهد. در جدول، زمان حل هر یک از روش‌ها نیز گزارش شده است که نشان می‌دهد با وجود خطای کم الگوریتم ترکیبی، زمان حل به میزان قابل توجهی

جدول (۲): اعداد تصادفی مورد استفاده در حل مدل

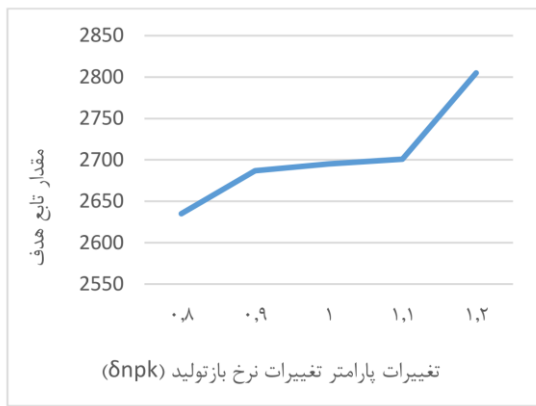
پارامتر	بازه تغییرات	پارامتر	بازه تغییرات	پارامتر	بازه تغییرات
F_a	یکنواخت: (۷۰۰-۶۰۰)	T_{npf}^g	یکنواخت: (۲-۰)	D_{max}	عدد ثابت: ۱۵
F_j	یکنواخت: (۸۵۰-۸۰۰)	T_{pfw}	یکنواخت: (۲-۰)	α_{pj}	یکنواخت: (۰,۱۵-۰,۱)
F_k	یکنواخت: (۱۰۰۰-۹۰۰)	P_{pb}	یکنواخت: (۱۵-۱۰)	β_{pj}	یکنواخت: (۰,۲-۰,۱)
F_o	یکنواخت: (۷۵۰-۷۰۰)	P_{pe}	یکنواخت: (۲۰-۱۵)	γ_{npk}	یکنواخت: (۰,۳۵-۰,۳)
F_f	یکنواخت: (۱۳۰۰-۱۲۰۰)	P_{npm}	یکنواخت: (۶-۱)	δ_{npk}	یکنواخت: (۰,۲۵-۰,۲)
F_u	یکنواخت: (۶۵۰-۶۰۰)	P_{npr}	یکنواخت: (۴-۰)	ϵ_{npk}	یکنواخت: (۰,۰۵-۰)
T_{pia}	یکنواخت: (۲-۰)	P_{pw}	یکنواخت: (۲۵-۲۰)	V_p	یکنواخت: (۰,۵-۰)
T_{paj}	یکنواخت: (۲-۰)	UC_p	یکنواخت: (۱۰-۵)	V_{np}	یکنواخت: (۰,۲۵-۰)
T_{pjk}	یکنواخت: (۲-۰)	HC_{pj}	یکنواخت: (۴-۱)	M	عدد ثابت: ۱۰۰۰
T_{pjo}	یکنواخت: (۲-۰)	HC_{pk}	یکنواخت: (۵-۲)	M_{np}	یکنواخت: (۴-۱)
T_{pju}	یکنواخت: (۲-۰)	HC_{npl}	یکنواخت: (۲-۰)	\bar{S}_a	یکنواخت: (۶۰۰-۵۰۰)
T_{pob}	یکنواخت: (۲-۰)	MC_{po}	یکنواخت: (۴-۱)	\bar{S}_j	یکنواخت: (۸۰۰-۷۰۰)
T_{pue}	یکنواخت: (۲-۰)	MC_{pu}	یکنواخت: (۶-۳)	\bar{S}_k	یکنواخت: (۸۰۰-۷۰۰)
T_{npkm}	یکنواخت: (۲-۰)	MC_{pf}	یکنواخت: (۷-۴)	\bar{S}_o	یکنواخت: (۸۰۰-۷۰۰)
T_{npkl}	یکنواخت: (۲-۰)	GC_{npf}^g	یکنواخت: (۴-۲)	\bar{S}_f	یکنواخت: (۸۰۰-۷۰۰)
T_{npkr}	یکنواخت: (۲-۰)	Q_{pi}	یکنواخت: (۲۵-۲۰)	\bar{S}_u	یکنواخت: (۸۰۰-۷۰۰)
T_{npkf}	یکنواخت: (۲-۰)	D_{ia}	یکنواخت: (۲۰-۱۰)	\underline{S}_x	عدد ثابت: ۰

جدول (۳): نتایج حل مسئله در ابعاد مختلف و به روش دقیق

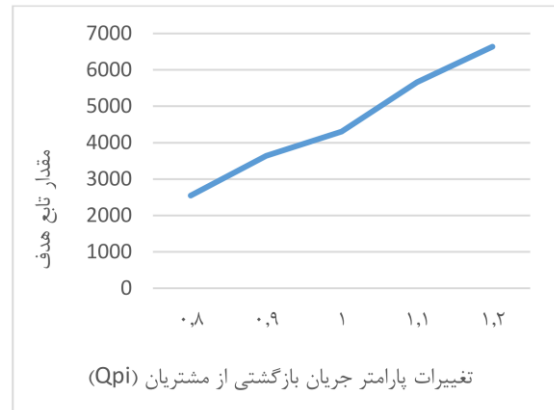
ردیف	سایز	ابعاد مسئله (i, a, f, p, n)	تعداد محدودیت‌ها	تعداد متغیر تصمیم باینری	تعداد کل متغیر تصمیم	پاسخ	زمان حل (ثانیه)
۱	کوچک	۴۳, ۲۵, ۱۰, ۴, ۴	۲۶۹۵	۱۲۹۵	۱۱۶۷۵	بهینه	۵۲
۲		۴۰, ۲۵, ۱۲, ۴, ۵	۳۸۰۱	۱۳۰۸	۱۵۷۳۷	بهینه	۵۰
۳	متوسط	۴۰, ۲۰, ۱۰, ۵, ۵	۵۵۹۵	۱۱۲۰	۲۱۲۲۱	بهینه	۹۶۰
۴		۴۵, ۲۳, ۱۰, ۵, ۵	۵۲۶۳	۱۳۵۵	۲۲۷۵۰	بهینه	۱۹۸۰
۵	بزرگ	۵۰, ۲۰, ۱۰, ۶, ۵	۶۸۰۸	۱۳۷۰	۲۹۶۹۰	زمان طولانی	>۱۰۸۰۰
۶		۹۰, ۳۶, ۱۶, ۷, ۶	۱۹۸۸۳	۴۰۲۸	۱۰۴۵۴۸	زمان طولانی	>۱۰۸۰۰

جدول (۴): مقایسه پاسخ‌های روش دقیق و الگوریتم ترکیبی

ردیف	سایز	تعداد محدودیت‌ها	تعداد کل متغیرها	بهترین پاسخ دقیق	زمان حل (ثانیه)	پاسخ الگوریتم ترکیبی	زمان حل (ثانیه)	خطا
۱	متوسط	۵۲۶۳	۲۲۷۵۰	۲۳۳۱۸	۱۹۸۰	۲۲۰۹۷	۳۰۰	٪۵
۲	بزرگ	۶۸۰۸	۲۹۶۹۰	۳۷۲۴۵	>۱۰۸۰۰	۳۴۵۲۸	۳۵۰	٪۷
۳		۱۹۸۸۳	۱۰۴۵۴۸	۷۱۷۰۵	>۱۰۸۰۰	۶۴۶۶۳	۱۲۰۰	٪۹



شکل (۵): حساسیت تابع هدف به تغییرات نرخ تولید مجدد



شکل (۴): حساسیت تابع هدف به جریان بازگشتی از مشتریان

[3] Choi, T. M., Li, Y., Xu, L. (2013). "Channel leadership, performance and coordination in closed loop supply chains". *International Journal of Production Economics*, 146(1): 371-380.

[4] Govindan, K., Soleimani, H., Kannan, D. (2015). "Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future". *European journal of operational research*, 240(3): 603-626.

[5] Souza, G. C. (2013). "Closed-loop supply chains: a critical review, and future research". *Decision Sciences*, 44(1): 7-38.

[6] Srivastava, S. K. (2008). "Network design for reverse logistics". *Omega*, 36(4): 535-548.

[7] Fonseca, M. C., García-Sánchez, Á., Ortega-Mier, M., & Saldanha-da-Gama, F. (2010). "A stochastic bi-objective location model for strategic reverse logistics". *Top*, 18(1): 158-184.

[8] Gomes, M. I., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q. (2011). "Modelling a recovery network for WEEE: A case study in Portugal". *Waste Management*, 31(7): 1645-1660.

[9] Alumur, S. A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Verter, V. (2012). "Multi-period reverse logistics network design". *European Journal of Operational Research*, 220(1): 67-78.

[10] Fahimnia, B., Sarkis, J., Dehghanian, F., Banihashemi, N., Rahman, S. (2013). "The impact of carbon pricing on a closed-loop supply chain: an Australian case study". *Journal of Cleaner Production*, 59: 210-225.

[11] Ayvaz, B., Bolat, B. (2014). "Proposal of a stochastic programming model for reverse logistics network design under uncertainties". *International Journal of Supply Chain Management*, 3(3): 33-42.

[12] Alshamsi, A., Diabat, A. (2015). "A reverse logistics network design". *Journal of Manufacturing Systems*, 37: 589-598.

[13] Ye, J., Wang, X., Li, Z. (2015). *Reverse Logistics Network Optimization Design under Fuzzy-stochastic Environment*. In LISS 2014 (pp. 1345-1352). Springer, Berlin, Heidelberg.

[14] Hatefi, S. M., Jolaib, F., Torabib, S. A., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2016). "Integrated forward-reverse logistics network design under uncertainty and

نتیجه و جمع‌بندی

زنجیره‌تأمین معکوس از لحاظ عملیاتی در کشورهای توسعه یافته به عنوان امر مهمی تلقی می‌گردد. این موضوع ممکن است چندین سال به طول انجامد تا در کشور ما عملیاتی شود. اما از لحاظ تحقیقاتی، ادبیات غنی دارد. در این مقاله سعی شد تا حد ممکن شرایط نزدیک به واقعیت در مدل سازی گنجانده شود از میان این شرایط می‌توان به تسهیلات متنوع از جمله ایستگاه جمع‌آوری محلی، ایستگاه جمع‌آوری مرکزی، ایستگاه دمونتاز، ایستگاه بازسازی محصول، ایستگاه استفاده مجدد از کالا، ایستگاه تولید مجدد و ایستگاه بازیافت اشاره نمود. از نوآوری‌های مدل، توجه به اجزای یک محصول است که از روی لیست قطعات قابل تعریف است و به همین دلیل امکان تعریف بازار فروش ماژول‌های یدکی در مدل فراهم شد. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد پارامتر کیفیت محصولات بازگشتی از مشتری به چه میزان می‌تواند روی سودآوری شبکه مؤثر واقع شود؛ پس ضرورت تعریف آن در مدل قابل درک است.

حل مدل با روش دقیق و الگوریتم ترکیبی توانست مزیت الگوریتم ترکیبی برای حل مسائل مقیاس بزرگ را به‌خوبی نشان دهد که از دیگر نوآوری‌های این مقاله به شمار می‌رود.

توسعه و حل مدل با در نظر گرفتن حالت چند دوره‌ای برای کنترل موجودی ماژول‌ها و یا شرایط عدم قطعیت می‌تواند شرایط نزدیک‌تر به واقعیت را ایجاد کند و به‌عنوان پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد. ضمن اینکه تحلیل مدل‌های قیمت‌گذاری محصول در هر کدام از بازارهای دست دوم ذکر شده در مدل می‌تواند از زمینه‌های تحقیق آتی باشد.

مراجع

[1] Soleimani, H., Kannan, G. (2015). "A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks". *Applied Mathematical Modelling*, 39(14): 3990-4012.

[2] Choi, T. M. (2013). "Optimal return service charging policy for a fashion mass customization program". *Service Science*, 5(1): 56-68.

- [18] Rahimi, M., Ghezavati, V. (2018). "Sustainable multi-period reverse logistics network design and planning under uncertainty utilizing conditional value at risk (CVaR) for recycling construction and demolition waste". *Journal of Cleaner Production*, 172: 1567-1581.
- [19] Yu, H., Solvang, W. D. (2018). "Incorporating flexible capacity in the planning of a multi-product multi-echelon sustainable reverse logistics network under uncertainty". *Journal of Cleaner Production*, 198: 285-303.
- reliability consideration. *Scientia Iranica. Transaction E, Industrial Engineering*, 23(2): 721-735.
- [15] Fattahi, M., Govindan, K. (2017). "Integrated forward/reverse logistics network design under uncertainty with pricing for collection of used products". *Annals of Operations Research*, 253(1): 193-225.
- [16] Zhou, Z., Cai, Y., Xiao, Y., Chen, X., Zeng, H. (2018). "The optimization of reverse logistics cost based on value flow analysis—a case study on automobile recycling company in China". *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(2): 807-818.
- [17] Liao, T. Y. (2018). "Reverse logistics network design for product recovery and remanufacturing". *Applied Mathematical Modelling*, 60: 145-163.



Network Design for Multi Echelon Reverse Logistics and Solving with Hybrid Algorithm

E. Shafiee Roudbari¹, S.M.T. Fatemi Ghomi^{2*}, M. Sheikh Sajadieh³

^{1, 2, 3} Department of Industrial Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 March 2020

Accepted 30 April 2020

Keywords:

Reverse supply chain network
design
Reverse logistics
Hybrid algorithm,
Remanufacturing and reuse
Refurbishing and recycle

ABSTRACT

Due to environmental concerns along the world, reverse logistics now is becoming an important strategy to decrease resource extraction. This research develops a generic mixed integer linear programming model for reverse logistics network design. This is a multi-echelon reverse logistics model. It maximizes total profit by handling products returned for reuse, refurbishing, remanufacturing, recycling and sale of spare parts. Also considering product variety and bill of material are model features. A hybrid algorithm constructed by genetic algorithm and branch and cut algorithm is proposed to solve the constructed problems. The designed model is validated and tested by using data generated in various size. Sensitivity analyses are conducted on various parameters to illustrate the capabilities of the proposed model.

* Corresponding author. S.M.T. Fatemi Ghomi
Tel.: 021-64545381; E-mail address: fatemi@aut.ac.ir