Archive of SID

پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره 4، شماره 4، زمستان 1398

مدل‌سازی و حل مسئلهٔ طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار برای محصول‌های پتروشیمی در شرایط عدم قطعیت

محمود احمدی آذر[1*]، بهروز دری[2]، اکبر عالم تبریز[3]، مسعود کسایی[4]

1- دانشجوی دکتری، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
2- استاد، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
3- استاد، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
4- استادیار، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

دریافت: 97/10/17 پذیرش: 98/3/8

چکیده

صنعت پتروشیمی از مهمترین صنایع در جهان است، که مدیریت و بهترین تصمیم‌گیری در فعالیت‌های آن موجب منافع اقتصادی فراوان و همچنین رونق و توسعه صنایع وابسته است. در این مقاله به مسئله مدیریت زنجیره تأمین محصول‌های پتروشیمی پرداخته می‌شود. مدلی برای بهینه‌سازی چندهدفه توسعه داده می‌شود؛ که در آن با گرفتن تصمیم‌های راهبردی، شش هدف بلندمدت اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در صنعت پتروشیمی انجام می‌شود. برای این منظور، ابتدا برای هدف‌های دوم اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی یک کران پایین در نظر گرفته شده و سپس بین سه هدف اصلی باقی‌مانده، با استفاده از روش اپسیلون محدودیت تکامل‌یافته جبهه پارتویی از جواب‌هایی کارا به‌دست آورده شده است. در این جبهه، جوابی که دارای کمترین انحراف از ایده‌آل است، برای درست‌ترین جواب انتخاب، و به مدیران صنعت پیشنهاد داده

*نویسنده مسئول مقاله: E-mail:m.ahmadiazar@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

می‌شود. عدم قطعیت داده در مدل پیشنهادی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار، کنترل شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که نه تنها نوسان بهینگی در رویکرد استوار پیشنهادی بسیار کمتر از رویکرد مقدار اسمی است، بلکه به طور چشمگیری نقص قیدها کمتر می‌شود؛ که موجب کاهش خطرپذیری در تصمیم‌گیری است. برای حل این مسئله پیشنهادی بزرگ، روش تجزیه بندرز برمبنای روش حل چندهدفه اپسیلون محدودیت تکامل‌یافته به‌کار گرفته شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که این پیشنهاد به‌صورت چشمگیری در سه معیار کمی میانگین انحراف از ایده‌آل، کیفیت جواب‌ها و زمان اجرا بهبود ایجاد می‌کند و حل مسئله در ابعاد بزرگ را ممکن می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: زنجیرهٔ تأمین محصول‌های پتروشیمی، بهینه‌سازی چندهدفه، برنامه‌ریزی امکانی استوار، اپسیلون محدودیت تکامل یافته، تجزیه بندرز

1- مقدمه

امروزه با تغییرات شدید و پیوسته در فضای کسب‌وکار ثابت شده است، که طراحی مناسب و بهینهٔ ساختار شبکه زنجیره تأمین(SCND[1])، بزرگترین تأثیر را بر عملکرد کلی زنجیره‌های تأمین، انعطاف‌پذیری و رقابت‌پذیری آن‌ها خواهد داشت. در این مرحله، تصمیم‌های راهبردی زیادی در ارتباط با تعیین مکان، تعداد و ظرفیت تسهیلات در شبکه زنجیره تأمین و همچنین وضعیت حمل‌ونقل جابه‌جایی و انبارداری مواد گرفته می‌شود؛ که نتیجه این تصمیم‌ها از نظر ماهیت، چشمگیر و بلندمدت می‌باشد [1, 2]. زنجیره‌های تأمین در شکل رایج خود (زنجیره‌های تأمین رو به جلو) به مجموعه‌ای از فرایندهای تأمین‌کننده به مصرف‌کننده (خرید مواد خام، تولید محصول نهایی، توزیع و تحویل آن‌ها) اشاره می‌کنند [3]. تکامل زنجیره‌های تأمین با درنظرگرفتن همزمان زنجیره‌های تأمین رو به جلو و تأمین بازگشتی، رویکرد یکپارچه‌ایی را ایجاد می‌کند که به عنوان زنجیره تأمین حلقه بسته (CLSC[2]) معرفی شده است [4, 5]. پیش فرض اصلی در جریان بازگشتی در زنجیره‌های تأمین حلقه بسته ، بازیابی و بازیافت حجم

1. Supply Chain Network Design (SCND)
2. Closed Loop Supply Chain (CLSC)

www.SID.ir

Archive of SID

وسیعی از مواد، می‌تواند منجر به کاهش تأثیرات زیست‌محیطی شود، و همچنین سلامت و ایمنی جامعه را بهبود و ارتقا دهد. زنجیره‌های تأمین حلقه بسته، به مراقبت و توجه به کالاهای مصرف شده به‌جای از بین بردن آن‌ها، به‌عنوان رویکردی اثبات شده در مسیر بهبود پایداری در زنجیره‌های تأمین شناخته شده‌اند [6, 7].

اگر در مسئله مدیریت زنجیره تامین حلقه بسته، اهداف سه‌گانه پایداری شامل، هدف اقتصادی(حداقل کردن هزینه‌ها)، هدف زیست‌محیطی (حداقل کردن آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های تولید، بازیافت و حمل‌ونقل)، و هدف اجتماعی (حداکثرکردن اشتغال)، مورد توجه قرار گیرد، مسئله تبدیل به مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار (SCLSCND [1]) خواهد شد. در کشورهایی که از میدان‌های نفت و گاز بهره‌مندند و یا واردات این مواد خام گران نیست و پالایشگاه‌های مناسب برای تولید فرآورده نفتی و گازی برای تأمین خوراک صنعت پتروشیمی وجود دارد، طراحی و برنامه‌ریزی مناسب تسهیلات پتروشیمی در قالب مسائل (P_SCLSCD [2]) و برای ارائه بهینه محصول‌های بنیادی و یا نهایی این صنعت بسیار با اهمیت بوده و هدف‌های اقتصادی و اجتماعی زیادی را می‌تواند برآورده کند؛ که عبارت اند از: افزایش درآمدهای کشور، ایجاد اشتغال و رونق صنایع وابسته می‌توان اشاره کرد.

یکی از چالش‌ها در مسئله مدیریت زنجیره تأمین مسئله (P_SCLSCD)، موضوع عدم قطعیت در داده‌ها است؛ که در سیستم‌های زنجیره تأمین، به دو گروه عدم قطعیت محیطی و سیستمی تقسیم می‌شود. عدم قطعیت محیطی به عملکرد عامل‌های دیگر زنجیره‌های تأمین مانند: تأمین‌کننده و تولیدکننده مربوط می‌شوند؛ و عدم قطعیت سیستمی به برخی فرایندها مانند تولید و توزیع محصول‌هایی اشاره دارد [2]. در مدل‌سازی و حل مسئله P_SCLSCD ترکیبی از علت‌های عدم قطعیت محیطی و سیستمی مانند عدم قطعیت در ظرفیت ارائه مواد اولیه، تقاضای سالانه محصول‌ها، میزان بازگشت محصول هایی که عمر مفید آنها

1. Sustainable Closed Supply Chain Network Desion (SCLSCND)
2. Petrochimical_Sustainable Closed Supply Chain Network Desion (P_SCLSCND)

www.SID.ir

Archive of SID

به اتمام رسیده[1] به مراکز جمع‌آوری و میزان بازیافت مواد اولیه و... باید توجه شود. در این تحقیق به مدل‌سازی و حل مسئله P_SCLSCD در شرایط عدم قطعیت پرداخته می‌شود، و مدل بهینه‌سازی چندهدفه توسعه داده می‌شود؛ که در آن با گرفتن تصمیم‌های راهبردی، هدف‌های بلندمدت اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در صنعت پتروشیمی تحقق می‌یابد. برای روبه‌رو شدن با عدم قطعیت، موازنه اهداف و همچنین حل مسئله در ابعاد بزرگ‌تررویکردی مناسب پیشنهاد می‌شود و باآزمایش‌هایی به ارزیابی آن‌ها می‌پردازیم.

2- پیشینه تحقیق

با توجه به عنوان این مقاله و بررسی نشدن این موضوع در تحقیق، در این بخش، مطابق با جدول 1 مقاله‌ها و تحقیق‌های انجام گرفته در دو بخش «طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار» و «طراحی زنجیره تأمین در صنعت پتروشیمی» به صورت خلاصه بررسی می‌شوند. در میان پژوهش‌های اجرا شده در سال 2013م. به این مقاله می‌توان اشاره کرد؛ که مدل‌های مختلف مدیریت زنجیره تأمین پایدار را بررسی کرده است. نویسنده در این مقاله بیان می‌کند: در پانزده سال گذشته (1998-2013)، بیش از 300 مقاله در حوزه زنجیره‌های تأمین پایدار (رو به جلو) و سبز منتشر شده است، با از بین این مقاله‌ها فقط 36 مورد از آن‌ها، به ارائه مدل‌های کمی پرداخته‌اند [8]. گویندان و همکاران (2015م) بازنگری گسترده‌ای را در ادبیات موضوع زنجیره تأمین معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کرده‌اند [4]. عدم قطعیت در مدل‌های بهینه‌سازی و زنجیره تأمین به‌تازگی توجه پژوهشگران را جلب کرده است. فرخ و همکاران در طراحی مدل زنجیره تأمین حلقه بسته، رویکردی با برنامه‌ریزی فازی استوار و جدید ارائه کرده‌اند [9]. منصور و همکاران در مدل بهینه‌سازی دوهدفه برای طراحی شبکه تأمین خون، عدم قطعیت داده‌ها را با رویکرد برنامه‌ریزی استوار در نظر می‌گیرند [10].

1. End-Of-Life (EOL)

www.SID.ir

Archive of SID

جدول 1 خلاصه‌ای از مشخصات تحقیق‌های پیشین

حوزه	نوع مدل	صنعت	رویکرد حل	سال	منبع
طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار	زنجیره تأمین حلقه بسته در چهارچوب مسئله مکان‌یابی	اتومبیل	نرم‌افزار SITATION	2009	[11]
	برنامه‌ریزی آمیخته خطی استوار	-	الگوریتم چندهدفه ممتیک	2011	[12]
	طراحی شبکه زنجیره تأمین با درنظرگیری میزان انتشار گاز CO_2 در چهارچوب مسئله مکان‌یابی تسهیلات	مناطق دارای سیستم مالیات و تجارت کربن	آزادسازی لاگرانژ	2012	[13]
	مدل برنامه‌نویسی چندهدفه خطی فازی	ماشین‌آلات	فازی	2014	[14]
	طراحی یک شبکه لجستیک پیشرو/ معکوس در قالب مدل برنامه‌ریزی آمیخته خطی	طلا	الگوریتم کلونی مورچه‌ها	2016	[15]
	مدل برنامه‌نویسی احتمالی چند هدفه در شرایط عدم قطعیت	بیودیزل	رویکرد ترکیبی اپسیلون محدودیت تکامل یافته و لکسیکوگراف انعطاف‌پذیر	2017	[16]
	مدل تصمیم‌گیری مکان‌یابی سه‌سطحی	-	الگوریتم های فراابتکاری	2018	[17]
	مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در شرایط عدم قطعیت	-	برنامه‌نویسی تصادفی فازی استوار	2018	[18]
طراحی زنجیره تأمین در صنعت پتروشیمی	مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته پیوسته در زمان	نفت	الگوریتم‌های بر مبنای انشعاب و تحدید	2003	[19]
	مدل برنامه نویسی غیرخطی عددصحیح آمیخته	پتروشیمی	الگوریتم های بر مبنای انشعاب و تحدید	2004	[20]
	مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته	محصول‌های شیمیایی	-	2005	[21]
	مدل تصادفی دوسطحی	نفت	روش EVPI	2008	[22]
	مدل برنامه ریزی تصادفی در شرایط عدم قطعیت	نفت	الگوریتم فرا ابتکاری	2011	[24 ,23]
	مدل برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح آمیخته قطعی	پتروشیمی	نرم افزار گمز	2013	[25]
	مدل برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح آمیخته	زیست توده‌های سلولزی	الگوریتم برنامه‌ریزی پویا	2015	[26]
	برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه	پتروشیمی	آزادسازی لاگرانژ	2017	[2]

www.SID.ir

Archive of SID

بامروری بر متن دیده می‌شود؛ هرچند مسئله مدیریت زنجیره تأمین محصول‌های پتروشیمی با روش‌های مختلفی بررسی شده است، اما هنوز مدلی جامع برای حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار محصول‌های پتروشیمی قابل توسعه، در نظر گرفته نشده است. از این رو در این مقاله، هدف ارائه مدلی جامع است. با در نظر گرفتن عدم قطعیت، ارائه مدل و روش حل چندهدفه برای موازنه اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، ارائه رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار برای روبه‌رو شدن با عدم قطعیت و در انتها ارائه روش حل مبتنی بر تجزیه بندرز از دیگر نوآوری‌های این تحقیق است.

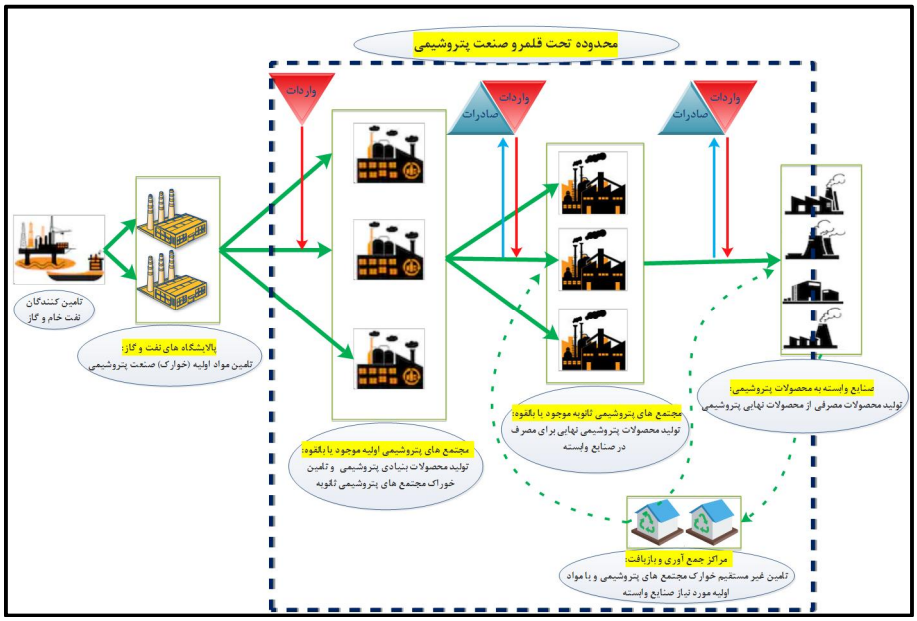
3- تشریح مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار صنعت پتروشیمی

شکل 1، زنجیره ارائه محصول‌های پتروشیمی را به طور کامل نشان می‌دهد. فرایند تولید محصول‌های پتروشیمی به این صورت است که، ابتدا نفت خام و یا گاز استخراج شده از میدان‌های نفتی و گاز به پالایشگاه‌های نفت و گاز فرستاده می‌شود، نفت و گاز و برخی دیگر از فرآورده ها برای تولید مواد اولیه به صنعت پتروشیمی وارد می‌شوند. مجتمع‌های پتروشیمی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: مجتمع‌های پتروشیمی اولیه، که مواد اولیه (نفت، گاز اتان، گاز متان و ...) به آن (خوراک) فرستاده می‌شود و در کارخانه‌های تولیدی به محصول‌های پتروشیمی بنیادی (اتیلن، پروپیلن، بوتیلن و ...) تبدیل می‌شود؛ محصول این مجتمع‌های پتروشیمی برای تهیه مواد اولیه (خوراک) به مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه فرستاده می‌شود و فرایندهایی در کارخانه‌های تولید موجود در مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه، محصول‌های پتروشیمی نهایی (پلی اتیلن، حلال‌های شیمیایی، اسیدها، مواد شیمیایی، کودهای شیمیایی و ...) تولید می‌شود که برخی از این محصول‌ها به طور مستقیم مصرف می‌شوند؛ (کودهای شیمیایی) و بیشتر محصول‌ها (انواع مختلف پلی‌اتیلن) برای مواد اولیه به صنایع وابسته فرستاده و محصول‌های مختلفی (داروهای شیمیایی، پلاستیک، تایر، کفش‌ها و ...) تولید می‌شود. مدیرهای صنعت پتروشیمی در نظر دارند که، تصمیم‌های راهبردی در ارتباط با برنامه‌ریزی و طراحی شبکه زنجیره تأمین

www.SID.ir

Archive of SID

محصول‌های پتروشیمی را به‌صورتی اجرا کنند که، هدف‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در نظر گرفته شده، برآورده شود.



شکل 1 شبکه زنجیره تأمین محصول‌های صنعت پتروشیمی

بیشتر فرضیه‌های مسئله P_SCLSCD در این تحقیق به صورت زیر است:

چند مجتمع پتروشیمی اولیه و ثانویه در حال حاضر است که، در هر یک از آن‌ها یک یا چند کارخانه تولید محصول‌های پتروشیمی با ظرفیت‌های محدود وجود دارد. مکان احداث مجتمع‌های پتروشیمی (کارخانه‌های تولیدی) از پیش مشخص شده است. ظرفیت پالایشگاه‌های نفت و گاز داخل کشور برای تعیین خوراک مجتمع‌های پتروشیمی اولیه محدود است. مکان استقرار تأمین‌کنندگان (پالایشگاه‌های داخلی) خوراک مجتمع‌های پتروشیمی اولیه از پیش مشخص شده است. چند نوع فن‌آوری تولید با ظرفیت، درجه ایمنی و سبز بودن (تولید CO_2) برای تأسیس کارخانه‌های تولید در دسترس است. ارتباط مجتمع‌های پتروشیمی فقط از راه خطوط لوله انجام می‌شود. درخواست سالانه بازار(مشتری‌ها) و ضریب(نسبت) جمع‌آوری

www.SID.ir

Archive of SID

محصـول‌هـای EOL، قیمـت صـادرات محصـول‌هـای، هزینـه واردات مـواد اولیـه پتروشیمی و یا محصول‌های بنیادی و نهایی پتروشـیمی قطعـی نیسـت. ظرفیـت همـه تسهیلات تولید، حمل‌ونقل و بازیافت محدود اسـت. بـرای تسـهیلات تولیـد و همچنـین حمل‌ونقل طول عمری در نظر گرفته می‌شود؛ که از این رو هزینه احداث تسـهیلات در هر سال برابر است با: هزینه احداث تقسیم بر طول عمـر مـی‌باشـد. لازم بـه توضـیح است که، از این طریق، هزینـه تسـهیلات تولیـدی بـه‌صـورت سـالانه متعـادل سـازی می‌شود؛ که اگر این کار انجام نشود؛ باعث می‌شود که هزینه احداث نسـبت بـه هزینـه واردات سالانه بسـیار بیشـتر و کارخانـه پتروشـیمی جدیـدی تأسـیس نشـود؛ و کـل تقاضای بازار از راه واردات و یا مجتمع‌های پتروشیمی قبلی تأمین شود.

4- مدل‌سازی و حل مسئله P_SCLSCD

4-1- مدل بهینه‌سازی چند هدفه پیشنهادی

نماد و علائم ریاضی

مجموعه و اندیس	
$R^1 = \{1,2,\dots,r,\dots,\lvert R^1\rvert\}$	مجموعه مواد اولیه (خوراک) برای نیاز مجتمع‌های پتروشیمی اولیه
$R^2 = \{1,2,\dots,r,\dots,\lvert R^2\rvert\}$	مجموعه مواد اولیه (خوراک) برای نیاز مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
$P^1 = \{1,2,\dots,p,\dots,\lvert P^1\rvert\} \subseteq R^2$	مجموعـه تولیـدهای مجتمـع‌هـای پتروشـیمی اولیـه (محصـول‌هـای پتروشیمی بنیادی)
$P^2 = \{1,2,\dots,p,\dots,\lvert P^2\rvert\}$	مجموعـه تولیـدهای مجتمـع‌هـای پتروشـیمی ثانویـه (محصـول‌هـای پتروشیمی نهایی){محصول‌های پتروشیمی نیاز بازار و صنایع وابسته}
$P = P^1 \cup P^2$	مجموعه محصول‌های پتروشیمی بنیادی و نهایی
$F^{1a} = \{1,2,\dots,f,\dots,\lvert F^{1a}\rvert\}$	مجموعـه کارخانـه‌هـای تولیـد محصـول‌هـای پتروشـیمی بنیـادی موجود/فعال
$F^{1b} = \{1,2,\dots,f,\dots,\lvert F^{1b}\rvert\}$	مجموعه کارخانه‌های تولید محصول‌های پتروشیمی بنیادی بالقوه
$F^1 = F^{1a} \cup F^{1b}$	مجموعه کارخانه‌های تولید محصول‌های پتروشیمی بنیادی موجود و بالقوه
$F^{2a} = \{1,2,\dots,f,\dots,\lvert F^{2a}\rvert\}$	مجموعـه کارخانـه‌هـای تولیـد محصـول‌هـای پتروشـیمی نهـایی موجود/فعال
$F^{2b} = \{1,2,\dots,f,\dots,\lvert F^{2b}\rvert\}$	مجموعه کارخانه‌های تولید محصول‌های پتروشیمی نهایی بالقوه

www.SID.ir

Archive of SID

$F^2 = F^{2a} \cup F^{2b}$	مجموعه کارخانه‌های تولید محصول‌های پتروشیمی نهایی موجود و بالقوه
$T = \{1,2,\dots,t,\dots,\lvert T\rvert\}$	مجموعه فن‌آوری‌های تولید
$S = \{1,2,3,4,5\}$	مجموعه اندازه (ظرفیت) برای تأسیس کارخانه‌های پتروشیمی {1= ظرفیت پایین، 2= ظرفیت به نسبت پایین، 3=ظرفیت متوسط، 4= ظرفیت به‌نسبت بالا، 5= ظرفیت بالا}
داده‌های مسئله	
rmc_r^1	هزینه واحد تأمین ماده اولیه r برای مجتمع‌های پتروشیمی اولیه از راه پالایشگاه‌های داخل کشور
$\widetilde{rmc_r^{1im}}$	هزینه واحد تأمین ماده اولیه r برای مجتمع‌های پتروشیمی اولیه از راه واردات (غیرقطعی)
pc_{pt}^1	هزینه واحد تولید محصول بنیادی p در مجتمع‌های پتروشیمی اولیه با فن‌آوری t
$tc_p^{1f^1 \to f^2}$	هزینه واحد حمل‌ونقل (ارائه محصول بنیادی p) از واحد تولید f_1 از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه به واحد تولید f_2 از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
$\widetilde{rmc_r^{2im}}$	هزینه واحد تأمین ماده اولیه r برای مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه از طریق واردات (غیرقطعی)
fc_{tsp}^1	هزینه احداث یک واحد/کارخانه تولیدی با تکنولوژی t در اندازه/ظرفیت s برای تولید محصول‌های پتروشیمی بنیادی p در مجتمع‌های پتروشیمی اولیه
$plc^{f^1 \to f^2}$	هزینه نصب خطوط لوله بین واحد تولید f_1 از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه و واحد تولید f2 از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
pc_{pt}^2	هزینه واحد تولید محصول نهایی p در مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه با تکنولوژی t
$tc_p^{2f^2}$	هزینه واحد حمل‌ونقل (ارائه محصول نهایی p) از واحد تولید f_2 از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه داخل کشور به بازار
$\widetilde{mc_p^{im}}$	هزینه واحد تأمین محصول‌های پتروشیمی نهایی p از راه واردات (غیرقطعی)
rcc_p	هزینه واحد جمع‌آوری و بازیافت محصول پتروشیمی نهایی p
$\widetilde{dem_p}$	نیاز سالانه بازار(صنایع وابسته) به محصول پتروشیمی نهایی p (غیرقطعی)

www.SID.ir

Archive of SID

$\widetilde{\alpha_p}$	نسبت بازگشت محصول پتروشیمی نهایی p EOL (غیرقطعی)
β_{rp}	میزان بازیافت مواد اولیه r از محصول پتروشیمی نهایی p EOL
$\widetilde{price_p^{1ex}}$	قیمت صادرات هر واحد محصول پتروشیمی بنیادی p (غیرقطعی)
$\widetilde{price_p^{2ex}}$	قیمت صادرات هر واحد محصول پتروشیمی نهایی p (غیرقطعی)
em_t	مقدار نشر CO_2 برای هر واحد تولید محصول‌های پتروشیمی زیر نظرفن‌آوری تولید t
u_{tps}^1	تعداد فرصت‌های شغلی (اشتغال نیروی انسانی) برای فعالیت یک واحد تولید مجهز به فن‌آوری تولید t برای تولید محصول پتروشیمی بنیادی p به اندازه ظرفیت اسمی s
u_{tps}^2	تعداد فرصت‌های شغلی برای فعالیت یک واحد تولید مجهز به فن‌آوری تولید t برای تولید محصول پتروشیمی نهایی p به اندازه ظرفیت اسمی s
v_p	تعداد فرصت‌های شغلی در صنایع وابسته در صورت تأمین کامل درخواست صنایع وابسته به محصول پتروشیمی نهایی p
cap_{pts}^{1P}	ظرفیت تولید سالانه محصول پتروشیمی بنیادی p در یک واحد تولید از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه مجهز به فن‌آوری t در اندازه s
cap_{pts}^{2P}	ظرفیت تولید سالانه محصول پتروشیمی نهایی p در یک واحد تولید از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه مجهز به فن‌آوری t در اندازه s
$cap^{rf^1 \to f^2}$	ظرفیت حمل‌ونقل سالانه برای ارائه محصول‌های پتروشیمی بنیادی از واحد تولید f_1 از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه به واحد تولید f_2 از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
cap_p^{RC}	ظرفیت سالانه جمع‌آوری و بازیافت محصول‌های مصرفی که تولید آنها از محصول پتروشیمی نهایی p استفاده شده است.
cap_r^{Ref}	ظرفیت تولید سالانه پالایشگاه‌های داخل کشور برای تأمین ماده اولیه r
cap^{ex}	ظرفیت صادرات سالانه محصول‌های پتروشیمی نهایی (بر حسب حجم صادرات)
cap^{im}	ظرفیت واردات سالانه خوراک مجتمع‌های پتروشیمی (بر حسب حجم واردات)
ρ_{rp}^1	مقدار ماده اولیه $r \in R^1$ مورد نیاز در مجتمع‌های پتروشیمی اولیه برای تولید هر واحد محصول‌های پتروشیمی بنیادی p
ρ_{rp}^2	مقدار ماده اولیه $r \in R^2$ نیاز شده در مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه برای تولید هر واحد محصول‌های پتروشیمی نهایی p

www.SID.ir

Archive of SID

متغیرها/خروجی‌های مسئله	
Y_{ftsp}^{1}	اگر در مکان $f \in F^{1b}$ کارخانه با تکنولوژی t در اندازه s برای تولید محصول‌های پتروشیمی بنیادی p احداث شود برابر است با: 1؛ در غیر این صورت صفر است.
Y_{ftsp}^{2}	اگر در مکان $f \in F^{2b}$ کارخانه با تکنولوژی t در اندازه s برای تولید محصول‌های پتروشیمی نهایی p احداث شود برابر است با: 1؛ در غیر این صورت صفر است.
$L^{f^1 \to f^2}$	اگر بین واحد تولید f_1 از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه به واحد تولید f_2 از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه خط لوله نصب شود برابر است با: 1؛ در غیر این صورت صفر است.
rm_{rf}^{1}	مقدار تأمین سالانه ماده اولیه r از راه‌های پالایشگاه‌های داخل کشور برای واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه.
rm_{rf}^{1im}	مقدار تأمین سالانه ماده اولیه r از راه‌های واردات برای واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه
x_{pft}^{1}	مقدار تولید سالانه محصول پتروشیمی بنیادی p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه مجهز به فن‌آوری تولید t
$t_p^{1f^1 \to f^2}$	مقدار حمل‌ونقل (ارائه محصول بنیادی p) از واحد تولید f_1، مجتمع‌های پتروشیمی اولیه به واحد تولید f_2 از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
rm_{rf}^{2im}	مقدار تأمین سالانه ماده اولیه r از راه‌های واردات برای واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه
x_{pft}^{2}	مقدار تولید سالانه محصول پتروشیمی نهایی p در واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه مجهز به فن‌آوری تولید t
$t_p^{2f^2}$	مقدار حمل‌ونقل (ارائه محصول نهایی p) از واحد تولید f_2 از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه به بازار
m_p^{im}	مقدار تأمین سالانه محصول‌های پتروشیمی نهایی p از راه واردات
rc_{pf}	مقدار جمع‌آوری و بازیافت سالانه محصول پتروشیمی نهایی p که به واحد تولید f از مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه ارسال می‌شود.
Sl_p	مقدار کمبود سالانه محصول پتروشیمی نهایی p
ex_{pf}^{1}	مقدار صادرات سالانه محصول پتروشیمی بنیادی p از واحد تولید f در مجتمع‌های پتروشیمی اولیه
ex_{pf}^{2}	مقدار صادرات سالانه محصول پتروشیمی نهایی p از واحد تولید f در مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه

www.SID.ir

Archive of SID

$$\min obj_1 = \left[\frac{1}{N}\sum_{f\in F^{1b}}\sum_{t}\sum_{s}\sum_{p\in P^1} fc^1_{tsp}\cdot Y^1_{ftsp} + \frac{1}{N}\sum_{f\in F^{2b}}\sum_{t}\sum_{s}\sum_{p\in P^2} fc^2_{tsp}\cdot Y^2_{ftsp} + \frac{1}{M}\sum_{f^1\in F}\sum_{f^1\in F} plc^{f^1\to f^2}\cdot L^{f^1\to f^2}\right] + \left[\sum_{r}\sum_{f} rmc^1_r\cdot rm^1_{rf}\right] + \left[\sum_{r}\sum_{f\in F^1}\widetilde{rmc^{1im}_r}\cdot rm^{1im}_{rf} + \sum_{r}\sum_{f\in F^2}\widetilde{rmc^{2im}_r}\cdot rm^{2im}_{rf} + \sum_{p\in P^2}\widetilde{mc^{im}_p}\cdot m^{im}_p\right] + \left[\sum_{f\in F^1}\sum_{t}\sum_{p\in P^1} pc^1_{pt}\cdot x^1_{pft} + \sum_{f\in F^2}\sum_{t}\sum_{p\in P^2} pc^2_{pt}\cdot x^2_{pft}\right] + \left[\sum_{p\in P^1}\sum_{f^1\in F}\sum_{f^2\in F} tc^{1\,f^1\to f^2}_p\cdot t^{1\,f^1\to f^2}_p + \sum_{p\in P^1}\sum_{f^2\in F} tc^{2\,f^2}_p\cdot t^{2\,f^2}_p\right] + \left[\sum_{p\in P^2} rcc_p\cdot rc_p\right] \quad (1)$$

$$\max obj_2 = \left[\sum_{f\in F^{1b}}\sum_{t}\sum_{s}\sum_{p\in P^1} u^1_{tps}\cdot\frac{x^1_{pft}}{cap^{1P}_{pts}} + \sum_{f\in F^{2b}}\sum_{t}\sum_{s}\sum_{p\in P^2} u^2_{tps}\cdot\frac{x^2_{pft}}{cap^{2P}_{pts}}\right] + \left[\sum_{p\in P^2} v_p\left(\frac{\widetilde{dem_p} - Sl_p}{\widetilde{dem_p}}\right)\right] \quad (2)$$

$$\min obj_3 = \left[\sum_{f\in F^{1b}}\sum_{t}\sum_{s}\sum_{p\in P^1}\sum_{p\in P^1} em_t\cdot x^1_{pft} + \sum_{f\in F^{1b}}\sum_{t}\sum_{s}\sum_{p\in P^1}\sum_{p\in P^1} em_t\cdot x^2_{pft}\right] \quad (3)$$

در رابطه (1)، هدف اقتصادی در مسئله P_SCLSCD آورده شده است؛ که بر اساس آن کل هزینه تأمین تقاضا بازار کمتر می‌شود. لازم به توضیح است که، در این رابطه N متوسط طول عمر (بر حسب سال) تسهیلات یک مجتمع پتروشیمی و M

www.SID.ir

Archive of SID

متوسط طول عمر (بر حسب سال) خط لوله انتقال محصول‌های پتروشیمی است. در رابطه (2) هدفی اجتماعی دیده می‌شود؛ که بر اساس آن فرصت‌های شغلی (استخدام یا اشتغال) در صنعت پتروشیمی و صنایع وابسته به آن بیشتر می‌شود. در رابطه (3) هدف اول زیست‌محیطی است؛ که بر اساس آن (نشر CO_2) از فعالیت‌های تولید در مجتمع‌های پتروشیمی کمتر می‌شود.

- **قیدها**

$$\sum_{f} rm_{rf}^{1} \leq cap_{r}^{Ref} \; ; \forall r \in R^{1} \tag{4}$$

$$x_{pft}^{1} \leq cap_{pts}^{1P} . Y_{ftsp}^{1} \; ; \forall f \in F^{1} , p \in P^{1} , s \in S , t \in T \tag{5}$$

$$x_{pft}^{2} \leq cap_{pts}^{2P} . Y_{ftsp}^{2} \; ; \forall f \in F^{2} , p \in P^{2} , s \in S , t \in T \tag{6}$$

$$\rho_{rp}^{1} . x_{pft}^{1} \leq rm_{rf}^{1} + rm_{rf}^{1im} \; ; \forall r \in R^{1} , f \in F^{1} , p \in P^{1} , t \in T \tag{7}$$

$$\rho_{rp}^{2} . x_{pft}^{2} \leq \sum_{f^{1} \in F} tc_{r}^{1 \, f^{1} \rightarrow f^{2}} + rm_{rf^{2}}^{2im} + \beta_{rp} \sum_{p' \in P^{2}} rc_{p' f^{2}} \; ; \forall r \in R^{2} , f^{2} \in F^{2} , p \in P^{2} , t \in T \tag{8}$$

$$\sum_{p} \sum_{t} \sum_{s} Y_{ftsp}^{1} \leq 1 \; ; \; \forall \; f \in F^{1} \tag{9}$$

$$\sum_{p} \sum_{t} \sum_{s} Y_{ftsp}^{2} \leq 1 \; ; \; \forall \; f \in F^{2} \tag{10}$$

$$x_{pft}^{1} = \sum_{f^{2} \in F^{2}} t_{p}^{1 \, f^{1} \rightarrow f^{2}} + ex_{pf}^{1} ; \; \forall \; f \in F^{1} , p \in P^{1} , t \in T \tag{11}$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$x_{pft}^{2} = t_{p}^{2^{f}} + ex_{pf}^{2};\ \forall\quad f \in F^{2}, p \in P^{2}, t \in T \tag{12}$$

$$\sum_{f}\sum_{t} x_{pft}^{2} + m_{p}^{im} = \widetilde{dem_{p}} - Sl_{p};\ \forall\, p \in p^{2} \tag{13}$$

$$\sum_{f\in F^{2}} rc_{pf} \le \widetilde{\alpha_{p}}\left(\sum_{f}\sum_{t} x_{pft}^{2} + m_{p}^{im}\right);\ \forall\ p \in p^{2} \tag{14}$$

$$\sum_{f\in F^{2}} rc_{pf} \le cap_{p}^{RC};\ \forall\ p \in p^{2} \tag{15}$$

$$\sum_{p} t_{p}^{1^{f^{1}\to f^{2}}} \le cap^{T^{f^{1}\to f^{2}}} L^{f^{1}\to f^{2}};\ \forall\ f^{1}, f^{2} \in F \tag{16}$$

$$\sum_{p\in P^{1}}\sum_{f\in F^{1}} ex_{pf}^{1} + \sum_{p\in P^{2}}\sum_{f\in F^{2}} ex_{pf}^{2} \le cap^{ex} \tag{17}$$

$$\sum_{r}\sum_{f\in F^{1}} rm_{rf}^{1im} + \sum_{r}\sum_{f\in F^{2}} rm_{rf}^{2im} \le cap^{im} \tag{18}$$

در رابطه (4) ظرفیت محدود تأمین سالانه خوراک مجتمع‌های پتروشیمی اولیه از پالایشگاه‌های داخل کشور قید می‌شود. رابطه (5) تضمین این است که، مقدار تولید در هر کارخانه مجتمع‌های پتروشیمی اولیه از ظرفیت تولید آن بیشتر نمی‌شود. رابطه (6) تضمین این است که، مقدار تولید در هر کارخانه مجتمع‌های پتروشیمی از ظرفیت تولید آن بیشتر نمی‌شود. رابطه (7) به نیاز مواد اولیه برای تولید محصول‌های پتروشیمی بنیادی در هر کارخانه و تولید از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه اشاره می‌کند. رابطه (8) به نیاز مواد اولیه برای تولید محصول‌های پتروشیمی نهایی در هر کارخانه مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه پرداخته است. رابطه (9) در هر مکان بالقوه برای تأسیس کارخانه‌های پتروشیمی اولیه، حداکثر یک کارخانه با ظرفیت و فن‌آوری و محصول تولیدی مشخص قابل

www.SID.ir

Archive of SID

تأسیس است. رابطه (10)، مشابه است با، رابطه 9. روابط (11) و (12) تعادل مقدار تولید و جریان خروجی از هر کارخانه تولید از مجتمع‌های پتروشیمی اولیه و همچنین مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه را تضمین می‌کند. رابطه (13) به تأمین درخواست‌های مشتریان اشاره دارد. رابطه (14) بیشترین مقدار جمع‌آوری برای بازیافت محصول‌های EOL پتروشیمی را نشان می‌دهد. مقدار جمع‌آوری شده هر محصول برابر است با: ضریب(نسبت) مشخصی از ارائه سالانه آن محصول به بازار می‌باشد در رابطه (15)، ظرفیت محدود سالانه مراکز جمع‌آوری محصول‌های EOL اعمال می‌شود. در رابطه (16)، ظرفیت محدود حمل‌ونقل سالانه از طریق خطوط لوله بین مجتمع‌های پتروشیمی کنترل می‌شود. در رابطه (17)، حجم صادرات سالانه محصول‌های صنعت پتروشیمی محدود است. رابطه (18)، ظرفیت محدود واردات سالانه خوراک مجتمع‌های پتروشیمی اعمال می‌شود.

4-2- رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار (RPP) برای روبه‌رو شدن با قطعیتی نبودن داده‌های مدل

اگر در یک مسئله بهینه‌سازی، برخی از داده ها به صورت عدد فازی باشد،آن‌گاه می‌توان از رویکردهای مختلفی از جمله رویکرد برنامه‌ریزی امکانی برای حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده کرد [27, 28] که از شاخه‌های بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی ریاضی فازی است [29]. مدل برنامه‌ریزی فازی زیر را در نظر بگیرد:

$$\begin{cases} Min\ \tilde{c}x \\ s.t. \\ Ax \le \tilde{b} \\ x \in X \end{cases} \qquad (19)$$

که در آن $\tilde{c} = (c^1, c^2, c^3, c^4)$ و $\tilde{b} = (b^1, b^2, b^3, b^4)$ و بردارهای قطعی نبودن در تابع هدف و قیدها هستند؛ که به‌صورت اعداد فازی ذوزنقه‌ای(TFN) بیان می‌شوند. بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی امکانی، ابتدا یک سطح $(\alpha \times 100)\%$ برای برقراری قیدها در نظر گرفته می‌شود؛ سپس اندازه امکان α برای قیدها به‌صورت زیر گفته می‌شود. با توجه به خواص اندازه امکان، برنامه‌ریزی امکانی بالا معادل با مدل دیفازی‌شده زیر است [27, 28]:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\begin{cases} Min\ E(\tilde{c}x) = \dfrac{c^1 + 2c^2 + 2c^3 + c^4}{6}x \\ s.t. \\ Ax \le \alpha.\mathrm{b}^1 + \left(1-\alpha\right)\mathrm{b}^2 \\ x \in X \end{cases} \quad (20)$$

برای بهبود عملکرد مدل قبل، در پژوهش صورت گرفته به وسیله پیشوایی و همکاران [30]، رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار (RPP) را گسترش دادند؛ که در آن سطح امکان α به صورت تعاملی، با توجه به مفاهیم استواری گفته شده، در فرایند حل مسئله به دست آمده تعیین می‌شود. فرم کلی مدل RPP به‌صورت زیر است:

$$\begin{cases} Min\ \dfrac{c^1 + 2c^2 + 2c^3 + c^4}{6}x + \varphi\left[(\alpha.\mathrm{b}^1 + \left(1-\alpha\right)\mathrm{b}^2 - \mathrm{b}^1)\right] \\ s.t. \\ Ax \le \alpha.\mathrm{b}^1 + \left(1-\alpha\right)\mathrm{b}^2 \\ x \in X \\ 0.5 \le \alpha \le 1 \end{cases} \quad (21)$$

که در آن $\varphi \ge 0$ یک پارامتر کنترلی است که، با تحلیل حساسیت به‌دست می‌آید و همچنین α متغیر است که نشان می‌دهد؛ امکان برقراری قیدها چه اندازه است. با توجه به رویکرد RPP، پارامترهای غیرقطعی در توابع هدف به صورت $\frac{c^1+2c^2+2c^3+c^4}{6}$ بازنویسی می‌شوند؛ که $\tilde{c}$ نشان‌دهنده هر پارامتر غیرقطعی موجود در تابع هدف است. عبارت $\frac{\widetilde{dem_p}-Sl_p}{\widetilde{dem_p}}$ ابتدا به صورت $1-\frac{Sl_p}{\widetilde{dem_p}}$ بیان و سپس متوسط $\widetilde{dem_p}$ جانشین آن می‌شود و همتای استوار آن بر اساس رویکرد بالا بیان می‌شود.

4-3- روش اپسیلون محدودیت تکامل یافته (AEC[1]) برای موزانه هدف‌های مدل

برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه (MODM) رویکردهای مختلفی ارائه شده‌اند؛ که از جمله آن‌ها می‌توان به اپسیلون محدودیت تکامل‌یافته (AEC) اشاره کرد. فرم کلی یک مسئله MODM به صورت زیر است.

1. Augmented Epsilon Constraint

www.SID.ir

Archive of SID

$$\begin{cases} Min\ (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ x \in X \end{cases} \quad (22)$$

AEC یکی از روش‌های MODM است که جواب‌های آن کارا[1]است. روش AEC هدف اول برای هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود؛ و سایر اهداف به کران بالای اپسیلون (e_i) محدود –می‌شوند؛ و مدل زیر جانشین می‌شود.

$$\begin{cases} Min\ f_1(x) - \sum_{i=2}^{n} \phi_i s_i \\ f_i(x) + s_i = e_i\ i = 2,3,..,n \\ x \in X \\ s_i \geq 0 \end{cases} \quad (23)$$

که در آن s_i متغیرهای نامنفی برای کمبود، و ϕ_i پارامتر برای نرمال‌سازی مقدار تابع هدف اول نسبت به هدف i است ($\phi_i = \frac{R(f_1)}{R(f_i)}$). برای اجرای بهتر روش AEC، می‌توان بازه مناسب اپسیلون‌ها (e_iها) را ابتدا با استفاده از روش Lex به‌دست آورد [31]. برای به کارگیری روش AEC در حل مسئله P_SCLSCD تعریف‌شده، هدف اقتصادی $f_1(x) = obj_1$ برای تابع هدف و $obj_2 + s_2 = e_2$ و $obj_3 + s_3 = e_3$ به‌عنوان اپسیلون قیدها در نظر گرفته می‌شوند.

4-4- روش تجزیه بندرز برای حل مسئله در ابعاد بزرگ

پس از به‌کارگیری روش RPP[2] برای مواجه شدن با عدم قطعیت داده‌ها و همچنین روش AEC برای موازنه هدف‌های مدل بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی، مدل نهایی مسئله P_SCLSCD، که مسئله‌ای از نوع برنامه‌ریزی خطی آمیخته (MILP) است؛ در حالت کلی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} MP: \\ Min\ c^t x + f^t y \\ s.t. \\ Ax + Dy \geq b \\ x \geq 0\ ,\ y \in S = \{0,1\} \end{cases} \quad (24)$$

1. Efficient
3. Robust possibilistic programming

www.SID.ir

Archive of SID

y بردار متغیرهای پیچیده‌کننده مسئله است و در صورت آزاد یا ثابت بودن آنها مسئله در زمان بسیار سریع تر حل شدنی است.

برای به‌کارگیری الگوریتم تجزیه بندرز برای حل مسئله P_SCLSCD در نظر گرفته دراین تحقیق، گام‌های زیر گذرانده می‌شود:

گام 1: متغیرهای گسسته/باینری (طراحی شبکه) را برای متغیرهای پیچیده‌ساز در نظر می‌گیریم و SP مشخص می‌شود.

گام 2: مدل DSP یا دوگان SP، که جواب آن جدا از متغیرهای پیچیده‌ساز است، به‌دست آورده می‌شود.

گام 3: مدل RMP برای این مسئله تشکیل می‌شود که، مجموعه برش‌های بهینگی و شدنی در تکرارهای الگوریتم به آن افزوده می‌شود.

گام 4: مقداری شدنی (همه یک باشند) برای متغیرهای طراحی در نظر می‌گیریم و مدل DSP را حل می‌کنیم. اگر جواب بهینه DSP متناهی باشد به «گام 5»، و اگر جواب بهینه آن نامتناهی باشد به «گام 6» می‌رویم.

گام 5: مقدار بهینه متناهی DSP را UB در نظر می‌گیریم. از جواب بهینه DSP، برش بهینگی را به مجموعه قیدهای $\{Optimality\ Cut\}$ مدل RMP اضافه می‌کنیم.

گام 6: مدل MDSP را تشکیل می‌دهیم (مدل همگن DSP برای یافتن نقاط گوشه‌ای آن و از جواب بهینه آن برش شدنی را به مجموعه قیدهای $\{Feasibility\ Cut\}$ مدل RMP اضافه می‌کنیم.

گام 7: برش بهینگی حاصل از «گام 5» یا برش شدنی حاصل از «گام 6» را به مجموعه قیدهای مدل RMP اضافه کرده و آن را حل نموده و مقدار LB را برای MP به‌دست می‌آوریم.

گام 8: اگر $|UB - LB| < tol$ بود، آنگاه به «گام 9» می‌رویم؛ در غیر این صورت جواب بهینه مدل RMP در «گام 6»را برای جواب شدنی متغیرهای گسسته در نظر می‌گیریم؛ و به «گام 4» می‌رویم. tol یک تلرانس اختیاری است.

گام 9: الگوریتم متوقف و گزارش جواب بهینه می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

5- یافته‌های پژوهش

در این بخش به مطالعه عددی مسئله P_SCLSCD پرداخته و با استفاده از چند مسئله آزمایشی، مدل، روش و حل پیشنهادی آن ارزیابی می‌شود. برای این منظور، ابتدا مطالعه‌ای عددی از محصول‌های پتروشیمی پلیمری آورده، و حل مسئله گزارش و تحلیل می‌شود. سپس، با استفاده از چند مسئله آزمایشی و معیار ارزیابی، عملکرد رویکرد حل مسئله اعتبارسنجی می‌شود.

5-1- مطالعه عددی از مسئله P_SCLSCD، تحلیل نتایج عددی و ارزیابی روش RPP پیشنهادی

در این بخش مثالی عددی از مسئله P_SCLSCD آورده می‌شود؛ که در آن شبکه زنجیره تأمین چند محصول پلیمری با استفاده از مدل پیشنهادی مدیریت می‌شود. در این مثال عددی، یک شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته می‌شود؛ که در آن ابتدا محصول پتروشیمی بنیادی اتیلن با استفاده از مواد اولیه اتان و بوتن در مجتمع‌های پتروشیمی اولیه (دو کارخانه فعال و ده مکان بالقوه) تولید و سپس در کنار کاتالیزورها برای سه خوراک مجتمع‌های پتروشیمی ثانویه (چهار کارخانه فعال وپنج مکان بالقوه) توزیع و یا صادر می‌شود. پنج نوع محصول پتروشیمی نهایی تولید می‌شود؛ که سطح‌های مختلف پلی‌اتیلن هستند. سه نوع فن‌آوری تولید، برای مجتمع‌های پتروشیمی در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض بر این است که، اتان و بوتن به طور کامل از پالایشگاه‌های داخلی تأمین می‌شود، کاتالیزورها وارداتی هستند؛ و درنهایت امکان تولید، واردات و صادرات محصول‌های پتروشیمی بنیادی اتیلن و محصول‌های پلیمری پلی‌اتیلن وجود دارد. ابعاد مسئله در مثال عددی در جدول زیر آورده شده است. همچنین داده‌های این مسئله به صورت تصادفی در بازده‌های تعریف شده در جدول شماره3 به‌دست آمده‌اند.

جدول 2 ابعاد مجموعه‌ها در مثال عددی مسئله P_SCLSCD

$\|R^1\|$	$\|R^2\|$	$\|F^{1a}\|$	$\|F^{1b}\|$	$\|F^1\|$	$\|F^{2b}\|$	$\|F^{2b}\|$	$\|F^2\|$	$\|T\|$	$\|S\|$
2	3	2	10	12	4	5	9	3	5

www.SID.ir

Archive of SID

جدول 3 داده‌های مثال عددی مسئله P_SCLSCD

rmc_r^1	U(1,2)	$\widetilde{mc_p^{im}}$	U(0.5,0.7)	u_{tps}^1, u_{tps}^2	U(30,50)
$\widetilde{rmc_r^{1im}}$	U(0.8,2.5)	rcc_p	U(2,3)	v_p	U(150,300)
pc_{pt}^1	U(0.5,0.7)	$\widetilde{dem}_p$	U(1000,1500)	$cap_{pts}^{1P}, cap_{pts}^{2P}$	U(200,300)
$tc_p^{1f^1\to f^2}, tc_p^{2f^2}$	U(0.2,0.3)	$\widetilde{\alpha_p}$	0.3	$cap^{Tf^1\to f^2}$	U(200,300)
$\widetilde{rmc_r^{2im}}$	U(2,5)	β_{rp}	0.7	cap_p^{RC}	0
fc_{tsp}^1	U(1,2)	$\widetilde{price_p^{1ex}}$	U(5,7)	cap_r^{Ref}	U(100,1500)
fc_{tsp}^2	U(2000,3000)	$\widetilde{price_p^{2ex}}$	U(8,10)	cap^{ex}	1000
$plc^{f^1\to f^2}$	U(100,150)	em_t	U(0.5,0.8)	cap^{im}	700
pc_{pt}^2	U(1,1.2)	ws_t	U(0,1)	ρ_{rp}^1, ρ_{rp}^2	1

جدول 4 مقدار بهینه هر یک از هدف‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی

اهداف	Z3 : کل انتشار CO2 در زنجیره تأمین (کمینه‌سازی)	Z2 : کل اشتغال در زنجیره تأمین (بیشینه‌سازی)	Z1 : کل هزینه زنجیره تأمین (کمینه‌سازی)
مقدار بهینه	1436	613	52350

در صورتی که به هر یک از هدف‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی به صورت جداگانه توجه شود، هر تابع هدف، در مقدار بهینه خود قرار می‌گیرد. با توجه به جدول 4، جواب $Sol_{Ideal} := (Z_1^* = 52350, Z_2^* = 613, Z_3^* = 1436)$ جوابی ایده‌آل است؛ که با توجه به تضاد بین هدف‌ها، دسترسی به این جواب ممکن نیست؛ اما جواب کارایی که کمترین فاصله یا انحراف را داشته باشد؛ به‌عنوان بهترین جواب انتخاب می‌شود. همان‌طور که در جدول شماره 5 دیده می‌شود، با به‌کارگیری روش AEC ، مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو به‌دست آورده شده است؛ که بر اساس معیار فاصله تا جواب ایده‌آل جواب پارتو انتخاب شده است. برای انتخاب یک جواب از

www.SID.ir

Archive of SID

مجموعه جواب‌های پارتو روش AEC، معیار نرمال‌شده فاصله تا ایده‌آل (ID) به‌صورت زیر تعریف می‌شود؛

$$ID = \frac{|Z_1 - Z_1^*|}{Z_1^*} + \frac{|Z_2 - Z_2^*|}{Z_2^*} + \frac{|Z_3 - Z_3^*|}{Z_3^*} \quad (25)$$

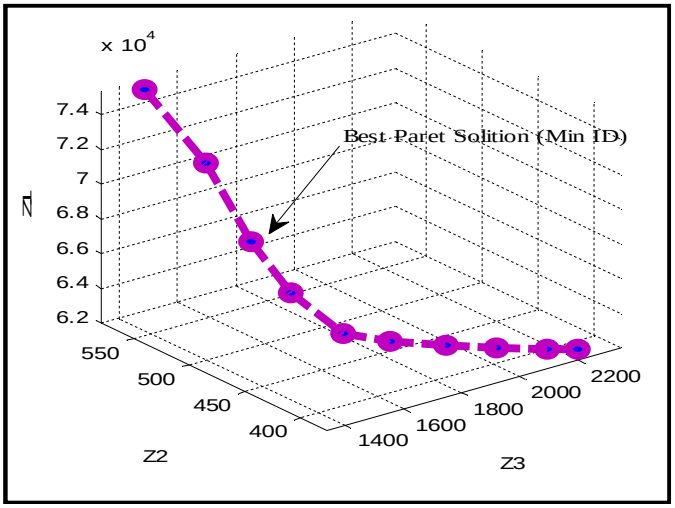
و هر جوابی که ID کمتری داشته، بهتر است. نمودار جبهه پارتو هدف‌های اقتصادی نسبت به اجتماعی و زیست‌محیطی به ترتیب در شکل‌های 2 و 3 نشان داده می‌شود. ابتدا مقادیر هدف اجتماعی و زیست‌محیطی در حالت بهینه خود تنظیم شده‌اند؛ مقدار هدف اقتصادی محاسبه شده است؛ سپس با انعطاف در هدف‌های اجتماعی و زیست‌محیطی، مقدار بهینه هزینه محاسبه شده است. در انعطاف‌های آغازین، بهبود در هزینه چشمگیراست، ولی از قسمتی به بعد بهبودی در هزینه اتفاق نمی‌افتد. این موضوع در جبهه پارتو هدف اقتصادی نسبت به زیست محیطی بیشتر دیده می‌شود.

جدول 5 جواب‌های پارتو بهینه‌سازی سه‌هدفه مبتنی بر روش AEC

Z1	Z2	Z3	انحراف از جواب ایده‌آل (ID)
75403	565	1436	0.5186
72356	520	1475	0.5610
68400	493	1525	0.5643
65504	480	1610	0.5894
63056	465	1732	0.6520
62797	445	1820	0.7410
62590	425	1934	0.8490
62484	408	2043	0.9507
62251	395	2164	1.0517
61996	390	2252	1.1162

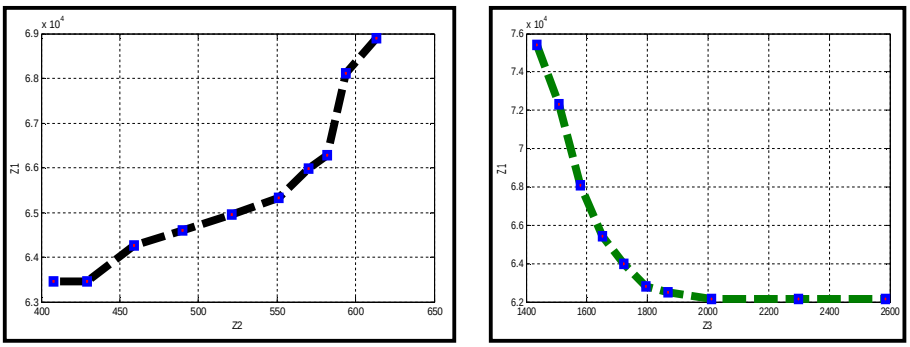
www.SID.ir

Archive of SID



شکل 2 نمودار جبهه پارتو و جواب انتخاب شده

همان‌طور که گفته‌شد، رویکرد RPP برای روبه‌رو شدن آن به‌کار گرفته شده است. برای ارزیابی رویکرد RPP برای کنترل عدم قطعیت، دو شاخص «انحراف از بهینگی» و «نقض قیدها» در سنجش عملکرد رویکردهای بهینه‌سازی در شرایط غیرقطعی استفاده می‌شوند. برای استفاده از دو شاخص، پارامترهای غیرقطعی بیست مرتبه شبیه‌سازی و عملکرد رویکرد RPP پیشنهادی سنجیده می‌شود.



شکل 3 نمودار جبهه پارتو هدف اقتصادی(Z1) نسبت به هدف اجتماعی (Z2) و هدف زیست‌محیطی(Z3)

www.SID.ir

Archive of SID

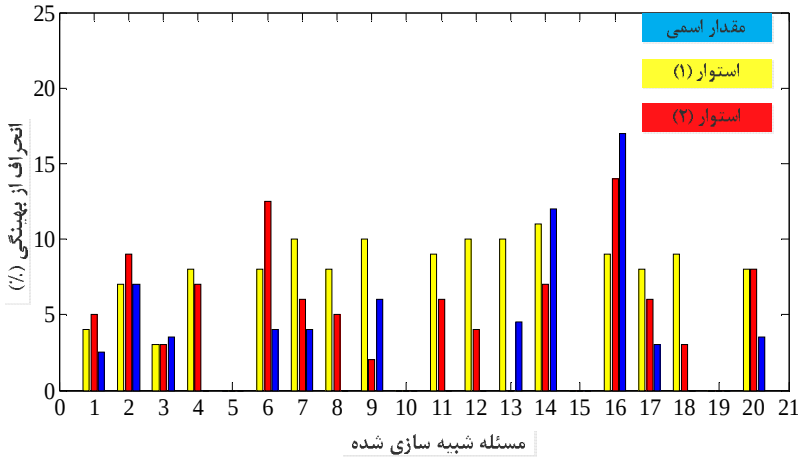
جدول 6 موازنه بین هدف‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی

موازنه اهداف اقتصادی و اجتماعی				موازنه اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی			
بهبود هزینه (%)	انحراف از اشتغال بهینه (%)	اشتغال	هزینه	بهبود هزینه (%)	انحراف از CO_2 بهینه (%)	CO_2	هزینه
-	0	613	68903	-	0	1436	75403
1.15	3	594	68110.62	4.12	5	1507.8	72296.4
3.8	5	582	66284.69	9.73	10	1579.6	68066.29
4.23	7	570	65988.4	13.25	15	1651.4	65412.1
5.19	10	551	65326.93	15.12	20	1723.2	64002.07
5.73	15	521	64954.86	16.7	25	1795	62810.7
6.24	20	490	64603.45	17.10	30	1866.8	62509.09
6.73	25	459	64265.83	17.55	40	2010.4	62169.77
7.91	30	429	63452.77	17.55	60	2297.6	62169.77
7.91	40	408	63452.77	17.55	80	2584.8	62169.77

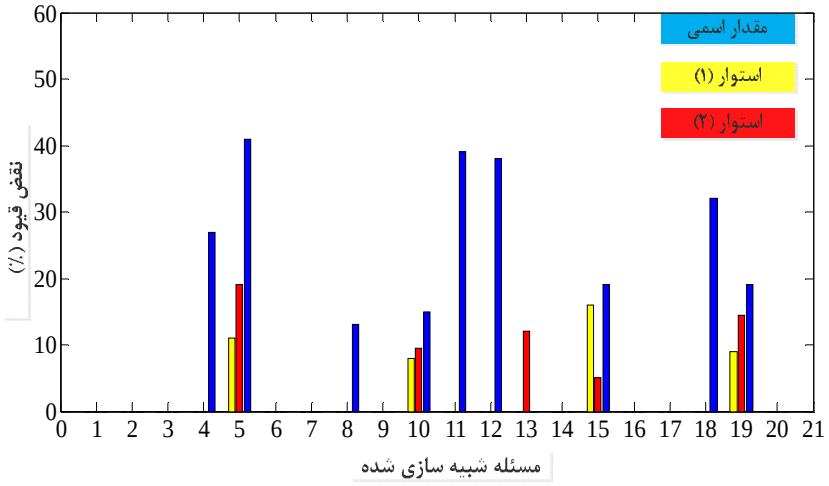
در رویکرد امکانی استوار 1 مشابه رویکرد امکانی، مقدار α از قبل تعیین می‌شود (در اینجا $\alpha = 95\%$). در رویکرد RPP (استوار 2) مقدار α نیز متغیر در نظر گرفته شده؛ و از حل مدل به‌دست آورده می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست آمده در شکل‌های 4 و5 دیده می‌شود که نخست، نوسان بهینگی در رویکرد استوار پیشنهادی بسیار کمتر از رویکرد مقدار اسمی است؛ و دوم اینکه رویکردهای امکانی استوار پیشنهادی به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به رویکرد مقدار اسمی نقص قیدها را کمتر می‌کند؛ که سبب کاهش خطرپذیری در تصمیم‌گیری می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل 4 شاخص‌های نقض بهینگی برای رویکردهای استوار و اسمی



شکل 5 شاخص‌های نقض قیدها برای رویکردهای استوار و اسمی

5-2- مسائل آزمایشی و ارزیابی روش تجزیه بندرز مبتنی بر روش AEC

برای حل مسائل ابعاد بزرگ، الگوریتم تجزیه بندرز مبتنی بر روش AEC برای موازنه هدف‌ها استفاده شده است. برای ارزیابی این رویکرد، چند آزمایش عددی در ابعاد بزرگ اتفاقی تولید شده است (جدول 7). برای ارزیابی نتیجه‌ها، عملکرد رویکرد

www.SID.ir

Archive of SID

پیشنهادی این تحقیق، با روش اپسیلون محدودیت موجود در نرم‌افزار GAMS که بر پایه CPLEX به‌دست می‌آید، و با سه معیار زیر مقایسه می‌شوند:

• معیار کمی میانگین انحراف از ایده‌آل (MID): در این شاخص، بعد از به‌دست آوردن جبهه پارتو هر روش، مجموع فاصله هر یک از جواب‌های پارتو از جواب ایده‌آل حساب می‌شود و بر تعداد جواب‌های پارتو تقسیم می‌شود. هر روش که MID کمتری داشته باشد؛ بهتر است.

• معیار کیفیت جواب‌ها (متر کیفی، QM): در این معیار تعداد جواب‌های هر روش که نسبت به روش دیگر مغلوب است؛ شمرده می‌شود. هر روش که QM بیشتری داشته باشد؛ بهتر است.

• معیار زمان اجرا (CPU_Time): هر روش که مسئله را در زمان کمتری حل کند؛ بهتر است.

جدول 7 ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی بندرز و AEC برای حل مسائل آزمایشی

اندازه مسئله SCLSC آزمایشی											معیارهای ارزیابی روش‌های حل								
$\|R^1\|$	$\|R^2\|$	$\|F^{1a}\|$	$\|F^{1b}\|$	$\|F^1\|$	$\|F^{2b}\|$	$\|F^{2b}\|$	$\|F^2\|$	$\|T\|$	$\|S\|$	Benders_AEC (روش پیشنهادی)			CPLEX_EC			درصد بهبود		
										MID	QM	CPU	MID	QM	CPU	MID	QM	CPU
5	1	10	15	25	10	15	25	3	5	146.31	12	32.4	163.21	10	52.2	10.35	20.00	37.93
6	2	15	20	35	15	20	35	3	5	190.42	13	56.1	203.45	10	68.4	6.40	30.00	17.98
7	2	20	25	45	20	25	45	3	5	236.41	15	65.8	303.65	12	77.1	22.14	25.00	14.66
8	3	22	30	52	22	30	52	3	5	417.74	15	73.1	476.31	11	98.3	12.30	36.36	25.64
9	3	24	35	57	24	35	57	4	5	820.32	17	91.4	930.21	13	132.4	11.81	30.77	30.97
10	4	26	40	66	26	40	66	4	5	948.59	20	108.5	971.31	13	161.76	2.34	53.85	32.93
12	4	28	45	73	28	45	73	4	5	1358.6	22	154.2	1451.34	15	240.3	6.39	46.67	35.83
15	5	30	50	80	30	50	80	5	5	1370.06	26	253.6	1494.21	16	381	8.31	62.50	33.44
15	5	32	55	87	32	55	87	5	5	1436.26	32	386.9	1565.29	19	469.8	8.24	68.42	17.65
15	5	35	60	95	35	60	95	5	5	1447.33	38	502.3	1534.87	23	612.9	5.70	65.22	18.05
میانگین																9.398	43.879	26.508

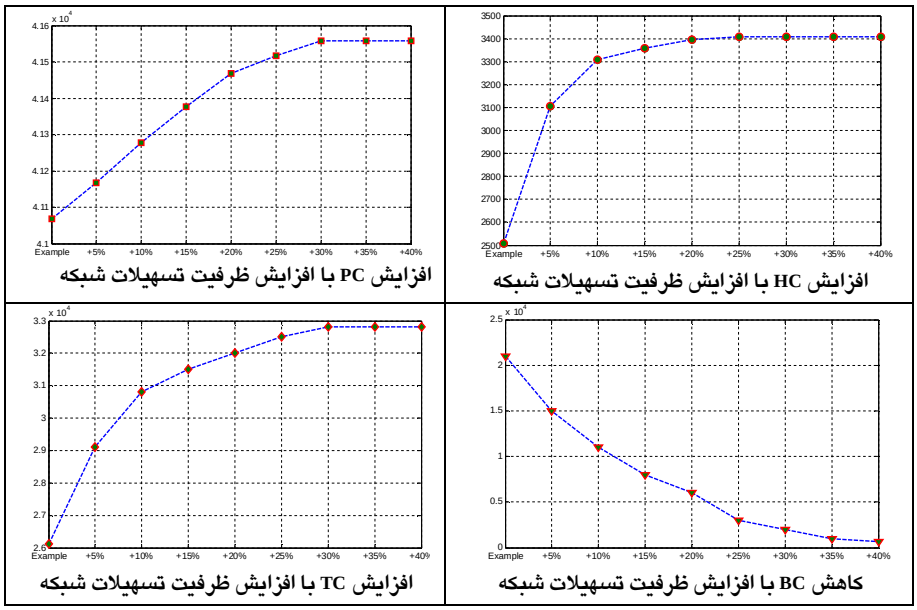
5-3- ارائه چند تحلیل حساسیت

ظرفیت تسهیلات از جمله پارامترهایی است که، بر تصمیم‌های میزان تولید، موجودی و ... تأثیرگذار است؛ و در نتیجه آن، بر هزینه‌های زنجیره ارائه محصول‌های

www.SID.ir

Archive of SID

پتروشیمی مانند: هزینه‌های تولید(PC)، نگهداری(HC)، کمبود(BC) و حمل‌ونقل(TC) تأثیر دارد. با افزایش ظرفیت، میزان تولید بیشتر و این سبب افزایش PC می‌شود؛ همچنین از میزان افزایش 30 درصد به بعد تغییری در هزینه‌های تولید ایجاد نمی‌شود؛ و دلیل این است که، با اینکه ظرفیت تولید وجود دارد، نیازی به تولید بیشتر نیست؛ زیرا کمبود تقاضای سیستم جبران شده است. لازم به توضیح است که چون میزان کاهش هزینه کمبود بیشتر از افزایش هزینه‌های تولید، موجودی و حمل‌ونقل است، در نهایت هزینه کل کاهش می‌یابد و از این رو افزایش ظرفیت تسهیلات شبکه موجب به افزایش سود می‌شود.



شکل 6 نمودار تغییر روند اجزای هزینه با تغییر در پارامتر ظرفیت تسهیلات

6- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق مسئله مدیریت زنجیره تأمین محصول‌های پتروشیمی (مسئله P_SCLSCD)، برنامه‌ریزی بلند مدت آن و مسئله طراحی شبکه در زنجیره تأمین محصول‌های این صنعت مورد بررسی قرار گرفته است. مدلی برای بهینه سازی چندهدفه برای مسئله گفته شده است. در مدل پیشنهادی، هدف اقتصادی، کم کردن

www.SID.ir

Archive of SID

هزینه‌های زنجیره تأمین، هدف اجتماعی، اشتغال‌زایی بیشتر و در نهایت هدف زیست‌محیطی، کم کردن انتشار آلودگی‌ها است. در مدل پیشنهادی این مقاله، بهینه‌سازی در P_SCLSCD به صورتی است که، هدف‌های گفته شده در بلند مدت در حد مطلوبی به‌دست آورده شوند. این سه هدف، با استفاده از روش AEC جبهه پارتویی از جواب‌های کارا به‌دست آورده شده است. نبودقطعیت داده در مدل پیشنهادی با استفاده از رویکرد RPP کنترل شده است؛ که بر اساس نتایج به‌دست آمده و عملکرد آن بر پایه استواری شدنی بودن و استواری بهینگی رخ داده است؛ نتیجه‌های عددی نشان می‌دهد که، نه تنها نوسان بهینگی در رویکرد استوار پیشنهادی بسیار کمتر از رویکرد مقدار اسمی است؛ بلکه به‌طور قابل ملاحظه‌ای نقص قیدها کمتر شده، که موجب کاهش ریسک در تصمیم‌گیری است. به منظور حل مسئله P_SCLSCD در ابعاد بزرگ و موازنه بین هدف‌ها، روش تجزیه بندرز استفاده شده است. برای تحقیق‌های آینده پیشنهاد می‌شود که، به برنامه‌ریزی‌های عملیاتی مجتمع‌های پتروشیمی توجه شود. برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات تجهیزات پتروشیمی و مهندسی سیستم‌های فرایند تولید محصول‌های پتروشیمی در زنجیره تأمین توجه شوند.

7- منابع

[1] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi, *Managing The Supply Chain: Definitive Guide*. Tata McGraw-Hill Education, 2004.

[2] A. Yousefi-Babadi, R. Tavakkoli-Moghaddam, A. Bozorgi-Amiri, and S. Seifi, "Designing a Reliable Multi-Objective Queuing Model of a Petrochemical Supply Chain Network under Uncertainty: A Case Study," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 100, pp. 177-197, 2017/05/08/ 2017.

[3] E. Hofmann, "Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation, S. Chopra, P. Meindl ",*Journal of Purchasing and Supply Management*

[4] K. Govindan, H. Soleimani, and D. Kannan, "Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future," *European Journal of Operational Research*, vol. 240, no. 3, pp. 603-626, 2015.

www.SID.ir

Archive of SID

[5] A. Jabbarzadeh, M. Haughton, and A. Khosrojerdi, "Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application," *Computers & Industrial Engineering,*.

[6] J. Quariguasi Frota Neto, G. Walther, J. Bloemhof, J. Van Nunen, and T. Spengler, "From closed-loop to sustainable supply chains: the WEEE case," *International Journal of Production Research,* 2010.

[7] B. Vahdani, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Modarres, and A. Baboli, "Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust-M/M/c queuing model," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 2012.

[8] S. Seuring, "A review of modeling approaches for sustainable supply chain management," *Decision Support Systems,* 2013.

[9] m. farrokh, a. azar, and g. jandaghi, "A novel robust fuzzy programming approach for closed loop supply chain design," *Modern Research in Decision Making,* vol. 1, no. 3, pp. 131-160, 2016.

[10] S. Mansoori, A. Bozorgi-Amiri, and F. Bayatloo, "A Bi-Objective Robust Optimization Model for Emergency Blood Supply Network Design under Uncertainty," *Modern Research in Decision Making,* 2018.

[11] R. Cruz-Rivera and J. Ertel, "Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico," *European Journal of Operational Research,* vol. 196, no. 3, pp. 930-939, 2009/08/01/ 2009.

[12] M. S. Pishvaee and M. Rabbani, "A graph theoretic-based heuristic algorithm for responsive supply chain network design with direct and indirect shipment," *Advances in Engineering Software,* 2011.

[13] S. Elhedhli and R. Merrick, "Green supply chain network design to reduce carbon emissions," *Transportation Research Part D: Transport and Environment,* vol. 17, no. 5, pp. 370-379, 2012.

[14] T-.S. Su, "Fuzzy multi-objective recoverable remanufacturing planning decisions involving multiple components and multiple machines," *Computers & Industrial Engineering,* vol. 72, pp. 72-83, 2014.

www.SID.ir

Archive of SID

[15] M. Zohal and H. Soleimani, "Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 133, pp. 314-337, 2016/10/01/ 2016.

[16] R. Babazadeh, J. Razmi, M. S. Pishvaee, and M. Rabbani, "A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk," *Omega*, vol. 66, pp. 258-277, 2017/01/01/ 2017.

[17] A. M. F. Fard and M. Hajaghaei-Keshteli, "A tri-level location-allocation model for forward/reverse supply chain," *Applied Soft Computing* 2018.

[18] M. Farrokh, A. Azar, G. Jandaghi, and E. Ahmadi, "A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty," *Fuzzy Sets and Systems*, 2018.

[19] R. Más and J. M. Pinto, "A mixed-integer optimization strategy for oil supply in distribution complexes," *Optimization and Engineering*, 2003.

[20] E. Schulz, S. Diaz, and A. Bandoni, "Supply chain optimisation in a petrochemical complex," in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 18: Elsevier, 2004, pp. 997-1002.

[21] A. Szklo, G. Machado, R. Schaeffer, J. Mariano, J. Sala, and M. Tavares, "The impacts of a GTL plant on Brazil's oil products supply and refinery expansion, 2005.

[22] W. B. E. Al-Othman, H. M. S. Lababidi, I. M. Alatiqi, and K. Al-Shayji, "Supply chain optimization of petroleum organization under uncertainty in market demands and prices," *European Journal of Operational Research*, 008.

[23] G. Ribas, A. Leiras, and S. Hamacher, "Tactical planning of the oil supply chain: optimization under uncertainty," in *Simposio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2011, pp. 1-1.۲

[24] K. Tong, Y. Feng, and G. Rong, "Planning under demand and yield uncertainties in an oil supply chain," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v2011.

www.SID.ir

Archive of SID

[25] L. J. Fernandes, S. Relvas, and A. P. Barbosa-Póvoa, "Strategic network design of downstream petroleum supply chains: single versus multi-entity participation," *Chemical Engineering Research and Desig*2013.

[26] H. An and W. E. Wilhelm, "An exact solution approach based on column generation and a partial-objective constraint to design a cellulosic biofuel supply chain," *Computers & chemical engineering*, vol. 71, pp. 11-23, 2014.

[27] C. Dai, Y. Cai, W. Ren, Y. Xie, and H. Guo, "Identification of optimal placements of best management practices through an interval-fuzzy possibilistic programming model," *Agricultural Water Management*, 2016.

[28] S.-P. Wan and J.-Y. Dong, "Possibility linear programming with trapezoidal fuzzy numbers," *Applied Mathematical Modelling*, 2014.

[29] H. Tanaka†, T. Okuda, and K. Asai, "On Fuzzy-Mathematical Programming," *Journal of Cybernetics*, vol. 3, no. 4, pp. 37-46, 1973/01/01 1973.

[30] M. S. Pishvaee, J. Razmi, and S. A. Torabi, "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 206, pp. 1-20, 11/1/ 2012.

[31] G. Mavrotas, "Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems," *Applied mathematics and computation*, vol. 213, no. 2, pp. 455-465, 2009.

www.SID.ir