

طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار با بکارگیری اصول ناب

حسین کماسی^{۱*}، سید محمدجواد میرزاپور آل هاشم^۲

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

چکیده

در این پژوهش، مدل‌سازی یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین پایدار با استفاده از تکنیک‌های ناب انجام می‌شود. از این رو، یک مدل چندهدفه غیرخطی عددصحیح آمیخته ارائه شده است. در این مقاله چندین تکنیک ناب معرفی شده‌اند که هر یک پس از پیاده‌سازی در سازمان اثراتی را با خود به همراه دارند و از این تکنیک‌ها برای دستیابی به یک زنجیره تأمین پایدار کمک گرفته شده است. مدل ارائه شده یک مدل سه سطحی شامل تأمین‌کنندگان، مراکز تولید و مصرف‌کنندگان نهایی است. برای حل ابتدا مدل خطی شده و سپس با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی حل می‌شود. در نهایت برای اعتبار سنجی، مدل در قالب یک مثال عددی حل شده و به تحلیل حساسیت پارامترهای مهم آن پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند که پیاده‌سازی تکنیک‌های ناب باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها شده و علاوه بر آن به سازمان در رسیدن به اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: طراحی زنجیره تأمین، پایداری، زنجیره تأمین ناب، برنامه‌ریزی آرمانی فازی

۱- مقدمه

مشتریان تازه مسائل اجتماعی را رعایت کنند تا تصویر مطلوبی از خود به‌جای بگذارند.

از ویژگی‌های بکارگیری اصول و تکنیک‌های ناب ۴ در زنجیره تأمین، شناسایی و کاهش فعالیت‌هایی است که ارزش‌افزوده‌ای برای سازمان در بر ندارد. همچنین این کار باعث کاهش موجودی و کاهش هرگونه ضایعات در زنجیره تأمین است که مجموعه این ویژگی‌ها باعث کاهش هزینه‌ها، بهبود کیفیت و پاسخگویی بهتر به نیازهای مشتریان می‌شود [۲]. زنجیره تأمین ناب به‌عنوان ابزاری است برای کمک به مدیران تا بخش‌های پربازده زنجیره تأمین را بیابند و با

گرمایش جهانی^۳ موضوعی است که امروزه در سراسر دنیا به یک چالش مهم تبدیل شده است. از علل اصلی این گرمایش رهاسازی گازهای گلخانه‌ای در جو است و از عوامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای مسئله حمل‌ونقل است که ۲۲٪ از کل آن را در برمی‌گیرد [۱].

قوانین سخت‌گیرانه دولت‌ها و مسئله گرمایش جهانی سازمان‌ها را مجبور کرده که مسائل زیست‌محیطی را در تصمیمات خود در نظرگیرند. با توجه به افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان در مورد مسئولیت‌های اجتماعی و وجود رقبا، سازمان‌ها باید برای حفظ بازارهای خود و تصاحب

^۲ - استادیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پست الکترونیک: mirzapour@aut.ac.ir

^{۱*} - دانشجوی دانش‌آموخته کارشناس ارشد مهندسی صنایع، پردیس گرمسار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، نویسنده پاسخگو، پست الکترونیک: hossein.komasi@aut.ac.ir، نشانی: گرمسار، میدان معلم، بلوار شهید مطهری، ابتدای خ شهید شادلو؛ کد پستی: ۳۵۸۱۸۶۷۴۶۱

تمرکز بر روی آن بخش‌ها، به سطح بالاتری از عملکرد دست یابند [۳].

اصول ناب به دلیل حذف دلایل بالقوه نگهداری محصول، استقرار سیستم تولید بهنگام^۱ با رویکرد حداقل موجودی سیستم، حذف مرجوعی‌ها، به حداقل رساندن ضایعات و جایگزینی فرآیندها، در بهبود نظارت بر منابع مؤثر است که این نظارت در نهایت به سود دهی شرکت‌ها کمک می‌کند، در نتیجه باعث بهبود عملکرد اقتصادی سازمان می‌شود، همچنین به دلیل رویکرد ذاتی آن برای حذف ضایعات منجر به کاهش آلودگی می‌گردد. از دیگر نتایج این رویکرد، بهبود شرایط اجتماعی در سطح جهانی است؛ برای مثال کاهش اتلاف انرژی، آب و هر نوع ماده تجدید ناپذیر در این دسته‌بندی قرار می‌گیرد. با پیاده‌سازی اصول ناب، موانع موجود برای کاهش آلودگی که به‌طور سنتی گران هستند حذف می‌شوند، در نتیجه این اصول موجب کاهش هزینه‌های مدیریت زیست‌محیطی می‌شود و مکمل مدیریت سبز است. وقتی سازمان برای توجه به جنبه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی پایداری^۲ تحت فشار قرار می‌گیرد، یکپارچه کردن ابزارهای ناب به‌عنوان وسیله‌ای برای تسهیل رسیدن به این هدف عمل خواهد کرد. سیستم‌های ناب به‌عنوان یک توانمندساز، گاهی اوقات تعیین‌کننده و در برخی موارد عنصر توسعه پایداری عمل می‌کند [۴].

۲- مرور ادبیات

وینکلر معتقد است که اگر شرکت‌ها سیستم تولید حلقه بسته را اجرا کنند، بسیاری از اثرات منفی زیست‌محیطی مانند ضایعات، مصرف انرژی، فرآیند حمل‌ونقلی و بسته‌بندی می‌تواند برطرف شود. در این تحقیق، آن‌ها مفهومی از زنجیره تامین پایدار^۳ را به تصویر می‌کشند که ابزار مناسبی برای طراحی سیستم تولید حلقه بسته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد پیاده‌سازی زنجیره تامین پایدار باعث می‌شود که ارتباط فرآیندهای بین اجزا زنجیره تامین از یک اقتصاد با جریان مستقیم به‌صورت یک اقتصاد با جریان دایره‌ای تبدیل شود، همچنین یک اقتصاد حلقه بسته، در نهایت منجر به بهبود عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی سازمان می‌شود [۵]. کاستانتینو و همکاران، یک شبکه زنجیره تامین پایدار را در شرایط عدم قطعیت طراحی کردند. برای دستیابی به پایداری

در زنجیره تامین شاخص‌های مناسب مانند انتشار گاز دی‌اکسید کربن و مصرف انرژی در نظر گرفته شده. عدم قطعیت موجود از طریق تئوری فازی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین جواب‌های حلقه بسته و لجستیک معکوس با ساختار سنتی روبه‌جلو زنجیره تامین مقایسه شده‌اند تا عملکرد پایداری بهبود یابد [۶]. رن و همکاران یک مدل زنجیره تامین پایدار را باهدف اولویت‌بندی و طبقه‌بندی پایداری در زنجیره تامین هیدروژن برای کمک به تصمیم‌گیری ذینفعان طراحی کردند. در این پژوهش، برای ارزیابی پایداری زنجیره تامین هیدروژن، نظریه گسترش و روند تحلیل سلسله مراتبی باهم ترکیب می‌شوند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان از کارایی روش ارائه شده دارند [۷]. پتريکا و همکاران یک سیستم توزیع معکوس کارآمد را برای حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار ارائه دادند. زنجیره تامین در نظر گرفته شده در مطالعه آنان شامل یک کارخانه، مجموعه‌ای از نقاط بالقوه برای مراکز پخش که هر یک دارای ظرفیت مجزا هستند و مجموعه مصرف‌کنندگان نهایی که تقاضای مختلفی دارند است. هدف از این پژوهش انتخاب تعداد و مکان مراکز پخش لازم برای تامین تقاضای تمام مشتریان و تخصیص مشتریان به مراکز پخش است بطوریکه هزینه‌های نصب و حمل که با انتشار گازهای گلخانه‌ای یکپارچه شده، کمینه شود. آن‌ها برای حل مدل از چندین الگوریتم هیورستیک بهبودیافته کلاسیک استفاده کردند [۸]. گنلا و همکاران یک مدل احتمالی عدد صحیح آمیخته خطی زنجیره تامین پایدار تولید هیبریدی بیواتانول را ارائه کردند که ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پایداری را تحت عدم قطعیت‌های گوناگون مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله یک مدل احتمالی عدد صحیح آمیخته خطی برای طراحی بهینه مدل معرفی شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که وقتی استانداردهای مختلف پایداری اعمال می‌شود، طراحی بهینه مدل تغییر می‌کند [۹]. همباچ و همکاران یک مدل زنجیره تامین پایدار و استوار بیودیزل را برای کاهش میزان انتشار کربن دی‌اکسید در اتحادیه اروپا ارائه کردند. آن‌ها برای دستیابی به این هدف به‌طور همزمان جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی را با مسائل اقتصادی در نظر گرفتند. همچنین برای طراحی پایدار

1- Just in time (JIT)

2- sustainability

3- sustainable supply chain

^۱ Just in time (JIT)

در این مقاله یک مدل زنجیره تأمین روبه‌جلو پایدار معرفی می‌شود که اصول و تکنیک‌های ناب برای کمک به دستیابی سریع‌تر و راحت‌تر به اهداف پایداری، با آن ترکیب شده است. یک مجموعه از تکنیک‌های ناب در نظر گرفته شده که هر یک از آن‌ها پس از پیاده‌سازی اثراتی را بر سیستم اعمال می‌کنند که به واسطه همین اثرات دارای چندین اثر مختلف بر روی ابعاد گوناگون پایداری هستند. مدل ارائه شده یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی چندهدفه، متشکل از تأمین‌کنندگان، مراکز تولید و مصرف‌کنندگان نهایی است که هر یک از محصولات تولیدی نیز از اجزا گوناگونی ساخته شده‌اند.

چندین مکان بالقوه برای استقرار مراکز تولید وجود دارد که از بین آن‌ها تعدادی مکان بهینه انتخاب می‌شود. همچنین یکسری هزینه‌های ثابت و متغیر برای استقرار و استفاده از مراکز تولید در نظر گرفته شده است.

چند نوع تکنولوژی تولید برای استفاده در مراکز تولید وجود دارد که هر یک دارای مصرف انرژی متفاوت، هزینه‌های ثابت و متغیر متفاوت، تعداد نیروی انسانی موردنیاز متفاوت و خطرات و ریسک‌های متفاوتی هستند که بر روی ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی زنجیره تأمین اثرگذار هستند و به هر مرکز تولید نیز تنها یک تکنولوژی تولید قابل تخصیص است.

تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات نهایی و نیز تأمین مواد اولیه از طرف تأمین‌کنندگان مشخص است و مدل باید به گونه‌ای طراحی شود که میزان برآورده کردن تقاضای مصرف‌کنندگان به حداکثر مقدار خود برسد.

هدف از مقاله حاضر تعیین موارد زیر است:

(۱) انتخاب بهینه تأمین‌کنندگان، وسایل حمل، مکان مناسب برای استقرار مراکز تولید

(۲) انتخاب تکنیک‌های ناب و تعیین میزان پیاده‌سازی آن‌ها در مراکز تولید

(۳) انتخاب برنامه کاری و تکنولوژی تولیدی مناسب برای استفاده در مراکز تولید

(۴) تعیین میزان بهینه جریان مواد در طول زنجیره تأمین به گونه‌ای که هزینه‌های کل شبکه زنجیره تأمین کمینه شود و میزان اثرات مثبت زیست‌محیطی و اجتماعی ایجادشده ناشی از فعالیت زنجیره تأمین بیشینه گردد.

و استوار زنجیره تأمین، عدم قطعیت در پارامترها و همچنین اثر ریسک‌های تصمیم‌گیرندگان در تصمیماتشان تر پایداری را موردبررسی قرار داند [۱]. داس یک مدل زنجیره تأمین پایدار را با در نظر گرفتن اصول و ابزارهای ناب در شرایط قطعی محیطی طراحی کرده است. هدف از این مقاله یکپارچه کردن کاربردهای سیستم‌های ناب در طراحی و برنامه‌ریزی مدل زنجیره‌تأمین برای بهبود عملکرد کلی پایداری سیستم است. مدل ارائه شده از طریق روش برنامه‌ریزی آرمانی حل شده است [۴].

به‌طور خلاصه سهم این مقاله که آن را از سایر کارهای پژوهشی متمایز می‌کند به‌صورت زیر است:

(۱) در نظر گرفتن مقدار تأثیر تکنیک‌های ناب بر روی جنبه‌های مختلف پایداری در طراحی زنجیره تأمین پایدار و ناب.

(۲) اتخاذ تصمیمات در سطوح استراتژیک مانند انتخاب تکنولوژی تولید و در سطوح تاکتیکال، مانند تعیین میزان جریان مواد بین سطوح مختلف زنجیره تأمین در طراحی زنجیره تأمین پایدار و ناب.

(۳) در نظر گرفتن فاکتورهای متنوعی برای بعد اجتماعی پایداری در طراحی زنجیره تأمین پایدار و ناب (در پژوهش‌های پیشین اغلب عواملی غیرمرتبط نظیر میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای مضر به آن نسبت داده شده است).

۳- تعریف مسئله

تکنیک‌های ناب بر روی پایداری اثرگذار هستند، به همین دلیل ارائه یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین پایدار که در آن اثرات ناب لحاظ شده باشد، ضروری است. به علت درآمیختن اثرات ناب در مسئله طراحی زنجیره تأمین، مدل ریاضی ارائه شده، یک مدل غیرخطی خواهد بود. همچنین با توجه به ماهیت پایداری که در برگیرنده سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است، مدل پیشنهادی یک مدل چندهدفه خواهد بود.

از آنجاکه در مدل‌های غیرخطی، فضای حل غیرمحدب است و جواب به‌دست‌آمده، یک جواب بهینه عمومی برای مسئله نخواهد بود، ابتدا باید مدل خطی شود. پس‌از آن با روش‌های رایج حل چندهدفه، مدل پیشنهادی به یک مدل تک هدفه معادل تبدیل می‌شود.

۴- مدل ریاضی

در این بخش اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای به کار رفته در مسئله معرفی می‌شوند و توابع هدف و محدودیت‌های مدل شرح داده می‌شوند.

اندیس‌ها

| | |
|---------------------------|---------------------|
| $t = \{1, 2, \dots, T\}$ | t: تکنولوژی تولید |
| $w = \{1, 2, \dots, W\}$ | w: برنامه کاری |
| $l = \{1, 2, \dots, 10\}$ | l: تکنیک ناب |
| $c = \{1, 2, \dots, C\}$ | c: ماده اولیه |
| $q = \{1, 2, \dots, Q\}$ | q: کیفیت مواد اولیه |
| $s = \{1, 2, \dots, S\}$ | s: تأمین‌کننده |
| $j = \{1, 2, \dots, J\}$ | j: مرکز تولید |
| $r = \{1, 2, \dots, R\}$ | r: مشتری |

پارامترها

| | |
|------------|--|
| FLP_{jl} | : هزینه ثابت پیاده‌سازی تکنیک ناب l در مرکز تولید j |
| OPC_{jl} | : هزینه متغیر پیاده‌سازی تکنیک ناب l در مرکز تولید j |
| CS_{scq} | : هزینه تأمین هر واحد قطعه c با درجه کیفی q توسط تأمین‌کننده s |
| FS_{scq} | : هزینه ثابت سفارش‌دهی برای تأمین قطعه c با کیفیت q توسط تأمین‌کننده s |
| FPC_{jt} | : هزینه ثابت احداث کارخانه j با تکنولوژی t |
| CM_{jw} | : هزینه تولید یک واحد محصول p با تکنولوژی t و برنامه کاری w در کارخانه j |
| CT_{jr} | : هزینه حمل هر واحد محصول p از کارخانه j به مشتری r |
| ES_{scq} | : مقدار انرژی مورد نیاز (مگاژول) برای تولید قطعه c با کیفیت q توسط تأمین‌کننده s |
| STL | : ظرفیت کامیون برای حمل بار |
| CAP_{jt} | : ظرفیت تولید کارخانه j با تکنولوژی t |
| DS_{sj} | : فاصله تأمین‌کننده s از کارخانه j |
| THE | : میزان انتشار گازهای آلاینده در هر کیلومتر برای حمل بار |

| | |
|-------------|---|
| ENP_{jt} | : انرژی مورد نیاز (مگاژول) برای تولید هر واحد محصول p با تکنولوژی t در کارخانه j |
| TD_{jr} | : فاصله کارخانه j تا مشتری r |
| TE | : مصرف انرژی به ازای هر کیلومتر برای حمل مواد |
| ar_j | : مساحت کارخانه j |
| WRP_t | : نرخ تولید ضایعات برای تولید هر واحد محصول p با تکنولوژی t |
| ρ_{cq} | : مقدار ماده اولیه نوع c و با کیفیت q برای تولید هر واحد محصول p |
| HMP_{jt} | : مقدار CO_2 تولید شده (به کیلوگرم) برای تولید هر واحد محصول p در کارخانه j با تکنولوژی t |
| θ_w | : ضریب رضایت کارکنان با بکارگیری برنامه w |
| δ_w | : ضریب آموزش کارکنان با بکارگیری برنامه w |
| r_t | : میزان روزهای کاری از دست رفته به خاطر خطرات محیط کار در نتیجه به کارگیری تکنولوژی t |
| α_q | : ضریب بهداشت کارکنان با انتخاب کیفیت q |
| β_q | : ضریب رضایت مشتری با انتخاب کیفیت q |
| WRC_{cq} | : نرخ تولید ضایعات برای تولید هر واحد ماده اولیه c با کیفیت q |
| HE_{scq} | : مقدار CO_2 تولید شده برای تولید هر واحد قطعه c توسط تأمین‌کننده s |
| D_r | : میزان تقاضای مشتری r |
| ST_s | : ضریب رضایت کارکنان تأمین‌کننده s با توجه به برنامه کاری تأمین‌کننده |
| TR_s | : ضریب آموزش کارکنان تأمین‌کننده s با توجه به برنامه کاری تأمین‌کننده |
| DM_s | : ضریب ایمنی محیطی تأمین‌کننده s با توجه به تکنولوژی تولیدی مورد استفاده |
| LCS_l | : ضریب تکنیک ناب l برای هزینه‌های ثابت سفارش |
| EE_l | : اثر تکنیک ناب l بر روی مصرف انرژی |
| EV_l | : اثر تکنیک ناب l بر روی تولید ضایعات |
| EH_l | : اثر تکنیک ناب l بر روی انتشار آلاینده‌گی |
| EC_l | : اثر تکنیک ناب l بر روی مصرف مواد اولیه |
| ECP_l | : اثر تکنیک ناب l بر روی کاهش هزینه تولید |
| ECH_l | : اثر تکنیک ناب l بر روی کاهش هزینه نگهداری |
| ERW_l | : اثر تکنیک ناب l بر روی رضایت کارکنان |

x_{jrt} : مقدار محصولی که در مرکز تولید j با تکنولوژی t تولید شده و به مشتری r فرستاده می‌شود

x'_j : مقدار کل تولید در کارخانه j

x''_{jt} : مقدار کل تولید کارخانه j با تکنولوژی t

u_{sjcq} : اگر تامین کننده s ماده اولیه c را با کیفیت q برای کارخانه j تامین کند 1 ، در غیر این صورت صفر

u''_s : تعداد کل دفعات خرید از تامین کننده s

q_{sjcq} : مقدار ماده c که کارخانه j با کیفیت p از تامین کننده s خریداری می‌کند

VSR_{sj} : تعداد جابجایی بین تامین کننده و تولید کننده

VRP_{jr} : تعداد جابجایی بین تولید کننده و مصرف کننده

HSR_{sj} : متغیرهای کمکی برای محاسبه تعداد دفعات جابجایی بین تامین کننده و تولید کننده

HRP_{jr} : متغیرهای کمکی برای محاسبه تعداد دفعات جابجایی بین تولید کننده و مصرف کننده

ERC_l : اثر تکنیک ناب l بر روی رضایت مشتری

EHL_l : اثر تکنیک ناب l بر روی بهداشت کارکنان

ESF_l : اثر تکنیک ناب l بر روی ایمنی محیط کار

ETR_l : اثر تکنیک ناب l بر روی آموزش کارکنان

ZP : ضرایب وزنی برای اجزا تابع هدف زیست محیطی

ET : ضرایب وزنی برای اجزا تابع هدف اجتماعی

متغیرهای تصمیم

qp_{jl} : اگر تکنیک ناب l در کارخانه j پیاده سازی شود 1 و در غیر این صورت صفر

pa_{jl} : درصد پیاده سازی تکنیک ناب l در کارخانه j

p_{jt} : اگر مرکز تولید j با تکنولوژی تولید t تاسیس شود 1 و در غیر این صورت صفر

pl_{wj} : اگر برنامه کاری w به مرکز تولید j تخصیص داده شود 1 و در غیر این صورت صفر

y_{jqc} : اگر کارخانه j قطعه c را با کیفیت q بخرد 1 و در غیر این صورت صفر

توابع هدف و محدودیت‌ها

$$ECO = Spic + Suc + Pr dc \quad (1)$$

$$Spic = \sum_{j,l} FLP_{jl} qp_{jl} + \sum_{j,l} OPC_{jl} ar_j pa_{jl} \quad (2)$$

$$Suc = \sum_s FS_s u''_s + \sum_{s,j,c,q} CS_{scq} q_{sjcq} + \sum_{s,j} FCT.DS_{sj} VSR_{sj} \quad (3)$$

$$Pr dc = \sum_{j,t} FCP_{jt} (ar_j / 100) p_{jt} + \sum_{j,t,w} CM_{jtw} x''_{jt} pl_{wj} - \sum_{j,t,w,l} ECP_{l} CM_{jtw} x''_{jt} pa_{jl} pl_{wj} + \sum_{jr} FCT.TD_{jr} VRP_{jr} \quad (4)$$

$$En = EnSu + EnPr \quad (5)$$

$$EnSu = ZP_1 \sum_{s,j} VSR_{sj} DS_{sj} TE + ZP_1 \sum_{s,j,c,q} ES_{scq} q_{sjcq} + ZP_2 \sum_{s,j,c,q} WRC_{cq} q_{sjcq} + ZP_3 \sum_{s,j} VSR_{sj} DS_{sj} THE + ZP_3 \sum_{s,j,c,q} HE_{scq} q_{sjcq} \quad (6)$$

$$EnPr = ZP_1 \sum_{j,r} VRP_{jr} TD_{jr} TE + ZP_1 \sum_{j,r,t} ENP_{jt} x_{jrt} - ZP_1 \sum_{j,t,l} EE_l ENP_{jt} x''_{jt} pa_{jl} + ZP_2 \sum_{j,r,t} WRP_{jt} x_{jrt} - ZP_2 \sum_{j,t,l} EV_l WRP_{jt} x''_{jt} pa_{jl} + ZP_3 \sum_{j,c,q} \rho_{cq} x'_j y_{jqc} - ZP_3 \sum_{j,c,q,l} \rho_{cq} EC_l x'_j y_{jqc} pa_{jl} + ZP_4 \sum_{j,r} VRP_{jr} TD_{jr} THE + ZP_4 \sum_{j,r,t} HMP_{jt} x_{jrt} - ZP_4 \sum_{j,t,l} EH_l HMP_{jt} x''_{jt} pa_{jl} \quad (7)$$

$$So = SoSu + SoPr \quad (8)$$

$$SoSu = ET_1 \sum_{s,j,c,q} ST_s q_{sjcq} + ET_2 \sum_{s,j,c,q} TR_s q_{sjcq} - ET_3 \sum_{s,j,c,q} DM_s q_{sjcq} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} SoPr = & ET_1 \sum_{j,t,w} \theta_w x_{jt}'' p_{lwj} + ET_1 \sum_{j,t,w,l} ERW_l \theta_w x_{jt}'' p_{lwj} p_{ajl} \\ & + ET_2 \sum_{j,t,w} \delta_w x_{jt}'' p_{lwj} + ET_2 \sum_{j,t,w,l} ETR_l \delta_w x_{jt}'' p_{lwj} p_{ajl} \\ & - ET_3 \sum_{j,r,t} r_t x_{jrt} + ET_3 \sum_{j,t,l} ESF_l r_t x_{jt}'' p_{ajl} \\ & - ET_4 \sum_{j,c,q} \alpha_q \rho_{cq} x'_j y_{sjcq} + ET_4 \sum_{j,c,q,l} EHL_l \alpha_q \rho_{cq} x'_j y_{sjcq} p_{ajl} \\ & + ET_5 \sum_{j,c,q} \beta_q \rho_{cq} x'_j y_{sjcq} + ET_5 \sum_{j,c,q,l} ERC_l \beta_q \rho_{cq} x'_j y_{sjcq} p_{ajl} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sum_t p_{jt} \leq 1 \quad \forall j \quad (11)$$

$$qp_{lj} \leq \sum_t p_{jt} \quad \forall j, l \quad (12)$$

$$p_{ajl} \leq qp_{lj} \quad \forall j, l \quad (13)$$

$$\sum_w p_{lwj} = \sum_t p_{jt} \quad \forall j \quad (14)$$

$$\sum_q y_{jqc} = \sum_t p_{jt} \quad \forall j, c \quad (15)$$

$$y_{jqc} = \sum_s u_{sjcq} \quad \forall j, c, q \quad (16)$$

$$u_s'' = \sum_{j,c,q} u_{sjcq} \quad \forall s \quad (17)$$

$$D_r = \sum_{j,t} x_{jrt} \quad \forall r \quad (18)$$

$$\sum_r x_{jrt} \leq CAP_{jt} p_{jt} \quad \forall j, t \quad (19)$$

$$\sum_{r,t} x_{jrt} = x'_j \quad \forall j \quad (20)$$

$$\sum_r x_{jrt} = x''_{jt} \quad \forall j, t \quad (21)$$

$$q1_{sjcq} \leq x'_j \quad \forall s, j, c, q \quad (22)$$

$$q1_{sjcq} \leq Mu_{sjcq} \quad \forall s, j, c, q \quad (23)$$

$$q1_{sjcq} \geq x'_j - M(1 - u_{sjcq}) \quad \forall s, j, c, q \quad (24)$$

$$q_{sjcq} = \rho_{cq} q1_{sjcq} \quad \forall s, j, c, q \quad (25)$$

$$\sum_{j,q} q_{sjcq} \leq CAS_{sc} \quad \forall s, c \quad (26)$$

$$\sum_{c,q} \frac{q_{sjcq}}{STL} + HSR_{sj} = VSR_{sj} \quad \forall s, j \quad (27)$$

$$\sum_t \frac{x_{jrt}}{STL} + HRP_{jr} = VRP_{jr} \quad \forall j, r \quad (28)$$

$$VSR_{sj} + HSR_{sj} \geq 0 \quad \forall s, j \quad (29)$$

$$VRP_{jr} + HRP_{jr} \geq 0 \quad \forall j, r \quad (30)$$

تأسیس شد آنگاه باید تمامی قطعات را با دقتاً یک کیفیت خریداری کند. محدودیت (۱۶) بیانگر این است که اگر تولیدکننده J قطعه C را با کیفیت Q استفاده کند آنگاه باید آن را از دقتاً یک تأمین‌کننده خریداری کند. محدودیت (۱۷) بیانگر کل تعداد دفعات خرید از تأمین‌کننده S است. محدودیت (۱۸) محدودیت تعادلی تقاضا است و بیانگر این است که تقاضای مشتری I از محصول P برابر است با مجموع ارسالی‌ها از تمام مراکز تولید به آن مشتری. محدودیت (۱۹) تضمین می‌کند که در صورت تولید محصول P در مرکز تولید J ، میزان تولید از ظرفیت تولید بیشتر نباشد. محدودیت (۲۰) بیانگر تعداد کل تولیدات هر مرکز تولید است. محدودیت (۲۱) نشان‌دهنده کل تولیدات هر مرکز تولید با تکنولوژی t است. محدودیت‌های (۲۲)، (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) نشان‌دهنده این است که کارخانه J قطعه C را به چه میزان با کیفیت Q از تأمین‌کننده S خریداری کرده است. محدودیت (۲۶) بیانگر این است که مقدار خرید از هر تأمین‌کننده نباید بیشتر از ظرفیت آن باشد. محدودیت‌های (۲۷)، (۲۸)، (۲۹) و (۳۰) تعداد دفعات جابجایی بین تأمین‌کننده و تولیدکننده و تولیدکننده و مشتری را برای حمل محصولات و مواد اولیه مشخص می‌کنند.

محاسبه اثر تکنیک‌های ناب بر پایداری

معیارهایی که در این مقاله برای ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شده‌اند عبارت‌اند از هزینه‌های سیستم، میزان تولید ضایعات، انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف مواد اولیه، مصرف انرژی، ایمنی محیط کار، بهداشت کارکنان، رضایت کارکنان، آموزش کارکنان و رضایت مشتریان.

ساجان و همکاران در سال ۲۰۱۷ تحقیقی را باهدف بررسی و اندازه‌گیری کمی اثرات ناب بر روی جنبه‌های مختلف پایداری انجام دادند. او در این تحقیق تعداد ۱۰ تکنیک ناب را که در جدول (۱) آمده است، مدنظر قرارداد. [۱۰].

همچنین داس در تحقیقی که در سال ۲۰۱۸ انجام داد، نشان داد که هر یک از تکنیک‌های ناب پس از اینکه در سازمان اجرا شوند، یک سری اثرات مثبت را بر روی سیستم برجای می‌گذارند و به واسطه همین اثرات بر مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی اثرگذار اند [۴]. با در نظر گرفتن داده‌های حاصل از دو تحقیق ساجان و داس، مقدار اثر تکنیک‌های ناب بر روی پایداری جدول (۱) است.

رابطه (۱) تابع هدف اقتصادی شامل هزینه‌های برقراری تکنیک‌های ناب، هزینه‌های تأمین و هزینه‌های تولید است. رابطه (۲) هزینه‌های برقراری تکنیک‌های ناب شامل هزینه‌های ثابت و متغیر در مراکز تولید است. رابطه (۳) هزینه‌های تأمین شامل هزینه‌های ثابت سفارش دهی و هزینه‌های متغیر مربوط به خرید مواد اولیه از تأمین‌کنندگان است. رابطه (۴) هزینه‌های مراکز تولید شامل هزینه‌های ثابت احداث مراکز تولید در بخش اول و هزینه‌های متغیر تولید محصولات در بخش دوم است.

تابع هدف زیست‌محیطی شامل اثرات زیست‌محیطی مربوط به تأمین و تولید است که از رابطه (۵) محاسبه می‌شود. رابطه (۶) اثرات زیست‌محیطی مربوط به تأمین‌کننده است که شامل اثرات مربوط به مصرف آب در بخش اول، مصرف انرژی در بخش دوم، تولید ضایعات در بخش سوم و انتشار آلاینده‌گی در بخش چهارم است. رابطه (۷) اثرات زیست‌محیطی مربوط به مراکز تولید است که شامل اثرات مربوط به مصرف آب در بخش اول، مصرف انرژی در بخش دوم، تولید ضایعات در بخش سوم، مصرف مواد اولیه در بخش چهارم و انتشار آلاینده‌گی در بخش پنجم است.

تابع هدف اجتماعی شامل اثرات اجتماعی مربوط به تأمین‌کننده و تولیدکننده است که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود. رابطه (۹) اثرات اجتماعی مربوط به تأمین‌کننده شامل رضایت کارکنان در بخش اول، آموزش کارکنان در بخش دوم، ایمنی محیط کار در بخش سوم است. رابطه (۱۰) اثرات اجتماعی مربوط به تولیدکننده شامل رضایت کارکنان در بخش اول، آموزش کارکنان در بخش دوم، ایمنی محیط کار در بخش سوم، بهداشت کارکنان در بخش چهارم و رضایت مشتریان در بخش پنجم است.

محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که در صورت تأسیس یک مرکز تولید، تنها یک تکنولوژی تولید به آن مرکز اختصاص یابد. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که زمانی می‌توان انتخاب کرد که کدام تکنیک‌های ناب در یک مرکز تولید اجرا شوند که آن مرکز تأسیس شده باشد. محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند که تنها زمانی می‌توان تعیین کرد که یک تکنیک ناب در یک مرکز تولید به چه میزان اجرا شود که آن تکنیک برای اجرا در آن مرکز انتخاب شده باشد. محدودیت (۱۴) تضمین می‌کند که در صورت تأسیس یک مرکز تولید، باید دقیقاً یک برنامه کاری به آن مرکز اختصاص یابد. محدودیت (۱۵) بیانگر این است که اگر کارخانه J

جدول (۱): اثرات پیاده سازی ناب بر پایداری

| کاهش زمان تنظیم | هوشین کاری | چیدمان ناب | سیستم کششی | خطا ناپذیری و S5 | کار استاندارد | نت ناب | همکاری با مشتری | همکاری با تأمین کننده | کایزن | |
|-----------------|------------|------------|------------|------------------|---------------|--------|-----------------|-----------------------|-------|---------------|
| ۰/۴۰۸ | ۰/۱۶۱ | ۰/۱۳۴ | ۰/۱۲۴ | ۰/۳۴۱ | ۰/۳۶۷ | ۰/۳۳۶ | ۰/۵۱ | ۰/۴۶۱ | ۰/۴۸۹ | اقتصاد |
| ۰/۱۱۹ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۷۱ | ۰/۰۷۳ | ۰/۱۴۹ | ۰/۱۶۱ | ۰/۲۲۱ | ۰/۱۱۲ | ۰/۱۳۵ | ۰ | ضایعات |
| ۰ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۳۷ | ۰/۰۶۱ | ۰ | ۰/۰۷۴ | ۰/۱۱۳ | ۰/۱۳۶ | ۰ | انتشار |
| ۰ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۵۶ | ۰ | ۰/۰۶۸ | ۰/۳۱ | ۰/۲۴۹ | ۰ | مصرف مواد |
| ۰ | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۵۱ | ۰/۰۴ | ۰/۰۹۸ | ۰ | ۰/۰۸ | ۰/۱۲۲ | ۰/۱۴۶ | ۰ | مصرف انرژی |
| ۰ | ۰/۰۸۱ | ۰/۰۵۴ | ۰ | ۰/۱۰۳ | ۰ | ۰/۱۶۸ | ۰ | ۰ | ۰ | ایمنی |
| ۰ | ۰/۰۸۱ | ۰/۰۵۴ | ۰ | ۰/۱۰۳ | ۰ | ۰/۱۶۸ | ۰ | ۰ | ۰ | هداشت |
| ۰ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۵۶ | ۰/۰۷۵ | ۰ | ۰/۱۰۴ | ۰ | ۰/۳۹۷ | رضایت کارکنان |
| ۰ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۵۸ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۰۶۶ | ۰/۱۰۴ | آموزش کارکنان |
| ۰ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۷ | ۰/۰۵۸ | ۰ | ۰ | ۰/۳۲۵ | ۰/۳۲۷ | ۰ | رضایت مشتریان |

طراحی شبکه زنجیره تامین با ابزارهای کارگزاران اصول ناب

۶- روش حل

برای خطی سازی ضرب متغیر صفر و یک در صفر و یک فرض کنیم که و دو متغیر صفر و یک هستند که حاصل ضرب آنان را با Z نشان می دهیم. در این صورت اگر هر دو متغیر مقدار ۱ بگیرند Z نیز ۱ می شود و اگر یکی از آن دو یا هر دو آنها صفر شوند، Z نیز صفر خواهد شد. این شرایط با استفاده از معادلات زیر نشان داده می شوند [۱۲].

$$z \leq x_1 \quad (31)$$

$$z \leq x_2 \quad (32)$$

$$z \geq x_1 + x_2 - 1 \quad (33)$$

برای خطی سازی ضرب متغیر پیوسته در صفر و یک عبارت غیرخطی که در آن یک متغیر پیوسته و یک متغیر صفر و یک است را در نظر بگیرید. مقدار این عبارت را معادل Z قرار

به علت وجود عبارات غیرخطی به صورت ضرب متغیر پیوسته در پیوسته، همچنین ضرب متغیر پیوسته در باینری و باینری در باینری در توابع هدف مدل به صورت غیرخطی است و یک فضای حل غیر محدب به وجود آمده است. در نتیجه هیچ تضمینی وجود ندارد که جواب های به دست آمده، یک جواب بهینه عمومی برای مسئله باشند [۱۱]. برای غلبه بر این مشکل ابتدا باید مدل خطی شود. مدل پیشنهادی، یک مدل چندهدفه شامل اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی است. در گام بعد برای غلبه بر این مشکل از روش برنامه ریزی آرمانی فازی استفاده شده که از تابع ادغامی ترابی-هسینی برای تبدیل کردن مدل به یک مدل تک هدفه معادل استفاده شده است.

$$w_{ij} \geq x_i^U x_j + x_i x_j^U - x_i^U x_j^U \quad (38)$$

$$w_{ij} \leq x_i^U x_j + x_i x_j^L - x_i^U x_j^L \quad (39)$$

$$w_{ij} \leq x_i x_j^U + x_i^L x_j - x_i^L x_j^U \quad (40)$$

$$x^L \leq x \leq x^U, w^L \leq w \leq w^U \quad (41)$$

با توجه به توضیحات فوق، مدل خطی شده به صورت زیر است که در آن متغیر $Q1_{jw}$ و محدودیت‌های (۴۵) تا (۴۷) برای خطی کردن ضرب x_{jt}'' در pl_{wj} ، متغیر $Q2_{jtl}$ و محدودیت‌های (۴۸) تا (۵۰) برای خطی کردن ضرب x_{jt}'' در pa_{jl} ، متغیر $Q3_{jtwl}$ و محدودیت‌های (۵۱) تا (۵۳) برای خطی کردن ضرب x_{jt}'' در pa_{jl} در pl_{wj} ، متغیر $Q4_{jl}$ و محدودیت‌های (۵۴) تا (۵۶) برای خطی کردن ضرب x_j' در pa_{jl} ، متغیر $Q5_{jqc}$ و محدودیت‌های (۵۷) تا (۵۹) برای ضرب x_j' در y_{jqc} و متغیر $Q6_{jqcl}$ و محدودیت‌های (۶۰) تا (۶۲) برای خطی کردن ضرب x_j' در pa_{jl} در y_{jqc} به مدل اضافه شده‌اند.

$$ECO = Spic + Suc + Pr dc \quad (1)$$

$$Spic = \sum_{j,l} FLP_{jl} qp_{jl} + \sum_{j,l} OPC_{jl} ar_j pa_{jl} \quad (2)$$

$$Suc = \sum_s FS_s u_s'' + \sum_{s,j,c,q} CS_{scq} q_{sjcq} + \sum_{s,j} FCT.DS_{sj} VSR_{sj} \quad (3)$$

$$Pr dc = \sum_{j,t} FCP_{jt} (ar_j / 100) p_{jt} + \sum_{j,t,w} CM_{jtw} Q1_{jtw} - \sum_{j,t,w,l} ECP_{l} CM_{jtw} Q3_{jtwl} + \sum_{jr} FCT.TD_{jr} VRP_{jr} \quad (42)$$

$$En = EnSu + EnPr \quad (5)$$

$$EnSu = ZP_1 \sum_{s,j} VSR_{sj} DS_{sj} TE + ZP_1 \sum_{s,j,c,q} ES_{scq} q_{sjcq} + ZP_2 \sum_{s,j,c,q} WRC_{cq} q_{sjcq} + ZP_3 \sum_{s,j} VSR_{sj} DS_{sj} THE + ZP_3 \sum_{s,j,c,q} HE_{scq} q_{sjcq} \quad (6)$$

$$EnPr = ZP_1 \sum_{j,r} VRP_{jr} TD_{jr} TE + ZP_1 \sum_{j,r,t} ENP_{jrt} x_{jrt} - ZP_1 \sum_{j,t,l} EE_l ENP_{jt} Q2_{jtl} + ZP_2 \sum_{j,r,t} WRP_{jrt} x_{jrt} - ZP_2 \sum_{j,t,l} EVWRP_{l} Q2_{jtl} + ZP_3 \sum_{j,c,q} \rho_{cq} Q5_{jqc} - ZP_3 \sum_{j,c,q,l} \rho_{cq} EC_l Q6_{jqcl} + ZP_4 \sum_{j,r} VRP_{jr} TD_{jr} THE + ZP_4 \sum_{j,r,t} HMP_{jrt} x_{jrt} - ZP_4 \sum_{j,t,l} EH_l HMP_{jt} Q2_{jtl} \quad (43)$$

می‌دهیم. اگر صفر شود، Z نیز صفر می‌شود و اگر یک شود مقدار Z برابر با مقدار خواهد شد. برای استفاده از Z به جای این عبارت غیرخطی لازم است که سه محدودیت به صورت زیر به مدل اضافه شود [۱۳].

$$z \leq x_1 \quad (34)$$

$$z \leq Mx_2 \quad (35)$$

$$z \geq x_1 - M(1 - x_2) \quad (36)$$

برای خطی سازی ضرب متغیر پیوسته در پیوسته از روش خطی سازی مک کورمیک استفاده می‌شود. در این روش ابتدا برای هر یک از دو متغیر پیوسته حدود بالا و پایین آن‌ها مشخص می‌شود. فرض کنیم x_i و x_j متغیرهای پیوسته و $x_i^L, x_i^U, x_j^L, x_j^U$ به ترتیب حدود بالا و پایین متغیر اول و حدود بالا و پایین متغیر دوم هستند و Z حاصل ضرب این دو متغیر پیوسته است. در این صورت محدودیت‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴].

$$w_{ij} \geq x_i^L x_j + x_i x_j^L - x_i^L x_j^L \quad (37)$$

$$So = SoSu + SoPr \quad (8)$$

$$SoSu = ET_1 \sum_{s,j,c,q} ST_s q_{sjcq} + ET_2 \sum_{s,j,c,q} TR_s q_{sjcq} - ET_3 \sum_{s,j,c,q} DM_s q_{sjcq} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} SoPr = & ET_1 \sum_{j,t,w} \theta_w Q1_{jtw} + ET_1 \sum_{j,t,w,l} ERW_l \theta_w Q3_{jtwl} + ET_2 \sum_{j,t,w} \delta_w Q1_{jtw} + ET_2 \sum_{j,t,w,l} ETR_l \delta_w Q3_{jtwl} \\ & - ET_3 \sum_{j,r,t} r_t x_{jrt} + ET_3 \sum_{j,t,l} ESF_l r_t Q2_{jtl} - ET_4 \sum_{j,c,q} \alpha_q \rho_{cq} Q5_{jqc} + ET_4 \sum_{j,c,q,l} EHL_l \alpha_q \rho_{cq} Q6_{jqcl} \\ & + ET_5 \sum_{j,c,q} \beta_q \rho_{cq} Q5_{jqc} + ET_5 \sum_{j,c,q,l} ERC_l \beta_q \rho_{cq} Q6_{jqcl} \end{aligned} \quad (44)$$

$$\sum_t p_{jt} \leq 1 \quad \forall j \quad (11)$$

$$qp_{lj} \leq \sum_t p_{jt} \quad \forall j, l \quad (12)$$

$$pa_{jl} \leq qp_{lj} \quad \forall j, l \quad (13)$$

$$\sum_w pl_{wj} = \sum_t p_{jt} \quad \forall j \quad (14)$$

$$\sum_q y_{jqc} = \sum_t p_{jt} \quad \forall j, c \quad (15)$$

$$y_{jqc} = \sum_s u_{sjcq} \quad \forall j, c, q \quad (16)$$

$$u_s'' = \sum_{j,c,q} u_{sjcq} \quad \forall s \quad (17)$$

$$\hat{D}_r = \sum_{j,t} x_{jrt} \quad \forall r \quad (18)$$

$$\sum_r x_{jrt} \leq \hat{C} \hat{A} P_{jt} p_{jt} \quad \forall j, t \quad (19)$$

$$\sum_{r,t} x_{jrt} = x'_j \quad \forall j \quad (20)$$

$$\sum_r x_{jrt} = x''_{jt} \quad \forall j, t \quad (21)$$

$$q1_{sjcq} \leq x'_j \quad \forall s, j, c, q \quad (22)$$

$$q1_{sjcq} \leq M u_{sjcq} \quad \forall s, j, c, q \quad (23)$$

$$q1_{sjcq} \geq x'_j - M(1 - u_{sjcq}) \quad \forall s, j, c, q \quad (24)$$

$$q_{sjcq} = \rho_{cq} q1_{sjcq} \quad \forall s, j, c, q \quad (25)$$

$$\sum_{j,q} q_{sjcq} \leq \hat{C} \hat{A} S_{sc} \quad \forall s, c \quad (26)$$

$$\sum_{c,q} \frac{q_{sjcq}}{STL} + HSR_{sj} = VSR_{sj} \quad \forall s, j \quad (27)$$

$$\sum_t \frac{x_{jrt}}{STL} + HRP_{jr} = VRP_{jr} \quad \forall j, r \quad (28)$$

$$VSR_{sj} + HSR_{sj} \geq 0 \quad \forall s, j \quad (29)$$

$$VRP_{jr} + HRP_{jr} \geq 0 \quad \forall j, r \quad (30)$$

$$Q1_{jtw} \leq x''_{jt} \quad \forall j, t, w \quad (45)$$

$$Q1_{jtw} \leq Mpl_{wj} \quad \forall j, t, w \quad (46)$$

$$Q1_{jtw} \geq x''_{jt} - M(1 - pl_{wj}) \quad \forall j, t, w \quad (47)$$

$$Q2_{jtl} \geq x''_{jt} + x''_{jt} pa_{jl} - x''_{jt} \quad \forall j, t, l \quad (48)$$

$$Q2_{jtl} \leq x''_{jt} \quad \forall j, t, l \quad (49)$$

$$Q2_{jtl} \leq x''_{jt} pa_{jl} \quad \forall j, t, l \quad (50)$$

$$Q3_{jtwl} \leq Q2_{jtl} \quad \forall j, t, w, l \quad (51)$$

$$Q3_{jtwl} \leq Mpl_{wj} \quad \forall j, t, w, l \quad (52)$$

$$Q3_{jtwl} \geq Q2_{jtl} - M(1 - pl_{wj}) \quad \forall j, t, w, l \quad (53)$$

$$Q4_{jl} \geq x'_j + x''_{jl} pa_{jl} - x''_{jl} \quad \forall j, l \quad (54)$$

$$Q4_{jl} \leq x'_j \quad \forall j, l \quad (55)$$

$$Q4_{jl} \leq x''_{jl} pa_{jl} \quad \forall j, l \quad (56)$$

$$Q5_{jcq} \leq x'_j \quad \forall j, c, q \quad (57)$$

$$Q5_{jcq} \leq My_{jcq} \quad \forall j, c, q \quad (58)$$

$$Q5_{jcq} \geq x'_j - M(1 - y_{jcq}) \quad \forall j, c, q \quad (59)$$

$$Q6_{jcql} \leq Q4_{jl} \quad \forall j, c, q, l \quad (60)$$

$$Q6_{jcql} \leq My_{jcq} \quad \forall j, c, q, l \quad (61)$$

$$Q6_{jcql} \geq Q4_{jl} - M(1 - y_{jcq}) \quad \forall j, c, q, l \quad (62)$$

روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی

یکی از مشکلات مدل‌های برنامه‌ریزی چندهدفه مانند روش ال پی متریک، محدودیت افسیلون و ... این است که در این روش‌ها باید تمامی پارامترهای مسئله به شکلی دقیق در فضای تصمیم‌گیری مشخص شوند و تمامی اهداف و

محدودیت‌ها قطعی باشند. در نتیجه این روش‌ها قادر نیستند که در دنیای واقعی به جواب‌های قابل قبولی برسند. [۱۵] برای مواجهه با این مشکل، مفهوم مجموعه‌های فازی مطرح شد که از این مفهوم در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود.

$$f_1^{PIS} = \min f_1 \quad , \quad f_1^{NIS} = \max f_1$$

$$f_2^{PIS} = \min f_2 \quad , \quad f_2^{NIS} = \max f_2$$

$$f_3^{PIS} = \max f_3 \quad , \quad f_3^{NIS} = \min f_3$$

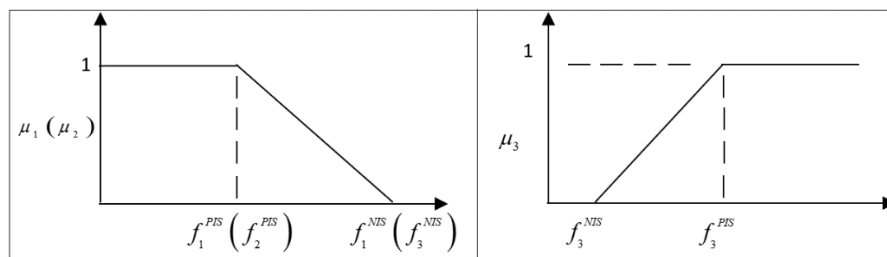
پس از تعیین جواب‌های ایده آل مثبت و منفی، یک تابع عضویت خطی برای هر تابع هدف در نظر گرفته می‌شود.

$$\mu_1 = \begin{cases} 1 & f_1 < f_1^{PIS} \\ \frac{f_1^{NIS} - f_1}{f_1^{NIS} - f_1^{PIS}} & f_1^{PIS} < f_1 < f_1^{NIS} \\ 0 & f_1^{NIS} < f_1 \end{cases} \quad (63)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 1 & f_2 > f_2^{PIS} \\ \frac{f_2^{NIS} - f_2}{f_2^{NIS} - f_2^{PIS}} & f_2^{PIS} < f_2 < f_2^{NIS} \\ 0 & f_2^{NIS} > f_2 \end{cases} \quad (64)$$

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & f_3 < f_3^{PIS} \\ \frac{f_3 - f_3^{NIS}}{f_3^{PIS} - f_3^{NIS}} & f_3^{NIS} < f_3 < f_3^{PIS} \\ 0 & f_3^{NIS} < f_3 \end{cases} \quad (65)$$

در واقع μ_i به سطح ارضاء هدف i -ام اشاره دارد. پس از انجام مراحل فوق و با استفاده از یک تابع ادغامی، مدل برنامه‌ریزی چند هدفه، به یک مدل تک هدفه معادل تبدیل می‌شود. شکل (۱) تابع عضویت خطی را برای هر یک از توابع هدف نشان می‌دهد.



شکل (۱): تابع عضویت خطی برای توابع هدف

کردند [۱۸] اما این رویکرد نسبت به مدل تک فازی نیازمند محاسبات بیشتری بود.

همچنین ورنرز نیز یک روش برای ایجاد تابع ادغامی با ویژگی اکیدا سعودی یکنواخت را توسعه داد [۱۹] که سلیم و اوزکارهان آن را توسعه داده و با ایجاد تغییراتی روش خود

یکی از روش‌های رایج و پرکاربرد برای حل مسائل چندهدفه، روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی است. مزیت اصلی رویکرد فازی، قابلیت اندازه‌گیری سطح ارضاء هر یک از توابع هدف به صورت صریح است. این ویژگی به تصمیم‌گیرندگان برای اتخاذ یک روش مؤثر و براساس درجه رضایت و اولویت هر هدف کمک می‌کند [۱۶].

در مدل ارائه شده، آرمان‌ها فازی هستند. بسیاری از اطلاعاتی که از محیط دریافت می‌کنیم نوعی از نادقیقی را در درون خود دارد. در قالب برنامه‌ریزی فازی، پارامترهای مدل از قبیل ضرایب متغیرهای تصمیم، میزان آرمان، اولویت‌ها و اوزان را می‌توان نادقیق انگاشت. آرمانی را که میزان آن نادقیق بیان شده باشد به یک آرمان فازی اطلاق می‌کنیم.

در روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی، ابتدا جواب‌های ایده آل مثبت و منفی برای هر هدف در نظر گرفته می‌شود. اگر هدف موردنظر مینیم سازی باشد، با حذف سایر اهداف، مدل باقیمانده را باهدف ماکزیمم سازی و مینیمم سازی حل می‌کنیم. جواب به‌دست آمده از حل مدل مینیمم سازی، یک جواب ایده‌آل مثبت و جواب به‌دست آمده از حل مدل ماکزیمم سازی یک جواب ایده‌آل منفی برای هدف موردنظر است و اگر هدف موردنظر از نوع ماکزیمم سازی باشد، عکس آن عمل می‌کنیم.

زیمرمن رویکرد max-min را ارائه کرد که نخستین روش برای ایجاد تابع ادغامی نیز بود [۱۷]، اما دارای اشکالاتی بود از جمله اینکه جواب‌های غیر مؤثری را به دست می‌آورد. به همین دلیل، لی و همکاران آن را توسعه دادند و رویکرد دومرحله‌ای را برای مسئله برنامه‌ریزی آرمانی فازی ارائه

جدول (۲): ظرفیت تأمین کنندگان

| تأمین کننده | قطعه ۱ | قطعه ۲ | قطعه ۳ |
|-------------|--------|--------|--------|
| ۱ | ۳۴۴۰ | ۳۵۵۰ | ۶۸۰۰ |
| ۲ | ۳۸۵۰ | ۳۷۵۰ | ۶۲۹۰ |
| ۳ | ۴۰۵۰ | ۴۲۶۰ | ۷۰۰۰ |

جدول (۳): ظرفیت تولید کنندگان

| تولید کننده | تکنولوژی تولید | |
|-------------|----------------|-------|
| | نوع ۱ | نوع ۲ |
| ۱ | ۳۶۰۰ | ۴۱۰۰ |
| ۲ | ۳۲۰۰ | ۳۸۰۰ |

جدول (۴): تقاضای مشتریان

| مشتری | تقاضا |
|-------|-------|
| ۱ | ۴۷۰ |
| ۲ | ۲۹۰ |
| ۳ | ۵۲۰ |
| ۴ | ۱۵۰ |
| ۵ | ۳۷۰ |
| ۶ | ۲۴۰ |
| ۷ | ۵۶۰ |
| ۸ | ۳۱۰ |

مدل با استفاده از نرم افزار Gams و با سالور CPLEX حل شده است. مقدار بهینه هر یک از توابع هدف، مقدار انحراف و میزان تحقق هر آرمان در جدول (۵) آمده است.

را ارائه کردند [۲۰]. ترابی و هسینی یک روش هیبریدی را که ترکیبی از روش سلیم و اوزکاراهان و لای و هوانگ بود ارائه کردند [۱۶].

تابع ادغامی ارائه شده ترابی- هسینی که مدل چندهدفه را تبدیل به مدل تک هدفه معادل می کند، به صورت زیر است:

$$\max \lambda = \gamma \lambda_0 + (1 - \gamma) \sum_h \theta_h \mu_h \quad (66)$$

$$s.t. \quad \lambda_0 \leq \mu_h \quad h = 1, 2, 3 \quad (67)$$

که در آن θ_h عبارت است از ضرایب وزنی درجات ارضا هر یک از اهداف که بیانگر اهمیت هر هدف برای تصمیم گیرنده است و $\sum_h \theta_h = 1$. همچنین تصمیم گیرنده با استفاده از ضریب γ می تواند مشخص کند رسیدن به جوابی که اختلاف ماکزیمم و مینیمم سطح ارضا اهداف را کمینه می کند مهم تر است یا جوابی که مجموع ضرایب وزنی سطوح ارضا اهداف را کمینه می کند. در نتیجه با تنظیم پارامترهای θ_h و γ می توان به جواب های مختلف متوازن و غیرمتوازن دست یافت.

۷- مثال عددی

در این بخش به منظور بررسی کارایی مدل پیشنهادی، یک مثال عددی تولید شده، سپس مدل در قالب مثال عددی حل شده و به بررسی پاسخ ها و تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از حل آن پرداخته می شود. شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده در این مثال شامل ۳ تأمین کننده است که ۳ نوع ماده اولیه مورد نیاز برای تولید محصول نهایی را با ۲ درجه کیفیت متفاوت تأمین می کنند، همچنین ۲ نوع تکنولوژی تولید و ۳ نوع برنامه کاری برای اختصاص به ۲ مکان بالقوه برای احداث مراکز تولید در نظر گرفته شده تا پس از تولید، محصول نهایی را به دست ۸ مصرف کننده نهایی برسانند. تکنولوژی های تولید و برنامه های کاری از لحاظ هزینه ها، شاخص های زیست محیطی و اجتماعی متفاوت از یکدیگر هستند. هزینه های خرید هر واحد ماده اولیه از تأمین کنندگان بسته به کیفیت مواد متفاوت است و هر چه مواد با کیفیت تر باشند، هزینه بیشتری نیز دارند. میزان ظرفیت تأمین کنندگان و مراکز تولید و میزان تقاضای مشتریان در جداول (۲) تا (۴) آمده است.

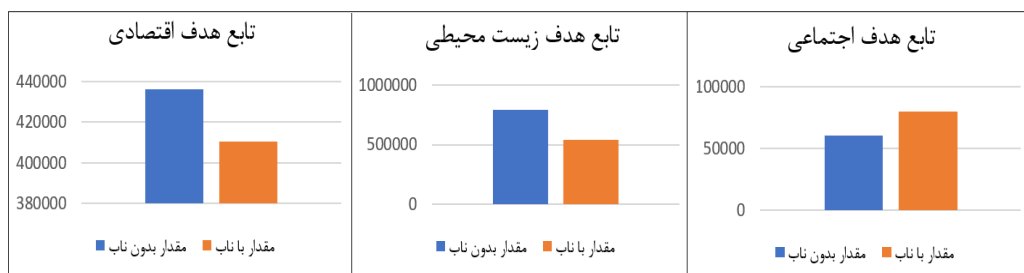
جدول (۵): مقادیر به دست آمده برای توابع هدف

| تابع هدف | نوع آرمان | نوع انحراف | مقدار بهینه تابع هدف | مقدار تابع هدف پس از حل | مقدار انحراف | میزان تحقق آرمان |
|------------|-----------|------------|----------------------|-------------------------|--------------|------------------|
| اقتصادی | Min | d_1^+ | ۳۴۵۴۳۶/۲۹۱ | ۴۱۰۲۲۰ | ۶۴۷۸۳/۷۰۹ | ۰/۹۴۷ |
| زیست محیطی | Min | d_2^+ | ۵۴۲۴۸۱/۰۶۴ | ۵۴۳۱۴۰ | ۶۵۸/۹۳۶ | ۰/۹۹۹ |
| اجتماعی | Max | d_3^- | ۹۳۵۸۰/۱۱۹ | ۷۹۵۶۸/۱۰۶ | -۱۴۰۱۲/۰۱۳ | ۰/۶۴۶ |

مقایسه عملکرد ناب و غیرناب

در این بخش، به منظور بررسی اثر پیاده سازی تکنیک های ناب بر روی ابعاد اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی پایداری، ابتدا طراحی شبکه زنجیره تامین بدون در نظر گرفتن تکنیک های ناب انجام می شود و مثال تولید شده در

بخش قبل تحت این شرایط، دوباره در نرم افزار گمز حل می شود و بعد از آن جواب های به دست آمده از آن با پاسخ های به دست آمده از حل مدل با در نظر گرفتن تکنیک های ناب مقایسه می شود تا درصد بهبود یا پس افت در اهداف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی در نتیجه پیاده سازی تکنیک های ناب مشخص شود.



شکل (۲): مقایسه مقادیر تابع هدف در حالت ناب و غیرناب

جدول (۶): مقایسه مقادیر تابع هدف در حالت ناب و بدون ناب

| تابع هدف | مقدار غیر ناب | مقدار ناب | درصد بهبود |
|------------|---------------|-----------|------------|
| اقتصادی | ۴۳۶۱۳۰ | ۴۱۰۲۲۰ | ۵/۹۵ |
| زیست محیطی | ۷۸۷۹۰۰ | ۵۴۳۱۴۰ | ۳۱/۰۷ |
| اجتماعی | ۶۰۳۹۷/۴۸۷ | ۷۹۵۶۸/۱۰۶ | ۳۱/۷۵ |

همان طور که در جدول (۶) مشاهده می کنیم، مدل برای حالتی که در آن تکنیک های ناب پیاده سازی نشده، حل شده است. ستون دوم جدول مربوط به جواب های به دست آمده از حل مدل بدون پیاده سازی تکنیک های ناب و ستون سوم جواب های به دست آمده از حل مدل با پیاده سازی تکنیک های ناب و ستون آخر مربوط به درصد بهبود ایجاد شده در مدل ناب نسبت به غیرناب است.

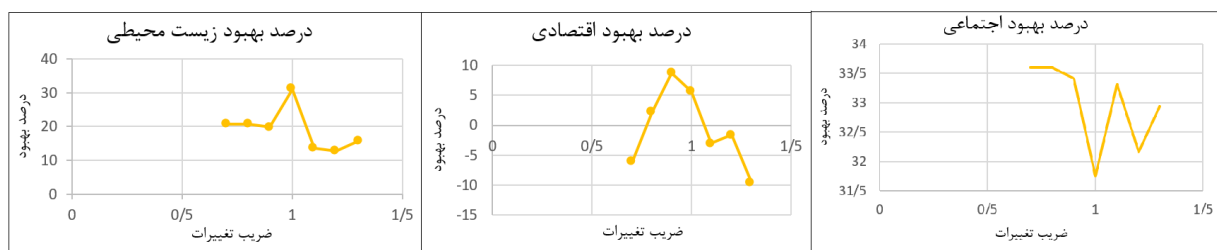
پس از حل مدل پیشنهادی بدون در پیاده سازی تکنیک های ناب و مقایسه جواب های به دست آمده از آن باحالتی که در آن تکنیک های ناب پیاده سازی شده اند، مشاهده می شود که پیاده سازی تکنیک های ناب باعث بهبود مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی شده اند که باعث ۵/۹۵ درصد صرفه جویی در هزینه ها شده است، ۳۱/۰۷ درصد بهبود در مسائل زیست محیطی و ۳۱/۷۵ درصد بهبود در مسائل

تولیدکنندگان است، جهت بررسی تغییرات بر روی میزان هر سه تابع هدف انتخاب شده‌اند. نحوه انجام آنالیز حساسیت بدین صورت است که تمامی پارامترهای مسئله به جز پارامتر موردبررسی ثابت باقی‌مانده و با ایجاد تغییرات در مقادیر پارامتری که جهت انجام آنالیز حساسیت انتخاب شده، نتایج موردبررسی قرار می‌گیرد. نتایج تحلیل حساسیت در شکل (۳) نشان داده شده است.

اجتماعی را به همراه داشته است. نکته‌ای که شکل (۲) و جدول (۶) نیز به خوبی آن را نشان می‌دهند.

۸- تحلیل حساسیت

در این بخش به منظور ارزیابی اثر تغییرات پارامترهای مدل بر روی نتیجه توابع هدف، پارامترهای میزان تقاضا و مساحت مراکز تولید که مجموع این دو پارامتر بیانگر وسعت



شکل (۳): روند تغییرات توابع هدف

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه عدد صحیح آمیخته غیرخطی برای طراحی زنجیره تأمین پایدار با کمک تکنیک‌های ناب ارائه شده است. این مدل شامل سه سطح تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان است. اهداف مسئله عبارت‌اند از حداقل کردن هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین، حداقل کردن اثرات مخرب زیست‌محیطی تولیدشده و حداکثر کردن اثرات مثبت اجتماعی. در روش ارائه شده برای حل مدل، ابتدا مدل خطی شده و در گام بعد با کمک مفهوم برنامه‌ریزی آرمانی فازی، مدل چندهدفه به مدل تک هدفه معادل تبدیل شده است. حل مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز GAMS انجام شده است. پس از آن بار دیگر مدل بدون در نظر گرفتن تکنیک‌های ناب حل شده و جواب‌های به دست آمده باحالتی که تکنیک‌های ناب پیاده‌سازی شده‌اند، مقایسه شده است و مشخص شد که پیاده‌سازی تکنیک‌های ناب باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها شده و علاوه بر آن به سازمان در رسیدن به اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی کمک می‌کند. برای مطالعات در آینده پیشنهاد می‌شود که عدم قطعیت در پارامترها در نظر گرفته شود، همچنین مدل چند دوره‌ای در نظر گرفته شود و بکارگیری مفاهیم مدیریت موجودی و هزینه‌های نگهداری به کار گرفته شود اثر ناب بر روی هزینه‌های آن بررسی شود.

همان‌طور که در شکل (۳) نیز مشاهده می‌شود، اثر تکنیک‌های ناب بر مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی همواره مثبت است و با افزایش یا کاهش وسعت تولیدکنندگان، مقدار بهبود از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند.

تأثیر تکنیک‌های ناب بر ابعاد اقتصادی کاملاً وابسته به اندازه زنجیره تأمین است و بر اساس وسعت تولیدکننده ممکن است باعث افزایش هزینه‌های سیستم شود و یا صرفه‌جویی در هزینه‌ها را به همراه داشته باشد و در یک نقطه خاص میزان ایده‌آل و بهینه آن است که بیشترین صرفه‌جویی در هزینه‌ها را داریم و با افزایش یا کاهش وسعت تولیدکنندگان در این نقطه، بر شدت اثر مثبت بر بعد اقتصادی کاسته می‌شود و رفته رفته باعث افزایش هزینه‌های سیستم می‌شود. در نتیجه بهبود در هزینه‌ها، وابسته به وسعت تولیدکنندگان است و در شبکه زنجیره تأمین با تأمین‌کنندگان بزرگ، هزینه‌های متغیر پیاده‌سازی تکنیک‌های ناب باعث تحمیل هزینه به سیستم می‌شود و در شبکه زنجیره تأمین با تولیدکنندگان کوچک، هزینه‌های ثابت پیاده‌سازی تکنیک‌های ناب باعث تحمیل هزینه به سیستم می‌شود و در مواردی باعث می‌شود که پیاده‌سازی تکنیک‌های ناب از نظر اقتصادی به صرفه نباشد.

- [10] M.P, S., S. P.R, R. A, and B. P, Lean manufacturing practices in Indian manufacturing SMEs and their effect on sustainability performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2017. 28: p. 00-00.
- [11] Bazaraa, M.S., H.D. Sherali, and C.M. Shetty, *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. 2013: Wiley.
- [12] Norouzi, N., R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Ghazanfari, M. Alinaghian, and A. Salamatbakhsh, A New Multi-objective Competitive Open Vehicle Routing Problem Solved by Particle Swarm Optimization. *Networks and Spatial Economics*, 2011. 12.
- [13] Glover, F. and E. Woolsey, Converting the 0-1 Polynomial Programming Problem to a 0-1 Linear Program. *Operations Research*, 1974. 22(1): p. 180-182.
- [14] McCormick, G.P., Computability of global solutions to factorable nonconvex programs: Part I — Convex underestimating problems. *Mathematical Programming*, 1976. 10(1): p. 147-175.
- [15] Bessis, J., *Risk Management in Banking*. 2011: Wiley.
- [16] Torabi, S.A. and E. Hassini, An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy Sets and Systems*, 2008. 159(2): p. 193-214.
- [17] Zimmermann, H.J., Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. *Fuzzy Sets and Systems*, 1978. 1(1): p. 45-55.
- [18] Li, X.-q., B. Zhang, and H. Li, Computing efficient solutions to fuzzy multiple objective linear programming problems. *Fuzzy Sets and Systems*, 2006. 157(10): p. 1328-1332.
- [19] Werners, B.M. *Aggregation Models in Mathematical Programming*. 1988. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [20] Selim, H. and I. Ozkarahan, A supply chain distribution network design model: An interactive fuzzy goal programming-based solution approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008. 36(3): p. 401-418.
- [1] Hombach, L.E., C. Büsing, and G. Walther, Robust and sustainable supply chains under market uncertainties and different risk attitudes – A case study of the German biodiesel market. *European Journal of Operational Research*, 2018. 269(1): p. 302-312.
- [2] Ugarte, G.M., J.S. Golden, and K.J. Dooley, Lean versus green: The impact of lean logistics on greenhouse gas emissions in consumer goods supply chains. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2016. 22(2): p. 98-109.
- [3] Afonso, H. and M.d.R. Cabrita, Developing a Lean Supply Chain Performance Framework in a SME: A Perspective Based on the Balanced Scorecard. *Procedia Engineering*, 2015. 131: p. 270-279.
- [4] Das, K., Integrating lean systems in the design of a sustainable supply chain model. *International Journal of Production Economics*, 2018. 198: p. 177-190.
- [5] Winkler, H., Closed-loop production systems—A sustainable supply chain approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2011. 4(3): p. 243-246.
- [6] Costantino, N., M. Dotoli, M. Falagario, and F. Sciancalepore, Fuzzy network design of sustainable supply chains. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012. 45(6): p. 1284-1289.
- [7] Ren, J., A. Manzardo, S. Toniolo, and A. Scipioni, Sustainability of hydrogen supply chain. Part II: Prioritizing and classifying the sustainability of hydrogen supply chains based on the combination of extension theory and AHP. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013. 38(32): p. 13845-13855.
- [8] Govindan, K., A. Jafarian, R. Khodaverdi, and K. Devika, Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 2014. 152: p. 9-28.
- [9] Gonela, V., J. Zhang, A. Osmani, and R. Onyeaghala, Stochastic optimization of sustainable hybrid generation bioethanol supply chains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015. 77: p. 1-28.