ارائه یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن تجارت مجوزهای نشر آلودگی

احمد رضایی[1]، فرزاد دهقانیان[2*]
دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۱۹

چکیده

مکانیسم تجارت مجوزهای نشر آلودگی یکی از مکانیسم‌های ذیل پیمان کیوتو[3] برای کنترل میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی است. این مقاله به دنبال طراحی استراتژیک یک شبکه زنجیره تأمین در محیط تجارت مجوزهای نشر آلودگی با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی و محدودیت بودجه است. تقاضا و قیمت مجوزهای نشر آلودگی به‌عنوان عوامل تصادفی مهم تأثیرگذار در طراحی شبکه لحاظ شده‌اند. بدین منظور ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای ارائه و حل شده است. سپس تأثیر تغییرات قیمت مجوزهای نشر آلودگی و تأثیر تغییرات بودجه بر طراحی شبکه بررسی و ارزش جواب‌های تصادفی محاسبه می‌شوند. نتایج نشان‌دهنده اثرگذاری تجارت مجوزهای نشر و تغییر در توپولوژی شبکه و کاهش هزینه‌ها، به‌دلیل استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی است.

واژه‌های کلیدی: طراحی شبکه زنجیره تأمین، زنجیره تأمین سبز، تجارت مجوزهای نشر آلودگی، برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای

۱-مقدمه

یک تصمیم اساسی در مدیریت زنجیره تأمین، طراحی شبکه زنجیره تأمین[3] است که در سطح استراتژیک شامل تصمیم‌گیری در مورد تعداد، مکان، ظرفیت و نوع تکنولوژی کارخانجات و مراکز توزیع و در سطح تاکتیکی شامل تصمیم‌گیری در مورد جریان کالا و مواد اولیه و نحوه تخصیص کالا به مشتریان می‌باشد[۱]. اجرای تصمیمات استراتژیک نیاز به صرف هزینه‌های کلان دارد و تغییرات پس از ایجاد کارخانجات و مراکز توزیع به سختی و با صرف هزینه‌های زیاد انجام‌پذیر خواهد بود. از این‌رو تصمیم‌های استراتژیک باید به‌گونه‌ای اخذ شوند که تا حد امکان با گذشت زمان و تغییر شرایط کمترین فاصله از وضعیت بهینه را بگیرند. انتخاب هدف و شناخت شرایط موجود و آینده سهم زیادی در اتخاذ بهتر تصمیمات استراتژیک دارد. هدفی که اغلب طراحان شبکه مورد توجه قرار می‌دهند حداقل کردن هزینه‌های شبکه است[۲]؛ اما علاوه بر اهداف اقتصادی می‌توان اهداف دیگری را نیز در طراحی شبکه در نظر گرفت، یکی از اهدافی که در دهه‌های اخیر توجه تولیدکنندگان را به خود جلب کرده است حداقل کردن آلودگی‌های زیست‌محیطی است.

توجه به حداقل‌سازی آلودگی‌های زیست‌محیطی در کنار در نظر گرفتن مسائل اقتصادی در طراحی زنجیره تأمین باعث ظهور مفهوم طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز[4]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد، پست‌الکترونیکی: ahmad.rezaee@stu.um.ac.ir
۲*- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده پاسخگو، پست‌الکترونیکی: f.dehghanian@um.ac.ir، نشانی: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع.

3- Supply chain network design

4- Green supply chain network design

می‌شود که دو عامل از عوامل سه‌گانه توسعه پایدار را دارا می‌باشد. در توسعه پایدار باید اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را به‌طور هم‌زمان در نظر گرفت. حداقل‌سازی آلودگی هوا[۳] و جمع‌آوری محصولات و بازیافت در انتهای عمر مفید آنها[۴] نمونه‌هایی از اهداف زیست‌محیطی و توجه به تأثیر ایجاد یک کارخانه در رشد منطقه[۵] نمونه‌ای از اهداف اجتماعی هستند. در این مقاله به حداقل‌سازی آلودگی هوا در بخش‌های تولید، انبارداری و توزیع، تحت روش تجارت مجوز نشر آلودگی[1]پرداخته خواهد شد که در آن بعضی از پارامترهای مسئله از عدم قطعیت برخوردار هستند.

تجارت مجوز نشر آلودگی یکی از مکانیسم‌های اقتصادی پیمان کیوتو است. در این طرح برای هر زنجیره یک حد مجاز تولید آلایندگی، به‌وسیله تخصیص مجوزهایی جهت انتشار آلودگی، تعریف می‌شود که زنجیره‌ها اجازه خرید و فروش این مجوزها را دارند. هر زنجیره مجاز است حداکثر به میزان مجوزهایی که دارد (بعد از خرید و فروش مجوزها) آلودگی تولید کند. پس هر زنجیره باید تصمیم بگیرد که با صرف هزینه از تکنولوژی بهتری (از منظر زیست‌محیطی) برای تولید و حمل‌ونقل استفاده کند و آلودگی خود را کاهش دهد و یا با خرید مجوز، نیاز خود را برطرف کند. با توجه به اینکه این خرید و فروش در بازار آزاد اتفاق می‌افتد، قیمت مجوزهای نشر آلودگی بر اساس عرضه و تقاضا تعیین می‌شوند و از عدم قطعیت بالایی برخوردار هستند.

در این مسئله، برای مقابله با عدم قطعیت یک روش حل، قرار دادن امید ریاضی پارامترهای غیرقطعی به‌جای آنها و حل مسئله قطعی است. جواب‌های به‌دست آمده در این حالت لزوماً بهینه نیستند و حتی می‌توانند از جواب بهینه خیلی دور باشند و یا برای بعضی سناریوها نشدنی باشند[۶]. برای رفع این مشکل می‌توان برای آن عوامل، سناریوهای متفاوتی را در نظر گرفت و با توجه به ماهیت تصمیم‌گیری دومرحله‌ای طراحی شبکه زنجیره تأمین، می‌توان از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای[2] استفاده کرد[۷]. در این مقاله به‌دنبال طراحی یک شبکه زنجیره تأمین با هدف کمینه کردن هزینه‌های زنجیره و هزینه‌های تجارت مجوز نشر آلودگی خواهیم بود، که در آن قیمت مجوزهای نشر آلودگی غیرقطعی است. هم‌چنین با توجه به اینکه بیشترین توجه در ادبیات موضوع طراحی شبکه زنجیره تأمین در حالت غیرقطعی مربوط به عدم قطعیت تقاضا است[۸]، که نشان از اهمیت عدم قطعیت این پارامتر دارد، در این مقاله تقاضا نیز به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است.در ادامه ابتدا مروری مختصر در ادبیات طراحی شبکه زنجیره سبز ارائه شده و در ادامه پژوهش‌های انجام شده در مدل‌سازی عدم قطعیت در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین سبز بررسی خواهد شد.

بوجارسکی[3] و همکاران با ارائه یک مدل سه هدفه به کمینه‌سازی آلایندگی‌های زنجیره، کمینه‌سازی میزان شاخص Impact 2002+، بیشینه‌سازی سود و تصمیم‌گیری در مورد مکان و ظرفیت کارخانجات و چگونگی جریان کالا در زنجیره در دوره‌های زمانی مختلف پرداخته‌اند[۹]. چابانه[4] و همکاران با ارائه یک مدل دوهدفه به کمینه‌سازی هزینه‌ها (هزینه‌های زنجیره و هزینه‌های تجارت مجوزهای نشر آلودگی) و کمینه‌سازی میزان گازهای گلخانه‌ای خروجی پرداخته‌اند[۱۰].هم‌چنین آنها تصمیم‌گیری در مورد نوع تکنولوژی به‌کار رفته در کارخانجات را به ادبیات افزودند.عبدالله[5] و همکارانبه ارائه مدلی یک هدفه پرداخته‌اند که در آن مسائل زیست‌محیطی با استفاده از مدل‌سازی هزینه‌های تجارت مجوزهای نشر آلودگی در تابع هدف، وارد مدل شده است[۱۱]. آنها با ارائه یک مدل جامع، آلایندگی سطوح توزیع و تأمین را نیز در نظر گرفته‌اند.کنان[6] و همکارانبه طراحی یک شبکه لجستیک معکوس و تصمیم‌گیری در مورد مکان و ظرفیت تسهیلات با هدف حداقل کردن هزینه‌های زنجیره و هزینه‌های تجارت مجوزهای نشر آلودگی پرداخته‌اند[۱۲]. چابانه و همکاران در یک مدل دوهدفه میزان خروجی گازهای گلخانه‌ای در تولید محصولات و تولید انرژی تأمین شده را در محاسبه میزان آلایندگی در نظر گرفته‌اند و به طراحی یک شبکه

1- Emission trading
2- Two stage stochastic programming

3- Bojarski
4- Chaabane
5- Abdallah
6- Kannan

زنجیره تأمین بسته تحت روش تجارت مجوزهای نشر آلودگی پرداخته‌اند[۱۳]. در تمام مواردی که مورد بررسی قرار گرفت، همه متغیرها به‌صورت قطعی مدل‌سازی شده‌اند. در ادامه به بررسی مقالاتی که به عدم قطعیت در متغیرهای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز توجه کرده‌اند پرداخته خواهد شد.

جی. گویلن گوسالبز[1] وگروسمان[2] اولین کسانی بودند که عدم قطعیت عوامل متغیر زیست‌محیطی را در یک مدل ریاضی وارد کردند[۱۴]. آنها میزان آلایندگی به ازای تولید و یا حمل‌ونقل هر واحد کالا در بخش‌های مختلف زنجیره را غیرقطعی فرض کرده، سپس با قرار دادن کل آلایندگی زنجیره در یک محدودیت که به‌صورت احتمالی برقرار است به حداقل کردن آلایندگی زنجیره پرداخته‌اند. ام. اس پیشوا[3] و همکاران در یک مدل دوهدفه به تصمیم‌گیری در مورد مکان، ظرفیت و نوع تکنولوژی تسهیلات در شبکه پرداختند[۱۵]. آنها عدم قطعیت هزینه‌های تولید و میزان آلایندگی را از طریق روش‌های فازی مدل‌سازی و حل کرده‌اند. اس. گیارولا[4] و همکاران اولین کسانی بودند که عدم قطعیت در قیمت مبادله مجوزهای نشر آلودگی را با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مدل کرده‌اند[۱۶]. آنها علاوه بر عدم قطعیت قیمت مجوز، قیمت بیومس[5] را نیز غیرقطعی گرفته و به طراحی زنجیره‌ای پرداخته‌اند که یک شبکه زنجیره تأمین کامل (شامل سطوح تأمین، تولید و توزیع) نیست.

طبق جستجوهای انجام گرفته تا به‌حال در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز هیچ مقاله‌ای عدم قطعیت قیمت مجوز نشر آلودگی (و میزان تقاضا) را در نظر نگرفته است. در این مقاله به ارائه یک مدل ریاضی جهت تصمیم‌گیری در مورد مکان، ظرفیت و نوع تکنولوژی کارخانجات و مکان و ظرفیت مراکز توزیع و انتخاب تأمین‌کنندگان مواد اولیه و نحوه جریان کالا در شبکه خواهیم پرداخت و برای فائق آمدن بر عدم قطعیت قیمت مجوزهای نشر و تقاضا از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای بهره خواهیم برد.

۲-مدل و تعریف مسئله

مسئله مورد نظر در سطح استراتژیک (مرحله اول در برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای) شامل انتخاب مکان، ظرفیت و نوع تکنولوژی ساخت برای کارخانجات و تعیین مکان و ظرفیت مراکز توزیع و انتخاب تأمین‌کنندگان از بین گزینه‌های بالقوه و در سطح تاکتیکی (مرحله دوم در برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای) شامل تصمیمات در هر سناریو در مورد مقدار تولید، میزان حمل‌ونقل‌ها، نوع وسیله نقلیه، میزان مواد اولیه خرید شده از هر تأمین‌کننده و مقدار مجوزهای نشر آلودگی مبادله شده است. محصولات می‌توانند با تکنولوژی‌های مختلف ساخته و با وسایل متفاوت حمل شوند. تفاوت تکنولوژی‌ها و وسایل حمل‌ونقل از منظر آلودگی و هزینه‌هاست. مکان مشتریان مشخص و تمام تقاضای آنها باید پاسخ داده شود. کالاها می‌توانند از طریق انبارها و یا به‌طور مستقیم برای مشتریان ارسال شوند و وسایل حمل‌ونقل دارای حداقل و حداکثر ظرفیت هستند.

قیمت مبادله‌ای مجوزهای نشر آلودگی و میزان تقاضا در انتهای دوره معلوم خواهند شد و در ابتدای دوره سناریوهایی با احتمال معین برای هر کدام موجود می‌باشد. تصمیم‌گیری در مورد مکان و ظرفیت و نوع تکنولوژی کارخانجات، ظرفیت و مکان انبارها و در مورد انتخاب تأمین‌کنندگان در ابتدای دوره انجام خواهد شد و در انتهای دوره، بعد از مشخص شدن قیمت مجوزهای نشر آلودگی و میزان تقاضا به تصمیم‌گیری در مورد مقدار تولید و نحوه تخصیص به مشتریان می‌پردازد.

1- G.Guillén-Gosálbez
2- Grossmann
3- M.S. Pishvaee
4- S. Giarola
5- Biomass

۲-۱- تعریف متغیرهای مدل

اندیس‌ها

اندیس محصولات	i	اندیس مراکز توزیع	w		
اندیس مواد اولیه	r	اندیس ظرفیت مراکز توزیع (انبار)	v		
اندیس تأمین‌کنندگان	n	اندیس انواع وسایل حمل‌ونقل	k		
اندیس کارخانجات	m	اندیس مشتریان	j		
اندیس نوع تکنولوژی تولید	h	اندیس سناریوها	s		
اندیس ظرفیت کارخانجات	u				

عوامل متغیر

π_s قیمت خرید یا فروش مجوز نشر آلودگی در سناریو s (دلار)

d_{ijs} تقاضای محصول i در شهر j در سناریو s

cap حداکثر مجاز میزان آلایندگی شبکه (هزار تن)

f_{mhu} هزینه ثابت تأسیس کارخانه m با تکنولوژی h و با ظرفیت u

f'_{wv} هزینه ثابت تأسیس انبار w با ظرفیت v

f''_{n} هزینه سالیانه عقد قرارداد با تأمین‌کننده n

cm_{imh} هزینه تولید یک واحد محصول i با تکنولوژی h در کارخانه m

cs_{rnm} هزینه تأمین یک کیلوگرم ماده‌اولیه r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m

ct_{iabk} هزینه حمل یک واحد محصول i از a به b با وسیله نقلیه k

ρ_i زمان مورد نیاز برای ساخت یک واحد محصول i

ρ'_i حجم یک واحد محصول i

α_{ri} مقدار ماده اولیه r مورد نیاز برای ساخت یک واحد محصول i

c_{mhu} ظرفیت تولید در کارخانه m با تکنولوژی h و ظرفیت u

c'_{wv} ظرفیت انبارداری در انبار w با ظرفیت v

c''_{rn} توان تأمین تأمین‌کننده n برای ماده اولیه r

lb_{abk} حداقل میزان حمل‌ونقل بین a و b با وسیله نقلیه k

ub_{abk} حداکثر میزان حمل‌ونقل بین a و b با وسیله نقلیه k

em_{imh} آلودگی ایجاد شده به ازای تولید یک واحد از محصول i در کارخانه m با تکنولوژی h

et_{iabk} آلودگی ایجاد شده به ازای حمل یک واحد محصول i از a به b با وسیله نقلیه k

lt_{mh} فاکتور تبدیل هزینه ثابت تأسیس کارخانه m با تکنولوژی h به هزینه سالیانه

lt'_{w} فاکتور تبدیل هزینه ثابت تأسیس انبار w به هزینه سالیانه

b بودجه موجود جهت ایجاد کارخانجات و مراکز توزیع در کل شبکه

۲-۲- متغیرهای مدل

Q_{imhs} تعداد محصول i تولید شده در کارخانه m با تکنولوژی h در سناریو s

R_{rnms} مقدار ماده اولیه r حمل شده از تأمین‌کننده n به کارخانه m در سناریو s

L_{iabks} تعداد محصول i حمل شده از a به b با وسیله نقلیه k در سناریوs

E_s تعداد مجوز نشر آلودگی مبادله شده در سناریو s

F_{mhu} متغیر صفرویک تأسیس شدن یا نشدن کارخانه m با تکنولوژی h و ظرفیت u

F'_{wv} متغیر صفرویک تأسیس شدن یا نشدن انبار w با ظرفیت v

F''_n متغیر صفرویک انتخاب شدن یا نشدن تأمین‌کننده n

G_{abks} متغیر باینری استفاده یا عدم استفاده از وسیله حمل‌ونقل k بین a و b در سناریو s

۲-۳- مدل ریاضی مسئله

مسئله مرحله اول

$$MIN \sum_m \sum_h \sum_u (lt_{mh} f_{mhu}) F_{mhu} + \sum_w \sum_v (lt'_w f'_{wv}) F'_{wv} + \sum_n f''_n F''_n + E_s(Q(F, F', F'', s)) \quad (۱)$$

s.t.

$$\sum_m \sum_h \sum_u f_{mhu} F_{mhu} + \sum_w \sum_v f'_{wv} F'_{wv} \le b \quad (۲)$$

$$\sum_h \sum_u F_{mhu} \le 1 \qquad \forall m \quad (۳)$$

$$\sum_v F'_{wv} \le 1 \qquad \forall w \quad (۴)$$

$$\sum_m \sum_h \sum_u c_{mhu} F_{mhu} \ge \sum_i \sum_j d_{ijs} \qquad \forall s \quad (۵)$$

$$\sum_n c''_{rn} F''_n \ge \sum_i \sum_j d_{ijs}\, \alpha_{ri} \qquad \forall r, s \quad (۶)$$

$$F_{mhu}, F'_{wu}, F''_n \in \{0,1\} \qquad \forall n, m, h, u, w, v \quad (۷)$$

به‌طوری‌که برای هر سناریو در مرحله دوم داریم:

$$Q(F, F', F'', s) = MIN \sum_i \sum_m \sum_w \sum_k ct_{imwk} L_{imwks} + \sum_i \sum_w \sum_j \sum_k ct_{iwjk} L_{iwjks} + \sum_i \sum_m \sum_j \sum_k ct_{imjk} L_{imjks} + \sum_i \sum_m \sum_h cm_{imh} Q_{imhs} + \sum_r \sum_n \sum_m cs_{rnm} R_{rnms} + \pi_s E_s \quad (۸)$$

s.t.

$$\sum_i \sum_m \sum_w \sum_k et_{imwk} L_{imwks} \quad (۹)$$

$$+\sum_{i}\sum_{w}\sum_{j}\sum_{k} et_{iwjk}L_{iwjks}$$
$$+\sum_{i}\sum_{m}\sum_{j}\sum_{k} et_{imjk}L_{imjks}$$
$$+\sum_{i}\sum_{m}\sum_{h} em_{imh}Q_{imhs} - cap = E_s$$

$$\sum_{i}\rho_i Q_{imh} \le \sum_{u} c_{mhu}F_{mhu} \qquad \forall m,h \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{i}\sum_{m}\sum_{k}\rho'_i L_{imwks} \le \sum_{v} c'_{wv}F'_{wv} \qquad \forall w \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{m} \mathrm{R_{rnms}} \le \mathrm{c''_{rn}F''_{n}} \qquad \forall r,n \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{i}\sum_{h}\alpha_{ri}Q_{imhs} = \sum_{n}\mathrm{R_{rnms}} \qquad \forall r,m \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{h} Q_{imhs} = \sum_{w}\sum_{k} L_{imwks} + \sum_{j}\sum_{k} L''_{imjks} \qquad \forall i,m \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{m}\sum_{k} L_{imwks} = \sum_{j}\sum_{k} L_{iwjks} \qquad \forall i,w \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{w}\sum_{k} L_{iwjks} + \sum_{m}\sum_{k} L_{imjks} \ge d_{ijs} \qquad \forall i,j \qquad (۱۶)$$

$$lb_{mwk}G_{mwks} \le \sum_{i}\rho'_i L_{imwks} \le ub_{mwk}G_{mwks} \qquad \forall m,w,k \qquad (۱۷)$$

$$lb_{wjk}G_{wjks} \le \sum_{i}\rho'_i L_{iwjks} \le ub_{wjk}G_{wjks} \qquad \forall w,j,k \qquad (۱۸)$$

$$lb_{mjk}G_{mjks} \le \sum_{i}\rho'_i L_{imjks} \le ub_{mjk}G_{mjks} \qquad \forall m,j,k \qquad (۱۹)$$

$F_{mhu}, F'_{wu}, F''_{n}, G_{mwks},$
$G'_{wjks}, G''_{mjks} \in \{0,1\}$
$Q_{imhs}, R_{rnms}, L_{imwks}, L'_{iwjks},$
$L''_{imjks} \ge 0$
E_s is URS

$$\forall i,r,n,m,h,u,w,v,j,k \qquad (۲۰)$$

معادله شماره (۱) تابع هدف مسئله مرحله اول است که شامل معادل سالانه هزینه‌های ایجاد شبکه، هزینه‌های قرارداد با تأمین‌کنندگان و امید ریاضی هزینه‌های مسئله مرحله دوم است. معادله شماره (۲) محدودیت بودجه برای تأسیس تسهیلات شبکه است. معادلات شماره (۳) و (۴) محدودیت‌های منطقی ایجاد یک تسهیل با تکنولوژی و ظرفیت یکتا در هر مکان است. معادلات شماره (۵) و (۶) تضمین می‌کنند که جواب مسئله مرحله اول برای تمام سناریوهای مرحله دوم شدنی باشد، این معادلات در فرم مبسوط مدل تصادفی محدودیت زائد هستند.

معادله شماره (۸) تابع هدف مسئله مربوط به هر سناریو در مرحله دوم است. معادله شماره (۹) میزان مجوز مورد نیاز و یا مازاد را محاسبه می‌کند. معادلات شماره (۱۰) و (۱۱) و (۱۲) محدودیت‌های ظرفیت مربوط به کارخانجات و انبارها و تأمین‌کنندگان مواد اولیه است. معادلات شماره (۱۳) و (۱۴) و (۱۵) معادلات تعادل کالا و مواد اولیه در گره‌های شبکه است. معادله شماره (۱۶) محدودیت تقاضای مورد نیاز هر مشتری در هر سناریو برای هر کالا است. معادلات شماره (۱۷) و (۱۸) و (۱۹) محدودیت‌های ظرفیت برای هر نوع وسیله حمل‌ونقل بین هر دو گره در شبکه است.

۳-مطالعه موردی

در این قسمت با حل یک نمونه واقعی در حالت فرم مبسوط[1] مسائل تصادفی دومرحله‌ای (مطابق تعریف

1- Extensive form

مرجع[۷]) سعی در تجزیه‌وتحلیل آثار متغیرهای مدل و میزان کارایی آن می‌باشد. شبکه مورد نظر در کشور استرالیا و در صنعت مبلمان است. سه نوع محصول و پنج شهر کاندید برای تأسیس تسهیلات وجود دارد و تکنولوژی تولید و انواع وسایل حمل‌ونقل شامل سه نوع آلاینده، معمولی و سبز هستند. هم‌چنین فرض شده است که تکنولوژی تولید با هزینه ثابت بیشتر، آلایندگی و هزینه متغیر تولید کمتری دارد و وسایل حمل با هزینه کمتر، آلایندگی بیشتری دارند.

تقاضای مربوط به هر محصول دارای دو حالت خوش‌بینانه و بدبینانه است. در ضمن قیمت مجوز نشر آلودگی دارای سه حالت خوش‌بینانه، بدبینانه و محتمل است که در مجموع ۲۴ سناریو را تشکیل می‌دهند و احتمال رخداد آنها یکسان فرض شده است. برای حل از نرم‌افزار CPLX نسخه ۱۲.۳ و زبان برنامه‌نویسی c++ استفاده شده است.

۳-۱-اثر تغییرات قیمت مجوزهای نشر آلودگی

این قسمت به بررسی اثر افزایش قیمت مجوز نشر آلودگی می‌پردازد، برای این کار قیمت در تمام سناریوها به میزان یکسان افزایش داده شده است و سناریوهای مربوط به تقاضا در تمام نمونه‌ها بدون تغییر هستند. هر سطر جدول (۱) نماینده یک مسئله غیرقطعی با ۲۴ سناریو توضیح داده شده است.

با توجه به جدول (۱) با افزایش قیمت مجوز نشر آلودگی شبکه از توپولوژی نوع ۱ به نوع ۲ و سپس به توپولوژی نوع ۳ تغییر شکل می‌دهد که با توجه به جدول (۲) تعداد تسهیلات افزایش و متوسط ظرفیت آنها کاهش می‌یابد. شبکه با این کار آلایندگی بخش حمل‌ونقل را کاهش می‌دهد و در واقع سعی می‌کند به مشتریان نزدیک‌تر شود. افزایش تعداد تسهیلات با توجه به محدودیت بودجه باعث استفاده بیشتر از تکنولوژی‌های تولید ارزان‌تر با آلایندگی بالاتر می‌شود، به همین منظور جدول (۲) در توپولوی نوع ۱ ظرفیت تکنولوژی سبز ۶۰ درصد کل ظرفیت است که در توپولوژی‌های نوع ۲ و ۳ این ظرفیت به ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. پس با افزایش قیمت مجوز نشر آلایندگی، آلایندگی بخش تولید افزایش و آلایندگی حمل‌ونقل کاهش یافته که با توجه به سهم بیشتر آلایندگی حمل‌ونقل نسبت به تولید، آلایندگی کل زنجیره کاهش می‌یابد. با تغییر توپولوژی از ۱ به ۲، هزینه و آلایندگی بخش حمل‌ونقل کاهش داشته که نشان‌دهنده نزدیک‌تر شدن به مشتریان است، سایر کاهش‌ها در آلایندگی حمل‌ونقل با افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل همراه است که نشان‌دهنده استفاده بیشتر از وسایل حمل‌ونقل سبز با هزینه‌های بالاتر و آلایندگی کمتر است. با افزایش قیمت مجوزهای نشر آلودگی، مدل ابتدا مقدار مجوزهایی که می‌خرد را کاهش داده و سپس، مدل توانایی فروش مجوز را نیز پیدا می‌کند و سعی می‌کند سود حاصل از فروش مجوزهای نشر آلودگی را افزایش دهد. ستون آخر جدول (۱) مقدار تابع هدف را نمایش می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش امید ریاضی قیمت مجوزهای نشر هزینه‌های زنجیره ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند.

با توجه به فضای گسسته جواب‌های مرحله اول، به ازای توزیع‌هایی که مقدار امید ریاضی آنها نزدیک نقاطی است که توپولوژی دو مدل باهم متفاوت‌اند، باید حساسیت بیشتری در تخمین تابع توزیع قیمت مجوز نشر آلودگی داشت. در این شرایط می‌توان از تأسیس تسهیلات یکسان در دو توپولوژی شروع کرد و تأسیس سایر تسهیلات را تا حد امکان به تعویق انداخت تا در صورت امکان بتوان اطلاعات بیشتری از محیط کسب کرد. مثل توزیع‌هایی که امید ریاضی قیمت مجوز در آنها بین ۳۰ تا ۴۰ دلار و یا بین ۶۰ تا ۷۰ دلار هستند.

۳-۲-ارزش جواب‌های تصادفی

ارزش جواب‌های تصادفی با استفاده از روش مرجع[۸]محاسبه و بر مقدار تابع هدف مدل قطعی تقسیم و در ستون ارزش جواب‌های تصادفی جدول (۳) بیان شده است.نکته قابل توجه این است که در توزیع‌هایی که امید ریاضی قیمت مجوز ۴۰،۵۰ و ۶۰ دلار است، توپولوژی‌های حاصل از روش تصادفی هزینه ایجاد کمتری نسبت به توپولوژی‌های حاصل از روش قطعی دارند. اگر معادل سالانه اختلاف بین هزینه‌های ایجاد توپولوژی‌های ۲ و ۳ را محاسبه و آنها را نیز به‌عنوان ارزش ایجاد شده حاصل از استفاده از روش تصادفی بدانیم، ارزش جواب‌های تصادفی به میزان تقریبی ۰.۳۸ درصد افزایش داشته که در ستون ارزش جدید جواب‌های تصادفی بیان شده است. در داده‌های این مورد به ازای امید ریاضی قیمت‌های پایین و بالا ارزش جواب‌های تصادفی صفر است، چرا که توپولوژی‌های حاصل از روش تصادفی و روش قطعی با یکدیگر برابر می‌شوند.

جدول (۱): تغییرات توپولوژی در مدل تصادفی به ازای افزایش قیمت مجوز نشر آلودگی

مقدار تابع هدف	هزینه مبادله مجوز	هزینه تولید	هزینه حمل‌ونقل	آلایندگی کل	آلایندگی تولید	آلایندگی حمل‌ونقل	نوع توپولوژی	امید ریاضی قیمت	قیمت بدبینانه	قیمت متوسط	قیمت خوش‌بینانه
م. دلار	م. دلار	م. دلار	م. دلار	هزار تن	هزار تن	هزار تن	---	دلار	دلار	دلار	دلار
48.3	0.15	11.9	15.3	109.6	29.3	80.3	1	10	20	10	0
48.4	0.09	13.0	14.5	99.8	35.0	64.7	2	20	30	20	10
48.4	0.11	13.0	14.5	98.8	35.2	63.6	2	30	40	30	20
48.5	0.11	13.0	14.5	97.8	35.3	62.5	2	40	50	40	30
48.5	-0.34	13.0	15.0	89.8	35.3	54.5	2	50	60	50	40
48.4	-0.87	13.0	15.4	81.8	35.2	46.6	2	60	70	60	50
48.2	-1.50	13.1	15.6	73.6	35.5	38.1	3	70	80	70	60
48	-1.71	13.1	15.6	73.6	35.5	38.1	3	80	90	80	70
47.8	-1.93	13.1	15.6	73.6	35.5	38.1	3	90	100	90	80
47.6	-2.14	13.1	15.6	73.6	35.5	38.1	3	100	110	100	90

جدول (۲): جزئیات هر توپولوژی

شهر کاندید	توپولوژی ۱			توپولوژی ۲			توپولوژی ۳		
	کارخانه		انبار	کارخانه		انبار	کارخانه		انبار
	ظرفیت	تکنولوژی	ظرفیت	ظرفیت	تکنولوژی	ظرفیت	ظرفیت	تکنولوژی	ظرفیت
Adelaide	100000	آلاینده	---	---	---	---	100000	آلاینده	10000
Melbourne	---	---	18000	200000	آلاینده	18000	100000	آلاینده	---
Sydney	300000	سبز	18000	200000	سبز	18000	200000	سبز	18000
Perth	100000	آلاینده	---	100000	آلاینده	---	100000	آلاینده	---
Brisbane	---	---	---	---	---	---	---	---	---
میانگین	166666.7		18000	166666.7		18000	125000		14000

جدول (۳): ارزش جواب‌های تصادفی

ارزش جدید جواب‌های تصادفی	ارزش جواب‌های تصادفی	تصادفی		قطعی	
		نوع توپولوژی	امید ریاضی قیمت مبادله مجوز	نوع توپولوژی	قیمت مبادله مجوز
0.00%		1	10	1	10
		2	20	2	20
		2	30	2	30
0.63%	0.26%	2	40	3	40
0.49%	0.11%	2	50	3	50
0.40%	0.02%	2	60	3	60
0.00%		3	70	3	70
		3	80	3	80
		3	90	3	90
		3	100	3	100

۳-۳-اثر تغییرات بودجه

برای بررسی تأثیر این متغیر، شبکه مورد نظر را در چهار حالت، شامل ایجاد شبکه در بودجه‌های ۲۰ و ۳۰ میلیون دلاری و در حالاتی که امید ریاضی قیمت مجوز نشر ۲۰ و ۱۰۰ دلار است، طراحی کرده و به تحلیل جواب‌ها می‌پردازد.

در حالت کلی کاهش بودجه باعث کاهش تعداد تسهیلات شده و در نتیجه آلایندگی حمل‌ونقل بیشتر می‌شود و هم‌چنین باعث خرید تکنولوژی‌های تولید ارزان و آلاینده شده که این نیز باعث افزایش آلایندگی تولید می‌شود. پس کاهش بودجه باعث افزایش آلایندگی کل زنجیره می‌شود. مطابق جدول (۴)، در قیمت ۲۰ دلار افزایش آلایندگی کل براثر کاهش بودجه برابر با ۳۷.۰۲ درصد است (افزایش ۱۳۶۵۵۰ نسبت به ۹۹۶۵۸) که با افزایش قیمت به ۱۰۰ دلار این افزایش آلایندگی به ۳۱.۸۶ درصد می‌رسد (افزایش ۹۷۰۳۸ نسبت به ۷۳۵۹۱)، پس اگر قیمت مجوز افزایش یابد (به‌عبارت دیگر اهمیت آلایندگی بیشتر شود) مدل سعی می‌کند افزایش آلایندگی در اثر کاهش بودجه را کاهش دهد. در بودجه ۲۰ میلیونی در اثر افزایش امید ریاضی قیمت مجوزهای نشر آلودگی هیچ‌گونه تغییری در آلایندگی تولید به وجود نیامده است که به دلیل ثابت ماندن توپولوژی شبکه است.

کاهش بودجه باعث افزایش هزینه‌های تولید (به‌دلیل استفاده از تکنولوژی‌هایی با هزینه تأسیس ارزان‌تر و هزینه تولید گران‌تر) و افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل (به‌دلیل کاهش تعداد تسهیلات و افزایش حمل‌ونقل‌ها) می‌شود. در بودجه ۳۰ میلیون دلاری اگر قیمت مجوز افزایش یابد مدل با تغییر توپولوژی و نزدیک‌تر شدن به مشتریان، آلایندگی حمل‌ونقل را کاهش می‌دهد که باعث کاهش چشمگیری در هزینه‌های خرید مجوز می‌شود که این کاهش اثر افزایش هزینه سایر بخش‌ها را جبران کرده و باعث کاهش مقدار تابع هدف شده است؛ اما در بودجه ۲۰ میلیون دلاری افزایش قیمت مجوز باعث تغییری در توپولوژی نمی‌شود و تلاش مدل برای کاهش هزینه‌های خرید مجوز به‌قدری نیست که افزایش سایر هزینه‌ها را جبران کند، در نتیجه مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. در بودجه ۲۰ میلیون دلاری توپولوژی شبکه به ازای افزایش قیمت مجوز تا ۷۰۰ دلار نیز بدون تغییر باقی خواهد ماند. دلیل این عدم تغییر کاهش فضای جواب براثر کاهش مقدار سمت راست محدودیت بودجه است.

افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و کاهش آلایندگی حمل‌ونقل در اثر افزایش امید ریاضی قیمت مجوزهای نشر آلودگی در حالت ۲۰ میلیونی بیشتر از حالت ۳۰ میلیونی است، دلیل این دو موضوع می‌تواند ثابت ماندن توپولوژی در حالت ۲۰ میلیونی باشد. چرا که شبکه سعی در کاهش هزینه‌های آلودگی دارد اما چون نمی‌تواند توپولوژی را تغییر دهد تلاش بیشتری جهت کاهش آلایندگی بخش حمل‌ونقل به نسبت حالت ۳۰ میلیونی می‌کند که منتج به افزایش بیشتر در هزینه‌ها می‌شود. افزایش تابع هدف در اثر افزایش قیمت مجوزهای نشر در مدل ۳۰ میلیونی کمتر از مدل ۲۰

جدول (۴): اثر تغییرات بودجه

مقدار آلایندگی حمل‌ونقل		هزینه حمل‌ونقل		بودجه
۱۰۰ دلار	۲۰ دلار	۱۰۰ دلار	۲۰ دلار	
38061	64538	15.59	14.5	30
48940	88451	19.44	17.24	20
مقدار آلایندگی تولید		**هزینه تولید**		**بودجه**
۱۰۰ دلار	۲۰ دلار	۱۰۰ دلار	۲۰ دلار	
35530	35121	13.09	13.01	30
48098	48098	15.43	15.43	20
مقدار کل آلایندگی		**مقدار تابع هدف**		**بودجه**
۱۰۰ دلار	۲۰ دلار	۱۰۰ دلار	۲۰ دلار	
73591	99658	47.55	48.37	30
97038	136550	54.02	52.45	20

میلیونی است، دلیل آن این است که مدل ۳۰ میلیونی از افزایش امید ریاضی قیمت مجوزهای نشر استفاده می‌کند و به‌وسیله تغییر توپولوژی با سود حاصل از فروش مجوزهای مازاد خود مقدار تابع هدف را کاهش می‌دهد؛ اما در مدل ۲۰ میلیونی چون توپولوژی تغییر نمی‌کند هزینه‌های شبکه در اثر افزایش امید ریاضی قیمت مجوز نشر آلودگی افزایش می‌یابند.

۴-نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و قیمت مجوزهای انتشار آلودگی ارائه و حل شد. نتایج نشان داد که قیمت مجوزهای نشر آلودگی بر ساختار شبکه تأثیرگذار است و با تغییر آن توپولوژی شبکه نیز تغییر خواهد کرد. هم‌چنین در نظر گرفتن عدم قطعیت و استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی باعث کاهش هزینه‌های ایجاد و بهره‌برداری شبکه می‌شود. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که محدودیت بودجه علاوه بر تأثیرگذاری بر هزینه‌ها و آلایندگی بخش‌های مختلف زنجیره بر تأثیرپذیری توپولوژی شبکه در اثر تغییرات قیمت مجوزهای نشر نیز اثرگذار خواهد بود.

منابع

[1] Santoso T, Ahmed S, Goetschalckx M, Shapiro A. ***A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty***. European Journal of Operational Research;167:96-115,2005.

[2] Nickel S, Saldanha-da-Gama F, Ziegler H-P. ***A multi-stagestochastic supply network design problem with financial decisions and risk management***. Omega;40:511-24,2012.

[3] Hugo A, Pistikopoulos EN. ***Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks***. Journal of Cleaner Production;40:1471-91,2005.

[4] Lee D-H, Dong M. ***Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty***. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review;45:61-71,2009.

[5] Dehghanian F, Mansour S. ***Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm***. Resources, Conservation and Recycling;53:559-70,2009.

[6] Klibi W, Martel A, Guitouni A. ***The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review***. European Journal of Operational Research;203:283-93,2010.

[7] Birge JR, Louveaux FV. Introduction to Stochastic programming: Springer; 1997.

[8] Mohammadi Bidhandi H, Mohd Yusuff R. ***Integrated supply chain planning under uncertainty using an improved stochastic approach***. Applied Mathematical Modelling;35:2618-30,2011.

[9] Bojarski AD, Laínez JM, Espuña A, Puigjaner L. ***Incorporating environmental impacts and regulations in a holistic supply chains modeling: An LCA approach***. Computers & Chemical Engineering;33:1747-59,2009.

[10] Chaabane A, Ramudhin A ,Paquet M. ***Designing supply chains with sustainability considerations***. Production Planning & Control;22:727-41,2011.

[11] Abdallah T, Farhat A, Diabat A, Kennedy S. ***Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: Formulation and life cycle assessment***. Applied Mathematical Modelling;36:4271-85,2012.

[12] Kannan D, Diabat A, Alrefaei M, Govindan K, Yong G. ***A carbon footprint based reverse logistics network design model***. Resources, Conservation and Recycling;67:75-9,2012.

[13] Chaabane A ,Ramudhin A, Paquet M. ***Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme***. International Journal of Production Economics;135:37-49,2012.

[14] Guillén-Gosálbez G, Grossmann IE. ***Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty***. AIChE Journal;55:99-121,2009.

[15] Pishvaee MS, Torabi SA, Razmi J. ***Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty***. Computers & Industrial Engineering;62:624-32,2012.

[16]Giarola S, Shah N, Bezzo F. ***A comprehensive approach to the design of ethanol supply chains including carbon trading effects***. Bioresource Technology;107:175-85,2012.