

## طراحی یک شبکه زنجیره تامین با در نظر گرفتن تقاضای حساس به قیمت و میزان انتشار کربن

امیر رضا ناجی عطار<sup>۱</sup>، فرزاد دهقانیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد؛ amirreza.naji.attar@mail.um.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد؛ f.dehghanian@um.ac.ir

### چکیده

امروزه با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و توجه بیش از پیش مشتریان به سازگاری محصولات با محیط پیرامون، تولید محصول سبز اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. با توجه به تاثیر بسیار زیاد زنجیره‌تأمین بر میزان انتشار محصول تولیدشده، هدف اصلی این پژوهش، طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین سبز است که در آن تقاضای مشتری وابسته به دو عامل قیمت و میزان انتشار کربن در فرایند تولید محصول می‌باشد. مقدار انتشار کربن این مساله به نوع تکنولوژی تولید و حمل‌ونقل بین اجزای مختلف زنجیره‌تأمین وابسته است. در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی ریاضی برای طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین با هدف بیشینه کردن سود ارائه می‌شود. برای محاسبه مقدار انتشار کربن به ازای هر محصول نهایی، ابتدا مقدار کربن انتشار یافته کل زنجیره محاسبه شده و بر مجموع مقدار محصول نهایی ارسال شده تقسیم می‌شود. در پایان نتایج مدل با یک مثال عددی بررسی شده‌اند.  
**کلمات کلیدی:** طراحی شبکه زنجیره‌تأمین، قیمت‌گذاری، تقاضای حساس به انتشار

## Supply chain network design with price and carbon emission sensitive demand

Amir Reza Naji Attar<sup>1</sup>, Farzad Dehghanian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MSc Student, Ferdowsi University of Mashhad; amirreza.naji.attar@mail.um.ac.ir

<sup>2</sup>Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad; f.dehghanian@um.ac.ir

### Abstract

Nowadays, due to the increasing environmental concerns and the growing attention of customers to the compatibility of products, the production of green products has become especially important. Because of the huge impact of supply chain on the amount of emission, the main goal of this study is the design of green supply chain network in which customer demand depends on the price and the amount of carbon emissions in the production process. The amount of carbon emissions depend on the type of production technology and transportation between various facilities of the supply chain. This paper presents a mathematical optimization model for designing a supply chain network with the aim of maximizing profit. To calculate the amount of carbon emissions per product, first we calculate the amount of carbon released by the entire supply chain then divide it by the total amount of Products sent to the customer. Finally, The results have been evaluated by a numerical example.

**Keywords:** Supply chain network design, Pricing, Carbon emission sensitive demand

### ۱- مقدمه و مرور ادبیات

#### ۱-۱- مقدمه

امروزه نگرانی جوامع بشری نسبت به مسائل زیست‌محیطی بیش از پیش افزایش یافته است. این نگرانی‌ها تاثیر خود را در خرید مشتریان و تدابیر دولت‌ها نشان می‌دهد؛ به طوری که تعداد زیادی از خریداران در انتخاب خود به میزان آلودگی ایجاد شده توسط محصولات توجه می‌کنند [۱]. مطالعات بسیاری روی رفتار مشتریان نسبت به خرید محصول انجام گرفته که نشان‌دهنده تعداد زیاد مشتریانی است که حاضر به پرداخت هزینه بیشتر در ازای خرید محصول سازگارتر با محیط‌زیست هستند و هر روزه به تعداد این مشتریان افزوده می‌شود [۲] [۳].

علاوه بر مشتریان، دولت‌ها نیز با اقدامات مختلف در صدد کاهش میزان آلاینده‌گی محصولات هستند [۴]. بسیاری از پژوهش‌ها به تاثیر زیاد تولیدکنندگان بر میزان آلودگی محیط زیست اذعان دارند؛ به همین منظور بیشتر تدابیر دولت‌ها، تمرکز رسانه‌ها و جامعه برای کاهش میزان آلودگی، بر روی شرکت‌های تولیدکننده متمرکز شده است [۵] [۶].

عوامل نظارتی دولت‌ها و همچنین بازار گسترده مشتریان حساس به مسائل زیست محیطی، تولیدکنندگان را بر آن داشته است که با کاهش میزان کربن انتشار یافته، علاوه بر جذب تقاضای مشتریان حساس<sup>۱</sup>، نگرانی دولت را نیز برطرف نماید. نمونه‌ای از اقدامات اولیه تولیدکنندگان، بهبود نوع تکنولوژی تولید است [۷].

اما بسیاری از پژوهش‌ها نشان می‌دهند تنها راه کاهش میزان انتشار کربن تغییر تکنولوژی تولید نبوده و از عوامل تاثیرگذار در این بخش می‌توان به مدیریت زنجیره تامین اشاره نمود. از جمله موارد تاثیرگذار زنجیره تامین که منجر به انتشار کربن می‌شود می‌توان به نوع حمل و نقل، فاصله بین اجزا و مکان تاسیس هر جزء اشاره نمود [۵] [۸].

پس از پی بردن محققان به اهمیت زنجیره تامین و تاثیر آن بر میزان آلودگی محیط زیست، تمرکز بسیاری از پژوهش‌ها به طراحی و اصلاح زنجیره تامین معطوف شده است. تحقیقات انجام شده در بخش ذکر شده با کلمه کلیدی زنجیره تامین سبز<sup>۲</sup> مشخص می‌شود. در این حوزه پژوهشی در بخش طراحی مکان بهینه تسهیلات، نوع حمل و نقل و نوع تکنولوژی تولید تحقیقات گسترده‌ای صورت پذیرفته است [۹].

به دلیل تاثیر مکان‌یابی بهینه در نوع حمل و نقل، فاصله و تعداد تسهیلات زنجیره تامین، این بخش را یکی از تاثیرگذارترین حوزه‌های زنجیره تامین سبز معرفی می‌کنند. در بسیاری از پژوهش‌ها تلاش شده که با طراحی بهینه، فاصله بین تسهیلات و اجزای مختلف زنجیره تامین کمینه شود تا به وسیله کم‌هزینه‌ترین و پاک‌ترین روش، حمل و نقل بین اجزا انجام شود [۱۰].

به دلیل محاسبه تقاضا در مقدار درآمد و تاثیر مستقیم آن در اندازه تولید یک کارخانه، اهمیت در نظر گرفتن این پارامتر به طور چشمگیری افزایش یافته است. پژوهش‌های اولیه نشان می‌دهند که با کنترل میزان انتشار و افزایش کیفیت محصول می‌توان به “اندازه تقاضای مطلوب با سود بیشینه” دست یافت [۵].

اهمیت تاثیر مقدار انتشار در تقاضای مشتری موجب شد که Nouria و همکاران [۱۱] یک تابع تقاضای حساس تعریف کنند که با افزایش و کاهش میزان انتشار کربن تغییر می‌کند. علاوه بر مدل ذکر شده، پژوهش‌های متعددی به تابع تقاضای حساس پرداخته‌اند که نشان‌دهنده اهمیت این بخش می‌باشد.

اما یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های موجود برای شرکت‌ها در کنار کاهش میزان انتشار کربن، تعیین قیمت نهایی محصول است؛ به نحوی که مشتریان با توانایی خرید متفاوت را در نظر بگیرد و قیمت منصفانه‌ای ارائه دهد. قیمت‌گذاری<sup>۳</sup> زنجیره تامین سبز را می‌توان به سه دسته مختلف تقسیم کرد. دسته اول به بازطراحی زنجیره تامین با در نظر گرفتن تقاضای حساس به میزان انتشار و قیمت نهایی می‌پردازد [۱۲]. دسته دوم زنجیره حساس به انتشار با در نظر گرفتن قیمت ثابت طراحی می‌کنند [۱۱] و در نهایت گروه سوم طراحی یک زنجیره تامین و تعیین قیمت نهایی محصول را انجام می‌دهند با این فرض که میزان انتشار زنجیره از مقدار آستانه بیشینه فراتر نرود.

از دسته بندی فوق می‌توان به این نتیجه رسید که تاکنون هیچ پژوهشی به طور همزمان به طراحی زنجیره تامین با در نظر گرفتن حساسیت مشتریان به میزان انتشار کربن و قیمت گذاری هوشمند نپرداخته است و این مساله در پژوهش پیش‌رو مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد.

## ۲-۱- مرور ادبیات

پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته این مقاله را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد. در بخش نخست، مطالعاتی که برای طراحی زنجیره تامین سبز تلاش کردند بررسی می‌کنیم. بخش دوم به بررسی مقالاتی که در مدل خود وابستگی به انتشار در نظر گرفته شده است، اختصاص دارد و در نهایت مطالعاتی که طراحی زنجیره تامین و قیمت‌گذاری محصول را به صورت همزمان در نظر گرفته‌اند معرفی می‌شوند.

به منظور طراحی زنجیره تامین سبز در یک پژوهش کافی است نگرانی‌های زیست محیطی در آن لحاظ شود. از جمله مواردی که در زنجیره تامین باعث ایجاد آلودگی محیط زیست می‌شود می‌توان به مکان تسهیلات، روش حمل و نقل و نوع تکنولوژی اشاره کرد.

<sup>1</sup> Emission sensitive demand

<sup>2</sup> Green supply chain

<sup>3</sup> pricing

اولین مطالعات در زمینه زنجیره تامین سبز در جهت کاهش میزان انتشار، به تغییر تکنولوژی تولید و بررسی تاثیر آن پرداختند. Rădulescu و همکاران [۱۳] در مدل خود سه سطح آلودگی مورد انتظار که عبارتند از: سطح مطلوب آلودگی، سطح هشدار و حداکثر آلودگی قابل قبول، در نظر گرفتند. در مدل ذکر شده اگر میزان آلودگی از سه سطح ذکر شده فراتر رود مقداری به عنوان جریمه به هزینه‌ها اضافه می‌شود.

مطالعه دیگری که در این بخش انجام شده به بررسی حساسیت تقاضای مشتری نسبت به آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌پردازد (Nouira و همکاران [۱۴]). در این مقاله برای کاهش میزان آلودگی، در مورد تکنولوژی‌های مختلف مطالعه انجام می‌شود تا هدف بیشینه‌سازی سود کارخانه میسر شود.

بر اساس تحقیقی که در دانشگاه میشیگان انجام شده، روش‌های حمل‌ونقل و لوازم الکتریکی جزو اصلی‌ترین عوامل آلوده‌کننده محیط‌زیست معرفی می‌شوند. اهمیت این پژوهش موجب شد که Bozorgi و همکاران [۱۵] به اثر حمل‌ونقل مواد مورد نیاز به یخچال در میزان آلودگی بپردازند. در این مقاله، حمل‌ونقل یک محصول که به درجه حرارت پایین نیاز دارد از یک انبار به یک مرکز توزیع در نظر گرفته شده است و هدف اصلی آن کاهش هزینه‌ها و مقدار انتشار می‌باشد به طوری که مقدار سفارش بهینه محاسبه شود.

علاوه بر این، مکان تامین‌کننده و فاصله آن نسبت به دیگر اجزای زنجیره‌تامین، در نوع حمل‌ونقل تاثیر دارند. این فرض در مطالعه Palak و همکاران [۴] در نظر گرفته شده‌است. در این مطالعه برای محاسبه مقدار هزینه‌ها و با هدف کمینه‌کردن آنها، مقدار انتشار کربن بیشینه‌ای تحت عنوان "Cap" مفروض است و با توجه به این مقدار پس از انتخاب تامین‌کننده در جهت کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری، مدل‌سازی صورت می‌گیرد.

در بخش زنجیره‌تامین سبز، مکان‌یابی تسهیلات به علت در برگرفتن تمامی حوزه‌های تاثیرگذار در آلودگی، اهمیت ویژه‌ای دارد. اگر بین دو جزء زنجیره فاصله وجود داشته باشد، زنجیره نیازمند حمل‌ونقل است؛ همچنین نوع تکنولوژی تولید می‌تواند بر هزینه مکان کارخانه تولید موثر باشد. بنابراین تسهیلات باید طوری مکان‌یابی شوند که با افزایش تقاضای مشتریان حساس به انتشار، رضایت آن‌ها جلب شود.

Martí و همکاران [۸] یکی از جدیدترین مطالعات انجام شده در بخش زنجیره‌تامین سبز را ارائه نمودند که میزان آلودگی یک زنجیره و مقدار "Cap" تعیین شده توسط دولت را به طور همزمان در مقدار تقاضای مشتریان تاثیر دادند. مدل ارائه شده با جستجو در بین سیاست‌های مختلف، بهترین راه‌حل موجود جهت کاهش میزان انتشار را مورد بررسی قرار می‌دهند تا با کاهش انتشار و افزایش تقاضا به هدف بیشینه‌سازی سود دست یابند.

یکی از مهم‌ترین مطالعه‌های صورت گرفته در بخش طراحی زنجیره‌تامین با در نظر گرفتن تقاضای حساس به میزان انتشار نوشته Nouira و همکاران [۱۱] است. در این مقاله تقاضا یک تابع قطعه قطعه خطی است که با تغییر مقدار انتشار ناشی از تولید و حمل‌ونقل رابطه مستقیم دارد. Nouira در این پژوهش مقادیر آستانه انتشار کربن بیشینه و کمینه معرفی نمود و یک رابطه مستقیم بین مقادیر آستانه انتشار و تقاضای مشتری در نظر گرفت. همچنین تابع هدف این مساله بیشینه‌سازی سود کارخانه در نظر گرفته شده‌است.

تصمیم‌های تاثیرگذار در این بخش که عبارتند از تصمیم‌گیری در مورد طراحی زنجیره‌تامین و همچنین تعیین قیمت نهایی محصول، ماهیت متفاوتی دارند. طراحی زنجیره‌تامین از جمله تصمیم‌های استراتژیک محسوب می‌شوند در حالی که قیمت‌گذاری محصول یک تصمیم عملیاتی می‌باشد [۱۰]. به همین دلیل مطالعاتی که به طراحی زنجیره‌تامین همراه با قیمت‌گذاری می‌پردازند بسیار اندک هستند. Bilir و همکاران [۱۶] پژوهشی به عمل آوردند که در بخش طراحی زنجیره‌تامین با در نظر گرفتن تقاضای حساس به انتشار و قیمت انجام شده است. در این مطالعه تابع تقاضای حساس به قیمت وجود داشته و نویسندگان در نظر دارند مکان بهینه را طوری تعیین کنند که فاصله بین مرکز توزیع و مشتری کمتر از فاصله تعیین شده مساله باشد.

Moradinasab و همکاران [۱۷] در مدل خود سه زنجیره‌تامین برای محصولات نفتی منظور کردند. هر کدام از این زنجیره‌ها تابع تقاضای مخصوص به خود را دارد که این تابع تقاضا به قیمت نهایی محصول هر زنجیره، قیمت فروش دولتی با یارانه و قیمت فروش دولتی بدون یارانه وابسته است. پس از تعیین قیمت نهایی و تقاضای مشتری، طراحی زنجیره‌ها با اهداف کاهش میزان آلودگی و بیشینه‌سازی سود انجام می‌گیرد.

در نهایت با توجه به پژوهش‌های بررسی‌شده، یکی از مسائلی که تا امروز مورد مطالعه قرار نگرفته است، تاثیر آلودگی‌های زیست‌محیطی و قیمت‌گذاری محصول نهایی به صورت همزمان در مقدار تقاضای مشتریان می‌باشد. بنابراین هدف مقاله پیش رو، طراحی یک شبکه زنجیره‌تامین با در نظر گرفتن تاثیرات زیست‌محیطی و قیمت نهایی محصول است.

## ۲- تعریف مساله

زنجیره‌تامین مورد مطالعه در این مقاله شامل سه سطح: تامین‌کننده، کارخانه تولید محصول و در نهایت مشتری می‌شود. هدف اصلی که این مقاله دنبال می‌کند، دستیابی به یک مقدار تقاضای بهینه با در نظر گرفتن حساسیت مشتریان به میزان کربن انتشاریافته به ازای تولید هر واحد محصول و همچنین قیمت نهایی محصول بوده و تابع هدف این مدل بیشینه‌سازی سود است.

### ۱-۲- مجموعه‌ها و پارامترهای مساله

مجموعه‌های به کار رفته در مساله عبارتند از:  $R$  مجموعه مواد اولیه مورد نیاز،  $I$  مجموعه تامین‌کنندگان،  $J$  مجموعه کارخانه‌ها،  $K$  مجموعه مشتریان،  $H$  مجموعه تکنولوژی‌های تولید،  $U$  مجموعه ظرفیت کارخانه‌ها،  $T$  مجموعه روش‌های حمل‌ونقل و  $L$  مجموعه تعداد قیمت‌های مصوب برای محصول نهایی.

پارامترهایی که در محاسبه‌های این مقاله تاثیر دارند عبارتند از:

$CM_{jhu}$	هزینه تولید هر واحد محصول در کارخانه $j$ با تکنولوژی تولید $h$ و ظرفیت کارخانه $u$
$FC_{jhu}$	هزینه تاسیس کارخانه $j$ با تکنولوژی $h$ و ظرفیت $u$
$TC_{rijt}$	هزینه خرید و ارسال هر واحد ماده اولیه $r$ از تامین‌کننده $i$ به کارخانه $j$ با روش حمل‌ونقل $t$
$TC'_{jkt}$	هزینه ارسال هر واحد محصول نهایی از کارخانه $j$ به مشتری $k$ با روش حمل‌ونقل $t$
$a$	مقدار تقاضای بالقوه
$E_0$	آستانه انتشار ماکزیمم به ازای هر واحد محصول نهایی
$b$	ضریب حساسیت تقاضا به قیمت
$\delta$	ضریب حساسیت تقاضا به میزان انتشار کربن.
$e_{ijt}$	مقدار کربن انتشاریافته به ازای ارسال هر واحد ماده اولیه از تامین‌کننده $i$ به کارخانه $j$ با روش حمل‌ونقل $t$
$e'_{jhu}$	مقدار کربن انتشاریافته به ازای تولید هر واحد محصول نهایی در کارخانه $j$ با تکنولوژی $h$ و ظرفیت $u$
$e''_{jkt}$	مقدار کربن انتشاریافته به ازای ارسال هر واحد محصول نهایی از کارخانه $j$ به مشتری $k$ با روش حمل‌ونقل $t$
$M$	مقدار به اندازه کافی بزرگ
$\alpha_r$	مقدار ماده اولیه مورد نیاز $r$ برای تولید محصول نهایی
$C_{ri}$	ظرفیت ماده اولیه $r$ در تامین‌کننده $i$
$C'_{jhu}$	ظرفیت تولید کارخانه $j$ با تکنولوژی $h$ و ظرفیت $u$

متغیرهای تصمیم این مساله به دو بخش متغیرهای سفرویک و متغیرهای صحیح تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

$X_{rijt}$	• اگر ماده اولیه $r$ از تامین‌کننده $i$ به کارخانه $j$ با روش حمل‌ونقل $t$ ارسال شود؛ ۱ در غیر این صورت ۰
$X'_{jkt}$	• اگر محصول نهایی از کارخانه $j$ به مشتری $k$ با روش حمل‌ونقل $t$ ارسال شود؛ ۱ در غیر این صورت ۰
$Z_{jhu}$	• اگر کارخانه $j$ با تکنولوژی تولید $h$ و ظرفیت $u$ تاسیس شود؛ ۱ در غیر این صورت ۰
$k_l$	• اگر قیمت مصوب $p_l$ انتخاب شود؛ ۱ در غیر این صورت ۰
$Y_{rijt}$	مقدار ماده اولیه $r$ که از تامین‌کننده $i$ به کارخانه $j$ با روش حمل‌ونقل $t$ ارسال شود

مقدار محصول نهایی که از کارخانه $j$ به مشتری $k$ با روش حمل‌ونقل $t$ ارسال شود	$Y'_{jkt}$
مقدار تولید در کارخانه $j$ با تکنولوژی $h$ و ظرفیت $u$	$Q_{jhu}$
قیمت نهایی محصول	$P$
تقاضای وابسته به انتشار و قیمت برای مشتری $k$	$D_k$
مقدار کربن انتشار یافته کل زنجیره تامین برای مشتری $k$	$TE_k$
مقدار کربن انتشار یافته به ازای هر واحد برای مشتری $k$	$E_k$

## ۲-۲- مدل اصلی

معادله شماره ۱ تابع تقاضای مدل را معرفی می‌کند. بخش دوم تابع تقاضا نشان‌دهنده حساسیت تقاضا نسبت به مقدار قیمت نهایی محصول است. این قیمت با کمک معادله ۲ از بین سه مقدار تعیین شده انتخاب شده و با کمک معادله ۳ مقدار قیمت نهایی یکتا می‌شود. همچنین در این مقاله فرض شده که مقدار انتشار به ازای هر واحد محصول نمی‌تواند از آستانه انتشار فراتر رود (معادله ۴).

$$D_k = a - b * P + \delta (E_0 - E_k) \quad \forall k \quad (1)$$

$$P = k_1 p_1 + k_2 p_2 + k_3 p_3 \quad (2)$$

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1 \quad (3)$$

$$0 \leq E_k \leq E_0 \quad (4)$$

تابع هدف مدل اصلی به شکل زیر معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Max } \sum_l k_l P_l * \sum_j \sum_k \sum_t Y'_{jkt} - [\sum_j \sum_h \sum_u FC_{jhu} * Z_{jhu} + \sum_j \sum_h \sum_u CM_{jhu} * Q_{jhu} \\ \sum_r \sum_i \sum_j \sum_t TC_{rijt} * Y_{rijt} + \sum_j \sum_k \sum_t TC'_{jkt} * Y'_{jkt}] \end{aligned} \quad (5)$$

بخش نخست معادله فوق برای محاسبه مقدار درآمد زنجیره تامین، بخش دوم آن برای هزینه‌های به ترتیب: احداث کارخانه، هزینه‌های تولید، هزینه‌های حمل‌ونقل بین تامین‌کننده و کارخانه و بخش پایانی هزینه‌های حمل‌ونقل بین کارخانه و مشتری در مدل لحاظ شدند.

باتوجه به اینکه بخش درآمد تابع فوق به صورت غیرخطی است، متغیر  $g_l$  را به مدل اضافه می‌کنیم و درآمد مساله را به شکل معادله ۶ تغییر می‌دهیم:

$$g_1 P_1 + g_2 P_2 + g_3 P_3 \quad (6)$$

مقدار متغیر  $g_l$  نیز با کمک معادله ۷ به دست می‌آید:

$$\begin{cases} M * (k_l - 1) + \sum_j \sum_k \sum_t Y'_{jkt} \leq g_l \leq \sum_j \sum_k \sum_t Y'_{jkt} \\ g_l \leq M * k_l \end{cases} \quad \forall l \quad (7)$$

محدودیت‌های مدل شامل بخش‌های مختلفی می‌شوند که در ادامه آن‌ها را معرفی می‌کنیم:

$$\sum_j \sum_t Y'_{jkt} \leq D_k \quad \forall k \quad (8)$$

مقدار ارسال نهایی محصول نمی‌تواند از مقدار تقاضا بیشتر باشد. محدودیت شماره ۸ برای همین منظور در مدل لحاظ می‌شود.

$$\alpha_r \sum_h \sum_u Q_{jhu} = \sum_i \sum_t Y_{rijt} \quad \forall r, j \quad (9)$$

$$\sum_k \sum_t Y'_{jkt} = \sum_h \sum_u Q_{jhu} \quad \forall j \quad (10)$$

هزینه‌های موجودی در مدل در نظر گرفته نشده و این عامل باعث می‌شود که مقدار مواد اولیه ارسالی با مقدار تولید و همچنین مقدار تولید محصول نهایی با ارسال آن برابر باشد (معادله‌های ۹ و ۱۰).



محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲ برای کنترل یکتا بودن حمل‌ونقل بین سطوح در مدل لحاظ می‌شوند. همچنین با کمک محدودیت ۱۳ فرض کردیم که یک تکنولوژی تولید در هر کارخانه می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد و ظرفیت تولید هر کارخانه یکتا است:

$$\sum_t X'_{jkt} \leq I \quad \forall j, k \quad (11)$$

$$\sum_t X_{rijt} \leq I \quad \forall r, i, j \quad (12)$$

$$\sum_h \sum_u Z_{jhu} \leq I \quad \forall j \quad (13)$$

ارتباط بین متغیرهای صفرویک و متغیرهای صحیح به صورت محدودیت‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ برقرار می‌شود.

$$0 \leq Y_{rijt} \leq M * X_{rijt} \quad \forall r, i, j, t \quad (14)$$

$$0 \leq Q_{jhu} \leq M * Z_{jhu} \quad \forall j, h, u \quad (15)$$

$$0 \leq Y'_{jkt} \leq M * X'_{jkt} \quad \forall j, k, t \quad (16)$$

همچنین محدودیت ۱۷ برای کنترل ظرفیت تامین‌کننده و محدودیت ۱۸ برای کنترل ظرفیت کارخانه هستند.

$$\sum_j \sum_t Y_{rijt} \leq C_{ri} \quad \forall r, i \quad (17)$$

$$\sum_u Q_{jhu} \leq \sum_u C'_{jhu} Z_{jhu} \quad \forall j, h \quad (18)$$

معادله کرین انتشار یافته کل زنجیره به شکل زیر تعریف می‌شود. بخش اول و دوم معادله ۱۹ پس از طی کردن مراحل که در ادامه توضیح داده می‌شوند به دست می‌آیند اما بخش سوم این معادله از حاصل ضرب مقدار محصول نهایی ارسال شده به هر مشتری در مقدار انتشار به ازای هر واحد محاسبه می‌شود. پس از محاسبه مقدار انتشار کل زنجیره، از طریق معادله ۲۰ مقدار انتشار کرین به ازای هر واحد برای هر مشتری را محاسبه می‌کنیم.

$$TE_k = \sum_r \sum_i \sum_j \sum_t \alpha_r * g'_{rijtk} + \sum_j \sum_h \sum_u \sum_t g''_{jhukt} + \sum_j \sum_t e'_{jkt} * Y'_{jkt} \quad \forall k \quad (19)$$

$$E_k = TE_k / \sum_j \sum_t Y'_{jkt} \quad \forall k \quad (20)$$

بخش اول معادله ۱۹ برای محاسبه مقدار انتشار کرین حاصل از حمل‌ونقل بین سطوح اول و دوم با روش حمل‌ونقل مورد نظر است. برای سهولت در محاسبه، متغیر  $\gamma_j$  را به مدل اضافه می‌کنیم تا با کمک نامعادله زیر، بیشترین مقدار انتشار بین سطوح یک و دو محاسبه شود:

$$\gamma_j \geq e_{ijt} * X_{rijt} \quad \forall r, i, j, t \quad (21)$$

در این مرحله ابتدا متغیر صفرویک  $f_{rijt}$  به مدل اضافه شد تا با کمک معادله ۲۲ بتوانیم به ازای هر کارخانه تنها یک مسیر را در نظر بگیریم:

$$\sum_r \sum_i \sum_t f_{rijt} \leq 1 \quad \forall j \quad (22)$$

برای محاسبه مقدار  $\gamma_j$  در تابع انتشار، معادله زیر را به مدل می‌افزاییم:

$$\gamma_j = \sum_r \sum_i \sum_t e_{ijt} * f_{rijt} * X_{rijt} \quad \forall j \quad (23)$$

برای اینکه ضرب دو متغیر باینری  $X_{rijt}$  و  $f_{rijt}$  را بتوانیم به صورت خطی به مدل اضافه کنیم، متغیر صفرویک  $n_{rijt}$  به مدل اضافه می‌شود که روش محاسبه آن به صورت زیر است:

$$\begin{cases} 2 * n_{rijt} \leq f_{rijt} + X_{rijt} \\ f_{rijt} + X_{rijt} \leq n_{rijt} + 1 \end{cases} \quad \forall r, i, j, t \quad (24)$$

مقدار  $\gamma_j$  به صورت زیر تبدیل شده و محاسبه می‌شود:

$$\gamma_j = \sum_r \sum_i \sum_t e_{ijt} * n_{rijt} \quad \forall j \quad (25)$$

در پایان، بخش نخست تابع انتشار کل که به میزان انتشار بین تامین‌کننده و کارخانه مربوط می‌شود، به کمک معادله زیر به دست می‌آید:

$$\sum_r \sum_i \sum_j \sum_t e_{ijt} * n_{rijt} * Y'_{jkt} \quad \forall k \quad (26)$$

معادله ۲۶ یک مقدار غیرخطی است. برای خطی کردن این مقدار به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\begin{cases} M * (n_{rijt} - 1) + e_{ijt} * Y'_{jkt} \leq g'_{rijtk} \leq e_{ijt} * Y'_{jkt} \\ g'_{rijtk} \leq M * n_{rijt} \end{cases} \quad \forall r, i, j, t, k \quad (27)$$

در نهایت، محاسبه میزان انتشار کربن حاصل از ارسال مواد اولیه از تامین‌کنندگان به کارخانه‌ها به شکل بخش اول معادله ۱۹ می‌شود. برای محاسبه مقدار انتشار کربن توسط تکنولوژی تولید که بخش دوم تابع انتشار است، از معادله زیر استفاده می‌کنیم:

$$\sum_j \sum_h \sum_u \sum_t e'_{jhu} * Y'_{jkt} * Z_{jhu} \quad \forall k \quad (28)$$

معادله ۲۸ به دلیل ضرب شدن دو متغیر در یکدیگر، یک معادله غیرخطی است. خطی کردن این معادله هم به کمک معادله ۲۹ انجام می‌شود:

$$\begin{cases} M * (Z_{jhu} - 1) + e'_{jhu} Y'_{jkt} \leq g''_{jhukt} \leq e'_{jhu} Y'_{jkt} \\ g''_{jhukt} \leq M * Z_{jhu} \end{cases} \quad \forall j, h, u, t, k \quad (29)$$

خطی‌سازی شده معادله ۲۹ را در بخش دوم معادله ۱۹ مشاهده می‌کنیم.

### ۳- روش حل ابتکاری

مدل غیرخطی این پایان‌نامه به دلیل تقسیم دو متغیر غیرخطی است و برای حل آن روش ابتکاری با شرح زیر ارائه می‌شود:

۱. محدودیت شماره ۴ نشان می‌دهد که مقدار انتشار کربن به ازای تولید هر واحد محصول نهایی نباید از مقدار آستانه انتشار کربن به ازای هر واحد فراتر رود. در ابتدا این محدودیت را از مدل حذف می‌کنیم.
۲. مقدار  $E_k$  را به عنوان یک پارامتر و برابر با بیشترین مقدار ممکن برای انتشار کربن در نظر می‌گیریم. در این مساله چون فرض کردیم مقدار انتشار کربن نمی‌تواند از آستانه انتشار فراتر رود، این مقداری بیشینه برابر با  $E_0$  می‌شود. همچنین محدودیت مربوط به محاسبه آن (محدودیت ۲۰) را حذف می‌کنیم.
۳. به جای محدودیت ۲۰، محدودیت زیر را به مدل مساله اضافه می‌کنیم:

$$TE_k \leq E_k * \sum_j \sum_t Y'_{jkt} \quad \forall k \quad (30)$$

۴. مساله را با فرم جدید و محدودیت‌های اضافه و کم شده حل می‌کنیم. پس از اتمام حل مدل، مقدار انتشار کربن به ازای هر واحد ( $E_k$ ) را از معادله زیر به دست می‌آوریم:

$$E_k = TE_k / \sum_j \sum_t Y'_{jkt} \quad \forall k \quad (31)$$

۵. مقدار  $E_k$  به دست آمده در بخش چهارم را به عنوان پارامتر ورودی اولیه برای مدل در نظر می‌گیریم و مرحله ۴ را تکرار می‌کنیم.

۶. مرحله ۵ را تا زمانی که  $E_k$  دو مرحله ۴ و ۵ با یکدیگر برابر شوند ادامه می‌دهیم. همچنین یکی از شروط توقف روش حل، عدم بهبود در تابع هدف است.

### ۳-۲- مثال عددی

برای حل مساله ارائه شده قصد داریم از مطالعه موردی مقاله Nouira و همکاران [۱۱] استفاده کنیم. در این مقاله چهار کشور چین، تونس، ایتالیا و لهستان برای انتخاب تامین‌کننده و یا تاسیس کارخانه در نظر گرفته می‌شوند. دو مشتری عمده فروش آلمانی و ایتالیایی داریم. روش‌های حمل‌ونقل جاده‌ای، ریلی، هوایی و دریایی در مدل قرار دارند و تکنولوژی‌های تولید نرمال و سبز برای کارخانه‌ها در نظر گرفته شده است. برای تولید هر واحد محصول نهایی، به یک واحد از هر ماده اولیه  $p_1$ ،  $p_2$ ،  $p_3$  و  $p_4$  نیاز است ( $\alpha_r = 1; \forall r$ ). مقادیر پارامترهای موثر در تابع تقاضا عبارتند از:  $a=300,000$ ،  $b=180$ ،  $\delta = 30$  و مقدار آستانه انتشار بیشینه تعیین شده توسط دولت برای تولید این محصول برابر با ۱۰۰۰ واحد می‌باشد.

پس از معرفی پارامترها، مساله را حل کنیم. تکرارهای روش ابتکاری را در سطرهای اول تا نهم جدول ۱ مشاهده می‌کنید:

مقدار انتشار به ازای هر واحد بر ارسال نهایی	مقدار ارسال محصول نهایی برای مشتری مورد نظر	مقدار انتشار کل زنجیره برای مشتری مورد نظر	مقدار انتشار به ازای هر واحد	مشتری	تابع هدف
۸۳۹.۸۴	۲۷۳.۰۰۰	۲۲۹.۲۷۴.۹۹۹.۸۶	۱.۰۰۰	ایتالیا	۵۸.۶۵۷.۳۴۰.۰۰
۷۹۸.۵۲	۲۷۳.۰۰۰	۲۱۷.۹۹۴.۶۲۰.۱۳	۱.۰۰۰	آلمان	
۸۲۸.۹۰	۲۷۷.۸۰۷.۸۰	۲۳۰.۲۷۵.۴۲۶.۷۲	۸۳۹.۸۴	ایتالیا	۵۹.۸۷۲.۸۴۲.۵۲
۷۹۰.۹۰	۲۷۹.۰۴۴.۴۰	۲۲۰.۶۹۵.۱۶۵.۸۸	۷۹۸.۵۲	آلمان	
۸۲۸.۹۰	۲۷۸.۱۲۳	۲۳۰.۵۴۴.۴۴۲.۷۰	۸۲۸.۹۰	ایتالیا	۵۹.۷۶۷.۷۴۰.۷۸
۷۲۴.۰۵	۲۷۹.۲۷۳	۲۰۲.۲۰۷.۲۴۸.۶۸	۷۹۰.۹۰	آلمان	
۸۲۸.۹۰	۲۷۸.۱۲۳	۲۳۰.۵۴۴.۴۴۲.۷۰	۸۲۸.۹۰	ایتالیا	۵۹.۹۷۴.۰۸۳.۲۷
۷۱۹.۷۸	۲۸۱.۲۷۸.۵۰	۲۰۲.۴۵۷.۹۱۸.۴۹	۷۲۴.۰۵	آلمان	
۶۹۶.۷۶	۲۸۱.۱۳۳	۱۹۵.۸۸۲.۰۶۰.۵۹	۸۲۸.۹۰	ایتالیا	۶۰.۱۶۹.۶۶۰.۵۵
۷۱۹.۷۸	۲۸۱.۴۰۶۶۰	۲۰۲.۵۵۰.۸۴۲.۵۵	۷۱۹.۷۸	آلمان	
۶۹۶.۷۶	۲۸۲.۰۹۷.۲۰	۱۹۶.۵۵۴.۰۴۵.۰۷	۶۹۶.۷۶	ایتالیا	۶۰.۲۷۲.۰۱۴.۷۲
۷۱۸.۰۲	۲۸۲.۰۹۷.۲۰	۲۰۲.۵۵۰.۸۴۲.۵۵	۷۱۹.۷۸	آلمان	
۶۹۶.۲۹	۲۸۲.۰۹۷.۲۰	۱۹۶.۴۲۰.۱۹۵.۴۰	۶۹۶.۷۶	ایتالیا	۶۰.۲۹۲.۲۸۰.۱۷
۷۱۶.۴۰	۲۸۲.۰۹۷.۲۰	۲۰۲.۰۹۲.۴۷۸.۳۹	۷۱۸.۰۲	آلمان	
۶۸۸.۹۹	۲۸۲.۱۱۱.۳۰	۱۹۴.۳۷۰.۶۹۲.۳۵	۶۹۶.۲۹	ایتالیا	۶۰.۳۷۲.۱۰۹.۴۵
۷۱۶.۴۰	۲۸۱.۵۰۸.۰۰	۲۰۱.۶۷۲.۳۳۱.۲۰	۷۱۶.۴۰	آلمان	
۶۸۸.۹۹	۲۸۲.۳۲۰.۳۰	۱۹۴.۵۲۲.۷۵۳.۴۰	۶۸۸.۹۹	ایتالیا	۶۰.۱۸۸.۶۰۸.۸۳
۶۸۸.۹۹	۲۸۱.۵۰۸	۲۰۱.۶۷۲.۳۳۱.۲۰	۷۱۶.۴۰	آلمان	

جدول ۱: گام‌های حل مدل با روش ابتکاری

در جدول فوق ابتدا مقدار  $E_k$  را برابر با ۱۰۰۰ قرار می‌دهیم. ستون‌های جدول به ترتیب نشان‌دهنده تابع هدف زنجیره، مقادیر میزان انتشار کل زنجیره برای مشتری‌های ایتالیایی و آلمانی، مقدار محصول نهایی ارسال شده و مقدار انتشار هر محصول نهایی حاصل از معادله ۳۱ را پس از حل مدل نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که پس از ۹ تکرار روش ابتکاری متوقف می‌شویم و به مقدار سود تقریبی سطر ۸ دست پیدا می‌کنیم.

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر طراحی یک زنجیره‌تامین به همراه در نظر گرفتن حساسیت‌های زیست‌محیطی مشتریان یکی از پر کاربردترین مباحث مدیریت زنجیره‌تامین سبز محسوب می‌شود. اهمیت این مبحث موجب سرمایه‌گذاری‌های کلان در بخش طراحی و همچنین بازطراحی شبکه‌های زنجیره‌تامین شده است. پژوهش مورد نظر به بررسی رفتار مشتریان نسبت به تغییرات زیست‌محیطی (انتشار کربن) و همچنین قیمت نهایی محصول می‌پردازد. سیاست‌های کاهش انتشار کربن در این پژوهش شامل در نظر گرفتن روش‌های مختلف حمل‌ونقل و همچنین تکنولوژی‌های تولید مختلف است.

قیمت‌گذاری محصول نهایی را می‌توان یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش دانست. در این مساله تابع تقاضایی تعریف شده که با افزایش و یا کاهش اندازه قیمت نهایی محصول به صورت خطی تغییر می‌کند. اما در دنیای واقعی نمی‌توان محصولی یافت که قیمت نهایی آن به صورت پیوسته تغییر کند به همین منظور در این مساله قیمت محصول محدود به سه قیمت زیاد، متوسط و کم شده است. در این پژوهش ابتدا مسیرهای مختلف برای تامین محصول با توجه به هدف کاهش انتشار مشخص می‌شوند و سپس میزان انتشار کل زنجیره با توجه به میزان ارسال و همچنین میزان تولید اندازه‌گیری می‌شود. در پایان، مجموع انتشار زنجیره‌تامین بر میزان تولید محصولات تقسیم می‌شود تا انتشار کربن به ازای تولید یک محصول مشخص شود.

برای مطالعات آتی از جمله پیشنهاداتی که می‌توان مطرح نمود در نظر گرفتن هزینه‌های موجودی در مدل‌سازی مساله است. هزینه‌های نگهداری موجودی در یک انبار یا در کارخانه تولید از جمله مواردی است که می‌تواند در یک زنجیره در نظر گرفته شود و به هزینه‌های مدل اضافه شود. پیشنهاد دیگر برای توسعه مدل مورد نظر افزایش تعداد سطوح زنجیره‌تامین برای طراحی شبکه است. در شرکت‌های صنعتی امروز تعداد سطوحی که برای یک زنجیره وجود دارد می‌تواند شامل بیش از سه سطح باشد. به همین منظور پیشنهاد افزایش میزان سطوح زنجیره مطرح می‌شود.



## منابع

- [۱] Zhang, L., J. Wang, and J. You. (2015). Consumer environmental awareness and channel coordination with two substitutable products, *European Journal of Operational Research*, 241, 63-73.
- [۲] Rao, P. (2002). Greening the supply chain: a new initiative in South East Asia, *International Journal of Operations & Production Management*, 22, 632-655.
- [۳] Jayaraman, V., R. Singh, and A. Anandnarayan. (2012). Impact of sustainable manufacturing practices on consumer perception and revenue growth: an emerging economy perspective, *International Journal of Production Research*, 50, 1395-1410.
- [۴] Palak, G., S.D. Ekşioğlu, and J. Geunes. (2014). Analyzing the impacts of carbon regulatory mechanisms on supplier and mode selection decisions: An application to a biofuel supply chain, *International Journal of Production Economics*, 154, 198-216.
- [۵] Altmann, M. (2014). A supply chain design approach considering environmentally sensitive customers: the case of a German manufacturing SME, *International Journal of Production Research*, 53, 16.
- [۶] Tate, W.L., L.M. Ellram, and J.F. Kirchoff. (2010). Corporate social responsibility reports: a thematic analysis related to supply chain management, *Journal of supply chain management*, 46, 19-44.
- [۷] Krass, D., T. Nedorezov, and A. Ovchinnikov. (2013). Environmental taxes and the choice of green technology, *Production and operations management*, 22, 1035-1055.
- [۸] Martí, J.M.C., J.-S. Tancrez, and R.W. Seifert. (2015). Carbon footprint and responsiveness trade-offs in supply chain network design, *International Journal of Production Economics*, 166, 129-142.
- [۹] Dekker, R., J. Bloemhof, and I. Mallidis. (2012). Operations Research for green logistics—An overview of aspects, issues, contributions and challenges, *European Journal of Operational Research*, 219, 671-679.
- [۱۰] Chaabane, A., A. Ramudhin, and M. Paquet. (2012). Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme, *International Journal of Production Economics*, 135, 37-49.
- [۱۱] Noura, I., et al. (2011). Design of forward supply chains: Impact of a carbon emissions-sensitive demand, *International Journal of Production Economics*, 135, 80-98.
- [۱۲] Yang, L., Q. Zhang, and J. Ji. (2017). Pricing and carbon emission reduction decisions in supply chains with vertical and horizontal cooperation, *International Journal of Production Economics*, 191, 286-297.
- [۱۳] Rădulescu, M., S. Rădulescu, and C.Z. Rădulescu. (2009). Sustainable production technologies which take into account environmental constraints, *European Journal of Operational Research*, 193, 730-740.
- [۱۴] Noura, I., Y. Frein, and A.B. Hadj-Alouane. (2014). Optimization of manufacturing systems under environmental considerations for a greenness-dependent demand, *International Journal of Production Economics*, 150, 188-198.
- [۱۵] Bozorgi, A., J. Pazour, and D. Nazzal. (2014). A new inventory model for cold items that considers costs and emissions, *International Journal of Production Economics*, 155, 114-125.
- [۱۶] Bilir, C., S.O. Ekici, and F. Ulengin. (2017). An integrated multi-objective supply chain network and competitive facility location model, *Computers & Industrial Engineering*, 108, 136-148.
- [۱۷] Moradinasab, N., et al. (2018). Competition and cooperation between supply chains in multi-objective petroleum green supply chain: A game theoretic approach, *Journal of Cleaner Production*, 170, 818-841.