

ارائه مدل برنامه ریزی ریاضی چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین کمپوست با تأکید بر کیفیت کود تولیدشده با توجه به روش ساخت و پایداری محیط زیست

سیما غایب لو^{۱*}، فریبا فتحی پور^۲، مهسا علی محمدی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳	تولید کمپوست از مواد زائد دارای سابقه طولانی است و از دیرباز از روش های متفاوتی برای تولید کمپوست استفاده شده است. علیرغم اهمیت بالای کمپوست به عنوان کود ارگانیک برای باروری محصولات کشاورزی، مرور ادبیات زنجیره تأمین تولید کمپوست نشان می دهد که این مسئله چندان مورد توجه قرار نگرفته است. از طرف دیگر، کیفیت کمپوست تولید شده بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله با یک نگاه نوآورانه در قالب روش تحلیل سلسله مراتبی به آن پرداخته شده است. از این رو، مقاله حاضر با ارائه یک مدل چندهدفه به چگونگی فرآیند تولید کمپوست و طراحی زنجیره تأمین آن و بررسی کیفیت کمپوست، هزینه های کمپوست و همچنین کاهش آلاینده های زیست محیطی گازهای گلخانه ای حاصل از آن پرداخته است. برای حل مدل چندهدفه از روش های مجموع وزن دهی شده و اپسیلون محدودیت استفاده شده است. مدل برای یک مطالعه موردی حل و کارایی مدل ارائه شده بررسی و با توجه به تحلیل حساسیت های انجام گرفته، بینش های مفید مدیریتی در ارتباط با تعیین ظرفیت بهینه تأمین کنندگان و تولید کنندگان، بهبود کارایی زنجیره تأمین کمپوست با در نظر گرفتن تابع هدف کیفیت کمپوست، تعیین وسیله حمل و نقل مناسب با در نظر گرفتن اولویت های مدیریتی در مورد هزینه کل زنجیره تأمین و الزامات قانونی مربوط به انتشار آلاینده ها و تعیین روش تولید بهینه کمپوست استخراج شده است.
واژگان کلیدی: طراحی زنجیره تأمین، کمپوست، برنامه ریزی چندهدفه، کیفیت کمپوست، مجموع وزن دهی شده، اپسیلون محدودیت.	

۱- مقدمه

امروزه، ۱٫۳ بلیون تن مواد غذایی هر سال دور ریخته شده و سپس سوزانده و یا دفن می شوند که این مسئله منجر به ایجاد مشکلات عمده اقتصادی، زیست محیطی و حتی اجتماعی شده است [۱]. با این وجود؛ نه تنها روش هایی برای جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی وجود دارد، بلکه می توان از این زباله ها برای تولید کودهای طبیعی و ارگانیک جهت

استفاده در کشاورزی و باغبانی برای کشت محصولات باکیفیت تر و سالم تر استفاده کرد که به این کودها، کمپوست گفته می شود [۲]. بر اساس تعریف ارائه شده توسط سازمان استاندارد، کمپوست، کود آلی جامد پایدار و بهداشتی حاصل از تجزیه بیولوژیکی مواد آلی تحت تیمار انواع مختلف ریز جانداران هست که می تواند از فرآوری مخلوطی از چند ماده آلی قابل تجزیه تشکیل شده باشد و

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghayebloo.sima@znu.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و صنایع، دانشگاه زنجان،

۲. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، آموزش عالی سراج، تبریز

۳. دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد مرکزی تهران

یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای زنجیره تأمین حلقه بسته محصولات کشاورزی شامل تأمین‌کنندگان، مزارع و مراکز توزیع در زنجیره تأمین مستقیم و مشتریان، مراکز بازیافت و تولید بیوگاز و کمپوست در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، تابع هدف مدل، حداکثر سازی سود بوده است که با استفاده از روش‌های متاهیورستیک حل شده است. در مطالعه [۲۱]، زنجیره تأمین مرکبات، به دلیل دغدغه و نگرانی عمده بخش‌های دولتی و خصوصی در رابطه با مرکبات خراب‌شده، بررسی شده است. برای مسئله فوق، یک مدل برنامه‌ریزی دو هدفه شامل حداقل کردن هزینه‌ها و حداکثر سازی پاسخگویی به نیازهای مشتریان ارائه داده شده است که برای حل مدل از الگوریتم چندهدفه کشتل^۲ استفاده شده است. در انتها، جواب‌های پارتویی به‌دست‌آمده از روش الگوریتم ژنتیک نامغلوب^۳ و روش شبیه‌سازی تبرید چندهدفه^۴ مقایسه شده‌اند. در مطالعه [۲۲]، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مدیریت یکپارچه مواد زائد جامد شهری ارائه شده است. در مدل فوق، تولید کمپوست به‌عنوان یکی از محصولات در زنجیره تأمین معکوس در نظر گرفته شده و راجع به کیفیت و اثرات زیست‌محیطی بحثی نشده است. علیرغم در نظر نگرفتن موارد فوق، در این مدل نرخ‌های ایجاد مواد جامد، حالت‌های حمل‌ونقل، تکنیک‌های پردازش، درآمدهای حاصله از پردازش ضایعات و بسیاری از موارد مرتبط با مدیریت مواد جامد شهری مطرح شده‌اند که آن را در حیطه مدل‌های جامع و فراگیر برای مدیریت یکپارچه مواد جامد شهری قرار داده است. در مطالعه [۲۳]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه برای مدیریت زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس محصولات کشاورزی ارائه شده که در زنجیره تأمین معکوس، تولید کمپوست از ضایعات محصولات کشاورزی در نظر گرفته شده است. اهداف حداقل کردن هزینه و انتشار گاز مونوکسید کربن و حداکثر سازی پاسخگویی مد نظر قرار گرفته‌اند.

در میان انواع آلودگی‌های زیست‌محیطی، آلودگی از طریق گازهای گلخانه‌ای بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تحقیقات نشان می‌دهد که وسایل نقلیه و حمل‌ونقل، عامل اصلی انتشار چهار آلاینده مونواکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌ها و ذرات معلق هوا هستند [۵].

دارای رنگ قهوه‌ای و بوی خاک هست [۳]. کمپوست در انواع کمپوست شهرداری، کمپوست سبز، ورمی کمپوست و کمپوست قارچ خوراکی موجود هست [۴]. فرآیندهایی که برای تولید کمپوست وجود دارد شامل روش‌های برگرداندن توده، هوادهی فعال، هوادهی غیرفعال و تولید کمپوست در راکتور می‌باشند [۲].

مدیریت زنجیره تأمین کمپوست به‌عنوان یک کود ارگانیک، بسیار ضروری هست. در ادبیات، مدیریت تولید و مصرف کودها، تحت عنوان مدیریت زنجیره تأمین کمپوست مطرح شده‌اند. دلایل متعددی مانند توسعه پایدار، نگرانی‌های زیست‌محیطی، کمبود انرژی و کاهش منابع طبیعی موجب افزایش توجه به مدیریت زنجیره تأمین سبز شده است [۱۸]. مواد زائد به‌دست‌آمده از زباله‌های شهری، کشاورزی، جنگلی و حیوانی به‌عنوان مواد اولیه تهیه کمپوست یا پوسال در نظر گرفته شده و بعد از تبدیل آن‌ها به کمپوست به کشاورزان و سایر مشتریان کمپوست عرضه می‌گردد. این فرآیند، تحت عنوان زنجیره تأمین کمپوست یا پوسال شناخته شده است. محمد امتیاز و خرم شهزاد، با استفاده از شاخص‌های اقتصاد دایره‌ای^۱، کل فرآیندهای زنجیره تبدیل زباله‌های شهری به کمپوست را با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با توجه به مدل فوق، نتیجه‌گیری کردند که این تکنولوژی منجر به افزایش درآمد از طریق فروش کمپوست تولیدشده و جایگزینی کودهای ارگانیک با کودهای شیمیایی در سطح بالا شدند. همچنین میزان انتشار گازهای آلاینده نیز به طرز چشمگیری کاهش یافت [۱۹]. در ادامه پاره‌ای از مطالعات انجام‌گرفته در زمینه زنجیره تأمین تولید کمپوست تشریح شده‌اند.

یونس جبار زاده و همکاران [۱۳]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح چندهدفه و چند دوره‌ای برای بهینه‌سازی یک شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم و معکوس میوه سیب، جریان مستقیم شامل سه سطح (باغ‌ها، مراکز توزیع و مناطق مشتریان داخلی و خارجی) و جریان معکوس شامل دو سطح (مراکز کمپوستینگ و بازار کمپوست) توسعه دادند. اهداف مدل فوق شامل حداکثر سازی سود، حداقل سازی اثرات زیست‌محیطی و حداکثر سازی پاسخگویی در نظر گرفته شده‌اند. در مطالعه [۲۰]،

³ Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA)

⁴ Multi objective simulated annealing

¹ Circular Economy

² Keshtel

گرفته شده و با استفاده از رویکرد وزن دهی ساده تعیین می‌شود. منابع ایجاد انتشار گازهای گلخانه‌ای در یک زنجیره تأمین سبز می‌تواند متنوع باشد. در مطالعه [۱۰] میزان انتشار این گازها که به دلیل فرآیندهای عملیاتی موجود در زنجیره تأمین و هم‌چنین حمل‌ونقل در بین بخش‌های مختلف زنجیره تأمین می‌تواند ایجاد شود در محاسبه اثرات زیست‌محیطی زنجیره تأمین حلقه بسته مدنظر قرار گرفته است. اثرات زیست‌محیطی در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته به صورت جامع از مجموع اثرات مربوط به حمل‌ونقل، مجموع اثرات مربوط به احداث، اثرات زیست‌محیطی اکوسیستم و اثر زیست‌محیطی از فعالیت تسهیلات در مطالعه [۱۱] محاسبه شده است.

در جدول ۱ مسائل زنجیره تأمین تولید کمپوست با جزئیات بیشتر و با در نظر گرفتن چند دسته ویژگی شامل سال انتشار، نوع تابع هدف و روش حل ارائه شده‌اند. ویژگی‌های مسئله و مدل ریاضی مدنظر در این مقاله، در سطر آخر جدول ۱ آمده است.

انتشار گازهای گلخانه‌ای نه تنها به سلامت انسان ضرر می‌رساند بلکه اثرات مخربی بر محیط‌زیست همچون افزایش خشکسالی، بارش‌های سنگین و جاری شدن سیل، افزایش سطح آب دریاها و آسیب رسیدن به منابع آب، کشاورزی، حیات‌وحش و اکوسیستم نیز دارد [۶]. انتشار آلودگی برای شیوه‌هایی وجود دارد که سوخت فسیلی مصرف می‌کنند که بر اساس مقدار انتشار آلودگی به ازای مصرف هر لیتر گازوئیل در حمل‌ونقل جاده‌ای ۰٫۸۰۴ کیلوگرم در هر کیلومتر است. این مقدار برای شیوه انتقال ریلی ۱۰٫۷۲ و کشتی‌های سوخت‌رسان ۳۰٫۲۴۶ کیلوگرم در هر کیلومتر هست [۷، ۸]. برای محاسبه اثرات زیست‌محیطی در مطالعات مختلف، روش‌ها و رویکردهای متفاوتی ارائه شده است. در مطالعه [۹] برای تعیین اثر عوامل محیط‌زیست در هر یک از فعالیت‌ها، با استفاده از نتایج حاصل از آزمون‌های مختلف، شاخص‌های محیط زیستی به رتبه ۰ تا ۱۰۰ تبدیل شده‌اند. در انتها اثر زیست‌محیطی کلی در سطح پروژه، با تجمیع اثرات زیست‌محیطی برآورد شده برای تمامی فعالیت‌ها در نظر

جدول ۱: طبقه‌بندی مسائل زنجیره تأمین تولید کمپوست

اهداف	مرجع	سال انتشار	هزینه	اثرات زیست‌محیطی	پاسخگویی	کیفیت	روش حل
	[۱۹]	۲۰۱۸	*		*		متاهیورستیک
	[۲۰]	۲۰۱۹	*				دقیق
	[۲۱]	۲۰۲۰	*	*	*		وزنی
	[۱۲]	۲۰۲۰	*	*	*		برنامه‌ریزی آرمانی
	[۱۸]	۲۰۲۱	*				متاهیورستیک
	این پژوهش	۲۰۲۱	*	*	*	*	وزنی و محدودیت اسیلون

گرفته در این حیطه (جدول ۱) را ببینید) نشان می‌دهد که زنجیره تأمین کمپوست، علیرغم اهمیت آن چندان مورد توجه قرار نگرفته است. البته زنجیره تأمین حلقه بسته در چند مطالعه انجام شده است که در قالب زنجیره تأمین معکوس تهیه کمپوست مطرح شده است [۱۳]. علیرغم اهمیت مطالعات فوق، باید اذعان کرد که در مطالعات فوق، تولید کمپوست فقط بر اساس ضایعات محصول تولید شده در زنجیره تأمین مستقیم مطرح شده‌اند و کیفیت کود تهیه شده مورد توجه قرار نگرفته است. طراحی زنجیره تأمین

با افزایش فزاینده جمعیت و روند رو به گسترش شهرنشینی، روزانه بر مقدار زباله تولیدشده به‌وسیله انسان افزوده می‌شود. به‌طوری‌که بعد از تأمین مواد غذایی، زباله و دفع آن یکی از مسائل عمده بشر به شمار می‌آید [۱۲]. از این رو، طراحی زنجیره تأمین کمپوست به صورت کارا که نه تنها هزینه را مد نظر قرار داده بلکه به بهینه‌سازی معیارهای مرتبط با محیط زیست از جمله انتشار گاز دی‌اکسید کربن^۱ و همچنین کیفیت کود تهیه‌شده می‌پردازد، مفید و کاربردی خواهد بود. مرور مطالعات انجام

^۱ CO₂

فضولات دامی و شاخ و برگ درختان (پسماند گیاهی) هستند که به دو نوع کمپوست دامی و گیاهی تبدیل می‌شوند. از این مواد اولیه، ۲۰ درصد از ماده اولیه شاخ و برگ گیاهان (پسماند گیاهی) و ۸۰ درصد از ماده اولیه فضولات دامی به کمپوست (محصول نهایی) تبدیل می‌شود. هر تولیدکننده می‌تواند با یکی از چهار روش تولید کمپوست یعنی، روش برگرداندن توده، روش هوادهی فعال، روش هوادهی غیرفعال و روش تولید کمپوست در رآکتور محصول خود را تولید کند. در این زنجیره، دو دوره زمانی در نظر گرفته شده است. مشتریان می‌توانند سفارش خود را هم از توزیع‌کنندگان و هم به صورت مستقیم از تولیدکنندگان دریافت کنند. تولیدکنندگان ابتدا مصرف شهر خود را از بین محصول نهایی برداشته و سپس باقی‌مانده را در بین توزیع‌کنندگان و مشتریان جهت تأمین سفارشات آن‌ها تقسیم می‌کنند. در زنجیره تأمین کمپوست، حمل‌ونقل بین گره‌ها به وسیله حمل‌ونقل جاده‌ای انجام می‌شود و هر وسیله حمل‌ونقل، میزان مشخصی محصول با خود حمل می‌کند. برای مثال وانت مزدا تک کابین در هر بار حمل‌ونقل، ۱۰۰۰ کیلوگرم محصول با خود می‌تواند حمل کند. همچنین هر وسیله نقلیه، میزانی آلودگی ایجاد می‌کند که در این مطالعه میزان آلودگی هوا بر اساس انتشار گازهای گلخانه‌ای^۱، گاز CO_2 بررسی شده است. انتشار آلودگی برای شیوه‌هایی وجود دارد که سوخت فسیلی مصرف می‌کنند. مقدار انتشار آلودگی به ازای مصرف هر لیتر سوخت گازوئیل در حمل‌ونقل جاده‌ای برابر ۰٫۸۰۴ کیلوگرم در هر کیلومتر است [۷، ۸]. در این پژوهش، کیفیت کود کمپوست بر اساس روش تولید که شامل روش‌های هوادهی فعال و غیرفعال، روش برگرداندن توده و همچنین روش تولید رآکتوری هست، بررسی شده است. همچنین هزینه‌های ناشی از تولید کمپوست و آلودگی‌های زیست‌محیطی که در هنگام حمل‌ونقل این محصول ایجاد می‌شود شامل آلودگی هوای ناشی از گازهای گلخانه‌ای (GHG) مانند گاز CO_2 ، محاسبه شده‌اند. با جمع‌بندی مطالب بیان شده در این بخش، می‌توان فرض‌های مسئله را در قالب موارد زیر خلاصه نمود.

✓ تعداد و مکان‌های مراکز تأمین‌کننده مشخص

کود که مواد اولیه آن متنوع بوده و کیفیت کود تولید را نیز در نظر می‌گیرد بسیار حائز اهمیت است. از طرف دیگر، قسمت عمده مطالعات انجام گرفته در مورد زنجیره تأمین کود، مربوط به کودهای شیمیایی می‌باشند که با توجه به اثرات زیان‌بار این کودها، نیاز به استفاده از کودهای طبیعی و ارگانیک از جمله کمپوست و بهینه‌سازی زنجیره تأمین آن بسیار ضروری است [۱۴-۱۷]. در این تحقیق به بررسی جنبه‌های مختلف زنجیره تأمین کمپوست از جمله آلودگی‌های زیست‌محیطی گاز گلخانه‌ای CO_2 به هنگام حمل‌ونقل و همچنین هزینه‌های زنجیره تأمین کمپوست و کیفیت کمپوست بر اساس روش تولید آن پرداخته شده است. مقوله‌های فوق در قالب یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی سه هدفه شامل اهداف حداقل کردن هزینه‌ها، حداقل کردن اثرات زیست‌محیطی گاز گلخانه‌ای CO_2 و حداکثر کردن کیفیت کود کمپوست تولید شده توسعه داده شده است و از روش‌های وزنی و محدودیت اپسیلون برای حل آن استفاده شده است. به منظور بررسی کارایی، مدل ارائه شده در یک مطالعه موردی در ایران پیاده‌سازی شد.

ادامه این مقاله به صورت زیر سازمان یافته است: بخش دوم به تعریف مسئله و تبیین فرض‌های مسئله اختصاص یافته است. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط سه هدفه برای مسئله، در بخش سوم توسعه داده شده است. بخش‌های چهارم و پنجم به تشریح روش‌های حل و توصیف مطالعه موردی و نتایج آن اختصاص یافته‌اند. در پایان، بخش ششم، خلاصه‌ای از نتایج تحقیق و برخی زمینه‌های تحقیقات آتی مورد بحث قرار گرفته‌اند.

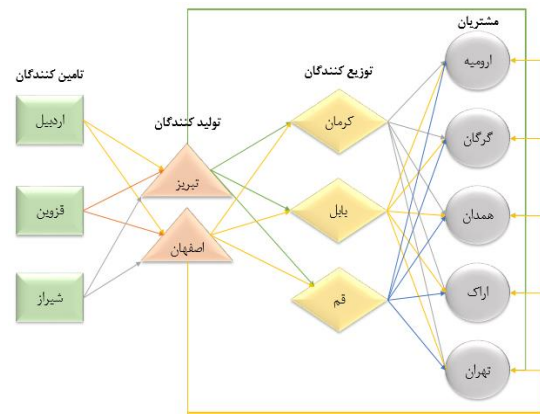
۲- تعریف مسئله

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی سه هدفه برای زنجیره تأمین کمپوست ارائه شده است. شکل (۱) شبکه زنجیره تأمین موردنظر در این مسئله را نمایش می‌دهد. شبکه مورد مطالعه، یک شبکه چهار سطحی شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان می‌باشند. تأمین‌کنندگان در شهرهای اردبیل، قزوین و شیراز، تولیدکنندگان در تبریز و اصفهان، توزیع‌کنندگان در کرمان، بابل و قم و مشتریان در شهرهای ارومیه، گرگان، همدان، اراک و تهران واقع شده‌اند. مواد اولیه‌ای که توسط تأمین‌کنندگان به تولیدکنندگان ارسال می‌شود، در دو نوع

^۱ Green House Gas (GHG)

J	مجموعه مواد اولیه هستند
P	مجموعه روش‌های تولید استفاده شده هستند
پارامترها	
QM_{mp}	کیفیت نسبی روش تولید نوع p در مرکز تولید m هستند.
C_s	هزینه ثابت تأمین‌کننده s هستند.
C_{mp}	هزینه ثابت احداث مراکز تولید m با روش تولید p هستند.
C_d	هزینه ثابت احداث مرکز توزیع d هستند.
CP_{pt}	هزینه پردازش و بسته‌بندی هر واحد تولیدی با استفاده از روش تولید p در دوره زمانی t هستند.
CX_{ipmdt}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد از محصول i که با استفاده از روش تولید p در مرکز تولید m تولید شده و به مرکز توزیع d در دوره زمانی t ارسال می‌شود.
CY_{idct}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد از محصول i که از مرکز توزیع d به مشتری c در دوره زمانی t ارسال می‌شود.
CW_{ipmct}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد از محصول i که با استفاده از روش تولید p در مرکز تولید m تولید شده و به مشتری c در دوره زمانی t ارسال می‌شود.
CZ_{jsmt}	هزینه حمل‌ونقل هر واحد مواد اولیه j که از مرکز تأمین‌کننده s به مرکز تولید m در دوره زمانی t ارسال می‌شود.
CR_{ipt}	هزینه تولید هر واحد محصول i که با استفاده از روش تولید p در دوره زمانی t تولید شده است.
G_{mpt}	ظرفیت تولید محصول که توسط تولیدکننده m با روش تولید p در دوره زمانی t ارسال می‌شود.
G_{dt}	ظرفیت مرکز توزیع d در دوره زمانی t
DG_{ict}	تقاضای محصول i توسط مشتری c در دوره زمانی t
MJ_{sjt}	ظرفیت تأمین‌کننده s برای تأمین مواد اولیه j در دوره زمانی t
γ_{ji}	ضریب تبدیل هر واحد از مواد اولیه j که به محصول i تبدیل می‌شود.

- ✓ تعداد و مکان‌های مراکز تولیدکننده مشخص هستند
- ✓ تعداد و مکان‌های مراکز توزیع‌کننده مشخص هستند.
- ✓ تعداد و مکان‌های مشتریان مشخص هستند.
- ✓ از یک نوع وسیله نقلیه برای حمل‌ونقل استفاده می‌شود و ظرفیت حمل این وسیله نقلیه مشخص است.
- ✓ ظرفیت مراکز تأمین‌کننده، تولیدکننده و توزیع‌کننده مشخص است.
- ✓ میزان سفارش و نوع سفارش مشتریان مشخص است.
- ✓ مسیر رفت‌وآمد و طول مسیر هر وسیله نقلیه مشخص است.
- ✓ نوع، میزان و روش تولید کمپوست که هر تولیدکننده می‌تواند تولید کند، مشخص است.



شکل ۱: شبکه زنجیره تأمین کمپوست

۳- مدل برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی

در این بخش به مدل‌سازی مسئله مورد مطالعه می‌پردازیم. اندیس‌ها، متغیرهای تصمیم و پارامترهای این مدل در ادامه بیان شده است.

اندیس‌ها

S	مجموعه تأمین‌کنندگان
M	مجموعه مراکز تولید
D	مجموعه مراکز توزیع
C	مجموعه مشتریان
T	دوره‌های برنامه‌ریزی
I	مجموعه محصولات تولیدی

CeY_{dct} تعداد دفعات حملی که برای محصول از توزیع‌کننده d به مشتری c در دوره زمانی t انجام می‌شود.

CeW_{mct} تعداد دفعات حملی که برای محصول از تولیدکننده m به مشتری c در دوره زمانی t انجام می‌شود.

حال پس از معرفی اندیس‌ها، متغیرهای تصمیم و پارامترها، مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min} z_1 = & \sum_s C_s \times \delta_s \\ & + \sum_{mp} C_{mp} \times \alpha_{mp} \\ & + \sum_d C_d \times \theta_d \\ & + \left(\sum_{ipmdt} X_{ipmdt} \right. \\ & \left. + \sum_{ipmct} W_{ipmct} \right) \\ & \times \left(\sum_{ipt} CR_{ipt} + \sum_{pt} CP_{pt} \right) \\ & + \sum_{ipmdt} CX_{ipmdt} \times X_{ipmdt} \\ & + \sum_{idct} CY_{idct} \times Y_{idct} \\ & + \sum_{ipmct} CW_{ipmct} \times W_{ipmct} \\ & + \sum_{jsmt} CZ_{jsmt} \times Z_{jsmt} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Min} z_2 = & \left(\sum_{jsmt} \frac{Z_{jsmt}}{1000} \times L_{sm} \right. \\ & + \left. \sum_{ipmdt} \frac{X_{ipmdt}}{1000} \times L_{md} \right. \\ & + \left. \sum_{ipmct} \frac{W_{ipmct}}{1000} \times L_{mc} \right. \\ & \left. + \sum_{idct} \frac{Y_{idct}}{1000} \times L_{dc} \right) \times (GHG) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Max} z_3 = \sum_{pm} QM_{pm} \times \alpha_{mp} \quad (3)$$

S.t.

$$\sum_m Z_{jsmt} \leq MJ_{sjt} \times \beta_{sj} ; \forall s, j, t \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_c W_{ipmct} + \sum_i \sum_c X_{ipmdt} \leq G_{mpt} \times \alpha_{mp} ; \forall m, p, t \quad (5)$$

$$\sum_p \sum_d W_{ipmdt} + \sum_p \sum_c X_{ipmct} \leq \sum_s \sum_j Z_{jsmt} \gamma_{ji} ; \forall i, m, t \quad (6)$$

L_{sm} فاصله تأمین‌کننده s از تولیدکننده m

L_{md} فاصله تولیدکننده m از توزیع‌کننده d

L_{dc} فاصله توزیع‌کننده d از مشتری c

L_{mc} فاصله تولیدکننده m از مشتری c

GHG مقدار انتشار گاز گلخانه‌ای CO_2 در هر کیلومتر حرکت یک وسیله نقلیه موردنظر (وانت مزدا تک کابین)

متغیرهای تصمیم

δ_s اگر مرکز تأمین‌کننده s در محل احداث شود برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

θ_d اگر مرکز توزیع d در محل احداث شود ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

β_{sj} اگر مرکز تأمین‌کننده s مواد اولیه j را تأمین کند ۱ در غیر این صورت برابر ۰ است.

α_{mp} اگر تولیدکننده m احداث و از روش تولید p استفاده کند ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ است.

X_{ipmdt} مقدار محصول i که با استفاده از روش تولید p توسط تولیدکننده m تولیدشده و به مرکز توزیع d در دوره زمانی t ارسال می‌شود.

Y_{idct} مقدار محصول i که از مرکز توزیع‌کننده d به مشتری c در دوره زمانی t ارسال می‌شود.

W_{ipmct} مقدار محصول i که با استفاده از روش تولید p توسط تولیدکننده m تولیدشده و به مشتری c در دوره زمانی t ارسال می‌شود.

Z_{jsmt} مقدار مواد اولیه j که توسط تأمین‌کننده s به تولیدکننده m در دوره زمانی t ارسال می‌شود.

CeZ_{smt} تعداد دفعات حملی که برای مواد اولیه از تأمین‌کننده s به تولیدکننده m در دوره زمانی t انجام می‌شود.

CeX_{mdt} تعداد دفعات حملی که برای محصول از تولیدکننده m به توزیع‌کننده d در دوره زمانی t انجام می‌شود.

کل هر نوع محصول تولیدی در هر واحد تولیدکننده نمی‌تواند بیشتر از موجودی ماده اولیه مربوط به آن محصول باشد و ضریب تبدیل ماده اولیه به محصول این محدودیت را برقرار می‌سازد. در رابطه (۷) مشخص می‌شود که مقدار محصول دریافتی توسط هر توزیع‌کننده نباید بیشتر از ظرفیت نگهداری آن توزیع‌کننده باشد، مشروط به اینکه آن توزیع‌کننده انتخاب شود. در رابطه (۸)، هر توزیع‌کننده برای توزیع هر محصول، حداکثر به اندازه کل محصول خریداری شده از تمامی تولیدکنندگان، مجاز به ارسال هست. همچنین، طبق رابطه (۹)، این مقدار محصول ارسالی نمی‌تواند از ظرفیت همان توزیع‌کننده نیز بیشتر باشد مشروط بر اینکه آن توزیع‌کننده انتخاب شده باشد. رابطه (۱۰) تضمین می‌کند که تقاضای هر مشتری برای هر نوع محصول باید پاسخ داده شود. رابطه (۱۱) تضمین می‌کند که حداکثر ۲۰ درصد تقاضای مشتریان می‌تواند به صورت مستقیم از تولیدکنندگان پاسخ داده شود و مابقی تقاضا باید از طریق توزیع‌کنندگان تأمین شود. رابطه (۱۲) نشان می‌دهد که هر مرکز تولید در صورت احداث، فقط می‌تواند از یک روش تولید، برای تولید محصولات استفاده کند. رابطه (۱۳) نیز بیان می‌کند که هر تأمین‌کننده به شرط انتخاب، بدون محدودیت می‌تواند تمامی انواع مواد اولیه را تأمین کند. رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) به تعیین نوع متغیرهای تصمیم که پیوسته و یا صفر و یک هستند، می‌پردازد.

۳-۱- خطی سازی مدل پیشنهادی

در رابطه (۲) که همان تابع هدف دوم هست، عبارت جزء صحیح، باعث غیرخطی شدن مدل شده است. با استفاده از روابط (۱۶) تا (۲۳) تابع هدف غیرخطی، به حالت خطی تبدیل می‌شود. حالت خطی شده تابع هدف دوم با رابطه (۲') نشان داده شده است که جایگزین رابطه (۲) خواهد شد.

$$\text{Min} z_2 = \left(\begin{array}{l} \sum_i \sum_m \sum_t \text{Ce}Z_{smt} \times L_{sm} \\ + \sum_m \sum_d \sum_t \text{Ce}X_{mdt} \times L_{md} \\ + \sum_m \sum_c \sum_t \text{Ce}W_{mct} \times L_{mc} \\ + \sum_d \sum_c \sum_t \text{Ce}Y_{dct} \times L_{dc} \end{array} \right) \times \text{GHG} \quad (2')$$

$$\text{Ce}Z_{smt} \geq \frac{\sum_j Z_{jsmt}}{1000} \quad \forall s, m, t \quad (16)$$

$$\text{Ce}Z_{smt} \leq \frac{\sum_j Z_{jsmt}}{1000} + 1 - \text{eps} \quad \forall s, m, t \quad (17)$$

$$\sum_i \sum_p \sum_m X_{ipmdt} \leq G_{dt} \times \theta_d \quad \forall d, t \quad (7)$$

$$\sum_p \sum_m X_{ipmdt} \geq \sum_c Y_{idct} \quad \forall i, d, t \quad (8)$$

$$\sum_i \sum_c Y_{idct} \leq G_{dt} \times \theta_d ; \quad \forall d, t \quad (9)$$

$$\sum_d Y_{idct} + \sum_p \sum_m W_{ipmct} \geq DG_{ict} ; \quad \forall i, c, t \quad (10)$$

$$\sum_i \sum_p \sum_m \sum_c W_{ipmct} \geq \sum_i \sum_c DG_{ict} \times 0.2 ; \quad \forall t \quad (11)$$

$$\sum_p \alpha_{mp} \leq 1 ; \quad \forall m \quad (12)$$

$$M \times \delta_s \geq \sum_j \beta_{sj} ; \quad \forall s \quad (13)$$

$$\begin{array}{l} X_{ipmdt}, Y_{idct}, W_{ipmct}, Z_{jsmt} \\ \text{Ce}Z_{smt}, \text{Ce}X_{mdt}, \text{Ce}W_{mct} \\ \text{Ce}Y_{dct} \geq 0 ; \quad \forall i, c, j, s, p, m, d, t \end{array} \quad (14)$$

$$\delta_s, \theta_d, \beta_{sj}, \alpha_{mp} \in \{0, 1\} \quad \forall s, d, j, m, p \quad (15)$$

رابطه (۱) تابع هدف اول مدل هست که در راستای کاهش هزینه‌ها تعریف شده است. بخش اول آن هزینه‌های ثابت، بخش دوم هزینه‌های تولید هر واحد محصول و بخش سوم، هزینه‌های حمل‌ونقل هست. رابطه (۲) تابع هدف دوم را نشان می‌دهد که هدف آن کاهش اثرات زیست‌محیطی گاز گلخانه‌ای CO_2 است که بر اساس میزان حمل‌ونقل در هر بخش از زنجیره، به دست آمده است. رابطه (۳) تابع هدف سوم مدل بوده که در راستای افزایش کیفیت کود تولیدشده تعریف شده است. کیفیت محصول بر اساس روش‌های انجام کار یا همان روش‌های تولید کمپوست تعریف شده‌اند.

رابطه (۴) تضمین می‌کند که حداکثر مقدار ارسال هر نوع ماده اولیه از تأمین‌کنندگان نمی‌تواند از حداکثر ظرفیت تأمین‌کننده موردنظر در تأمین آن نوع ماده اولیه بیشتر باشد، مشروط بر اینکه آن تأمین‌کننده انتخاب شود. رابطه (۵) نشان می‌دهد که کل محصول ارسال شده از تولیدکنندگان به مشتریان چه به صورت ارسال مستقیم و چه به صورت ارسال غیرمستقیم از طریق توزیع‌کنندگان، نمی‌تواند از ظرفیت تولید آن تولیدکننده با روش تولید مشخص شده، بیشتر باشد. رابطه (۶) بیان می‌کند که مقدار

زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای) مدل‌سازی شدند. برای مدل‌سازی تابع هدف سوم (کیفیت کود تولیدشده) وزن‌های مربوط به انواع روش‌های تولیدی باید تعیین شود که با استفاده از روش AHP، این وزن‌ها محاسبه شدند. با اضافه کردن محدودیت‌های مربوطه، چارچوب کلی مدل ریاضی ایجاد شد. با توجه به اینکه، مدل ریاضی توسعه داده شده سه هدفه هست، برای حل آن از روش‌های مجموع وزن دهی شده و اسپیلون محدودیت که از انواع روش‌های حل تصمیم‌گیری چندهدفه می‌باشند، استفاده شده است.

۵- توصیف مطالعه موردی و نتایج آن

در این بخش، با استفاده از روش‌های بیان شده در بخش ۵، به بررسی مطالعه موردی خواهیم پرداخت. همه هزینه‌ها برحسب تومان هستند. هزینه‌های ثابت تأمین‌کنندگان در شهرهای اردبیل، قزوین و شیراز به ترتیب برابر ۱۰، ۱۲ و ۱۵ میلیون می‌باشند. همچنین هزینه‌های ثابت احداث مراکز توزیع در شهرهای کرمان، بابل و قم به ترتیب برابر ۵۰، ۵۵ و ۶۰ میلیون هستند. برنامه‌ریزی تولید و انتقال مواد اولیه و کود کمپوست در دو دوره زمانی (t=2) در نظر گرفته شده است. مقدار پارامتر GHG، یعنی مقدار انتشار گاز دی‌اکسید کربن برحسب کیلوگرم در هر کیلومتر جابجایی برابر ۰.۸۰۴، با استفاده از مرجع [۷، ۸] تعیین شده است. مقادیر بقیه پارامترها در قسمت پیوست آورده شده است (جداول ۱ و ۲ پیوست را ببینید). قبل از پرداختن به حل مدل، صحنه‌گذاری آن انجام شده است.

۵-۱- نتایج فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

شکل (۳) نمودار سلسله مراتبی بر اساس روش تولید را نشان می‌دهد. هدف از این بخش، به دست آوردن امتیاز کیفی روش‌های مختلف تولید کمپوست هست. در سطح اول روش‌های هوادهی، حجم توده، دما و نوع بستر زیرین به‌عنوان عوامل اصلی تأثیرگذار بر کیفیت روش انجام کار می‌باشند. سطح دوم که شامل گزینه‌ها است، عبارت‌اند از روش‌های برگرداندن توده، هوادهی فعال، هوادهی غیرفعال و تولید کمپوست در رآکتور می‌باشند.

نمودار (۱)، اولویت‌بندی عوامل تأثیرگذار در کیفیت بر اساس روش انجام کار است. با توجه به این شکل واضح است که روش انجام کار هوادهی توده کمپوست، کنترل دمای توده کمپوست، حجم توده کمپوست و بستر زیرین توده

$$CeX_{mdt} \geq \frac{\sum_i \sum_p X_{ipmdt}}{1000} \quad \forall m, d, t \quad (18)$$

$$CeX_{mdt} \leq \frac{\sum_i \sum_p X_{ipmdt}}{1000} + 1 - eps \quad \forall m, d, t \quad (19)$$

$$CeY_{dct} \geq \frac{\sum_i Y_{idct}}{1000} \quad \forall d, c, t \quad (20)$$

$$CeY_{dct} \leq \frac{\sum_i Y_{idct}}{1000} + 1 - eps \quad \forall d, c, t \quad (21)$$

$$CeW_{mct} \geq \frac{\sum_i \sum_p W_{ipmdt}}{1000} \quad \forall m, c, t \quad (22)$$

$$CeW_{mct} \leq \frac{\sum_i \sum_p W_{ipmdt}}{1000} + 1 - eps \quad \forall m, c, t \quad (23)$$



شکل (۲): گام‌هایی کلی پژوهش

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، در ابتدا با استفاده از اطلاعات هزینه‌ای و اطلاعات مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای، توابع هدف اول (هزینه) و دوم (اثرات

۵-۲- صحنه‌گذاری مدل ریاضی پیشنهادی

پس از ساختاردهی مدل ریاضی، لازم است مدل ارائه‌شده را صحنه‌گذاری کنیم. در این بخش صحنه‌گذاری مدل توسعه داده‌شده با استفاده از هزینه‌های ارسال و مقدار تقاضا انجام شده است. در رابطه با هزینه‌های ارسال، در ساختار زنجیره تأمین مدل پیشنهادی، دو نوع ارسال برای تأمین تقاضای مشتریان شامل ارسال مستقیم از تولیدکننده به مشتریان و ارسال از طریق توزیع‌کنندگان در نظر گرفته شده است.

برای صحنه‌گذاری مدل، هزینه‌های ارسال از طریق توزیع‌کنندگان، در شرایط حدی بالا و هزینه‌های ارسال مستقیم از تولیدکنندگان به مصرف‌کنندگان، در شرایط حدی پایین در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از حل مدل نشان داد که کل تقاضای مصرف‌کنندگان از طریق ارسال مستقیم، تأمین می‌گردد، به نحوی که هیچ مرکز توزیعی احداث نمی‌شود و مقادیر متغیرهای θ_i (متغیر صفر و یک احداث یا عدم احداث مرکز توزیع) برابر با صفر می‌گردند. علاوه بر مورد بیان شده، مقادیر حدی برای پارامتر تقاضا نیز بررسی شدند. در این بررسی، مقدار تقاضا در کمترین مقدار ممکن تنظیم شد و نتایج حاصل از حل مدل نشان داد که تمامی متغیرهای ارسال مواد اولیه از تأمین‌کنندگان و کمپوست تولیدی نیز حداقل مقدار ممکن را گرفته‌اند. همچنین مقدار کمپوست تولیدی نیز دقیقاً برابر همان حداقل مقدار تقاضای مورد نیاز زنجیره تأمین هست.

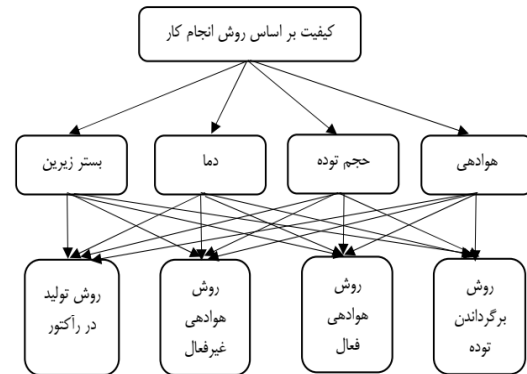
۵-۳- نتایج حل به روش مجموع وزن‌دهی شده

تابع هدف مجموع وزن‌دهی شده برای مدل توسعه داده شده به صورت معادله (۲۴) هست.

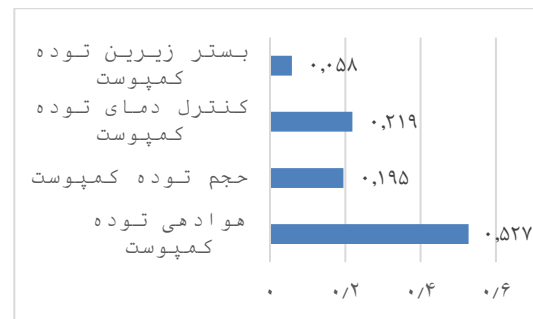
$$Z = W_1 * \left(\frac{Z_{11} - Z_{1min}}{Z_{1max} - Z_{1min}} \right) + W_2 * \left(\frac{Z_{21} - Z_{2min}}{Z_{2max} - Z_{2min}} \right) - W_3 * \left(\frac{Z_{31} - Z_{3min}}{Z_{3max} - Z_{3min}} \right) \quad (24)$$

نحوه برخورد با این تابع هدف وزن‌دهی شده به دو صورت می‌تواند است. یک رویکرد این است که به پارامترهای W_1, W_2, W_3 متناسب با اهمیت آن‌ها مقدار داده و مقادیر مربوط به متغیرها تعیین شوند. در مطالعه موردی مورد نظر، با توجه به نظر خبرگان، برای مقادیر وزنی توابع هدف اول تا سوم، به ترتیب مقادیر ۰,۳۵، ۰,۳۰، ۰,۳۵ در نظر گرفته

کمپوست به ترتیب عوامل تأثیرگذار در کیفیت کمپوست بر اساس روش انجام کار می‌باشند.

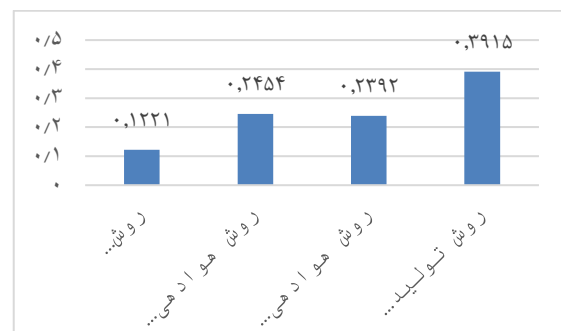


شکل (۳): نمودار سلسله‌مراتبی بر اساس روش انجام کار



نمودار (۱): اولویت‌بندی عوامل تأثیرگذار در کیفیت بر اساس روش انجام کار

اولویت‌بندی کیفیت بر اساس روش انجام کار در نمودار (۲) نشان داده شده است. مطابق نمودار (۲)، با استفاده از روش AHP، کیفیت محصول تولیدشده بر اساس روش تولید کمپوست در رآکتور بیشتر بوده و سپس روش‌های هوادهی فعال، هوادهی غیرفعال و برگرداندن توده به ترتیب اولویت‌های بعدی قرار دارند. مقادیر مربوط به کیفیت نسبی هر روش که در مدل ریاضی با پارامتر QM_{mp} مشخص شده است برای روش‌های برگرداندن توده، هوادهی فعال، هوادهی غیرفعال و تولید کمپوست در رآکتور به ترتیب برابر ۰,۱۲۲۱، ۰,۲۴۵۴، ۰,۲۳۹۲ و ۰,۳۹۱۶ محاسبه شده‌اند.



نمودار (۲): نمودار اولویت‌بندی کیفیت بر اساس روش انجام کار

شده‌اند. جواب حاصل از حل مدل در این رویکرد به صورت جدول ۲ محاسبه شده است. مقادیر بقیه متغیرها برابر صفر و مقدار تابع هدف وزن‌دهی شده برابر ۰/۱۱۳ به دست آمده است.

جدول ۲- الف: نتایج روش مجموع وزن دهی - متغیر مقدار محصول ارسال شده از هر تولیدکننده به هر توزیع‌کننده به تفکیک روش

i	p	m	d	t	X_{ipmdt}
۱	۴	۱	۲	۲	۱,۵۰۰
۱	۴	۲	۳	۱	۲۶,۶۲۵
۱	۴	۲	۳	۲	۴۵,۸۷۵
۲	۴	۲	۳	۱	۶۱,۰۰۰
۲	۴	۲	۳	۲	۴۹,۰۰۰

جدول ۲- ب: نتایج روش مجموع وزن دهی - متغیر مقدار محصول ارسال مستقیم از هر تولیدکننده به هر مشتری به تفکیک روش

i	p	m	c	t	W_{ipmct}
۱	۴	۱	۱	۱	۱۰,۰۰۰
۱	۴	۱	۱	۲	۱۸,۰۰۰
۱	۴	۱	۲	۱	۱۳,۰۰۰
۱	۴	۱	۳	۱	۱۵,۰۰۰
۱	۴	۱	۳	۲	۱۰,۱۲۵
۱	۴	۱	۴	۱	۱۶,۳۷۵
۲	۴	۱	۱	۱	۱۵,۰۰۰
۲	۴	۱	۱	۲	۲۵,۰۰۰
۲	۴	۱	۲	۲	۲۰,۰۰۰

جدول ۲- ج: نتایج روش مجموع وزن دهی - متغیر مقدار محصول ارسال شده از هر توزیع‌کننده به هر مشتری

i	d	c	t	Y_{idct}
۱	۲	۲	۲	۱۵,۰۰۰
۱	۳	۳	۲	۵,۸۷۵
۱	۳	۴	۱	۱,۶۲۵
۱	۳	۴	۲	۲۱,۰۰۰
۱	۳	۵	۱	۲۵,۰۰۰
۱	۳	۵	۲	۱۹,۰۰۰
۲	۳	۲	۱	۱۸,۰۰۰
۲	۳	۳	۱	۱۰,۰۰۰
۲	۳	۳	۲	۱۵,۰۰۰
۲	۳	۴	۱	۱۳,۰۰۰
۲	۳	۴	۲	۱۷,۰۰۰
۲	۳	۵	۱	۲۰,۰۰۰
۲	۳	۵	۲	۱۷,۰۰۰

جدول ۲- د: نتایج روش مجموع وزن دهی- متغیر مواد اولیه ارسال شده از هر تأمین کننده به هر تولیدکننده به تفکیک نوع مواد اولیه

j	s	m	t	Z_{jsmt}
۱	۱	۱	۱	۸۱,۲۵۰
۱	۱	۱	۲	۵۴,۵۴۵
۱	۱	۲	۱	۲۳,۰۰۰
۱	۱	۲	۲	۳۳,۰۰۰
۱	۲	۱	۱	۱۰۰,۰۰۰
۱	۲	۱	۲	۸۹,۲۰۴
۱	۲	۲	۱	۵,۶۳۶
۱	۲	۲	۲	۳۱,۳۵۶
۱	۳	۲	۱	۶۰,۱۱۳
۱	۳	۲	۲	۸۸,۵۶۰
۲	۱	۱	۱	۱۸,۷۵۰
۲	۱	۱	۲	۴۵,۴۵۴
۲	۲	۱	۲	۱۰,۷۹۵
۲	۲	۲	۱	۳۶,۳۶۳
۲	۲	۲	۲	۴۹,۸۱۰
۲	۳	۲	۱	۱۱,۴۳۹
۲	۳	۲	۲	۱۱,۴۳۹

مورد بحث، با شروع از مقدار ۰ و افزایش آن با گام ۰,۱ در هر مرحله برای هرکدام از توابع هدف، ۶۷ جواب به دست آمدند که از بین آن‌ها، تنها ۱۱ جواب مؤثر (غالب) بودند و بقیه به‌عنوان جواب‌های غیر مؤثر (مغلوب) شناسایی و حذف شدند. جواب‌های مؤثر به‌دست‌آمده در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

رویکرد دیگر، استفاده از روش پارامتریک (وزین) هست که به‌عنوان یکی از روش‌های معروف در به وجود آوردن راه‌حل‌های مؤثر و متعدد در معرفی به تصمیم‌گیرنده توسعه داده شده است (مرجع [۲۶] را ببینید). به‌بیان‌دیگر، با استفاده از این‌رو، به ازای ارزش‌های مختلف اوزان، راه‌حل‌های مؤثر را می‌توان به دست آورد. در مطالعه موردی

جدول ۳: جواب‌های به دست از روش مجموع وزن دهی شده پارامتریک

ردیف	Z_1	Z_2	Z_3
۱	۱۲۶,۴۵۴,۴۱۶,۶۶۶	۴۱۳,۷۲۷	۰,۷۸۳۲
۲	۱۲۶,۸۳۹,۸۶۶,۶۶۶	۴۰۰,۲۳۰	۰,۷۸۳۲
۳	۱,۲۶۷,۴۹۲,۰۰۰,۰۰۰	۴۱۱,۹۴۳	۰,۷۸۳۲
۴	۱۲۴,۷۷۳,۶۰۰,۰۰۰	۴۱۰,۵۴۸	۰,۶۳۰۸
۵	۱۲۳,۵۸۳,۰۲۰,۰۰۰	۴۲۰,۵۷۸	۰,۷۸۳۲
۶	۱۲۳,۴۴۱,۳۷۵,۰۰۰	۴۰۶,۱۷۹	۰,۶۳۷
۷	۱۲۴,۸۶۲,۹۰۰,۰۰۰	۴۰۵,۹۰۲	۰,۷۸۳۲
۸	۱۲۳,۱۸۷,۲۰۰,۰۰۰	۴۰۶,۱۶۸	۰,۶۳۰۸
۹	۱۲۳,۶۷۰,۶۹۱,۶۶۶	۴۰,۵۸۱	۰,۶۳۰۸
۱۰	۱۲۲,۹۸۸,۴۷۵,۰۰۰	۴۱۷,۴۰۹	۰,۴۷۸۴
۱۱	۱۲۲,۹۱۶,۹۰۰,۰۰۰	۴۲۲,۷۷۳	۰,۶۳۰۸

۴-۵- نتایج حل به روش محدودیت اِپسیلون

در روش محدودیت اِپسیلون، تابع هدف مسئله چندهدفه به یک مسئله بهینه‌سازی تک هدفه تبدیل می‌شود. تابع هدف دارای بالاترین اولویت به‌عنوان تابع هدف مدل و بقیه توابع هدف با استفاده از بردار محدودیت ϵ به‌عنوان محدودیت

در نظر گرفته می‌شوند. در مسئله مورد بررسی، تابع هدف هزینه، به دلیل اهمیت بالای آن به‌عنوان تابع هدف اصلی و توابع هدف پایداری محیط‌زیست و کیفیت به‌عنوان محدودیت در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۴ جواب‌های به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد.

جدول ۴: جواب‌های به‌دست‌آمده از روش اِپسیلون محدودیت

ردیف	Z_1	Z_2	Z_3
۱	۱۱۹,۹۱۵,۸۳۳,۳۳۳	۴۱۳,۷۲۷	۰,۶۳۷
۲	۱۱۹,۹۱۵,۸۳۳,۳۳۳	۴۰۰,۲۳۰	۰,۶۳۷
۳	۱۱۹,۹۱۵,۸۳۳,۳۳۳	۴۱۱,۹۴۳	۰,۶۳۷
۴	۱۱۹,۹۱۵,۸۳۳,۳۳۳	۴۱۰,۵۴۸	۰,۶۳۷
۵	۱۱۹,۹۱۵,۸۳۳,۳۳۳	۴۲۰,۵۷۸	۰,۶۳۷
۶	۱۱۹,۹۱۵,۸۳۳,۳۳۳	۴۰۶,۱۷۹	۰,۶۳۷
۷	۱۱۹,۹۱۵,۸۳۳,۳۳۳	۴۰۵,۹۰۲	۰,۶۳۰,۸
۸	۱۱۹,۹۱۵,۸۳۳,۳۳۳	۴۰۶,۱۶۸	۰,۶۳۰,۸
۹	۱۱۹,۹۱۵,۸۳۳,۳۳۳	۴۰,۵۸۱	۰,۶۳۰,۸
۱۰	۱۱۹,۹۱۵,۸۳۳,۳۳۳	۴۱۷,۴۰۹	۰,۶۳۷

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، جواب‌های شماره ۹ و ۱۰ به‌عنوان جواب‌های پارتویی قوی و بقیه جواب‌ها به‌عنوان جواب‌های پارتویی ضعیف به‌دست‌آمده‌اند.

۵-۵- مقایسه روش اِپسیلون محدودیت با روش وزنی

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل به روش‌های اِپسیلون محدودیت (جدول ۴ را ببینید) و روش وزنی (جدول ۳ را ببینید)، کیفیت جواب‌های به‌دست‌آمده از روش اِپسیلون محدودیت بهتر از کیفیت جواب‌های روش وزنی هست. در واقع، مقدار تابع هدف اول در روش محدودیت اِپسیلون کمتر از مقدار آن در روش وزنی هست که این مقدار کاهش حدود ۵ درصد هست. مقدار تابع هدف ۵ آمده است.

با توجه به اینکه تغییر ظرفیت تأمین‌کنندگان تأثیری بر روی تابع هدف سوم، یعنی تابع هدف کیفیت، ندارد، مقادیر مربوط به این تابع در نظر گرفته نشده‌اند. مقدار تابع هدف سوم، در تمامی حالت‌ها برابر $0/۸۷۳۲$ به‌دست آمده است. چراکه مقادیر تابع هدف سوم، متأثر از نوع روش تولید بوده و با تغییر ظرفیت تأمین‌کنندگان تغییر نمی‌کند. با افزایش ظرفیت تأمین‌کنندگان، به دلیل کاهش تعداد مراکز

تأمین‌کننده احداث‌شده، مقدار تابع هدف هزینه کاهش می‌یابد. البته با افزایش ظرفیت تأمین‌کنندگان به مقداری بیشتر از ۴ برابر، تغییری در هزینه‌ها مشاهده نمی‌شود، که این مسئله به دلیل الزام در ایجاد تعداد حداقلی از مراکز تأمین‌کنندگان به‌منظور پاسخ‌دهی به تقاضای مراکز تولید هست.

جدول ۵: مقادیر توابع هدف اول و دوم به ازای افزایش

ظرفیت تأمین‌کنندگان

ظرفیت تأمین‌کننده	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم
MJ_{sjt}	۱۲۶,۵۵۶,۷۹۹,۹۹۹	۴۲۸,۴۳۳
$MJ_{sjt} * 200\%$	۱۲۵,۱۰۶,۱۰۰,۰۰۰	۴۳۰,۴۲۱
$MJ_{sjt} * 300\%$	۱۲۳,۹۸۰,۵۰۰,۰۰۰	۴۱۸,۹۲۵
$MJ_{sjt} * 400\%$	۱۲۳,۹۸۰,۵۰۰,۰۰۰	۴۱۸,۹۲۵

تأثیر افزایش ظرفیت تأمین‌کنندگان بر روی تابع هدف دوم، یعنی تابع هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی، نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت تأمین‌کنندگان به دلیل برآورده کردن تقاضای مشتریان تأثیر چندانی بر روی مقدار تابع هدف دوم ندارد. هر چند که با افزایش ظرفیت تأمین‌کنندگان، تعداد

قابل توجهی می‌یابد، به نحوی که با افزایش ۲٫۳ درصد در هزینه و ۱۵ درصد در مقدار انتشار گاز دی‌اکسید کربن می‌توانیم کیفیت کمپوست تولیدی را ۲۳ درصد افزایش دهیم. قابل ذکر است که در مسائل چندهدفه برای به دست آوردن بهبودی در یک تابع هدف ناگزیر هستیم که لطمه‌ای در مقدار توابع هدف دیگر را بپذیریم و این حقیقت انکارناپذیر مسائل چندهدفه هست که در این مدل نیز به وقوع پیوسته است. بنابراین می‌توان گفت که اضافه کردن تابع هدف سوم، کارایی مدل زنجیره تأمین کمپوست را می‌تواند بهتر از قبل کند.

✓ تأثیر ظرفیت وسیله حمل‌ونقل بر روی مقدار هزینه

و اثرات زیست‌محیطی ناشی از زنجیره تأمین

وسيله حمل‌ونقل در نظر گرفته شده برای حمل‌ونقل بین تسهیلات، وانت‌بار به ظرفیت ۱ تن در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه، ممکن است طبق الزامات قانونی مجبور باشیم مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا سطح قابل قبول قانونی کاهش دهیم، در این قسمت، کاهش آن با استفاده از تغییر در نوع وسیله نقلیه موردبررسی و تحلیل قرار گرفته است. جدول ۷ این مسئله را نشان می‌دهد.

جدول ۷: تأثیر ظرفیت وسیله حمل‌ونقل بر روی توابع هدف اول و دوم

مقدار ظرفیت حمل‌ونقل	افزایش در هزینه کل زنجیره	کاهش در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای
ظرفیت ۳ تن	۳۰٪	۶۳٪
ظرفیت ۶ تن	۶۰٪	۸۰٪

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش ظرفیت حمل وسیله نقلیه از ۱ به ۶ تن، مقدار تابع هدف اول (تابع هزینه) ۶۰ درصد افزایش یافت و این در حالی است که مقدار تابع هدف دوم (انتشار گازهای گلخانه‌ای) ۸۰ درصد کاهش یافته است. همچنین در تغییر ظرفیت حمل وسیله نقلیه از ۱ به ۳ تن، مقادیر توابع هدف فوق به ترتیب ۳۰ و ۶۳ درصد محاسبه شدند. طبیعی است که این نوع تغییر، در مقدار تابع هدف سوم (کیفیت کود تولید شده)، تأثیری نخواهد داشت. با توجه به اولویت‌های مدیریتی از بعد هزینه و الزامات قانونی مرتبط با میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌توان در رابطه با انتخاب ظرفیت مناسب حمل تصمیم‌گیری کرد.

مراکز تأمین‌کننده کاهش می‌یابد، اما به دلیل برآورده کردن میزان تقاضای مشتریان، میزان حمل‌ونقل ایجاد شده و به تبع آن میزان آلودگی زیست‌محیطی ایجاد شده تغییر چندانی نمی‌کند و نشان می‌دهد که این تابع هدف نسبت به تغییرات ظرفیت تأمین‌کنندگان حساس نیست.

✓ تأثیر ظرفیت تولیدکنندگان بر روی توابع هدف

تأثیر افزایش ظرفیت تولیدکنندگان بر روی مقادیر توابع هدف اول و دوم نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت تولیدکنندگان، به دلیل کاهش هزینه‌های احداث واحدهای تولیدی، مقدار تابع هدف اول کاهش یافته است. افزایش ظرفیت تولیدکنندگان منجر به نوسان بسیار کوچکی بر روی تابع هدف دوم، یعنی کاهش اثرات زیست‌محیطی، شده است. این مسئله به این دلیل هست که اثرات زیست‌محیطی مدنظر در تابع هدف دوم، ناشی از حمل‌ونقل بین تسهیلات بوده و تعداد تسهیلات تولیدی احداث شده، در میزان آلودگی به وجود آمده تأثیری ندارد. در این حالت نیز مقدار تابع هدف سوم، در تمامی حالت‌ها ثابت و برابر ۰/۸۷۳۲ به دست آمده است.

✓ تأثیر در نظر گرفتن تابع هدف کیفیت بر روی مدل

در این بخش، مدل به دو صورت با و بدون در نظر گرفتن تابع هدف سوم، یعنی بهینه‌سازی کیفیت، اجرا شده است تا تأثیر تابع هدف سوم بر روی مدل، بررسی شود. بدین منظور یک‌بار مدل با در نظر گرفتن وزن‌های مساوی و برابر ۰٫۵، به توابع هدف اول و دوم و بار دیگر با در نظر گرفتن وزن‌های مساوی و برابر ۰٫۳۳، برای هر سه تابع هدف اجرا شده است. نتایج حاصل در جدول ۶ نشان داده شده‌اند.

جدول ۶: تأثیر تابع هدف کیفیت بر روی مدل

	مقادیر توابع هدف بدون در نظر گرفتن تابع هدف کیفیت	مقادیر توابع هدف در نظر گرفتن تابع هدف کیفیت
Z_1	۱۲۲،۵۲۸،۳۷۵،۰۰۰	۱۲۵،۴۳۱،۱۲۰،۰۰۰
Z_2	۴۱۹،۳۵۵	۴۸۲،۰۲۱
Z_3	۰/۶۳۷	۰/۷۸۳۲
Z_w	۰/۰۵۲	۰/۱۲۲

همان‌طور که در ۶ مشاهده می‌شود، با وارد کردن تابع هدف کیفیت به مدل، توابع هدف هزینه و انتشار گاز دی‌اکسید کربن بدتر از قبل می‌شود. اما، تابع هدف سوم بهبود

✓ تعیین روش تولید بهینه کمپوست

اولویت‌بندی‌های متفاوت مدیران برای اهداف سه‌گانه مدل شامل هزینه، اثرات زیست‌محیطی و کیفیت کود تولیدشده منجر به متفاوت بودن وزن اهداف فوق می‌شود. در این بخش، با تغییر وزن اهداف فوق و بررسی و تحلیل نتایج حاصل از آن، روش (های) تولیدی که به‌عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شوند و در عمل لازم است که تولیدکنندگان کود کمپوست از این‌رو (های) تولید بهره بگیرند، استخراج شده است. جدول (۸) نتایج حاصله را نشان می‌دهد. نتایج جدول (۸) بر اساس تعداد دفعات به‌دست‌آمده برای روش بهینه تولید با اولویت‌های متفاوت برای اهداف به‌دست‌آمده است. تعداد دفعاتی که از هر روش، به‌عنوان روش بهینه استفاده شده است با علامت "*" نشان داده شده است.

جدول ۸: روش (های) تولید استفاده شده به ازای وزن‌های

مختلف توابع هدف

روش استفاده شده	روش استفاده شده	روش تولید
توسط هر دو تولیدکننده	توسط یکی از تولیدکنندگان	۱: برگرداندن توده
		۲: هوادهی فعال
		۳: هوادهی غیرفعال
		۴: تولید در رآکتور
	*	
	**	

نتایج نشان داده شده در جدول ۸ نشان می‌دهد که همواره روش تولید ۴، یعنی تولید کود کمپوست با استفاده از رآکتور یکی از بهترین روش‌های تولید کود کمپوست هست. در واقع از ۱۲ بار حل مختلف مدل، ۹ بار، هر دو تولیدکننده، روش تولید ۴ را به‌عنوان روش تولید بهینه انتخاب کرده‌اند.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

با توجه به اهمیت کمپوست در تولید محصولات کشاورزی و نقش بالای آن در کیفیت و سطح مواد معدنی و مغذی موجود در محصولات تولید شده از خاک دارای کمپوست، این مقاله به طراحی زنجیره تأمین کمپوست پرداخته است. بررسی‌های ادبیات موضوع نشان داده است که تاکنون در طراحی زنجیره تأمین کمپوست به مفهوم کیفیت کمپوست تولیدی که تحت تأثیر روش‌های تولید کمپوست هست، پرداخته نشده است. این مقاله با ارائه یک نوآوری، کیفیت کمپوست تولیدی را با کمک روش تحلیل سلسله مراتبی مدل‌سازی کرده و تلاش کرده است تا عوامل مهم تأثیرگذار

بر کیفیت کمپوست را که عبارتند از روش هوادهی توده کمپوست، کنترل دمای توده کمپوست، حجم توده کمپوست و بستر زیرین توده کمپوست را که مستقیماً در روش تولید کمپوست نقش دارند، از نظر سطح تأثیرگذاری ارزیابی کند. نتایج نشان می‌دهد که ۵۲٫۷ درصد روش هوادهی توده تأثیرگذار است و عوامل دیگر نیز نقش غیرقابل انکاری دارند، به نحوی که کمترین تأثیر را بستر زیرین توده با سطح ۵ درصد به خود اختصاص داده است. بنابراین با انجام محاسبات لازم یک امتیاز نهایی به عنوان شاخص کیفیت برای کیفیت کمپوست تولیدی از روش‌های مختلف بدست آمده است، که مبنای تابع هدف کیفیت قرار گرفته است. علاوه بر این، بعد هزینه‌ای زنجیره تأمین کمپوست که مشتمل بر هزینه‌های احداث مراکز تولید و توزیع و هزینه تدارک مواد اولیه و ارسال کمپوست تولیدی به توزیع کنندگان و در نهایت دریافت توسط مشتریان است، مدلسازی شده است. تولید کمپوست با کیفیت تر با انگیزه ایجاد محصولات سبز انجام می‌شود بنابراین لازم است که خود این زنجیره با کمترین اثرات زیست محیطی پی‌کرندی شود. از این رو مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر حمل مواد اولیه یا محصولات بین مراکز مختلف زنجیره تأمین با هدف کمینه کردن آن، مدلسازی شده است. لذا با در نظر گرفتن جمیع شرایط، یک مدل برنامه‌ریزی سه هدفه شامل حداقل کردن هزینه و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و حداکثر کردن کیفیت در زنجیره تأمین کود کمپوست توسعه داده شده است. بعد از حل مدل با استفاده از روش‌های مجموع وزن‌دهی شده و اپسیلون محدودیت، بررسی جواب‌ها انجام شده است. بر اساس این تحلیل‌ها استفاده از روش اپسیلون محدودیت در حل این مدل سه هدفه پیشنهاد می‌شود چراکه جواب‌های پارتویی قوی‌تری را گزارش کرده است. به نحوی که تابع هدف اول با بهبود ۵ درصدی مواجه شده، تابع هدف دوم در سطح ثابت و بهبودی جزئی در تابع هدف سوم هم مشاهده شده است. با انجام تحلیل حساسیت‌های مختلف بر روی پارامترهای کلیدی مدل، نتایج گزارش شده است و بینش‌های مفید مدیریتی ارائه شده‌اند. در این راستا، تعیین ظرفیت تأمین کنندگان و تولیدکنندگان به‌عنوان پارامترهای اساسی و تأثیرگذار بر روی مقادیر توابع هدف تحلیل شدند و مقدار ظرفیت بهینه با توجه به شرایط حاکم تعیین شده است. علاوه بر این برخی از دستاوردهای حائز اهمیت مقاله

عبارت‌اند از:

▪ کل مدل که دارای اهداف متناقض می‌باشد، با طراحی ۱۲ حالت مختلف تصادفی حل شده است، که در ۹ حالت تنها روش تولید کمپوست در راکتور به عنوان روش بهینه انتخاب شده است. این نشان می‌دهد که روش تولید کمپوست در راکتور با در نظر گرفتن جمیع شرایط، روش برتر است.

علاوه بر این، در زمینه پیشنهادات برای مطالعات آتی برای تکمیل این مقاله به موارد زیر می‌توان اشاره کرد: در نظر گرفتن زنجیره تأمین حلقه بسته تولید کمپوست، در نظر گرفتن روش‌های تولیدی دیگری به غیر از چهار روش تولیدی مطرح‌شده در این پژوهش، در نظر گرفتن آلودگی‌های زیست‌محیطی در حالت کلی و نه فقط موارد ایجادشده به دلیل حمل‌ونقل، در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موردنیاز در مدل از جمله در کیفیت کود تولید شده و یا در مقدار تقاضا و حل آن با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی استوار و یا برنامه‌ریزی تصادفی.

پیوست: پارامترهای مدل

در این بخش مدل ارائه‌شده به منظر بررسی کارایی آن برای یک مطالعه موردی حل شده است. در این مطالعه موردی سه تأمین‌کننده در شهرهای اردبیل، قزوین و شیراز، دو تولیدکننده در تبریز و اصفهان و سه توزیع‌کننده در کرمان، بابل و قم و پنج شهر به‌عنوان مراکز مصرف در شهرهای ارومیه، گرگان، همدان، اراک و تهران در نظر گرفته شده‌اند. تعداد دوره‌های زمانی ۲ هست.

▪ اضافه کردن تابع هدف کیفیت، علیرغم تأثیر منفی بر روی تابع هدف هزینه، منجر به افزایش کارایی کل زنجیره تأمین تولید کود باکیفیت می‌شود. به طوری که با صرف ۲,۳ درصد هزینه بیشتر و ۱۵ درصد انتشار گاز گلخانه‌ای بیشتر، ۲۳ درصد کیفیت کمپوست تولیدی بهبود یافته است.

▪ سناریوهایی برای مدیران در راستای برآورده کردن دو اولویت متناقض مدیران در کاهش هزینه‌ها و الزامات قانونی مرتبط با انتشار آلاینده‌ها، با تغییر نوع وسیله نقلیه ارائه‌شده است. در یکی از این سناریوها انتخاب وسیله نقلیه با ظرفیت حمل ۶ تن، منجر به بهبود ۸۰ درصدی در انتشار گازهای گلخانه‌ای در ازاء صرف ۶۰ درصد هزینه بیشتر شده است. بنابراین انتخاب ظرفیت وسیله نقلیه، وابسته به سطح الزامات قانونی می‌باشد.

▪ در بین روش‌های بررسی‌شده برای تولید کمپوست، روش تولید کمپوست در راکتور به‌عنوان بهترین روش تولید با در نظر گرفتن تمام اهداف سه‌گانه متناقض مدل هست. چرا که شاخص کیفیت این روش برابر با ۰,۳۹۱۵ در مقایسه با ۰,۱۲۲۱ برای روش برگرداندن توده می‌باشد که برتری قابل توجهی دارد. علاوه بر این

جدول (۱- پیوست): مقادیر مربوط به اندیس‌های مدل

p	j	i	c	d	m	تأمین‌کننده (s)
روش انجام کار	مواد اولیه	محصول	مشتری	توزیع‌کننده	تولیدکننده	
برگرداندن توده	فضولات دامی	کمپوست دامی	ارومیه	کرمان	تبریز	اردبیل ۱
هوادهی فعال	فضولات گیاهی	کمپوست گیاهی	گرگان	بابل	اصفهان	قزوین ۲
هوادهی غیرفعال			همدان	قم		شیراز ۳
تولید در راکتور			اراک			۴
			تهران			۵

جدول (۲- پیوست): مقادیر مربوط به پارامترهای مدل

CZ_{jsmt}			CY_{idct}						
j	s	m	CZ_{jsm1}	CZ_{jsm2}	i	d	c	CY_{idc1}	CY_{idc2}
۱	۱	۱	۵۰	۵۲	۱	۱	۱	۴۵	۴۴
۱	۱	۲	۵۳	۵۵	۱	۱	۲	۴۸	۴۷
۱	۲	۱	۶۰	۶۳	۱	۲	۱	۵۰	۵۱
۱	۲	۲	۶۲	۶۵	۱	۲	۲	۵۵	۵۷
۲	۱	۱	۵۳	۵۵	۱	۳	۱	۵۲	۵۴
۲	۱	۲	۵۶	۵۸	۱	۳	۲	۵۷	۵۹
۲	۲	۱	۶۲	۶۴	۱	۴	۱	۴۴	۴۳
۲	۲	۲	۶۶	۶۷	۱	۴	۲	۴۷	۴۸
۳	۱	۱	۶۳	۶۵	۱	۵	۱	۵۱	۵۲
۳	۱	۲	۶۶	۶۸	۱	۵	۲	۵۳	۵۵
۳	۲	۱	۵۴	۵۶	۲	۱	۱	۵۰	۵۲
۳	۲	۲	۵۷	۵۹	۲	۱	۲	۵۲	۵۵
					۲	۲	۱	۵۳	۵۵
m	s	d	L_{sm}^*	L_{md}^*					
۱	۱	۱	۲۱۹	۱,۶۳۷	۲	۳	۱	۴۸	۴۷
۱	۲	۲	۴۵۵	۸۲۸	۲	۳	۲	۵۰	۴۹
۱	۳	۳	۱,۵۲۳	۷۳۱	۲	۴	۱	۴۴	۴۶
۲	۱	۱	۱,۰۳۰	۶۶۱	۲	۴	۲	۴۷	۴۹
۲	۲	۲	۴۸۰	۶۶۸	۲	۵	۱	۴۳	۴۴
۲	۳	۳	۴۸۵	۲۷۹	۲	۵	۲	۴۵	۴۷
					۳	۱	۱	۵۳	۵۵
s	j	t	MJ_{sjt}						
۱	۱	۱	۳۵۰		۳	۱	۲	۵۶	۵۸
۱	۱	۱	۳۵۰		۳	۲	۱	۴۵	۴۶
۲	۱	۱	۲۰۰		۳	۲	۲	۴۹	۴۸
۳	۱	۱	۲۰۰		۳	۳	۱	۴۹	۴۸
۱	۱	۲	۳۰۰		۳	۳	۲	۴۳	۴۴
۲	۱	۲	۴۰۰		۳	۴	۱	۴۹	۴۷
۳	۱	۲	۴۰۰		۳	۴	۲	۵۱	۵۳
۱	۲	۱	۱۷۰		۳	۵	۱	۳۵	۳۷
۲	۲	۱	۱۲۰		۳	۵	۲	۳۸	۴۰
۳	۲	۱	۱۷۰						
					c	d	m	L_{dc}^*	L_{mc}^*
۱	۲	۲	۱۵۰		۱	۱	۱	۱,۷۳۵	۳۰۸
۲	۲	۲	۲۰۰		۲	۱	۱	۱,۴۳۵	۹۹۶
۳	۲	۲	۲۰۰		۳	۱	۱	۱,۱۲۵	۶۰۹
					۴	۱	۱	۹۴۹	۷۸۵
d	t	G_{dt}							
۱	۱	۲۰۰			۵	۱	۱	۱,۰۳۸	۵۹۹
۱	۲	۲۳۰			۱	۲	۲	۱,۱۳۶	۱,۰۷۴
۲	۱	۲۰۰			۲	۲	۲	۱۷۲	۸۳۶
۲	۲	۲۳۰			۳	۲	۲	۵۶۶	۴۶۴
۳	۱	۲۰۰			۴	۲	۲	۵۲۲	۲۸۸
۳	۲	۲۳۰			۵	۲	۲	۲۲۹	۴۳۹
					۱	۳		۱,۰۳۹	

j	i	γ_{ji}^*	P	m	C_{mp}	t	CP_{pt}
۱	۱	۰,۳	۱	۱	۵۵۲,۰۰۰	۱	۵,۵
۲	۱	۰	۱	۲	۶۵۵,۰۰۰	۲	۵,۸
۱	۲	۰	۲	۱	۴۰۰,۰۰۰	۱	۴,۵
۲	۲	۰,۸	۲	۲	۴۲۵,۰۰۰	۲	۴
			۳	۱	۴۵۰,۰۰۰	۱	۴
			۳	۲	۴۸۰,۰۰۰	۲	۳,۵
			۴	۱	۵۵۰,۰۰۰	۱	۵
			۴	۲	۶۰۰,۰۰۰	۲	۴

i	c	t	DG_{ict}	P	t	i	CR_{ipt}	m	G_{mpt}
۱	۱	۱	۱۰	۱	۱	۱	۷	۱	۲۰۰
۲	۱	۱	۱۵	۱	۱	۲	۶,۵	۲	۲۰۰
۱	۱	۲	۱۸	۱	۲	۱	۷	۱	۳۰۰
۲	۱	۲	۲۵	۱	۲	۲	۹	۲	۳۰۰
۱	۲	۱	۱۳	۲	۱	۱	۴,۵	۱	۷۰۰
۲	۲	۱	۱۸	۲	۱	۲	۵,۵	۲	۷۰۰
۱	۲	۲	۱۵	۲	۲	۱	۵,۲	۱	۸۰۰
۲	۲	۲	۲۰	۲	۲	۲	۶,۳	۲	۸۰۰
۱	۳	۱	۱۵	۳	۱	۱	۵,۳	۱	۷۰۰
۲	۳	۱	۱۰	۳	۱	۲	۶	۲	۷۰۰
۱	۳	۲	۱۶	۳	۲	۱	۷	۱	۸۰۰
۲	۳	۲	۱۵	۳	۲	۲	۵,۷	۲	۸۰۰
۱	۴	۱	۱۸	۴	۱	۱	۴,۸	۱	۷۰۰
۲	۴	۱	۱۳	۴	۱	۲	۷,۵	۲	۷۰۰
۱	۴	۲	۲۱	۴	۲	۱	۸	۱	۸۰۰
۲	۴	۲	۱۷	۴	۲	۲	۷,۲	۲	۸۰۰
۱	۵	۱	۲۵						
۲	۵	۱	۲۰						
۱	۵	۲	۱۹						
۲	۵	۲	۱۷						

i	m	C	t	CW_{ipmct}			
				CW_{i1mct}	CW_{i2mct}	CW_{i3mct}	CW_{i4mct}
۱	۱	۱	۱	۹۸	۱۰۰	۹۸	۹۳
۲	۱	۱	۱	۱۱۳	۹۶	۹۰	۱۲۰
۱	۱	۱	۲	۱۰۳	۱۱۰	۱۰۶	۹۸
۲	۱	۱	۲	۱۱۸	۱۰۰	۹۷	۱۲۵
۱	۱	۲	۱	۱۰۱	۹۵	۱۰۰	۱۰۵
۲	۱	۲	۱	۱۰۰	۱۱۵	۱۱۰	۹۶
۱	۱	۲	۲	۱۰۶	۱۰۰	۱۰۷	۱۱۰
۲	۱	۲	۲	۱۰۵	۱۲۰	۱۱۷	۱۰۰
۱	۱	۳	۱	۱۰۳	۱۰۳	۹۸	۹۵
۲	۱	۳	۱	۱۱۳	۱۰۷	۹۹	۱۱۵

۱	۱	۳	۲	۱۰۸	۱۱۱	۱۰۸	۱۰۱
۲	۱	۳	۲	۱۱۹	۱۱۳	۱۰۷	۱۲۱
۱	۱	۴	۱	۱۰۳	۱۱۰	۱۱۵	۱۰۸
۲	۱	۴	۱	۱۲۳	۱۰۹	۱۰۵	۱۱۶
۱	۱	۴	۲	۱۰۸	۱۱۳	۱۱۷	۱۱۳
	۱	۴	۲	۱۲۸	۱۱۵	۱۱۶	۱۲۲
۱	۱	۵	۱	۹۸	۹۹	۱۰۰	۹۳
۲	۱	۵	۱	۱۰۰	۱۰۲	۹۲	۹۶
۱	۱	۵	۲	۱۰۰	۱۰۱	۱۰۵	۹۷
۲	۱	۵	۲	۱۰۳	۱۰۶	۹۶	۱۰۲
۱	۲	۱	۱	۱۰۲	۱۰۵	۱۱۵	۱۲۱
۲	۲	۱	۱	۹۸	۱۲۵	۹۷	۱۱۸
۱	۲	۱	۲	۱۰۶	۱۰۹	۱۲۰	۱۲۶
۲	۲	۱	۲	۱۰۱	۱۳۱	۱۰۵	۱۲۳
۱	۲	۲	۱	۱۱۳	۱۱۵	۱۱۷	۹۸
۲	۲	۲	۱	۱۱۰	۱۲۰	۱۱۳	۱۲۳
۱	۲	۲	۲	۱۱۹	۱۲۲	۱۲۵	۱۰۴
۲	۲	۲	۲	۱۱۶	۱۲۸	۱۱۹	۱۲۹
۱	۲	۳	۱	۱۱۳	۱۲۱	۱۱۵	۱۱۷
۲	۲	۳	۱	۱۰۸	۹۹	۱۰۸	۱۲۶
۱	۲	۳	۲	۱۲۰	۱۲۶	۱۱۸	۱۲۳
۲	۲	۳	۲	۱۱۷	۱۰۹	۱۱۵	۱۳۱
۱	۲	۴	۱	۱۱۸	۱۱۳	۱۲۰	۱۰۵
۲	۲	۴	۱	۱۲۰	۱۲۳	۱۱۱	۱۰۹
۱	۲	۴	۲	۱۲۵	۱۲۴	۱۲۷	۱۱۲
۲	۲	۴	۲	۱۲۸	۱۳۰	۱۲۰	۱۱۶
۱	۲	۵	۱	۱۰۳	۱۰۸	۱۱۵	۱۲۰
۲	۲	۵	۱	۱۰۱	۱۲۵	۱۰۵	۱۱۴
۱	۲	۵	۲	۱۱۳	۱۱۵	۱۲۱	۱۲۸
۲	۲	۵	۲	۱۱۱	۱۳۱	۱۱۷	۱۲۱

$CX_{ipm dt}$

i	p	m	t	$CX_{ipm 1t}$	$CX_{ipm 2t}$	$CX_{ipm 3t}$
۱	۱	۱	۱	۵۲	۴۷	۴۵
۱	۱	۱	۲	۵۵	۴۹	۴۷
۱	۱	۲	۱	۴۲	۵۰	۴۲
۱	۱	۲	۲	۴۵	۵۴	۴۴
۱	۲	۱	۱	۵۳	۴۸	۴۵
۱	۲	۱	۲	۵۵	۴۹	۴۸
۱	۲	۲	۱	۴۲	۵۰	۴۱
۱	۲	۲	۲	۴۵	۵۳	۴۳
۱	۳	۱	۱	۵۱	۴۴	۴۹
۱	۳	۱	۲	۵۰	۴۵	۴۱
۱	۳	۲	۱	۴۱	۵۲	۴۲
۱	۳	۲	۲	۴۴	۵۶	۴۵
۱	۴	۱	۱	۵۵	۴۶	۵۰

۱	۴	۱	۲	۵۴	۴۸	۵۳
۱	۴	۲	۱	۴۴	۴۹	۴۰
	۴	۲	۲	۴۶	۵۴	۴۱
۲	۱	۱	۱	۵۴,۵	۵۱,۵	۴۴,۵
۲	۱	۱	۲	۵۱,۵	۵۳,۵	۴۷,۵
۲	۱	۲	۱	۴۷,۵	۵۳,۵	۴۵,۵
۲	۱	۲	۲	۵۰,۵	۵۸,۵	۴۷,۵
۲	۲	۱	۱	۴۹	۴۳	۴۷
۲	۲	۱	۲	۵۲	۴۵	۵۰
۲	۲	۲	۱	۴۳	۵۰	۴۴
۲	۲	۲	۲	۴۵	۵۵	۴۶
۲	۳	۱	۱	۵۴	۴۵	۵۱
۲	۳	۱	۲	۵۵	۴۷	۵۲
۲	۳	۲	۱	۴۶	۵۳	۴۲
۲	۳	۲	۲	۴۹	۵۸	۴۴
۲	۴	۱	۱	۵۰	۴۷	۴۸
۲	۴	۱	۲	۵۶	۵۰	۴۹
۲	۴	۲	۱	۴۸	۵۵	۴۱
۲	۴	۲	۲	۵۱	۵۹	۴۳

راهنمای جدول: همه مقادیر پارامترها به‌جز آن دسته از پارامترهایی که با علامت "*" مشخص شده‌اند، برحسب هزار واحد می‌باشند.

مراجع

[1] O'Connor, J., et al., Physical, chemical, and microbial contaminants in food waste management for soil application: A review. *Environmental Pollution*, 2022: p. 118860.

[۲] مزدک رساپور، همایون‌رضا مدنی‌شاه‌رودی، سیدمسعود کمالی و سیاوش عباسی، "مقایسه انواع مختلف سیستم‌های تولید کمپوست و نحوه کارکرد آن‌ها"، مدیریت پسماندها، دوره ۸، شماره ۱، ۱۳۸۵، صفحه ۸۲-۸۲.

[۳] عبدالایمان عمویی، حسین علی اصغرینیا و علی خدادادی، "بررسی کیفیت کود کمپوست تولیدی از پسماندهای روستایی در شهرستان بابل"، مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران، دوره ۱۹، شماره ۱، ۱۳۸۸، صفحه ۵۵-۶۱.

[4] Aleksander Banasik, Argyris Kanellopoulos, G.D.H. Claassen, Jacqueline M. Bloemhof-Ruwaard and Jack G.A.J. van der Vorst, "Closing loops in agricultural supply chains using multi-objective optimization: A case study of an industrial mushroom supply chain", *International Journal of Production Economics*, Vol. 183, Part B, 2017, pp. 409-420.

[۵] راضیه یوسفی گل بته، فائزه رضانی مقدم صحرانی، میترا محمدی، شهاب هوشمند و ماندانا محمدی، "سنجش میزان آلاینده‌های خروجی از آگزوز خودروهای پژو ۲۰۶، سمند معمولی و سمند تاکسی در شهر مشهد"، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، دوره ۱۸، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۶۳-۷۶.

[6] Qu, Y., T. Bektaş, and J. Bennell, "Sustainability SI: multimode multicommodity network design model for intermodal freight transportation with transfer and emission costs", *Networks and Spatial Economics*, Vol. 16, NO.1, 2016, pp. 303-329.

[۷] فریبا فتحی‌پور و مهدی قدری، "ارائه یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای زنجیره تأمین پایدار نفت پایین‌دست چند حالت حمل‌ونقلی"، کنفرانس بین‌المللی انجمن ایرانی تحقیق در عملیات، ایران، بابلسر، ۱۱ تا ۱۲ اردیبهشت، دوره ۱۲، ۱۳۹۸.

[8] Hongqi Li, Yue Lu, Jun Zhang and Tianyi Wang, "Trends in road freight transportation carbon dioxide emissions and policies in China", *Energy Policy*, Vol. 57, June 2013, pp. 99-106.

[۹] الهه حیدرنژاد، علی سلماس نیا و رضا برادران کاظم زاده، "ارائه مدلی استوار برای مسئله گسسته موازنه‌سازی زمان-هزینه-اثرات زیست‌محیطی پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمان و هزینه"، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۸، ۲۰۱۹، صفحه ۲۱۵-۲۳۲.

[۱۰] مهسا زارعی، مهدی نصراللهی و امیر یوسفلی، "توسعه شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته در فضای غیرقطعی"، مدل‌سازی در مهندسی، انتشار آنلاین از ۱۶ آبان ۱۴۰۰.

[۱۱] آنیته عبدی و مصطفی حاجی آقائی کشتلی، "بررسی مدل احتمالی چندهدفه برای مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار با در نظر گرفتن مسیریابی وسایل نقلیه با استفاده از الگوریتم‌های نوین و ترکیبی فرا ابتکاری"، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۶۷-۸۵.

[۱۲] نگار ترکمانی و حسینعلی علیخانی، "مقایسه ورمی کمپوست حاصل از کودهای گاوی، گوسفندی و مرغی در رطوبت‌های مختلف"، کنگره ملی بازیافت و استفاده از منابع آلی تجدیدشونده در کشاورزی، اصفهان، ایران، شماره ۳، ۱۳۸۷.

[۱۳] یونس جبارزاده، حسین ریحانی یامچی و نادر غفاری نسب، "مدل ریاضی چندهدفه برای مدیریت زنجیره تأمین یکپارچه مستقیم و معکوس پایدار سیب‌درختی با در نظر گرفتن بازارهای خارجی میوه"، مدیریت کسب‌وکارهای بین‌المللی، دوره ۸، شماره ۳، ۱۳۹۹، صفحه ۱۳۹-۱۶۶.

[۱۴] خدیجه جاسمی، فاخر کردونی و محمد علی بهدانی، "بررسی وضعیت مصرف انواع کودها و تأثیر آن بر عملکرد در مزارع زعفران مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی، کنگره چالش‌های کود در ایران، تهران، ایران، ۱۰ تا ۱۲ اسفند، دوره ۱، ۱۳۸۹.

[۱۵] نجمه بلوک آذری، "اثرات مصرف کودهای شیمیایی در منابع آبی دشت فومنات در استان گیلان، کنگره چالش‌های کود در ایران، تهران، ایران، ۱۰ تا ۱۲ اسفند، دوره ۱، ۱۳۸۹.

[۱۶] رهام محتشمی و محمد رضا چاکرالاحسینی، "اثرات نامطلوب عناصر مضر موجود در کودهای شیمیایی بر روی محصولات کشاورزی، انسان و محیط‌زیست، کنگره چالش‌های کود در ایران، تهران، ایران، ۱۰ تا ۱۲ اسفند، دوره ۱، ۱۳۸۹.

[۱۷] نادر صادقی و جمشید بهین، "مدل‌سازی رهش کود اوره از ماتریس اوره لیگنین اصلاح‌شده، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۸، شماره ۶۰، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۱-۱۱.

[18] Angie Silva, Michele Rosano, Laura Stocker and Leen Gorissen, "From waste to sustainable materials management: Three case studies of the transition journey", Waste management, Vol. 61, March 2017, pp. 547-557.

[19] Rashid, M.I. and K. Shahzad, Food waste recycling for compost production and its economic and environmental assessment as circular economy indicators of solid waste management. Journal of Cleaner Production, 2021. 317: p. 128467.

[20] Cheraghalipour, A. and E. Roghanian, "A Bi-Level Model for a Closed-Loop Agricultural Supply Chain Considering Biogas and Compost", Research Square, Nov. 2021.

[21] Armin Cheraghalipour, Mohammad Mehdi Paydar, and Mostafa Hajiaghahi-Keshteli, "A bi-objective optimization for citrus closed-loop supply chain using Pareto-based algorithms", Applied Soft Computing, Vol. 69, August 2018, pp. 33-59.

[22] Koushik Paul, Subhasish Chattopadhyay, Amit Dutta, and Akhouri PKrishna, Subhabrata Ray, "A comprehensive optimization model for integrated solid waste management system: A case study", Environmental Engineering Research, Vol. 24, NO. 2, 2019, pp. 220-237.

[23] Hossein Reyhani Yamchi, Younis Jabbarzadeh, Nader Ghaffarinasab, Vikas Kumar and JA Garza-Reyes, "A multi-objective linear optimization model for designing sustainable closed-loop agricultural supply chain", Proceedings of the 10th Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), IEOM Society, March 2020.

[۲۴] حسن قدسی پور، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، چاپ دوازدهم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، ۱۳۹۸.

[25] Salvador García, Julián Luengo, Francisco Herrera, Data preprocessing in data mining, 72th, Springer, London, 2015.

[۲۶] محمدجواد اصغر پور، تصمیم‌گیری‌های چند معیاره، چاپ هجدهم، انتشارات دانشگاه تهران، ایران، ۱۴۰۰.