



Production and Operations Management  
University of Isfahan E-ISSN: 2423-6950  
Vol. 12, Issue 1, No. 24, Spring 2021



<http://dx.doi.org/10.22108/ipom.2021.124187.1284>

(Research Paper)

## Industrial symbiosis network optimization considering sustainable development characteristics

**Khadijeh Bayati**

Industrial engineering, Faculty of Industrial Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran, bzohre65@gmail.com

**Emad Roghanian \***

Industrial engineering, Faculty of Industrial Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran, e\_roghanian@kntu.ac.ir

**Purpose:** Despite their achievements, the industrial parks have had a devastating effect on the environment and sometimes did not address social welfare issues. Therefore, it is necessary to improve their design based on the characteristics of sustainable development and ecological principles. One of the effective measures in this regard is Industrial Symbiosis (IS). It is a set of integrated plants aiming to exchange the waste of each plant as the raw material of another plant. Although several models have been presented for the optimization of water or energy exchange, one of the purposes of this research is to simultaneously exchange raw materials and waste in solid, liquid, and gas types. Considering the social characteristic of sustainable development is another necessity of this research that has been less discussed. Also, a significant portion of the waste needs to be recycled and cannot be exchanged directly between plants. Therefore, another purpose of this research is to increase the productivity of the model considering material flow between plants and recovery centres, which did not exist in previous models.

**Design/methodology/approach:** In this research, a two-objective mixed-integer linear programming model is proposed considering the characteristics of sustainable development, which simultaneously enables the exchange of all raw materials and waste. Providing recyclable waste exchanges via recovery centres is another strength of the proposed model. The first objective is to minimize the economic costs of the IS network, and the second objective is to maximize social welfare. The environmental characteristic is also controlled by model constraints. Finally, to validate the proposed model, it has been

---

\* Corresponding author



implemented in one of the industrial parks of Alborz province. Also, to solve the model, the  $\epsilon$ -Constraint method has been used.

**Findings:** According to the model's results, most of the plant's waste was replaced by the input raw materials of other plants, while before IS, all plant waste was disposed and all input materials were supplied through fresh materials. Therefore, the findings of the proposed model are as follows:

- reducing the volume of disposed and useless plant waste and its costs;
- reducing the volume of fresh input raw materials plants and its costs;
- creating 23 job opportunities through the establishment of centres to recover;
- compensating for lost working days due to the reduction of environmental pollutants to achieve the social characteristics of sustainable development; and
- improving the characteristics of sustainable development in the industrial park compared to the time before IS.

**Research limitations/implications:** This research, like other studies, has assumptions and limitations in model development. For example, the transmission path of all three types of material and waste was considered the same. The feasibility of situations trade-off and the use of waste of recovery centres was not studied. Also, the expectations of the park and the plants were considered in an integrated manner. Therefore, the following subjects are suggested to improve and develop the model in future studies:

- design of IS network using bi-level models;
- development of a model for the use of waste from the recovery centre; for example, methane gas or sludge treatment plant;
- model development by considering seasonal plants through reliability inventory models and intermittent flows;
- development of a model for locating and allocating unusable waste in the current network to the new plant; and
- development of a model based on the different transmission paths for material and waste flow in solid, liquid, and gaseous according to the research assumption 3.

**Practical implications:** One of the most significant applications of this paper is the simultaneous optimization of exchange material and waste in three types of solid, liquid, and gaseous in IS network to achieve the characteristics of sustainable development. Also, reducing the cost of input material and waste disposal compared to the time before IS are the economic advantages of this research.

**Social implications -** One of the aims of this paper was to reduce the environmental and social impact of the industrial park to achieve the characteristics of sustainable development. For example, reducing the volume of fresh input raw materials and disposed waste plants and job creation were the environmental and social advantages of this study.


**Originality/value:** The innovations of this research include the following:

- simultaneous optimization of material and waste flow in three types: solid, liquid, and gaseous;
- considering the social characteristic of sustainable development; and
- considering the exchange between recovery centres and plants to use the waste in need of recovery.

**Keywords:** Eco-industrial park, Industrial Symbiosis (IS), Sustainable development, Multi-objective optimization, Mixed-integer linear programming,  $\epsilon$ -Constraint



مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۲، شماره ۱، پیاپی ۲۴، بهار ۱۴۰۰  
دریافت: ۱۳/۰۵/۱۳۹۹ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱ ص ۳۱-۵۶

 <http://dx.doi.org/10.22108/jpom.2021.124187.1284>

(مقاله پژوهشی)

## بهینه‌سازی شبکه همزیستی صنعتی با در نظر گرفتن مشخصه‌های توسعه پایدار

خدیجه بیاتی<sup>۱</sup>، عماد روغنیان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، bzohre65@gmail.com

۲- دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، e\_roganlian@kntu.ac.ir

**چکیده:** شهرک‌های صنعتی با وجود دستاوردهای خود، تأثیرات مخربی بر محیط زیست داشته‌اند و گاهی به موضوعات مرتبط با رفاه اجتماعی توجه نکرده‌اند؛ بنابراین، طراحی آنها باید متناسب با اهداف توسعه پایدار و اصول اکولوژیک بهبود یابد. یکی از اقدامات مؤثر در این زمینه، پیاده‌سازی شبکه‌های همزیستی صنعتی است. شبکه‌های همزیستی، مجموعه‌ای از صنایع است که با هدف اشتراک‌گذاری ضایعات هر صنعت به‌عنوان ماده اولیه صنعت دیگر در کنار هم قرار گرفته است و امکان تبادل انرژی و مواد را فراهم می‌آورد. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای بهینه‌سازی شبکه‌های همزیستی ارائه شده است که به‌طور هم‌زمان، انتقال ضایعات و مواد اولیه جامد، مایع و گاز را فراهم می‌کند. هدف اول، حداقل‌سازی هزینه‌های اقتصادی اجرای شبکه و صنایع مشترک در آن و هدف دوم، حداکثرسازی رفاه اجتماعی را فراهم می‌آورد. بعد محیط زیستی با محدودیت‌های مدل کنترل می‌شود. برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، به پیاده‌سازی آن بر یکی از شهرک‌های صنعتی استان البرز اقدام شده است. برای حل مدل از روش اپسیلون محدودیت استفاده شده است که نتایج خروجی نشان می‌دهد، حجم ضایعات بدون استفاده و هزینه‌های صنایع در شرایط همزیستی نسبت به پیش از آن کاهش یافته است. همچنین، ایجاد ۲۳ فرصت شغلی از جمله مزایای بهبود سطح اجتماعی است.

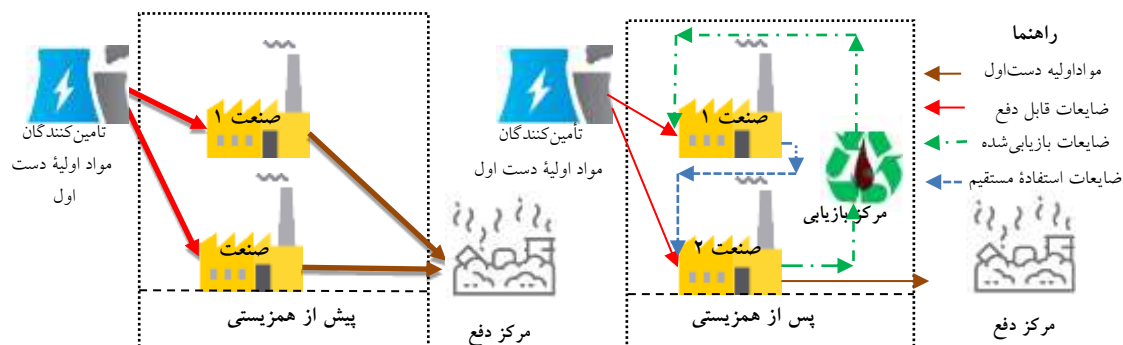
**واژه‌های کلیدی:** پارک‌های صنعتی اکولوژیک، همزیستی صنعتی، توسعه پایدار، بهینه‌سازی چندهدفه، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، اپسیلون محدودیت



## ۱- مقدمه

شهرک‌های صنعتی با ایجاد زیرساخت اقتصادی، امکان رشد فناوری و نوآوری‌ها را فراهم می‌کنند و نقش مهمی در توسعه اقتصادی دارند؛ اما این دستاوردهای اقتصادی، اغلب بدون در نظر گرفتن کیفیت محیط زیست و رفاه اجتماعی است و باعث آسیب‌های جدی به جامعه و محیط زیست می‌شود که از جمله آنها به مصرف بی‌رویه منابع طبیعی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، گرمایش زمین و بیماری‌های روحی و جسمی افراد می‌توان اشاره کرد (لئو<sup>۱</sup> و بایی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸؛ گنس<sup>۳</sup>، کاپلین<sup>۴</sup>، ادریس<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۹)؛ بنابراین، طراحی شهرک‌های صنعتی باید با الهام از روابط اکولوژیک طبیعی انجام می‌شود؛ به گونه‌ای که موجب کمترین آثار مخرب بر طبیعت و جوامع انسانی شود (ادویر<sup>۶</sup>، چن<sup>۷</sup>، وانگ<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). بر همین اساس، مفاهیمی مانند پارک‌های صنعتی اکولوژیک<sup>۹</sup> و همزیستی صنعتی<sup>۱۰</sup> مطرح شده است (شریعت، ایران‌زاده و بافنده، ۲۰۱۶). پارک‌های صنعتی اکولوژیک با محوریت همزیستی صنعتی برای بهبود عملکرد شهرک‌های صنعتی همسو با توسعه پایدار شکل گرفته است. همزیستی صنعتی، اشتراک ضایعات خروجی یک صنعت به‌عنوان ماده اولیه صنایع مجاور، اشتراک زیرساخت‌ها یا خدمات بین صنایع است که علاوه بر مزایای محیط زیستی و اجتماعی، مزیت‌های اقتصادی بسیاری برای صنایع مشترک در طرح به همراه دارد (فراکاساسیا<sup>۱۱</sup>، گیانوکارو<sup>۱۲</sup> و آلبینو<sup>۱۳</sup>، ۲۰۲۱).

یکی از نکات مهم در مبانی همزیستی صنعتی، طراحی این شبکه‌ها برای بهینه‌سازی تبادل ضایعات بوده است. تاکنون، روش‌های متعددی در این زمینه به کار رفته است که از جمله آنها به طراحی شبکه برای مدیریت آب و اشتراک انواع انرژی می‌توان اشاره کرد. نکته مهم در مدل‌های موجود، تمرکز بر یک حالت تبادل، مانند آب یا انرژی است (بویکس<sup>۱۴</sup>، مونتاستراک<sup>۱۵</sup>، آزارو<sup>۱۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۵)؛ در حالی که برای کاربردی شدن مدل در شهرک‌های صنعتی باید به‌طور هم‌زمان، انتقال انواع مواد اولیه و ضایعات در حالت‌های جامد، مایع و گاز در نظر گرفته شود. همچنین، بهبود بعد اجتماعی توسعه پایدار از مزیت‌های مهم همزیستی است که کمتر به آن توجه شده است. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط<sup>۱۷</sup> دوهدفه با لحاظ کردن مشخصه‌های توسعه پایدار ارائه شده است که به‌طور هم‌زمان، امکان انتقال کلیه مواد اولیه و ضایعات جامد، مایع و گاز را بین صنایع فراهم می‌کند. تبادلات ضایعات قابل بازیابی از دیگر نقاط قوت مدل پیشنهادی است که از طریق مراکز بازیابی و مکان‌یابی آنها از بین مراکز بالقوه محقق می‌شود. به‌طور کلی، عملکرد شبکه همزیستی مدل پیشنهادی در شهرک صنعتی در شکل شماره ۱ توصیف شده است. مطابق آن، پس از همزیستی، بخش عمده‌ای از مواد اولیه از طریق ضایعات خروجی صنایع مجاور به دو صورت مستقیم یا پس از بازیابی و فقط بخشی از آن از تأمین‌کنندگان دست اول (نو) تأمین می‌شود؛ در حالی که پیش از همزیستی، کلیه مواد اولیه از طریق تأمین‌کنندگان و به‌صورت مواد دست اول، تأمین و ضایعات نیز بدون استفاده در مراکز دفع امحا می‌شود.



شکل ۱- مقایسه جریان مواد و ضایعات در شهرک صنعتی پیش و پس از همزیستی صنعتی

تابع هدف اول، حداقل‌سازی هزینه‌های اجرای شبکه و صنایع را از طریق ترغیب مدل به کاهش استفاده از مواد اولیه دست اول و ضایعات بدون استفاده دنبال می‌کند. همچنین، افزایش استفاده مجدد از ضایعات در فرایند تولید، دستیابی به بعد محیط زیستی توسعه پایدار را فراهم کرده است. هدف دوم با حداکثرسازی ایجاد فرصت‌های شغلی در شبکه و جبران روزهای کاری ازدست‌رفته، دستیابی به بعد اجتماعی را محقق کرده است؛ بنابراین، در نهایت به این پرسش پاسخ داده می‌شود که حجم انتقالات (تبادلات) درون شبکه، مکان مراکز بازیابی از میان مراکز بالقوه، رفاه اجتماعی، مشاغل ایجادشده و بهبود وضعیت شهرک در ابعاد توسعه پایدار نسبت به پیش از همزیستی چیست.

## ۱-۱ پیشینه پژوهش

مفهوم همزیستی صنعتی در دهه ۱۹۹۰ شکل گرفته است. در ابتدا، در عمده مبانی نظری از مدل‌های مفهومی و جدول‌های هدف‌گذاری در طراحی پارک صنعتی اکولوژیک و بهینه‌سازی همزیستی استفاده شده است. به‌علت ناکارآمدی مدل‌های مفهومی در طراحی شبکه‌های بزرگ، پژوهشگران به استفاده از مدل‌های ریاضی روی آورده‌اند که تا حدی، طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده را آسان کرده است (بیگلر<sup>۱۸</sup> و گراسمن<sup>۱۹</sup>، ۲۰۰۴).

از جمله مدل‌های ریاضی به انواع برنامه‌ریزی‌های خطی، غیرخطی و عدد صحیح می‌توان اشاره کرد که عموماً بر مبنای نوع تبادل مانند آب توسعه یافته است؛ برای نمونه، لاولیدی<sup>۲۰</sup> و الهالواگی<sup>۲۱</sup> (۲۰۰۹)، مدلی غیرخطی را برای تبادل آب در سطح پارک‌های صنعتی اکولوژیک ارائه کردند که هدف آن، حداقل‌سازی هزینه تأمین و تبادل آب در سطح پارک بود. آویسو<sup>۲۲</sup>، تان<sup>۲۳</sup>، کولابا<sup>۲۴</sup> و همکاران (۲۰۱۰) با در نظر گرفتن تفاوت نگرش و خواسته‌های صنایع و مؤسسان پارک از احداث شبکه همزیستی، بر آن شدند یک مدل دوسطحی فازی<sup>۲۵</sup> غیرخطی را برای تبادل آب ارائه دهند. در این مدل، مؤسسان پارک به‌عنوان سطح پیشرو و صنایع به‌عنوان سطح پیرو در نظر گرفته شده‌اند که به‌ترتیب، حداقل‌سازی مصرف آب دست اول در سطح پارک، هدف پیشرو و حداقل‌سازی هزینه‌های تأمین آب، هدف سطح پیرو بوده است. با توجه به ضعف مدل‌های خطی در تعیین اتصالات شبکه و اهمیت تبادل انرژی حرارتی در بهبود عملکرد اقتصادی و محیط زیستی صنایع، کیم<sup>۲۶</sup>، یون<sup>۲۷</sup>، چائی<sup>۲۸</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی را برای تبادل انرژی حرارتی ارائه کردند. روبیو<sup>۲۹</sup>، پانسه<sup>۳۰</sup>، سرنا<sup>۳۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح غیرخطی را برای طراحی شبکه‌های تبادل آب توسعه دادند که هدف اقتصادی به‌صورت جزئی‌تر و با لحاظ کردن هزینه‌های لوله‌کشی و تصفیه آب لحاظ شده است. نظر به اینکه مدل‌های غیرخطی از حیث روش حل در ردیف مدل‌های سخت قرار می‌گیرد، رویکردهای مدل‌سازی به سمت مدل‌های خطی گرایش یافت؛ به‌گونه‌ای که بویکس<sup>۳۲</sup>، مونتاستراک، پیبولنو<sup>۳۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، مدل عدد صحیح خطی و چائو<sup>۳۴</sup>، لونور<sup>۳۵</sup>، استل<sup>۳۶</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، مدل خطی را برای تبادل انرژی ارائه کردند. در ادامه، آویسو (۲۰۱۴)، مدل‌های خطی مختلط عدد صحیح را برای تبادل آب بهبود داد. تسخیری<sup>۳۷</sup>، بهرا<sup>۳۸</sup>، تان<sup>۳۹</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، مدل‌های عدد صحیح مختلط خطی را برای انتقال انرژی با رویکرد فازی برای پوشش‌دهی عدم قطعیت در داده‌های مدل مانند تقاضا توسعه دادند. دوباره، ژانگ<sup>۴۰</sup>، ژو<sup>۴۱</sup>، چابرا<sup>۴۲</sup> و همکاران (۲۰۱۶) از رویکرد غیرخطی برای تبادل بخار گرم خروجی از کارخانه‌ها به‌عنوان بخار سرد ورودی برای کارخانه‌های مصرف‌کننده استفاده کردند. نکته مهم در مدل ژانگ نسبت به سایر مدل‌ها، در نظر گرفتن کاهش دما حین انتقال بخار بود. در سال‌های اخیر،

بیشتر مدل‌ها بر پایه مدل‌های مختلط عدد صحیح خطی توسعه یافته است. بر همین اساس، تیو<sup>۴۳</sup> و کروز<sup>۴۴</sup> (۲۰۱۷) یک مدل دوهدفه اقتصادی و محیط‌زیستی را با لحاظ کردن مباحثی مانند هزینه قطر لوله انتقال آب توسعه دادند که با پارامترهای مذکور، دقت برآورد هزینه و قابلیت اجرایی نسبت به مدل‌های مشابه افزایش یافته بود. افشاری<sup>۴۵</sup>، جابر<sup>۴۶</sup> و سرکی<sup>۴۷</sup> (۲۰۱۸)، مدلی دوهدفه را برای تبادل انرژی توسعه دادند. مدل دیگری را نوینو<sup>۴۸</sup>، روی<sup>۴۹</sup> و هنکیون<sup>۵۰</sup> (۲۰۱۹) برای تبادل آب ارائه کردند که هدف اقتصادی و محیط‌زیستی را دنبال می‌کند و هزینه بیمه کارکنان شبکه را نیز در تابع هدف اقتصادی خود آورده است. ولنزوئلا- ونگاس<sup>۵۱</sup>، ورا<sup>۵۲</sup> و دیز<sup>۵۳</sup> (۲۰۲۰)، مدل خطی مختلط عدد صحیح را برای تبادل انرژی طراحی کردند که در آن، تاب‌آوری شبکه در برابر حوادثی همچون قطع ارتباطات در نظر گرفته شده است.

نکته مهم این است که در پژوهش‌های داخلی، مفاهیمی همچون زنجیره‌های تأمین سبز و لجستیک معکوس برای بهبود عملکرد محیط‌زیستی صنایع شکل گرفته است (حسینی و میرجهانمرد، ۲۰۱۴)؛ برای مثال، شکوهیار و اکبری (۲۰۱۸)، از روش ترکیبی مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی برای بهبود بازیافت زباله‌های الکترونیکی همسو با توسعه پایدار استفاده کرده‌اند که بعد اجتماعی آن، اشتغال‌زایی در ایستگاه‌های بازیافت را دربرمی‌گیرد. نصر آزادانی، داوودی و معینی (۲۰۱۹)، برای کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید در فرایند تولید فولاد، مدلی غیرخطی ارائه کردند که جایگزینی آهن اسفنجی را بررسی کرده است. این مدل‌ها نقش مؤثری در بهبود عملکرد صنایع به‌صورت فردی دارد؛ اما در شهرک‌های صنعتی، مزایای جمعی شبکه‌های هم‌زیستی در ابعاد محیط‌زیستی و اقتصادی، بیشتر از سیاست‌های فردی مقابله با آلاینده‌های محیط‌زیستی است.

همچنین، بخش مهمی از ضایعات کارخانه‌ها، قابلیت استفاده دوباره در فرایند تولیدی آن کارخانه را از طریق لجستیک معکوس ندارد؛ در حالی که با مواد ورودی کارخانه‌های مجاور همخوانی دارد؛ بنابراین، شبکه‌های هم‌زیستی با به‌کارگیری ضایعات در کارخانه‌های مجاور، نقش مؤثرتری در حداقل‌سازی زباله‌های صنعتی و دستیابی به اهداف توسعه پایدار فراهم می‌کند (هنکیون<sup>۵۴</sup>، هو<sup>۵۵</sup>، لی<sup>۵۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۹).

## ۱-۲ شکاف پژوهشی

در این بخش، خلاصه پیشینه پژوهش موضوع به‌طور خلاصه در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، بیشتر خلاصه پیشینه پژوهش بر اهداف اقتصادی و محیط‌زیستی تمرکز کرده است و بعد اجتماعی توسعه پایدار در نظر گرفته نشده است؛ در صورتی که دستیابی به اهداف توسعه پایدار بدون لحاظ کردن رفاه اجتماعی به‌طور کامل محقق نمی‌شود. همچنین، در بیشتر مطالعات به‌صورت انحصاری بر نوعی از تبادلات شامل آب یا انرژی تمرکز شده است. تبادل پسماندهای جامد نیز با وجود درجه زیاد کاربری مجدد در هیچ یک از مدل‌ها لحاظ نشده است؛ بنابراین، باید مدل‌های چندلایه و با در نظر گرفتن تبادل هم‌زمان انواع ضایعات و مواد طراحی شود. نکته دیگر، در نظر گرفتن مراکز بازیابی ضایعات است که در مدل‌های موجود لحاظ نشده است و ارتباطات شبکه به‌صورت مستقیم بین صنایع در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- خلاصه پیشینه پژوهش موضوع

ردیف	نویسنده	سال	نوع مدل	نوع هدف			مطالعه کاربردی / مثال عددی
				اقتصادی	محیط زیستی	اجتماعی	
۱	لاولیدی	۲۰۰۹	NLP	*			مثال عددی
۲	کیم	۲۰۱۰	MILP	*	*		مطالعه کاربردی
۳	آویسو	۲۰۱۰	Bi-level	*	*		مثال عددی
۴	چائی <sup>۵۷</sup>	۲۰۱۰	MILP	*			مطالعه کاربردی
۵	روبیو	۲۰۱۱	MINLP	*			مثال عددی
۶	بویکس	۲۰۱۲	MILP	*	*		مثال عددی
۷	چائو	۲۰۱۳	LP	*	*		مثال عددی
۸	آویسو	۲۰۱۴	MILP	*			مطالعه کاربردی
۹	تسخیری	۲۰۱۵	MILP	*	*		مطالعه کاربردی
۱۰	گونالا <sup>۵۸</sup>	۲۰۱۵	MILP	*			مطالعه کاربردی
۱۱	ژانگ	۲۰۱۶	NLP	*	*		مطالعه کاربردی
۱۲	آندیپان <sup>۵۹</sup>	۲۰۱۶	NLP	*			مطالعه کاربردی
۱۳	تیو	۲۰۱۷	MILP	*	*		مطالعه کاربردی
۱۴	افشاری	۲۰۱۸	MILP	*	*		مطالعه کاربردی
۱۵	افشاری	۲۰۱۸	MILP	*	*		مطالعه کاربردی
۱۶	بی <sup>۶۰</sup>	۲۰۱۹	Bi-Level	*			مطالعه کاربردی
۱۷	آلفادهی <sup>۶۱</sup>	۲۰۱۹	LP	*			مطالعه کاربردی
۱۸	پانو <sup>۶۲</sup>	۲۰۱۹	MILP	*	*		مطالعه کاربردی
۱۹	نویینو	۲۰۱۹	MILP	*			مثال عددی
۲۰	داکيون <sup>۶۳</sup>	۲۰۱۹	ILP	*			مثال عددی
۲۱	ولنزوللا- ونگاس	۲۰۲۰	MILP	*	*		مطالعه کاربردی
۲۲	کوآ <sup>۶۴</sup>	۲۰۲۰	LP	*	*		مثال عددی
۲۳	چان <sup>۶۵</sup>	۲۰۲۰	MILP	*			مطالعه کاربردی
۲۴	پژوهش حاضر	۲۰۲۱	MILP	*	*	*	مطالعه کاربردی

سایر بخش‌های پژوهش به شرح ذیل سازماندهی شده است:

در بخش ۲، مفاهیم به کاررفته در پژوهش و در بخش ۳، مدل ریاضی ارائه شده با نام روش شناسی پژوهش بررسی شده است. در بخش ۴ با پیاده‌سازی مدل روی مطالعه کاربردی، اعتبار مدل ارزیابی شده است. در بخش ۵، خروجی مدل تحلیل شده است. در نهایت، در بخش ۶، نتایج پژوهش و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده مطرح شده است.

## ۲- مبانی نظری

مفاهیم نظری متناسب با موضوع پژوهش، در دو زیربخش روش اپسیلون محدودیت و مفهوم توسعه پایدار ارائه

می‌شود.

## ۲-۱ روش اپسیلون محدودیت

مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، از جمله روش‌های تصمیم‌گیری است که در آن، علی‌رغم مدل‌های تک‌هدفه، چندین هدف برای بهینه‌سازی پیش روی تصمیم‌گیرنده است که گاهی متضاد است. برای حل دقیق مدل‌های چندهدفه، الگوریتم‌های گوناگونی وجود دارد. یکی از آنها، روش اپسیلون محدودیت<sup>۶۶</sup> است که کاربرد گسترده‌ای در پژوهش‌های اخیر داشته است. رویکرد این روش، نگاه‌داشتن بهترین تابع هدف برای بهینه‌سازی و انتقال سایر اهداف به محدودیت‌هاست. بدین ترتیب، مرز پارتو با استفاده از تغییرات ایجادشده در حدود اهداف فرعی در تکرارهای مختلف ایجاد می‌شود. مدل چندهدفه (با فرض مدل سه‌هدفه و هدف اول به‌عنوان بالاترین اولویت) پس از الگوریتم اپسیلون محدودیت به فرم معادلات (۱) تا (۵) تبدیل می‌شود (خطیبی، خاکراز و رحمانی، ۲۰۱۷).

$$\min f_1(X) \qquad \min f_1(X) \qquad (1)$$

$$\min f_2(X) \qquad \text{پس از اعمال الگوریتم اپسیلون} \qquad f_2(X) \leq \varepsilon_2 \qquad (2)$$

$$\min f_3(X) \qquad \xrightarrow{\text{محدودیت}} \qquad f_3(X) \leq \varepsilon_3 \qquad (3)$$

$$g(X) \geq 0 \qquad g(X) \geq 0 \qquad (4)$$

$$X \in S \qquad X \in S \qquad (5)$$

مراحل الگوریتم به‌صورت ذیل است:

- ۱- هر بار، یکی از اهداف را به‌عنوان تابع هدف اصلی در نظر بگیرید و مسئله را با آن بهینه کنید.
- ۲- مقدار بهینه تابع هدف حاصل از گام یک را در سایر توابع هدف جایگزین و مقادیر مربوط را یادداشت کنید.
- ۳- بازه بین مقدار بهینه و خروجی گام دو هر یک از اهداف فرعی را به تعداد از پیش تعیین‌شده تقسیم‌بندی کنید و یک جدول برای مقادیر  $\varepsilon_i$ ها به دست آورید.
- ۴- مسئله را با یکی از مقادیر  $\varepsilon_i$ ها و به‌ازای بهینه‌شدن هدف اصلی، حل و جواب‌های پارتو را گزارش کنید. کدنویسی مدل پیشنهادی بر مبنای الگوریتم فوق در نرم‌افزار گمزو حل‌کننده<sup>۶۷</sup> سیپلکس<sup>۶۸</sup> انجام شده است.

## ۲-۲ توسعه پایدار

بر اساس گزارش براندتلند<sup>۶۹</sup> در کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه<sup>۷۰</sup> (۱۹۸۷)، توسعه پایدار عبارت است از «توسعه‌ای که نیازهای زمان حال را برآورده سازد؛ بدون آنکه توانایی نسل‌های آینده را در برآورده‌سازی نیازهایشان به خطر اندازد». شاخص‌های توسعه پایدار در توسعه صنعتی را در سه بعد اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی می‌توان مطرح کرد. شاخص اقتصادی برای بهبود عملکرد اقتصادی با کاهش هزینه‌هایی مانند تولید، زیرساخت‌ها و دفع ضایعات اطلاق می‌شود. بعد محیط زیستی برای کاهش مصرف منابع طبیعی و آلاینده‌های محیط زیستی شکل گرفته است. بعد اجتماعی برای بهبود رفاه اجتماعی است که افزایش اشتغال و سطح سلامت کارکنان صنعتی را دربرمی‌گیرد.



### ۳- روش شناسی پژوهش

در این پژوهش، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای بهینه‌سازی انتقالات در شبکه‌های همزیستی و مکان‌یابی مراکز بازیابی ضایعات ارائه شده است. رویکرد مدل برمبنای استفاده مستقیم یا غیرمستقیم از ضایعات است. در این رویکرد، بخشی از ضایعات، که کیفیت صنایع متقاضی را ندارد، پس از رسیدن به کیفیت مطلوب در مراکز بازیابی، به‌عنوان مواد اولیه بازیابی شده (تبادل غیرمستقیم) در اختیار صنایع قرار می‌گیرد. بخش دیگر از ضایعات دارای کیفیت لازم در تبادل مستقیم، به‌صورت مستقیم به صنایع متقاضی ارسال می‌شود. به‌طور کلی، تقاضای صنایع پس از شبکه همزیستی به سه صورت تأمین می‌شود: مواد اولیه دست اول که از تأمین‌کنندگان اولیه تأمین می‌شود؛ مواد اولیه استفاده مجدد که به‌صورت مستقیم از ضایعات خروجی یک صنعت به‌عنوان مواد ورودی صنعت دیگر ارسال می‌شود و دسته سوم، ضایعات بازیافت شده که از مراکز بازیابی در اختیار صنایع قرار می‌گیرد. نوع پژوهش، کاربردی و برمبنای مطالعه روی شهرک صنعتی است که هفت صنعت از شهرک نظرآباد به‌عنوان نمونه آماری لحاظ شده است. داده‌های لازم با بازدید و پرسش و پاسخ با صنایع، جلسات با کارشناسان شرکت شهرک‌های صنعتی استان البرز و بانک داده این شرکت تهیه شده است. درنهایت، پس از اعتبارسنجی مدل با نمونه مورد مطالعه، مدیران شهرک مورد مطالعه، خروجی آن را برای ارزیابی عملکرد اجرایی تأیید کردند.

### مفروضات مدل

- ۱- فرایند تولید کارخانه‌ها فصلی نیست.
- ۲- همزیستی یک کارخانه با خودش صفر در نظر گرفته شده است.
- ۳- فاصله بین گره‌ها برای انواع انتقالات جامد، گاز و آبی یکسان در نظر گرفته شده است.
- ۴- در فرایند انتقال از مقدار افت کیفی چشم‌پوشی شده است.

جدول ۲- پارامترها، اندیس‌ها و متغیرهای مدل

اندیس‌های مدل	
$m1$ : تأمین‌کنندگان مواد اولیه حالت آب	$p1$ : مراکز بالقوه بازیابی حالت آب مانند تصفیه‌خانه
$m2$ : تأمین‌کنندگان مواد اولیه حالت گاز	$p2$ : مراکز بالقوه بازیابی حالت گاز مانند کربن‌دی‌اکسید
$m3$ : تأمین‌کنندگان مواد اولیه جامد	$p3$ : مراکز بالقوه بازیابی جامدات
$t1$ : مراکز دفع ضایعات بلااستفاده آب‌وفاضلاب	$k1$ : سطوح کیفیتی تبادلات حالت آب در شبکه
$t2$ : مراکز دفع ضایعات بلااستفاده گاز	$k2$ : سطوح کیفیتی تبادلات حالت گاز در شبکه
$t3$ : مراکز دفع ضایعات بلااستفاده جامد	$k3$ : سطوح کیفیتی تبادلات جامد در شبکه
$i$ : کارخانه مبدأ و ارائه‌دهنده ضایعات خروجی به شبکه	$z$ : کارخانه مصرف‌کننده ضایعات خروجی به‌عنوان ماده اولیه
پارامترهای مدل	
$d_{m1j}$ : فاصله تأمین‌کننده $m1$ با مصرف‌کننده (صنایع) $j$ ام	$PC^{k1}$ : هزینه متغیر لوله‌کشی و انتقال به‌ازای هرواحد مسافت و حجم هرنوع
$d_{m2j}$ : فاصله تأمین‌کننده $m2$ با مصرف‌کننده (صنایع) $j$ ام	تبادل $k1$
$d_{m3j}$ : فاصله تأمین‌کننده $m3$ با مصرف‌کننده (صنایع) $j$ ام	$PC^{k2}$ : هزینه متغیر لوله‌کشی و انتقال به‌ازای هرواحد مسافت و حجم هرنوع
$d_{ij}$ : فاصله کارخانه تولیدکننده $i$ ام با کارخانه مصرف‌کننده $j$	تبادل $k2$
$d_{p1j}$ : فاصله بازیابی $p1$ با مصرف (صنایع) $j$ ام	$VTC$ : هزینه متغیر حمل‌ونقل به‌ازای هرواحد مسافت برای انتقال $k3$
$d_{p2j}$ : فاصله بازیابی $p2$ با مصرف‌کننده (صنایع) $j$ ام	$C_{p1}^{k1}$ : هزینه متغیر بازسازی هرواحد ضایعات $k1$ در بازیابی $p1$
$d_{p3j}$ : فاصله بازیابی $p3$ با مصرف‌کننده (صنایع) $j$ ام	$C_{p2}^{k2}$ : هزینه متغیر بازسازی هرواحد ضایعات $k2$ در بازیابی $p2$

<p><math>C_{p3}^{k3}</math>: هزینه متغیر بازسازی هرواحد ضایعات <math>k3</math> در بازیابی <math>p3</math></p> <p><math>S_{m1}^{k1}(Fr)</math>: قیمت فروش هرواحد آب تازه <math>k1</math> در تامین کننده <math>m1</math></p> <p><math>S_{m2}^{k2}(Fr)</math>: قیمت فروش هرواحد انرژی طبیعی و دست اول <math>k2</math> توسط تامین کننده <math>m2</math></p> <p><math>S_{m3}^{k3}(Fr)</math>: قیمت فروش هرواحد جامدات دست اول <math>k3</math> در تامین کننده <math>m3</math></p> <p><math>E^{k1}(ww)</math>: هزینه متغیر پیش تصفیه و جریمه هرواحد ضایعات بلا استفاده <math>k1</math></p> <p><math>E^{k2}(ww)</math>: هزینه متغیر پیش تصفیه و جریمه هرواحد ضایعات بلا استفاده <math>k2</math></p> <p><math>E^{k3}(ww)</math>: هزینه متغیر پیش تصفیه و جریمه هرواحد ضایعات بلا استفاده <math>k3</math></p> <p><math>we(jc)</math>: وزن تعداد کل مشاغل ایجاد شده در مراکز بازیابی</p> <p><math>we(wd)</math>: وزن تعداد کل روزهای جبران شده در صورت بازیابی</p> <p><math>AE1^{k1}</math>: حدمجاز تولید ضایعات <math>k1</math> در شهرک</p> <p><math>AE2^{k2}</math>: حدمجاز تولید ضایعات <math>k2</math> در شهرک</p> <p><math>AE3^{k3}</math>: حدمجاز تولید ضایعات <math>k3</math> در شهرک</p> <p><math>AF1^{k1}</math>: حدمجاز مصرف مواد اولیه دست اول <math>k1</math> در شهرک</p> <p><math>AF2^{k2}</math>: حدمجاز مصرف مواد اولیه دست اول <math>k2</math> در شهرک</p> <p><math>AF3^{k3}</math>: حدمجاز مصرف مواد اولیه دست اول <math>k3</math> در شهرک</p> <p><math>D_j^{k1}(in)</math>: تقاضای کارخانه <math>k1</math> از ماده اولیه <math>k1</math></p> <p><math>D_j^{k2}(in)</math>: تقاضای کارخانه <math>k2</math> از ماده اولیه <math>k2</math></p> <p><math>D_j^{k3}(in)</math>: تقاضای کارخانه <math>k3</math> از ماده اولیه <math>k3</math></p> <p><math>\theta_1</math>: حداکثر فاصله مجاز برای انتقال <math>k1</math></p> <p><math>\theta_2</math>: حداکثر فاصله مجاز برای انتقال <math>k2</math></p> <p><math>W_j^{k1}(out)</math>: حجم ضایعات خروجی کارخانه <math>k1</math> نوع <math>k1</math></p> <p><math>W_j^{k2}(out)</math>: حجم ضایعات خروجی کارخانه <math>k2</math> نوع <math>k2</math></p> <p><math>W_j^{k3}(out)</math>: حجم ضایعات خروجی کارخانه <math>k3</math> نوع <math>k3</math></p> <p><math>Q_{m1}^{k1}(out)</math>: کیفیت خروجی از تامین کننده <math>m1</math> نوع <math>k1</math></p> <p><math>Q_{m2}^{k2}(out)</math>: کیفیت خروجی از تامین کننده <math>m2</math> نوع <math>k2</math></p> <p><math>Q_{m3}^{k3}(out)</math>: کیفیت خروجی از تامین کننده <math>m3</math> نوع <math>k3</math></p> <p><math>\alpha_1^{k1}</math>: حدمجاز مصرف ضایعات <math>k1</math> در تولید محصولات کارخانه <math>j</math></p> <p><math>\alpha_2^{k2}</math>: حدمجاز مصرف ضایعات <math>k2</math> در تولید محصولات کارخانه <math>j</math></p> <p><math>\alpha_3^{k3}</math>: حدمجاز مصرف ضایعات <math>k3</math> در تولید محصولات کارخانه <math>j</math></p> <p><math>\beta</math>: ضریب بهره‌وری تبدیل ضایعات در مراکز بازیابی</p>	<p><math>d_{ip1}</math>: فاصله کارخانه تولیدکننده ضایعات <math>i</math> با بازیابی <math>p1</math></p> <p><math>d_{ip2}</math>: فاصله کارخانه تولیدکننده ضایعات <math>i</math> با بازیابی <math>p2</math></p> <p><math>d_{ip3}</math>: فاصله کارخانه تولیدکننده ضایعات <math>i</math> با بازیابی <math>p3</math></p> <p><math>d_{it1}</math>: فاصله کارخانه تولیدکننده ضایعات <math>i</math> با مراکز دفع <math>t1</math></p> <p><math>d_{it2}</math>: فاصله کارخانه تولیدکننده ضایعات <math>i</math> با دفع <math>t2</math></p> <p><math>d_{it3}</math>: فاصله کارخانه تولیدکننده ضایعات <math>i</math> با دفع <math>t3</math></p> <p><math>s_{cp1}</math>: هزینه ثابت احداث مراکز بازیابی بالقوه <math>p1</math></p> <p><math>s_{cp2}</math>: هزینه ثابت احداث مراکز بازیابی بالقوه <math>p2</math></p> <p><math>s_{cp3}</math>: هزینه ثابت احداث مراکز بازیابی بالقوه <math>p3</math></p> <p><math>PJ_{p1}</math>: تعداد مشاغل ایجاد شده در بازیابی <math>p1</math> در صورت احداث</p> <p><math>PJ_{p2}</math>: تعداد مشاغل ایجاد شده در بازیابی <math>p2</math> در صورت احداث</p> <p><math>PJ_{p3}</math>: تعداد مشاغل ایجاد شده در بازیابی <math>p3</math> در صورت احداث</p> <p><math>WDK1</math>: متوسط جبران تعداد روزهای از دست رفته به دلیل افزایش سطح سلامت محیط کار به ازای هرواحد حجم باز مصرف آب و فاضلاب</p> <p><math>WDK2</math>: متوسط جبران تعداد روزهای از دست رفته به دلیل افزایش سطح سلامت محیط کار به ازای هرواحد حجم باز مصرف انرژی</p> <p><math>WDK3</math>: متوسط جبران تعداد روزهای از دست رفته به دلیل افزایش سطح سلامت محیط کار به ازای هرواحد حجم باز مصرف پسماند جامد</p> <p><math>Cap_{p1}(max)</math>: حداکثر ظرفیت بازیابی <math>p1</math></p> <p><math>Cap_{p2}(max)</math>: حداکثر ظرفیت بازیابی <math>p2</math></p> <p><math>Cap_{p3}(max)</math>: حداکثر ظرفیت بازیابی <math>p3</math></p> <p><math>Cap_{p1}(min)</math>: حداقل ظرفیت پذیرش بازیابی <math>p1</math></p> <p><math>Cap_{p2}(min)</math>: حداقل ظرفیت پذیرش بازیابی <math>p2</math></p> <p><math>Cap_{p3}(min)</math>: حداقل ظرفیت پذیرش بازیابی <math>p3</math></p> <p><math>Q_i^{k1}(out)</math>: کیفیت ضایعات خروجی کارخانه <math>i</math> نوع <math>k1</math></p> <p><math>Q_i^{k2}(out)</math>: کیفیت ضایعات خروجی کارخانه <math>i</math> نوع <math>k2</math></p> <p><math>Q_i^{k3}(out)</math>: کیفیت ضایعات خروجی کارخانه <math>i</math> نوع <math>k3</math></p> <p><math>Q_j^{k2}(in)</math>: حداقل کیفیت مواد ورودی به کارخانه <math>j</math> نوع <math>k2</math></p> <p><math>Q_j^{k3}(in)</math>: حداقل کیفیت مواد ورودی به کارخانه <math>j</math> نوع <math>k3</math></p> <p><math>Q_{p1}^{k1}(out)</math>: کیفیت خروجی از مراکز بازیابی <math>p1</math> نوع <math>k1</math></p> <p><math>Q_{p2}^{k2}(out)</math>: کیفیت خروجی از مراکز بازیابی <math>p2</math> نوع <math>k2</math></p> <p><math>Q_{p3}^{k3}(out)</math>: کیفیت خروجی از مراکز بازیابی <math>p3</math> نوع <math>k3</math></p>
<p><b>متغیرهای تصمیم</b></p>	
<p><math>X_{m2j}^{k2}(Fr)</math>: متغیر باینری، اگر انتقال انرژی دست اول <math>k2</math> از <math>m2</math> به <math>j</math> صورت پذیرد ۱ و در غیر این صورت صفر</p> <p><math>X_{m3j}^{k3}(Fr)</math>: متغیر باینری، اگر انتقال جامد دست اول <math>k3</math> از <math>m3</math> به <math>j</math> صورت پذیرد ۱ و در غیر این صورت صفر</p> <p><math>X_{p1j}^{k1}(Rc)</math>: متغیر باینری، اگر انتقال مواد بازیابی <math>k1</math> از <math>p1</math> به <math>j</math> صورت پذیرد ۱ و در غیر این صورت صفر</p> <p><math>X_{p2j}^{k2}(Rc)</math>: متغیر باینری، اگر انتقال مواد بازیابی <math>k2</math> از <math>p2</math> به <math>j</math> صورت پذیرد ۱ و در غیر این صورت صفر</p> <p><math>X_{p3j}^{k3}(Rc)</math>: متغیر باینری، اگر انتقال مواد بازیابی <math>k3</math> از <math>p3</math> به <math>j</math> صورت پذیرد ۱</p>	<p><math>V_{m1j}^{k1}(Fr)</math>: حجم انتقال آب دست اول <math>k1</math> از <math>m1</math> به <math>j</math></p> <p><math>V_{m2j}^{k2}(Fr)</math>: حجم انتقال انرژی دست اول <math>k2</math> از <math>m2</math> به <math>j</math></p> <p><math>V_{m3j}^{k3}(Fr)</math>: حجم انتقال جامد دست اول <math>k3</math> از <math>m3</math> به <math>j</math></p> <p><math>V_{ij}^{k1}(Re)</math>: حجم انتقال مواد استفاده مجدد <math>k1</math> از <math>i</math> به <math>j</math></p> <p><math>V_{ij}^{k2}(Re)</math>: حجم انتقال مواد استفاده مجدد <math>k2</math> از <math>i</math> به <math>j</math></p> <p><math>V_{ij}^{k3}(Re)</math>: حجم انتقال مواد استفاده مجدد <math>k3</math> از <math>i</math> به <math>j</math></p> <p><math>V_{ip1}^{k1}(Rc)</math>: حجم انتقال ضایعات بازیابی <math>k1</math> از <math>i</math> به <math>p1</math></p> <p><math>V_{ip2}^{k2}(Rc)</math>: حجم انتقال ضایعات بازیابی <math>k2</math> از <math>i</math> به <math>p2</math></p> <p><math>V_{ip3}^{k3}(Rc)</math>: حجم انتقال ضایعات بازیابی <math>k3</math> از <math>i</math> به <math>p3</math></p>

و درغیراینصورت صفر	$V_{p1j}^{k1}(Rc)$ : حجم انتقال مواد بازیابی $k1$ از $p1$ به $j$
$X_{ij}^{k1}(Re)$ : متغیرباینری، اگر انتقال مواد استفاده‌مجدد $k1$ از $i$ به $j$ صورت‌پذیرد	$V_{p2j}^{k2}(Rc)$ : حجم انتقال مواد بازیابی $k2$ از $p2$ به $j$
۱ و درغیراینصورت صفر	$V_{p3j}^{k3}(Rc)$ : حجم انتقال مواد بازیابی $k3$ از $p3$ به $j$
$X_{ij}^{k2}(Re)$ : متغیرباینری، اگر انتقال مواد استفاده‌مجدد $k2$ از $i$ به $j$ صورت‌پذیرد	$V_{it1}^{k1}(ww)$ : حجم انتقال ضایعات بلااستفاده $k1$ از $i$ به $t1$
۱ و درغیراینصورت صفر	$V_{it2}^{k2}(ww)$ : حجم انتقال ضایعات بلااستفاده $k2$ از $i$ به $t2$
$X_{ij}^{k3}(Re)$ : متغیرباینری، اگر انتقال مواد استفاده‌مجدد $k3$ از $i$ به $j$ صورت‌پذیرد	$V_{it3}^{k3}(ww)$ : حجم انتقال ضایعات بلااستفاده $k3$ از $i$ به $t3$
۱ و درغیراینصورت صفر	$X_{m1j}^{k1}(Fr)$ : متغیرباینری، اگر انتقال آب‌تازه $k1$ از $m1$ به $j$ صورت‌پذیرد
$X_{it1}^{k1}(ww)$ : متغیرباینری، اگر انتقال ضایعات بلااستفاده $k1$ از $i$ به $t1$ صورت‌پذیرد	۱ و درغیراینصورت صفر
۱ و درغیراینصورت صفر	$Y_{p1}$ : متغیرباینری، اگر بازیابی $p1$ احداث‌گردد ۱ و درغیراینصورت صفر
$X_{it2}^{k2}(ww)$ : متغیرباینری، اگر انتقال ضایعات بلااستفاده $k2$ از $i$ به $t2$ صورت‌پذیرد	$Y_{p2}$ : متغیرباینری، اگر بازیابی $p2$ احداث‌گردد ۱ و درغیراینصورت صفر
۱ و درغیراینصورت صفر	$Y_{p3}$ : متغیرباینری، اگر بازیابی $p3$ احداث‌گردد ۱ و درغیراینصورت صفر
$X_{it3}^{k3}(ww)$ : متغیرباینری، اگر انتقال ضایعات بلااستفاده $k3$ از $i$ به $t3$ صورت‌پذیرد	$SW$ : امتیاز کل رفاه‌اجتماعی شهرک
۱ و درغیراینصورت صفر	
$X_{ip1}^{k1}(Rc)$ : متغیرباینری، اگر انتقال ضایعات قابل بازیابی $k1$ از $i$ به $p1$ صورت‌پذیرد	
۱ و درغیراینصورت صفر	
$X_{ip2}^{k2}(Rc)$ : متغیرباینری، اگر انتقال ضایعات قابل بازیابی $k2$ از $i$ به $p2$ صورت‌پذیرد	
۱ و درغیراینصورت صفر	
$X_{ip3}^{k3}(Rc)$ : متغیرباینری، اگر انتقال ضایعات قابل بازیابی $k3$ از $i$ به $p3$ صورت‌پذیرد	
۱ و درغیراینصورت صفر	
$TNC$ : هزینه کل اجرای شبکه و تامین مواد صنایع شهرک	

### توابع هدف

$$\begin{aligned} \text{Min } TNC = & TC_{\text{waste disposal}} + TC_{\text{structure}} + TC_{\text{supply materials}} + TC_{\text{vehicle}} \\ & + TC_{\text{operation}} + TC_{\text{piping and transfer}} \end{aligned} \quad (6)$$

هدف اول حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های شبکه ارائه شده است. مطابق معادله (۶)، این تابع شامل هزینه دفع ضایعات بدون استفاده در شبکه، ساخت مراکز بازیابی، تأمین بخشی از مواد اولیه که قابل تأمین از شبکه نیست، حمل و نقل مواد جامد، هزینه‌های عملیاتی روی هر واحد ضایعات قابل بازیابی و هزینه انتقال و لوله‌کشی مواد ضایعات حالت آب و انرژی است؛ به‌گونه‌ای که:

$$TC_{\text{Piping and transfer}} = \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m1=1}^{M1} \sum_{k1=1}^{K1} \sum_{j=1}^J d_{m1j} \times V_{m1j}^{k1}(Fr) \times PC^{K1} + \sum_{m2=1}^{M2} \sum_{k2=1}^{K2} \sum_{j=1}^J d_{m2j} \times V_{m2j}^{k2}(Fr) \times PC^{K2} \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k2=1}^{K2} \sum_{j=1}^J d_{ij} \times V_{ij}^{k2}(Re) \times PC^{K2} + \sum_{i=1}^I \sum_{k1=1}^{K1} \sum_{j=1}^J d_{ij} \times V_{ij}^{k1}(Re) \times PC^{K1} \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k2=1}^{K2} \sum_{p2=1}^{P2} d_{ip2} \times V_{ip2}^{k2}(Rc) \times PC^{K2} + \sum_{i=1}^I \sum_{k1=1}^{K1} \sum_{p1=1}^{P1} d_{ip1} \times V_{ip1}^{k1}(Rc) \times PC^{K1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{p2=1}^{P2} \sum_{k2=1}^{K2} \sum_{j=1}^J d_{p2j} \times V_{p2j}^{k2}(Rc) \times PC^{K2} + \sum_{p1=1}^{P1} \sum_{k1=1}^{k1} \sum_{j=1}^J d_{p1j} \times V_{p1j}^{k1}(Rc) \times PC^{K1} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{k2=1}^{k2} \sum_{t2=1}^{T2} d_{it2} \times V_{it2}^{k2}(ww) \times PC^{K2} + \sum_{i=1}^I \sum_{k1=1}^{k1} \sum_{t1=1}^{T1} d_{it1} \times V_{it1}^{k1}(ww) \times PC^{K1}
 \end{aligned}$$

$$TC_{Structure} = \sum_{p1=1}^{P1} \sum_{p2=1}^{P2} \sum_{p3=1}^{P3} y_{p1} \times sc_{p1} + y_{p2} \times sc_{p2} + y_{p3} \times sc_{p3} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 TC_{Waste\ disposal} & \quad (9) \\
 & = \sum_{\substack{k1 \\ K2}}^{K1} \sum_{\substack{i \\ I}}^I \sum_{\substack{t1 \\ T2}}^{T1} V_{it1}^{k1}(ww) \times E^{k1}(ww) \\
 & + \sum_{\substack{k2 \\ K3}}^{K2} \sum_{\substack{i \\ I}}^I \sum_{\substack{t2 \\ T3}}^{T2} V_{it2}^{k2}(ww) \times E^{k2}(ww) \\
 & + \sum_{\substack{k3 \\ I}}^{K3} \sum_{\substack{i \\ I}}^I \sum_{\substack{t3 \\ T3}}^{T3} V_{it3}^{k3}(ww) \times E^{k3}(ww)
 \end{aligned}$$

$$TC_{Supply\ materials} = \sum_{m1}^{M1} \sum_{k1}^{K1} \sum_j^J V_{m1j}^{k1}(Fr) \times S_{m1}^{k1}(Fr) + \sum_{m2}^{M2} \sum_{k2}^{K2} \sum_i^I V_{m2j}^{k2}(Fr) \times S_{m2}^{k2}(Fr) + \sum_{m3}^{M3} \sum_{k3}^{K3} \sum_i^I V_{m3j}^{k3}(Fr) \times S_{m3}^{k3}(Fr) \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 TC_{Operation} & = \sum_{i=1}^I \sum_{k1=1}^{k1} \sum_{p1=1}^{P1} V_{ip1}^{k1}(Rc) \times C_{p1}^{k1} + \sum_{i=1}^I \sum_{k2=1}^{k2} \sum_{p2=1}^{P2} V_{ip2}^{k2}(Rc) \times C_{p2}^{k2} \\
 & + \sum_{i=1}^I \sum_{k3=1}^{k3} \sum_{p3=1}^{P3} V_{ip3}^{k3}(Rc) \times C_{p3}^{k3}
 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 TC_{vehicle} & = \left[ \sum_{m3=1}^{M3} \sum_{k3=1}^{K3} \sum_{j=1}^J d_{m3j} \times X_{m3j}^{k3}(Fr) + \sum_{i=1}^I \sum_{k3=1}^{k3} \sum_{p3=1}^{P3} d_{ip3} \times X_{ip3}^{k3}(Rc) \right. \\
 & + \sum_{p3=1}^{P3} \sum_{k3=1}^{K3} \sum_{j=1}^J d_{p3j} \times X_{p3j}^{k3}(Rc) \\
 & \left. + \sum_{i=1}^I \sum_{k3=1}^{K3} \sum_{j=1}^J d_{ij} \times X_{ij}^{k3}(Re) + \sum_{i=1}^I \sum_{k3=1}^{k3} \sum_{t3=1}^{T3} d_{it3} \times X_{it3}^{k3}(ww) \right] \times VTC \quad (12)
 \end{aligned}$$

در رابطه (۷)، هزینه‌های انتقال مواد اولیه و ضایعات آب و گاز لحاظ شده است که تابعی از مسافت است. این هزینه‌ها شامل لوله‌کشی، نیروهای لازم برای انتقال سیالات مانند پمپاژ و فشار است. هزینه‌های احداث هر یک از مراکز بازیابی در معادله (۸) ارائه شده است. معادله (۹) و (۱۰) به ترتیب، هزینه‌های دفع ضایعات استفاده‌ناشدنی در

شبکه و تأمین مواد اولیه تأمین ناشدنی از شبکه (دست‌اول) را در نظر گرفته است. رابطه (۱۱) هزینه‌های بازسازی هر واحد ضایعات در مراکز بازیابی و رابطه (۱۲) هزینه حمل و نقل حالت جامد را ارائه کرده است.

$$\begin{aligned}
 \max Sw = & we(wd) \times [WDK1 \\
 & \times \left( \sum_i^I \sum_j^J \sum_{k1}^{K1} V_{ij}^{k1}(Re) + \sum_{p1}^{P1} \sum_j^J \sum_{k1}^{K1} V_{p1j}^{k1}(Rc) \right) + WDK2 \\
 & \times \left( \sum_i^I \sum_j^J \sum_{k2}^{K2} V_{ij}^{k2}(Re) + \sum_{p2}^{P2} \sum_j^J \sum_{k2}^{K2} V_{p2j}^{k2}(Rc) \right) + WDK3 \\
 & \times \left( \sum_i^I \sum_j^J \sum_{k3}^{K3} V_{ij}^{k3}(Re) + \sum_{p3}^{P3} \sum_j^J \sum_{k3}^{K3} V_{p3j}^{k3}(Rc) \right) ] + we(jc) \times \\
 & \left[ \sum_{p1}^{P1} y_{p1} \times PJ_{p1} + \sum_{p2}^{P2} y_{p2} \times PJ_{p2} + \sum_{p3}^{P3} y_{p3} \times PJ_{p3} \right]
 \end{aligned} \tag{13}$$

تابع هدف دوم مطابق رابطه (۱۳) همسو با حداکثرسازی رفاه اجتماعی ارائه شده است. پارامتر  $WDK3, WDK2, WDK1$  به مفهوم مجموع تعداد روزهای سالانه‌ای است که به‌واسطه استفاده مجدد از ضایعات و کاهش آلاینده‌های ناشی از آنها، از میزان غیبت کارکنان یا کاهش راندمان کاری کاسته، به عبارتی، این روزها جبران می‌شود. بر همین اساس، بخش اول این رابطه، معرف جبران روزهای کاری ازدست‌رفته است و با توجه به میزان این پارامتر و وزن  $we(wd)$ ، همسو با افزایش حجم ضایعات استفاده مجدد یا بازیابی شده اقدام می‌کند. بخش دوم این تابع، ایجاد اشتغال به‌واسطه احداث مراکز بازیابی را نشان داده است.

$we(jc)$  به مفهوم اهمیت اشتغال‌زایی و  $we(wd)$  اهمیت جبران روزهای کاری ازدست‌رفته در منطقه است که کارشناسان خبره بر مبنای شرایط منطقه تعیین می‌کنند. در این مطالعه، مقادیر روزهای کاری جبران‌شده و وزن‌های مذکور در جلسه با مدیران شرکت شهرک‌های صنعتی استان البرز تعیین شده است.

#### محدودیت‌های مدل

• محدودیت انتشار مجاز مجموع ضایعات خروجی از صنایع شهرک، مطابق روابط (۱۴) تا (۱۶) است که تابعی از کاهش ضایعات بدون استفاده است.

$$\sum_i^I \sum_{t1}^{T1} V_{it1}^{k1}(ww) \leq AE1^{k1} \quad \forall k1 \tag{14}$$

$$\sum_i^I \sum_{t2}^{T2} V_{it2}^{k2}(ww) \leq AE2^{k2} \quad \forall k2 \tag{15}$$

$$\sum_i^I \sum_{t3}^{T3} V_{it3}^{k3}(ww) \leq AE3^{k3} \quad \forall k3 \tag{16}$$

• محدودیت حداکثر مصرف مجاز مجموع مواد اولیه دست اول در صنایع شهرک، مطابق روابط (۱۷) تا (۱۹) که برای کنترل بعد محیط زیستی توسعه پایدار لحاظ شده است.

$$\sum_{m1}^{M1} \sum_j^J V_{m1j}^{k1}(Fr) \leq AF1^{k1} \quad \forall k1 \quad (17)$$

$$\sum_{m2}^{M2} \sum_j^J V_{m2j}^{k2}(Fr) \leq AF2^{k2} \quad \forall k2 \quad (18)$$

$$\sum_{m3}^{M3} \sum_j^J V_{m3j}^{k3}(Fr) \leq AF3^{k3} \quad \forall k3 \quad (19)$$

• محدودیت تراز حجم خروجی از بازیابی  $p1$ ،  $p2$  و  $p3$  مطابق روابط (۲۰) تا (۲۲)

$$\sum_j^J \sum_{k1}^{K1} V_{p1j}^{k1}(Rc) \leq \beta \times \sum_i^I \sum_{k1}^{K1} V_{ip1}^{k1}(Rc) \quad \forall p1 \quad (20)$$

$$\sum_j^J \sum_{k2}^{K2} V_{p2j}^{k2}(Rc) \leq \beta \times \sum_i^I \sum_{k2}^{K2} V_{ip2}^{k2}(Rc) \quad \forall p2 \quad (21)$$

$$\sum_j^J \sum_{k3}^{K3} V_{p3j}^{k3}(Rc) \leq \beta \times \sum_i^I \sum_{k3}^{K3} V_{ip3}^{k3}(Rc) \quad \forall p3 \quad (22)$$

• محدودیت ظرفیت مراکز بازیابی  $p1$ ،  $p2$  و  $p3$  مطابق روابط (۲۳) تا (۲۵).

$$\sum_i^I \sum_{k1}^{K1} V_{ip1}^{k1}(Rc) \leq Cap_{p1}(\max) \times y_{p1} \quad \forall p1 \quad (23)$$

$$\sum_i^I \sum_{k2}^{K2} V_{ip2}^{k2}(Rc) \leq Cap_{p2}(\max) \times y_{p2} \quad \forall p2 \quad (24)$$

$$\sum_i^I \sum_{k3}^{K3} V_{ip3}^{k3}(Rc) \leq Cap_{p3}(\max) \times y_{p3} \quad \forall p3 \quad (25)$$

• محدودیت کنترل حجم و جهت جریان انتقالات مطابق روابط (۲۶) تا (۲۸).

$$Cap_{p1}(\min) \times X_{ip1}^{k1}(Rc) \leq V_{ip1}^{k1}(Rc) \leq Cap_{p1}(\max) \times X_{ip1}^{k1}(Rc) \quad \forall i, p1, k1 \quad (26)$$

$$Cap_{p2}(\min) \times X_{ip2}^{k2}(Rc) \leq V_{ip2}^{k2}(Rc) \leq Cap_{p2}(\max) \times X_{ip2}^{k2}(Rc) \quad \forall i, p2, k2 \quad (27)$$

$$Cap_{p3}(\min) \times X_{ip3}^{k3}(Rc) \leq V_{ip3}^{k3}(Rc) \leq Cap_{p3}(\max) \times X_{ip3}^{k3}(Rc) \quad \forall i, p3, k3 \quad (28)$$

$$X_{ip1}^{k1}(Rc) \leq y_{p1} \quad \forall i, p1, k1 \quad (29)$$

$$X_{ip2}^{k2}(Rc) \leq y_{p2} \quad \forall i, p2, k2 \quad (30)$$

$$X_{ip3}^{k3}(Rc) \leq y_{p3} \quad \forall i, p3, k3 \quad (31)$$

$$V_{ij}^{k1}(Re) \leq D_j^{k1}(in) \times X_{ij}^{k1}(Re) \quad \forall i, j, k1 \quad (32)$$

$$V_{ij}^{k2}(Re) \leq D_j^{k2}(in) \times X_{ij}^{k2}(Re) \quad \forall i, j, k2 \quad (33)$$

$$V_{ij}^{k3}(Re) \leq D_j^{k3}(in) \times X_{ij}^{k3}(Re) \quad \forall i, j, k3 \quad (34)$$

$$X_{ij}^{k1}(Re) \leq V_{ij}^{k1}(Re) \quad \forall i, j, k1 \quad (35)$$

$$X_{ij}^{k2}(Re) \leq V_{ij}^{k2}(Re) \quad \forall i, j, k2 \quad (36)$$

$$X_{ij}^{k3}(Re) \leq V_{ij}^{k3}(Re) \quad \forall i, j, k3 \quad (37)$$

$$V_{p1j}^{k1}(Rc) \leq D_j^{k1}(in) \times X_{p1j}^{k1}(Rc) \quad \forall p1, j, k1 \quad (38)$$

$$V_{p2j}^{k2}(Rc) \leq D_j^{k2}(in) \times X_{p2j}^{k2}(Rc) \quad \forall p2, j, k2 \quad (39)$$

$$V_{p3j}^{k3}(Rc) \leq D_j^{k3}(in) \times X_{p3j}^{k3}(Rc) \quad \forall p3, j, k3 \quad (40)$$

$$X_{p1j}^{k1}(Rc) \leq V_{p1j}^{k1}(Rc) \quad \forall p1, j, k1 \quad (41)$$

$$X_{p2j}^{k2}(Rc) \leq V_{p2j}^{k2}(Rc) \quad \forall p2, j, k2 \quad (42)$$

$$X_{p3j}^{k3}(Rc) \leq V_{p3j}^{k3}(Rc) \quad \forall p3, j, k3 \quad (43)$$

$$V_{it1}^{k1}(ww) \leq AE1^{k1} \times X_{it1}^{k1}(ww) \quad \forall t1, i, k1 \quad (44)$$

$$V_{it2}^{k2}(ww) \leq AE2^{k2} \times X_{it2}^{k2}(ww) \quad \forall t2, i, k2 \quad (45)$$

$$V_{it3}^{k3}(ww) \leq AE3^{k3} \times X_{it3}^{k3}(ww) \quad \forall t3, i, k3 \quad (46)$$

$$X_{it1}^{k1}(ww) \leq V_{it1}^{k1}(ww) \quad \forall t1, i, k1 \quad (47)$$

$$X_{it2}^{k2}(ww) \leq V_{it2}^{k2}(ww) \quad \forall t2, i, k2 \quad (48)$$

$$X_{it3}^{k3}(ww) \leq V_{it3}^{k3}(ww) \quad \forall t3, i, k3 \quad (49)$$

$$V_{m1j}^{k1}(Fr) \leq D_j^{k1}(in) \times X_{m1j}^{k1}(Fr) \quad \forall m1, j, k1 \quad (50)$$

$$V_{m2j}^{k2}(Fr) \leq D_j^{k2}(in) \times X_{m2j}^{k2}(Fr) \quad \forall m2, j, k2 \quad (51)$$

$$V_{m3j}^{k3}(Fr) \leq D_j^{k3}(in) \times X_{m3j}^{k3}(Fr) \quad \forall m3, j, k3 \quad (52)$$

$$X_{m1j}^{k1}(Fr) \leq V_{m1j}^{k1}(Fr) \quad \forall m1, j, k1 \quad (53)$$

$$X_{m2j}^{k2}(Fr) \leq V_{m2j}^{k2}(Fr) \quad \forall m2, j, k2 \quad (54)$$

$$X_{m3j}^{k3}(Fr) \leq V_{m3j}^{k3}(Fr) \quad \forall m3, j, k3 \quad (55)$$

- محدودیت منع رابطه یک کارخانه با خودش مطابق روابط (۵۶) با (۵۸) براساس فرض شماره ۲.

$$X_{ij}^{k1}(Re) = 0 \quad \forall i = j, k1 \quad (56)$$

$$X_{ij}^{k2}(Re) = 0 \quad \forall i = j, k2 \quad (57)$$

$$X_{ij}^{k3}(Re) = 0 \quad \forall i = j, k3 \quad (58)$$

- محدودیت بیشترین فاصله مجاز در انتقال حالت آب و انرژی به علت جلوگیری از حوادث و نشت آلاینده در مسیر که در روابط (۵۹) تا (۶۴) ارائه شده است. براساس این محدودیت، امکان اتصال بین دو کارخانه یا کارخانه با مراکز بازیابی در صورتی میسر است که فاصله آنها کمتر یا مساوی حداکثر مجاز  $\theta_1$  و  $\theta_2$  باشد.

$$[(d_{ij} - \theta_1) \times X_{ij}^{k1}(Re)] \leq 0 \quad \forall i, j, k1 \quad (59)$$

$$[(d_{ij} - \theta_2) \times X_{ij}^{k2}(Re)] \leq 0 \quad \forall i, j, k2 \quad (60)$$

$$[(d_{ip1} - \theta_1) \times X_{ip1}^{k1}(Rc)] \leq 0 \quad \forall i, p1, k1 \quad (61)$$

$$[(d_{ip2} - \theta_2) \times X_{ip2}^{k2}(Rc)] \leq 0 \quad \forall i, p2, k2 \quad (62)$$

$$[(d_{p1j} - \theta_1) \times X_{p1j}^{k1}(Rc)] \leq 0 \quad \forall j, p1, k1 \quad (63)$$

$$[(d_{p2j} - \theta_2) \times X_{p2j}^{k2}(Rc)] \leq 0 \quad \forall j, p2, k2 \quad (64)$$

- محدودیت بیشترین فاصله مجاز در انتقال حالت آب و انرژی به علت جلوگیری از حوادث و نشت آلاینده در مسیر که در روابط (۵۹) تا (۶۴) ارائه شده است. براساس این محدودیت، امکان اتصال بین دو کارخانه یا کارخانه با مراکز بازیابی در صورتی میسر است که فاصله آنها کمتر یا مساوی حداکثر مجاز  $\theta_1$  و  $\theta_2$  باشد. (نکته: در صورت نبود فرض ۳، لازم بود برای پارامتر فاصله، اندیس  $k1$ ،  $k2$  و  $k3$  در نظر گرفته می شد).

- محدودیت تراز ضایعات خروجی از کارخانه‌ها براساس روابط (۶۵) تا (۶۷).

$$W_i^{k1}(out) \geq \left[ \sum_{j=1}^J V_{ij}^{k1}(Re) + \sum_{p1=1}^{P1} V_{ip1}^{k1}(Rc) + \sum_{t1=1}^{T1} V_{it1}^{k1}(ww) \right] \forall i, k1 \quad (65)$$

$$W_i^{k2}(out) \geq \left[ \sum_{j=1}^J V_{ij}^{k2}(Re) + \sum_{p2=1}^{P2} V_{ip2}^{k2}(Rc) + \sum_{t2=1}^{T2} V_{it2}^{k2}(ww) \right] \forall i, k2 \quad (66)$$

$$W_i^{k3}(out) \geq \left[ \sum_{j=1}^J V_{ij}^{k3}(Re) + \sum_{p3=1}^{P3} V_{ip3}^{k3}(Rc) + \sum_{t3=1}^{T3} V_{it3}^{k3}(ww) \right] \forall i, k3 \quad (67)$$



- محدودیت تأمین کیفیت مورد نیاز هر کارخانه براساس روابط (۶۸) تا (۷۶).

$$Q_j^{k1}(in) \times X_{ij}^{k1}(Re) \leq Q_i^{k1}(out) \quad \forall i, j, k1 \quad (68)$$

$$Q_j^{k2}(in) \times X_{ij}^{k2}(Re) \leq Q_i^{k2}(out) \quad \forall i, j, k2 \quad (69)$$

$$Q_j^{k3}(in) \times X_{ij}^{k3}(Re) \leq Q_i^{k3}(out) \quad \forall i, j, k3 \quad (70)$$

$$Q_j^{k1}(in) \times X_{p1j}^{k1}(Rc) \leq Q_{p1}^{k1}(out) \quad \forall p1, j, k1 \quad (71)$$

$$Q_j^{k2}(in) \times X_{p2j}^{k2}(Rc) \leq Q_{p2}^{k2}(out) \quad \forall p2, j, k2 \quad (72)$$

$$Q_j^{k3}(in) \times X_{p3j}^{k3}(Rc) \leq Q_{p3}^{k3}(out) \quad \forall p3, j, k3 \quad (73)$$

$$Q_j^{k1}(in) \times X_{m1j}^{k1}(Fr) \leq Q_{m1}^{k1}(out) \quad \forall m1, j, k1 \quad (74)$$

$$Q_j^{k2}(in) \times X_{m2j}^{k2}(Fr) \leq Q_{m2}^{k2}(out) \quad \forall m2, j, k2 \quad (75)$$

$$Q_j^{k2}(in) \times X_{m3j}^{k1}(Fr) \leq Q_{m3}^{k3}(out) \quad \forall m3, j, k3 \quad (76)$$

(نکته: اگر فرض ۴ نبود، لازم بود مقدار افت کیفی به‌ازای هر واحد مسافت به‌صورت حاصل ضرب  $\square$  مسافت در دلتا (افت کیفیت)، از سمت راست محدودیت کسر شود).

- محدودیت تأمین تقاضای کارخانه‌ها براساس روابط (۷۷) تا (۷۹).

$$D_j^{k1}(in) \leq \sum_{i=1}^I V_{ij}^{k1}(Re) + \sum_{p1=1}^{P1} V_{p1j}^{k1}(Rc) + \sum_{m1=1}^{M1} V_{m1j}^{k1}(Fr) \quad \forall j, k1 \quad (77)$$

$$D_j^{k2}(in) \leq \sum_{i=1}^I V_{ij}^{k2}(Re) + \sum_{p2=1}^{P2} V_{p2j}^{k2}(Rc) + \sum_{m2=1}^{M2} V_{m2j}^{k2}(Fr) \quad \forall j, k2 \quad (78)$$

$$D_j^{k3}(in) \leq \sum_{i=1}^I V_{ij}^{k3}(Re) + \sum_{p=1}^{P3} V_{p3j}^{k3}(Rc) + \sum_{m3=1}^{M3} V_{m3j}^{k3}(Fr) \quad \forall j, k3 \quad (79)$$

(نکته: در صورت برقرارنشدن فرض یک، باید موجودی اطمینان برای تأمین تقاضای دریافت‌کنندگان متصل به کارخانه‌های فصلی در نظر گرفته شود تا نیاز آنها در فصول تعطیل یا تغییر خروجی تأمین شود).

- محدودیت حد مجاز مصرف ضایعات در تولید براساس (۸۰) تا (۸۲)

$$\sum_{i=1}^I V_{ij}^{k1}(Re) + \sum_{p1=1}^P V_{p1j}^{k1}(Rc) \leq \alpha 1_j^{k1} \times D_j^{k1}(in) \quad \forall j, k1 \quad (80)$$

$$\sum_{i=1}^I V_{ij}^{k2}(Re) + \sum_{p2=1}^P V_{p2j}^{k2}(Rc) \leq \alpha 2_j^{k2} \times D_j^{k2}(in) \quad \forall j, k2 \quad (81)$$

$$\sum_{i=1}^I V_{ij}^{k3}(Re) + \sum_{p3=1}^P V_{p3j}^{k3}(Rc) \leq \alpha 3_j^{k3} \times D_j^{k3}(in) \quad \forall j, k3 \quad (82)$$

• محدودیت عمومی مدل در روابط (۸۳) تا (۱۱۷)

$$V_{m1j}^{k1}(Fr) \geq 0 \quad \forall j, k1, m1 \quad (83) \quad X_{m1j}^{k1}(Fr) \in \{0,1\} \quad \forall j, k1, m1 \quad (84)$$

$$V_{m2j}^{k2}(Fr) \geq 0 \quad \forall j, k2, m2 \quad (85) \quad X_{m2j}^{k2}(Fr) \in \{0,1\} \quad \forall j, k2, m2 \quad (86)$$

$$V_{m3j}^{k3}(Fr) \geq 0 \quad \forall j, k3, m3 \quad (87) \quad X_{m3j}^{k3}(Fr) \in \{0,1\} \quad \forall j, k3, m3 \quad (88)$$

$$V_{p1j}^{k1}(Rc) \geq 0 \quad \forall j, p1, k1 \quad (89) \quad X_{p1j}^{k1}(Rc) \in \{0,1\} \quad \forall j, p1, k1 \quad (90)$$

$$V_{p2j}^{k2}(Rc) \geq 0 \quad \forall j, p2, k2 \quad (91) \quad X_{p2j}^{k2}(Rc) \in \{0,1\} \quad \forall j, p2, k2 \quad (92)$$

$$V_{p3j}^{k3}(Rc) \geq 0 \quad \forall j, p3, k3 \quad (93) \quad X_{p3j}^{k3}(Rc) \in \{0,1\} \quad \forall j, p3, k3 \quad (94)$$

$$V_{ij}^{k1}(Re) \geq 0 \quad \forall j, i, k1 \quad (95) \quad X_{ij}^{k1}(Re) \in \{0,1\} \quad \forall j, i, k1 \quad (96)$$

$$V_{ij}^{k2}(Re) \geq 0 \quad \forall j, i, k2 \quad (97) \quad X_{ij}^{k2}(Re) \in \{0,1\} \quad \forall j, i, k2 \quad (98)$$

$$V_{ij}^{k3}(Re) \geq 0 \quad \forall j, i, k3 \quad (99) \quad X_{ij}^{k3}(Re) \in \{0,1\} \quad \forall j, i, k3 \quad (100)$$

$$V_{it1}^{k1}(ww) \geq 0 \quad \forall t1, i, k1 \quad (101) \quad X_{it1}^{k1}(ww) \in \{0,1\} \quad \forall t1, i, k1 \quad (102)$$

$$V_{it2}^{k2}(ww) \geq 0 \quad \forall t2, i, k2 \quad (103) \quad X_{it2}^{k2}(ww) \in \{0,1\} \quad \forall t2, i, k2 \quad (104)$$

$$V_{it3}^{k3}(ww) \geq 0 \quad \forall t3, i, k3 \quad (105) \quad X_{it3}^{k3}(ww) \in \{0,1\} \quad \forall t3, i, k3 \quad (106)$$

$$V_{ip1}^{k1}(Rc) \geq 0 \quad \forall p1, i, k1 \quad (107) \quad X_{ip1}^{k1}(Rc) \in \{0,1\} \quad \forall p1, i, k1 \quad (108)$$

$$V_{ip2}^{k2}(Rc) \geq 0 \quad \forall p2, i, k2 \quad (109) \quad X_{ip2}^{k2}(Rc) \in \{0,1\} \quad \forall p2, i, k2 \quad (110)$$

$$V_{ip3}^{k3}(Rc) \geq 0 \quad \forall p3, i, k3 \quad (111) \quad X_{ip3}^{k3}(Rc) \in \{0,1\} \quad \forall p3, i, k3 \quad (112)$$

$$TNC \geq 0 \quad (113) \quad y_{p1} \in \{0,1\} \quad (114)$$

$$SW \geq 0 \quad (115) \quad y_{p2} \in \{0,1\} \quad (116)$$

$$y_{p3} \in \{0,1\} \quad (117)$$

#### ۴- مطالعه کاربردی

براساس اعتبارسنجی مدل پیشنهادی برای پیاده‌سازی آن بر شهرک صنعتی نظرآباد در استان البرز اقدام شده است. بیشتر صنایع شهرک، غذایی است و صنایع دیگری از جمله داروسازی، شیمیایی و سلولزی نیز وجود دارد. هفت صنعت به‌عنوان نمونه آماری در نظر گرفته شده است که فهرست آنها به همراه اندیس‌های i و j در جدول شماره ۳ آمده است. بخش کشاورزی و دامی مجاور شهرک نیز به‌عنوان یکی از مصرف‌کننده‌های ضایعات صنعتی در این مطالعه در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- فهرست صنایع منتخب در مطالعه موردی

صنعت	(مبدأ ضایعات) i	(مقصد ضایعات) j
بتن و سیمان	۱	۱
نیروگاه محلی	۲	۲
کیک و شکلات	۳	۳
لبنیات	۴	۴
نوشیدنی گازدار	۵	۵
نساجی و رنگرزی	۶	۶
کشاورزی و دام	۷	۷

سطوح در نظر گرفته شده هر یک از حالات آب، انرژی و جامد در جدول شماره ۴ تشریح شده است.

جدول ۴- سطوح کیفیتی ورودی و خروجی صنایع مورد مطالعه موردی

k1							
سطوح	آب/فاضلاب	آب/فاضلاب	آب/فاضلاب	آب/فاضلاب			
اندیس	۴	۳	۲	۱			
k2							
سطوح	دی‌اکسید کربن	نیترژن					
اندیس	۱	۲	۳				
k3							
سطوح	پسماند پنییر	آب پنییر	ملاس	خمیرمایه	ویناس	پلاستیک	پارچه
اندیس	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷

تعداد هر یک از تأمین‌کنندگان مواد اولیه دست اول در این مطالعه، دو مکان در خارج از شهرک و تعداد مراکز بالقوه بازیابی نیز دو مکان داخل شهرک در نظر گرفته شده است. یک مکان نیز به‌عنوان مرکز دفع هر یک از حالات ضایعات خروجی لحاظ شده است. متوسط حجم تقاضا، ضایعات خروجی، سطوح کیفیت آنها در صنایع مورد مطالعه در جدول‌های شماره ۵ تا ۷، فواصل در جدول شماره ۸ و سایر پارامترها در جدول شماره ۹ نشان داده شده است.

جدول ۵- حجم و کیفیت تقاضا و ضایعات خروجی حالت آب و فاضلاب

۴	۳				۱		۱	k1 ورودی
	۴	۱	۱	۳	۴	۳	۴	k1 خروجی
۷	۶	۵	۴	۳	۲		۱	صنعت حجم و کیفیت
۱۲۰	۶۰۰				۹۰۰		۸۰۰	حجم تقاضا (kg/year)
۲۹۰	۳۱۰				۴۰۰		۳۵۵	کیفیت تقاضا
	۶۰۰	۱۸۰۰	۳۰۰	۲۸۰	۲۵۰	۶۰۰	۲۰۰	حجم ضایعات (kg/year)
	۲۰۰	۴۱۰	۲۰۵	۲۵۵	۲۵۰	۲۸۰	۲۱۰	کیفیت ضایعات

جدول ۶- حجم و کیفیت تقاضا و ضایعات خروجی حالت انرژی

		۲		۳	۲		۱	k2 ورودی	
		۲	۳	۲	۱	۳	۱	۲	
۷	۶	۵	۴	۳		۲		۱	صنعت حجم و کیفیت
		۱۲۷/۵		۶۰	۱۰۰			۱۰۰	حجم تقاضا (kg/year)
		۶۰		۷۰	۶۰			۳۸۶	کیفیت تقاضا
		۸۵	۲۵	۴۰	۴۰	۷۵	۱۲۰	۱۰۰	حجم ضایعات (kg/year)
		۷۱	۶۰	۵۰	۳۷۰	۷۵	۳۹۰	۶۰	کیفیت ضایعات

جدول ۷- حجم و کیفیت تقاضا و ضایعات خروجی حالت جامد

۵	۱	۷	۶	۴	۳	۶	۷	۴	۲	۷		k3 ورودی
		۷	۶	۵	۶	۱	۴	۳	۲			k3 خروجی
۷	۶	۵			۴	۳			۲	۱		صنعت حجم و کیفیت
۲۰	۲۰	۱۳۰	۶۰	۱۵	۴۳	۶۵	۱۰	۷۰	۶۰	۸		حجم تقاضا (kg/year)
۱۰	۳۰	۲۰	۹۰	۱۰	۲۰	۹۰	۲۰	۲۰	۲۰	۵		کیفیت تقاضا
		۲۷	۲۰	۲۵	۱۰	۵۰	۱۹	۵۰	۱۰			حجم ضایعات (kg/year)
		۲۵	۶۰	۳۰	۵۰	۳۰	۲۰	۲۵	۴۰			کیفیت ضایعات

جدول ۸- فاصله صنایع با یکدیگر و با مراکز بازاریابی، دفع و تأمین کنندگان

	$d_{ij}$							$d_{p1j}$		$d_{p2j}$		$d_{p3j}$	
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۱	۲	۱	۲	۱	۲
۱	۰	۲۰	۱۰۰	۴۰	۳۰	۱۲۰	۱۲۰	۲۱۰	۱۶۰	۲۴۰	۳۰	۱۵۰	۹۰
۲		۰	۸۰	۴۰	۶۰	۱۰	۱۱۰	۷۰	۱۳۰	۸۰	۳۰	۱۳۰	۱۴۰
۳			۰	۲۰	۲۰	۴۰	۶۰	۲۴۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۴۰	۲۰	۵۰
۴				۰	۱۱۰	۱۰۰	۹۰	۱۰۰	۲۱۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۶۰
۵					۰	۱۰۰	۱۰۰	۶۰	۱۶۰	۱۱۰	۲۴۰	۵۰	۸۰
۶						۰	۷۰	۸۰	۱۵۰	۱۵۰	۵۰	۲۱۰	۱۷۰
۷							۰	۶۰	۴۰	۱۴۰	۶۰	۳۰	۶۰
	$d_{it1}$	$d_{it2}$	$d_{it3}$	$d_{m1j}$		$d_{m2j}$		$d_{m3j}$					
	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۱	۲				
۱	۲۷۰	۲۸	۴۰	۶۴۰	۳۱۰	۸۹۰	۷۰۰	۴۸۰	۶۱۰				
۲	۲۰۰	۱	۳۰	۵۲۰	۲۶۰	۳۹۰	۲۹۰	۳۴۰	۳۹۰				
۳	۱۴۰	۳/۳	۳۰	۵۳۰	۲۴۰	۹۳۰	۹۶۰	۵۹۰	۵۹۰				
۴	۱۲۰	۳/۱	۹۰	۴۷۰	۹۲۰	۴۹۰	۲۹۰	۸۳۰	۵۱۰				
۵	۲۳۰	۳/۵	۷۰	۳۹۰	۵۲۰	۲۷۰	۳۰۰	۹۶۰	۹۷۰				
۶	۱۰۰	۲	۸۰	۶۶۰	۲۴۰	۳۹۰	۴۸۰	۸۶۰	۲۱۰				
۷				۷۰۰	۴۸۰	۳۰۰	۳۵۰	۹۵۰	۵۰۰				

جدول ۹- سایر پارامترهای مدل در شهرک مورد مطالعه

$E^{k1}(ww) \in U(۳۰۰۰, ۳۸۰۰)$	$AE1^{k1} \in U(۵۰۰, ۱۵۰۰)$	$C_{p2}^{k2} \in U(۵۰۰, ۳۱۰۰)$	WDK3=۲
$E^{k2}(ww) \in U(۱۵۰۰, ۶۰۰۰)$	$AE2^{k2} \in U(۸۰, ۳۰۰)$	$C_{p3}^{k3} \in U(۱۲۰۰, ۳۴۰۰)$	WDK2=۳
$E^{k3}(ww) \in U(۳۰۰, ۴۰۰۰)$	$AE3^{k3} \in U(۵۰, ۱۰۰)$	$Q_{m1}^{k1}(out) \in U(۲۹۰, ۳۳۰)$	WDK1=۲
$S_{m1}^{k1}(Fr) \in U(۱۰۰۰, ۳۲۰۰)$	$sc_{p1} \in U(۵۱۰, ۶۲۷) * ۱۰^{\circ}$	$Q_{m2}^{k2}(out) \in U(۶۰, ۳۹۰)$	$PJ_{p1=1}=۹$
$S_{m2}^{k2}(Fr) \in U(۱۵۰۰, ۳۰۰۰)$	$sc_{p2} \in U(۴۷۰, ۵۴۰) * ۱۰^{\circ}$	$Q_{m3}^{k3}(out) \in U(۵, ۱۰۰)$	$PJ_{p1=2}=۱۱$
$S_{m3}^{k3}(Fr) \in U(۳۲۰, ۳۰۰۰)$	$sc_{p3} \in U(۵۵۷, ۵۸۴) * ۱۰^{\circ}$	$Q_{p1}^{k1}(out) \in U(۲۹۰, ۳۲۰)$	$PJ_{p2=1}=۶$
$AF1^{k1} \in U(۴۰۰, ۹۰۰)$	$PC^{k1} \in U(۲۲۵, ۳۵۰)$	$Q_{p2}^{k2}(out) \in U(۶۰, ۳۹۰)$	$PJ_{p2=2}=۴$
$AF2^{k2} \in U(۹۰, ۴۰۰)$	$PC^{k2} \in U(۳۲۰, ۳۵۰)$	$Q_{p3}^{k3}(out) \in U(۵, ۱۰۰)$	$PJ_{p3=1}=۱۰$
$AF3^{k3} \in U(۵۰, ۱۵۰)$	$C_{p1}^{k1} \in U(۲۰۰, ۳۰۰۰)$	$\theta_1=۲۴۰, \theta_2=۲۶۰$	$PJ_{p3=2}=۸$
$\alpha_1^{k1} = \alpha_1^{k2} = \alpha_1^{k3} = ۱$	$we(jc) = we(wd) = ۰, ۵$	$VTC=۳۵۰$	$\beta = ۹۰\%$

پس از حل مدل با اپسیلون محدودیت با ۲۰ تکرار و در نظر گرفتن هدف هزینه به عنوان اولویت بالاتر برای بهینه‌سازی، مقادیر هدف و متغیرهای تصمیم به شرح جدول شماره ۱۰ به دست آمده است.

جدول ۱۰- متغیرهای خروجی مدل روی مطالعه موردی

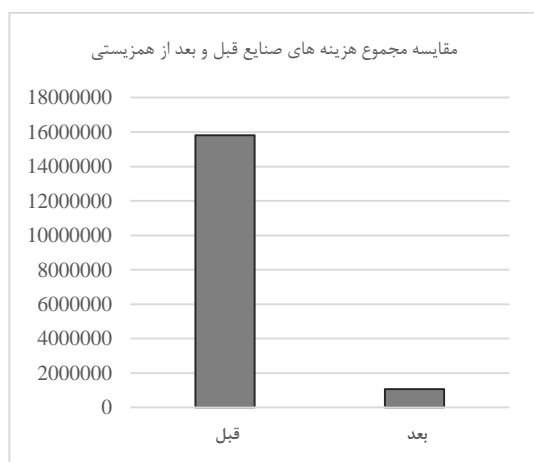
$V_{ij}^{k1}(Re)$		$V_{ij}^{k2}(Re)$			
$V_{51}^1(Re)=800$	$V_{52}^1(Re)=900$	$V_{15}^2(Re)=100$	$V_{21}^2(Re)=100$	$V_{23}^3(Re)=50$	$V_{53}^3(Re)=85$
$V_{ij}^{k3}(Re)$					$V_{ip2}^{k2}(Rc)$
$V_{35}^3(Re)=43$	$V_{35}^4(Re)=15$	$V_{47}^1(Re)=20$	$V_{62}^7(Re)=8$	$V_{63}^7(Re)=10$	$V_{32}^2(Rc)=40$
$V_{ip1}^{k1}(Rc)$		$V_{p1j}^{k1}(Rc)$		$V_{m2j}^{k2}(Fr)$	
$V_{21}^3(Rc)=600$	$V_{21}^4(Rc)=120$	$V_{16}^3(Rc)=600$	$V_{17}^4(Rc)=47$	$V_{13}^2(Fr)=15$	$V_{13}^3(Fr)=10$
$V_{p3j}^{k3}(Rc)$					$y_{p1}$
$V_{13}^2(Rc)=8$	$V_{15}^6(Rc)=25$	$V_{16}^7(Rc)=9$	$V_{17}^5(Rc)=20$		$y_1 = 1$
$V_{ip3}^{k3}(Rc)$					$y_{p2}$
$V_{31}^2(Rc)=10$	$V_{41}^6(Rc)=10$	$V_{51}^5(Rc)=20$	$V_{51}^6(Rc)=20$	$V_{61}^7(Rc)=9$	$y_2 = 1$
$V_{it3}^{k3}(ww)$				$V_{p2j}^{k2}(Rc)$	$y_{p3}$
$V_{31}^3(ww)=7$	$V_{31}^4(ww)=4$	$V_{41}^1(ww)=30$	$V_{51}^5(ww)=5$	$V_{25}^2(Rc)=27/5$	$y_1 = 1$
$V_{m3j}^{k3}(Fr)$					$V_{m1j}^{k1}(Fr)$
$V_{15}^6(Fr)=35$	$V_{23}^2(Fr)=52$	$V_{23}^4(Fr)=70$	$V_{24}^6(Fr)=65$	$V_{26}^7(Fr)=121$	$V_{27}^4(Fr)$
$V_{it1}^{k1}(ww)$					
$V_{11}^4(ww) = 200$	$V_{21}^4(ww) = 130$	$V_{21}^3(ww) = 280$	$V_{31}^3(ww) = 280$	$V_{41}^1(ww) = 300$	$V_{51}^1(ww) = 600$
$V_{it2}^{k2}(ww)$				TNC	SW
$V_{21}^1(ww)=20$	$V_{21}^3(ww)=25$	$V_{31}^1(ww)=40$	$V_{41}^3(ww)=40$	۱,۷۵۳,۱۷۱,۷۸۵	۲۹۹۸/۲۵

۵- بحث

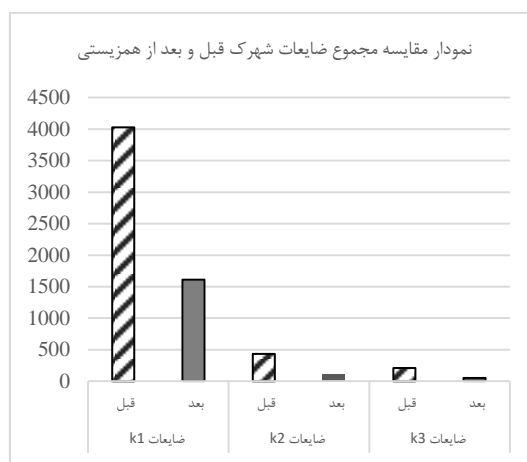
## ۱-۵ تفسیر نتایج

همانگونه که در شکل شماره ۱ بخش مقدمه نیز نشان داده شده است، پس از همزیستی، بخش عمده‌ای از ضایعات، جایگزین مواد اولیه می‌شود و نیاز صنایع به مواد اولیه دست اول را کاهش می‌دهد. این امر در خروجی مطالعه موردی این پژوهش در جدول شماره ۱۰ به وضوح مشاهده می‌شود که براساس نتایج جدول، بخش عمده ضایعات، به صورت مستقیم یا پس از بازیابی، دوباره به چرخه تولید بازمی‌گردد و جایگزین منابع و مواد اولیه دست اول می‌شود؛ در حالی که پیش از همزیستی، کلیه ضایعات، بدون استفاده و کلیه تقاضاها از مواد دست اول قابل تأمین بوده است که تفاوت حجم ضایعات پیش و پس از همزیستی در نمودار شماره ۲ ارائه شده است. علاوه بر این، براساس نمودار شماره ۳، پیش از همزیستی، هزینه صنایع در دو بخش تأمین مواد اولیه و دفع ضایعات، بیشتر از هزینه این دو بخش در شرایط همزیستی است؛ بنابراین، به استناد نتایج خروجی مدل و نکات مذکور، شبکه همزیستی این پژوهش، عملکرد شهرک را در هر سه بعد توسعه پایدار بهبود داده است. نکته مهم این است که بیشترین کاهش میزان استفاده مجدد از ضایعات در بخش ضایعات جامد است (براساس نمودار شماره ۲) که در مطالعات پیشین لحاظ نشده است و فقط حالت آب و انرژی مطالعه شده است. یکی از نقاط قوت مدل، ایجاد

فرصت استفاده مجدد ضایعات پس از بازیابی است که در مقایسه با مدل‌های موجود، بخش بیشتری از ضایعات را قابل استفاده می‌کند؛ به طور مثال، در مدل افشاری (۲۰۱۸) فقط انتقال مستقیم در شبکه امکان‌پذیر است؛ در حالی که براساس جدول شماره ۱۰، بخشی از ضایعات، امکان تبادل مستقیم را دارد و بخش عمده آنها نیازمند بازیابی بوده است؛ بنابراین، بدون مراکز بازیابی، فرصت استفاده مجدد این گروه ضایعات از دست می‌رود که به صورت موازی بر ابعاد اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی مؤثر است. از دیگر مزایای مدل، انتقال هم‌زمان مواد در هر سه حالت جامد، مایع و گاز است که در مدل‌های مشابه مانند نوئینو (۲۰۱۹) فقط تبادل یک حالت (آب) بررسی شده است. لحاظ کردن بعد اجتماعی، از دیگر مزیت‌های مدل است که در هیچ یک از مدل‌های موجود در نظر گرفته نشده است که براساس خروجی، سطح اجتماعی شهرک نسبت به قبل، بهبود زیادی دارد.



شکل ۳- هزینه تأمین تقاضا و دفع ضایعات پیش و پس از همزیستی



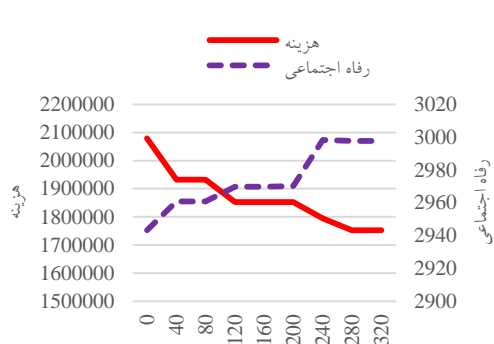
شکل ۲- حجم ضایعات پیش و پس از همزیستی در کل شهرک

- براساس نتایج به دست آمده در این پژوهش و فشارهای محیط زیستی روی صنایع، پیشنهادهای ذیل به مدیران تصمیم‌گیرنده در حوزه شهرک‌های صنعتی مانند شرکت شهرک‌های صنعتی ارائه می‌شود:
- برگزاری دوره‌های توجیهی برای مدیران شهرک‌های صنعتی و کارآفرینان مستقر در شهرک‌ها برای ترویج و جایگزینی شبکه‌های همزیستی به جای سیاست‌های فعلی مقابله با آلاینده‌های صنعتی؛
  - تدوین طرح‌های توجیهی اقتصادی و محیط زیستی مطابق خروجی‌های مدل و نمودارهای شماره ۲ و ۳، برای ارائه و جذب سرمایه‌گذاران دولتی و خصوصی همسو با پیاده‌سازی همزیستی صنعتی و
  - اصلاح شیوه‌نامه‌های تخصیص کاربری اراضی شهرک‌های صنعتی همسو با بهبود عملکرد همزیستی.

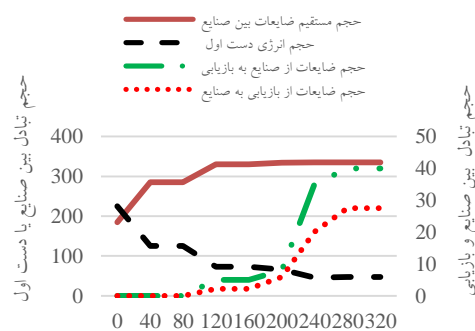
## ۲-۵ تحلیل حساسیت

در ادامه، تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامتر بیشترین فاصله مجاز در انتقال ضایعات گاز برای استفاده مجدد در نمودار شماره ۴ ارائه شده است. این پارامتر با رعایت فاصله حداکثری در تبادل مستقیم یا بازیابی شده ضایعات، از انتشار آلاینده‌های حین انتقال جلوگیری می‌کند. براساس نمودار، زمانی که محدودیت فاصله‌ای صفر باشد، فاصله مراکز بازیابی با کارخانه‌ها بیشتر از حد مجاز (صفر) است و انتقال به بازیابی انجام نمی‌شود. در این حالت، نیازهای

گاز از طریق گازهای دست اول و جریان ضایعات مستقیم تأمین می‌شود و جریان بازیابی (در این مثال) وجود ندارد. با افزایش مقدار تتا، صنایع بیشتری در محدوده مجاز فاصله‌ای با مراکز بازیابی قرار می‌گیرد و جریان‌های بازیابی شده، جایگزین گازهای طبیعی می‌شود. همچنین، براساس نمودار شماره ۵، هزینه مدل در نقطه صفر تتا، بیشترین و رفاه اجتماعی، کمترین است که تأثیر استفاده از ضایعات را بر بهبود توسعه پایدار نشان می‌دهد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود، جانمایی شهرک‌های صنعتی از ابتدا با مطالعه ضمنی امکان تبادل ضایعات و مواد اولیه صنایع انجام شود تا فرصت‌های تبادلات بیشتری از نظر محدودیت‌های فاصله‌ای ضایعات خطرناک فراهم شود و عملکرد همزیستی افزایش یابد.



شکل ۵- تحلیل حساسیت مقادیر هدف بر مبنای بیشترین فاصله مجاز انتقال انرژی ( $\theta_2$ )



شکل ۴- تحلیل حساسیت حجم تبادلات بر مبنای بیشترین فاصله مجاز انتقال انرژی ( $\theta_2$ )

شکل ۴- تحلیل حساسیت حجم تبادلات بر مبنای بیشترین فاصله مجاز انتقال  
شکل ۵- تحلیل حساسیت مقادیر هدف بر مبنای بیشترین فاصله مجاز انتقال

## ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

شهرک‌های صنعتی علی‌رغم دستاوردهای خود، تأثیرات مخربی بر محیط زیست دارند و گاهی، در آنها به موضوعات مرتبط با رفاه اجتماعی توجه نشده است. همزیستی صنعتی به‌عنوان رویکرد نظام‌مند و همکاری متقابل بین صنایع، همسو با بهینه‌سازی تبادلات مواد و انرژی به وجود آمده است که هدف آن، اکولوژیک کردن طراحی شهرک‌های صنعتی است. در این پژوهش، یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح برای بهینه‌سازی تبادلات شبکه‌های همزیستی و مکان‌یابی ایستگاه‌های بازیابی ارائه شده است. از جمله نوآوری‌های مدل نسبت به دیگر پژوهش‌های این زمینه، تبادل هم‌زمان هر سه حالت جامد، آب و انرژی است. همچنین، تبادل غیرمستقیم ضایعات از طریق مراکز بازیابی، از دیگر نوآوری‌های مدل بوده است. برای بهبود عملکرد شهرک برای دستیابی به بعد اجتماعی توسعه پایدار، هدف اجتماعی در مدل لحاظ شده است. حل مدل با استفاده از روش اپسیلون محدودیت و با نرم‌افزار گمز انجام شده است. نتایج خروجی مدل بر شهرک مورد مطالعه نشان می‌دهد، حجم کل ضایعات بدون استفاده از مجموع صنایع شهرک نسبت به پیش از آن، به میزان زیادی کاهش یافته است. همچنین، هزینه صنایع در همزیستی نسبت به هزینه‌های انفرادی آنها بسیار کاهش یافته است و همین امر، ابزار مناسبی برای ترغیب آنها به مشارکت در طرح است. ایجاد ۲۳ فرصت شغلی جدید با احداث مراکز بازیابی و جبران روزهای



کاری ازدست‌رفته ناشی از آلاینده‌های محیط زیستی، از جمله دستاوردهای هدف اجتماعی است. این پژوهش نیز همانند سایر مطالعات، مفروضات و محدودیت‌هایی در توسعه مدل دارد؛ برای مثال، مسیر انتقال هر سه حالت مواد و ضایعات، یکسان در نظر گرفته شده است. امکان تبدیل بین حالت‌ها و استفاده از ضایعات مراکز بازیابی در نظر گرفته نشده است. همچنین، انتظارات شهرک و صنایع به صورت یکپارچه منظور نشده است؛ بنابراین، پیشنهادهای ذیل برای بهبود و توسعه مدل در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود:

- طراحی شبکه همزیستی چندلایه با استفاده از مدل‌های دوسطحی؛
- توسعه مدل برای استفاده از ضایعات حاصل از ایستگاه بازیابی؛ برای مثال، گاز متان یا لجن تصفیه‌خانه؛
- توسعه مدل با در نظر گرفتن صنایع فصلی با مدل‌های موجودی اطمینان و جریان‌های منقطع؛
- توسعه مدل برای مکان‌یابی و تخصیص پسماندهای استفاده‌ناشدنی در شبکه فعلی به مشاغل جدید و
- توسعه مدل بر مبنای تفاوت مسیر انتقال مواد در شبکه در انواع جامد، گاز و آب بر اساس فرضیه ۳.

### سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی شرکت شهرک‌های صنعتی انجام شده است. بدین وسیله، سپاسگزاری خود را از این مجموعه اعلام می‌کنیم.

### References

- Afshari, H., Farel, R., and Peng, Q. (2018). «Challenges of value creation in Eco-Industrial Parks (EIPs): A stakeholder perspective for optimizing energy exchanges». *Resources, Conservation and Recycling*, 139: 315-325 .
- Afshari, H., Jaber, M.Y., and Searcy, C. (2018). «Extending industrial symbiosis to residential buildings: A mathematical model and case study». *Journal of Cleaner Production*, 183: 370-379 .
- Al-Fadhli, F.M., Baaqeel, H., and El-Halwagi, M.M. (2019). «Modular design of carbon-hydrogen-oxygen symbiosis networks over a time horizon with limited natural resources». *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 141: 107535 .
- Andiappan, V., Tan, R.R., and Ng, D.K. (2016). «An optimization-based negotiation framework for energy systems in an eco-industrial park». *Journal of Cleaner Production*, 129, 496-507 .
- Aviso, K. B. (2014). Design of robust water exchange networks for eco-industrial symbiosis». *Process Safety and Environmental Protection*, 92(2): 160-170 .
- Aviso, K.B., Tan, R.R., Culaba, A.B., and Cruz Jr, J.B .(2010). «Bi-level fuzzy optimization approach for water exchange in eco-industrial parks». *Process Safety and Environmental Protection*, 88(1): 31-40 .
- Bi, R., Chen, C., Tang, J., Jia, X., and Xiang, S. (2019). «Two-level optimization model for water consumption based on water prices in eco-industrial parks». *Resources. Conservation and Recycling*, 146, 308-315 .
- Biegler, L.T., and Grossmann, I.E. (2004). «Retrospective on optimization». *Computers and chemical engineering*, 28(8): 1169-1192 .
- Boix, M., Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C., and Domenech, S. (2015). «Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: a literature review». *Journal of Cleaner Production*, 87: 303-317 .
- Boix, M., Montastruc, L., Pibouleau, L., Azzaro-Pantel, C., and Domenech, S. (2012). «Industrial

- water management by multiobjective optimization: from individual to collective solution through eco-industrial parks». *Journal of Cleaner Production*, 22(1): 85-97 .
- Cao, X., Wen, Z., Xu, J., De Clercq, D., Wang, Y., and Tao, Y. (2020). «Many-objective optimization of technology implementation in the industrial symbiosis system based on a modified NSGA-III». *Journal of Cleaner Production*, 245: 118810 .
- Chae, S.H., Kim, S.H., Yoon, S.G., and Park, S. (2010). «Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park». *Applied energy*, 87(6): 1978-1988 .
- Chan, W.M., Leong, Y.T., and Chew, I.M.L. (2020). «Multiple-criteria evaluation of centralized chilled water hub powered by industrial waste heat and renewable energy». *Journal of Cleaner Production*, 247: 119570 .
- Chao, G., Leveueur, S., Estel, L., and Yassine, A. (2013). «Industrial Symbiosis Optimization Control Model for the exchanges of the material/energy flows in an industrial production park». *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9): 1015-1020.
- Daquin, C., Allaoui, H., Goncalves, G., and Hsu, T. (2019). «Collaborative Lot-Sizing problem for an Industrial Symbiosis». *IFAC-PapersOnLine*, 52(13): 1325-1330 .
- Fraccascia, L., Giannoccaro, I., and Albino, V. (2021). «Ecosystem indicators for measuring industrial symbiosis». *Ecological economics*, 183: 106944.
- Genc, O., Capelleveen, G., Erdis, E., Yildiz, O., and Yazan, D.M. (2019). «A socio-ecological approach to improve industrial zones towards eco-industrial parks». *Journal of Environmental Management*. 0301-4797, doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109507.
- Gonela, V., Zhang, J., and Osmani, A. (2015). «Stochastic optimization of sustainable industrial symbiosis based hybrid generation bioethanol supply chains». *Computers and industrial engineering*, 87: 40-65 .
- Hennequin, S., Ho, V.T., Le Thi, H.A., Nouinou, H., and Roy, D. (2019). «Industrial symbioses: Bi-objective model and solution method». In *World Congress on Global Optimization* (pp 1054-1066). Springer, Cham.
- Hosseini, S.A., and Mirjahanmard S.J. (2014). «Identifying and Prioritizing the Effective Factors on Green Supply Chain Management by Using Path Analysis Approach». *Production and Operation Management*, 5(2): 161-178.
- khatibi, S., khakraz. B.M., and Rahmani, M. (2017). «Multi objective Model of airport gate scheduling problem using NSGA-II algorithm and epsilon constraint». *Modeling in Engineering*, 15(51): 397-410. doi:10.22075/jme.2017.2855.
- Kim, S.H., Yoon, S.G., Chae, S.H., and Park, S. (2010). «Economic and environmental optimization of a multi-site utility network for an industrial complex». *Journal of environmental management*, 91(3): 690-705 .
- Liu, X., and Bae, J. (2018). «Urbanization and industrialization impact of CO2 emissions in China». *Journal of Cleaner Production*, 172: 178-186 .
- Lovelady, E.M., and El-Halwagi, M.M. (2009). «Design and integration of eco- industrial parks for managing water resources». *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 28(2): 265-272 .
- Nasr-Azadani, M., Davoodi, S.M.R., and Moeni, SH. (2019). «Optimization of a proposed non-linear production model and the effect of direct reduced iron charging on CO2 emission and coke-energy consumption of ESCO blast furnace no. 3». *Production and Operation Management*, 10(2): 57-82. doi:10.22108/jpom.2019.115301.1183.
- Nouinou, H., Roy, D., and Hennequin, S. (2019). «Mathematical modelling for flows optimization within an industrial symbiosis». *IFAC-PapersOnLine*, 52(13): 1319-1324 .
- O'Dwyer, E., Chen, K., Wang, H., Wang, A., Shah, N., and Guo, M. (2020). «Optimisation of wastewater treatment strategies in eco-industrial parks: Technology», *location and transport*. *ChemicalEngineering Journal*, 381, 122643. doi.org/10.1016/j.cej.2019.122643.

- Panu, M., Topolski, K., Abrash, S., and El-Halwagi, M.M. (2019). «CO2 footprint reduction via the optimal design of Carbon-Hydrogen-Oxygen SYmbiosis Networks (CHOSYNs)». *Chemical Engineering Science*, 203: 1-11 .
- Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., and El-Halwagi, M.M. (2011). «Optimal reconfiguration of multi-plant water networks into an eco-industrial park». *Computers and chemical engineering*, 44: 58-83 .
- Shariat, M., Iranzadeh, S., and Bafande, A. (2016). *Industrial Ecology and Industrial Symbiosis. First National Conference on Management and Engineering of Progress*, Tehran , Iran University of Science and Technology. doi: [https://www.civilica.com/Paper-ICMPE01-ICMPE01\\_118.html](https://www.civilica.com/Paper-ICMPE01-ICMPE01_118.html).
- Shokohyar, S., and Akbari, E. (2018). «Design of A Sustainable Development Model for E-waste Recycling». *Production and Operation Management*. 7(2): 137-152. <http://dx.doi.org/10.22108/jpom.2016.21097>.
- Taskhiri, M.S., Behera, S.K., Tan, R.R., and Park, H.S. (2015). «Fuzzy optimization of a waste-to-energy network system in an eco-industrial park». *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(3): 476-489 .
- Tiu, B.T.C., and Cruz, D.E. (2017). «An MILP model for optimizing water exchanges in eco-industrial parks considering water quality». *Resources, Conservation and Recycling*, 119: 89-96 .
- Valenzuela-Venegas, G., Vera-Hofmann, G., and Díaz-Alvarado, F.A. (2020). «Design of sustainable and resilient eco-industrial parks: Planning the flows integration network through multi-objective optimization». *Journal of Cleaner Production*, 243: 118610.
- Zhang, C., Zhou, L., Chhabra, P., Garud, S.S., Aditya, K., Romagnoli, A., and etal. (2016). «A novel methodology for the design of waste heat recovery network in eco-industrial park using techno-economic analysis and multi-objective optimization». *Applied energy*, 184: 88-102 .
- World Commission on Environmental and Development. (1987). Brandtland report.

- 
1. Liu
  2. Bae
  3. Genc
  4. Capelleveen
  5. Erdis
  6. O'Dwyer
  7. Chen
  8. Wang
  9. Eco-Industrial Park
  10. Industrial Symbiosis
  11. Fraccascia
  12. Giannoccaro
  13. Albino
  14. Boix
  15. Montastruc
  16. Azzaro
  17. Mixed Integer Linear Programming (MILP)
  18. Biegler
  19. Grassmann
  20. Lovelady
  21. El-Halwagi
  22. Aviso
  23. Tan
  24. Culaba
  25. Bi-Level Based on Fuzzy approach
  26. Kim
  27. Yoon
  28. Chae

29. Rubio
30. Ponce
31. Serna
32. Boix
33. Pibouleau
34. Chao
35. Leveneur
36. Estel
37. Taskhiri
38. Behera
39. Tan
40. Zhang
41. Zhou
42. Chhabra
43. Tiu
44. Cruze
45. Afshari
46. Jaber
47. searcy
48. Nouinou
49. Roy
50. Hennequin
51. Valenzuela-Venegas
52. Vera
53. Daiz
54. Hennequin
55. Ho
56. Le
57. Chae
58. Gonela
59. Andiapan
60. Bi
61. Al-Fadhli
62. Panu
63. Daquin
64. Cao
65. Chan
66.  $\varepsilon$ -Constraint
67. Solver
68. Ciplax
69. Brandt land report
70. World Commission on Environmental and Development (WCED)