



## Modeling of Closed-Loop Supply Chains by Utilizing Scenario-Based Approaches in Facing Uncertainty in Quality and Quantity of Returns

**Mansour Momeni\***

\*Corresponding Author, Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mmomeni@ut.ac.ir

**Nima Zereshki**

Ph.D. Candidate, Department of Production and Operation Management, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: nzereshki@yahoo.com

### Abstract

**Objective:** The main purpose of this research is to develop a scenario-based model to deal with the design and planning decisions of supply chain networks considering uncertainty in both quantity and quality of the returned products at their end of life era.

**Methods:** In this approach by the help of scenarios and operation research, a mixed-integer linear programming model is applied and profit maximization is chosen to be the target of this model which integrates multi - products and multi - periods of times with different time horizons. In this model, several flows of products between entities like factories, storages, distribution/recycling/disposal centers and costumers have been taken into account that is according to the variety of entities in the network. The uncertainty associated with the quantity and quality of the used products in the reverse network which is directly affected by customers' usage and sorting results in recycling centers, respectively, have been taken into account as the main cause of the uncertainty.

**Results:** Of the main findings of this research which was the applicability of these kinds of approaches in real case problems, have been approved in an acceptable time and has shown that this approach can be used in cases with mathematical functions predicting their uncertainty behavior.

**Conclusion:** Finally, the model is deployed in Steel industry of Iran with real data from factories and market to examine the model in utilizing potential locations for different entities by considering the costs, especially the lost costumers. As predicted, increase in quality of return will reduce the need for raw material and as a result, will increase the profit of the entire chain and increase in the quantity of returned might need to build more entities that would reduce the profit of the entire chain and even unprofitable at all.

**Keywords:** Closed-Loop Supply Chain, Reverse Logistics, Uncertainty.

**Citation:** Momeni, Mansour & Zereshki, Nima (2021). Modeling of Closed-Loop Supply Chains by Utilizing Scenario-Based Approaches in Facing Uncertainty in Quality and Quantity of Returns. *Industrial Management Journal*, 13(1), 105-130. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2021, Vol. 13, No.1, pp. 105-130

DOI: 10.22059/IMJ.2020.283663.1007616

Received: June16, 2019; Accepted: October 10, 2020

© Faculty of Management, University of Tehran



## مدل سازی زنجیره تامین حلقه بسته با بکارگیری از سناریوها در مواجهه با عدم قطعیت در کمیت و کیفیت برگشتی ها

منصور مؤمنی \*

\* نویسنده مسئول، استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mmomeni@ut.ac.ir

نیما زرشکی

دانشجوی دکترا، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: nzereshki@yahoo.com

### چکیده

**هدف:** هدف از این پژوهش ایجاد یک مدل مبتنی بر سناریو برای طراحی و برنامه ریزی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در حالتی است که در جریان برگشت شرایط عدم قطعیت در دو بعد کمی و کیفی محصولات به پایان عمر خود رسیده به آن اضافه شده است.

**روش:** از یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط، با تابع هدف بیشینه کردن سود و یک سری سناریو بکارگیری شده، که به صورت یک مدل چند محصوله با چند دوره زمانی و با در نظر گرفتن جریان مواد خام بین موجودیت های شبکه بررسی و ارائه شده است. همچنین در مسیر برگشت در دو بعد از مرجوعی ها (مقدار یا تعداد برگشت و کیفیت کالای برگشت داده شده) عدم قطعیت لحاظ شده است. شروع جریان برگشت زنجیره، از مشتریان به مراکز دسته بندی بوده که در واقع منشأ عدم قطعیت موجود در مدل نیز همین دو موجودیت هستند.

**یافته ها:** از جمله یافته های اصلی این تحقیق، بررسی امکان پذیری بکارگیری این گونه از رویکردها در حل مدل های واقعی بوده، که با توجه به نتایج بدست آمده از مدل می توان نتیجه گیری نمود که رویکرد سناریو محور می تواند در خصوص مدل هایی که عدم قطعیت در آنها بصورت توابع ریاضی قابل مدل شدن هستند در مدت زمان مناسب به جواب های قابل قبولی برسد.

**نتیجه گیری:** در مدل حل شده با داده های واقعی از صنعت فولاد، بکارگیری یا عدم بکارگیری از نقاط بالقوه برای احداث موجودیت های زنجیره بررسی شده است. همانطوریکه انتظار می رود با افزایش سطح کیفی محصولات بازگشتی نیاز به مواد اولیه کاهش پیدا کرده و در نتیجه سود کلی زنجیره افزایش می یابد و با افزایش تعداد برگشتی ها بدلیل افزایش هزینه های عملیاتی (و نیاز به ایجاد تاسیسات جدید) میزان سوددهی با نرخ افزایشی، کاهش می یابد که این امر خود می تواند زنجیره را در سطوح بالای برگشتی ها غیر سودده نماید.

**کلیدواژه ها:** زنجیره تامین حلقه بسته، عدم قطعیت، لجستیک معکوس.

**استناد:** مؤمنی، منصور؛ زرشکی، نیما (۱۴۰۰). مدل سازی زنجیره تامین حلقه بسته با بکارگیری از سناریوها در مواجهه با عدم قطعیت در کمیت و کیفیت برگشتی ها. مدیریت صنعتی، ۱۳(۱)، ۱۰۵-۱۳۰.

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۰، دوره ۱۳، شماره ۱، صص. ۱۰۵-۱۳۰

DOI: 10.22059/imj.2020.283663.1007616

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۶، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۳

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

## مقدمه

با توسعه روزافزون صنایع و کاهش لحظه‌ای منابع اولیه، افزایش هزینه تامین منابع و الزامات زیست محیطی به وجود آمده، نیاز به بررسی هر چه بیشتر زنجیره تامین معکوس پررنگ‌تر و پررنگ‌تر می‌شود. از جمله مباحث مطرح در حوزه لجستیک و مدیریت زنجیره تامین، موضوع "لجستیک معکوس" و "مدیریت بازگشتی‌ها" می‌باشد که طی دو دهه اخیر، شرکت‌ها و صنایع زیادی در کشورهای پیشرفته بررسی در این حوزه را آغاز کرده و لجستیک معکوس را یکی از فرایندهای مهم در زنجیره تامین خود در نظر گرفته‌اند.

رویکردهای متفاوتی مانند رویکردهای تصادفی، منطق فازی، رویکردهای برنامه‌ریزی بازه‌ای (مقادیر فاصله‌ای برای پارامترهای نامعین)، نظریه آشوب و ترکیبی از رویکردهای ذکر شده، جهت بررسی عدم اطمینان به کار گرفته شده‌اند. علاوه بر این‌ها، رویکردهای تولید سناریو می‌توانند به طور مجزا یا توأم با سایر رویکردهای حل غیرقطعی بکار روند. اغلب کارهای تحقیقاتی انجام شده در طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تامین، پارامترهای غیرقطعی را در جریان رو به جلو در نظر گرفته‌اند که البته با ترکیب جریان برگشت با زنجیره تامین، منابع عدم قطعیت جدید متعددی مانند زمان برگشتی‌ها، کیفیت و کمیت برگشتی‌ها و ... ظاهر می‌شوند (اکالی و ستینکایا<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱).

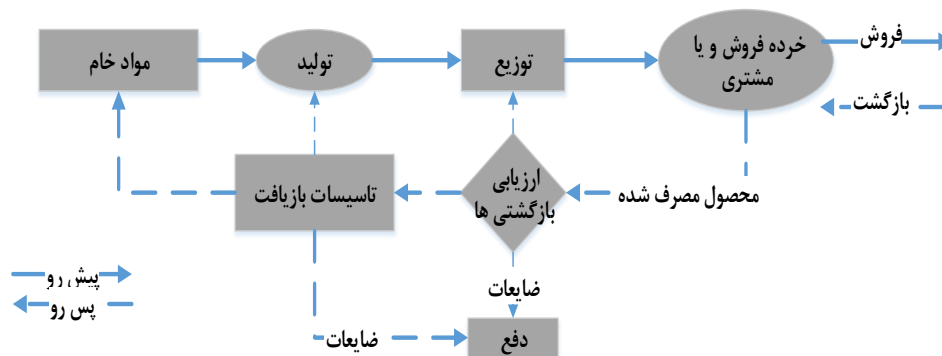
هدف این مقاله طراحی و برنامه‌ریزی یک زنجیره تامین حلقه بسته با تعیین نمودن تعداد و مکان اجزای شبکه (شامل کارخانه، انبار، مشتری، مراکز جمع‌آوری، و مراکز دفع) در یک افق زمانی می‌باشد. علاوه بر این، بهترین برنامه‌ریزی ممکن برای تامین، تولید، حمل و نقل، انبار، و جمع‌آوری در دوره‌های مختلف زمانی بررسی شده است. هدف نهایی نیز بیشینه کردن سود زنجیره لحاظ شده است.

در نهایت یافته‌های این مقاله در صنعت فولاد که با توجه به موارد مطرح شده گزینه مناسبی برای ارزیابی به شمار می‌رفت به عنوان مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت چرا که سطح کیفی آهن قراضه جمع‌آوری شده در محصول تولیدی تاثیر بسزایی داشته و برای تبدیل هر سطح به فولاد مطلوب، می‌بایست تغییراتی در مواد اولیه بکارگیری شده ایجاد گردد.

## پیشینه پژوهش

لجستیک معکوس در حالت کلی از کاربر نهایی (مشتری) آغاز می‌شود. جایی که کالاهای مصرف شده (محصولات بازگشتی) جمع‌آوری شده و سپس تلاش می‌شود تا محصولاتی که به پایان عمر خود رسیده‌اند با بیشترین بهره ممکن مدیریت شوند. در این چرخه تصمیمات زیادی شامل بازیافت، تولید مجدد، تعمیر و در نهایت دفع برخی از قطعات، میبایست اتخاذ گردد. زنجیره تامین بصورت کلی در شکل یک (جریان رو به جلو با خط و جریان معکوس بصورت خط چین) نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Akcali, E., Cetinkaya, S



شکل ۱- نمایی از یک زنجیره تامین پیشرو و پس رو

همانگونه که پاپاجورجیو<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) اشاره کرده نیاز به درک منبع عدم قطعیت به مسئله مهمی تبدیل شده و رویکردهای بهینه سازی که عدم قطعیت را در نظر می گیرند با توجه به پارامترهای زیاد در فضای عدم قطعیت به مدل های بسیار بزرگی منتهی خواهند شد. رویکردهای بهینه سازی برای مواجهه با عدم قطعیت در ساختار و مدیریت سازمان ها و فرآیندهای آنها را می توان در ساهینیدیس<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) و لی و یراپتريتو<sup>۳</sup> (۲۰۰۸) مشاهده نمود.

اکثر مقالات در حوزه مدل سازی عدم قطعیت بازگشتی ها بر تولید مجدد و برنامه ریزی موجودی متمرکز دارند در حالیکه کیفیت مواد بازگشتی، تاثیر بسزایی در هزینه ها دارد. این در تحقیق دنیزل، فرگوسن، و سوزا<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) با موضوع بررسی عدم قطعیت بازگشتی ها در حالت چند دوره ای نشان داده شده است. این مطالعه بر برنامه ریزی تولید مجدد از طریق مدل سازی برنامه ریزی خطی اتفاقی متمرکز بود. افق استراتژیک تصمیمات طراحی زنجیره تامین، تاثیر عدم قطعیت در مسائل را تشدید می کند. علاوه بر این فلیشمن و همکاران بیان کردند که کنترل و تخمین مقدار و کیفیت کالاهای بازگشتی کار دشواری است لذا این مسئله در حوزه زنجیره تامین معکوس حائز اهمیت بیشتری می گردد. بنابراین اهمیت در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل ها، محققین را به نشان دادن پارامترهای غیرقطعی در طراحی شبکه زنجیره تامین برانگیخت (کلیبی<sup>۵</sup> ۲۰۱۰).

در جدول ۱ تعدادی از تحقیقات صورت گرفته و متغیرهای احتمالی بررسی شده آورده شده است.

<sup>1</sup> Papageorgiou, L. G.

<sup>2</sup> Sahinidis, N. V.

<sup>3</sup> Li, Z., Ierapetritou, M. G.

<sup>4</sup> Denizel, M., Ferguson, M., Souza, G.

<sup>5</sup> Klibi W.

جدول ۱. مطالعات اخیر با در نظر گرفتن عدم قطعیت

| پارامترها |   |   |   |   |   |   |   |   |    | روش حل |    |    |    |    |    | سال انتشار | نویسنده                                                                                                                    |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|--------|----|----|----|----|----|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱         | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱     | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۷         | ۱۸                                                                                                                         |
|           |   |   |   |   |   |   | * | * |    | *      |    |    |    |    | *  | ۲۰۱۳       | حسنزاده امین <sup>۱</sup> ، ژانگ <sup>۲</sup>                                                                              |
|           |   |   |   |   |   |   | * | * |    | *      |    |    |    |    |    | ۲۰۱۵       | هو <sup>۳</sup> ، شو <sup>۴</sup> ، ژاو <sup>۵</sup> ، لو <sup>۶</sup>                                                     |
|           |   |   |   |   | * |   |   | * |    | *      |    |    |    |    | *  | ۲۰۱۴       | زبولاس <sup>۷</sup> ، مندز <sup>۸</sup> ، باربوساپووا <sup>۹</sup> ، نوایسک <sup>۱۰</sup>                                  |
|           |   |   |   | * |   |   |   | * |    |        | *  | *  | *  |    |    | ۲۰۱۵       | دای <sup>۱۱</sup> ، ژنگ <sup>۱۲</sup>                                                                                      |
|           |   |   |   | * |   |   |   | * | *  |        | *  |    |    |    | *  | ۲۰۱۴       | اشفاری <sup>۱۳</sup> ، شریفی <sup>۱۴</sup> ، المکاوای <sup>۱۵</sup> ، پنگ <sup>۱۶</sup>                                    |
|           |   |   |   |   | * |   | * | * |    |        |    |    | *  |    | *  | ۲۰۱۵       | جیندال <sup>۱۷</sup> ، سانگوان <sup>۱۸</sup> ، ساکسنا <sup>۱۹</sup>                                                        |
|           |   |   |   | * |   |   | * | * |    | *      |    |    |    | *  |    | ۲۰۱۵       | سوبالان <sup>۲۰</sup> ، بایکاسوگلو <sup>۲۱</sup> ، اوسویدان <sup>۲۲</sup> ، سردار تاسان <sup>۲۳</sup> ، سلیم <sup>۲۴</sup> |
|           |   | * |   |   |   |   |   |   |    |        |    |    | *  |    | *  | ۲۰۱۵       | سوبالان، سردار تاسان، بایکاسوگلو                                                                                           |
|           |   |   |   |   |   |   | * | * | *  |        |    |    |    |    |    | ۲۰۱۵       | فلاح <sup>۲۵</sup> ، اسکندری <sup>۲۶</sup> ، پیشوایی <sup>۲۷</sup>                                                         |
|           | * |   |   |   |   |   |   | * |    |        |    |    |    |    |    | ۲۰۱۳       | یانگ <sup>۲۸</sup> ، ککه <sup>۲۹</sup> ، اندرسون <sup>۳۰</sup> ، دنگ <sup>۳۱</sup>                                         |
| *         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |        |    | *  |    |    |    | ۲۰۱۶       | اکلان <sup>۳۲</sup> ، لم <sup>۳۳</sup>                                                                                     |
|           |   |   |   |   |   |   | * | * |    | *      |    |    |    |    |    | ۲۰۱۵       | چن <sup>۱</sup> ، کوکویازیچی <sup>۲</sup> ، ورتز <sup>۳</sup> ، سانز <sup>۴</sup>                                          |

<sup>1</sup> Hassanzadeh Amin. S.<sup>2</sup> Zhang, G.<sup>3</sup> Hu, Z.<sup>4</sup> Sheu, J.<sup>5</sup> Zhao, L.<sup>6</sup> Lu, C.<sup>7</sup> Zeballos, L.<sup>8</sup> Méndez, C.<sup>9</sup> Barbosa-Povoa, A.<sup>10</sup> Novais, A.<sup>11</sup> Dai, Z.<sup>12</sup> Zheng, X.<sup>13</sup> Ashfari, H.<sup>14</sup> Sharifi, M.<sup>15</sup> ElMekkawy, T.Y.<sup>16</sup> Peng, Q.<sup>17</sup> Jindal, A.<sup>18</sup> Sangwan, K.<sup>19</sup> Saxena, A.<sup>20</sup> Subulan, K.<sup>21</sup> Baykasoglu, A.<sup>22</sup> Özsoydan, F.B.<sup>23</sup> Serdar Tas, A.<sup>24</sup> Selim, H.<sup>25</sup> Fallah, H.<sup>26</sup> Eskandari, H.<sup>27</sup> Pishvae, S.<sup>28</sup> Qiang, Q.<sup>29</sup> KeKe<sup>30</sup> Anderson, T.<sup>31</sup> Dong, J.<sup>32</sup> Aqlan, F.<sup>33</sup> Lam, S.

|  |   |  |  |  |  |  |   |   |  |   |  |  |  |   |      |                                                                                                    |
|--|---|--|--|--|--|--|---|---|--|---|--|--|--|---|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |   |  |  |  |  |  | * | * |  | * |  |  |  |   | ۲۰۱۶ | گیری <sup>۵</sup> ، شارما <sup>۶</sup>                                                             |
|  | * |  |  |  |  |  |   | * |  |   |  |  |  | * | ۲۰۱۵ | رومین <sup>۷</sup> ، لیفی <sup>۸</sup> ، ماژو <sup>۹</sup> ، پیو <sup>۱۰</sup> ، ژان <sup>۱۱</sup> |
|  |   |  |  |  |  |  |   | * |  | * |  |  |  | * | ۲۰۱۳ | کاردوسو <sup>۱۲</sup> ، باربوسا پووا <sup>۱۳</sup> ، رلوس <sup>۱۴</sup>                            |

همانطوری که مرور ادبیات در این حوزه نشان می‌دهد، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) از معمول‌ترین روش حل‌ها در این حوزه می‌باشد. این مدل‌ها از یک مدل ساده تک محصوله تا یک مدل پیچیده چند محصوله یا مدل‌های چند هدفه می‌توانند متفاوت باشند. در مباحث مرتبط با عدم قطعیت، از تکنیک‌های بهینه‌سازی غیر دقیق در یک چهار چوب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به عنوان مثال برنامه‌ریزی بازه‌ای (ژانگ، هانگ و هی ۲۰۱۱) برنامه‌ریزی فازی (وحدانی و همکاران ۲۰۱۲) برنامه‌ریزی تصادفی (کراچیان و کارآموز ۲۰۰۷) و ... بکارگیری شده است.

با بررسی ادبیات موارد بیشتری از این دست مشاهده می‌شود که در ادامه آورده شده است. پیشوایی و ربانی (۲۰۱۱) یک مدل بهینه‌سازی استوار برای عدم قطعیت در داده‌های ورودی در مسائل طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ارائه نموده و روش حل آن را با سایر راه حل‌های مدل‌های قطعی با آزمون‌های مختلف مقایسه و بررسی نموده اند. وحدانی، توکلی مقدم، جولای و بابلی (۲۰۱۳) یک شبکه قابل اعتماد از تاسیسات در زنجیره تامین حلقه بسته با وجود عدم قطعیت ارائه دادند که برای حل مدل ارائه شده از یک متدلوژی هیبرید تعاملی ناول استفاده شده است. چن<sup>۱۴</sup> و چانگ<sup>۱۵</sup> (۲۰۰۶) با پارامترهای فازی به سراغ مدل زنجیره تامین رفتند و یک روشی که می‌توانست ارزش فازی هدف‌ها را محاسبه کند به عنوان راه حل انتخاب نمودند. مقالاتی با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی به بررسی CLSC با عدم قطعیت پرداخته‌اند. سالما<sup>۱۶</sup>، باربوسا پووا<sup>۱۷</sup> و نوویس<sup>۱۸</sup> (۲۰۰۷) مدل MILP برای طراحی شبکه لجستیک معکوس با ظرفیت محدود تک دوره‌ای و تک محصوله پیشنهاد دادند که با استفاده از یک سری سناریو، عدم قطعیت در تقاضا و بازگشت را مدیریت می‌نمود.

<sup>1</sup> Chen, W.

<sup>2</sup> Kucukyazici, B.

<sup>3</sup> Verter, V.

<sup>4</sup> Sáenz, M.

<sup>5</sup> Giri, B.C.

<sup>6</sup> Sharma, S.

<sup>7</sup> Ruimin, M.

<sup>8</sup> Lifei, Y.

<sup>9</sup> Maozhu, J.

<sup>10</sup> Peiyu, R.

<sup>11</sup> Zhihan, L.

<sup>12</sup> Cardoso, S.

<sup>13</sup> Relvas, S.

<sup>14</sup> Chen, S. P.

<sup>15</sup> Chang, P. C.

<sup>16</sup> Salema, M.

<sup>17</sup> Barbosa-Póvoa, A.

<sup>18</sup> Novais, A. Q.

جدول ۲. دسته بندی تحقیقات بر اساس ویژگی ها

| مطالعه موردی | روش حل       | راه حل      |         |      | دوره  |      | محصول |      | پیشینه ظرفیت | ساختار شبکه |       |       | پارامترها |         | نویسنده                         |
|--------------|--------------|-------------|---------|------|-------|------|-------|------|--------------|-------------|-------|-------|-----------|---------|---------------------------------|
|              |              | فرا ابتکاری | ابتکاری | دقیق | کوتاه | بلند | کوتاه | بلند |              | پیشرو       | پس رو | پیشرو | فازی      | احتمالی |                                 |
| *            | سیمپلکس      |             |         |      |       | *    | *     |      | *            |             |       | *     |           | *       | تسیاکیس و همکاران (۲۰۰۱)        |
|              | LR           |             |         | *    | *     |      |       | *    |              |             |       | *     |           | *       | آقضاف (۲۰۰۵)                    |
| *            | گمز          |             |         |      |       | *    | *     |      |              |             | *     |       |           | *       | لیستس و دکر (۲۰۰۵)              |
| *            | ABD, SAA     |             |         | *    |       | *    | *     |      |              |             |       | *     |           | *       | سانتوسو و همکاران (۲۰۰۵)        |
|              | GA           |             |         | *    |       | *    |       | *    | *            |             | *     |       |           | *       | لیکنز و وندال (۲۰۰۷)            |
|              | B&C          |             |         | *    |       | *    |       | *    |              | *           |       |       |           | *       | لیستس (۲۰۰۷)                    |
| *            | B&B          |             |         | *    |       | *    | *     |      |              |             | *     |       |           | *       | سالما و همکاران (۲۰۰۷)          |
| *            | مبتنی بر SAA | *           |         |      |       | *    | *     |      |              | *           |       |       |           | *       | چوینارد و همکاران (۲۰۰۹)        |
|              | ابتکاری      |             |         |      | *     |      | *     |      |              |             | *     |       |           | *       | لی و دانگ (۲۰۰۹)                |
|              | اکسپرس SP    |             |         |      | *     |      | *     |      |              | *           |       |       |           | *       | السايد و همکاران (۲۰۱۰)         |
| *            | گمز          | *           |         |      |       | *    |       | *    |              |             | *     |       |           | *       | کارا و اونوت (۲۰۱۰)             |
|              | لینگو        |             |         |      |       | *    |       | *    | *            |             | *     |       |           | *       | پیشوایی و همکاران (۲۰۱۰)        |
|              | BD           |             |         | *    |       | *    | *     |      |              |             |       | *     |           | *       | بیدهندی و یوسف (۲۰۱۱)           |
| *            | BD           |             |         | *    | *     |      | *     |      |              |             |       | *     |           | *       | یو و گراسمن (۲۰۱۱)              |
|              | PM           |             |         | *    | *     |      |       | *    |              | *           |       |       | *         |         | وحدانی و همکاران (۲۰۱۲)         |
|              | سیمپلکس      |             |         |      |       | *    | *     |      |              | *           |       |       |           | *       | امین و ژانگ (۲۰۱۳)              |
|              | PGA          | *           |         |      |       | *    |       | *    |              | *           |       |       | *         |         | روغنیان و کمندانپور (۲۰۱۳)      |
|              | ABD, SAA     |             |         | *    |       | *    |       | *    | *            | *           |       |       |           | *       | پیشوایی و همکاران (۲۰۱۴)        |
|              | سیمپلکس      |             |         |      |       | *    | *     |      |              |             | *     |       |           | *       | سلیمانی و گویندان (۲۰۱۴)        |
|              | BD           |             |         | *    | *     |      | *     |      | *            | *           |       |       |           | *       | خاتمی، ماهوتچی و فراهانی (۲۰۱۵) |

GA: Genetic Algorithm; LR: Lagrangian Relaxation; ABD: Accelerated Benders' Decomposition; SAA: Sample Average Approximation; B&B: Branch and Bound; BD: Benders' Decomposition; B&C: Branch and Cut; PM: Possibilistic Method; PGA: Priority-based Genetic Algorithm.

یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای طراحی یک شبکه چند دوره‌ای توسط لی و دانگ<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) ارائه شد که عدم قطعیت در تقاضا در جریان رو به جلو و در تامین برای جریان برگشتی از مشتریان در نظر گرفته شده بود. چون تکنیک‌های ریاضی بهینه سازی در سائز و پیچیدگی محدودیت دارند اکثر نویسندگان بر اساس رویکرد شبیه‌سازی انیلینگ از الگوریتم‌های ابتکاری استفاده نموده‌اند. یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی خطی مختلط عدد صحیح (سناریو محور) برای یک CLSC تک دوره‌ای و چند محصوله که شامل چند کارخانه، مرکز جمع آوری و بازار تقاضا بود را امین و ژانگ<sup>۲</sup> (۲۰۱۳) ارائه نمودند. این مدل تقاضا و بازگشت را به عنوان پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفته و در تابع هدف آن فاکتورهای زیست محیطی را لحاظ نموده است. کاردوسو<sup>۳</sup> و باربوسا پووا (۲۰۱۳)، یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی و برنامه‌ریزی CLSC ارائه دادند که توسعه ظرفیت و حمل و نقل پویا در شرایط عدم قطعیت در تقاضای محصول بصورت درخت سناریو بررسی شده است.

جدول ۲ بطور خلاصه تحقیقاتی که بصورت همزمان زنجیره تامین رو به جلو و معکوس را با عدم قطعیت بررسی کرده اند را نشان می‌دهد.

در تحقیق انجام شده پورمهدی، پایدار و اسدی (۲۰۲۰) مدلی از زنجیره تامین حلقه بسته پایدار با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و جریان برگشت با رویکرد سناریو محور بررسی شده است. در این مدل دید زیست محیطی مصرف آب و تولید گاز کربنیک وجود داشته و تاثیر تغییر تکنولوژی تولید بر پایداری زنجیره تامین نیز بررسی شده است. مدل ارائه شده یک مدل چند هدفه خطی با هدف بهینه سازی زنجیره تامین حلقه بسته فولاد بوده که عدم قطعیت در آن بواسطه سناریوها مدل شده اند. در پژوهش انجام شده توسط فرخ، آذر، جندقی، و احمدی (۲۰۱۷) طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با عدم قطعیت ترکیبی با بکارگیری برنامه‌ریزی تصادفی فازی بررسی شده که دو منبع برای عدم قطعیت بررسی شده است. دو منبع عدم قطعیت با احتمال وقوع و مقدار پارامتر به این صورت تعریف شده اند که برخی از پارامترهای غیر قطعی می‌توانند بر اساس سناریوهای آینده و بر پایه احتمال وقوعشان در نظر گرفته شوند و مقدار این پارامترها در سناریوها عموماً غیر دقیق و بر اساس توابع احتمالی می‌توانند مطرح شوند که در مدل به عنوان تغییرپذیری سناریو و تغییر پذیری احتمالی در نظر گرفته شده اند. در مقاله قلی زاده و فضل الله تبار (۲۰۲۰) یک زنجیره تامین سبز حلقه بسته در صنعت ذوب با در نظر گرفتن مخاطرات زیست محیطی بررسی شده است. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در دنیای واقعی، یک بهینه سازی استوار در نظر گرفته شده و عدم قطعیت در تقاضا با سه سناریو بررسی شده است. در این پژوهش مکان فیزیکی تاسیسات ثابت و از قبل مشخص در نظر گرفته شده و با توجه به اینکه مدل ریاضی مطرح شده زمانبر بوده به عنوان روش حل از یک الگوریتم ژنتیک بهبود یافته استفاده شده است. در پژوهش ژن، هانگ و ونگ<sup>۴</sup> (۲۰۱۹) توسعه یک زنجیره تامین حلقه بسته با دید توأم بودن سبز و پایداری با در نظر گرفتن تقاضای غیر قطعی بررسی شد. یک مدل دو هدفه، کاهش گاز کربنیک و هزینه کل ارائه شد. با یک رویکرد سناریو محور تقاضای غیر قطعی در مدل برنامه‌ریزی تصادفی مدل‌سازی شد که اعتبار و کارایی مدل نیز با داده‌های تصادفی بررسی شده

<sup>1</sup> Lee, D., Dong, M.

<sup>2</sup> Zhang, G.

<sup>3</sup> Cardoso, S.

<sup>4</sup> Zhen, L., Huang, L., Wang, w.



است. در مقاله ارائه شده المراج و تفالیس<sup>۱</sup> (۲۰۲۰) یک مدل چند دوره ای با عدم قطعیت در کیفیت تولیدات ارائه شده است. فرموله بندی استوار قابل تنظیم وابسته ارائه شده بر اساس "صبر کن و ببین" ارائه شده که بودجه پویا نیز برای مدل کردن رفتار تقاضای بازار در طول زمان به عنوان عدم قطعیت را شامل شده است. هدف مدل کمینه کردن هزینه شبکه زنجیره تامین بوده که با مثال های عددی روشن شد. در مقاله ارائه شده کیم، چانگ، کانگ، و جیونگ<sup>۲</sup> (۲۰۱۸) عدم قطعیت در تقاضا و جریان برگشتی در نظر گرفته شده که با مدل سازی استوار زنجیره تامین حلقه بسته بررسی شده است. یک مدل بهینه سازی عدد صحیح مختلط در کنار یک مدل استوار برای غلبه بر عدم قطعیت ناشی از تقاضا و قطعات برگشتی در صنعت مد (fashion) ارائه شده که در این مدل ساده سازی شده و مدل استوار با یک عدم قطعیت در شرایط خاص معادل مدل با شرایط عدم قطعیت متعدد لحاظ شده است. با استفاده از مثال های عددی شبیه سازی صورت گرفته و جوابگویی مدل بررسی شده و نشان داده شده از مدل ها قطعی جواب بهتری ارائه داده است.

### جدول ۳. مرور ادبیات تحقیقات اخیر (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰)

| مقاله                           | توسعه مدل در محیط |           |                    | هدف     |            |      | روش حل |     |                                                             | آزمون |             |
|---------------------------------|-------------------|-----------|--------------------|---------|------------|------|--------|-----|-------------------------------------------------------------|-------|-------------|
|                                 | قطعی              | عدم قطعیت | مدل سازی عدم قطعیت | اقتصادی | زیست محیطی | بهره | زمان   | حجم | نرم افزار بهینه سازی                                        | عددی  | مورد مطالعه |
| سلیمانی و کنان <sup>۳</sup>     | ×                 |           |                    | ×       |            |      |        |     | GA and PSO vs. CPLEX and MATLAB                             | ×     |             |
| چن و همکاران <sup>۴</sup>       | ×                 |           |                    | ×       |            |      |        |     | GA vs. LINGO                                                | ×     |             |
| گارگ و همکاران <sup>۵</sup>     | ×                 |           |                    | ×       | ×          |      | ×      |     | LINGO                                                       |       | ×           |
| داس و پوسیناسی <sup>۶</sup>     |                   | ×         | SP                 | ×       | ×          |      | ×      |     | LINGO                                                       | ×     |             |
| وحدانی و محمدی <sup>۷</sup>     |                   | ×         | Hybrid SP/RP       | ×       |            | ×    |        |     | SAICA vs. GAMS                                              | ×     |             |
| سوبولان و همکاران <sup>۸</sup>  |                   | ×         | Hybrid SP/RP       | ×       |            | ×    | ×      |     | CPLEX                                                       |       | ×           |
| یی و همکاران <sup>۹</sup>       | ×                 |           |                    | ×       |            |      | ×      |     | LINGO                                                       |       | ×           |
| ذحل و سلیمانی <sup>۱۰</sup>     | ×                 |           |                    | ×       | ×          |      |        |     | Ant colony vs. LINGO                                        | ×     |             |
| ترابی و همکاران <sup>۱۱</sup>   |                   | ×         | FP                 | ×       |            |      | ×      |     | CPLEX                                                       | ×     |             |
| شکوه و همکاران <sup>۱۲</sup>    |                   | ×         | Hybrid SP/RP       | ×       |            |      |        |     | Latin Hypercube Sampling and Benders decomposition in CPLEX | ×     |             |
| زاله چن و همکاران <sup>۱۳</sup> |                   | ×         | Hybrid FP/RP       | ×       | ×          | ×    |        |     | SGA                                                         | ×     | ×           |
| طلایی و همکاران <sup>۱</sup>    |                   | ×         | Hybrid             | ×       | ×          |      | ×      |     |                                                             | ×     |             |

<sup>1</sup> Almaraj, I., Trafalis, T.

<sup>2</sup> Kim, J., Chung, B., Kang, Y., Jeong, B

<sup>3</sup> Soleimani and Kannan (2015)

<sup>4</sup> Chen et al. (2015)

<sup>5</sup> Garg et al. (2015)

<sup>6</sup> Das and Posinasetti (2015)

<sup>7</sup> Vahdani and Mohammadi (2015)

<sup>8</sup> Subulan et al. (2015a)

<sup>9</sup> Yi et al. (2016)

<sup>10</sup> Zohal and Soleimani (2016)

<sup>11</sup> Torabi et al. (2016)

<sup>12</sup> Keyvanshokoo et al. (2016)

<sup>13</sup> Zhalchian et al. (2016)

|   |   |                                              |   |   |   |   |   | FP/RP              |   |   |                                     |
|---|---|----------------------------------------------|---|---|---|---|---|--------------------|---|---|-------------------------------------|
| × |   | CPLEX                                        |   | × |   |   | × |                    |   | × | اوزیلان و همکاران <sup>۲</sup>      |
| × |   | GAMS                                         |   | × |   |   | × |                    |   | × | امین و همکاران <sup>۳</sup>         |
|   | × | MOPSO and<br>NSGA-II                         | × |   | × |   | × |                    |   | × | کدامبالا و همکاران <sup>۴</sup>     |
|   | × | CPLEX                                        | × |   |   |   | × | SP                 | × |   | جیحونیان و همکاران <sup>۵</sup>     |
|   | × | GA vs. LINGO                                 | × |   | × |   | × | FP                 | × |   | سلیمانی و همکاران <sup>۶</sup>      |
|   | × | CPLEX                                        |   | × |   |   | × | SP                 | × |   | محمد و همکاران <sup>۷</sup>         |
|   | × | CPLEX                                        |   | × |   | × | × | Hybrid<br>SP/FP/RP | × |   | فرخ و همکاران <sup>۸</sup>          |
|   | × | Benders<br>decomposition in<br>CPLEX         | × |   |   |   | × | Hybrid<br>SP/RP    | × |   | سیسخت و ریان <sup>۹</sup>           |
| × |   |                                              |   | × |   |   | × |                    |   | × | طالعزاده و همکاران <sup>۱۰</sup>    |
|   | × | MATLAB                                       |   | × |   | × | × |                    |   | × | حسنو و همکاران <sup>۱۱</sup>        |
|   | × | GAMS                                         |   | × | × | × | × |                    |   | × | زربخش نیا و همکاران <sup>۱۲</sup>   |
|   | × | GAMS                                         |   | × | × | × | × |                    |   | × | پاکسوی و همکاران <sup>۱۳</sup>      |
|   | × | Tabu search                                  | × |   |   | × | × | SP                 | × |   | ژن و همکاران <sup>۱۴</sup>          |
|   | × | Fixed-and-relax<br>decompositionvs.<br>CPLEX | × |   |   |   | × | SP                 | × |   | باپتستا و همکاران <sup>۱۵</sup>     |
|   | × | GRASP and PSO<br>vs. GAMS                    | × |   |   |   | × | SP                 | × |   | حاجپور و همکاران <sup>۱۶</sup>      |
|   | × | LINGO                                        |   | × |   |   | × | RP                 | × |   | الماراج و ترافالیس <sup>۱۷</sup>    |
|   | × | WOA                                          | × |   |   |   | × | Hybrid<br>FP/RP    | × |   | قهرمانی نهر و همکاران <sup>۱۸</sup> |
| × |   | CPLEX                                        |   | × | × |   | × | RP                 | × |   | ساعدینیا و همکاران <sup>۱۹</sup>    |
| × |   | CPLEX                                        |   | × | × |   | × | SP                 | × |   | احمدی و امین <sup>۲۰</sup>          |
| × |   | NEOS                                         |   | × | × |   | × | FP                 | × |   | عصیم و همکاران <sup>۲۱</sup>        |
| × |   | LINGO                                        |   | × | × | × | × | FP                 | × |   | درباری و همکاران <sup>۲۲</sup>      |
|   | × | CPLEX                                        |   | × |   | × | × | Hybrid<br>FP/RP    | × |   | توسرکانی و امین <sup>۲۳</sup>       |
|   | × | SAAGP in LINGO                               | × |   |   | × | × | Hybrid<br>FP/RP    | × |   | یو و سولونگ <sup>۲۴</sup>           |

SP: stochastic programming; FP: fuzzy programming; RP: robust programming; GA: genetic algorithm; PSO: particle swarm optimization; SAICA: self-adaptive imperialist competitive algorithm; SGA: self-adaptive genetic algorithm; MOPSO: multi-objective particle swarm optimization; NSGA-II: non-dominant sorted genetic algorithm; GRASP: Greedy randomized adaptive search procedure; WOA: whale optimization algorithm; SAAGP: sample average approximation based goal programming.

<sup>1</sup> Talaei et al. (2016)

<sup>2</sup> Ozceylan et al. (2017)

<sup>3</sup> Amin et al. (2017)

<sup>4</sup> Kadambala et al. (2017)

<sup>5</sup> Jeihoonian et al. (2017)

<sup>6</sup> Soleimani et al. (2017)

<sup>7</sup> Mohammed et al. (2019)

<sup>8</sup> Farrokh et al. (2018)

<sup>9</sup> Haddadsisakht and Ryan (2018)

<sup>10</sup> Taleizadeh et al. (2019)

<sup>11</sup> Hasanov et al. (2019)

<sup>12</sup> Zarbakhshnia et al. (2019)

<sup>13</sup> Paksoy et al. (2019)

<sup>14</sup> Zhen et al. (2019)

<sup>15</sup> Baptista et al. (2019)

<sup>16</sup> Hajipour et al. (2019)

<sup>17</sup> Almaraj and Trafalis (2019)

<sup>18</sup> Ghahremani- Nahr et al. (2019)

<sup>19</sup> Saedinia et al. (2019)

<sup>20</sup> Ahmadi and Amin (2019)

<sup>21</sup> Asim et al. (2019)

<sup>22</sup> Darbari et al. (2019)

<sup>23</sup> Tosarkani and Amin (2019)

<sup>24</sup> Yu and Solvang(2020)

## تعریف مسأله

زنجیره تامین حلقه بسته دارای سه فرایند عمده می باشد: تولید و انبار داری، حمل و نقل و توزیع، و تولید مجدد. در هر کدام از این فرایندها، یک یا چند موجودیت<sup>۱</sup> می توانند فعال باشند: کارخانه ها، انبارها، مراکز توزیع، مشتریان، مراکز جمع آوری، مراکز بازیافت، و ... . در هر یک از این تاسیسات کالاها و مواد متعددی می توانند در حال گذر و همزمان در حال تبدیل شدن باشند. در این مقاله پنج سطح کارخانه، انبار، مشتری، مراکز بازیافت و مراکز دفع کامل در نظر گرفته شده است. مسئله بصورت کلی به شکل زیر قابل تعریف است:

## ورودی های مدل:

- یک ساختار برای جانمایی موجودیت ها
- صورت مواد اولیه مورد نیاز محصولات
- زمان سفر بین هر دو گره شبکه
- حداقل زمان مصرف برای هر محصول بازگشتی
- حداقل و حداکثر ظرفیت تولید و جمع آوری
- رابطه بین محصولات رفت و بازگشتی
- میزان تقاضای مشتریان
- هزینه حمل و نقل بین هر دو موجودیت
- هزینه جمع آوری یا تولید برای هر موجودیت
- و تعیین می شوند:
- ساختار شبکه
- سطح تولید و انبار
- هزینه سرمایه گذاری
- حداقل و حداکثر ظرفیت در جریان بین گره ها
- نسبت حداکثر دفع کامل
- نسبت بازگشتی از محصولات اصلی
- حداکثر ظرفیت انبارها
- موجودی اولیه انبار
- هزینه تقاضای ارضا نشده و مرجوعی
- هزینه انبارداری هر واحد در هر موجودیت
- هزینه دفع برای هر واحد
- میزان جابجایی در جریان ها
- تقاضای ارضا نشده و میزان مرجوعی ها

و هدف بر بیشینه شدن سود کلی زنجیره تامین می باشد.

مدل های زنجیره تامین در رویکرد سنتی معمولاً به این صورت در نظر گرفته می شوند که مشتریانی در محل های خود وجود دارند که تقاضایشان می باید ارضا گردد. در این مدل نیز مجموعه ای از مشتریان (با تقاضا و بازگشت) در نظر گرفته شده اند، با این تفاوت که مشتریان ممکن است برای عضویت در زنجیره تامین انتخاب شوند و یا نشوند و حتی در صورت انتخاب نیز ممکن است تنها قسمتی از تقاضای آنها برآورده شود. البته هزینه های پناالتی برای مشتریانی که کلاً انتخاب نشده اند و مشتریانی که قسمتی از تقاضای آنها برآورده نشده اعمال می گردد. در بخش توزیع، تقاضای مشتریان از طریق انبارها که می توانند کارهای تکمیلی روی محصول انجام دهند برآورده می شود. در این بخش هزینه حمل و نقل و هزینه انبارداری اتفاق می افتد.

بازگشتی ها از مشتریان در مراکز جمع آوری تجمع می گردند که بعد از فعالیتهای دمونتاژ و بازرسی، برخی از اجزا و موادی که مناسب استفاده مجدد باشند، به کارخانه ها عودت داده می شوند تا با یک سری فرایندها، مجدداً به زنجیره تولید وارد شوند. سایر قطعات که در شرایط خوبی قرار ندارند به موجودیت های دیگر برای فرایندهای بهبود بیشتر و یا به مراکز دفع ارسال می گردند.

<sup>1</sup>. Entity

برخی از مفروضات مدل به شرح ذیل است:

- محصولات جدید و تولید مجدد شده قابل تمایز نیستند.
- تامین مواد یا محصولات جدید دارای یک حد پایین و بالا می‌باشد.
- کلیه تاسیسات که می‌توانند محصولی را ذخیره کنند یک بیشینه ظرفیت انبار دارند.
- حجم بازگشتی‌ها کسری از محصولات تامین شده در جریان رفت است.
- زمان سفر به صورت تعداد واحد زمان کوتاه مدت برای حرکت یک محصول از یک مبدا به مقصد خود تعریف شده و بین سطوح مختلف زنجیره مدل شده است.
- زمان تبدیل محصول و زمان مصرف محصول به صورت کمینه تعداد واحدهای زمان کوتاه مدت که محصول در آن تولید (در هر تاسیسات) یا مصرف (در هر مشتری) می‌شود در نظر گرفته شده است.
- هزینه بازگشتی‌ها بر اساس کیفیت مختلف آنها متفاوت خواهد بود.

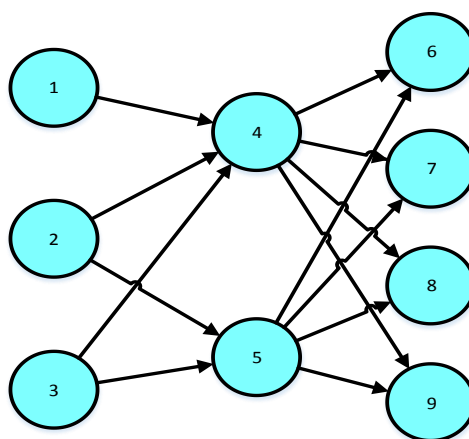
### طراحی مدل

در این بخش با توجه به روش کلی حل مسأله (برنامه ریزی ریاضی) در فضای عدم اطمینان، به مدل‌سازی ریاضی مسأله در این شرایط پرداخته می‌شود.

### نمایش زنجیره تامین حلقه بسته

در این تحقیق شماتیک گراف برای نمایش ساختار CLSC در نظر گرفته شده است (نمودار ۱) که از کارخانه به مشتری و برگشت از مشتری به کارخانه (همان کارخانه یا کارخانه دیگر) استفاده شده است. هر گره نشان دهنده یک موجودیت در زنجیره تامین (مانند کارخانه، انبار، مشتری، و ...) بوده و هر بردار بین دو گره نشان دهنده جریان موجود بین دو موجودیت می‌باشد.

زنجیره تامین با گراف  $G=(V,A)$  با مجموعه گره‌های  $(V)$  و مجموعه بردارهای  $(A)$  را با  $n$  سطح در نظر بگیرید.  $V$  به این صورت قابل تعریف است که:  $V = \bigcup_{i=1}^n V_i$ .  $V_i \cap V_j = \emptyset$  که  $V_i$  زیر مجموعه‌ای از گره‌ها بوده که به سطح  $i$  تعلق دارند. و در این صورت:  $A_i = V_i \equiv V_{i+1}$  مجموعه بردارهایی هستند که  $V_i$  را به  $V_{i+1}$  متصل می‌کنند. در نظر داشته باشید که نیازی نیست که  $V_i$  به تمامی گره‌های  $V_{i+1}$  متصل باشد و بنابرین  $\equiv$  صرفاً ارتباطات بالقوه را نشان خواهد داد. در نتیجه:  $A = \bigcup_{i=1}^{n-1} A_i$ .  $A_i \cap A_j = \emptyset$



نمودار ۱: نمای گراف از شبکه زنجیره تامین

یکی دیگر از شرایط مطرح شده در این مدل طراحی یک زنجیره تامین چند محصوله است. بنابراین  $M$  را به عنوان مجموعه محصولات در نظر گرفته و  $\bar{A}_i = M_i \equiv A_i$  به عنوان بسط زیرمجموعه‌ای از بردارها بیان کننده زوج جریان - محصول خواهد بود.  $M$  نیز همانند  $A$  تعریف می‌شود.  $M = \bigcup_{i=1}^n M_i$ .  $M_i \cap M_j = \emptyset$ .

برای هر گرهی دو دسته محصول وجود دارد (محصولات ورودی و محصولات خروجی) که با توجه به محل قرار گیری گره در ابتدای بردار و یا در انتهای بردار معین می‌شوند. بنابراین دو زیر مجموعه از گره‌ها یکی برای محصولات ورودی  $\bar{V}_i$  و یکی برای محصولات خروجی  $\bar{V}_i$  تعریف می‌شود:  $\bar{V}_i = M_i \equiv V_i$  و  $\bar{V}_i = M_{i+1} \equiv V_i$  در نتیجه ساختار زنجیره تامین را می‌توان بصورت یک گراف  $\bar{G} = (V, \bar{A})$  تعریف کرد که  $V$  مجموعه کلیه موجودیت‌ها و  $\bar{A} = \bigcup_{i=1}^{n-1} \bar{A}_i$  مجموعه بردارهای بسط داده شده باشد به عنوان مثال مجموعه‌ای از جفت محصولات - جریان.

### مدل سازی زمان

مدل ایجاد شده باید در دو حوزه تصمیم‌سازی کند: حوزه طراحی و حوزه برنامه‌ریزی. در مرحله طراحی، ساختار زنجیره تامین حلقه بسته تعیین می‌گردد که در واقع تصمیم ایجاد یا عدم ایجاد موجودیت‌ها اتخاذ می‌شود. این تصمیم برای یک دوره زمانی (افق زمانی) اتخاذ می‌گردد. مرحله برنامه‌ریزی شامل زمان‌های کوتاه‌تری می‌شود. در طول افق زمانی، دو مقیاس زمانی (به هم مرتبط) در نظر گرفته می‌شود. یک زمان بلندتر (ماکرو) برای بخش‌بندی افق زمانی که تقاضا و مقادیر بازگشتی در نظر گرفته می‌شوند و یک زمان کوتاه‌تر (میکرو) که برنامه‌ریزی با جزئیات بیشتر برای معین شدن تقاضا و مقادیر برگشتی را مقدور می‌سازد. به عنوان مثال در یک افق پنج ساله، مقیاس ماکرو یک ساله در نظر گرفته شده و سپس به بازه‌های شش ماهه تقسیم بندی شده است (میکرو).  $t \in T$  عضوی از مجموعه ماکرو زمان‌ها و  $t \in \bar{T}$  به عنوان عضوی از مجموعه میکرو زمان‌ها در نظر بگیرید. برای هر  $t \in T$ ،  $n$  تا از  $\bar{T}$  می‌تواند وجود داشته باشد. به منظور ایجاد رابطه بین دو مقیاس زمانی، تابعی تعریف می‌شود که یک واحد زمانی را به واحد زمانی در گذشته مرتبط می‌سازد. این تابع ارتباط بین دو واحد زمانی مختلف را در یک محدودیت ممکن می‌سازد. وقتی به این تابع نیاز

است که اتفاقی در زنجیره در یک بازه زمانی آغاز شده و تا بازه بعدی ادامه یابد.  $t \in T$  و  $t' \in T'$  را در نظر بگیرید، فرض کنید  $(t, t')$  لحظه فعلی باشند. حال می‌خواهیم زمان فعلی را به زمانی در  $\tau$  میکرو زمان قبل مرتبط کنیم. تابع بازگشتی  $\gamma$  به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\gamma(t, t' - \tau) = \begin{cases} (t, t' - \tau) & \text{if } t' - \tau \geq 0. \\ (t - \omega, \omega n + t' - \tau) & \text{if } t' - \tau < 0 \wedge t \geq \omega \end{cases}$$

که  $\omega \in \mathbb{Z}$  کوچکترین عدد صحیح بزرگتر یا مساوی  $\frac{\tau - t}{n}$  و  $\omega = \lceil \frac{\tau - t}{n} \rceil$  و  $n = [T']$

### مدل سازی زنجیره

زنجیره تامین دارای ساختار پنج سطحی می‌باشد که در ادامه به تعاریف مورد نیاز پرداخته می‌شود.

مجموعه‌ها یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این مدل سازی هستند که تعریف ساختار کلی شبکه را ممکن می‌سازند. تحت این ساختار مجموعه‌ای از معادلات رو به جلو کلیه محدودیت‌هایی که باید ارضا شوند را تعریف می‌کنند.

هر سطح از زنجیره تامین با یک موجودیت تعریف شده است (به عنوان مثال کارخانه، انبار، مشتری و ...) بنابراین مجموعه گره‌ها  $V$  به زیر مجموعه‌هایی که هر یک اشاره به یک سطح خاص دارند بخش‌بندی می‌شود. همچنین هیچ موجودیتی نمی‌تواند به دو سطح (زیر مجموعه) تعلق داشته باشد.

$$\begin{aligned} & \bullet I_f: \text{نقاط بالقوه برای احداث کارخانه} \quad i \in I_f \subseteq V \quad \bullet I_c: \text{نقاط بالقوه مشتری} \quad i \in I_c \subseteq V \\ & \bullet I_o: \text{نقاط بالقوه برای احداث مراکز دفع کامل} \quad i \in I_o \subseteq V \quad \bullet I_d: \text{نقاط بالقوه برای احداث مراکز بازیافت} \quad i \in I_d \subseteq V \\ & \bullet I_w: \text{نقاط بالقوه برای احداث انبار} \quad i \in I_w \subseteq V \end{aligned}$$

موجودیت  $Y_s$  به عنوان تامین کننده مواد اولیه برای  $I_f$  ها که در واقع کسری مواد اولیه برگشتی را تامین می‌کند. در اینجا فرض بر صفر بودن هزینه حمل و نقل و زمان جابجایی از این موجودیت تا کارخانه هاست.  $Y_s \subseteq V$

مجموعه  $I = I_f \cup I_w \cup I_d$  شامل کلیه موجودیت‌هایی است که در صورت افتتاح یا استفاده هزینه ثابتی را به همراه خواهند داشت. البته مشتریان نیز ممکن است به عنوان بخشی از شبکه انتخاب بشوند یا نشوند که برای این حالت‌ها هزینه ثابتی لحاظ نمی‌گردد.

موجودیت‌ها و محصولات به یکدیگر مرتبط هستند. لذا موجودیت‌های توسعه یافته به صورت زوج محصول - موجودیت تعریف می‌شوند. با توجه به اینکه دو موجودیت در دو سطح متوالی ممکن است به یک محصول ربط داشته باشند دو مجموعه متفاوت باید تعریف شوند. لذا زیرمجموعه‌های  $M$  را که هر یک به محصول متفاوتی اشاره دارند در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} & \bullet M_f: \text{محصولات خروجی از کارخانه ها} \quad m \in M_f \subseteq M \quad \bullet M_w: \text{محصولات خروجی از انبار ها} \quad m \in M_w \subseteq M \\ & \bullet M_c: \text{محصولات خروجی از مشتریان} \quad m \in M_c \subseteq M \quad \bullet M_d: \text{محصولات خروجی از مراکز تفکیک} \quad m \in M_d \subseteq M \end{aligned}$$

$$M_d \subseteq M \quad m \in M_s \text{ : محصولات خروجی از تامین کننده} \\ M_s \subseteq M$$

موجودیتهای توسعه یافته به صورت مجموعه‌های زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} \check{V}_d &= \{(m, i): m \in M_d \wedge i \in I_d\} & \check{V}_d &= \{(m, i): m \in M_d \wedge i \in I_d\} \\ \check{V}_s &= \{(m, i): m \in M_s \wedge i \in I_s\} & \check{V}_s &= \{(m, i): m \in M_s \wedge i \in I_s\} \\ \check{V}_d &= \{(m, i): m \in M_d \wedge i \in I_d\} \end{aligned}$$

دو نوع محصول برای هر گره قابل تصور است. در برخی محدودیت‌ها به تعریف رابطه بین موجودیت و محصولات ورودی نیاز خواهد بود. بنابراین برای موجودیت‌های کارخانه و مشتریان دو مجموعه محصولات ورودی به صورت زیر قابل تعریف خواهد بود.

$$\begin{aligned} \hat{V}_f &= \{(m, i): m \in M_s \wedge i \in I_f\} \cup \{(m, i): m \in M_d \wedge i \in I_f\} \\ \hat{V}_c &= \{(m, i): m \in M_w \wedge i \in I_c\} \end{aligned}$$

همچنین مجموعه  $\bar{V} = \hat{V}_f \cup \check{V}_w \cup \check{V}_d \cup \check{V}_c$  برای تعریف تابع هدف مورد نیاز خواهد بود.

جریان‌ها در گراف زنجیره تامین ارتباط دهنده سطوح مختلف زنجیره هستند که بوسیله زوج موجودیت - موجودیت تعریف می‌شوند. مدل دارای چهار سطح است که در نتیجه شبکه جریان‌ها بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{aligned} A_{fw} : A_{f1} &= \{(i, j): i \in I_f \wedge j \in I_w\} & A_{cd} : A_{d1} &= \{(i, j): i \in I_c \wedge j \in I_d\} \\ A_{wc} : A_{f2} &= \{(i, j): i \in I_w \wedge j \in I_c\} & A_{df} : A_{d2} &= \{(i, j): i \in I_d \wedge j \in I_f\} \end{aligned}$$

کلیه جریان‌های شبکه را  $A$  در نظر بگیرید  $A = \bigcup_{k \in K} A_k$  و  $K = \{f_1, f_2, d_1, d_2\}$ . تامین کنندگان و مراکز دفع دو بخش دیگر در نظر گرفته شده در این مدل هستند که برای هر کدام یک موجودیت مجازی در نظر گرفته شده که بتوان جریان بین آنها را به این صورت نشان داد.

در نظر گرفته شده اند. جریان تامین کننده بصورت یک جریان از موجودیت موهومی و دومی بصورت جریان از هر مرکز تفکیک به یک مرکز دفع مدل شده است.

همانند موجودیت‌ها، جریان‌ها نیز با در نظر گرفتن محصولات می‌توانند بصورت توسعه یافته تعریف شوند. همانطوری که قبلاً هم گفته شد هر جریان با یک محصول مرتبط بوده و بنابراین مجموعه زیر قابل تعریف می‌باشد:

$$\begin{aligned} F_{f1} &= \{(m, i, j): m \in M_f \wedge (i, j) \in A_{f1}\} & F_{d1} &= \{(m, i, j): m \in M_c \wedge (i, j) \in A_{d1}\} \\ F_{f2} &= \{(m, i, j): m \in M_w \wedge (i, j) \in A_{f2}\} & F_{d2} &= \{(m, i, j): m \in M_d \wedge (i, j) \in A_{d2}\} \end{aligned}$$

و با اضافه شدن تامین کننده و مرکز دفع به مدل دو مجموعه زیر نیز اضافه می‌شوند:

$$F_d = \{(m, i, j): m \in M_d \wedge (i, j) \in A_o\} \quad F_s = \{(m, i, j): m \in M_s \wedge (i, j) \in A_s\}$$

ساختار شبکه بصورت  $F = \bigcup_{k \in K} F_k$  و  $K = \{f_1, f_2, d_1, d_2, s, d\}$  تعریف می‌گردد.

$t'$  را به عنوان زمان کوتاه (میکرو) و بلند مدت (ماکرو) در نظر بگیرید. دو مجموعه  $T$  و  $T'$  به این صورت تعریف می‌کنیم:

زمانی را تعریف می‌کند.  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  و  $T' = \{t'_1, t'_2, \dots, t'_n\}$  و در نهایت  $\bar{T} = \{(t, t') : t \in T \wedge t' \in T'\}$  مجموعه کلیه واحدهای

### پارامترها

$\tau_{ij}$ : زمان سفر لازم بین دو موجودیت  $i$  و  $j$   $\phi_m$ : زمان فرآیند تولید برای محصول  $m$

$\gamma_{mi} = f(\tau_{ij}, \phi_m)$ : تابع توأم زمان سفر و فرآیند که حاصلش زودترین زمان کوتاه ممکن برای جریان محصول  $m \in M$

### سناریوها

$R$ : سطوح دسته بندی برگشتی محصول نهایی  $r \in R$  (مثلا به صورت خوشبینانه و بدبینانه)  
 $G$ : خروجی فرآیند تفکیک و مرتب سازی  $g \in G$  بر اساس  $Q$  درجه کیفی (ترکیب دسته بندی‌های کیفی متفاوت در هر بسته خروجی)

$Q$ : دسته بندی کیفیتی محصولات در نتیجه فرآیند مرتب سازی  $q \in Q$

$$\{(r, g) : r \in R \wedge g \in G\} : \Omega$$

### پارامترهای مستقل از زمان

$\alpha_m$ : هدف قانونی بازیافت تعیین شده برای محصول  $\beta_{m\bar{m}}$ : رابطه بین محصول  $m$  و  $\bar{m}$

$$\alpha_m \in [0, 1] \cdot m$$

$f_i$ : هزینه احداث موجودیت  $i \in I$

$S_{mi0}$ : موجودی اولیه محصول  $m$  در موجودیت  $i$  که  $c_i$ : هزینه از دست دادن مشتری بالقوه  $i \in I$

$g_i^p$  و  $g_i^s$ : بیشینه و کمینه تامین برای موجودیت  $i \in I$   $g_i^s$ : حداکثر ظرفیت انبارش موجودیت  $i \in I$

$P_g$ : احتمال وقوع خروجی  $g$  برای فرآیند رتبه بندی  $P_r$ : احتمال وقوع خروجی  $r$  برای سطح بازگشت

$C_0$ : قیمت خرید هر واحد از مواد اولیه  $M$  در کارخانه ها (با فرض ثابت بودن در طول دوره)

$Rf_{rm}$ : کسر بازگشتی محصول نهایی  $m \in M_c$  در سطح  $r$ . این پارامتر در سایر  $M$  ها برابر یک خواهد بود

### پارامترهای وابسته به زمان

$csl_{it}$ : سطح پاسخ برای مشتری  $i \in I_c$  برای زمان  $t$

$d_{mit}$ : تقاضای محصول  $m$  در موجودیت  $i$  دوره زمانی  $t$

$$i \in I_c$$

$C_{mi\bar{t}}^s$ : هزینه انبارداری به ازای واحد در موجودیت  $i$  در

زمان  $t$

$C_{mit}^u$ : هزینه متغیر تقاضای ارضا نشده یا مرجوعی محصول  $m$  به موجودیت  $i \in I_c$  برای زمان  $t$

$\vartheta_{m\bar{t}}$ : قیمت محصول  $m$  ( $m \in M_w$ ) در زمان  $t$

$C_{mij\bar{t}}$ : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول  $m$  از موجودیت  $i$  به موجودیت  $j$  در زمان  $t$



$cr_{qmi\bar{t}}$ : هزینه دسته کیفیتی  $q$  از محصولات برگشتی  $m$  از موجودیت  $i$  به موجودیت  $j$  در زمان  $t$   
 $fr_{gqmi\bar{t}}$ : کسر رده کیفیتی  $q$  در دسته بندی  $g$  از محصول  $m$  از موجودیت  $i$  ( $i \in I_d$ ) به موجودیت  $j$  ( $j \in I_f$ ) در زمان  $t$

### متغیرهای پیوسته

$X_{rgmi\bar{t}}$ : مقدار محصول  $m$  که از موجودیت  $i$  به موجودیت  $j$  در زمان  $t$  و تحت سناریوی  $(r, g)$  و با نرخ برگشت  $r$  و دسته بندی  $g$  حمل شده است.

$S_{rgmi\bar{t}}$ : مقدار محصول  $m$  که در موجودیت  $i$  در زمان  $t$  و تحت سناریوی  $(r, g)$  ذخیره شده است.

$U_{rgmi\bar{t}}$ : مقدار تقاضای ارضا نشده محصول  $m$  برای مشتری  $i$  در زمان  $t$  و تحت سناریوی  $(r, g)$

$Y_i$ : متغیر صفر و یک احداث یا عدم احداث (بکارگیری یا عدم بکارگیری) موجودیت  $I$

### فرمول بندی

مدل چند محصوله چند دوره‌ای برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP) سالما، باربوسا پووا و نوویس (۲۰۱۰) به منظور رویکرد فرموله‌بندی در این بخش برای مواجهه با دو منبع عدم قطعیت با بکارگیری چهارچوب مدل یک مرحله‌ای تصادفی ارائه شده است که یکی از معمول ترین چهارچوب‌های برنامه‌ریزی با عدم قطعیت است. در این مدل عدم قطعیت بواسطه یک مجموعه سناریوهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند که بیانگر چگونگی عملکرد در طول دوره زمانی برنامه‌ریزی با توجه به محدودیت‌های سطح کیفی و مقدار بازگشتی متفاوت خواهند بود. بنابراین برای انتظار وقوع هر سناریو یک احتمال اختصاص داده می‌شود.

در رویکرد سناریو محور عدم قطعیت ناشی از تعداد برگشتی‌ها که از سمت مشتریان به مراکز تفکیک ارسال می‌گردند بصورت  $R$  حالت متفاوت که احتمال وقوع هر یک  $P_r$  است در نظر گرفته می‌شود. هر یک از این حالت‌ها نشان دهنده حجم مشخصی از بازگشتی‌ها و یا کسر مشخصی از محصول نهایی می‌باشند.

از طرف دیگر عامل عدم قطعیت دوم کیفیت برگشتی‌هایی است که در نتیجه تفکیک در مراکز تفکیک حاصل شده و به کارخانه ارسال می‌شوند و به  $Q$  دسته متفاوت قابل بیان هستند. به عنوان مثال می‌توان فرض کرد که دسته‌بندی ورودی‌ها بر اساس سه گروه مختلف صورت می‌گیرد: خوب، متوسط، و بد. بنابراین کیفیت بازگشتی‌هایی که به کارخانه ارسال می‌شوند ترکیبی از این سه دسته و با درصدهای متفاوت خواهد بود که با عدم قطعیتی به آن نسبت داده شده و بصورت  $G$  خروجی مستقل که احتمال وقوع هر کدام از حالت‌ها  $P_g$  می‌باشد قابل تعریف هستند.

رویکرد بکارگرفته شده سناریوهای برای ترکیب نقاط مستقل  $r$  و  $g$  تعریف نموده ( $\Omega = \{(r, g)\}$ ) که با توجه به استقلال آنها احتمال هر سناریو بصورت  $P_r P_g$  خواهد بود چرا که منبع دو نوع عدم قطعیت، مستقل در نظر گرفته شده‌اند.

### تابع هدف

تابع هدف در نظر گرفته شده بیشینه کردن سود کلی زنجیره تامین (رابطه ۱) است. در ادامه رابطه‌های شکل دهنده تابع هدف را بررسی می‌نماییم:

هزینه تاسیس و یا بکارگیری از تاسیسات به عنوان هزینه‌های دست اول بوده که شامل کارخانه‌ها، انبارها، مراکز تفکیک و مراکز دفع می‌باشند. هزینه دیگر قابل توجه در این مدل هزینه پناستی مشتری از دست رفته و به عبارت بهتر در عدم ورود یک نقطه بالقوه از مشتریان (مانند یک شهر یا ...) در زنجیره تامین می‌باشد. این هزینه نیز مانند هزینه اول مستقل از سناریوها بوده و به عنوان هزینه دست اول در نظر گرفته می‌شود. هزینه حمل و نقل (برای مقدار کالای حمل شده) از جمله هزینه‌های دست دوم بوده که با سناریوی انتخابی مرتبط خواهد بود و در مدل با احتساب احتمال سناریو نمایش داده شده است. هزینه چهارم در این مدل مرتبط با محصولات دسته بندی شده ای است که به کارخانه ارسال می‌شوند. هزینه پناستی ارضای کسری از تقاضا در عبارت پنجم لحاظ شده است و هزینه پناستی هر گونه موجودی در هر موجودیتی بجز مشتری (عبارت ششم) که در نتیجه شامل  $\tilde{V}_c$  نخواهد بود. عبارت هفتم به منظور هزینه تامین کمبود مواد اولیه از تامین کننده  $Y_0$  در کارخانه‌ها بوده چراکه مقدار کالای بازیافت شده همیشه برای مصرف در دوره‌های بعدی کافی نبوده و کارخانه مجبور به تامین مواد اولیه می‌باشد. عبارت هشتم درآمد ناشی از فروش محصول نهایی تحویل داده شده به مشتریان تحت سناریوها می‌شود و به همین دلیل در مدل با ضرب در احتمال وقوع سناریو در نظر گرفته شده است.

در مجموع موارد فوق مدل توضیح داده شده به شرح ذیل است:

$$\begin{aligned} \text{Max } F = & - \sum_{i \in I} f_i Y_i - \sum_{m_i: (m, i) \in \tilde{V}_c} \sum_{t \in T} [c_i d_{mit} (1 - Y)] - \\ & \sum_{(r, g) \in \Omega} P_r P_g \left( \sum_{m_j: (m, j) \in F \setminus F_{d2}} \sum_{\bar{t}: (t, t') \in \bar{T}} c_{mj\bar{t}} X_{rgmj\bar{t}} + \right. \\ & \sum_{m_j: (m, j) \in F_{d2}} \sum_{\bar{t}: (t, t') \in \bar{T}} \sum_{q \in Q} c_{rjmj\bar{t}} f_{rgqmj\bar{t}} X_{rgmj\bar{t}} + \\ & \sum_{m_i: (m, i) \in \tilde{V}_c} \sum_{t \in T} c_{mit}^u U_{rgmit} + \sum_{m_i: (m, i) \in \bar{V} \setminus \tilde{V}_c} \sum_{\bar{t}: (t, t') \in \bar{T}} c_{mi\bar{t}}^s S_{rgmi\bar{t}} + \\ & \left. \sum_{m_j: (m, j) \in F_s} \sum_{\bar{t}: (t, t') \in \bar{T}} c_0 X_{rgmj\bar{t}} \right) + \\ & \sum_{(r, g) \in \Omega} P_r P_g \left( \sum_{m_i: (m, i) \in \tilde{V}_c} \sum_{\bar{t}: (t, t') \in \bar{T}} \vartheta_{m\bar{t}} X_{rgmj\bar{t}} \right) \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱)}$$

### محدودیت‌ها

محدودیت‌های مدل مشابه مدل قطعی سالما ۲۰۱۰ هستند که برای هر سناریو  $(r, g)$  مقرر شده‌اند. رابطه دوم تا پنجم تعادل مواد در موجودیت‌ها را با بررسی برابری جریان ورودی و خروجی به علاوه تفاوت موجودی ابتدا و انتهای دوره تضمین می‌کند. با توجه به اینکه توازن مواد بر اساس نوع محصول ترک کننده موجودیت صورت می‌پذیرد، جریان محصول وارد شده به موجودیت با پارامتر  $\beta_{m\bar{m}}$  به جریان خروجی تبدیل شده که ارتباط بین دو نوع جریان را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که میزان بازگردانی گسسته مشتریان در هر سطح از طریق پارامتر  $Rf_{r\bar{m}}$  در محاسبات در نظر گرفته می‌شود.

بدین ترتیب محدودیت اول بصورت زیر تعریف می‌گردد: (رابطه ۲ برای کارخانه، رابطه ۳ برای انبارها، رابطه ۴ برای مشتریان، رابطه ۵ برای مراکز تفکیک)

$$\begin{aligned} S_{rgmi\bar{y}}(t, t'-1) + \sum_{\bar{m}_j: (\bar{m}, j, i) \in F_{d2}} Rf_{r\bar{m}} \beta_{m\bar{m}} X_{rg\bar{m}_j i\bar{y}}(t, t'-\tau_{ji}-\varnothing_m) + \\ \sum_{\bar{m}_j: (\bar{m}, j, i) \in F_s} \beta_{m\bar{m}} X_{rg\bar{m}_j i\bar{y}}(t, t') = \sum_{m_i: (m, i, j) \in F_{f1}} X_{rgmj\bar{t}} + S_{rgmi\bar{t}} \cdot \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$(r, g) \in \Omega \wedge (\bar{m}, i) \in \tilde{V}_f \wedge (m, i) \in \tilde{V}_f \wedge \bar{t}: (t, t')$$

$$S_{rgmi\bar{y}}(t, t'-1) + \sum_{\bar{m}_j: (\bar{m}, j, i) \in F_{f1}} Rf_{r\bar{m}} \beta_{m\bar{m}} X_{rg\bar{m}_j i\bar{y}}(t, t'-\tau_{ji}-\varnothing_m) = \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\sum_{mi:(m,i,j) \in F_{f2}} X_{rgmij\bar{t}} + S_{rgmi\bar{t}} \cdot (r.g) \in \Omega \wedge (\bar{m}.i) \in \hat{V}_w \wedge (m.i) \in \check{V}_w \wedge \bar{t}: (t.t') \\ \sum_{mj:(\bar{m}.j,i) \in F_{f2}} R_{f\bar{r}\bar{m}} \beta_{m\bar{m}} X_{rgmjiy}(t.t' - \tau_{ji} - \phi_m) = \sum_{mi:(m,i,j) \in F_{d1}} X_{rgmij\bar{t}} \cdot \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$(r.g) \in \Omega \wedge (\bar{m}.i) \in \hat{V}_c \wedge (m.i) \in \check{V}_c \wedge \bar{t}: (t.t') \\ S_{rgmiy}(t.t' - 1) + \sum_{mj:(\bar{m}.j,i) \in F_{d1}} R_{f\bar{r}\bar{m}} \beta_{m\bar{m}} X_{rgmjiy}(t.t' - \tau_{ji} - \phi_m) = \\ \sum_{mi:(m,i,j) \in F_{d2}} X_{rgmij\bar{t}} + S_{rgmi\bar{t}} \cdot (r.g) \in \Omega \wedge (\bar{m}.i) \in \hat{V}_d \wedge (m.i) \in \check{V}_d \wedge \bar{t}: (t.t') \quad \text{رابطه (۵)}$$

محدودیت پنجم (رابطه ۶)، محدودیت در مقوله تقاضای مشتریان است که در صورت انتخاب برای عضویت در زنجیره تقاضای معینی در بازه زمانی دارد که این تقاضا می تواند بصورت کامل و یا بخشی از آن ارضا شود. قسمت برآورده نشده تقاضا در متغیر U نشان داده می شود. در نهایت این محدودیت ارضای تقاضا را وقتی مشتریان برای ورود به شبکه انتخاب می شوند اعمال می کند:

$$\sum_{j:(m,j,i) \in F_{f2}} \sum_{t' \in T'} X_{rgmjiy}(t.t' - \tau_{ji}) + U_{rgmit} = d_{mit} Y_i \cdot \quad \text{رابطه (۶)}$$

محدودیت ششم (رابطه ۷) حداقل میزان رضایت مشتری را اعمال میکند. بنابراین مقدار محصول تحویل داده شده به مشتری i در طول دوره ماکرو  $\bar{t}$  باید بزرگتر یا مساوی  $CSL_{it}$  از تقاضای دوره باشد.

$$\sum_{mj:(m,j,i) \in F_{f2}} \sum_{t' \in T'} X_{rgmjiy}(t.t' - \tau_{ji}) \geq CSL_{it} \sum_{m \in M_w} d_{mit} Y_i \quad , \quad (r.g) \in \Omega \wedge i \in I_c \wedge t \in T \quad \text{رابطه (۷)}$$

محدودیت هفتم (رابطه هشتم) محدودیت های قانونی برای بازیافت مواد را لحاظ می کند. پارامتر  $\alpha_m$  حداقل میزان در نظر گرفته شده بازیافت برای محصول m است که بواسطه خط مشی های زیست محیطی بیان شده اند. بنابراین مراکز دمونتاز تنها می توانند کمتر از  $1 - \alpha_m$  از محصولات جمع آوری شده را دورریز نمایند.

$$\sum_{j \in I_o} \sum_{t' \in T'} X_{rgmjiy}(t.t') \leq (1 - \alpha_m) \sum_{mj:(m,j,i) \in F_{d1}} \sum_{t' \in T'} \beta_{m\bar{m}} X_{rgmjiy}(t.t' - \tau_{ji}) \quad \text{رابطه (۸)}$$

محدودیت های ۸ تا ۱۳ (رابطه های ۹ تا ۱۴) حد بالا و پایین تامین را که در اکثر قراردادها نیز بیان می شوند مدل می کنند. این مقادیر می تواند برای هر کارخانه متفاوت در نظر گرفته شود که با سیاست های مدیریتی همسو باشد.

$$\sum_{mj:(m,i,j) \in F_{f1}} X_{rgmji\bar{t}} \leq g_i^p Y_i \quad , \quad (r.g) \in \Omega \wedge (i,j) \in A_{f1} \wedge \bar{t}: (t.t') \in \bar{T} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\sum_{mj:(m,i,j) \in F_{f1}} X_{rgmji\bar{t}} \geq h_i^p Y_i \quad , \quad (r.g) \in \Omega \wedge (i,j) \in A_{f1} \wedge \bar{t}: (t.t') \in \bar{T} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\sum_{mj:(m,i,j) \in F_{f2}} X_{rgmji\bar{t}} \leq g_i^p Y_i \quad , \quad (r.g) \in \Omega \wedge (i,j) \in A_{f2} \wedge \bar{t}: (t.t') \in \bar{T} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sum_{mj:(m,i,j) \in F_{f2}} X_{rgmji\bar{t}} \geq h_i^p Y_i \quad , \quad (r.g) \in \Omega \wedge (i,j) \in A_{f2} \wedge \bar{t}: (t.t') \in \bar{T} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\sum_{mj:(m,i,j) \in F_{d2}} X_{rgmji\bar{t}} \leq g_i^p Y_i \quad , \quad (r.g) \in \Omega \wedge (i,j) \in A_{d21} \wedge \bar{t}: (t.t') \in \bar{T} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sum_{mj:(m,i,j) \in F_{d2}} X_{rgmji\bar{t}} \geq h_i^p Y_i \quad , \quad (r.g) \in \Omega \wedge (i,j) \in A_{d2} \wedge \bar{t}: (t.t') \in \bar{T} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

محدودیت ۱۴ (رابطه ۱۵) ظرفیت در تاسیسات، انبارها، و مراکز دسته بندی را محدود می کند. لازم به ذکر است به دلیل بی معنی بودن انبار در حوزه مشتری، در این سطح در نظر گرفته نمی شود.

$$\sum_{m:(m,i) \in \bar{V}/\check{V}_c} S_{rgmi\bar{t}} \leq g_i^s Y_j \quad , \quad (r.g) \in \Omega \wedge i \in I \wedge \bar{t}: (t.t') \in \bar{T} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

### مورد مطالعه صنعت فولاد

صنعت فولاد یکی از موتورهای محرک توسعه اقتصادی کشورها در سراسر جهان به شمار می‌رود که در سراسر جهان بیش از ۲ میلیون نفر را به طور مستقیم به کار گرفته است. انطباق این صنعت با محیط زیست تا آنجایی است که ۹۷ درصد از محصولات فولادی قابلیت استفاده مجدد را دارند. امروزه تولید فولاد خام به دو روش عمده صورت می‌گیرد: تهیه چدن مذاب در کوره بلند و ساخت فولاد در کانورترهای اکسیژنی و روش دیگر، ذوب قراضه یا آهن اسفنجی در کوره‌های قوس الکتریکی. روش کوره قوس الکتریکی، مستقیماً آهن قراضه را به فولاد مذاب تبدیل می‌نماید. ۲۸/۸ درصد فرآیند تولید فولاد خام کشورمان به روش تکنولوژی کوره بلند و کانورتر اکسیژنی و ۷۱/۲ درصد به روش کوره قوس الکتریکی می‌باشد که البته بر میزان اهمیت این تحقیق می‌افزاید.

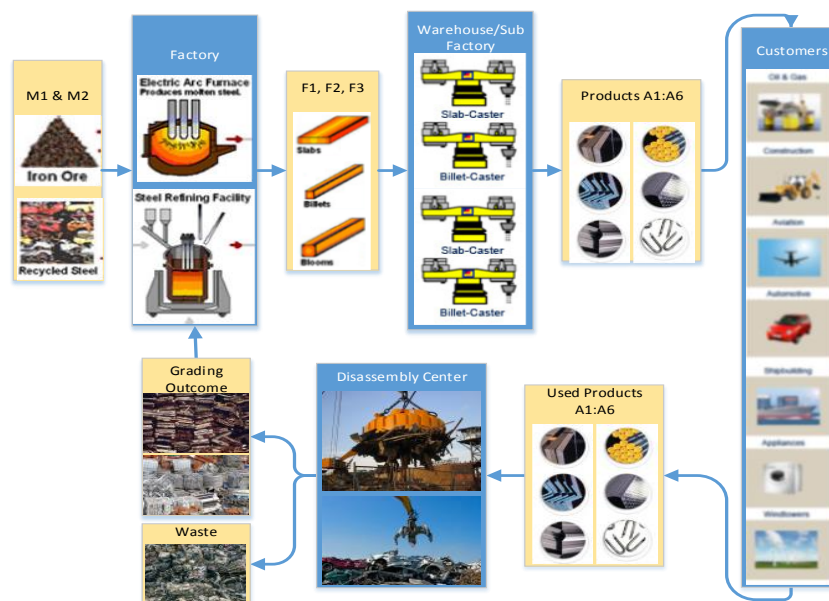
اطلاعات روشن و در دسترس از شرایط و میزان مصرف آهن قراضه در تولید فولاد ایران وجود ندارد ولی با توجه به ضریب مصرف ۲۰ الی ۳۰ درصدی آهن قراضه در تولید فولاد در واحدهای در حال بهره‌برداری نیاز به میزان تقریبی ۱۲ میلیون تن آهن قراضه احساس شده که لزوم بسترسازی و ایجاد شرایط مناسب برای بازیافت آهن قراضه مشهود بوده و لازم است برنامه‌ریزی ویژه‌ای برای تامین زیرساخت‌های موردنیاز برای جمع‌آوری آهن قراضه صورت پذیرد.

ساختار زنجیره تامین حلقه بسته شامل ۵ نقطه بالقوه و مجزا برای احداث کارخانه، انبار، مرکز بازیافت، مرکز دفع و مشتری بالقوه می‌باشد. کارخانه‌ها دو نوع ماده اولیه (M1 و M2) برای ساخت سه نوع محصول متفاوت (F1، F2 و F3) دریافت نموده و این محصولات به انبارهایی ارسال می‌شوند که در آنها فرآیندهای دیگری مانند تغییر شکل و ... صورت می‌پذیرد که در نهایت شش محصول نهایی (A1 تا A6) را تولید می‌کنند. مشتریان در واقع خرید خود را از این محصولات نهایی انتخاب می‌کنند. در نتیجه تقاضا برای هر محصول با توجه به مشتریان متفاوت خواهد بود. تقاضا برای هر مشتری برای محصول A1 به عنوان نمونه در نیمه اول دوره زمانی برنامه‌ریزی در جدول ۴ داده شده است.

جدول ۴. میزان تقاضای متغیر در طول دوره‌های زمانی

|    |     | Tb1    | Tb2    | Tb3    | Tb4    | Tb5    | Tb6    | Tb7    | Tb8    | Tb9    | Tb10   |
|----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| A1 | I۰۱ | ۲۹۸۶۷۴ | ۲۹۹۹۴۳ | ۳۰۱۲۱۸ | ۳۰۲۴۹۹ | ۳۰۳۷۸۷ | ۳۰۵۰۸۰ | ۳۰۶۳۸۰ | ۳۰۷۶۸۶ | ۳۰۸۹۹۹ | ۳۱۰۳۱۸ |
| A1 | I۰۲ | ۱۰۸۰۴۴ | ۱۰۹۳۳۴ | ۱۱۰۶۲۰ | ۱۱۱۹۳۱ | ۱۱۳۲۵۷ | ۱۱۴۵۹۹ | ۱۱۵۹۵۷ | ۱۱۷۳۳۱ | ۱۱۸۷۲۲ | ۱۲۰۱۲۸ |
| A1 | I۰۳ | ۴۰۰۲۵۷ | ۴۰۳۳۱۵ | ۴۰۴۳۸۵ | ۴۰۶۴۶۶ | ۴۰۸۵۵۹ | ۴۱۰۶۶۳ | ۴۱۲۷۸۰ | ۴۱۴۹۰۸ | ۴۱۷۰۴۸ | ۴۱۹۲۰۰ |
| A1 | I۰۴ | ۷۴۷۴۵  | ۷۵۵۳۱  | ۷۶۳۲۵  | ۷۷۱۲۸  | ۷۷۹۴۰  | ۷۸۷۶۰  | ۷۹۵۸۹  | ۸۰۴۲۸  | ۸۱۲۷۵  | ۸۲۱۳۲  |
| A1 | I۰۵ | ۵۷۹۹۷۰ | ۵۸۵۱۱۵ | ۵۹۰۳۰۶ | ۵۹۵۵۴۳ | ۶۰۰۸۲۷ | ۶۰۶۱۵۹ | ۶۱۱۵۳۸ | ۶۱۶۹۶۶ | ۶۲۲۴۴۲ | ۶۲۷۹۶۷ |

با توجه به نبود اطلاعات کافی در حوزه محصول فرض بر این شد که میزان تقاضا محصولات بصورت مساوی بوده ولی در بازه‌های زمانی میکرو تایم بر اساس متوسط نرخ سرانه مصرف و متوسط نرخ رشد جمعیت محاسبه شده است.



شکل ۲- نمای شماتیک جریان مواد در زنجیره تامین حلقه بسته فولاد

قسمتی از این ۶ محصول را مصرف کنندگان بعد از مصرف به مراکز تفکیک ارسال می کنند که هر محصولی دارای یک کسر بازگشتی مختص خود است. مراکز تفکیک محصولات برگشتی را با سطوح کیفی متفاوت دسته بندی می کنند. فرض بر این است که مراکز تفکیک بازگشتی ها را در سه رده کیفی دسته بندی نموده و بر اساس دسته بندی کیفی، محصولات برگشتی به کارخانه ها ارسال می شوند تا در محصول جدید استفاده شده و یا به مراکز دفع ارسال شوند که در خصوص دفع نباید از حد مجاز قانونی تجاوز نماید. این حد می تواند یک حد فرضی و مورد نظر خبرگان صنعت نیز باشد. بین محصول جدید و تولید مجدد شده هیچ گونه تمایزی وجود ندارد. شکل ۲ نمای شماتیک این جریان مواد در این زنجیره تامین حلقه بسته را نشان می دهد.

کیفیت برگشتی ها بصورت غیر قطعی و با پنج وضعیت ممکن در نظر گرفته می شود: عالی، خوب، متوسط، بد و خیلی بد. هر وضعیت، ترکیبی از درجه های متفاوت کیفی خوب، متوسط و بد است که حاصل فرآیند دسته بندی در مراکز تفکیک می باشد. احتمال هر حالت و درصد محصولات برگشتی در هر رده کیفی در جدول ۵ آمده است. همانطوری که ملاحظه می کنید در حالت خوب فرض بر ترکیب ۶۶٫۷ درصد کیفیت خوب محصول و ۳۳٫۳ درصد کیفیت متوسط محصول و صفر درصد کیفیت بد در نظر گرفته شده است.

جدول ۵. خروجی دسته بندی برگشتی ها

| خروجی دسته بندی | احتمال | مقدار خوب | مقدار متوسط | مقدار بد |
|-----------------|--------|-----------|-------------|----------|
| عالی            | ۰/۱    | ۱         | ۰           | ۰        |
| خوب             | ۰/۵    | ۶۶/۷      | ۳۳/۴        | ۰        |
| متوسط           | ۰/۲۵   | ۳۳/۳      | ۳۳/۳        | ۳۳/۴     |
| بد              | ۰/۱    | ۰         | ۶۶/۷        | ۳۳/۴     |
| خیلی بد         | ۰/۰۵   | ۰         | ۰           | ۱        |

همانطوری که اشاره شد بازگشتی از مشتریان در مراکز تفکیک قبل از ارسال به کارخانه‌ها دسته‌بندی می‌شوند. با توجه به اینکه محصولات برگشتی و مواد خام برای ورود به فرآیند تولید محصول جدید با هم در رقابت هستند ترکیب آنها و قیمت آنها پارامترهای حیاتی سیستم خواهند بود. جدول ۶ داده‌های مسئله را با ارائه قیمت مواد خام و محصولات دسته بندی شده بازگشتی تکمیل می‌کند.

جدول ۶. قیمت مواد اولیه

| $M_2$ | $M_1$ | ماده اولیه خام        |       |
|-------|-------|-----------------------|-------|
| ۹۰۰۰  | ۷۵۰۰  | محصولات رتبه بندی شده | خوب   |
| ۸۰۰۰  | ۵۷۰۰  |                       | متوسط |
| ۹۰۰۰  | ۷۰۰۰  |                       | بد    |
| ۱۱۰۰۰ | ۸۵۰۰  |                       |       |

کمیت غیر قطعی برگشتی‌ها توسط مشتریان با سه سطح برگشت خوشبینانه ( $R_1$ )، متعادل ( $R_2$ )، و بدبینانه ( $R_3$ ) تخمین زده می‌شود. جدول ۷ کسر برگشتی از محصول نهایی توسط مشتریان و احتمال وقوع آن‌ها را در هر سطح نشان می‌دهد. داده‌های گذشته از کمیت و کیفیت جریان بازگشتی‌ها وجود نداشته بنابراین مقدار پارامترهای خروجی سناریوها و احتمال آن‌ها به منظور بررسی مورد یک شرکت با دقت انتخاب شده است.

جدول ۷. کسر برگشتی از محصول نهایی توسط مشتریان و احتمال وقوع آنها

| A6   | A5  | A4  | A3  | A2  | A1   | محصول<br>احتمال |           |             |
|------|-----|-----|-----|-----|------|-----------------|-----------|-------------|
| ۰/۹۹ | ۰/۵ | ۰/۹ | ۰/۶ | ۰/۸ | ۰/۵۵ | ۰/۳۵            | خوشبینانه | کسر بازگشتی |
| ۰/۹  | ۰/۴ | ۰/۸ | ۰/۵ | ۰/۷ | ۰/۴۵ | ۰/۴۵            | متعادل    |             |
| ۰/۸  | ۰/۳ | ۰/۷ | ۰/۴ | ۰/۶ | ۰/۳۵ | ۰/۲۰            | بدبینانه  |             |

همچنین در جدول ۸ قیمت محصول نهایی ( $A_1$ - $A_6$ ) را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است قیمت فروش محصولات نیز با توجه به روند قیمت‌های موجود بصورت افزایشی و بر اساس تابع پیش‌بینی خطی در نظر گرفته شده است.

جدول ۸. قیمت محصول نهایی

|    | Tb1   | Tb2   | Tb3   | Tb4   | Tb5   | Tb6   | Tb7   | Tb8   | Tb9   | Tb10  |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A1 | ۳۰۳۸۱ | ۳۰۷۰۰ | ۳۱۳۱۸ | ۳۱۳۱۸ | ۲۹۹۷۲ | ۲۹۹۵۴ | ۲۹۹۵۵ | ۳۰۴۵۵ | ۳۰۶۹۱ | ۳۱۳۰۹ |
| A2 | ۲۴۱۹۱ | ۲۵۳۴۵ | ۲۶۰۰۰ | ۲۵۸۰۹ | ۲۵۵۳۲ | ۲۵۵۳۲ | ۲۵۶۰۵ | ۲۵۴۶۴ | ۲۶۱۴۱ | ۲۶۳۰۰ |
| A3 | ۲۵۴۵۰ | ۲۴۹۵۰ | ۲۷۳۲۵ | ۲۶۰۲۵ | ۲۷۱۰۰ | ۲۵۰۳۳ | ۲۵۹۳۳ | ۲۴۸۰۰ | ۲۶۱۰۰ | ۲۴۳۲۵ |
| A4 | ۲۳۵۰۰ | ۲۳۸۳۶ | ۲۴۳۷۰ | ۲۳۲۶۷ | ۲۳۰۴۱ | ۲۰۹۷۹ | ۲۲۱۲۸ | ۲۱۱۰۰ | ۲۱۳۵۸ | ۲۱۳۰۸ |
| A5 | ۲۴۸۰۰ | ۲۴۶۰۰ | ۲۴۹۰۰ | ۲۳۵۰۰ | ۲۳۱۰۰ | ۲۰۶۰۰ | ۲۲۵۰۰ | ۲۱۴۰۰ | ۲۱۹۰۰ | ۲۱۹۰۰ |
| A6 | ۲۴۸۰۰ | ۲۴۷۰۰ | ۲۷۲۶۳ | ۲۶۴۶۷ | ۲۵۶۱۳ | ۲۵۴۵۰ | ۲۶۶۳۸ | ۲۵۹۰۰ | ۲۶۵۶۳ | ۲۶۵۶۳ |

### نتایج عددی مطالعه موردی

مطالعات زیادی به منظور بررسی آثار تغییر در پارامترهای مرتبط با کیفیت و کمیت جریان برگشتی بر طراحی و برنامه ریزی زنجیره تامین انجام گرفته است. برای تشریح این تبعات در مدل ارائه شده، به صورت همزمان سناریوها و پارامترهای غیر قطعی لحاظ شده‌اند که خروجی این مدل در شرایط بهینه برای هر شهر، با مقادیر واقعی و با بکارگیری از نرم افزار GAMS بررسی گردید که موجودیت‌هایی به شرح جدول ۹ حاصل شدند.

### نتایج تفاوت در سطح کیفی بازگشتی‌ها

برای بررسی تاثیر سطوح مختلف کیفیتی بازگشتی‌ها پنج حالت مختلف در نظر گرفته شد. جدول ۹ نتایج بهترین حالت شبکه اصلی را برای پنج حالت مختلف نشان می‌دهد. همانطوری که در جدول ملاحظه می‌شود کیفیت بازگشتی‌ها در ماکزیمم کردن سود تاثیر به سزایی دارد. بنابراین سود بیشتر وقتی به دست می‌آید که صد درصد بازگشتی‌ها کیفیت خوبی داشته باشند (مورد G1). با کاهش کیفیت بازگشتی‌ها اندازه شبکه کاهش پیدا کرده و به کمینه خود در G5 می‌رسد و در نهایت تعداد مشتریان و مراکز تفکیک به حداقل خود می‌رسند. در مورد G3 تا G5 ساختار شبکه تا حد زیادی بدون تغییر می‌ماند ولی میزان سود زنجیره به دلیل تغییر در فروش و افزایش هزینه‌ها شدیداً تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

جدول ۹. خروجی مدل در شرایط بهینه

|                | ساختار بهینه نهایی |   |   |   | G1 |   |   |   | G2 |   |   |   | G3-5 |   |   |   |
|----------------|--------------------|---|---|---|----|---|---|---|----|---|---|---|------|---|---|---|
|                | F                  | W | C | D | F  | W | C | D | F  | W | C | D | F    | W | C | D |
| I01            |                    | ۱ | ۱ | ۱ |    | ۱ | ۱ | ۱ |    | ۱ | ۱ | ۱ |      |   | ۱ | ۱ |
| I02            | ۱                  | ۱ |   | ۱ | ۱  | ۱ |   |   | ۱  | ۱ |   |   | ۱    | ۱ |   |   |
| I03            |                    | ۱ | ۱ | ۱ |    |   | ۱ | ۱ |    |   | ۱ | ۱ |      |   |   |   |
| I04            | ۱                  | ۱ | ۱ | ۱ | ۱  | ۱ | ۱ |   | ۱  | ۱ | ۱ |   | ۱    | ۱ | ۱ | ۱ |
| I05            |                    | ۱ |   | ۱ |    | ۱ |   | ۱ |    | ۱ |   |   |      | ۱ |   |   |
| جمع موجودیت‌ها | ۲                  | ۵ | ۳ | ۵ | ۲  | ۴ | ۳ | ۳ | ۲  | ۴ | ۳ | ۲ | ۲    | ۳ | ۲ | ۲ |

### میزان عدم پاسخ گویی

با توجه به هزینه در نظر گرفته شده برای عدم ارضای تقاضای مشتریان در این مدل، در حل نهایی مدل پارامتر U مقادیر متفاوتی در طول دوره‌های مختلف گرفته که به عنوان نمونه در جدول ذیل برای G1 و سه محصول اول در مشتریان مختلف در دوره‌های زمانی کوتاه مدت ۲ تا ۵ آورده شده است.

جدول ۱۰. مقدار تقاضای ارضا نشده مشتریان در طول دوره‌های ۲ تا ۵

|    |    |    |     | Tb2       | Tb3       | Tb4       | Tb5       |
|----|----|----|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| R1 | G1 | A1 | I01 | ۲۹۱۹۴۲۸۵۷ | ۳۰۰۷۶۷۹۹۱ | ۳۰۲۴۷۵۱۱۹ | ۳۰۳۷۶۳۹۲۵ |
| R1 | G1 | A1 | I03 | ۳۹۷۳۱۵۴۷۲ | ۴۰۴۳۸۵۰۶۷ | ۴۰۶۴۵۹۲۱۸ | ۴۰۸۵۵۰۶۴۰ |
| R1 | G1 | A1 | I04 | ۷۴۵۳۰۹۸۷  | ۷۵۹۳۵۷۰۷  | ۷۶۹۹۰۷۴۸  | ۷۷۹۱۱۱۹۰  |
| R1 | G1 | A2 | I01 | ۲۹۹۹۴۲۸۵۷ | ۳۰۰۷۶۷۹۹۱ | ۳۰۲۴۷۵۱۱۹ | ۳۰۳۷۶۳۹۲۵ |
| R1 | G1 | A2 | I03 | ۴۰۲۳۱۵۴۷۲ | ۴۰۴۳۸۵۰۶۷ | ۴۰۶۴۵۹۲۱۸ | ۴۰۸۵۵۰۶۴۰ |
| R1 | G1 | A2 | I04 | ۷۵۵۳۰۹۸۷  | ۷۵۹۳۵۷۰۷  | ۷۶۹۹۰۷۴۸  | ۷۷۹۱۱۱۹۰  |
| R1 | G1 | A3 | I01 | ۲۹۹۹۴۲۸۵۷ | ۳۰۰۴۴۰۵۴۱ | ۳۰۲۴۷۶۴۶۹ | ۳۰۳۷۶۳۹۲۵ |
| R1 | G1 | A3 | I03 | ۴۰۲۳۱۵۴۷۲ | ۴۰۴۳۸۵۰۶۷ | ۴۰۶۴۵۷۸۶۸ | ۴۰۸۵۵۰۶۴۰ |
| R1 | G1 | A3 | I04 | ۷۵۵۳۰۹۸۷  | ۷۶۲۴۶۴۵۷  | ۷۶۹۹۰۷۴۸  | ۷۷۹۱۱۱۹۰  |

این متغیر در این مدل برای هر دوره دارای ۲۷۰ عدد بود که جدول فوق نمونه‌ای از یک سطح کیفی و کمی بازگشتی، سه محصول و سه مشتری عضو زنجیره جهت سرویس‌دهی را نشان می‌دهد.

### مقدار موجودی انبار انتهایی دوره موجودیت‌ها

با توجه به مفروضات مدل در خصوص امکان نگهداری محصول در انتهایی دوره در کلیه موجودیت‌ها (به جز مشتری) به عنوان نمونه جدول زیر نمایش‌دهنده موجودی انتهایی دوره در دو موجودیت متفاوت می‌باشد.

جدول ۱۱. مقدار موجودی انتهایی دوره در طول دوره‌های ۲ تا ۵

|    |    |    |     |   | Tb2  | Tb3  | Tb4    | Tb5     |
|----|----|----|-----|---|------|------|--------|---------|
| R1 | G1 | M1 | I01 | D | ۷۰۰۰ |      |        | ۷۰۰۰    |
| R1 | G1 | M1 | I02 | D | ۷۰۰۰ |      |        | ۷۰۰۰    |
| R1 | G1 | M1 | I03 | D | ۷۰۰۰ |      |        | ۷۰۰۰    |
| R1 | G1 | M1 | I04 | D | ۷۰۰۰ |      |        | ۷۰۰۰    |
| R1 | G1 | M1 | I05 | D | ۷۰۰۰ |      |        | ۷۰۰۰    |
| R1 | G2 | F1 | I02 | F | ۷۰۰۰ |      | ۷۰۰۰   | ۱۶۱۳/۸  |
| R1 | G2 | F1 | I04 | F | ۷۰۰۰ |      | ۷۰۰۰   | ۴۰۶/۷۶  |
| R1 | G2 | F2 | I02 | F | ۷۰۰۰ | ۷۰۰۰ |        | ۶۱۳/۸   |
| R1 | G2 | F2 | I04 | F | ۷۰۰۰ | ۷۰۰۰ |        | ۲۴۰۶/۷۶ |
| R1 | G2 | F3 | I02 | F | ۷۰۰۰ |      | ۶۳۸۶/۲ | ۷۰۰۰    |
| R1 | G2 | F3 | I04 | F | ۷۰۰۰ |      | ۴۵۹۳/۲ | ۷۰۰۰    |

این متغیر در مدل ۶۱۵ مقدار به ازای هر دوره خواهد گرفت. (این عدد بصورت ضرب تعداد  $r$  در تعداد  $g$  در حاصل جمع تعداد محصولات در تعداد موجودیت فعال بدست آمده است).

### مقدار جابجایی محصول بین موجودیت‌ها

در این مدل پارامتر  $X$  به عنوان تعداد کالای جابجایی شده بین موجودیت‌ها معرفی شده که در ادامه نمونه‌ای از مقدار کالای جابجا شده بین دو موجودیت کارخانه و انبار از یک سطح کیفی و کمی بازگشتی، سه محصول و در یک دوره زمانی ۵ دوره‌ای نمایش داده شده است.

جدول ۱۲. مقدار محصول جابجا شده در طول دوره بین موجودیت‌ها در طول دوره‌های ۲ تا ۵

|    |    |    |     |     |   |   | Tb 1 | Tb2     | Tb3    | Tb4   | Tb5   |
|----|----|----|-----|-----|---|---|------|---------|--------|-------|-------|
| R1 | G1 | F1 | I02 | I01 | F | W | ۳۰۰۰ |         | ۳۰۰۰   |       |       |
| R1 | G1 | F1 | I02 | I02 | F | W | ۳۰۰۰ | ۱۰۰۰۰۰۰ | ۴۰۰۰   | ۴۰۰۰  |       |
| R1 | G1 | F1 | I02 | I03 | F | W |      |         |        | ۳۰۰۰  |       |
| R1 | G1 | F1 | I02 | I05 | F | W | ۳۰۰۰ |         |        |       |       |
| R1 | G1 | F1 | I04 | I01 | F | W |      |         |        |       |       |
| R1 | G1 | F1 | I04 | I03 | F | W |      |         |        |       |       |
| R1 | G1 | F1 | I04 | I04 | F | W | ۵۰۰۰ | ۸۶۵۵۰۰  | ۲۸۹۴۹۰ | ۴۷۵۶۸ | ۴۶۱۵  |
| R1 | G1 | F2 | I02 | I01 | F | W |      |         |        |       | ۳۰۰۰  |
| R1 | G1 | F2 | I02 | I02 | F | W |      | ۹۹۶۶۶۷  | ۱۰۰۰   |       | ۵۰۰۰  |
| R1 | G1 | F2 | I02 | I03 | F | W | ۳۰۰۰ | ۳۳۳۳    | ۳۰۰۰   |       | ۳۰۰۰  |
| R1 | G1 | F2 | I02 | I05 | F | W |      |         | ۳۰۰۰   |       | ۳۰۰۰  |
| R1 | G1 | F2 | I04 | I01 | F | W |      | ۷۳۱۰۰۰  |        |       |       |
| R1 | G1 | F2 | I04 | I04 | F | W |      | ۱۳۴۵۰۰  | ۲۸۹۴۹۰ | ۴۰۵۶۸ | ۱۸۶۱۵ |
| R1 | G1 | F3 | I02 | I01 | F | W |      |         |        | ۳۰۰۰  |       |
| R1 | G1 | F3 | I02 | I02 | F | W |      | ۹۹۶۶۶۷  | ۷۰۰۰   | ۱۰۰۰  | ۱۰۲۰  |
| R1 | G1 | F3 | I02 | I03 | F | W |      |         |        |       |       |
| R1 | G1 | F3 | I02 | I05 | F | W |      | ۳۳۳۳    |        | ۳۰۰۰  |       |
| R1 | G1 | F3 | I04 | I01 | F | W |      | ۸۶۵۵۰۰  |        |       |       |
| R1 | G1 | F3 | I04 | I04 | F | W |      |         | ۲۸۹۴۹۰ | ۴۷۵۶۸ | ۶۶۱۵  |



## دانش افزایی و نوآوری پژوهش

ارزش کالاهای بازگشتی در پایان زنجیره تامین به صورت روزافزون در حال افزایش است، چرا که هزینه تمام شده بدست آوری مواد اولیه به صورتی رقابتی در حال افزایش است. زنجیره های تامین پیشرو با درک درستی از این مساله به بررسی روش های بازگشت کالاهای مصرف شده پرداخته اند و همان گونه که در مباحث قبلی نیز آورده شد زنجیره تامین های هوشمند و موفق آن هایی هستند که در مسیر برگشت نیز برنامه ریزی کرده و موفق عمل کرده اند.

در بررسی های پژوهش های گذشته در اکثر موارد بازگشت محصول با نرخ از پیش تعیین شده و معلوم، مفروض بوده که شاید بتوان گفت در اکثر مواقع کار به این سادگی نیست و نیاز به بررسی بیشتری در عالم واقع وجود دارد. نوآوری عمده این پژوهش نیز در نظر گرفتن عدم قطعیت در کمیت و کیفیت کالاهای بازگشتی به صورت توانمند و در نظر گرفتن تقاضا و قیمت غیر یکسان در طول دوره ها است که تاکنون در مقالات گذشته بررسی نشده است. در واقع مدل سازی و طراحی شبکه زنجیره تامین به صورت رفت و برگشتی، ترکیب آن با عدم قطعیت در برگشت، و ایجاد یک مدل پژوهش در عملیاتی با توجه به سناریوها با هدف بهینه سازی زنجیره تامین حلقه بسته نوآوری این پژوهش است.

مدل سازی یک زنجیره تامین رفت و برگشت به صورت چند محصولی و چند دوره ای به طور رایج در پژوهش های قبلی انجام شده است، ولی در مطالعات برگشت زنجیره، نیاز به ایجاد درک بهتر و مفروضات نزدیک به واقع تر احساس می شود. از این رو در این پژوهش سعی بر ایجاد شناخت بهتر از شرایط برگشت شده است.

این پژوهش بر پایه مدل برنامه ریزی مختلط عدد صحیح خطی ارائه شده توسط سالما و همکاران (۲۰۱۰) بنا شده و متغیرهایی مانند مکان کارخانه، انبار، مشتری، مراکز تفکیک، و دفع و در نظر گرفتن جریان ها، زمان، و ... را به صورت پیش فرض در خود بررسی کرده و با شرایط متفاوت بازگشت از نظر تعداد و کیفیت بازگشتی نیز مدل را حل می نماید. تعداد محصولات مستقل از کیفیت محصولات بوده که در مراکز تفکیک به دسته های گوناگون تقسیم بندی شده و به مراکز تولیدی بازگشت داده می شوند. همچنین مدل اولیه در مقاله مبنا به صورت دو مرحله ای حل شده که در مرحله اول مکان موجودیت ها بدون در نظر گرفتن سناریوها و در مرحله دوم بکارگیری سناریوها در مدل ایجاد شده معین شده است که در این مقاله مدل بصورت یکپارچه مورد بررسی و حل شده است.

## جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله رویکرد سناریو محور برای ترکیب عدم قطعیت در کمیت و کیفیت محصولات برگشتی و تاثیر آن بر طراحی و برنامه ریزی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ارائه گردید. یکپارچه سازی همزمان دو منبع مهم و اصلی از عدم قطعیت که با نشان دادن تصور بهتری از خصوصیات جریان بازگشتی توانمند شده و در نظر گرفتن تقاضای متغیر در طول افق زمانی، در واقع نقطه قوت این پژوهش به شمار می رود.

فرمول بندی مدل بواسطه یک مثال واقعی از صنعت فولاد ارزیابی شده که نتایج عددی آن در قسمت قبل ارائه گردید. از نتایج بدست آمده در مدل می توان به این برداشت رسید که با افزایش سطح کیفی محصولات بازگشتی (از ۵g

به ۱g) نیاز به مواد اولیه کاهش پیدا کرده و در نتیجه سود کلی زنجیره افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد برگشتی‌ها بدلیل افزایش هزینه‌های عملیاتی (و نیاز به ایجاد تاسیسات جدید) میزان سوددهی با نرخ افزایشی، کاهش می‌یابد که این امر خود می‌تواند زنجیره را در سطوح بالای برگشتی‌ها غیر سودده نماید. همچنین این مدل برای تصمیم‌گیری در خصوص احداث و یا عدم احداث تاسیسات جدید در مکان فیزیکی جدید قابل بکارگیری بوده که با داده‌های واقعی می‌توان بدرستی نتایج و عواقب هر یک را بررسی و ارزیابی نمود.

به عنوان پیشنهاد برای تحقیقات بعدی می‌توان از الگوریتم‌های هیوریستیک برای کاهش تعداد داده‌ها در مدل استفاده نمود چرا که با افزایش تعداد نقاط، تعداد متغیرها بصورت تصاعدی افزایش پیدا کرده و زمان حل مدل افزایش می‌یابد.

## References

- Akcali, E., & Cetinkaya, S. (2011). Quantitative models for inventory and production planning in closed-loop supply chains. *International Journal of Production Research*, 49(8), 2373–2407.
- Almaraj, I., Trafalis, T., (2020). Affinely adjustable robust optimization under dynamic uncertainty set for a novel robust closed-loop supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 145, 106521.
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4165–4176.
- Cardoso, S., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., & Relvas, S. (2013). Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. *European Journal of Operations Research*, 226(3), 436–451.
- Chen, S. P., & Chang, P. C. (2006). A mathematical programming approach to supply chain models with fuzzy parameters. *Engineering Optimization*, 38, 647–669.
- Denizel, M., Ferguson, M., & Souza, G. (2010). Multiperiod remanufacturing planning with uncertain quality of inputs. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 57(3), 394–404.
- Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, Gh., Ahmadi, E. (2017). A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems* 341 (2018) 69–91.
- Gholizadeh, H., Fazlollahtabar, H. (2020). Robust optimization and modified genetic algorithm for a closed loop green supply chain under uncertainty: Case study in melting industry. *Computers & Industrial Engineering* 147, 106653.
- Klibi W., Martel A., Guitouni A., (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review, *European Journal of Operational Research* 203. 283–293.
- Kim, J., Chung, B., Kang, Y., Jeong, B. (2018). Robust optimization model for closed-loop supply chain planning under reverse logistics flow and demand uncertainty. *Journal of*

- Cleaner Production*, 196, 1314e1328.
- Lee, D., & Dong, M. (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 61–71.
- Li, Z., & Ierapetritou, M. G. (2008). Process scheduling under uncertainty: Review and challenges. *Computers and Chemical Engineering*, 32(4–5), 715–727.
- Papageorgiou, L. G. (2009). Supply chain optimization for the process industries: Advances and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 33(12), 1931–1938.
- Pishvaei, M., & Rabbani, M. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(1), 637–649.
- Pourmehdi M, Paydar MM, Asadi-Gangraj E, (2020). Scenario-based design of a steel sustainable closed-loop supply chain network considering production technology, *Journal of Cleaner Production*, not printed yet.
- Sahinidis, N. V. (2004). Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 28(6–7), 971–983.
- Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modeling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 336–349.
- Salema, M., Barbosa-Póvoa, A., & Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design for a capacitated multi-product reverse logistics networks with uncertainty. *European Journal of Operations Research*, 179, 1063–1077.
- Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Jolai, F., & Baboli, A. (2013). Reliable design of a closed loop supply chain network under uncertainty: An interval fuzzy possibilistic chance-constrained model. *Engineering Optimization*, 45(6), 745–765.
- Zhen, L., Huang, L., Wang, w., (2019). Green and sustainable closed-loop supply chain network design under Uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1195e1209.