

A system dynamics approach for capacity planning within a closed-loop supply chain: A case study of lead-acid battery industry

Atousa Zarindast

School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran,
Iran

Setareh Majidi

School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran,
Iran, setare_majidi@ind.iust.ac.ir

Mir Saman Pishvae*

School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran,
Iran, pishvae@iust.ac.ir

Abstract:

Industries are now under high pressure to manufacture environmental-friendly products and collect the end-of-life products due to governmental obligations, social responsibilities, environmental issues, and increasing awareness of consumers. Reverse supply chain (logistics) problems deal with returning and handling the end-of-life products. Accordingly, used products should dispose, recycle or recover efficiently. Managing of reverse supply chains confronts with higher degree of uncertainty and dynamism compared to forward chain. Therefore, capacity planning becomes more important to prevent excess capacity or penalties resulting from the loss of second-hand products. To this aim, a system dynamics approach is used in this paper to model the capacity planning Decisions in a lead-acid battery closed-loop supply chain. The product exchange policy and effect of green image on the supply chain performance are also considered in the developed model. The proposed model is implemented by Vensim software and the effect of various policies is simulated and analyzed.

Keywords: System dynamics, Close-loop supply chain, Recycling, Capacity planning, Lead-acid battery

* Corresponding author

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۸، پیاپی ۱۵، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۶

دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۱۲ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

صص: ۱۷۵-۱۹۱

رویکرد پویایی‌شناسی سیستم برای بررسی سیاست‌های برنامه‌ریزی ظرفیت در زنجیره تأمین حلقه بسته سبز: مطالعه موردی صنعت باتری اسیدی

آتوسا زرین‌دست^۱، ستاره مجیدی^۲، میر سامان پیشوایی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، setare_majidi@ind.iust.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، pishvae@iust.ac.ir

چکیده: با توجه به قوانین سخت‌گیرانه دولتی، دغدغه‌های محیط زیستی و افزایش آگاهی مشتریان نسبت به مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها، صنایع در سطح جهانی برای تولید محصولات سازگار با محیط زیست و جمع‌آوری محصولات خود بعد از استفاده، تحت فشار زیادی قرار گرفته‌اند. مدیریت زنجیره تأمین (لجستیک) معکوس، برای پاسخ به نیاز گفته‌شده، محصولات را در پایان عمر به‌شکلی کارا و اثربخش مدیریت می‌کند. در زنجیره تأمین معکوس محصولات در پایان عمر به‌طور مناسب منهدم، بازیافت و یا بازتولید شوند. زنجیره تأمین معکوس نسبت به جریان مستقیم محصولات در زنجیره مستقیم با عدم قطعیت و پویایی بیشتری مواجه است؛ بنابراین جلوگیری از پدیده مازاد ظرفیت و یا هزینه جریمه ناشی از دست‌دادن محصول دست دوم، تنها با یک برنامه‌ریزی ظرفیت اثربخش امکان‌پذیر است. در این مقاله برای تحقق هدف گفته‌شده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای مطالعه سیستمی پدیده‌ها استفاده شده است. ابتدا یک مدل پویایی‌شناسی سیستم برای بررسی سیاست‌های برنامه‌ریزی ظرفیت در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته باتری اسیدی خودرو با استفاده از داده‌های صبا باتری توسعه داده شده است. در مدل توسعه‌داده‌شده بازیافت محصولات با فرض سیاست تبادل محصول و تأثیر تصویر سبز بر عملکرد زنجیره تأمین، در نظر گرفته شده است. مدل توسعه‌داده‌شده با نرم‌افزار ونسیم پیاده‌سازی شده است و تأثیر سیاست‌های مختلف شبیه‌سازی و تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی: بازیافت، برنامه‌ریزی ظرفیت، باتری اسیدی، پویایی‌شناسی سیستم، حلقه بسته

۱- مقدمه

مدیریت زنجیره تأمین معکوس در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از شرکت‌ها قرار گرفته است. به‌علت قوانین دولتی در بسیاری از صنایع، تولیدکنندگان موظف‌اند مسئولیت محصولات خود را بعد از تولید، با نابودکردن و یا استفاده دوباره بر عهده بگیرند. به دلیل امتیازات تشویقی در نظر گرفته شده از طرف دولت‌ها برای کارخانه‌های دوست‌دار محیط زیست، آگاهی بیشتر مشتریان از مسائل زیست محیطی، افزایش بازار برای محصولات دوست‌دار محیط زیست و سود حاصل از بازتولید محصولات، تولیدکنندگان را به سمت ایجاد تصویر سبز هدایت کرده‌اند (۱).

انجمن مدیریت لجستیک (CLM) لجستیک معکوس را این چنین تعریف می‌کند: «عبارتی که اغلب برای اشاره به نقش لجستیک در بازیافت، دورریز زباله و مدیریت مواد پرخطر استفاده می‌شود». از یک دیدگاه گسترده‌تر این عبارت دربرگیرنده فعالیت‌های لجستیکی مربوط به کاهش استفاده از منابع، بازیافت، جایگزینی، بازاستفاده از مواد اولیه و دورریز است. کارگروه اروپایی لجستیک معکوس «رولاگ» تعریف زیر را برای لجستیک معکوس ارائه داده است: «فرایند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان مواد خام، موجودی طی فرایند و کالای ساخته شده از تولید، توزیع یا از نقطه مصرف به نقطه بازگرداندن یا دورریز مناسب» (۲).

بیشتر زنجیره‌های معکوس برای پنج هدف ساختاردهی شده‌اند: ۱. جمع‌آوری محصولات (بازگرداندن محصولات استفاده شده از مصرف‌کنندگان) ۲. لجستیک معکوس (حمل و نقل محصولات به تسهیلات برای بازرسی و دسته‌بندی)

۳. بازرسی و دورریزی (آگاهی از وضعیت محصولات بازگشته و تصمیم‌گیری برای نحوه دوباره استفاده کردن و قابلیت سوددهی) ۴. بازتولید (بازگرداندن محصول به حالت اصلی آن) ۵. بازاریابی (خلق بازار دوم برای محصولات بازگردانده شده) (۳). یک زنجیره معکوس بر جریان بازگشتی مواد از مشتری به تأمین‌کننده با هدف بیشینه‌کردن سود و یا کمینه‌کردن هزینه تمرکز دارد (۴).

یک زنجیره حلقه بسته شامل زنجیره روبه‌جلو و معکوس است که در آن زنجیره روبه‌جلو شامل حرکت مواد/محصول از تأمین‌کنندگان بالادستی به مشتریان پایین‌دستی است و زنجیره معکوس به حرکت محصولات دست دوم/فروخته‌نشده از مشتری به تأمین‌کننده بالادستی برای بازیافت‌های ممکن و بازاستفاده اطلاق می‌شود. زنجیره معکوس باید به صورت یکپارچه قسمتی از زنجیره روبه‌جلو باشد تا منجر به هزینه کمتر و ارضای قوانین دولتی/محیط زیستی شود.

بازتولید محصولات به دلیل آثار مخرب کمینه بر محیط زیست و کاستن ارزش کمتری از کالا و همچنین ایجاد موقعیت بازاریابی جدید، مطلوب‌ترین حالت برای محصولات نسبت به حالات قراضه کردن و بازیابی قطعات در پایان عمرشان است. محصولات بازتولید شده گاهی به مشتریانی که به برندی علاقه دارند ولی نمی‌خواهند هزینه محصول نو را پرداخت کنند به‌عنوان انتخاب دوم پیشنهاد می‌شود (۵).

حفاظت از محیط زیست و حفظ منابع طبیعی اهمیت بالایی در سطح جهانی پیدا کرده است. به همین دلیل فرایند بازیافت در بسیاری از محصولات انجام می‌گیرد. در واقع محصولات به منظور رسیدن به کیفیت مطلوب بعد از استفاده شدن بازیافت میشوند

و هدف، بازگرداندن مواد اولیه بدون حفظ ساختار است، مانند بازیافت پلاستیک، بازیافت کاغذ (۶) و بازیافت باتری (۷-۱۱).

در این مقاله برنامه‌ریزی ظرفیت با در نظر گرفتن تصویر سبز و سیاست تشویقی تبادل محصول برای بازیافت باتری اسیدی به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده و به کمک رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، اثر متقابل پارامترهای در نظر گرفته شده در درازمدت بررسی و شبیه‌سازی شده است.

در بخش ۲ این مقاله به مرور ادبیات پرداخته می‌شود. در بخش ۳ تعریف مسئله بیان شده و در بخش ۴ عناصر لازم برای توسعه متدولوژی پویایی‌شناسی سیستم (متغیرهای مدل، نمودار علی و فرمول‌های ریاضی) ارائه شده است. سپس در بخش ۵، اعتبارسنجی مدل انجام شده است و در نهایت در بخش ۶ تحلیل سناریوها همراه با نتایج ارائه شده است.

۲- مرور ادبیات

تحقیقاتی انجام شده بر لجستیک معکوس از دهه ۶۰ میلادی شروع شده و تحقیقات بر استراتژی و مدل‌های لجستیک معکوس در دهه ۸۰ میلادی صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۷ فلیشمن^۱ و همکاران (۱۲) مطالعاتی بر لجستیک معکوس از جنبه‌های برنامه‌ریزی توزیع کنترل موجودی و برنامه‌ریزی تولید انجام داده‌اند. در سال ۲۰۰۷ لیتون^۲ و همکاران (۱۳) ارتباط پایداری زنجیره همراه با در نظر گرفتن مسائل محیط زیست در موضوعات طراحی محصول، اضافه‌ات طول عمر محصول و بازیابی محصول در پایان عمر مفید در نظر گرفته‌اند. تمرکز لجستیک معکوس بر مدیریت هدررفته‌ها

(بازیابی مواد اصلی) است به علت رقابتی که بین محصول نو و محصول بازتولید شده وجود دارد، در بازیابی قطعات و محصولات از طریق بازتولید سرمایه‌گذاری دارای ریسک است. هزینه بازیابی مواد، از طریق بهینه‌کردن مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات در لجستیک معکوس بهینه می‌شود (۱۴).

یکی از تصمیمات مهم در طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس، تعیین ظرفیت تسهیلات بازیابی و بازیافت است. برنامه‌ریزی ظرفیت با قیمت خرید محصولات دست دوم از مشتری ارتباط متقابل دارند و برای جلوگیری از بهینگی جزئی باید هم‌زمان بهینه شوند (۱۵). در تصمیم افزایش ظرفیت باید به مسائل کلیدی مانند کی؟ کجا؟ چه مقدار؟ تحت دو هدف رقابتی ۱. بیشینه‌سازی سهم بازار ۲. بیشینه‌سازی بهره‌برداری از ظرفیت، پرداخته شود. در استراتژی ظرفیت، فاکتورهایی از قبیل پیش‌بینی الگوی تقاضا، هزینه‌های ساخت، فعالیت تسهیلات جدید، تکنولوژی جدید و استراتژی‌های رقابتی باید در نظر گرفته شوند. در عین حال که ترکیب عوامل خارجی خاص به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر سود، هزینه و جریان تأثیرگذار است. از جمله این عوامل آگاهی از تعهدات محیط زیست و مجازات‌های اعمال شده توسط قانون است (۱۶). استراتژی و عملیات زنجیره معکوس برای انطباق ظرفیت جهت افزایش سود زنجیره در انجام فعالیت‌های بازیابی با چالش‌هایی همراه است که مدیریت ظرفیت در زنجیره معکوس را بسیار پیچیده‌تر می‌کند. این مطالعه با انگیزه نیاز به توسعه ابزار متدولوژیکی پشتیبان تصمیم‌گیری جهت برنامه‌ریزی ظرفیت فعالیت‌های بازیابی زنجیره معکوس، صورت گرفته است. هدف این تحقیق مطالعه رفتار بلندمدت زنجیره معکوس با بازیافت و

برنامه‌ریزی ظرفیت کارآمد با در نظر گرفتن فاکتورهای قوانین محیط زیست، جریمه دولتی، هوشیاری جمعی و تأثیر تصویر سبز است. همچنین در این مقاله سیاست‌های برنامه‌ریزی ظرفیت برای یک محصول در زنجیره روبه‌جلو و معکوس بررسی می‌شود. تکنیک‌های برنامه‌ریزی ظرفیت پویا با مدل‌های ساده‌شده و فرض‌های محدودکننده در کتاب‌های مدیریت تولید و عملیات پیشنهاد شده است، در ادبیات، متدولوژی‌های کنترل بهینه برای تعیین مقادیر بهینه انبساط و انقباض برای ظرفیت ارائه شده است. در سال ۲۰۰۳ جورجیادیس و ولاکوس^۳ (۱۷) تأثیر عوامل محیطی بر رفتار یک زنجیره تأمین تک‌محصولی با بازیابی محصول را در طولانی‌مدت در نظر گرفتند. موضوعات بررسی شده تأثیر «تصویر سبز شرکت» بر تقاضای مشتریان، برداشتن قوانین و وضعیت کمپین‌های زیست‌محیطی برای دورریز محصولات تمام شده است. رفتار سیستم با مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها تحلیل شده است و موجودی محصولات جدید، استفاده شده و بازیابی و جریان بین آنها بررسی شده است.

در سال ۲۰۰۶ جورجیادیس و همکاران (۱۸) زنجیره تأمین حلقه بسته با فعالیت بازتولید با استفاده از سیاست‌های برنامه‌ریزی ظرفیت پویا با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها ارائه کردند که تأثیر چرخه عمر و الگوهای بازگشت انواع محصولات را بر سیاست‌های بهینه‌سازی مانند انبساطی و انقباضی در ظرفیت جمع‌آوری و بازتولید را بررسی می‌کند. نتایج عددی با مثال‌هایی از چرخه‌های عمر و الگوهای بازگشت متفاوت نشان می‌دهد که سیاست‌های انبساطی و انقباضی در ظرفیت جمع‌آوری و سیاست انقباضی در ظرفیت بازتولید، به نوع چرخه عمر و میانگین زمان مصرف بستگی دارد. در حالی که

سیاست انبساطی در ظرفیت بازتولید، به‌طور مشخص تحت تأثیر این عوامل نیست. نتایج همچنین نشان می‌دهد که سیاست‌های ظرفیت جمع‌آوری و بازتولید به تقاضای کل محصول، حساس نیستند. این عدم حساسیت سیاست‌های بهینه‌سازی به کل تقاضای یکی از ویژگی‌های مدل ارائه شده است که به دست آوردن پیش‌بینی تقاضای دقیق را مشکل می‌کند.

در سال ۲۰۰۸ جورجیادیس و بسیو^۴ (۱۹) تأثیر انگیزه‌های اکولوژیکی و ابداعات تکنولوژیکی را بر رفتار زنجیره تأمین حلقه بسته با فعالیت بازیافت بررسی کردند. منظور از انگیزه اکولوژیکی عامل اجبار و تصویر سبز است و منظور از ابداعات تکنولوژیکی طراحی برای محیط است. این مدل برای زنجیره تجهیزات الکتریکی در یونان اجرا شده است. تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که عامل‌هایی مانند تأخیر در قوانین و میزان دسترسی به محل دفن زباله در مدل مؤثرند.

در سال ۲۰۱۰ جورجیادیس و آتاناسیو^۵ (۲۰) مقاله سال ۲۰۰۶ جورجیادیس را با معرفی مدل حلقه بسته دوم‌محصولی و در نظر گرفتن زمان ورود محصول دوم به بازار گسترش دادند و رفتار پویای سیستم را در طول دوره عمر دو محصول، تحت سناریوهای ترجیحات بازار و در نظر گرفتن چرخه عمر محصول و بازگشت دو محصول بررسی کردند.

در سال ۲۰۱۰ جورجیادیس و بسیو (۲۱) یک مدل پویایی سیستم در زنجیره معکوس حلقه بسته را که فعالیت‌های آن در مقاله سال ۲۰۰۸ خود معرفی شده بود، توسعه دادند. اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های دنیای واقعی از زنجیره تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی در یونان انجام شده است. در این مقاله، عوامل استراتژی‌های استواری محیط زیست (تصویر سبز و اجبار قوانین) و ویژگی‌های عملیاتی

زنجیره (پارامترهای اقتصادی، ویژگی‌های محصول)، روابط بین آنها و تأثیرشان بر محیط زیست بررسی شده است.

در سال ۲۰۱۳ جورجیادیس و آتاناسیو (۲۲) به سیاست‌های برنامه‌ریزی ظرفیت در زنجیره معکوس با فعالیت بازتولید و هزینه کسب موجوی بالا به همراه عدم قطعیت موجود در تقاضا، الگوی فروش، کیفیت و زمان بازگشت محصولات دست دوم پرداختند. هدف تسهیل کردن تصمیم‌گیری است، زمانی که مدیریت با مشکل اجرا کردن دو استراتژی ۱. سرمایه‌گذاری زودهنگام و بزرگ برای سودآوری اقتصادی ظرفیت فروش و آمادگی آن ۲. استراتژی منعطف با اندازه کم و فراوانی بیشتر برای افزایش ظرفیت روبه‌رو است. در این مقاله دو محصول پشت سر هم در نظر گرفته شده و رفتار سیستم در شرایط جریان گذرا، ظرفیت واقعی و مطلوب، سیاست انبساطی و انقباضی ظرفیت و سود کل زنجیره تأمین با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی پویا و آنالیز عددی قوی شامل محصولات بازتولیدی تحت سناریوهای مختلف، بررسی شده است.

ابزار مدل و آنالیز در مقاله جاری پویایی‌شناسی سیستم است که در اوایل دهه ۶۰ به عنوان متدولوژی مدل‌سازی و شبیه‌سازی بلندمدت برای تصمیم‌گیری دینامیک در مدیریت صنایع معرفی شده است. از آن زمان پویایی‌شناسی سیستم در مسائل استراتژیک و سیاست‌های تجاری بسیاری به کار رفته و تعداد کمی از آن در مدل‌سازی زنجیره تأمین به کار رفته که بسیاری از آنها به لجستیک روبه‌جلو پرداخته‌اند.

فورستر^۶ در کتاب پویایی‌شناسی صنعت^۷ یک مدل زنجیره تأمین را به عنوان یکی از اولین مثال‌های خود از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای باز طراحی زنجیره تأمین ارائه کرده است (۲۳). در سال ۲۰۰۰

مینگیسی^۸ و همکاران (۲۴) از این رویکرد برای بهبود رفتار لجستیک پیچیده صنعت یکپارچه غذا استفاده کردند و یک مدل عمومی ارائه دادند و نتایج شبیه‌سازی را به طور عملی در زمینه تولید و فرایند ماکیان پیاده کردند.

در کتاب استرمن^۹ دو مدل برای مطالعه زنجیره معکوس پیشنهاد شده است. مدل اول زامودیو-رامیرز^{۱۰}، برای بازیابی و بازیافت مواد در صنایع اتوماتیک امریکا است که بینشی را درباره افزایش بازیافت اتوماتیک ایجاد کرد. مدل دوم تیلور، بر مکانیزم بازار بازیافت کاغذ تمرکز کرده است که معمولاً به بی‌ثباتی و ناکارآمدی در جریان، قیمت‌ها و... مربوط می‌شود (۲۵).

پویایی‌شناسی سیستم برای مسائل مدیریتی پویا و بلندمدت طراحی شده است. تمرکز آن بر درک فرایندهای فیزیکی، جریان‌های اطلاعات و تعامل سیاست‌های مدیریتی است که پویایی متغیرهای موردنظر ما را می‌سازد. روابط بین این اجزا، ساختار سیستم را می‌سازد. ساختار سیستم در طول زمان با عملیات خود الگوی رفتاری پویای سیستم را تولید می‌کند و توصیف معتبری از فرایند دنیای واقعی ارائه می‌دهد. هدف کلی از یک مطالعه پویایی‌شناسی سیستم، درک چرایی و چگونگی پویایی تولید و جستجوی سیاست‌هایی برای بهبود عملکرد سیستم است. منظور از سیاست‌ها، قوانین تصمیم‌گیری در سطح کلان است که توسط مدیران سطح بالا استفاده می‌شود. این رویکرد با شبیه‌سازی معمولی مانند شبیه‌سازی گسسته متفاوت است. برای شبیه‌سازی گسسته هدف این است که مدل نقطه به نقطه واقعیت را دنبال کند و قابلیت پیش‌بینی دقیق داشته باشد در صورتی که در پویایی‌شناسی سیستم مسئله اصلی این است که رفتار پویای سیستم مانند رشد نمایی،

نوسانی و... مدل شود. بنابراین هدف مدل این نیست که سود کل زنجیره به ازای هر هفته چگونه خواهد بود؛ بلکه این است که تحت چه شرایطی و چه سیاست برنامه ریزی ظرفیت، کل سود بالاتر می رود و در حالت منفی، چگونه قابل کنترل است.

در سال ۲۰۱۳ داس^{۱۱} و همکاران (۲۶) برای آنالیز سیستم یکپارچه ارائه شده بر محصولات الکترونیکی تکیه کردند و برای مقدار اصلی پارامترهای مدل خود از مقالات گیبر و بلاس سال ۲۰۱۰، نیرا و همکاران سال ۲۰۰۶ استفاده کردند. با سیاست تبادل محصول (دریافت محصول نو در ازای محصول کهنه) مصرف کنندگان برای بازگرداندن محصول کهنه به کارخانه تشویق شدند و در این مقاله نشان داده شد که استفاده از این سیاست جمع آوری محصولات کهنه را بیشتر می کند و اثر شلاق چرمی را در زنجیره کاهش می دهد و اثر شلاق چرمی در زنجیره حلقه باز بیشتر از زنجیره حلقه بسته است.

در سال ۲۰۰۸، کینگلی^{۱۲} و همکاران (۲۷) رفتار زنجیره تأمین معکوس را برای یک محصول در بلندمدت با بازتولید و شبیه سازی انحرافات موجودی و اثر شلاق چرمی و در نظر گرفتن سیاست های حفاظت از محیط زیست و استراتژی های برنامه ریزی ظرفیت بازتولید همراه با رویکرد متدولوژی پویایی شناسی سیستم ها بررسی کردند.

۳- تعریف مسئله

در این تحقیق سیاست های برنامه ریزی ظرفیت در افق بلندمدت یک زنجیره تأمین حلقه بسته و تک محصول شامل عملیات های تأمین، تولید، توزیع، جمع آوری، بازیافت بررسی شده که در آن نه تنها مسائل مالی بلکه زیست محیطی مانند تأثیر تصویر

سبز بر تقاضای مشتری در نظر گرفته شده است. زنجیره تأمین مورد نظر سه سطحی (تولیدکننده، خرده فروش و مشتری) است. در کانال معکوس عمل جمع آوری توسط خرده فروش با استراتژی تبادل محصول صورت می گیرد، سپس تنها فعالیت، بازیافت سرب موجود در باتری توسط بازیافت کننده خارجی انجام می شود که ۷۰ درصد سرب موجود در آن بازیافت می شود و به صورت مواد اولیه وارد خط تولید می شود و محصول نهایی به خرده فروش انتقال داده می شود.

زنجیره های تأمین به واسطه طبیعت پیچیدشان با حد بالایی از عدم قطعیت روبه رو هستند، عدم قطعیت ها در مسائل زنجیره تأمین به دو دسته تقسیم می شوند: ۱. عدم قطعیت مربوط به پارامترها که خود به دو دسته سیستمی و محیطی قابل تقسیم است ۲. عدم قطعیت مربوط به حوادث غیر مترقبه. این عدم قطعیت ها در زنجیره معکوس به علت عدم قطعیت در الگوی تقاضایی مشتری و کیفیت محصول بازگشتی شدیدتر است؛ بنابراین در این تحقیق به منظور مواجه شدن با عدم قطعیت، زنجیره به صورت حلقه بسته و برنامه ریزی ظرفیت در دوره طولانی مدت بررسی می شود.

مطالعه موردی کارخانه صابابتری است که باتری اسیدی خودرو تولید می کند. این محصول در استارت زدن، روشن کردن و احتراق در خودرو کاربرد دارد. باتری های اسیدی شامل آند، کاتد، شبکه های فلزی، الکترولیت، پروپیلن و مواد دیگری است (۴). طبق قرارداد بیسل که در سال ۱۹۹۲ منعقد شده است باتری های که طول عمرشان پایان یافته است به عنوان زباله سمی شناخته می شوند؛ چرا که فلزات سنگین و مواد سمی به کاررفته در تولید این محصول دارای

روبه جلو شامل تولیدکننده و خرده‌فروش است. تقاضای تولیدکننده برای مواد خام از دو طریق خرید سرب از معدن و خرید سرب از بازیافت‌کننده ارضا می‌شود. محصولات جدید از تولیدکننده به خرده‌فروش منتقل می‌شود و به مشتریان فروخته می‌شود. اعمال سیاست تبادل محصول برای محصولات دست دوم، تأثیر زیادی بر بازیافت این محصولات دارد.

زنجیره معکوس با جمع‌آوری محصولات در پایان دوره عمرشان با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی شروع می‌شود. محصولات جمع‌آوری شده توسط خرده‌فروش به کارخانه بازیافت انتقال داده می‌شود.

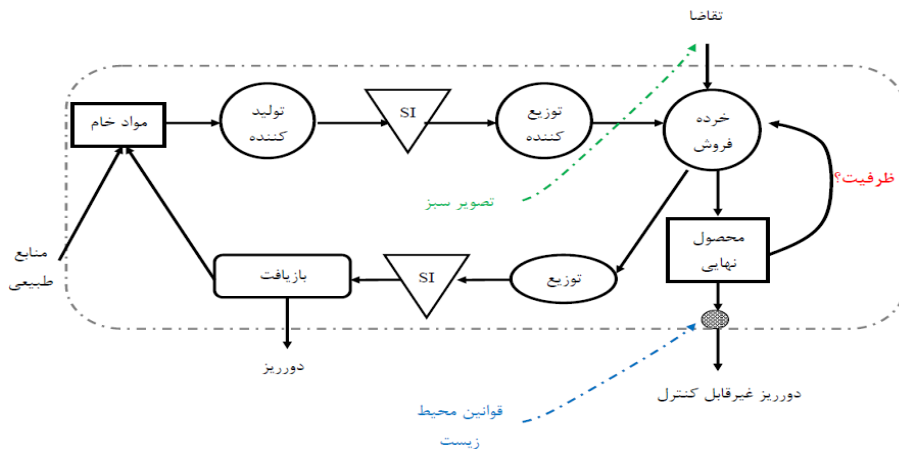
همان‌طور که در شکل مشخص است، سفارشات خرده‌فروش طی زمان دارای رفتار نوسانی بوده است و واریانس سفارشات در حلقه بسته بیشتر از سنتی است. در این سیستم پاسخ به این مسئله اهمیت دارد که سیاست برنامه‌ریزی ظرفیت و وضعیت محصول تبدلی چگونه باشد تا: ۱. قوانین زیست‌محیطی رعایت شود ۲. سود کل زنجیره بیشینه شود.

۴-۲- نمودار مرز مدل و چارچوب مسئله

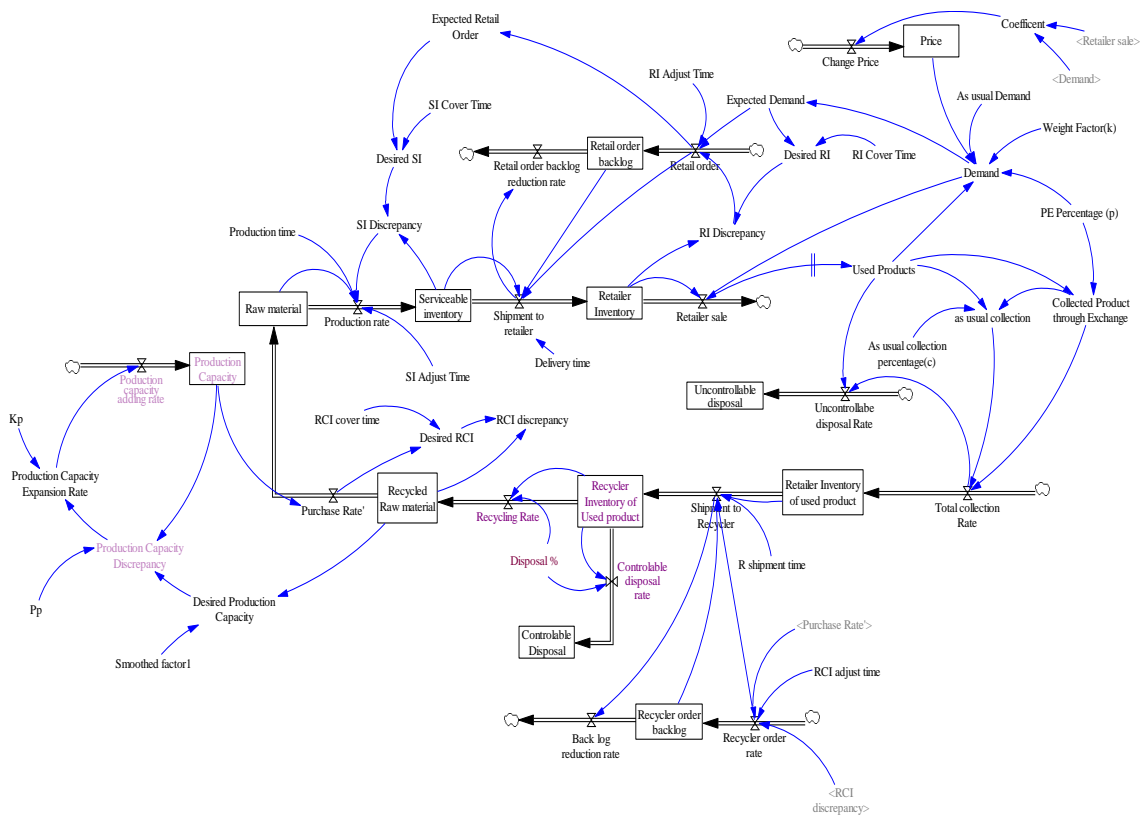
نمودار مرز مدل در جدول ۱ نشان داده شده است. لیست متغیرهای درون‌زا، برون‌زا و خارج از مرز مدل در این نمودار قابل مشاهده است. همچنین در این مطالعه بر زنجیره تأمین حلقه بسته تک‌محصولی در شکل ۳ تمرکز شده است. زنجیره

جدول ۱- نمودار مرز مدل

متغیرهای درون‌زا	متغیرهای برون‌زا	متغیرهای خارج از مرز مدل
ظرفیت تولید	ورودی مواد خام	کشش محصول
ظرفیت جمع‌آوری	مجموع تقاضا	محصولات جایگزین
قیمت باتری نو	فعالیت قانون	محصول مکمل
قیمت باتری خریداری شده از مشتری	ورودی مواد خام	
درصد بازیافت سرب موجود در باتری		
ظرفیت بازیافت		
ظرفیت تولید		



شکل ۳- جریان زنجیره تأمین حلقه بسته تک‌محصولی با فعالیت بازیافت



شکل ۵- نمودار جریان موجودی

$$Collected_Product_through_Exchange = p * Used_products \quad ۱$$

$$As_Usual_Collection = (Used_Product - \quad ۲$$

$$Collected_Product_through_Exchange) * c \quad ۳$$

$$Total_Collection_Rate = Collected_Product_through_Exchange + As_Usual_Collection$$

$$Demand_{with_PE} = Demand_{As_Usual} + k * (p * Used_Products) \quad ۴$$

که در آن p نشان دهنده درصد تبادل محصول (PE) است. نرخ جمع آوری کالاهای استفاده شده بدون سیاست تبادل محصول با c نشان داده شده است و k عامل وزنی است که به تعریف رابطه بین تقاضا و PE کمک می کند. مقادیر k و c از یک شرکت به شرکت دیگر و از محصولی به محصول دیگر متفاوت است. اگر $k=0$ باشد، PE تأثیری بر تقاضای محصولات جدید ندارد. اگر $k > 0$ ، PE بر تقاضا تأثیر دارد.

۵- پیاده سازی و ارزیابی

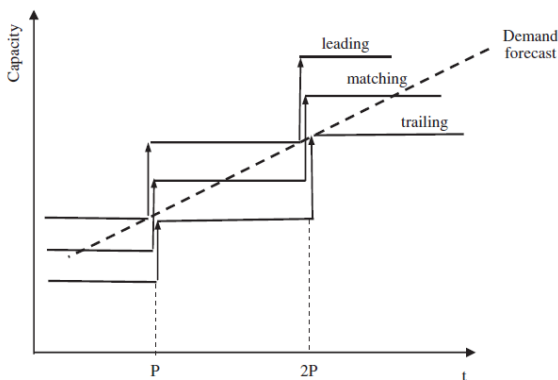
مدل این مسئله برای محصول باتری اسیدی خودرو در بازار ایران با نرم افزار ونسیم پیاده سازی شده است و به مدت ۲۰ ماه اجرا شده است. در این مدل تأثیر دو سیاست تبادل محصول بر جمع آوری و K_p و P_p بر ظرفیت تولید بررسی شده است.

۱-۵- بررسی تأثیر سیاست تبادل محصول بر

جمع آوری

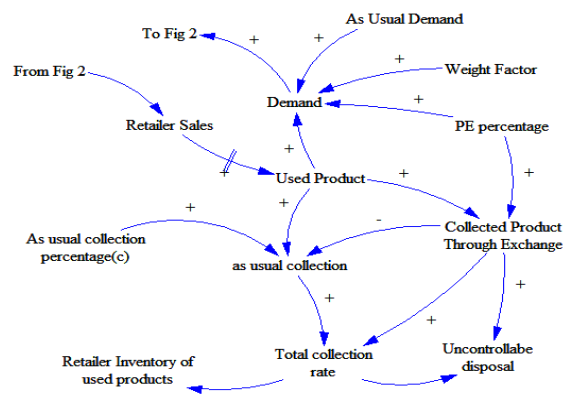
تأثیر سیاست تبادل محصول بر تقاضا و جمع آوری محصولات کارکرده در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود با پیاده سازی این سیاست میزان جمع آوری محصول افزایش می یابد. سیاست تبادل محصول در مدل در شکل ۶ قابل مشاهده است که توسط معادلات (۱) تا (۴) فرموله شده است.

نرخ انبساط ظرفیت تولید وابسته به اختلاف ظرفیت مطلوب تولید از مقدار واقعی تولید است و مقدار اختلاف را طوری تعیین می‌کند که به مقدار مطلوب نزدیک شود. نرخ انبساط ظرفیت تولید در هر دوره مثبت و مضربی صحیح از P_p است. این نرخ با تابع پالس مدل شده است که در آن مقدار هر پالس نسبتی از اختلاف ظرفیت تولید در یک دوره زمانی ضربدر پارامتر K_p است. استراتژی‌های برنامه‌ریزی ظرفیت در شکل ۸ نشان داده شده است.

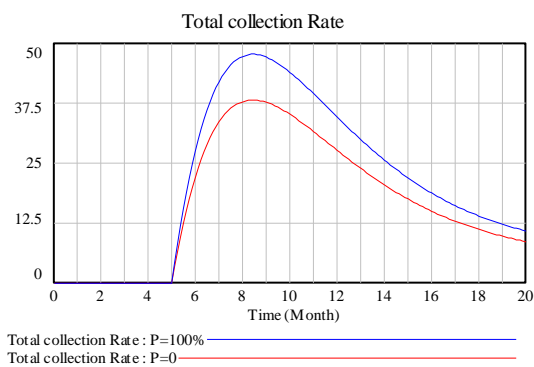


شکل ۸- استراتژی‌های برنامه‌ریزی ظرفیت

در استراتژی ظرفیت **Leading** اضافه ظرفیت جمع‌آوری می‌شود؛ بنابراین تغییرات ناگهانی تقاضا پاسخ داده می‌شود. در حالی که استراتژی ظرفیت **Trailing**، تقاضا را به تأخیر می‌اندازد و ظرفیت به طور کامل بهره‌برداری می‌شود و در استراتژی ظرفیت **Matching** سعی می‌شود تقاضا و ظرفیت طول زمان انطباق داده شوند. در $K_p > 20$ ، استراتژی ظرفیت **Leading** است که با توجه به نتایج شبیه‌سازی باید از این استراتژی استفاده شود. واضح است که بین تصمیم افزایش ظرفیت تولید و عملی شدن آن فاصله زمانی وجود دارد که با متغیر نرخ افزایش ظرفیت نشان داده شده و با تأخیری از نرخ انبساط ظرفیت عمل می‌کند. تصمیم‌گیرنده



شکل ۶- نمودار علی‌حلقوی برای تقاضا، تبادل محصول و جمع‌آوری



شکل ۷- تأثیر PE بر جمع‌آوری

جدول ۲- پارامترهای مهم در مدل

مقدار	نماد	پارامتر (واحد اندازه‌گیری)
۰/۵	p	تبادل محصول (درصد)
۰/۲	k	عامل وزنی
۰/۸	c	جمع‌آوری معمول (درصد)
		نرخ بازیافت محصول (درصد)
		نرخ دورریز (درصد)
		زمان‌های تأخیر (هفته‌ها)

۲-۵- بررسی تأثیر K_p و P_p روی ظرفیت تولید

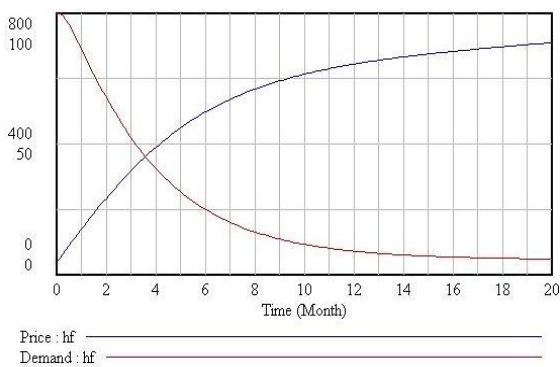
ظرفیت تولید هر P_p واحد زمانی بازبینی می‌شود و برای سرمایه‌گذاری بر ظرفیت تولید تصمیم‌گیری می‌شود. طول دوره زمانی بازبینی عموماً به چرخه عمر محصول و هزینه‌های عملیاتی تولید بستگی دارد که در این مدل بررسی شده است.

۶- نتایج مدل

در این بخش رفتارهای متغیرهای مهم در مدل مقایسه شده است.

۶-۱- مقایسه نمودار رفتار قیمت و تقاضا

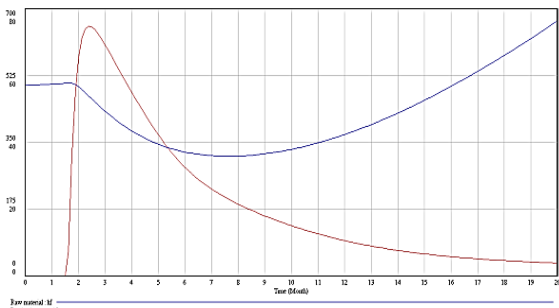
همان‌طور که دو نمودار شکل ۱۱ نشان می‌دهند با افزایش قیمت محصولات در بازار، تقاضای مشتریان کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- نمودارهای قیمت و تقاضا

۶-۲- مقایسه نمودار رفتار موجودی مواد خام و نرخ تولید

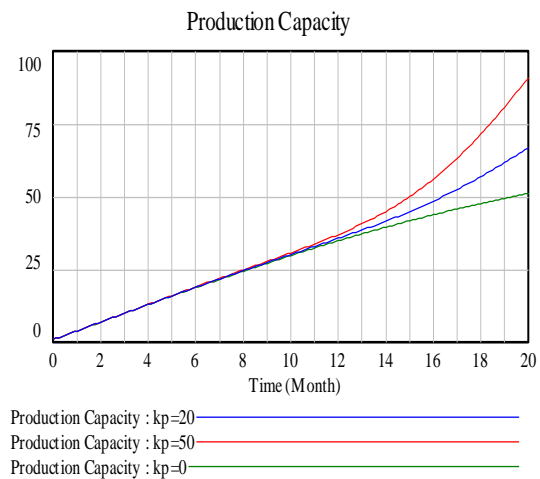
همان‌طور که در نمودار شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در ابتدا نرخ تولید افزایش می‌یابد و میزان موجودی مواد خام کاهش می‌یابد. با شروع کاهش نرخ تولید به علت اعمال سیاست برنامه‌ریزی تولید، میزان موجودی مواد خام افزایش می‌یابد.



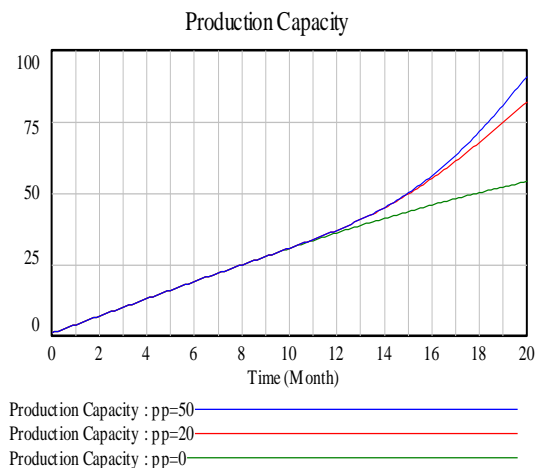
شکل ۱۲- نمودار موجودی مواد خام و نرخ تولید

می‌تواند اثر سیاست‌های مختلف را با تغییر پارامترهای فوق بررسی کند. مدل فوق می‌تواند برای افزایش و کاهش ظرفیت تولید استفاده شود. ولی در این تحقیق تنها افزایش ظرفیت مدنظر است به دلیل آنکه دوره بلوغ عمر محصول مدنظر است و تقاضا و بازگشت محصول ثابت است.

تأثیر سیاست برنامه‌ریزی ظرفیت بر مدل در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیاده‌سازی سیاست برنامه‌ریزی ظرفیت بر ظرفیت تولید تأثیرگذار است. با افزایش پارامترها سطح ظرفیت تولید افزایش می‌یابد.



شکل ۹- تأثیر K_p بر ظرفیت تولید



شکل ۱۰- تأثیر P_p بر ظرفیت تولید

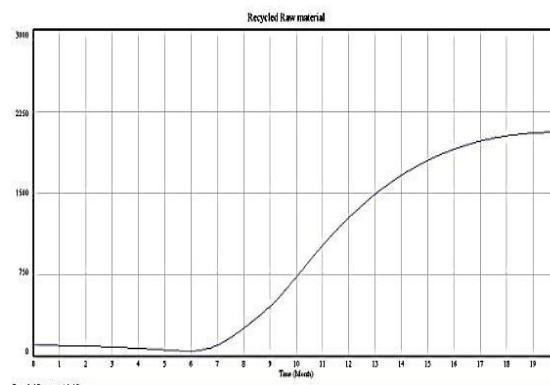
۶-۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مسئله زنجیره معکوس محصول باتری همراه با فعالیت بازیافت سرب موجود در آن پرداخته شد. در این مقاله، دو نوع سیاست بهبود بررسی شده است: ۱. سیاست تبادل محصول بر تقاضا و جمع‌آوری محصولات کارکرده به منظور ایجاد تصویر سبز و ۲. تأثیر سیاست‌های برنامه‌ریزی ظرفیت. این مسئله با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها و نرم افزار ونسیم مدل شده است. تحلیل رفتار مدل مسئله نشان می‌دهد که با اعمال سیاست تبادل محصول، نرخ جمع‌آوری کالاهای استفاده‌شده افزایش می‌یابد که این در راستای فعالیت‌های زیست‌محیطی است و موجب ایجاد تصویر سبز شرکت در ذهن مشتریان خواهد شد. در این مسئله به دلیل وجود تقاضای ثابت برای محصول، تنها امکان افزایش ظرفیت تولید است و بدین ترتیب استراتژی برنامه‌ریزی ظرفیت *Leading* اعمال شده است. بدین معنی که با اضافه ظرفیت جمع‌آوری شده به تغییرات ناگهانی تقاضا پاسخ داده می‌شود. در این مسئله، تأثیر دو پارامتر طول دوره بازیابی ظرفیت P_p و پارامتر نرخ انبساط ظرفیت تولید K_p بررسی شده است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با افزایش پارامترها، ظرفیت تولید افزایش می‌یابد.

۷- تحقیقات آتی

برای تحقیقات آتی، پارامترهای تأثیرگذار اقتصادی از جمله کشش محصول و تأثیر محصولات جایگزین در تقاضا را می‌توان در نظر گرفت. شایان ذکر است در این تحقیق مرکز بازیافت برای تمام تولیدکنندگان به صورت مرکزی در نظر گرفته شده است؛ به صورتی که تولیدکننده، اسید موردنیاز خود را تنها از یک مرکز می‌تواند خریداری کند. تحقیقات آتی می‌تواند شامل ادغام این مرکز با کمپانی تولیدکننده باشد یا چند مرکز جمع‌آوری اسید برای تولیدکننده در نظر گرفته شود.

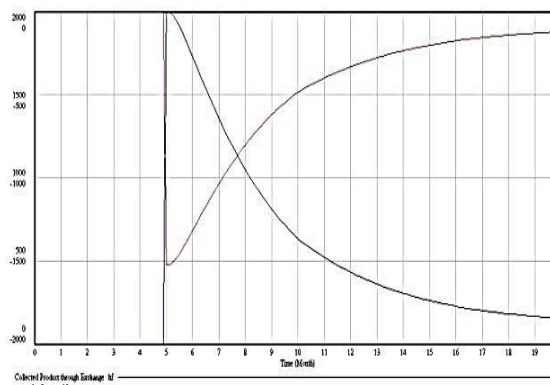
همچنین از نمودار شکل ۱۳ رفتار متغیر سطح موجودی مواد خام بازیافت‌کننده به صورت S شکل قابل مشاهده است.



شکل ۱۳- رفتار متغیر سطح موجودی مواد خام بازیافت‌کننده

۶-۳- مقایسه رفتار متغیرهای مربوط به جمع‌آوری محصول

دو روش جمع‌آوری محصول به صورت جمع‌آوری معمول و جمع‌آوری از طریق تبادل محصول در مدل اعمال شده است. با مقایسه دو نمودار شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که با افزایش جمع‌آوری معمول محصول، میزان محصول جمع‌آوری شده از طریق سیاست تبادل محصول کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴- مقایسه رفتار متغیرهای as usual collection و Collected product through exchange

محصولات وجود ندارد که در تحقیقات آتی می‌توان
یک محل جمع‌آوری جداگانه ایجاد کرد و تأثیر آن را
بر زنجیره بررسی کرد.

همچنین در این مقاله جمع‌آوری محصولات
استفاده‌شده صرفاً از طریق خرده‌فروشان صورت
می‌گیرد و محل جداگانه‌ای برای جمع‌آوری

پیوست ۱- متغیرهای سطح مدل و جریان

جدول ۳- متغیر سطح

متغیرهای سطح	توضیحات
Raw Material	موجودی مواد خام
Serviceable Inventory	موجودی در دست برای تولیدکننده
Retailer Inventory	موجودی خرده‌فروش
Retailer Order backlog	سفارشات ارضاننده خرده‌فروش که در دوره آتی باید تأمین شود
Retailer Inventory of Used Product	موجودی خرده‌فروش از جمع‌آوری محصولات کارکرده
Uncontrollable Disposal	تجمع دورریز غیرقابل کنترل
Recycler Inventory of Used product	موجودی بازیافت‌کننده از محصول کارکرده
Controllable Disposal	تجمع دورریز قابل کنترل
Recycled Raw material	موجودی مواد خام بازیافت‌شده
Production Capacity	ظرفیت تولید
Recycler Order backlog	سفارشات ارضاننده بازیافت‌کننده که در دوره آتی باید تأمین شود
Recycler order backlog	سفارشات بازیافت‌کننده که در دوره آتی تأمین می‌شود
Price	قیمت محصولات

جدول ۴- متغیر جریان

متغیرهای جریان	توضیحات
Production Rate	نرخ تولید در هر هفته
Shipment to Retailer	نرخ ارسال به خرده‌فروش
Retailer Sale	نرخ فروش خرده‌فروش
Retailer Order	سفارشات آتی که از خرده‌فروش به تولیدکننده داده می‌شود
Retail order backlog reduction rate	مقدار محصولاتی که به خرده‌فروش انتقال داده می‌شود
Uncontrollable disposal Rate	نرخ دورریز غیرقابل کنترل
Total collection Rate	نرخ کل جمع‌آوری توسط خرده‌فروش
Shipment to Recycler	نرخ ارسال از خرده‌فروش
Controllable disposal rate	نرخ دورریز قابل کنترل
Recycling Rate	نرخ بازیافت
Purchase Rate	نرخ خرید
Recycler order rate	نرخ سفارش بازیافت‌کننده
Back log reduction rate	نرخ کاهش سفارش در دست
Production capacity adding rate	نرخ افزایش ظرفیت تولید
Change Price	نرخ تغییر قیمت

پیوست ۲- معادلات مدل

متغیرهای سطح

- ✓ Raw Material (0)=500
Raw Material (t+dt) = Raw Material (t) + (Purchase Rate-Production rate)*dt
- ✓ Serviceable Inventory (0) = 600
Serviceable Inventory (t+dt) = Serviceable Inventory (t) + (Production rate-Shipment to retailer)*dt
- ✓ Retailer Inventory (0) = 800
Retailer Inventory (t+dt) = Retailer Inventory (t) + (Shipment to retailer-Retailer sale)* dt
- ✓ Retail order backlog(0) = 0
Retail order backlog (t+dt) = Retail order backlog (t) + (Retail order-Retail order backlog reduction rate)*dt
- ✓ Retailer Inventory of used product (0) = 100
Retailer Inventory of used product (t+dt) = Retailer Inventory of used product (t) + (Total collection Rate-Shipment to Recycler)*dt
- ✓ Controllable Disposal (0) = 0
Controllable Disposal (t+dt) = Controllable Disposal (t) + Controllable disposal rate* dt
- ✓ Recycler Inventory of Used product (0) = 200
Recycler Inventory of Used product (t+dt) Recycler Inventory of Used product (t) + (Shipment to Recycler-Recycling Rate Controllable disposal rate)*dt
- ✓ Recycled Raw material(0) = 300
Recycled Raw material (t+dt) = Recycled Raw material (t) + (Recycling Rate-Purchase Rate)*dt
- ✓ Recycler order backlog(0)=0
Recycler order backlog (t+dt) = Recycler order backlog (t) + (Recycler order rate-Back log reduction rate)* dt
- ✓ Production Capacity (0) = 100
Production Capacity (t+dt) = Production Capacity (t) + Production capacity adding rate* dt
- ✓ Price (0) = 40
Price (t+dt) = Price (t) + Change Price*dt

متغیرهای جریان

- ✓ Production Rate = MIN(Raw material/Production time, SI Discrepancy/SI Adjust Time)
- ✓ Shipment to Retailer = IF THEN ELSE(Serviceable inventory - Retail order - Retail order backlog >= 0, Retail order + Retail order backlog, Serviceable inventory) / Delivery time
- ✓ Retailer Sale = IF THEN ELSE (Retailer Inventory-Demand >= 0, Demand, Retailer Inventory)
- ✓ Retailer Order = Expected Demand + RI Discrepancy/RI Adjust Time
- ✓ Retail order backlog reduction rate = Shipment to retailer
- ✓ Uncontrollable disposal Rate = Used Products - Total collection Rate
- ✓ Total collection Rate = SMOOTH(as usual collection + Collected Product through Exchange, 3)
- ✓ Shipment to Recycler = IF THEN ELSE(Retailer Inventory of used product-Recycler order backlog - Recycler order rate >= 0, Recycler order rate + Recycler order backlog, Retailer Inventory of used product) / R shipment time
- ✓ Controllable disposal rate = Disposal % * Recycler Inventory of Used product
- ✓ Recycling Rate = Recycler Inventory of Used product * (1-Disposal %)
- ✓ Purchase Rate = Production Capacity
- ✓ Recycler order rate = Purchase Rate - RCI discrepancy /RCI adjust time
- ✓ Back log reduction rate = Shipment to Recycler
- ✓ Production capacity adding rate = DELAY3I (Production Capacity Expansion Rate, 24, 3)
- ✓ Change Price = DELAY1(Coefficient, 2)

متغیرهای کمکی

- ✓ Demand = SMOOTH ((As usual Demand +Weight Factor(k) *(PE Percentage (p) *Used Products)) / (0.2*Price),3)
- ✓ Collected Product through Exchange = PE Percentage (p) * Used Products
- ✓ Used Products = DELAY FIXED(Retailer sale, 5, 0)
- ✓ as usual collection = (Used Products - Collected Product through Exchange) * As usual collection percentage(c)
- ✓ Expected Retail Order = SMOOTH(Retail order, 1)
- ✓ Desired Production Capacity = DELAYII (Recycled Raw material, Smoothed factor1, 1)
- ✓ Production Capacity Discrepancy = PULSE (Desired Production Capacity - Production Capacity, Pp)
- ✓ Production Capacity Expansion Rate = MAX (Kp*Production Capacity Discrepancy,0)
- ✓ SI Discrepancy = MAX (Desired SI-Serviceable inventory, 0)
- ✓ RI Discrepancy = MAX (Desired RI-Retailer Inventory, 0)

References

- (1) S. Mitra. (2007). "Revenue management for remanufactured products," *Omega*, 35(5), 553-562.
- (2) S. Lambert, D. Riopel, & W. Abdul-Kader. (2011). "A reverse logistics decisions conceptual framework," *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 561-581.
- (3) J. D. Blackburn, V. D. R. Guide, G. C. Souza, & L. N. Van Wassenhove. (2004). "Reverse supply chains for commercial returns," *California management review*, 46(2), 6-22.
- (4) G. Kannan, P. Sasikumar, & K. Devika. (2010). "A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling," *Applied Mathematical Modelling*, 34(3), 655-670.
- (5) M. Pagell, Z. Wu, & N. N. Murthy. (2007). "The supply chain implications of recycling," *Business Horizons*, 50(2), 133-143.
- (6) R. K. Pati, P. Vrat, & P. Kumar. (2008). "A goal programming model for paper recycling system," *Omega*, 36(3), 405-417.
- (7) A. Muzi. (1995). "Collection of spent batteries in Rome," *Journal of power sources*, 57(1), 19-21.
- (8) M. Phillips & S. Lim. (1998). "Secondary lead production in Malaysia," *Journal of power sources*, 73(1), 11-16.
- (9) P. Frost. (1999). "Developments in lead-acid batteries: a lead producer's perspective," *Journal of power sources*, 78(1), 256-266.
- (10) A. Zabaniotou, E. Kouskoumvekaki, & D. Sanopoulos. (1999). "Recycling of spent lead/acid batteries: the case of Greece," *Resources, conservation and recycling*, vol. 25(3), 301-317.
- (11) S. E. Daniel, C. P. Pappis, & T. G. Voutsinas. (2003). "Applying life cycle inventory to reverse supply chains: a case study of lead recovery from batteries," *Resources, Conservation and Recycling*, 37(4), 251-281.
- (12) M. Fleischmann, J. M. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. Van der Laan, J. A. Van Nunen, & L. N. Van Wassenhove. (1997). "Quantitative models for reverse logistics: a review," *European journal of operational research*, 103(1), 1-17.
- (13) J. D. Linton, R. Klassen, & V. Jayaraman. (2007). "Sustainable supply chains: an introduction," *Journal of Operations Management*, 25(6), 1075-1082.
- (14) P. A. Horvath, C. W. Autry, & W. E. Wilcox. (2005). "Liquidity implications of reverse logistics for retailers: A Markov chain approach," *Journal of Retailing*, 81(3), 191-203.
- (15) M. S. Pishvae & S. Hamed. (2009). "A System Dynamics Approach for Capacity Planning and Price Adjustment in a Closed-Loop Supply Chain," in

- Proceeding of Computer Modeling and Simulation, 2009. EMS'09. Third UKSim European Symposium on*, 435-439.
- (16) D. Vlachos, P. Georgiadis, & E. Iakovou. (2007). "A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains," *Computers & Operations Research*, 34(2), 367-394.
- (17) P. Georgiadis & D. Vlachos. (2003). "Analysis of the dynamic impact of environmental policies on reverse logistics," *Operational Research*, 3(2), 123-135.
- (18) P. Georgiadis, D. Vlachos, & G. Tagaras. (2006). "The Impact of Product Lifecycle on Capacity Planning of Closed-Loop Supply Chains with Remanufacturing," *Production and Operations Management*, 15(4), 514-527.
- (19) P. Georgiadis & M. (2008). Besiou, "Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: a system dynamics approach," *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1665-1678.
- (20) P. Georgiadis & E. (2010). Athanasiou, "The impact of two-product joint lifecycles on capacity planning of remanufacturing networks," *European Journal of Operational Research*, 202(2), 420-433.
- (21) P. Georgiadis & M. (2010). Besiou, "Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: a system dynamics analysis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5-8), 475-493.
- (22) P. Georgiadis & E. (2013). Athanasiou, "Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing," *European Journal of Operational Research*, 225(1), 44-58.
- (23) D. R. Towill, M. M. Naim, & J. Wikner. (1992). "Industrial dynamics simulation models in the design of supply chains," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 22(5), 3-13.
- (24) S. Minegishi & D. Thiel. (2000). "System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain," *Simulation Practice and Theory*, 8(5), 321-339.
- (25) J. D. Sterman. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*, 19: Irwin/McGraw-Hill Boston, 2000.
- (26) D. Das & P. Dutta. (2013). "A system dynamics framework for integrated reverse supply chain with three way recovery and product exchange policy," *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 720-733.
- (27) D. Qingli, S. Hao, & Z. Hui. (2008). "Simulation of remanufacturing in reverse supply chain based on system dynamics," in *Proceeding of Service Systems and Service Management, 2008 International Conference on*, 1-6.

¹- Fleischmann

²- Linton

³- Georgiadis and Vlachos

⁴- Georgiadis and Besiou

⁵- Athanasiou

⁶- Forrester

⁷- Industrial Dynamics

⁸- Minegishi

⁹- Sterman

¹⁰- Zamudio-Ramirez

¹¹- Das

¹²- Qingli