

شبیه‌سازی زنجیره تأمین دوسطحی سنگ آهن-کنسانتره و کنسانتره-گندله

به کمک رویکرد پویایی‌های سیستم

میراحمد محمدی^۱، احمدرضا صیادی^{۲*}، علی حسین زاده کاشان^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار اقتصاد معدن دانشگاه تربیت مدرس

۳. استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۲۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۷/۰۷/۳۰، تاریخ تصویب: ۹۸/۰۱/۱۷)

چکیده

زنجیره تأمین صنعت فولاد به‌روش احیای مستقیم، شامل تهیه سنگ آهن، تولید کنسانتره، گندله، آهن اسفنجی و فولاد است. محدودیت تأمین کنندگان، تنوع نهاده‌های مصرفی و محدودیت مشتریان سبب تنوع گزینه‌های فنی و اقتصادی می‌شود که مدیریت بهینه زنجیره تأمین را ضروری می‌کند. هدف پژوهش حاضر، ارائه مدل پویای زنجیره تأمین دوسطحی (سنگ آهن-کنسانتره و گندله) به کمک رویکرد پویایی‌های سیستم است. بدین منظور، ضمن شناسایی متغیرهای کمی و کیفی و تعیین روابط میان آن‌ها، چگونگی تعامل و نحوه بازخورد میان متغیرها تعیین شده است. در ادامه، مدل شبیه‌سازی طراحی و امکان بررسی سناریوهای مختلف تولید فراهم شد. به منظور بررسی کارکرد مدل، از داده‌های یک مجتمع تولید فولاد در ایران استفاده شد. براین اساس، افزایش ۲ درصد عیار سنگ آهن منجر به افزایش ۳/۳۵ درصدی تولید نهایی گندله و افزایش هم‌زمان ۲ درصد عیار سنگ آهن ورودی، ۵ درصد نرخ تولید و ۲ درصد بازیابی و در نتیجه سبب افزایش ۵/۸۵ درصدی تولید گندله شده است.

واژه‌های کلیدی: پویایی‌های سیستم، زنجیره تأمین، فولاد، گندله، مدیریت.

مقدمه

گندله و آهن اسفنجی، در نهایت شمش آهن و محصولات نهایی تولید و به مشتریان و صنایع پایین‌دستی تحویل داده شد. تنوع در منابع تأمین‌کننده مواد خام، محصولات و مشتریان در صنعت فولاد سبب افزایش حساسیت و ریسک‌پذیری مراحل تأمین مواد خام، تولید، انبارداری، بازاریابی و فروش می‌شود. مدیریت و شبیه‌سازی این فرایندها نیز می‌تواند امکان بررسی عوامل تأثیرگذار پنهان را به منظور بهبود عملکرد زنجیره تأمین محصولات فراهم کند. باید توجه داشت که کنترل و هماهنگی میان بخش‌های مختلف زنجیره‌های تولیدی که پویایی خاص خود را دارند، همچنین حجم اطلاعات، عوامل تأثیرگذار، شناسایی نحوه تعامل آن‌ها با یکدیگر و میزان تأثیر هر یک از آن‌ها در عملکرد کلی سیستم کار چندان آسانی نیست؛ بنابراین باید به دنبال استفاده از رویکردی بود که بتواند این پیچیدگی‌ها را مدل کند. یکی از روش‌های رفع این چالش‌ها استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌هاست. پویایی‌های سیستم نگرش سیستمی به مسائل پیچیده

زنجیره تأمین عبارت است از همه اقدامات لازم برای تهیه مواد اولیه، تولید محصول، توزیع محصول تولیدی به خریداران و تحویل آن به مصرف‌کنندگان [۱]. ظهور فناوری‌های نوین و تحولات عظیم در بازارهای جهانی، مدیریت زنجیره تأمین را برای حفظ موقعیت و جایگاه رقابتی بنگاه‌های معدنی و صنعتی بیش‌ازپیش ضروری کرده است. ارتباطات متقابل بخش‌های مختلف و نیاز مشتریان در زمینه کیفیت، هزینه تمام‌شده محصولات و خدمات، مدت‌زمان تعهدشده برای ارائه محصول، تحویل به‌موقع به مشتری و پیشرفت فناوری از جمله عواملی هستند که سبب کاهش استفاده از سیستم‌های سنتی سفارش، خرید، تدارک و حرکت به سوی سیستم مدیریت زنجیره تأمین از سوی شرکت‌ها در سطوح مختلف شده‌اند. زنجیره تأمین شرکت‌های فولادی از تأمین یا تولید مواد خام مانند سنگ آهن و دیگر افزودنی‌ها آغاز شده است. همچنین ضمن تولید یا تأمین محصولات میانی کنسانتره،

بهینه‌سازی فرایند زنجیره تأمین معادن زغال ارائه کردند و نتیجه گرفتند تمرکز اصلی تنها بر کارخانه‌های زغال سنگ و کک به‌عنوان یکی از مواد اولیه تولید فولاد به‌روش کوره بلند است [۸]. جلالی و همکاران نیز کنترل موجودی محصولات فاسدشدنی را در زنجیره دوسطحی بررسی کردند [۹]. سلطانی و همکاران افزایش بهره‌وری در صنایع فولاد را با استفاده از مدیریت زنجیره تأمین بر مبنای کاهش هزینه‌ها بررسی کردند [۱۰]. نوری داریان و طالعی‌زاده نیز به بررسی و توسعه مدل تولید اقتصادی سه‌سطحی یکپارچه و غیریکپارچه پرداختند [۱۱]. در پژوهشی دیگر، عوامل تعیین‌کننده در زنجیره تأمین سنگ آهن در سطح جهان به‌صورت کیفی بررسی شد [۱۳]. لئو و همکاران زنجیره و ریسک تأمین را در صنعت فولاد چین بررسی کردند [۱۴]. علی‌رغم تنوع و تعدد مقالاتی که در حوزه زنجیره تأمین به معنای عام و همچنین زنجیره تأمین فولاد منتشر شده است، توجهی به رابطه و تراکنش متغیرهای درونی و بیرونی مؤثر بر زنجیره تأمین نشده است. براساس مطالعات، به کمک بررسی پویایی‌های زنجیره تأمین فولاد می‌توان متغیرهای تأثیرگذار در زنجیره تأمین فولاد را شناسایی کرد و تأثیر هر متغیر را بر کل زنجیره نشان داد؛ درحالی‌که در مدل‌سازی‌های استفاده‌شده امکان توجه به پویایی میان متغیرها وجود ندارد. یکی از رویکردهای رفع این چالش، پویایی‌های سیستم است.

نخستین ریشه استفاده از پویایی سیستم در زنجیره تأمین به فارستر در سال ۱۹۵۸ بازمی‌گردد که در آن مدلی برای سیستم تولید و توزیع ارائه شد [۴]. در سال ۱۹۶۱ این مدل با افزودن جزئیات بیشتر و ارتباط میان کاربرد مدل و آموزش مدیریت، بسط و توسعه داده شد. انجرهوفر و آنجلاید با مروری بر پژوهش‌های پیشین در مورد مدل‌سازی پویایی سیستم در زنجیره تأمین، آن‌ها را در قالب موضوعاتی مانند مدیریت زنجیره تأمین جهانی، تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت سهام، مدیریت موجودی، تقویت تقاضا، طراحی و مهندسی مجدد زنجیره تأمین و یکپارچه‌سازی این زنجیره طبقه‌بندی کردند [۱۴]. عشایری و لیمس نیز مدلی از پویایی سیستم‌ها ارائه کردند که امکان مدیریت بهبود قابلیت اطمینان تقاضا و همکاری کلی با دیگر شرکت‌ها را برای افزایش ارزش اقتصادی شرکت فراهم می‌کرد [۱۵]. محمودی و مینایی زنجیره تأمین

است که نه تنها منجر به مشخص شدن نحوه ارتباط ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌شود، بلکه میزان بازخورد عوامل درونی را نیز مشخص می‌کند و می‌تواند رفتار سیستم را در دوره‌های زمانی مختلف براساس اطلاعات موجود مدل کند. این رویکرد توانایی شبیه‌سازی زنجیره تأمین‌های پیوسته و درعین حال پیچیده را دارد و به کمک این شبیه‌سازی پیامدهای نامشخص تصمیم‌گیری‌ها آشکار می‌شود [۲]. در این پژوهش، به این مسئله توجه شده و مدل شبیه‌سازی برای زنجیره تأمین فولاد طراحی و اجرا شده است. در پایان نیز سناریوهای مختلف تولید گندله به‌عنوان یکی از حلقه‌های میانی مهم در تولید فولاد به روش احیای مستقیم در یکی از مراکز فولادی کشور بررسی شده است.

پیشینه پژوهش

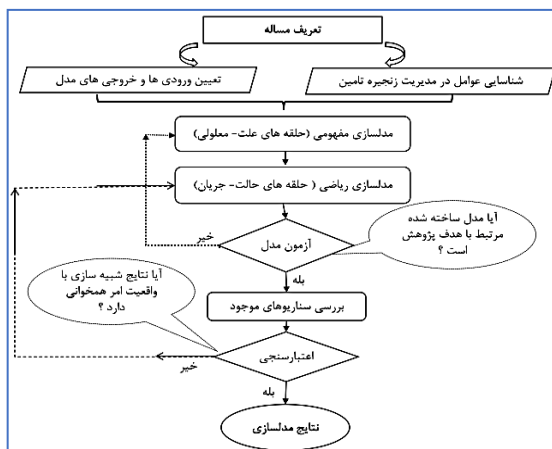
مدیریت زنجیره تأمین در اواخر دهه ۱۹۸۰ مطرح و در دهه ۱۹۹۰ به‌طور وسیع استفاده شد. تا پیش از این، از واژه‌هایی مانند لجستیک و مدیریت عملیات استفاده می‌شد [۳]. پژوهش‌های بسیار وسیعی در این حوزه صورت گرفته و مقالات بسیاری منتشر شده است. با توجه به هدف پژوهش حاضر، در اینجا تنها به پیشینه مطالعات زنجیره تأمین در حوزه معدن و صنایع فولاد پرداخته شد.

روی و گین مدلی را به‌منظور مطالعه عملکرد تولید بهنگام در واحد خرید یک کارخانه فولاد ارائه کردند. این مدل شامل چهار مؤلفه اصلی فضای مورد نیاز محصولات، نزدیکی زمانی تأمین‌کننده‌ها، زمان‌بندی تحویل و ظرفیت وسایل نقلیه است [۴]. گوکینگ و همکاران کاربرد مدیریت زنجیره تأمین در معدن طلای جیوجویا در چین را پایه‌ریزی کردند [۵]. زونگ و پتری نیز کنترل موجودی زنجیره تأمین صنعت فولاد را به‌روش کوره بلند، به کمک برنامه‌ریزی خطی و با هدف کمینه‌کردن هزینه کل موجودی بررسی کردند [۶]. زونگ و هیلو به بررسی چالش‌های زنجیره تأمین در صنعت فولاد پرداختند. از دیدگاه آن‌ها بهبود تنها منحصر به ارتقای روش‌های تولید نیست؛ زیرا این صنعت با عدم قطعیت‌های بسیاری در زنجیره تأمین خود مواجه است که شاید به عدم قطعیت در تأمین مواد خام اولیه، تقاضای بازار و قیمت محصولات منجر شود [۷]. پنگ و همکاران یک مدل ریاضی را برای

دینامیکی وابسته به تولید گندله در نظر گرفته شده است.

روش‌شناسی

کارکرد اصلی روش پویایی سیستم، شناسایی و تبیین فرایندهای بازخوردی است که همراه با ساختارهای حالت و جریان، تأخیرهای زمانی و ساختارهای غیرخطی، پویایی سیستم را نمایش می‌دهند [۲]. در این رویکرد، از حلقه‌های بسته بازخورد برای تحلیل عملکرد سیستم استفاده می‌شود. یک حلقه بازخوردی، زنجیره بسته‌ای از روابط علی است که بر متغیر اولیه تأثیر می‌گذارد. حلقه‌های بازخورد ترکیبی از حلقه‌های بازخورد مثبت (حلقه تقویتی) و حلقه‌های بازخورد منفی (حلقه تعادلی) هستند. دسته حلقه اول یعنی حلقه‌های تقویتی به صورت فزاینده هستند و سبب رشد یا تنزل شدید در طول زمان می‌شوند. حلقه‌های دسته دوم (تعادلی) نقشی هدف‌جو و متعادل‌کننده در سیستم دارند و عامل پایداری و ثبات هستند [۲۵]. در این حلقه‌ها، تأخیرها اهمیت بسیاری دارند و معمولاً بیانگر مرز تأثیرات کوتاه‌مدت و بلندمدت هستند. این حلقه‌ها به خوبی روابط علی موجود در سیستم را توصیف می‌کنند، اما امکان تبیین روابط ریاضی، جریان مواد، سرمایه و اطلاعات و... را ندارند. برای رفع این کاستی از مدل‌های کمی در قالب نمودار حالت و جریان استفاده می‌شود که در واقع بیانگر پویایی موجود در مسئله هستند. در شکل ۱، روش مدل‌سازی زنجیره تأمین با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستمی در قالب گام‌های متوالی آمده است.



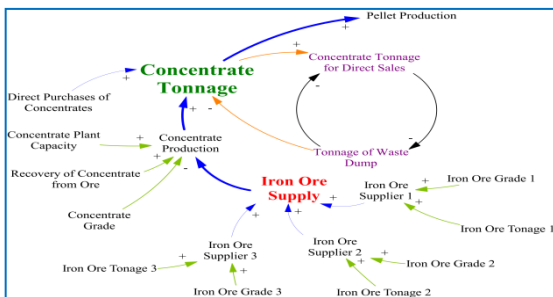
شکل ۱. رویکرد مدل‌سازی زنجیره تأمین گندله به کمک پویایی‌های سیستم

میلگرد در ایران را به کمک پویایی سیستم‌ها مدل کردند و به بررسی مشکلات بازار میلگرد و نوسانات قیمت در دوره پنج‌ساله پرداختند [۱۶]. تیان و همکاران از پویایی سیستم‌ها که مبتنی بر تئوری بازی‌هاست، برای راهنمایی سیاست‌گذاران توسعه مدیریت زنجیره تأمین سبز در صنایع تولیدکننده در چین استفاده کردند [۱۷]. در پژوهشی دیگر، از روش پویایی سیستم برای ارزیابی امکان‌پذیری زنجیره تأمین اتانل در برزیل استفاده شد [۱۸]. در ایران نیز پژوهشی با هدف ارزیابی روند تغییرات منابع و مصارف آب شهری تهران و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها صورت گرفت [۱۹]. همچنین افشار کاظمی و همکاران از روش پویایی سیستم‌ها برای تدوین راهبرد زنجیره تأمین صنعت فولاد ایران استفاده کردند و به عوامل اثرگذار بر این زنجیره پرداختند [۲۰]. شهابی به کمک روش پویایی سیستم‌ها، رویکردهای مدیریت بخش معدن را با هدف ارتقای سهم آن در اقتصاد ملی بررسی کرد [۲۱]. در پژوهشی دیگر با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها، تحلیل حساسیت پویایی زنجیره تأمین فولاد (بازار میلگرد) ایران صورت گرفت و الگویی برای تحلیل بازار میلگرد ارائه شد [۲۲]. صیادی و همکاران با استفاده از رویکرد پویایی سیستم، مدلی با هدف شناسایی عوامل تأثیرگذار بر ارزیابی بهره‌وری انرژی در معادن روباز آهن ارائه دادند [۲۳]. محمودی و همکاران نیز مطالعه‌ای با موضوع ارائه مدل پویایی ارزیابی بهره‌وری نیروی کار معادن در مجتمع معدنی و صنعتی انجام دادند [۲۴].

با توجه به پژوهش‌های فوق، از رویکرد پویایی‌های سیستم در مدیریت زنجیره تأمین در زمینه‌های مختلفی از جمله صنعت بازیافت، حمل‌ونقل، صنایع دامی و صنایع کاغذ استفاده شده است؛ به طوری که این رویکرد ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی رفتار زنجیره تأمین و کمک به مدیران در تصمیم‌گیری‌ها به‌شمار می‌آید. با این حال، در حوزه زنجیره تأمین صنعت معدن و صنایع وابسته کمتر از پویایی‌های سیستم استفاده شده است؛ از این رو در پژوهش حاضر از رویکرد پویایی سیستم به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی رفتار زنجیره تأمین در صنعت فولاد استفاده شد. در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، مطالعه حاضر زنجیره تأمین دوسطحی تولید گندله را به روش احیای مستقیم مدل می‌کند که در آن عمدتاً متغیرهای

استفاده از نمودارهای حالت- جریان بار دیگر رسم شد و تجزیه و تحلیل و سناریوسازی آن صورت گرفت. در پویایی سیستم هرچه مدل از حالت گفتاری و گرافیکی به سمت حالت کمی و ریاضی پیش برود، دقت بیشتری دارد. با توجه به مرزهای مدل، مدل‌سازی مفهومی در سطوح سنگ‌آهن-کنسانتره و کنسانتره-گندله انجام می‌شود.

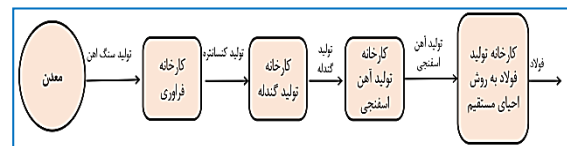
جریان مواد ورودی در این زنجیره دینامیک مسئله است که حرکت مواد اولیه را از نقطه شروع تا نقطه پایانی این پویایی رقم می‌زند. بررسی سناریوهای مختلف برای بهبود عملکرد مرتبط با خط تولید گندله و دستیابی بهتر و سریع‌تر به سیاست‌های مدیریتی شرکت از دیگر اهداف مدنظر است. بدین منظور نخست متغیرهایی تأثیرگذار در خط تولید فولاد شناسایی شد. سپس نحوه تعامل آن‌ها با مشورت کارشناسان ذی‌ربط تعیین و مدل علت- معلولی توسعه داده شد (شکل ۳). بدین ترتیب پس از آغاز زنجیره تولید فولاد از تأمین سنگ‌آهن با عیار و تناژ مشخص (تحويل در محل کارخانه)، سنگ‌آهن تأمین‌شده وارد چرخه تولید کنسانتره شد. ظرفیت تولید کنسانتره یکی از عوامل تعیین‌کننده میزان تناژ ورودی به زنجیره است که عاملی محدودکننده برای خرید مقدار تناژ سنگ‌آهن محسوب می‌شود. در سراسر زنجیره، حداکثر ظرفیت مرحله بعد، باید عاملی محدودکننده برای تولید مرحله قبل در نظر گرفته شود. علاوه بر تولید محصولات میانی به منظور خوراک‌دهی به سطوح بعدی، اضافه تولید هر سطح به بخش فروش مستقیم است. ارسال می‌شود که به درآمدزایی در طول زنجیره می‌انجامد. از سوی دیگر، در طول زنجیره ضایعاتی تولید می‌شود که به سود چرخه تولید نیست و هزینه‌هایی را به زنجیره تولید تحمیل می‌کند. در شکل‌های حالت- جریان مربوط به هر سطح چگونگی بازگشت این ضایعات به چرخه آمده است.



شکل ۳. مدل مفهومی زنجیره تأمین کنسانتره (نمودار علت- معلولی)

بیان مسئله و شناسایی متغیرهای مؤثر

برای تولید فولاد دو روش کلی وجود دارد. در روش اول که شیوه رایج‌تر تولید فولاد است، از احیای غیرمستقیم آهن استفاده می‌شود. سنگ‌آهن پس از فرآوری و تبدیل به آگلومره، به همراه آهک و کک وارد کوره بلند می‌شود و آهن خام به دست می‌آید. در روش دوم (شکل ۲) یعنی احیای مستقیم، کنسانتره سنگ‌آهن با عیار بالاتر از ۶۷ درصد به همراه افزودنی‌هایی مانند بنتونیت و آهک به محصولی به نام گندله تبدیل می‌شود. گندله‌ها گلوله‌های فلزی با ابعاد و شکل مشخص هستند و ماده اصلی تولید آهن اسفنجی محسوب می‌شوند. در نهایت آهن اسفنجی تولیدشده به همراه افزودنی‌هایی از قبیل فروسیلیسیوم، آهک، دولومیت و آهن قراضه برای تولید فولاد به مرحله ذوب و قالب‌گیری ارسال شده و محصول نهایی که همان فولاد است تولید می‌شود.



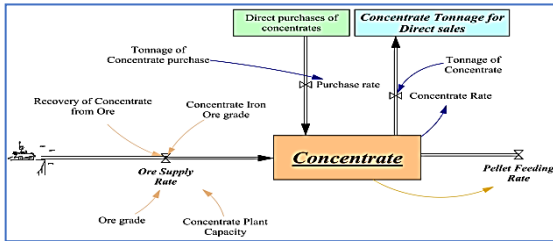
شکل ۲. فرایند تولید فولاد به روش احیای مستقیم

در مقاله حاضر، از رویکرد پویایی سیستم در زنجیره تأمین گندله استفاده شد. در واقع هدف، شناسایی پویایی زنجیره تولید گندله و بازخوردهای درونی متغیرهای تأثیرگذار در بخش‌های مختلف زنجیره تأمین آن است. با توجه به این هدف، عوامل تأثیرگذار در زنجیره تأمین گندله شناسایی شد. در نهایت از میان عوامل تأثیرگذار کشف‌شده، ارزیابی و بررسی مهم‌ترین آن‌ها صورت گرفت و میزان تأثیر آن‌ها در کل زنجیره مشخص شد.

مدل مفهومی علت- معلولی

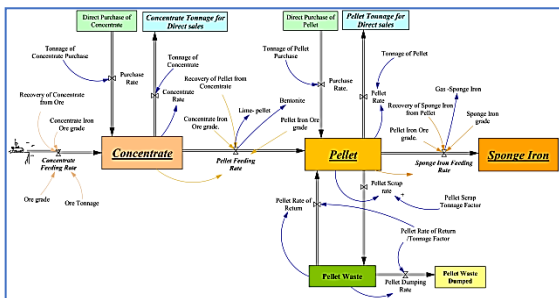
هنر اصلی مدل‌سازی با استفاده از پویایی‌های سیستم، کشف و معرفی ساختارهای بازخوردی است. مدل کیفی در قالب نمودار علت- معلولی برای تبیین وابستگی‌های متقابل و فرایندهای بازخوردی مناسب است و مبنای مدل‌سازی کمی به‌شمار می‌آید. در این پژوهش، فرایند مدل‌سازی با تعیین نوع ارتباط متغیرها به کمک حلقه‌های علت- معلولی آغاز شد. سپس به منظور مقارن‌دهی هر متغیر، مدل ساخته‌شده با

تولید T_c تن کنسانتره با عیار g_c نیاز است (رابطه ۱). عامل محدودکننده در این سطح، ظرفیت تولید کارخانه کنسانتره‌سازی است.



شکل ۵. مدل ریاضی زنجیره تأمین کنسانتره (نمودار حالت-جریان)

همچنین میزان T_c تن کنسانتره با عیار g_c و نرخ تبدیل R_2 برای تولید T_p تن گندله با عیار g_p نیاز است (رابطه ۲). در این قسمت، ظرفیت گندله به‌عنوان عامل محدودکننده در چرخه ایفای نقش می‌کند. آهک و دولومیت که افزودنی‌های کنسانتره هستند، برای گندله‌سازی به کنسانتره تولیدشده اضافه می‌شوند.



شکل ۶. مدل ریاضی زنجیره تأمین گندله (نمودار حالت-جریان)

$$T_o = \frac{T_c \times g_c}{g_o \times R_1} \quad (1)$$

$$T_c = \frac{T_p \times g_p}{g_c \times R_2} \quad (2)$$

$$C_{fr} = \frac{T_o \times R_2 \times g_o}{g_c} \quad (3)$$

$$C = C_{fr} + P_r - C_r - P_{fr} \quad (4)$$

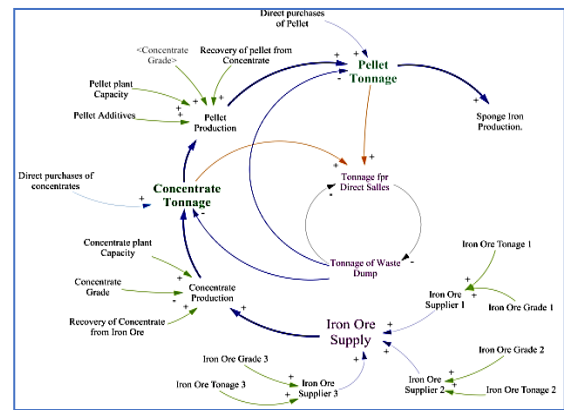
$$C_r = \text{If then else}(C \leq T_c - 0 - (C - T_c)) \quad (5)$$

$$P_{fr} = \frac{C \times R_2 \times g_c}{g_p} \quad (6)$$

$$P = (P_{fr} + P_{r-in} + P_{rr}) - (P_{r-out} + P_{sr} + S_{fr}) \quad (7)$$

$$P_w = (P_{sr}) - (P_{dr} + P_{rr}) \quad (8)$$

در سطح بعد (شکل ۴)، کنسانتره تولیدشده با عیار و تناژ مشخص برای تولید گندله، وارد مرحله گندله‌سازی شده است. باقیمانده محصول تولیدشده می‌تواند برای فروش مستقیم به بازار ارسال، یا در صورت وجود واحد آهن اسفنجی‌سازی، به آن بخش به‌عنوان خوراک اصلی فرستاده شود. بخشی از گندله تولیدی ویژگی لازم (از نظر شکل و ابعاد) را برای مصرف در تولید آهن اسفنجی ندارد که به‌عنوان ضایعات محسوب می‌شود. بخش مهمی از این ضایعات بار دیگر در زمان مناسب وارد چرخه تولید گندله شده و بدین ترتیب درصد ناچیزی از آن به‌عنوان ضایعات نهایی از مدار خارج می‌شود.



شکل ۴. مدل مفهومی زنجیره تأمین گندله (نمودار علت-معلولی)

مدل ریاضی حالت و جریان

براساس شکل ۴، پس از مدل‌سازی مفهومی و رسم نمودار علت-معلولی به‌منظور برآورد کمی عوامل و بیان دقیق نحوه ارتباط آن‌ها به‌صورت ریاضی، نمودار حالت-جریان رسم شد. وظیفه اصلی نمودارهای حالت-جریان دادن اطلاعات موردنیاز برای تصمیم‌گیری است؛ از این رو باید مقدار کمی هر یک از متغیرهای استفاده‌شده در مدل علت-معلولی برای شبیه‌سازی و دیگر عوامل تکمیلی در اختیار باشد. در ادامه، نمودارهای حالت-جریان هر یک از دو سطح تولید کنسانتره و گندله آهن رسم شد. مدل کمی سطح اول، یعنی تأمین کنسانتره در شکل ۵ و سطح دوم یعنی گندله در شکل ۶ آمده است. در ادامه برخی از مهم‌ترین روابط ریاضی متغیرها مشاهده می‌شود.

میزان T_o تن سنگ آهن با عیار g_o و بازیابی R_1 برای

جدول ۱. مقدار متغیرهای مربوط به هر یک از سطوح تولید

متغیر	نماد	مقدار	واحد
تناژ سنگ آهن	T_o	۷/۲	میلیون تن/سال
عیار سنگ آهن	g_o	۵۲	درصد
تناژ کنسانتره	T_c	۴	میلیون تن/سال
عیار کنسانتره	g_c	۶۸	درصد
نرخ تبدیل سنگ آهن به کنسانتره	R_1	۷۳	درصد
میزان فروش مستقیم کنسانتره	C_{ds}	۱/۵	میلیون تن/سال
میزان باطله کنسانتره	C_d	۳/۲	میلیون تن
نرخ تبدیل کنسانتره به گندله	R_2	۶۲/۵	درصد
تناژ گندله	T_p	۲/۵	میلیون تن/سال
عیار گندله	g_p	۶۸	درصد
میزان فروش مستقیم گندله	P_{ds}	مازاد تولید	-
ضایعات گندله	P_{sr}	۱۰ درصد تولید کل	-
ضایعات قابل برگشت گندله	P_{rr}	۶ درصد تولید کل	-
ضایعات غیرقابل برگشت گندله	T_{wd}	۴ درصد تولید کل	-

جدول ۲. تولید برحسب تن در طول ۱۵ ماه

ردیف	سنگ آهن (تن)	کنسانتره (تن)	گندله (تن)
دی ۹۴	۱۰۷,۰۹۳	۵۹,۷۸۳	۰
بهمن ۹۴	۱۰۷,۰۹۳	۵۹,۷۸۳	۰
اسفند ۹۴	۱۰۷,۰۹۳	۵۹,۷۸۳	۰
فروردین ۹۵	۲۶۶,۴۶۵	۱۴۸,۷۵۰	۶۵,۴۱۷
اردیبهشت ۹۵	۲۶۶,۴۶۵	۱۴۸,۷۵۰	۶۵,۴۱۷
خرداد ۹۵	۲۶۶,۴۶۵	۱۴۸,۷۵۰	۶۵,۴۱۷
تیر ۹۵	۲۶۶,۴۶۵	۱۴۸,۷۵۰	۶۵,۴۱۷
مرداد ۹۵	۲۶۶,۴۶۵	۱۴۸,۷۵۰	۶۵,۴۱۷
شهریور ۹۵	۲۶۶,۴۶۵	۱۴۸,۷۵۰	۶۵,۴۱۷
مهر ۹۵	۲۶۶,۴۶۵	۱۴۸,۷۵۰	۶۵,۴۱۷
آبان ۹۵	۲۶۶,۴۶۵	۱۴۸,۷۵۰	۶۵,۴۱۷
آذر ۹۵	۲۶۶,۴۶۵	۱۴۸,۷۵۰	۶۵,۴۱۷
دی ۹۵	۵۹۷,۱۲۰	۳۳۳,۳۳۳	۱۶۶,۶۶۷
بهمن ۹۵	۵۹۷,۱۲۰	۳۳۳,۳۳۳	۱۸۳,۳۳۳
اسفند ۹۵	۵۹۷,۱۲۰	۳۳۳,۳۳۳	۱۹۱,۶۶۷

تحلیل داده‌ها و شبیه‌سازی

از آنجا که مدل‌های ساخته شده در محیط نرم‌افزار ونسیم براساس شواهد کیفی و کمی است، بررسی صحت مدل، اساسی‌ترین و ضروری‌ترین مرحله مدل‌سازی است. اگر به هر دلیل مدل ساخته شده اعتبار کافی نداشته نباشد، نه تنها ناکارآمد خواهد بود، بلکه ممکن است طرح‌ها را در مرحله تصمیم‌گیری منحرف کند. به منظور اعتبارسنجی مدل‌های ساخته شده در پویایی سیستم روش‌های زیادی وجود دارد. در این پژوهش از سه روش آزمون درستی مدل، آزمون اکستریم و آزمون بازتولید رفتار استفاده شده است.

$$P_{dr} = (1 - \frac{P_{rr}}{T_f}) \times P_w \quad (9)$$

$$P_{rr} = \frac{P_{rr}}{T_r \times P_w} \quad (10)$$

در روابط ۳-۱۰، P_r برابر است با نرخ خرید گندله، C تناژ کنسانتره، P تناژ گندله، $P_{r in}$ تناژ خرید گندله آماده، $P_{r out}$ تناژ فروش مستقیم گندله، C_{fr} نرخ تزریق کنسانتره، R_2 نرخ تبدیل کنسانتره به گندله، C_r نرخ مازاد تولید کنسانتره، P_{fr} نرخ تزریق گندله، g_p عیار گندله، P_{rr} نرخ بازگشت گندله، P_{sr} نرخ ضایعات گندله، R_3 نرخ تبدیل آهن اسفنجی، S_{pr} نرخ تزریق آهن اسفنجی، P_w تناژ باطله گندله، P_{dr} نرخ دامپ شدن گندله و T_f ضریب بازگشت مواد در هر یک از سطوح.

براساس روابط فوق و با استفاده از مدل مفهومی ساخته شده در شکل ۴، نمودار حالت جریان خط تولید گندله مدل سازی شده است. با توجه به شکل ۶، محصول واحد گندله سازی به سه دسته تقسیم می‌شود. دسته اول خوراک مورد نیاز برای تولید سطح بعدی (در صورت وجود واحد آهن اسفنجی سازی) را تشکیل می‌دهد و اولویت با این دسته است. مسلماً هر خط تولیدی شامل ضایعات خاص خود است؛ بنابراین دسته دوم شامل محصولاتی است که از نظر شکل، ابعاد و دیگر ویژگی‌های مدنظر، خارج از استاندارد تعیین شده برای ارسال به سطح بعدی هستند. یک بخش این استاندارد به مرحله قبلی خود بازمی‌گردد و بار دیگر وارد خط تولید می‌شود. بخش دیگر که خصوصیات مذکور را برای تولید مجدد ندارد، در قسمت جداگانه‌ای دفع می‌شود. دسته سوم نیز میزان محصول مازاد بر تولید است که مستقیم برای فروش به بخش فروش ارسال خواهد شد.

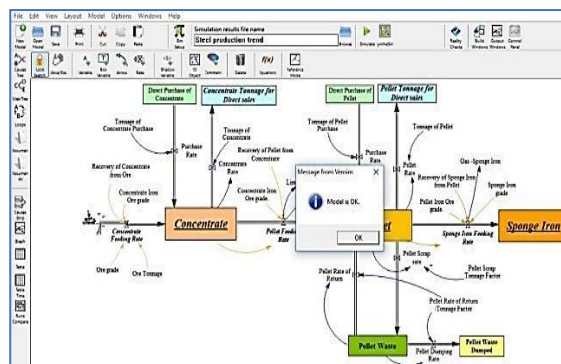
شبیه‌سازی پویایی زنجیره تأمین گندله

به منظور اجرا و بررسی چگونگی عملکرد مدل، از داده‌های یک مجتمع فولادی در کشور (جدول ۱) استفاده شد و شبیه‌سازی روند تولید صورت گرفت.

سنگ آهن با عیار ۵۲ درصد از فاصله حدود ۳۰ کیلومتری تأمین و وارد خط تولید کارخانه کنسانتره سازی می‌شود. در جدول ۲، داده‌های تولیدی مورد نیاز برای شبیه‌سازی در بازه ۱۵ ماهه آمده است.

آزمون درستی مدل

با استفاده از این آزمون می‌توان نحوه درست به‌کارگیری همه متغیرهای نمایش داده‌شده را برای استفاده آن‌ها در مدل‌سازی بررسی کرد. نتیجه آزمون درستی مدل در شکل ۷ آمده شده است.



شکل ۷. آزمون درستی مدل

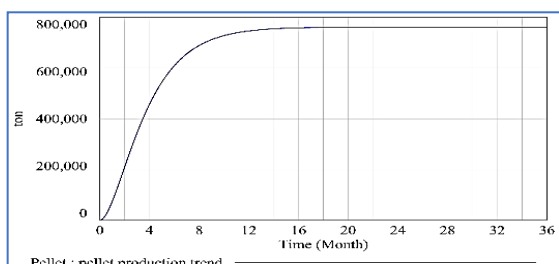
ظرفیت اسمی گندله است. از آن به بعد، روند تولید به شیب تقریباً افقی سوق می‌یابد که این امر صحت مدل طراحی‌شده را نشان می‌دهد.

آزمون اکستریم

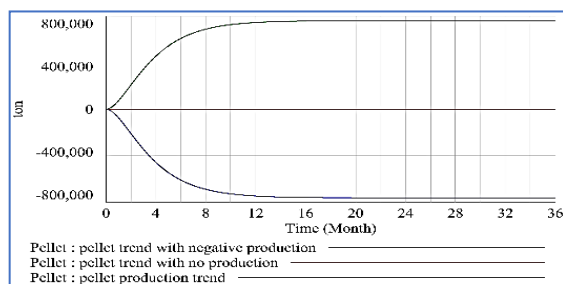
پس از تکمیل فرایند مدل‌سازی، یکی از آزمون‌هایی که باید انجام شود، شبیه‌سازی در بی‌نهایت است. برای این منظور پس از ساخت و اجرای مدل، رفتار مدل با رفتار داده‌های فرضی با مقادیر بسیار کم و بسیار زیاد و در دوره زمانی طولانی مدل می‌شود تا نتیجه رفتار مدل مشاهده شود. با توجه به شکل ۱۰، به ازای وارد کردن مقدار منفی در متغیر تناژ سنگ آهن ورودی (خط آبی‌رنگ) و مقدار صفر (خط قرمز رنگ)، مدل ساخته‌شده، روند تولید گندله را در حالت اول منفی و در حالت دوم صفر نشان می‌دهد. این مسئله حساس بودن مدل به داده‌های منفی و بی‌نهایت را بیان می‌کند که نشانی از صحت مدل ساخته‌شده است.

آزمون بازتولید رفتار

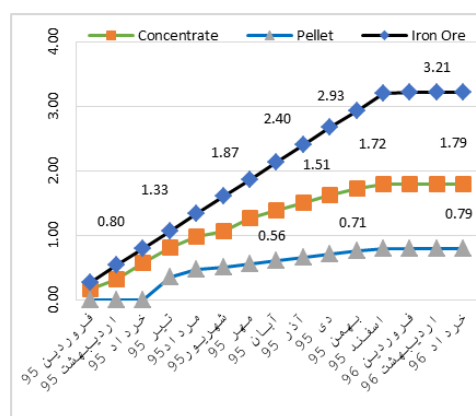
در این آزمون، با استفاده از نتایج مدل‌سازی و داده‌های واقعی شکل ۸ می‌توان تناسب رفتاری تولید گندله را مشاهده کرد. براین اساس تولید تجمعی کارخانه مورد مطالعه از سنگ آهن، کنسانتره و گندله نشان داده شده است. همچنین در سه ماه اول سال ۱۳۹۶ در سطوح ذکر شده، ظرفیت تولید به تولید اسمی خود رسیده و از آن زمان به بعد، تولید به‌طور ثابت ادامه می‌یابد.



شکل ۹. نتیجه آزمون بازتولید رفتار تولید گندله



شکل ۱۰. نتیجه آزمون اکستریم

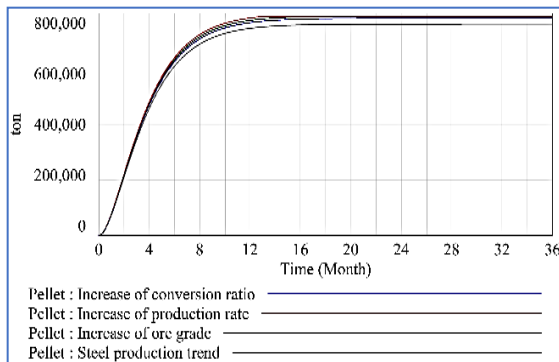


شکل ۸. تولید تجمعی مطالعه موردی مورد ارزیابی

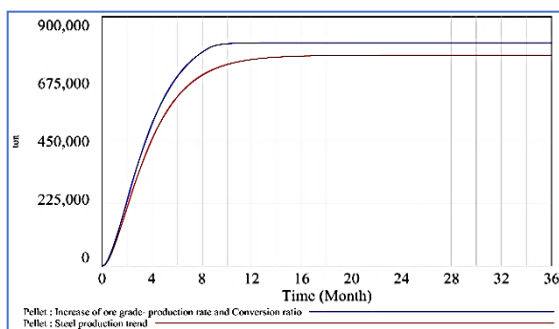
اجرای مدل

اجرای سناریو و بررسی شرایط «اگر و آنگاه» از اصلی‌ترین اهداف رویکرد پویایی‌های سیستم است. در مرحله اجرا و تعیین دامنه تغییرات متغیرها در سناریوها از دیدگاه‌های کارشناسان فنی و اقتصادی مجتمع مدنظر استفاده شد. در ادامه، مهم‌ترین سناریوهای مربوط براساس اولویت اجرا ذکر

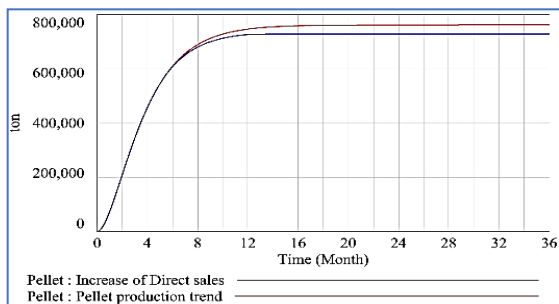
نتیجه آزمون بازتولید رفتار در شکل ۹ آمده است. در مقایسه دو شکل ۸ و ۹، روند تولید گندله در هر دو از تابع S پیروی می‌کند که نشان‌دهنده نزدیک شدن روند تولید به



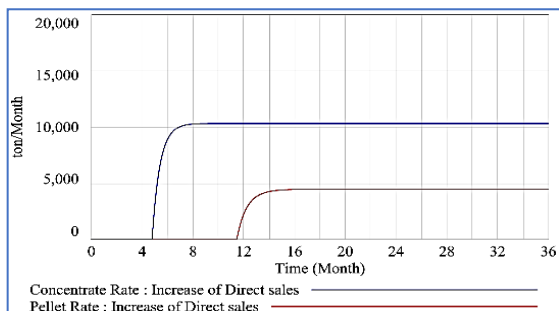
شکل ۱۱. افزایش متغیرهای عیار سنگ آهن، نرخ تولید و درصد بازیابی (سناریوهای ۱-۳)



شکل ۱۲. افزایش توأم عیار سنگ آهن، نرخ تولید و درصد بازیابی



شکل ۱۳-الف. اثر افزایش فروش محصولات میانی در زنجیره تأمین گندله



شکل ۱۳-ب. اثر افزایش فروش محصولات میانی در زنجیره تأمین گندله

شد. در این مقاله، از میان متغیرهای مختلف، ارزیابی متغیرهای مهم عیار سنگ آهن، تغییر نرخ تولید کنسانتره، تغییر نرخ بازیابی کنسانتره و گندله، تغییر در سیاست فروش مستقیم محصولات میانی و تغییر میزان ضایعات خط تولید صورت گرفت. در ادامه، این متغیرها به صورت مجزا و ترکیبی در قالب سناریوهای مختلف بررسی شدند. در شکل ۱۱، چگونگی تأثیر افزایش ۲ درصد در عیار سنگ آهن، افزایش ۵ درصد در نرخ تولید و افزایش ۲ درصد در بازیابی در تولید گندله آمده است (سناریوهای ۱-۳).

در سناریوی اول با افزایش ۲ درصد در عیار سنگ آهن، ۳/۳۵ درصد رشد در تولید کلی گندله خواهیم داشت (خط سبزرنگ). در سناریوی دوم، افزایش ۵ درصد در نرخ تولید گندله منجر به افزایش ۳/۷ درصدی تولید کلی گندله می شود (خط قرمز رنگ). در سناریوی سوم نیز افزایش ۲ درصد بازیابی سبب افزایش ۲/۷۴ درصد تولید کلی گندله می شود (خط آبی رنگ). همان طور که گفته شد، دلیل کاهش شیب در تمامی حالت مورد بررسی، محدودیت در ظرفیت واحد تولید است که به ظرفیت اسمی خود رسیده است.

در سناریوی چهارم (شکل ۱۲)، افزایش همزمان ۲ درصد عیار سنگ آهن، ۵ درصد نرخ تولید و ۲ درصد بازیابی منجر به افزایش ۵/۸۵ درصد در تولید کلی گندله می شود. با توجه به شکل ۱۲، تغییر همزمان این سه متغیر سبب افزایش شیب تولید (افزایش سرعت تولید) می شود که مدت زمان ظرفیت اسمی تولید را کوتاه تر خواهد کرد.

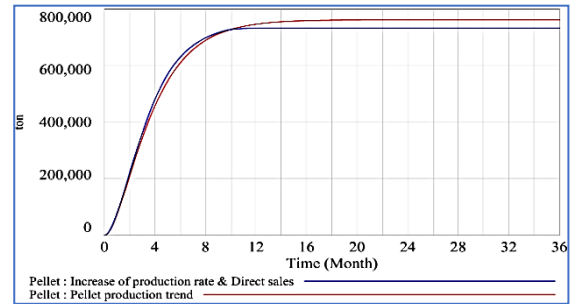
بر اساس شبیه سازی در سناریوی پنجم، افزایش ۵ درصدی فروش مستقیم کنسانتره، سبب کاهش ۴/۴ درصدی تولید نهایی گندله می شود (شکل ۱۳-الف). این میزان معادل فروش ۱۰,۳۰۰ تن کنسانتره (خط آبی رنگ) از ماه چهارم به بعد است. از سوی دیگر، اگر همه محصول تولید شده در واحد گندله به بخش آهن اسفنجی ارسال شود، پس از اعمال این سناریو حدود ۴۴۷۰ تن از ماه یازدهم به بخش فروش مستقیم گندله (خط قرمز) ارسال خواهد شد (شکل ۱۳-ب).

در سناریوی ششم (شکل ۱۴)، افزایش همزمان ۵ درصد فروش مستقیم و ۵ درصد نرخ تولید گندله سبب کاهش ۳/۸۲ درصد در تولید گندله می شود؛ بنابراین اعمال این سناریو شیب نمودار را افزایش می دهد (خط آبی رنگ). افزایش نرخ تولید نیز اثر خود را نشان می دهد.

نتیجه‌گیری

برای تحلیل و بهبود مدیریت زنجیره‌های تأمین صنایع گوناگون روش‌های مختلفی وجود دارد. در این میان، رویکرد پویایی‌های سیستم امکان بررسی سناریوهای مختلف و تحلیل حساسیت متغیرهای دینامیکی را فراهم می‌کند. با این دیدگاه در این پژوهش، مدل پویای زنجیره تأمین دوسطحی (سنگ آهن-کنسانتره-گندله) با استفاده از رویکرد پویایی‌های سیستم ارائه شد. بدین منظور نخست طراحی ماژول کیفی زنجیره تأمین گندله با بررسی بیش از ۳۵ متغیر کلیدی تولید صورت گرفت. سپس به منظور دستیابی به ماژول ریاضی زنجیره مورد مطالعه، مدل‌های کمی مربوط به آن ارائه شد. برای اعتبارسنجی مدل، از داده‌های خط تولید یک واحد گندله‌سازی در ایران استفاده شد. به منظور بررسی صحت مدل، داده‌های تولیدی ۱۵ دوره قبل از شروع زمان شبیه‌سازی و اطلاعات فعلی شرکت مقایسه شد. در ادامه نتایج شبیه‌سازی ذکر می‌شود:

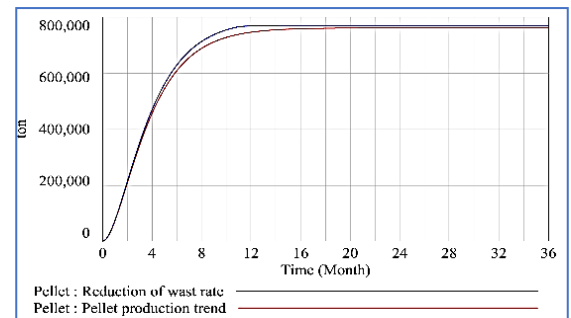
- تعاملات بین سیستمی و تأثیر رفتار متغیرها بر یکدیگر، نشان‌دهنده رشد ۵/۸ درصد تناژ گندله در اثر ترکیب سه سناریوی اول است. تأثیر این میزان رشد از تجمیع هر سه سناریوی اول بر تولید گندله کمتر است، اما تناژ فروش کنسانتره آهن را به‌عنوان محصول بین زنجیره‌ای افزایش می‌دهد.
- کاهش نرخ تولید ضایعات کمترین تأثیر را در زنجیره تولید گندله دارد. این ضایعات، ناشی از مناسب نبودن شکل و ابعاد است که بخش اعظمی از آن در فاصله زمانی مناسب بار دیگر وارد چرخه تولید گندله شده و به محصول قابل مصرف برای تولید آهن اسفنجی تبدیل شده است. به این ترتیب تنها سهم ناچیزی از ضایعات از چرخه خارج می‌شود و هدر می‌رود. به این دلیل کاهش نرخ تولید این ضایعات کمترین تأثیر را از دیگر سناریوهای بررسی شده دارد.
- از آنجا که کارخانه تولید کنسانتره قادر به تأمین خوراک بخش گندله‌سازی است، نیازی به تأمین کنسانتره از خارج زنجیره برای افزایش تناژ نهایی گندله نیست.
- براساس بررسی نتایج سناریوهای مختلف، هرگونه تصمیم‌گیری مدیران در مورد تغییر متغیرهای زنجیره،



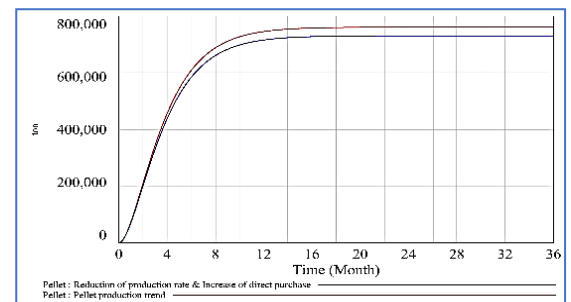
شکل ۱۴. اثر افزایش هم‌زمان فروش مستقیم و نرخ تولید

از این رو سرعت تولید از حالت قبل بیشتر می‌شود و در زمان کوتاه‌تری به ظرفیت اسمی خود می‌رسد. در ماه دهم، به دلیل افزایش فروش مستقیم، نرخ نهایی تولید گندله کمتر از حالت قبل می‌شود.

سناریوی هفتم (شکل ۱۵) نشان می‌دهد کاهش ۴ درصدی تولید ضایعات گندله در زمان مناسب، سبب افزایش در تولید می‌شود و در فاصله ماه‌های ۶-۱۲ به اوج می‌رسد (۱/۱۲ درصد). همچنین روند تولید به حالت پایدار سوق می‌یابد. در سناریوی هشتم، براساس شکل ۱۶، کاهش ۲ درصد نرخ تولید کنسانتره و افزایش ۵ درصد خرید مستقیم کنسانتره آماده برای تولید گندله، سبب کاهش ۴ درصد تولید نهایی گندله می‌شود.



شکل ۱۵. اثر کاهش نرخ تولید ضایعات بر تولید گندله



شکل ۱۶. اثر کاهش نرخ تولید و افزایش خرید مستقیم

مستلزم بررسی تأثیرات متقابل آن بر سایر متغیرها و پیش‌بینی رفتار نهایی سیستم در طول زمان است. ساخت سناریوهای واقع‌بینانه از تغییرات ترکیبی متغیرهای مؤثر می‌تواند پیامد چالش‌های مدیریتی را قبل از وقوع مشخص کرده و امکان تدابیر مدیریتی مناسب را فراهم کند.

منابع

1. Croxton, K. L., Garcia-Dastugu, S. J. E., Lambert, D. M., and Rogers, D. S. (2001). "The Supply Chain Management Processes", *Int. J. Logist. Manag.*, Vol. 12, No. 2, PP. 13–36.
2. Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Vol. 19. Irwin/Mcgraw-Hill Boston.
3. Hugos, M. H., (2011). *Essentials of Supply Chain Management*, Vol. 62, John Wiley and Sons.
4. Roy, R. N., and Guin, K. K. (1999). "A Proposed Model of JIT Purchasing in an Integrated Steel Plant", *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 59, No. 1, PP. 179–187.
5. Guoqing, L., Nailian, H., and Xuchun, H. (2003). "Study on the Application of Supply Chain Management (SCM) for Jiaojia Gold Mine", *Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries, South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 1, PP. 553-556.
6. Xiong, G. Y., and Petri, H. (2005). "Supply Chain Inventory Control in Iron and Steel Industry: A Case Study", *In IEEE International Conference on Granular Computing*, Vol. 1, PP. 314–317.
7. Xiong, G. Y., and Helo, P. (2008). "Challenges to the Supply Chain in the Steel Industry", *Int. J. Logist. Econ. Glob.*, Vol. 1, No. 2, PP. 160–175.
8. Peng, H., Zhou, M., Liu, M., Zhang, Y., and Huang, Y. (2009). "A Dynamic Optimization Model of an Integrated Coal Supply Chain System and Its Application", *Min. Sci. Technol, China*, Vol. 19, No. 6, PP. 842–846.
9. Jolai, F., Gheisariha.E., and Nojavan.F. (2011). "Inventory Control Of Perishable Items in a Two-Echelon Supply Chain", *Journal of Industrial Engineering, University of Tehran*, Special Issue, Vol. 45, PP. 69-77.
10. Soltani, M. R., Sayadi, A. R., Monjezi, M., and Hayati, M. (2013). "Productivity Improvement in a Steel Industry Using Supply Chain Management Technique", *Int J. Min. Geo-Eng*, Vol. 47, No. 1, PP. 51–59.
11. Nori Darian. M., and Talee Zadeh. A. (2015). "Development of the Economic Production Model in Integrated and Non-Integrated Three-Level Supply Chains, Taking Into Account the Optimal Inventory Control Policy", *Journal of Industrial Engineering, University of Tehran*, Vol. 52, No. 1, PP. 125-137.
12. Comtois, C. And Slack, B., (2016), "Dynamic Determinants In Global Iron Ore Supply Chain," *Inter University Research Center On Enterprise Network, Logistics And Transportation*, Vol. 1, P. 29.
13. Liu, J., An, R., Xiao, R., Yang, Y., Wang, G., and Wang, Q. (2017). "Implications From Substance Flow Analysis, Supply Chain and Supplier's risk Evaluation in Iron and Steel Industry in Mainland China", *Resource Policy*, Vol. 51, PP. 272–282.
14. Angerhofer, B. J., and Angelides, M. C. (2000). "System Dynamics Modelling in Supply Chain Management: Research Review", *In Simulation Conference, Proceeding, Winter*, Vol. 1, PP. 342–351.
15. Ashayeri, J. And Lemmes, L., (2006). "Economic Value Added of Supply Chain Demand Planning: A System Dynamics Simulation", *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, Vol. 22, No. 5, Pp. 550–556.
16. Mahmoodi, J., and Minaee, M. H. (2010). "Using System Dynamics to Model Rod Bar Supply Chain in Iranian Market", *Int. J. Ind. Eng.*, Vol. 21, No. 3.
17. Tian, Y., Govindan, K., and Zhu. Q. (2014). "A System Dynamics Model Based on Evolutionary Game Theory for Green Supply Chain Management Diffusion Among Chinese Manufacturers", *J. Clean. Prod.*, Vol. 80, PP. 96–105.
18. Demczuk. A., and Padula. A. D. (2017). "Using System Dynamics Modeling to Evaluate the Feasibility of Ethanol Supply Chain in Brazil: The Role of Sugarcane Yield, Gasoline Prices and Sales Tax Rates", *Biomass Bioenergy*, Vol. 97, PP. 186–211.
19. Osluwi Tabar, A., Zarghami, M., and Abrishamchi, A. (2006). "System Dynamic Model in Tehran Urban Water Management", *Water and Wastewater Journal of Research*, Vol. 17, No. 3, PP. 12-28. (In Persian)
20. Afshar Kazemi, M. A, Makuee, A., and Darmani. Z. (2009). "Using System Dynamics Modeling to Develop a Strategy for Steel Industry's Supply Chain in Iran", *Iranian Journal Of Trade Studies (IJTC)*, No. 50, PP. 201-224. (In Persian)
21. Shakoor Shahabi, R. (2009). "System Dynamic Modeling of Mine Sector Management to Improvement on Economic to Preferment", *Doctoral Thesis, Shahrood University of Technology, Central Library.* (In Persian)
22. Mahmoodi, G., and Minaee, M. H. (2013). "Design of a System Dynamics Model for the Steel Supply Chain", *Iranian Journal of Trade Studies (IJTC)*, Vol. 17, No. 66, PP. 129-160, (In Persian).

23. Mahmoodi, Z., Sayadi, A. R., and Rajabzadeh Ghatari, A. (2015). "Assessment of Energy Efficiency At Mines Using System Dynamics Approach", *3th National Open Pit Mining Conference, Kerman, Iran. (In Persian)*
24. Mahmoodi, Z., Sayadi, A. R., Rajabzadeh Ghatari, A. (2016). "Dynamic Modelling of Labor Productivity in Mining- Case Study: Chadormaluo Mining and Industry Complex", *Journal of Industrial Management, Vol. 8, No. 2, PP. 287-308. (In Persian)*
25. Haji Gholam Saryazdi, A., and Manteqi, M. (2012). "Analyze the Impact of Policies of Yazd Science and Technology Park on the Development of Technology Using System Dynamics Pproach", *2th International and 6th National Conference on Management of Technology, Tehran, Iran, P. 20. (In Persian)*

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Supply Chain Management
 2. Jiaojia
-