Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)
Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Journal Homepage: jscit.nit.ac.ir
Volume 11, Number 4, Winter 2023, pp. 61-78
Received: 08/14/2022, Revised: 12/17/2022, Accepted: 01/23/2023

Closed-Loop Supply Chain Control in Smart Factories Considering Uncertainty and Disruption: A Game Theory Approach

Davood Toofani Movaghar[1#], Shideh Saraeian[1*]
[1]Department of Computer Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran
[#]Dave.toofani2009@gmail.com, [*]Shideh.Saraeian@iau.ac.ir

[*]Corresponding author's address: Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran

Abstract- Due to the increasing use of Closed-Loop Supply Chains (CLSCs) in industry scopes in order to optimize raw material usage and reuse of end-of-life or used products, CLSC management is very necessary. Used products return to production cycles as production resources in CLSC processes. Thus, CLSC helps countries to use fewer raw materials for manufacturing and brings an opportunity for manufacturers to reuse end-of-life products, so that they can increase their overcome and decrease the use of natural resources simultaneously. Due to the impact of CLSC on industries, CLSC control is an interesting field of research. In this paper, a new game theory-based architecture for controlling CLSC considering uncertainty will be introduced. For this purpose, a smart Proportional-Integral-Derivative (PID) controller will be used which automatically tunes itself using the game theory method. Thus, creating a game with controller gains and searching for the equilibria point of the game, makes the best state for the controller. So that the controller could act rationally in CLSC and tune itself to optimize its performance. The optimized reaction of the controller used in this model would help the CLSC management system.

Keywords- Closed-Loop Supply Chain, Smart Factory, Game Theory, Optimization, PID Controller.

مجله علمی پژوهشی رایانش نرم و فناوری اطلاعات
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
صفحه مجله: jscit.nit.ac.ir
جلد ۱۱، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱ ، صفحه ۶۱-۷۸
دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳

کنترل زنجیره‌های تامین حلقه بسته در کارخانه‌های هوشمند با در نظر گرفتن عوامل غیرقطعی و مخرب: رویکرد نظریه بازی‌ها

داوود طوفانی موقّر[1#]، شیده سرائیان[1*]
۱- گروه کامپیوتر، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران.
#dave.toofani2009@gmail.com, *Shideh.Saraeian@iau.ac.ir

* نشانی نویسنده مسئول: گرگان، بزرگراه شهید کلانتری، کوی جهاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان.

چکیده- امروزه، زنجیره‌های تامین حلقه بسته[1] در صنایع با هدف کاهش مصرف مواد اولیه خام و استفاده مجدد از محصولات، استقبال چشمگیری داشته اند. بدین ترتیب، مدیریت این زنجیره‌ها در حوزه‌های مختلف حائز اهمیت خواهد بود. در این زنجیره‌ها، محصولات استفاده شده، به عنوان منابع اولیه تولید به چرخه بازمی‌گردند. این زنجیره‌ها به کشورها در جهت کاهش مصرف منابع خام کمک کرده و همچنین فرصتی برای تولیدکنندگان خواهند بود تا با بازمصرف مواد استفاده شده، سودآوری را افزایش دهند. به علت تاثیر این زنجیره‌ها در صنایع، توجه محققان به پژوهش در حوزه مدیریت این دسته زنجیره‌ها جلب شده است. در این تحقیق، یک معماری کنترلی مبتنی بر نظریه بازی‌ها[2] برای مدیریت زنجیره‌های تامین حلقه بسته در حضور عوامل غیرقطعی و مخرب، معرفی شده است. بدین منظور، از یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی[3] با قابلیت تنظیم خودکار ورودی‌ها توسط نظریه بازی‌ها استفاده شده است. با ایجاد یک بازی بین ورودی‌های این کنترل‌کننده و یافتن نقطه تعادل بازی (تعادل نَش[4])، می‌توان بهترین وضعیت کنترل‌کننده را مشخص نمود. نتایج حاصل نشان می دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی می تواند در زنجیره تامین حلقه بسته، با تنظیم خودکار ورودی‌ها، کارایی خود را بهینه نموده و در مدیریت زنجیره های فوق کارآمد واقع شود.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تامین حلقه بسته، کارخانه‌های هوشمند، نظریه بازی‌ها، بهینه‌سازی، کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی.

۱- مقدمه

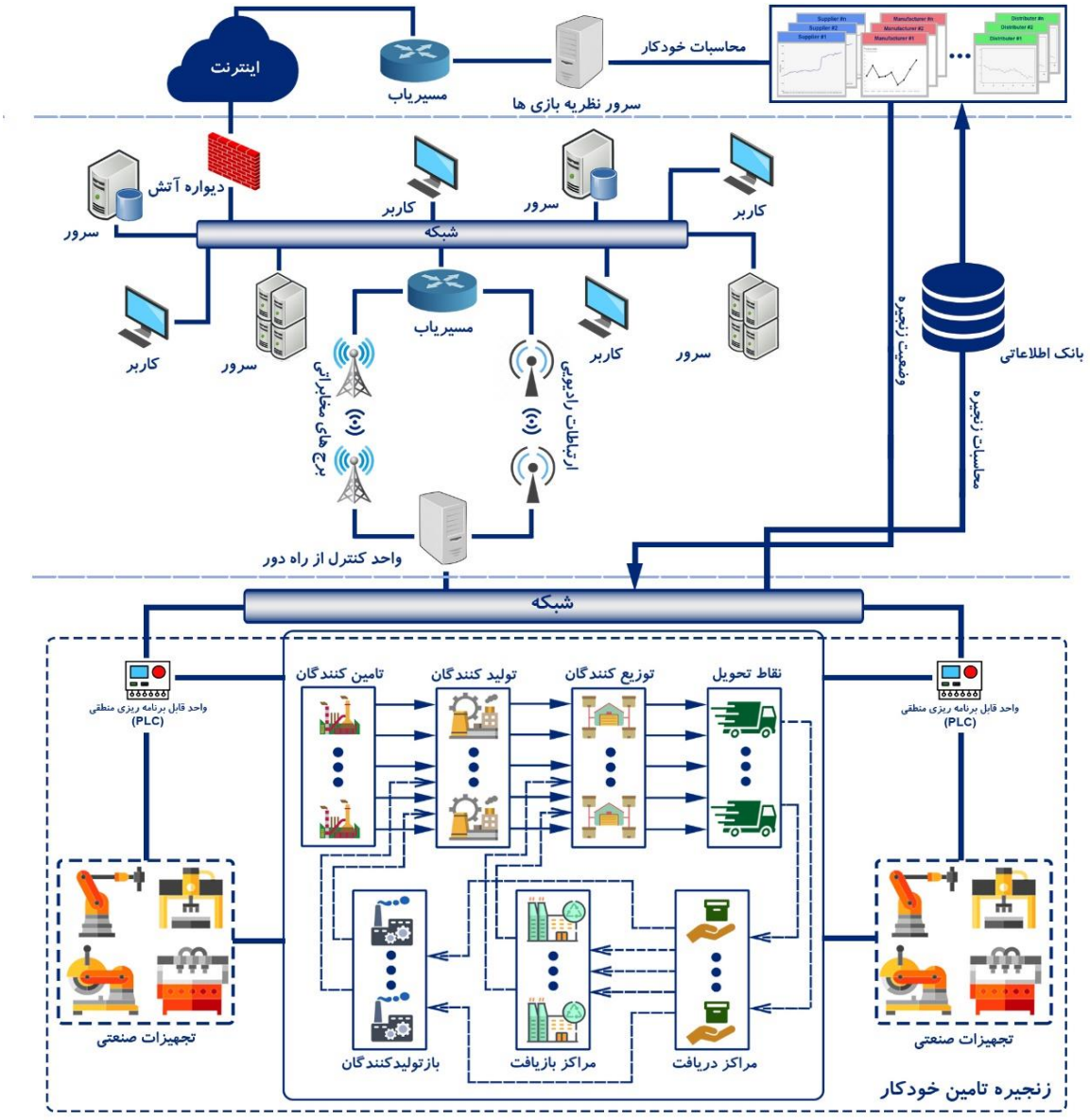
انقلاب صنعتی چهارم در حال تغییر استراتژی‌های شرکت‌ها، سازمان‌ها، مدل‌های تجاری، فرآیندها، محصولات و ارتباط بین تجهیزات است [۱]. در نتیجه، تغییرات گسترده‌ای در حوزه صنعت به‌وقوع پیوسته است که منجر به پیدایش کارخانه‌های هوشمند[5] شده است. در کارخانه‌های هوشمند چهارچوبی تجمیع شده از اینترنت اشیاء، اینترنت سرویس‌ها، اینترنت داده‌ها و تجهیزات صنعتی، با هدف ایجاد صنعت هوشمند، منعطف و سازگار گردآوری شده‌اند [۲]. در کنار مزایای کارخانه‌های هوشمند، تجمیع موارد ذکر شده چالش‌هایی را برای فرآیندهای صنعتی به همراه خواهد داشت. با توجه به سرعت جریان‌های تولید، کارخانه‌های هوشمند می‌بایست انعطاف و اعتماد لازم را ارضاء نمایند و همچنین استانداردهای کیفی لازم را نیز داشته باشند [۳]. همچنین توسعه کارخانه‌های هوشمند منجر به چالش‌هایی از قبیل داده‌های بدون ساختار ایجاد شده توسط تجهیزات هوشمند، لزوم به‌کارگیری برنامه‌ریزی پویا، تجمیع منابع داده برای چهارچوب اصلی و میزان مصرف انرژی، می‌گردد.

زنجیره‌های تامین یکی از مهمترین و گسترده‌ترین شاخه‌های صنعت هستند و تحت تاثیر چالش‌های ذکر شده قرار خواهند گرفت. در سیستم زنجیره تامین، محصول مورد نظر توسط تولیدکننده تولید می‌شود و توسط واسطه‌ها و مراکز توزیع به دست مصرف‌کننده می‌رسد. در گذشته، زنجیره تامین فقط شامل فرآیند معرفی شده

بود و جریان محصول به‌صورت یک‌طرفه از تولیدکننده به سمت مصرف‌کننده وجود داشت. اما امروزه یک جریان برگشت وجود دارد که محصولات استفاده‌شده یا منقضی‌شده، توسط مراکز جمع‌آوری از مصرف‌کننده دریافت می‌شوند و جهت استفاده مجدد در تولید به تولیدکننده تحویل داده می‌شوند. با در نظر گرفتن دو جریان معرفی‌شده، زنجیره‌های تامین حلقه بسته پدیدار می‌شوند. زنجیره تامین حلقه بسته به صنایع در جهت کاهش مصرف منابع اولیه خام، مدیریت استفاده از منابع طبیعی و افزایش سودآوری از طریق استفاده مجدد از محصولات استفاده‌شده، کمک خواهد نمود.

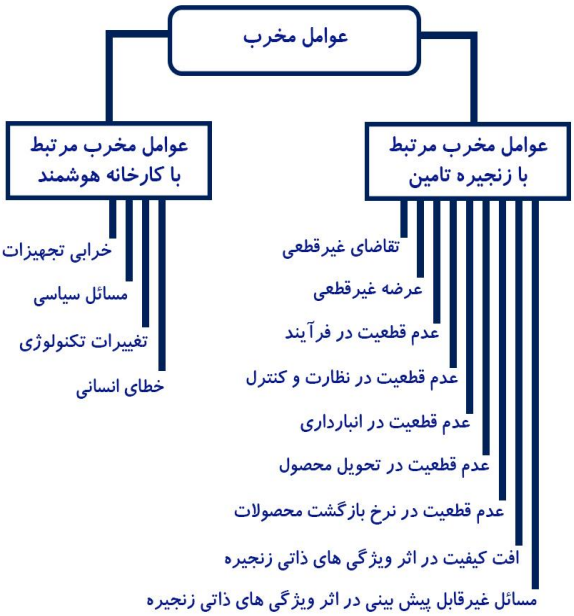
استفاده از زنجیره تامین حلقه بسته در کارخانه‌های هوشمند، منجر به ظهور مفهومی به نام زنجیره تامین حلقه بسته خودکار خواهد شد که شامل یک جریان مستقیم (جریان ارسال محصول از تولیدکننده به مصرف‌کننده) و یک جریان معکوس (جریان بازگشت محصول استفاده‌شده یا منقضی‌شده از مصرف‌کننده به تولیدکننده) به‌صورت خودکار است [۴]. این استراتژی به کاهش تقاضای تولید کننده برای استفاده از منابع اولیه خام کمک می‌نماید [۵]. شکل ۱، ساختار یک زنجیره تامین حلقه بسته خودکار در یک کارخانه هوشمند را نمایش می‌دهد.

چالش‌های مطرح شده برای توسعه کارخانه‌های هوشمند، زنجیره-های تامین حلقه بسته را دچار چالش‌های جدی می نماید. تامین رضایت مشتری، پیچیدگی فرآیندها، تعدد تجهیزات، عوامل غیرقطعی و ... از جمله چالش‌های تاثیرگذار در حوزه زنجیره‌های



شکل ۱: ساختار زنجیره تامین حلقه بسته خودکار در یک کارخانه هوشمند [۵]

تامین حلقه بسته می‌باشند که نیازمند مدیریت و کنترل دقیق خواهند بود. با در نظر داشتن چالش‌های کارخانه‌های هوشمند و چالش‌های زنجیره‌های تامین حلقه بسته، تجمیع این دو حوزه منجر به ظهور مسائل و و چالش‌های جدیدی خواهد شد که بایستی هوشمندانه و با دقت مورد بررسی قرار گیرند. از بین چالش‌های مطرح شده، در این مقاله به چالش عوامل مخرب و کنترل آن به‌دلیل تاثیر جدی این عوامل بر فرآیندهای زنجیره‌های تامین حلقه بسته پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که این عوامل مخرب ممکن است در یکی از دو دسته‌ی خرابی‌های مرتبط با زنجیره تامین حلقه بسته یا خرابی‌های مرتبط با کارخانه‌های هوشمند قرار گیرند.



شکل ۲: منابع عوامل مخرب در زنجیره تامین حلقه بسته خودکار در کارخانه‌های هوشمند [۵]

به‌این‌ترتیب، کنترل زنجیره تامین حلقه بسته در مقابل عوامل مخرب منجر می‌شود تا بخش یا قطعه‌ی درست، با مقدار درست، در زمان درست، در مکان درست و با وضعیت درست قرار داشته باشد [۶].

به‌دلیل اهمیت موضوع، پژوهش‌های زیادی در حوزه‌ی مدیریت زنجیره‌های تامین حلقه بسته با هدف افزایش کارایی و بهینه‌سازی این نوع زنجیره‌ها انجام گرفته است که از روش‌های متاهیوریستیک[۶] برای بهینه‌سازی [۷]، الگوریتم ژنتیک[۷] [۸]، بهینه‌سازی فازی[۸] [۹]، روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه[۹] [۱۰]، استفاده از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی بهینه‌شده [۵]، رویکرد برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط[۱۰] [۱۱] و ... استفاده نموده‌اند که در بخش بعد به مرور آن‌ها پرداخته خواهد شد.

نوآوری های این مقاله عبارتند از:

- قابلیت تنظیم خودکار ورودی‌های متغیر کنترل‌کننده در شرایط غیرقطعی و مخرب مختلف،
- بهینه‌سازی مدیریت و کنترل هوشمند زنجیره‌های تامین به‌کمک نظریه بازی‌ها،
- اعمال نظریه بازی‌ها در کنترل‌کننده پویا به‌عنوان یک چهارچوب تصمیم‌گیر تعاملی با سه بازیکن،
- بهینه نمودن دقت مدیریت و کنترل زنجیره تامین با به‌کارگیری کنترل‌کننده پیشنهادی هوشمند که کارائی بالائی را نتیجه می‌دهد.

به این ترتیب، هدف این تحقیق، کنترل و مدیریت بهینه زنجیره‌های تامین حلقه بسته است که به‌کمک یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی مبتنی بر نظریه بازی‌ها اعمال خواهد شد. این مقاله به‌صورت زیر سازماندهی شده است: بخش ۲ به بررسی کارهای مرتبط و ادبیات تحقیق خواهد پرداخت. بخش ۳ کنترل کننده پیشنهادی را معرفی می‌نماید. در بخش ۴ عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی شبیه‌سازی خواهد شد و در نهایت بخش ۵ نتایج و بحث بر روی آن‌ها را شامل خواهد شد.

۲- کارهای مرتبط

با توجه به گستردگی مطالعات انجام‌شده در حوزه‌ی موضوع این تحقیق، این بخش به سه زیربخش تقسیم شده است:

۲-۱- کارخانه‌های هوشمند

استفاده از اینترنت اشیاء در حوزه‌ی صنعت منجر به پدید آمدن اینترنت اشیاء صنعتی خواهد شد و این فرآیند باعث تبدیل کارخانه‌های سنتی به کارخانه‌های هوشمند می‌گردد. اولین تلاش‌ها در راستای ایجاد کارخانه‌های هوشمند به دهه ۱۹۹۰ میلادی بازمی‌گردد که در آن زمان با عنوان «تولید آمیخته با کامپیوتر[۱۱]» از آن نام برده می‌شد [۱۲]. در کارخانه‌های هوشمند، چارچوبی برای تجمیع تکنولوژی‌های جدید با تجهیزات صنعتی وجود دارد و هدف از این چارچوب، انعطاف، سازگاری و هوشمندی هرچه بیشتر خواهد بود. این تجمیع روی اجزای مختلف صنایع از جمله انبارداری، خطوط تولید، ساخت، بسته‌بندی، حمل و نقل و ... تاثیر خواهد گذاشت. در کنار این تغییرات و مزایای آن، تجمیع صنایع با تکنولوژی منجر به بروز چالش‌هایی برای صنایع خواهد شد. از جمله

مهم‌ترین چالش‌ها برای صنایع می‌توان به کنترل تجهیزات، مباحث امنیتی که منجر به خرابی در فرآیندها خواهند شد، تشخیص و جلوگیری از نفوذ، دقت محاسباتی، ارتباطات امن و ... اشاره کرد. به‌طور کلی، کارخانه‌های هوشمند از تلفیق فناوری اطلاعات[۱۲] و فناوری عملیاتی[۱۳] ظاهر می‌شوند. این مفهوم در تمامی حوزه‌های صنعت از جمله برنامه‌ریزی فرآیندها، بررسی نیازها، طراحی‌ها، تولیدات، توزیع محصولات و فروش محصولات به‌کار برده می‌شود. به‌دلیل اهمیت داده‌ها در حوزه‌ی عملیاتی که شامل داده‌های تولید، اطلاعات محصولات، آمار خط تولید و ... هستند، مکانیزم‌های مدیریتی در حوزه‌ی کارخانه‌های هوشمند باید به‌طور دقیق تبیین و اجرا شوند و تهدیدات امنیتی در این حوزه به‌خوبی بررسی شوند و برای جلوگیری از وقوع آن‌ها تدابیری اندیشیده شود [۱۳]. علاوه بر این، چالش های مختلفی در زمینه‌ی داده‌های تولید شده توسط حسگرها در کارخانه‌های هوشمند نیز وجود دارد. این داده‌ها توسط حسگرهای خط تولید، حسگرهای حمل و نقل و ... به‌وجود می‌آیند که باید با دقت و احتیاط مورد بررسی قرار گیرند. با استفاده از این داده‌ها امکان تصمیم‌گیری و توسعه فرآیندها برای مدیران فراهم خواهد بود، در نتیجه امنیت این اطلاعات یکی از مباحث مهم در حوزه‌ی کارخانه‌های هوشمند است [۱۴]. با توجه به مفهوم کارخانه‌های هوشمند، میان تجهیزات فیزیکی، مجموعه گسترده‌ای از داده‌های چندبعدی، به‌دست آوردن هوشمندانه دانش از عوامل محیطی و کنترل هوشمند با هدف بهینه‌سازی منابع و ارتقاء بهره‌وری تولید، وابستگی به‌وجود خواهد آمد. در مقاله‌ی *Huo* و همکاران [۱۵]، ترکیب تکنولوژی زنجیره بلوکی با قابلیت‌هایی شامل عدم تمرکز، غیر قابل دستکاری بودن، شفافیت، ناشناس بودن و خودمختاری با کارخانه‌های هوشمند معرفی شده است. در این مقاله، راهکارهای امنیتی، نحوه پیاده‌سازی و نیازمندی‌های فنی اجرای تکنولوژی زنجیره بلوکی در بستر کارخانه‌های هوشمند مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

همان‌گونه که ذکر گردید، پژوهشگران مختلفی اعتقاد دارند امنیت سایبری یکی از مسائلی است که کارخانه‌های هوشمند در حوزه اینترنت اشیاء صنعتی (که در آن تعدادی دستگاه هوشمند در ارتباط با ماشین‌آلات صنعتی، کامپیوترها و انسان‌ها به‌صورت شبکه در ارتباط قرار دارند) با آن درگیر هستند. در شبکه صنعتی مطرح شده، پرسنل واحد صنعتی می‌بایست از مسائل امنیتی آگاه باشند تا از وقوع خرابی‌های امنیتی و افشای اطلاعات صنعتی جلوگیری شود. در مقاله‌ی *Corallo* و همکاران [۱۶] به بررسی نحوه اجرای اصول امنیتی در کارخانه‌های هوشمند در مقابله با مسائل امنیت سایبری و تحقیقات صورت‌پذیرفته در این حوزه پرداخته شده است.

در مقاله‌ی *Tang* و همکاران [۱۷] محققان در زمینه نحوه استقرار هوش محاسباتی و یادگیری عمیق[۱۴] در شبکه‌های اینترنت اشیاء صنعتی مستقر در کارخانه‌های هوشمند با قابلیت لبه، تحقیق نموده‌اند. در سیستم معرفی‌شده، دستگاه‌های هوشمند می‌توانند به‌طور مشترک یک مدل مشترک را بدون به خطر انداختن حریم خصوصی داده‌ها آموزش دهند. چالش اصلی مطرح شده در این تحقیق با توجه به محدودیت منابع محاسباتی در دستگاه‌های هوشمند صنعتی، محدودیت پهنای باند و وضعیت کانال ارتباطی، انجام آموزش‌های محلی و آپلود وزن‌ها در سرور به صورت لحظه‌ای می‌باشد. نتایج پیاده‌سازی تحقیق نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قابلیت افزایش دقت را تا ٪۳۲/۷ در حوزه شبکه‌های کارخانه‌های هوشمند داراست.

به‌دلیل گسترش زنجیره‌های تامین، یکی از کاربردهای یکپارچه‌سازی صنایع با تکنولوژی‌های هوشمند و پدید آمدن کارخانه‌های هوشمند، توسعه و پیاده‌سازی زنجیره‌های تامین هوشمند است. همانطور که پیشتر بیان شد، زنجیره‌های تامین با هدف کاهش استفاده از منابع اولیه خام، افزایش سود و استفاده مجدد از محصولات استفاده‌شده یا منقضی‌شده، شامل دو جریان مستقیم و معکوس می‌باشند. بنابراین، مفهوم زنجیره‌های تامین حلقه بسته خودکار پدیدار خواهد شد که شامل پیاده‌سازی این زنجیره‌ها در بستر کارخانه‌های هوشمند خواهد بود [۱۸]. در جریان معکوس زنجیره‌های تامین حلقه بسته خودکار، تولیدکنندگان، محصولات استفاده‌شده یا منقضی‌شده را به‌عنوان مواد اولیه تولید استفاده خواهند کرد و در نتیجه محصول جدید با استفاده از محصولات تولید شده از قبل یا تعمیر آن‌ها، تولید خواهد شد. بدین ترتیب، زنجیره‌های تامین حلقه بسته در زمینه کاهش پسماندهای تولید، کاهش استفاده از منابع طبیعی و بهبود تولید به‌وسیله‌ی استفاده مجدد از محصولات تولیدشده، به کارخانه‌های هوشمند یاری می‌رسانند [۵]. به‌دلیل اهمیت زنجیره‌های تامین حلقه بسته و مزایای آن‌ها، مدیریت این زنجیره‌ها باید به‌دقت صورت پذیرد و به همین دلیل، این بخش مورد توجه بسیاری از تحقیقات قرار گرفته است. جدول ۱ خلاصه‌ای از تحقیقات بررسی شده در این حوزه نشان می‌دهد.

۲-۲- مدیریت زنجیره‌های تامین حلقه بسته

با در نظر گرفتن گسترش زنجیره‌های تامین حلقه بسته در صنایع مختلف و نقش حائز اهمیت آن‌ها در کاهش هزینه‌ها و کاهش مصرف منابع طبیعی، کنترل و مدیریت این زنجیره‌ها باید به‌دقت

جدول ۱: تحقیقات بررسی شده در حوزه کارخانه‌های هوشمند

نویسنده	چالش / مسئله	راهکار پیشنهادی	نتایج
Jeschke و همکاران [۱۲]	معرفی اینترنت اشیاء صنعتی و چالش‌های مرتبط	بررسی الزام و نحوه به‌کارگیری اینترنت اشیاء در حوزه صنعت	• اینترنت اشیاء صنعتی در کنار تکنولوژی های وابسته، منجر به افزایش سوددهی خواهد شد.
Yi و Jeong [۱۳]	معماری اصلی کارخانه‌های هوشمند و تلفیق فناوری اطلاعات و فناوری عملیاتی	ارائه مدل امنیتی برای کارخانه‌های هوشمند با هدف جلوگیری از حملات سایبری و ارائه راهکارهای امنیتی برای کارخانه‌های هوشمند	• کارخانه‌های هوشمند تبدیل به یک محدوده ۴مرحله‌ای می‌گردند که مرحله‌ی ۱ مربوط به فناوری اطلاعات و مرحله‌های ۰ تا ۳ مرتبط با فناوری عملیاتی خواهد بود.
Lee و همکاران [۱۴]	مدیریت داده‌های تولید شده در کارخانجات هوشمند	ارائه ساختاری جهت مدیریت داده‌ها	• هر دستگاه در شبکه توانایی مدیریت و پردازش داده‌های خود را خواهد داشت.
Huo و همکاران [۱۵]	استفاده از زنجیره‌ی بلوکی در ساختار اینترنت اشیاء صنعتی و کارخانه‌های هوشمند	ارائه راهکارهای امنیتی، نحوه پیاده‌سازی و نیازمندی‌های فنی اجرای زنجیره‌ی بلوکی در بستر کارخانه‌های هوشمند و روش‌های استفاده شده برای تلفیق زنجیره‌ی بلوکی با کارخانه‌های هوشمند	• جمع‌بندی تحقیقات انجام شده در حوزه زنجیره‌ی بلوکی در کارخانه‌های هوشمند • راهکارهای رفع چالش‌های اینترنت اشیاء صنعتی • کاربرد زنجیره‌ی بلوکی در کارخانه-های هوشمند با چالش‌های بسیاری روبرو است.
Corallo و همکاران [۱۶]	امنیت سایبری در کارخانه‌های هوشمند	نحوه اجرای اصول امنیتی در کارخانه‌های هوشمند در مقابله با مسائل امنیت سایبری	• جلوگیری از حملات سایبری
Tang و همکاران [۱۷]	استقرار هوش محاسباتی و یادگیری عمیق در کارخانه‌های هوشمند	ارائه یک چارچوب جدید با چند خروجی	• افزایش دقت در شبکه‌های کارخانه-های هوشمند

انجام پذیرد. با مدیریت زنجیره‌های تامین حلقه بسته، اهدافی همچون حداکثر نمودن رضایت مشتری، حداکثر نمودن سود نهائی و حداقل نمودن پسماندهای تولید قابل دستیابی است. [۶]. به‌دلیل یکپارچه‌سازی کارخانه‌های هوشمند با زنجیره‌های تامین حلقه بسته، چالش‌هایی از قبیل پیچیدگی جریان‌های مستقیم و معکوس، تعدد و گستردگی تجهیزات و ... در مدیریت این زنجیره‌ها وجود خواهد داشت. در مقاله‌ی *Saraeian* و همکاران [۵]، یک کنترل-کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی انطباقی با قابلیت تنظیم خودکار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای مدیریت زنجیره-های تامین حلقه بسته خودکار معرفی شده است. این تحقیق عوامل غیرقطعی و مخرب را نیز در زنجیره‌های تامین در نظر گرفته است و تنظیم خودکار کنترل‌کننده با هدف بهینه‌سازی عملکرد توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام می‌شود.

در مقاله‌ی *Guo* و همکاران [۱۹]، یک روش متاهیوریستیک با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات معرفی شده است. این تحقیق بر زنجیره‌های تامین حلقه بسته سبز تمرکز دارد، در نتیجه مدیریت زنجیره‌های تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن نرخ تولید گازهای گلخانه‌ای را مورد بررسی قرار داده است. در مقاله‌ی *Fu Meng* [۲۰]، یک مدل جدید زنجیره تامین حلقه بسته پویا توسعه داده شده است و ایده اصلی این تحقیق برگرفته از مدل انتشار ویروس‌های انسانی است. در این تحقیق، با در نظر گرفتن تعداد محصولات در بازه‌ی زمانی، کارایی و سود نهایی سیستم در وضعیت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت تحقیقات عددی برای بررسی عملکرد این سیستم پویا به‌کار گرفته شده است.

مقاله‌ی *Mishra* و همکاران [۲۱]، یک سیستم مدیریتی برای زنجیره تامین حلقه بسته را با در نظر گرفتن یک تولیدکننده، یک خرده‌فروش و یک شخص ثالث که تولیدکننده، محصول تولیدی را به آن فرد می‌دهد تا به خرده‌فروش برساند، معرفی می‌نماید. به دلیل حمل و نقل در نظر گرفته شده در این تحقیق، میزان تولید گازهای گلخانه‌ای مورد بحث خواهد بود و با مدیریت زنجیره، در جهت کاهش تولید این گازها تلاش شده است. این تحقیق از مدل *MINLP* در جهت کاهش هزینه‌های کلی استفاده نموده است. در مقاله‌ی *Nunes* و همکاران [۲۲]، در مورد مدیریت زنجیره تامین حلقه بسته زیست‌توده‌ها (شامل زباله‌هایی که منشا زیستی داشته باشند و از تکثیر سلولی پدید آمده باشند) تحقیق شده است. به‌عنوان مثال

جنگل‌ها و ضایعات جنگلی، فضولات دامی، فاضلاب‌های شهری و صنعتی، محصولات و ضایعات کشاورزی و باغداری و پسماندهای آلی صنعتی به‌عنوان زیست‌توده معرفی می‌شوند. با توجه به اینکه زیست‌توده به‌عنوان منبع انرژی قابل تجدید شناخته می‌شود، قابل بازیافت و بازگشت به چرخه مصرف خواهد بود. عواملی مانند شرایط آب‌وهوای فصلی، نیاز به کاشت مجدد در محصولات جنگلی و ... نیز جزو چالش‌های توده های زیستی به‌شمار می‌روند. در این تحقیق نشان داده شده است که مدل زنجیره تامین زیست‌توده باید شامل متغیرهای مختلفی جهت بررسی باشد و فاکتورهای مضر اصلی زیست‌توده نیز باید در نظر گرفته شوند.

در مقاله‌ی *Shen* و همکاران [۲۳]، محققان تحقیقات خود را روی صنعت کالاهای لوکس متمرکز نموده‌اند. صنایع لوکس در سطح جهان دائما در حال پیشرفت هستند به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۱۹ درآمد صنایع لوکس در سطح جهان بالغ بر ۱/۲تریلیون یورو بوده است. در این صنعت، گاها ممکن است مواد خام در یک کشور تولید شوند و برای پردازش به کشور دیگر منتقل شوند و در نهایت برای بسته‌بندی و فروش به مصرف‌کننده توسط کشور دیگر اقدام شود، به‌عنوان مثال چرم از آمریکا لاتین یا استرالیا گرفته می‌شود و در ایتالیا دباغی می‌گردد و برای تبدیل به اقلام چرمی و ورود به بازار مصرف، به کشورهای آسیایی ارسال می‌گردد. با توجه به پیچیدگی زنجیره در صنعت کالاهای لوکس، وجود مدیریت و کنترل دقیق در این حوزه، یک الزام به شمار می‌آید. در تحقیق دیگری به‌دلیل روند صعودی تولید پسماند در تمامی فازهای مختلف تولید، ایده‌ی مدیریت زنجیره تامین دایره‌ای مطرح گردیده است. مدیریت زنجیره تامین دایره‌ای به‌عنوان یک راهکار متناوب در برابر مدل خطی غالب بر تولید و مصرف عمل می‌نماید. با استفاده از این راهکار که با استفاده از اصل اقتصاد دایره‌ای ایجاد شده است، امکان مدیریت زنجیره تامین میسر گردیده است و با پیاده‌سازی آن، فرآیندهای زنجیره تامین قدرت خواهند یافت [۲۴].

در مقاله‌ی *Wamba* و *Queiroz* [۲۵]، از تکنولوژی بلاکچین[۱۵] برای مدیریت زنجیره‌های تامین استفاده شده است. ویژگی تکنولوژی بلاکچین یا زنجیره‌ی بلوکی این است که کار ذخیره داده‌ها بدون وجود یک مدیر و صاحب اختیار مرکزی امکان‌پذیر است و نمی‌توان با تخریب یک نقطه‌ی مرکزی، داده‌های ذخیره‌شده را تحریف یا نابود کرد. با استفاده از این تکنولوژی، امکان از بین بردن نقطه مدیریت مرکزی در زنجیره تامین وجود نخواهد داشت. در مقاله‌ی *Kim* و همکاران [۲۶]، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور مقابله با عوامل غیرقطعی تقاضای مشتریان و کالاهای بازیافت‌شده، در زنجیره تامین حلقه بسته در صنعت مُد معرفی و مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، سه گروه از مراکز جهت دریافت کالاهای استفاده‌شده وجود دارند که شامل مراکز بازیافت، مراکز تولید مجدد و مراکز تعمیر می‌باشند. با در نظر داشتن این مراکز، در این تحقیق یک مدل جدید از زنجیره تامین حلقه بسته نشان داده شده است که از خطا و عوامل غیرقطعی در مراکز دریافت کالاهای استفاده‌شده جلوگیری می‌نماید و از بودجه مربوط به عوامل غیرقطعی استفاده می‌کند.

در مقاله‌ی *Dinparast* و *Golpaygani* [۲۷] یک زنجیره تامین با مُد سفارشی‌ساز مورد تحقیق قرار گرفته است. زنجیره‌های تامین با مُد سفارشی‌ساز در زمره زنجیره‌های چابک قرار دارند، بنابراین تغییر در ساختار فیزیکی آن‌ها اجتناب ناپذیر است. تغییر در ساختار فیزیکی، جریان کالا و مواد تشکیل‌دهنده، بر ساختار زنجیره، تاثیر می‌گذارد و به‌این‌ترتیب، ضرورت بازنگری در الگوی جریان داده و اطلاعات، مطرح خواهد شد. در این مقاله، مدلی بر پایه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه شده است که با دریافت پارامترهای مربوط به زنجیره‌های سفارشی‌ساز، الگوی متناسب جریان داده و اطلاعات، همچنین الگوی جریان کالا و مواد تشکیل-دهنده آن را ارائه می‌دهد. مقاله‌ی *Seresti* و همکاران [۲۸] به بررسی فرآیند توزیع در یک زنجیره تامین می‌پردازد. یکی از ارکان مهم در یک زنجیره، بخش توزیع محصول می‌باشد که کاهش هزینه‌ها در این بخش، از هدر رفتن سرمایه و نیروی انسانی در برآیند زنجیره جلوگیری خواهد کرد. بنابراین حذف مسافت‌های غیرضروری و بهینه‌سازی مسیرهای طی شده در فرآیند توزیع محصول، یک راه‌حل کارساز در کاهش هزینه‌های توزیع به‌شمار می‌رود. در این تحقیق، یک مدل توزیع پویا در زنجیره عرضه سرد مواد لبنی با استفاده از یک روش ترکیبی اصلاحی فراابتکاری مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچه معرفی شده است. ارزیابی مدل معرفی شده روی داده‌های شرکت لبنی پگاه قزوین انجام گرفته است و نتایج نشان می‌دهند که مدل معرفی‌شده به دلیل کاهش تعداد وسایل نقلیه، مسافت طی‌شده کوتاه‌تر و مصرف سوخت کم‌تر، باعث صرفه‌جویی در هزینه حمل و نقل و نیروی انسانی خواهد گردید. در مقاله‌ی *Guo* و همکاران [۲۹]، یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای پیکربندی و بهینه‌سازی یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با بازسازی پایدار ایجاد شده است. هدف این مدل کاهش هزینه‌های خالص، تخریب محیط‌زیست و روزهای کاری از دست‌رفته ناشی از حوادث شغلی است. نتایج، اثربخشی و کاربرد مدل پیشنهادی را تایید می‌کند. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که راه‌حل پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم معمولی دارد.

مقاله‌ی *Ma* و همکاران [۳۰] ترکیب بهینه‌ی پذیرش زنجیره‌ی بلوکی در بازیافت محصولات استفاده‌شده و انتخاب فرمت فروش پلتفرم آنلاین را برای دستیابی به پایداری سه‌گانه اقتصاد، محیط زیست و جامعه بررسی می‌کند. در این تحقیق، تمرکز روی یک زنجیره تامین حلقه بسته شامل یک تولیدکننده و یک پلتفرم برخط[۱۶] می‌باشد. با ساختن مدل بازی دیفرانسیل نرمال‌شده، شرایط پذیرش زنجیره بلوکی، مشخص و تاثیر آن بر انتخاب قالب فروش و عملکرد سه‌گانه زنجیره تامین تعیین می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که هرچه نرخ بازیافت واقعی کمتر باشد، تأثیر زنجیره‌ی بلوکی در ایجاد پایداری سه‌گانه اقتصاد، محیط زیست و جامعه بهتر خواهد بود.

به طور کلی تحقیقات بسیاری در زمینه مدیریت و کنترل زنجیره-های تامین حلقه بسته صورت پذیرفته است که هر یک از این پژوهش‌ها از الگوریتم‌های متفاوت و روش‌های مدل‌سازی مختلفی استفاده نموده‌اند، اما هدف اصلی همه آن‌ها، تلاش در جهت بهبود فرآیندهای زنجیره‌های تامین حلقه بسته خواهد بود. در ادامه، مطالعات صورت‌گرفته در زمینه زنجیره‌های تامین حلقه بسته به اختصار در جدول ۲ قرار داده شده‌اند.

۲-۳- بهینه‌سازی با نظریه بازی‌ها

یکی از مفاهیم قابل استفاده در زمینه بهینه‌سازی، استفاده از نظریه بازی‌ها است، چراکه در نظریه بازی‌ها با استفاده از مدل‌های ریاضی، به تحلیل روش‌های همکاری یا رقابت موجودیت‌های منطقی و هوشمند پرداخته می‌شود. هر یک از موجودیت‌ها در نظریه بازی‌ها در صدد حداکثر کردن منافع خود می‌باشند و خروجی نهایی باید تعادلی بین منافع تمام موجودیت‌ها باشد. پس در خروجی نهائی، همه موجودیت‌ها حداکثر منفعت در دسترس خود را خواهند داشت و در نتیجه باعث انتخاب بهترین گزینه برای همه موجودیت‌ها خواهد شد و در نهایت مفهوم بهینه‌سازی پدیدار می‌گردد. پژوهش-های زیادی از نظریه بازی‌ها برای بهینه‌سازی پارامترها و مدل‌های مختلف بهره گرفته‌اند. در مقاله *Haghi* و همکاران [۳۱] از نظریه بازی‌ها برای بهینه‌سازی مصرف سوخت لیفتراک‌های صنعتی در استان اونتاریو کانادا بهره گرفته شده است. در این پژوهش دولت به‌عنوان یک بازیگر و کارخانه‌ی صنعتی با ۱۵۰ لیفتراک به‌عنوان بازیگر دیگر در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن پیامدهای مختلف تصمیم‌گیری برای هر یک از بازیگران و اجرای بازی مطرح-شده و رسیدن به نقطه تعادل بازی (تعادل نش)، موثر بودن لیفتراک‌های برقی در صنعت با هدف کاهش هزینه‌ها و همچنین کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نتیجه‌گیری شده است. در پژوهش دیگری، محققان در زمینه صنعت ماهی‌گیری، تحقیقاتی به‌عمل آورده‌اند که در آن با استفاده از نظریه بازی‌ها، در جهت بهینه‌سازی مسیرهای لجستیک صید ماهی تُن، تلاش شده است. با استفاده از مدل پیشنهادی در این پژوهش، امکان به‌اشتراک‌گذاری و تجمیع تجهیزات ماهی‌گیری بین قایق‌های ماهی‌گیری فراهم خواهد شد تا با بهینه‌سازی مسیرهای لجستیک در این صنعت، کاهش زمان فرآیندها و همچنین حداقل شدن مصرف سوخت میسر شود. در نتیجه‌ی این بهینه‌سازی، میزان آلایندگی و تولید کربن‌دی‌اکسید و گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد. پیاده‌سازی مدل پیشنهاد شده در این پژوهش با اعمال روی قایق‌های ماهی‌گیری در اقیانوس هند صورت پذیرفته است [۳۲].

در مقاله‌ی *Toufighi* و همکاران [۳۳]، محققان از نظریه بازی‌ها در جهت بهینه‌سازی استخراج نفت در کشور ایران به‌جهت متراکم-سازی استخراج از میادین مشترک نفتی استفاده نموده‌اند. در این مقاله، چالش اصلی در مشارکت ایران و عربستان صعودی در زمینه استخراج نفت در میدان نفتی فروزان واقع‌شده در خلیج فارس می-باشد که با توجه به نتایج مدل‌سازی، نقطه تعادل برای بازی مطرح-شده در مشارکت ایران با عربستان صعودی خواهد بود و نقطه تعادل برای عربستان صعودی عدم مشارکت در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه نقطه تعادل برای هر دو بازیگر بازی مطرح‌شده، به‌عنوان بهترین گزینه و بهترین حالت ممکن از نظر زمان استخراج معرفی شده است. در مقاله‌ی *Muthumanickam* و *Ilavarasan* [۳۴]، از نظریه بازی‌ها برای بهینه‌سازی مصرف منابع در تشخیص حملات *Rootkit* استفاده شده است. حملات *Rootkit* به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که مدیریت و مشاهده اطلاعات سیستم قربانی، بدون صدور اجازه دسترسی توسط کاربر سیستم صورت پذیرد. به‌منظور انجام این حملات، از فناوری اتصال به *API*های داخلی سیستم قربانی استفاده می‌شود. به‌منظور تشخیص این‌گونه حملات، تکنیک‌های فعلی تشخیص حملات *Rootkit*، به بررسی تمامی ساختمان داده-هایی که آدرس *API*های داخلی سیستم را نگهداری می‌کنند می-پردازند. این فرآیند به‌دلیل تعدد *API*ها در این ساختمان‌های داده، علاوه‌بر نیاز به زمان، مستلزم فراهم بودن منابع زیادی برای انجام محاسبات خواهد بود. در این تحقیق از نظریه بازی‌ها برای بهینه-سازی منابع مورد نیاز برای این محاسبات و فرآیند تشخیص حملات *Rootkit* بهره گرفته شده است.

جدول ۲: تحقیقات بررسی شده در حوزه زنجیره‌های تامین حلقه بسته

نویسنده	چالش / مسئله	راهکار پیشنهادی	نتایج
Abdel-Basset و همکاران [۶]	تاثیرات هوشمندسازی کارخانجات هوشمند بر زنجیره‌های تامین	استفاده از تگ‌های RFID و اینترنت اشیا در بدنه زنجیره‌های تامین و استفاده از تکنیک N-DEMATEL	• سیستم احراز هویت هوشمند و خودکار • کاهش زمان و هزینه • افزایش رضایت مشتریان
Saraeian و همکاران [۵]	مدیریت زنجیره تامین حلقه بسته اتوماتیک در حضور عوامل عدم قطعیت	کنترل‌کننده PID با تنظیمات خودکار توسط الگوریتم IPSO	• مدیریت زنجیره تامین حلقه بسته در فضای غیرقطعی به‌صورت هوشمند • کنترل‌کننده هوشمند با تنظیم خودکار در جهت کاهش زمان تنظیم کنترل‌کننده
Guo و همکاران [۱۹]	زنجیره تامین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن یارانه دولتی	ارائه یک مدل زنجیره تامین حلقه بسته سبز با الگوریتم ژنتیک و الگوریتم IPSO	• تعادل بین تعداد مراکز تولید و تولید مجدد • ارائه یارانه دولتی جهت استفاده مجدد از محصولات مصرف‌شده توسط تولیدکنندگان
Fu و Meng [۲۰]	مدیریت زنجیره تامین حلقه بسته	ارائه یک مدل پویا از زنجیره تامین حلقه بسته به‌منظور ایجاد دیدگاه سیستماتیک برای مدیران	• راهکارهای مدیریتی جهت سیاست گذاری بر تعداد و نحوه تولید مجدد
Mishra و همکاران [۲۱]	بهینه‌سازی هزینه جمع‌آوری و استفاده مجدد از محصولات مصرف‌شده	ارائه مدل کنترلی MINLP جهت افزایش سود و کاهش هزینه با بهینه نمودن تعداد حمل و نقل	• کاهش هزینه‌های حمل و نقل و در نتیجه هزینه‌های کلی زنجیره تامین
Nunes و همکاران [۲۲]	مدیریت زنجیره تامین زیست‌توده‌ها	بررسی رویکردهای مختلف کنترلی برای مدیریت زنجیره	• استفاده از زیست‌توده به‌عنوان منبع انرژی نیازمند بررسی متغیرهای مختلفی خواهد بود.
Shen و همکاران [۲۳]	مدیریت زنجیره تامین در صنعت کالاهای لوکس	جمع‌بندی رویکردهای مختلف و مباحث مهم در مدیریت	• اهمیت مدیریت زنجیره تامین کالاهای لوکس به دلیل پیچیدگی بیش از حد در فرآیند
Lahane و همکاران [۲۴]	مدیریت زنجیره‌های تامین به‌منظور کاهش پسماندهای تولید	ارائه مدل مدیریت زنجیره تامین دایره‌ای	• تقویت فرآیندهای زنجیره تامین • مدیریت بهینه به‌عنوان یک رویکرد متناوب
Wamba و Queiroz [۲۵]	مدیریت زنجیره‌های تامین	استفاده از تکنولوژی بلاکچین	• تغییرات در مدل مدیریتی زنجیره تامین
Kim و همکاران [۲۶]	زنجیره‌های تامین حلقه بسته در صنعت مد با در نظر داشتن حلقه برگشت کالاهای استفاده شده	استفاده از مدل بهینه سازی چندهدفه در حضور عوامل غیرقطعی تقاضای مشتریان و میزان کالاهای بازیافت شده	• در صورت قابل اعتماد بودن مراکز دریافت کالای استفاده شده، میزان عوامل غیرقطعی کاهش خواهد یافت و سودآوری حاصل، بیشتر خواهد شد.
Dinparast و Golpaygani [۲۷]	زنجیره‌های تامین با مُد سفارشی‌ساز	ارائه یک مدل بر پایه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط	• ارائه الگوی متناسب جریان داده و اطلاعات و الگوی متناسب جریان مواد بر اساس تغییر ساختار فیزیکی
Seresti و همکاران [۲۸]	ارائه مدل زنجیره توزیع پویا در زنجیره‌های عرضه سرد	ارائه یک مدل توزیع پویا در زنجیره عرضه سرد مواد لبنی با استفاده از یک روش ترکیبی اصلاحی فراابتکاری مبتنی بر بهینه‌سازی کلونی مورچه	• کاهش تعداد وسایل نقلیه • کوتاه شدن مسافت طی‌شده • کمتر شدن مصرف سوخت وسایل • صرفه‌جویی در هزینه حمل و نقل
Guo و همکاران [۲۹]	پیکربندی و بهینه‌سازی یک شبکه زنجیره تامین حلقه بسته با بازسازی پایدار	یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط چندهدفه	• راه‌حل پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم معمولی دارد. • دستیابی به راه‌حل بهینه بر اساس کارایی متقابل راه‌حل‌های امکان‌پذیر توسط روش بهینه‌سازی پیشنهادی
Ma و همکاران [۳۰]	بررسی ترکیب بهینه‌ی پذیرش زنجیره‌ی بلوکی در بازیافت محصولات استفاده‌شده و انتخاب فرمت فروش پلتفرم آنلاین برای دستیابی به پایداری سه-گانه اقتصاد، محیط زیست و جامعه	ساخت مدل بازی دیفرانسیل نرمال‌شده	• هرچه نرخ بازیافت واقعی کمتر باشد، تأثیر زنجیره بلوکی در ایجاد پایداری سه-گانه اقتصاد، محیط زیست و جامعه بهتر است.

شبکه نظیربه‌نظیر(همتا)، به شبکه‌ای گفته می‌شود که در آن تمامی سیستم‌ها یا گره‌های شبکه به‌طور هم‌زمان و با حق یکسان در حال فعالیت هستند و هیچ گره‌ای بر گره‌ی دیگر ارجحیت ندارد و هیچ دستگاه سرپرست اولیه‌ای در مرکز شبکه وجود ندارد. اما اخیرا برخی فعالیت‌های مخرب و خودپسندانه، منجر به ظهور پدیده‌هایی از قبیل سواری رایگان در این شبکه‌ها گردیده است. این فعالیت‌ها منجر به کاهش کارایی شبکه نظیربه‌نظیر، کاهش قدرت این شبکه‌ها و ازدحام بیشتر شبکه خواهد شد که در نهایت سیستم را به سمت ناتوانی سوق می‌دهد. در مقاله‌ی *SimonBiaou* و همکاران [۳۵]، برای مهار مشکل سواری رایگان در نسل دوم شبکه‌های بدون ساختار نظیربه‌نظیر، از یک مکانیزم جدید مدل تئوری بازی *Ayo* تصادفی استفاده شده است. با استفاده از مدل مطرح‌شده، سرعت ارتباطات در شبکه‌های نظیربه‌نظیر افزایش می‌یابد، مشکل کمبود پهنای باند مهار خواهد شد و بهبود قابل توجهی در میزان سواری رایگان صورت خواهد پذیرفت.

در مقاله‌ی *Casado-Vara* و همکاران [۳۶]، یک الگوریتم با قابلیت همکاری غیرخطی بر اساس نظریه بازی‌ها با هدف کنترل کیفیت داده‌ها و تشخیص داده‌های خراب در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، معرفی شده است. در این تحقیق، یک مدل جدید برای پردازش و مدیریت داده‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم به‌صورت خودکار، پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی این مقاله در یک فضای واقعی برای افزایش کیفیت داده‌های مرتبط با دمای تولید شده در سطوح داخلی یک شبکه حسگر بی‌سیم پیاده‌سازی شده است. طبق دستاوردهای این تحقیق، یک الگوریتم جدید، توزیع‌شده و خودسازمان‌یافته معرفی شده است که قابلیت تنظیم خودکار دمای محیط اطراف حسگرها در فضای پیاده‌سازی شده را دارد. در مقاله‌ی *Álvarez* و همکاران [۳۷]، یک رویکرد با استفاده از نظریه بازی‌ها برای پیشگیری از خطر طغیان رودخانه‌ها ارائه شده است. در این تحقیق از یک بازی به‌فرم استراتژیک استفاده شده است. این تحقیق به بررسی تاثیرات نحوه استفاده از زمین‌ها در بالادست حوزه آبخیر، در هزینه‌ها و سودآوری‌ها می‌پردازد. مالکان زمین‌های بالادست باید آگاه باشند که استفاده از زمین‌های آن‌ها، نه‌تنها در زمین‌های خود بلکه در زمین‌های دور از محل زندگی آن‌ها نیز عواقبی در مورد خطرات ناشی از سیلاب خواهد داشت. به‌عنوان نتیجه این تحقیق، برنامه‌ریزان شهری، دولت و مالکان زمین می‌توانند از نظریه بازی-های مشترک به‌عنوان ابزاری برای مدیریت ریسک سیل استفاده کنند.

یک وظیفه اصلی برای بخش‌های منابع انسانی و مدیران طراحی، ساختار تیم‌ها در شرکت‌ها در نظر گرفته می‌شود. دو بعد اصلی هنگام اجرای این تصمیم، اندازه تیم‌ها و ترکیب تخصص در تیم-هاست. مقاله‌ی *Hiller* [۳۸]، نظریه بازی‌های مشترک را برای مدل-سازی این تصمیمات اعمال می‌نماید. در این تحقیق از بازی‌های تولیدی استفاده شده است که نوع پیشرفته بازی‌های تیمی می‌باشند و امکان مدل‌سازی تیم‌ها را فراهم می‌نمایند. بازی مطرح‌شده در این تحقیق در دو مرحله انجام می‌پذیرد: در مرحله‌ی اول، شرکت در مورد استخدام و/یا تعیین صلاحیت کارمندان تصمیم می‌گیرد. در مرحله دوم، کارکنان براساس مدل پیشنهادی ساختار می‌یابند و سود شرکت محقق می‌شود. بر اساس این بازی، امکان مدل‌سازی بهتر تیم‌ها در شرکت‌ها وجود خواهد داشت. انتقال پیوسته پیام‌ها در شبکه‌های موقت خودرویی، منجر به بار سنگین ترافیک شبکه می‌شود. این امر باعث ازدحام در کانال بی‌سیم می‌شود که قابلیت اطمینان شبکه را کاهش می‌دهد و پارامترهای کیفیت خدمات[۱۷]، مانند افت بسته، توان عملیاتی و تاخیر متوسط را به میزان قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، تطابق میزان انتقال داده به‌گونه‌ای که منجر به کاهش عملکرد شبکه نشود و ارتباط مطمئنی را بین وسایل نقلیه در شهرهای هوشمند ایجاد کند، امری ضروری تلقی می‌شود. در مقاله‌ی *Amer* و همکاران [۳۹]، کنترل تراکم در کانال ارتباطی به‌عنوان یک رویکرد بازی غیرهمکارانه فرموله شده است و وسایل نقلیه به‌عنوان بازیگر در بازی عمل می‌کنند تا درخواست یک داده با تراکم بالا را به‌روشی خودخواهانه داشته باشند. راه‌حل بازی بهینه با استفاده از شرایط *Karush-Kuhn-Tucker* و ضریب لاگرانژ ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی در این تحقیق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، کارایی شبکه را در حضور عوامل ایجاد کننده تراکم، بهبود می‌بخشد.

امروزه، رایانش ابری مزایای بسیاری از جمله دسترسی آسان، مقیاس‌پذیری و مقرون‌به‌صرفه بودن دارد که منجر به خطرات امنیتی و آسیب پذیری‌های شبکه می‌شود. بنابراین، امنیت این سیستم و شناسایی مراکز آسیب‌پذیر داده، پیچیده‌تر از گذشته است. به‌طور قطع کشف مراکز داده آسیب‌پذیر که در معرض حمله قرار دارند، می‌تواند به تقویت این مراکز داده و ایجاد ساختار شبکه امن و ایمن کمک کند. مقاله‌ی *Hosseini* و *Vakili* [۴۰]، آسیب‌پذیری مراکز داده از طریق بدافزار را در زیرساخت‌ها و ساختار شبکه رایانش ابری بررسی می‌کند. این تحقیق، براساس تجزیه و تحلیل سیستم رایانش ابری با نظریه بازی‌ها، یک مدل توسعه‌یافته برای شناسایی مراکز داده آسیب‌پذیر در محاسبات ابری معرفی می‌نماید و طبق نظریه بازی‌ها، مقیاسی از میزان آسیب‌پذیری مراکز داده در شبکه رایانش ابری را نمایش خواهد داد. صنعت هتل‌داری یکی از صنایع

رو به گسترش در صنایع امروز است و به‌همین‌علت نیازمند مدیریت صحیح به‌منظور افزایش سودآوری و کاهش خرابی‌ها خواهد بود. در مقاله‌ی *Chen* و همکاران [۴۱]، محققان از یک مدل بازی ارزیاب، جهت بررسی فاکتورهای محیط‌زیستی در زنجیره تامین صنعت هتل‌داری استفاده کرده‌اند. نتایج این تحقیقات به دولت‌ها کمک می‌کند تا سیاست‌های محیطی کارسازی در این حوزه اعمال نمایند و به صاحبان این صنایع در جهت چیدمان و راه و رسم زنجیره تامین سالم در صنعت هتل‌داری راهنمایی می‌دهد. هنگام وقوع زلزله به‌دلیل شرایط بحرانی و کمبود زمان، مدیریت شرایط از اهمیت زیادی برخوردار است و می‌بایست برای چنین شرایطی در شهرها تدابیر لازم اندیشیده شود. در پژوهش *Ghasemi* و همکاران [۴۲]، محققان، شبکه‌ای شامل مکان‌های موثر، تولیدکنندگان، مراکز توزیع و بیمارستان‌ها در شرایط زلزله معرفی نموده‌اند. علاوه‌براین، ساختارهای پایه شهرها که در زمان زلزله کاربردی هستند مشخص شده‌اند. سپس براساس شبیه‌سازی، میزان تقاضا برای هر کالا در شرایط زلزله تعیین شده است و این میزان تقاضا به‌عنوان یک فاکتور عدم‌قطعیت در مدل‌سازی ریاضی در نظر گرفته شده است. روش پیشنهادی در دو سطح معرفی شده است که در سطح اول موقعیت مکانی و انبار مراکز توزیع در نظر گرفته شده است و در سطح دوم، مسیریابی بین مراکز توزیع و تولیدکنندگان با مکان‌های موثر تعیین شده‌اند. سطح اول با استفاده از یک جستجوی فراکتال تصادفی چندهدفه حل شده است و برای سطح دوم یک بازی همکارانه مد نظر قرار گرفته است که منجر به کاهش زمان طلایی توزیع کالاها خواهد شد.

مرور کارهای پیشین مرتبط با این مقاله، اهمیت مدیریت و کنترل زنجیره‌های تامین حلقه بسته را نمایش می‌دهند. از آنجائی که این نوع از زنجیره‌ها از شیوه‌های مختلفی نظیر افزایش رضایت مشتری، کاهش مصرف منابع اولیه خام، کاهش پسماندهای تولید، بهبود تولید و ... منجر به افزایش بهره‌وری در کسب و کارها می‌گردند، از این‌رو کنترل و مدیریت هوشمندانه آن‌ها، امری ضروری می‌باشد. همچنین با توجه به اهمیت تعریف زنجیره‌های تامین حلقه بسته سبز در کاهش اثرات زیست محیطی، وجود سیستم نظارتی در جهت کنترل این دسته از زنجیره‌ها نیز دارای اهمیت بالائی می‌باشد. از طرفی، ترکیب زنجیره‌های تامین در محیط کارخانه‌های هوشمند آن‌ها را درگیر با چالش‌های جدی می‌نماید که پژوهش‌های مختلف از مکانیزم‌های کنترلی مختلفی در جهت حل آن‌ها استفاده نموده اند، اما همچنان بحث بهینه‌سازی این فرآیندهای مدیریتی در کارخانه‌های هوشمند یک چالش تلقی می شود.

با هدف بهینه‌سازی فرآیندها و مدیریت چالش‌های مرتبط با کارخانه‌های هوشمند نیز، تحقیقات مختلفی و راهکارهای متنوعی ارائه شده است اما ارائه راهکار مناسب برای مدیریت چالش‌های مرتبط با این بخش، همچنان نیازمند تحقیق بیشتر می‌باشد. به‌عنوان مثال، یکی از راهکارهای استفاده شده در کارخانه‌های هوشمند، زنجیره‌های بلوکی هستند. به‌کارگیری زنجیره‌های بلوکی در کنار مزایای آن‌ها در جهت رفع چالش‌های مختلف این نوع از کارخانه‌ها، دارای معایبی نیز می‌باشد. از جمله این معایب می‌توان به ضعف توان عملیاتی تجهیزات موجود در صنعت جهت پردازش زنجیره‌های بلوکی، ضرورت وجود دقت زمانی در حد میکروثانیه و مسائل مربوط به حریم خصوصی تراکنش‌های صنعتی اشاره نمود. بنابراین همچنان وجود روش قوی‌تر و با کارائی بالاتر برای پوشش بهینه انواع چالش‌های مطرح‌شده، مهم می‌باشد.

به‌همین‌علت، در این مقاله به‌دلیل کاربرد فراوان زنجیره‌های تامین حلقه بسته در کارخانه‌های هوشمند، بر این نوع از زنجیره‌ها تمرکز شده است تا چالش‌های غیرقابل حل توسط راهکارهای پیشین به شیوه موثرتری پوشش داده شوند. بدین ترتیب، یک کنترل‌کننده هوشمند با قابلیت تنظیم خودکار ورودی‌های متغیر کنترل‌کننده با استفاده از نظریه بازی‌ها به‌عنوان یک چهارچوب تصمیم‌گیر تعاملی پیشنهاد گردیده است. وجه تمایز این مقاله، استفاده از نظریه بازی‌ها به‌عنوان عامل کنترل‌کننده در مدیریت این زنجیره‌ها با در نظر گرفتن عوامل غیرقطعی و مخرب و تشکیل بازی با سه بازیگر می‌باشد که به دنبال آن، یک کنترل‌کننده پویا، دقیق و با کارائی بالا را نتیجه می‌دهد.

۳- طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی

معماری پیشنهادی شامل ساختار زنجیره تامین حلقه بسته در کارخانه هوشمند به‌همراه یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی است. با در نظر داشتن مطالعات انجام‌شده در خصوص روش‌های مختلف بهینه‌سازی، در این تحقیق از نظریه بازی‌ها استفاده خواهد شد و ورودی‌های کنترل‌کننده مورد نظر، بهینه‌سازی خواهند شد. کنترل‌کننده مورد نظر دارای یک نقطه تنظیم است که درواقع مقدار نهایی مورد انتظار از کنترل‌کننده خواهد بود. عملیات کنترلی توسط کنترل‌کننده، بر اساس میزان خطای بین مقدار نهایی مورد نظر و مقدار متغیر فرآیند انجام می‌گردد. متغیر فرآیند، مقدار فعلی را نشان می‌دهد و اختلاف بین متغیر فرآیند و نقطه تنظیم، خطای کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود.

کنترل‌کننده *PID* به‌دلیل سادگی، سرعت عمل مناسب و پایداری، یکی از پرکاربردترین کنترل‌کننده‌ها در سراسر جهان است. این کنترل‌کننده سه مُد کنترلی دارد که به ترتیب کنترل تناسبی،

کنترل انتگرالی و کنترل مشتقی نام‌گذاری می‌گردند. مُد کنترل تناسبی، در اغلب موارد نیروی محرک کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود بدین شکل که متناسب با میزان خطای کنترل‌کننده، خروجی را تنظیم می‌نماید. اگر کنترل تناسبی بیش از حد بزرگ باشد، منجر به ناپایداری کنترل‌کننده خواهد شد و اگر این مقدار بسیار کم باشد، کنترل‌کننده امکان پاسخ به اغتشاشات یا تغییرات نقطه تنظیم را نخواهد داشت. مُد کنترل انتگرالی، درصورت وجود خطا، خروجی کنترل‌کننده را به‌صورت پیوسته کم یا زیاد می‌نماید تا خطا را به نزدیک صفر کاهش دهد. کنترل انتگرالی با توجه به میزان خطا، عملکرد خود را تغییر می‌دهد یعنی اگر مقدار خطا بزرگ باشد، مُد انتگرالی، خروجی کنترل‌کننده را به‌سرعت افزایش یا کاهش می‌دهد و اگر مقدار کوچک باشد، مُد انتگرالی، خروجی کنترل‌کننده را با سرعت کمتر تغییر خواهد داد. اگر مقدار کنترل انتگرالی بیش از حد بزرگ باشد، زمان انتگرال بیشتر خواهد بود و در نتیجه عملکرد کنترل‌کننده کند می‌گردد اما اگر کنترل انتگرالی بیش از حد کوچک باشد، فواصل انتگرالی بیش از حد کم خواهد شد و کنترل کننده، نوسانی و ناپایدار می‌شود. کنترل مشتقی در کنترل‌کننده *PID*، بر اساس میزان تغییرات خطا، یک خروجی تولید می‌کند. وقتی خطا تغییر نکند، مُد مشتقی صفر خواهد بود و وقتی تغییرات خطا زیاد باشد، مُد مشتقی عمل کنترل بیشتری تولید خواهد کرد.

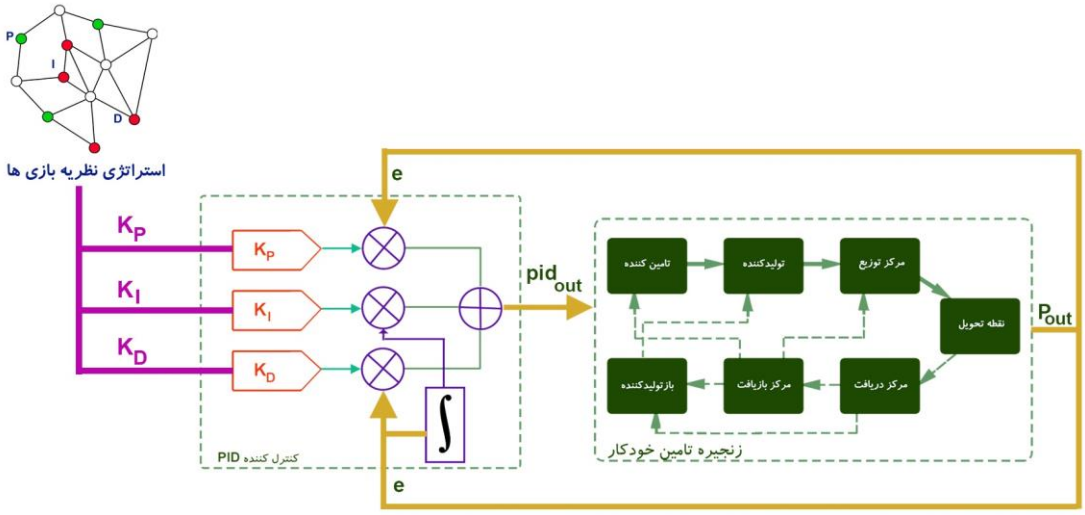
ورودی P یا کنترل تناسبی، سرعت سیستم را افزایش می‌دهد، ورودی I یا کنترل انتگرالی، خطای حالت دائم را کاهش می‌دهد اما در خروجی، نوسانات ناخواسته ایجاد می‌نماید و ورودی D یا کنترل مشتقی، نوسانات را تضعیف کرده و خروجی را به حالت ایده آل نزدیک می‌نماید. هر کدام از این کنترل‌ها، سیگنال خطا را به‌عنوان ورودی گرفته و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و در نهایت خروجی آن‌ها برای به‌دست‌آوردن خروجی نهایی کنترل‌کننده، با هم برآیند گرفته می‌شوند. خروجی این مجموعه برای اصلاح خطا به سیستم مورد نظر فرستاده می‌شود.

معماری پیشنهادی در این تحقیق، توسط نظریه بازی‌ها با ایجاد یک بازی با سه بازیگر که همان ورودی‌های کنترل‌کننده *PID* هستند، به‌دنبال نقطه تعادل برای مقادیر این سه ورودی خواهد بود. درواقع مقدار ورودی اولیه به‌عنوان مقدار اولیه ورودی‌ها قرار داده می‌شود و با افزایش و کاهش این مقادیر، پیامدهای بازیگران این بازی براساس محاسبات ریاضی به‌دست می‌آید. پس از محاسبه پیامدهای بازیگران، نقطه تعادل مشخص می‌شود و نقطه تعادل بازی، بهترین مقادیر برای P، I و D خواهد بود. در شکل ۳ کنترل‌کننده *PID* پیشنهادی با قابلیت تنظیم توسط نظریه بازی‌ها به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده در مورد نحوه عملکرد کنترل‌کننده *PID*، فرمول کلی محاسبه خطا برای این کنترل‌کننده به شرح زیر خواهد بود:

$$pid_{out}(\mathrm{t}) = k_p * e(t) + k_i * \int e(t)dt + k_d * d\frac{e(t)}{d(t)} \quad (۱)$$

در جایی که $e(t)$ همان مقدار خطای کنترل‌کننده نسبت به خروجی مورد انتظار خواهد بود. همانطور که ذکر شد برای مدل‌سازی بازی مورد نظر، از سه بازیگر P، I و D استفاده شده است. هر یک از این



شکل ۳: معماری کنترل‌کننده زنجیره تامین حلقه بسته [۵] با روش پیشنهادی

بازیگران دارای سه استراتژی "افزایش"، "ثبات" و "کاهش" می‌باشند. در این بازی مجموعه بازیگران و مجموعه استراتژی های هر بازیگر به شکل روابط ذیل خواهد بود:

$$N = \{P, I, D\} \quad (۲)$$

$$Strategy_P = Strategy_I = Strategy_D = \{\text{ثابت, کاهش, افزایش}\} \quad (۳)$$

بازی مطرح‌شده از نظر تقسیم‌بندی زمانی، به‌دلیل اینکه هریک از بازیگران می‌توانند فقط یک انتخاب داشته باشند، جزو دسته بازی‌های استراتژیک خالص خواهد بود و از نظر تقسیم‌بندی اطلاعاتی، به‌دلیل اینکه هر یک از بازیگران تمامی قواعد و پارامترهای بازی را می‌دانند، جزو دسته بازی‌های کامل طبقه‌بندی می‌گردد. در نتیجه بازی مورد نظر، یک بازی به فرم استراتژیک کامل محض خواهد بود.

با توجه به تعداد بازیگران در بازی مطرح شده، ماتریس پیامد بازی شامل ۳ ماتریس با ابعاد ۳*۳ است که پیامدهای بازیگران بازی را نمایش می‌دهد. با در نظر داشتن اینکه هر بازیگر سه استراتژی دارد، در نتیجه تمامی حالت‌های مختلف برای این بازی برابر ۲۷ حالت خواهد بود که در ماتریس پیامد قرار می‌گیرند. برای محاسبه پیامدهای بازیگران بازی از روابط زیر استفاده شده است [۴۳]:

$$P_1 = rt_{S_{qrs}} + sse_{S_{qrs}} - 0.5 * \left(100 - st_{S_{qrs}}\right) - 0.5 * (100 - o_{S_{qrs}}) \quad (۴)$$

$$P_2 = 0.5 * rt_{S_{qrs}} + 1.5 * sse_{S_{qrs}} - 0.5 * \left(100 - st_{S_{qrs}}\right) - 0.5 * (100 - o_{S_{qrs}}) \quad (۵)$$

$$P_3 = 0.5 * rt_{S_{qrs}} + st_{S_{qrs}} + o_{S_{qrs}} \quad (۶)$$

در جایی که q استراتژی انتخابی توسط بازیگر اول یا همان P، r استراتژی انتخابی توسط بازیگر دوم یا I و s استراتژی انتخابی توسط بازیگر سوم یا D خواهد بود، به‌عنوان مثال S_{121} بدین معناست که بازیگر اول استراتژی اول خود، بازیگر دوم استراتژی دوم خود و بازیگر سوم استراتژی اول خود را انتخاب نموده‌است. مقدار P_1 به‌عنوان پیامد بازیگر اول، P_2 پیامد بازیگر دوم و P_3 پیامد بازیگر سوم معرفی می‌شوند. $rt_{S_{qrs}}$ مقدار زمان صعود[۱۸]، $sse_{S_{qrs}}$ مقدار خطای حالت ماندگار[۱۹]، $st_{S_{qrs}}$ مقدار زمان نشست[۲۰] و $o_{S_{qrs}}$ مقدار فراجهش[۲۱] را در کنترل‌کننده برای موقعیتی که بازیگر اول استراتژی q، بازیگر دوم استراتژی r و بازیگر سوم استراتژی S را انتخاب کند، معین خواهند کرد. با در نظر داشتن توابع پیامد و استراتژی‌های مختلف بازیگران بازی، ماتریس‌های پیامد بازی به شرح ذیل خواهند بود:

$$\begin{bmatrix} S_{111} & S_{121} & S_{131} \\ S_{211} & S_{221} & S_{231} \\ S_{311} & S_{321} & S_{331} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

$$\begin{bmatrix} S_{112} & S_{122} & S_{132} \\ S_{212} & S_{222} & S_{232} \\ S_{312} & S_{322} & S_{332} \end{bmatrix} \quad (۸)$$

$$\begin{bmatrix} S_{113} & S_{123} & S_{133} \\ S_{213} & S_{223} & S_{233} \\ S_{313} & S_{323} & S_{333} \end{bmatrix} \quad (۹)$$

بعد از تشکیل ماتریس‌های پیامد برای بازی مورد نظر، به محاسبه تعادل نَش پرداخته می‌شود. تعادل نش، مجموعه‌ای از انتخاب‌های بازیگران یک بازی است که هر تغییر در استراتژی بازیگران، خروجی بازی را برای آنان بدتر خواهد کرد. در این تعادل، اگر یکی از بازیگران تصمیم بگیرد که به‌سمت انتخاب دیگری جز انتخاب مرتبط با تعادل نش حرکت کند، در نتیجه منفعت کمتری را شاهد خواهد بود.

۴- اعتبارسنجی کنترل‌کننده پیشنهادی

با در نظر گرفتن بازه مقادیر ممکن برای هر یک از ورودی‌های کنترل‌کننده PID و به‌کمک تابع Rand() روی بازه مورد نظر، مقادیر اولیه کنترل‌کننده به‌صورت تصادفی تولید می‌گردند. البته انحراف معیار این مقادیر پس از دریافت از تابع Rand() در بازه مورد نظر، برای انتخاب مقادیری با پایین‌ترین مقدار انحراف معیار مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

با مقایسه انحراف معیار برای مقادیر تولید شده توسط تابع Rand()، مقدار انتخابی برای ورودی P، I و D به‌ترتیب برابر ۲۶/۳۸، ۵۱/۵۶ و ۳/۳۷۴ در نظر گرفته شده‌اند. پس از مشخص شدن مقادیر اولیه ورودی‌های کنترل‌کننده، باید میزان افزایش یا کاهش مقادیر برای هر یک از ورودی‌ها را تعیین نمود. بدین منظور با افزایش و کاهش مقادیر ورودی و محاسبه انحراف معیار در هر مرحله، مطابق با آنچه که در قبل توضیح داده شد، میزان افزایش و کاهش مناسب برای هریک از ورودی‌های کنترل‌کننده طبق جدول ۳ تعیین می‌گردد.

جدول ۳: میزان افزایش و کاهش برای ورودی‌های کنترل‌کننده

ورودی‌های کنترل‌کننده	D	I	P
میزان افزایش یا کاهش	±۲	±۱۰	±۱۰

این اعداد نمایانگر میزان کاهش یا افزایش نسبت به مقدار اولیه برای هریک از ورودی‌ها طبق استراتژی مورد نظر می‌باشند. به بیان دیگر اگر بازیگر P استراتژی کاهشی داشته باشد، از مقدار اولیه P به اندازه ۱۰ واحد کاسته می‌شود و مقدار جدید برای P به‌دست می‌آید. با تعیین مقادیر اولیه و همچنین میزان افزایش و کاهش برای ورودی‌های کنترل‌کننده، تمامی حالت‌های ممکن برای سه بازیگر P، I و

D طبق استراتژی‌های مطرح‌شده، مشخص خواهند شد. استراتژی دوم هر سه بازیگر(S_{222}) به‌عنوان استراتژی اولیه انتخاب می‌گردد و مقادیر اولیه برای این استراتژی لحاظ خواهد شد. بر همین اساس برای هر استراتژی، توابع کنترل‌کننده PID اجرا شده و پارامترهای زمان صعود، خطای حالت ماندگار، فراجهش و زمان نشست محاسبه می‌شوند که شرح هر یک از این پارامترها به‌ترتیب زیر خواهند بود:

- Rise-Time یا زمان صعود، فاصله زمانی لازم برای صعود لبه‌ی بالا رونده پالس از ۱۰٪ تا ۹۰٪ دامنه قله پالس است. به‌بیان دیگر، زمان صعود زمانی است که سیگنال برای تغییر حالت از مقدار مشخص پایین به مقدار مشخص بالا نیاز دارد. هدف از بهینه‌سازی، کاهش زمان صعود در کنترل‌کننده خواهد بود.
- Steady-State Error یا خطای حالت ماندگار به‌عنوان تفاوت بین مقدار مطلوب و مقدار واقعی یک خروجی سیستم در زمانی که به بی‌نهایت می‌رسد تعریف می‌شود (یعنی وقتی پاسخ سیستم کنترل به حالت ماندگار رسیده باشد). به‌طورکلی، یک سیستم کنترلی خوب، سیستمی است که حداقل خطای ماندگار را داشته باشد.
- Overshoot یا فراجهش به میزان حداکثر مقدار پاسخ پله، در نمودار پاسخ پله سیستم گفته می‌شود. فراجهش بالاترین نقطه منحنی پاسخ است و معمولاً به صورت درصد فاصله آن تا مقدار پاسخ حالت دائم(مقدار مورد نظر) سنجیده می‌شود. در بهینه‌سازی تلاش می‌شود تا فراجهش تا حد امکان کنترل شود چراکه با افزایش ناگهانی مقدار پاسخ پله، منجر به ناپایداری در سیستم کنترل‌کننده خواهد شد.
- پارامتر Settling-Time یا زمان نشست در کنترل‌کننده PID، زمان لازم برای اینکه دامنه نوسان پاسخ به درصد مشخصی (معمولاً ۲ یا ۵ درصد) از پاسخ دائمی محدود شود و دیگر از آن تجاوز نکند، گفته می‌شود. با بهینه‌سازی کنترل‌کننده، پیش‌بینی می‌شود که زمان نشست کاهش خواهد یافت چراکه در صورت بزرگ بودن مقدار زمان نشست، ناپایداری سیستم بیشتر خواهد بود.

با محاسبه‌ی این پارامترها برای تمامی استراتژی‌های بازی با استفاده از روابط (۴)، (۵) و (۶)، پیامد بازیگران بازی برای تمام استراتژی-های ممکن، محاسبه می‌گردد. پس از محاسبه پیامدها برای استراتژی‌های بازی، ماتریس پیامد بازی قابل تشکیل خواهد بود. با توجه به اینکه بازی مورد نظر دارای سه بازیگر طراحی شده است و هر بازیگر سه استراتژی قابل انتخاب خواهد داشت، ماتریس پیامد بازی شامل سه ماتریس با ابعاد ۳*۳ خواهد بود. در ادامه ماتریس پیامد بازی با مقادیر اولیه P=26.38، I=51.56 و D=3.374 و استراتژی‌های بیان‌شده، شرح داده شده است.

$$\begin{bmatrix} -66.0317, -66.0362, 67.9175 & -66.0843, -66.0883, 67.8103 & -66.1605, -66.1639, 67.6555 \\ -67.3506, -67.3560, 65.2808 & -67.4168, -67.4215, 65.1453 & -67.5005, -67.5015, 64.9633 \\ -69.0193, -69.023, 61.9335 & -69.1017, -69.1043, 61.764 & -69.1791, -69.18055, 61.6049 \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

$$\begin{bmatrix} -66.9904, -66.9927, 65.9863 & -67.0973, -67.0967, 65.761 & -67.2081, -67.2066, 65.5358 \\ -68.7222, -68.7282, 62.5337 & -68.8332, -68.8384, 62.3082 & -68.9712, -68.9755, 62.0283 \\ -71.1956, -71.1957, 57.5581 & -71.4813, -71.4877, 57.0128 & -71.6197, -71.6211, 56.7147 \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

$$\begin{bmatrix} -67.8137, -67.8207, 64.3504 & -67.9946, -68.0012, 63.9868 & -68.1683, -68.1707, 63.6228 \\ -69.9720, -69.9766, 60.0174 & -70.1857, -70.1892, 59.5857 & -70.4601, -70.4653, 59.0434 \\ -73.1283, -73.1360, 53.7072 & -73.4797, -73.4851, 52.9952 & -73.8977, -73.9070, 52.1746 \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

جدول ۴: مقایسه پارامترها برای ورودی و خروجی بازی

	استراتژی	P	I	D	زمان صعود (s)	زمان نشست (s)	خطای حالت ماندگار	فراجهش (%)
مقدار اولیه	S_{222}	۲۶/۳۸	۵۱/۵۶	۳/۳۷۴	۰/۰۱۳۱	۰/۴۲۸۰	۰/۰۰۲۸	۶۱/۸۷۳۷
خروجی نهائی پس از اعمال بازی	S_{111}	۳۶/۳۸	۶۱/۵۶	۵/۳۷۴	۰/۰۱۰۵	۰/۳۵۶۴	۰/۰۰۱۶	۶۷/۵۵۵۹

با تشکیل ماتریس پیامد بازی، این ماتریس به‌عنوان ورودی ابزار Gambit 16 جهت محاسبه نقطه تعادل نش بازی قرار خواهد گرفت. این ابزار، ماتریس پیامد بازی را دریافت می‌کند و استراتژی یا استراتژی‌های تعادل نش در بازی مورد نظر را به‌عنوان خروجی نمایش می‌دهد. با استفاده از این ابزار و در نظر گرفتن مقادیر محاسبه‌شده برای بازی، نقطه تعادل نش برای بازی طراحی‌شده، استراتژی S_{111} معین می‌گردد. در جدول ۴، مقایسه‌ای بین مقادیر ورودی و خروجی بازی و همچنین مقایسه پارامترهای مربوطه انجام شده است. با بررسی جدول ۴ مشخص خواهد شد پارامترهای کنترل‌کننده PID با استفاده از نظریه بازی‌ها بهبود می‌یابند و در عمل، کنترل‌کننده در زمان کمتری پاسخ خواهد داد و عملکرد بهتری نسبت به مقدار اولیه دارد. روش پیشنهادی در این تحقیق، با در نظر گرفتن بهترین میزان افزایش و کاهش برای هر یک از ورودی‌های کنترل‌کننده و ایجاد یک بازی بین ورودی‌های کنترل‌کننده، منجر به انتخاب بهترین مقادیر برای این ورودی‌های می‌گردد و در نتیجه کنترل‌کننده با ضرایب بهبودیافته عملکرد بهتری خواهد داشت. در جدول ۶ مقایسه پارامترهای کنترلی کنترل‌کننده در مقاله‌ی Saraeian و همکاران [۵] و روش پیشنهادی این تحقیق نشان داده شده است.

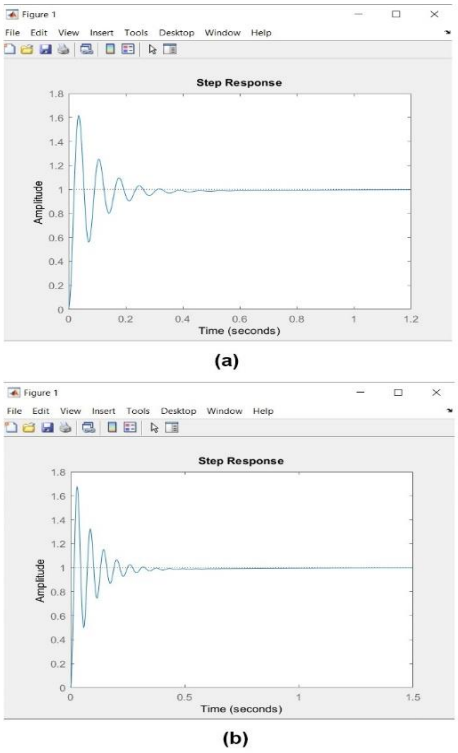
جدول ۵: مقایسه پارامترهای کنترل‌کننده برای این تحقیق و مقاله‌ی [۵]

	زمان صعود (s)	زمان نشست (s)	خطای حالت ماندگار	فراجهش (%)
Saraeian و همکاران [۵]	۰/۰۵۷	۰/۴۴۰	-	۳۰
خروجی بازی	۰/۰۱۰۵	۰/۳۵۶۴	۰/۰۰۱۶	۶۷/۵۵۵۹

بررسی جدول ۵ بهبود پارامترهای کنترل‌کننده در روش پیشنهادی نسبت به روش انتخاب‌شده در مقاله‌ی Saraeian و همکاران [۵] را به‌وضوح مشخص می‌نماید. بهبود پارامترهای کنترلی به‌دلیل تنظیم ورودی‌های کنترل‌کننده در بهترین شرایط ممکن توسط نظریه بازی‌ها پیش‌بینی می‌شود. چراکه در نظریه بازی‌ها، خروجی بازی یا تعادل نش، موقعیتی است که برای تمام بازیگران بهترین حالت ممکن به‌وقوع بپیوندد و هیچ‌یک از بازیگران تمایلی به خروج از تعادل مورد نظر نداشته باشند. بر اساس جدول ۶، مقدار زمان صعود از ۰/۰۵۷ به ۰/۰۱۰۵ کاهش یافته است. کاهش این مقدار به این معنی است که زمان افزایش مقدار در نمودار پاسخ پله کنترل‌کننده از ۱۰درصد به ۹۰درصد مقدار مورد نظر، کاهش یافته است یا به عبارتی کنترل‌کننده در زمان کمتری پاسخ داده است. مقدار زمان نشست از ۰/۴۴۰ به ۰/۳۵۶۴ کاهش یافته است و کاهش این مقدار به‌معنی کاهش زمان لازم برای کنترل‌کننده به‌منظور رسیدن به مقداری نزدیک به مقدار قابل انتظار، خواهد بود. مقدار خطای حالت ماندگار از ۰/۰۰۲۸ به ۰/۰۰۱۶ کاهش یافته است و کاهش این مقدار بیانگر آن است که میزان خطای ماندگار کنترل‌کننده که به‌صورت متناوب در حوالی مقدار نهایی مورد نظر ایجاد می‌گردد کاهش یافته است و در واقع کنترل‌کننده دقت بیشتری در ثابت نگه‌داشتن خروجی خواهد داشت. مقدار فراجهش از ۶۱/۸۷۳۷ به مقدار ۶۷/۵۵۵۹ افزایش یافته است که این به معنی افزایش مقدار فراجهش در کنترل‌کننده است. به بیان دیگر مقدار خطا در لحظه اول کنترل‌کننده افزایش یافته است. در شکل ۴، تصویر (a) مربوط به ورودی کنترل‌کننده و تصویر (b) نمودار پاسخ پله برای خروجی بازی است.

به‌منظور ارزیابی کارایی کنترل‌کننده مورد نظر، عناصری مانند پالت ها، جعبه‌ها، اقلام دارای چرخ برای جابجایی کالاها و ... که برای نقل و انتقال کالاها به‌کار می‌روند و قابل برگشت نیز می‌باشند، در زنجیره تامین حلقه بسته خودکار در نظر گرفته شده‌اند. این اقلام معمولا براساس اندازه، وزن، کاربرد و مواد سازنده طبقه‌بندی می‌شوند و تولیدکنندگان با هدف جلوگیری از خرید مواد جدید، به دفعات از این اقلام جهت نقل و انتقال کالاها استفاده می‌نمایند. از آنجایی که نرخ بازگشت آن‌ها مشخص نیست و یا درصد قابل تعمیر بودن این اقلام قابل پیش‌بینی نیست، بنابراین می‌توان وجود عوامل غیرقطعی متعددی را در آن‌ها محتمل دانست. به‌منظور شبیه‌سازی کنترل‌کننده مورد نظر، پارامترهای کنترلی برای اقلام قابل برگشت در نقل و انتقال کالاها، به‌صورت مدت زمان بین خرید اقلام جدید و اقلام موجود، تعداد تعمیرات و تعداد بازرسی‌ها در هر سیکل تعریف می‌گردند.

همچنین همان‌گونه که ذکر شد، نرخ بازگشت این اقلام و درصد قابل تعمیر بودن آن‌ها نیز، جزو عوامل غیرقطعی تلقی می‌گردند. بنابراین، فعالیت‌های مختلفی توسط کنترل‌کننده پیشنهادی، تحت کنترل قرار گرفته که در ادامه به نتایج عملکرد مدل پیشنهادی اشاره شده است.



شکل ۴: مقایسه نمودار پاسخ پله برای مقدار ورودی و خروجی بازی

به‌طورکلی ارزیابی کارایی کنترل‌کننده پیشنهاد شده شامل مقایسه عملکرد واقعی آن با استانداردها و اهدافی که می‌تواند براساس نیازهای سازمانی، تقاضای مشتریان، قوانین موجود و ... در نظر گرفته شوند در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور بررسی کارایی کنترل-کننده، مفهومی تحت عنوان ثبات سیستم، مطرح می‌گردد. ثبات سیستم به این مفهوم است که میزان تفاوت‌های وضعیت زنجیره تامین حلقه بسته خودکار، باید قبل و بعد از بهینه‌سازی در حداقل ممکن باشد. با توضیحات ارائه‌شده، میزان کارایی کنترل‌کننده براساس استانداردهای آماری قابل ارزیابی خواهد بود. این استانداردهای آماری شامل خطای مطلق انتگرال، خطای مجذور انتگرال، خطای مطلق وزن‌دار انتگرال و انتگرال خطای مربعات با مقیاس زمانی می‌شوند. در یک کنترل‌کننده کارآمد، هدف، بهبود پاسخ کنترل‌کننده، با حداقل ساختن خطای بین ورودی و پاسخ است. روابط ریاضی محاسبه استانداردهای ذکر شده، در ذیل قرار داده شده است [۵]:

$$IAE = \int_0^{t_{ss}} |e(t)| dt \quad (۱۳)$$

$$ISE = \int_0^{t_{ss}} e^2(t) dt \quad (۱۴)$$

$$ITAE = \int_0^{t_{ss}} t|e(t)| dt \quad (۱۵)$$

$$ITSE = \int_0^{t_{ss}} te^2(t) dt \quad (۱۶)$$

در روابط ذکر شده، t_{ss} زمانی است که پاسخ کنترل‌کننده به حالت پایدار رسیده است. در ادامه مقادیر این استانداردها برای حالت عادی و پاسخ کنترل‌کننده محاسبه و در جدول ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۶: ارزیابی کنترل‌کننده بر اساس استانداردهای آماری

	P	I	D	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Saraeian و همکاران [۵]	۵۱/۷۶	۰/۰۰۰۸	۹۲/۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲
این تحقیق	۲۶/۳۸	۵۱/۵۶	۳/۳۷۴	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۰۸

با توجه به در نظر داشتن عوامل غیرقطعی که قبلا به آن‌ها اشاره گردید، علاوه بر نتایج ذکر شده، نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده پیشنهادی در زنجیره تامین حلقه بسته خودکار در حضور عوامل غیرقطعی از جمله نرخ بازگشت و قابل تعمیر بودن اقلام قابل برگشت در نقل و انتقال کالاها که پیشتر به آن‌ها اشاره شد، نیز بررسی گردیده است. جدول ۷، نتایج این شبیه‌سازی را نمایش می-دهد.

جدول ۷: نتایج اعمال عوامل غیرقطعی بر کنترل‌کننده

	P	I	D	Cost	Profit ($)
Saraeian و همکاران [۵]	۵۱/۷۶	۰/۰۰۰۸	۹۲/۰۰۵	۲۸/۸۷۳	۴۰۴۰۰
این تحقیق	۲۶/۳۸	۵۱/۵۶	۳/۳۷۴	۱۹/۵۳	۶۳۱۳۴

۵- نتیجه‌گیری

زنجیره‌های تامین (شامل جریان ارسال محصول از تولیدکننده به مصرف‌کننده)، از جمله مباحث مهم در تمامی شاخه‌های صنعت می‌باشند. امروزه زنجیره‌های تامین حلقه بسته (شامل جریان ارسال محصول از تولیدکننده به مصرف‌کننده و جریان بازگشت محصول استفاده‌شده یا منقضی‌شده از مصرف‌کننده به تولیدکننده به‌صورت خودکار) در جهت افزایش رضایت مشتری، کاهش مصرف منابع اولیه خام، کاهش پسماندهای تولید، مدیریت استفاده از منابع طبیعی، بهبود تولید و افزایش سودآوری از طریق استفاده مجدد از محصولات استفاده‌شده، کمک خواهند نمود. به‌این‌ترتیب، زنجیره-های تامین حلقه بسته در مقابل زنجیره‌های تامین می‌توانند در جهت سودآوری بیشتر به کسب و کارها کمک فراوانی نمایند و به-همین‌دلیل در این مقاله بر روی این نوع از زنجیره‌های تامین تمرکز شده است.

همانگونه که در ابتدای مقاله نیز اشاره گردید، یکی از کاربردهای یکپارچه‌سازی صنایع با تکنولوژی‌های هوشمند و به دنبال آن پدید آمدن کارخانه‌های هوشمند، توسعه و پیاده‌سازی زنجیره‌های تامین هوشمند می‌باشد. به‌این‌ترتیب، تلفیق زنجیره‌های تامین حلقه بسته در کارخانه‌های هوشمند، چالش‌های مختلفی نظیر چالش‌های مرتبط با خرابی‌های درگیر در زنجیره تامین و یا کارخانه (نظیر پیچیدگی جریان‌های مستقیم و معکوس) را سبب می‌شود که مستلزم کنترل و مدیریت هوشمندانه می‌باشد. از طرفی به‌منظور ایجاد یک زنجیره تامین حلقه بسته در شرایط پایداری و حرکت به‌سوی تعریف و ایجاد زنجیره‌های تامین حلقه بسته سبز در جهت کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و بهبود اثرات زیست‌محیطی (کاهش تخریب محیط زیست) وجود سیستم نظارتی و کنترلی هوشمند در جهت کنترل زنجیره‌ها لازم و ضروری است.

به‌دلیل آنکه بحث بهینه‌سازی فرآیندهای مدیریتی در کارخانه‌های هوشمند همچنان یک چالش می‌باشد، پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام گرفته است و راهکارهای محاسباتی و منطقی بسیاری برای بهبود کارائی پیشنهاد گردیده‌اند. در این مقاله با توجه به اهمیت فراوان زنجیره‌های تامین حلقه بسته که پیشتر نیز به آن‌ها اشاره گردید، با در نظر گرفتن خرابی‌ها و عوامل غیرقطعی مختلف ناشی از تلفیق این نوع از زنجیره‌ها در کارخانه‌های هوشمند، از یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرال-مشتقی با قابلیت تنظیم خودکار به‌کمک نظریه‌بازی‌ها به‌عنوان یک چهارچوب تصمیم‌گیر تعاملی استفاده گردیده است. به‌این‌ترتیب، مدیریت این زنجیره‌ها به‌کمک کنترل هوشمندانه و پویا از سوی کنترل‌کننده پیشنهادی انجام می‌گیرد.

پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در حوزه اقلام قابل برگشت در نقل و انتقال کالاها با در نظر گرفتن دو عامل غیرقطعی فاکتورهای نرخ بازگشت و قابل تعمیر بودن اقلام قابل برگشت، صورت پذیرفته است. نتایج پیاده‌سازی مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که این کنترل‌کننده با استفاده از نظریه بازی‌ها به‌عنوان یک چهارچوب تصمیم‌گیر تعاملی، قابلیت تنظیم خودکار ورودی‌های خود را در شرایط غیرقطعی مختلف داشته و در شرایط پیاده‌سازی، کاهش مقدار تابع هزینه و افزایش تابع سود را نتیجه می‌دهد. در این حالت، کنترل کننده پیشنهادی می‌تواند به مدیریت و کنترل هوشمند زنجیره‌های تامین حلقه بسته بپردازد که کارائی و دقت آن در نتایج به‌دست‌آمده قابل مشاهده است.

روش پیشنهادی در این مقاله، در دنیای واقعی و در انواع صنایع، دارای کاربرد می‌باشد. به‌عنوان نمونه، زنجیره تامین حلقه بسته مرتبط با کارخانه تولید خوراک آماده دام، شامل کِشت نهاده‌ی مورد نیاز تولید خوراک در مزارع، ارسال نهاده به کارخانه، تولید خوراک به‌همراه مواد شیمیایی افزودنی و مصرف در دامداری‌ها می‌باشد که به‌عنوان جریان مستقیم در زنجیره در نظر گرفته می‌شود. در جریان معکوس این زنجیره، شرایطی در نظر گرفته شده است که فضولات حیوانی حاصل از مصرف خوراک در دامداری‌ها به‌عنوان کود در مزارع کِشت نهاده مورد استفاده قرار گیرد. در این زنجیره، بار میکروبی شیر دامداری بایستی به‌صورت مداوم کنترل گردد تا مطابق با استاندارد بسیاری از کشورها مقداری برابر ۱۰۰۰۰۰میکروارگانیسم در هر میلی‌لیتر داشته باشد. این مقدار به‌عنوان مقداری مجاز که بایستی کنترل گردد، در کنترل‌کننده تنظیم شده و مقدار لحظه‌ای آن، به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود. به‌این‌ترتیب، کنترل‌کننده با محاسبه اختلاف مقدار لحظه‌ای و مقدار مجاز (میزان خطا)، در جهت به صفر رساندن این اختلاف و رسیدن مقدار لحظه‌ای به مقدار مجاز تلاش می‌نماید. لازم به ذکر است روش پیشنهادی می‌تواند به‌خوبی در زمینه مدیریت و کنترل زنجیره‌های تامین (شامل جریان ارسال محصول از تولیدکننده به مصرف‌کننده) به غیر از زنجیره‌های تامین حلقه بسته نیز به‌کار گرفته شود. به‌عنوان مثال زنجیره‌های تامین در صنعت کالاهای لوکس به‌دلیل پیچیدگی بیش از حد در فرآیند، به مدیریت و کنترل دقیق نیاز دارند. در این زنجیره‌ها ممکن است مواد خام در یک کشور تولید شوند و برای پردازش به کشورهای دیگری انتقال داده شوند و یا حتی بسته‌بندی و فروش آن‌ها مجدد در کشور دیگری انجام شود که به‌کارگیری این کنترل‌کننده می‌تواند فرآیند درگیر در این زنجیره را با دقت مناسب کنترل و بهینه سازی نماید. در این زنجیره‌ها، عیار جواهرات می‌تواند به‌عنوان یک عامل کنترل-شونده در نظر گرفته شود. عیار مجاز فلز نقره در صنعت جواهرات با حداقل مقدار برابر ۷۵۰ مطرح می‌گردد. این مقدار به‌عنوان مقدار مجاز در کنترل‌کننده پیشنهادی قابل تنظیم است و در فرآیند تولید جواهرات، کنترل‌کننده از اختلاف مقدار لحظه‌ای عیار و مقدار مجاز در جهت بهینه‌نمودن استفاده می‌نماید تا مقدار عیار در زنجیره را در حد مجاز قرار دهد. در واقع پیشتر نیز ذکر گردید که کنترل‌کننده پیشنهادی سعی در رساندن اختلاف بین مقدار لحظه‌ای و مقدار مجاز تنظیم شده به عدد صفر خواهد داشت.

با در نظر گرفتن روش پیشنهادی در این تحقیق، کارهای آتی در این زمینه می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- طراحی رابط گرافیکی و تولید نسخه اجرایی با استفاده از استانداردهای ساخت نرم افزار جهت پیاده‌سازی عملی در صنعت،
- بررسی کارائی کنترل کننده پیشنهادی در جهت محافظت از زنجیره‌های تامین حلقه بسته در مقابل حملات سایبری (نظارت بر عملکرد زنجیره تامین، کنترل و مدیریت آن برای تشخیص سریع تهدیدات احتمالی در مسیر زنجیره تامین).

مراجع

[1] G. Büchi, M. Cugno and R. Castagnoli, "Smart factory performance and Industry 4.0," Technological Forecasting & Social Change, 2019.

[2] I. Jamai, L. B. Azzouz and L. A. Saïdane, "Security issues in Industry 4.0," IEEE, 2020.

[3] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee and B. Yin, "Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges," IEEE, pp. 6505 - 6519, 2017.

[4] M. Reimann, X. Y. and Z. , "Managing a closed-loop supply chain with process innovation for remanufacturing," European Journal of Operational Research, 2019.

[5] S. Saraeian, B. Shirazi and H. Motameni, "Adaptive control of criticality infrastructure in automatic closed-loop supply chain considering uncertainty," International Journal of Critical Infrastructure Protection, pp. 102-124, 2019.

[6] M. Abdel-Basset, G. Manogaran and M. Mohamed, "Internet of Things (IoT) and its impact on supply chain: A framework for building smart, secure and efficient systems," Future Generation Computer Systems, pp. 614-628, 2018.

[7] A. Samadi, M. Hajiaghaei-Keshteli and R. Tavakkoli-Moghaddam, "Solving a Discounted Closed-Loop Supply Chain Network Design Problem by Recent Metaheuristics," in Fuzzy Information and Engineering-2019, 2020.

[8] Y. Yun, A. Chuluunsukh and M. Gen, "Sustainable Closed-Loop Supply Chain Design Problem: A Hybrid Genetic Algorithm Approach," Mathematics, 2020.

[9] F. Ahmad, A. Yusuf Adhami and F. Smarandache, "Modified neutrosophic fuzzy optimization model for optimal closed-loop supply chain management under uncertainty," Optimization Theory Based on Neutrosophic and Plithogenic Sets, pp. 343-403, 2020.

[10] A. Garai and T. K. Roy, "Multi-objective optimization of cost-effective and customer-centric closed-loop supply chain management model in T-environment," Soft Computing, p. pages155–178, 2020.

[11] Y. Jabarzadeh, H. Reyhani Yamchi. V. Kumar and N. Ghaffarinasab, "A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network," Management of Environmental Quality, 2020.

[12] S. Jeschke, C. Brecher, T. Meisen, D. Özdemir and T. Eschert, "Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems," Industrial Internet of Things, 2016.

[13] Ki Jung Yi, Young-Sik Jeong, "Smart factory: security issues, challenges, and solutions," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2022.

[14] Y. K. Lee, J. Lee, S.-J. Lee and D. Yoon, "Data Stream Management for Distributed Devices in Smart Factory," IEEE, 2020.

[15] R. Huo, Sh. Zeng, Zh. Wang, J. Shang, W. Chen and T. Huang, "A Comprehensive Survey on Blockchain in Industrial Internet of Things: Motivations, Research Progresses, and Future Challenges," IEEE, vol. 24, no. 1, First Quarter, 2022.

[16] A. Corallo, M. Lazoi, M. Lezzi and A. Luperto, "Cybersecurity awareness in the context of the Industrial Internet of Things: A systematic literature review," Computers in Industry, 2022.

[17] Sh. Tang, L. Chen, K. He, J. Xia, L. Fan, and A. Nallanathan, "Computational Intelligence and Deep Learning for Next-Generation Edge-Enabled Industrial IoT," IEEE, 2022.

[18] Y.-C. Tsao, V.-T. Linh and J.-C. Lu, "Closed-loop supply chain network designs considering RFID adoption," Computers & Industrial Engineering, pp. 716-726, 2017.

[19] J. Guo, H. Yu and M. Gen, "Research on green closed-loop supply chain with the consideration of double subsidy in e-commerce environment," Computers & Industrial Engineering, 2020.

[20] L. Fu and F. Meng, "A human disease transmission inspired dynamic model for closed-loop supply chain management," Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020.

[21] M. Mishra, S. K. Hota, S. K. Ghosh and B. Sarkar, "Controlling Waste and Carbon Emission for a Sustainable Closed-Loop Supply Chain Management under a Cap-and-Trade Strategy," Mathematics, 2020.

[22] L. Nunes, T. Causer and D. Ciolkosz, "Biomass for energy: A review on supply chain management models," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020.

[23] B. Shen, S. Minner, H.-L. Chan and A. Brun, "Logistics and supply chain management in the luxury industry," Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020.

[24] S. Lahane, R. Kant and R. Shankar, "Circular supply chain management: A state-of-art review and future opportunities," Journal of Cleaner Production, 2020.

[25] S. F. Wamba and M. M. Queiroz, "Blockchain in the operations and supply chain management: Benefits, challenges and future research opportunities," International Journal of Information Management, 2020.

[26] J. Kim, B. D. Chung, Y. Kang and B. Jeong, "Robust optimization model for closed-loop supply chain planning under reverse logistics flow and demand uncertainty," Journal of Cleaner Production, vol. 196, pp. 1314-1328, 2018.

[27] S. Dinparast and S. A. H. Golpaygani, "A new model for selecting information flow pattern in build-to-order supply chains," Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT), vol. 8, no. 2, pp. 27-43, 2019.

[28] B. K. Seresti, M. Shakeri and P. Nikbakht, "A Dynamic Distribution Model in Cold Supply Chains Using Ant Colony Optimization," Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT), vol. 8, no. 4, pp. 44-58, 2019.

[29] Y. Guo, Q. Shi, Ch. Guo, J. Li, Z. You, Y. Wang, "Designing a sustainable-remanufacturing closed-loop supply chain under hybrid uncertainty: Cross-efficiency sorting multi-objective optimization," Computers & Industrial Engineering, 2022.

[30] D. Ma, H. Qin and J. Hu, "Achieving triple sustainability in closed-loop supply chain: The optimal combination of online platform sales format and blockchain-enabled recycling," Computers & Industrial Engineering, 2022.

[31] E. Haghi, H. Shamsi, S. Dimitrov, M. Fowler and K. Raahemifar, "Assessing the potential of fuel cell-powered and battery-powered forklifts for reducing GHG emissions using clean surplus power; a game theory approach," International Journal of Hydrogen Energy, pp. 34532-34544, 2020.

[32] C. Groba, A. Sartal and G. Bergantiño, "Optimization of tuna fishing logistic routes through information sharing policies: A game theory-based approach," Marine Policy, 2020.

[33] S. P. Toufighi, M. Mehregan and A. Jafarnejad, "Optimization of Iran's Production in Forouzan Common Oil Filed based on Game Theory," Mathematics Interdisciplinary Research, 2020.

[34] K. Muthumanickam and E. Ilavarasan, "Optimization of rootkit revealing system resources – A game theoretic approach," Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, pp. 386-392, 2015.

[35] B. O. SimonBiaou, A. O. Oluwatope, H. O. Odukoya, A. Babalola, O. E. Ojo and E. H. Sossou, "Ayo game approach to mitigate free riding in peer-to-peer networks," Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 2020.

[36] R. Casado-Vara, F. Prieto-Castrillo and J. M. Corchado, "A game theory approach for cooperative control to improve data quality and

false data detection in WSN," International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 28, no. 16, pp. 5087-5102, 2018.

[37] X. Álvarez, M. Gómez-Rúa and J. Vidal-Puga, "River flooding risk prevention: A cooperative game theory approach," Journal of Environmental Management, vol. 248, 2019.

[38] T. Hiller, "Structure of teams—A cooperative game theory approach," Managerial and Decision Economics, vol. 40, no. 5, pp. 520-525, 2019.

[39] M. Amer, Ch. Tsotskas, M. Hawes, P. Franco, L. Mihaylova, "A game theory approach for congestion control in vehicular ad hoc networks," 2017 Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications (SDF), pp. 1-6, 2017.

[40] S. Hosseini and R. Vakili, "Game theory approach for detecting vulnerable data centers in cloud computing network," International Journal of Communication Systems, vol. 32, no. 8, 2019.

پاورقی‌ها:

[1] Closed-Loop Supply Chains
[2] Game Theory
[3] Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller
[4] Nash Equilibrium
[5] Smart Factories
[6] Metaheuristic Methods
[7] Genetic Algorithm
[8] Fuzzy Optimization
[9] Multi-Objective Optimization Methods
[10] Mixed Integer Linear Programming
[11] Computer-Integrated Manufacturing
[12] Information Technology (IT)
[13] Operational Technology (OT)
[14] Deep Learning (DL)
[15] Blockchain Technology
[16] Online Platform
[17] Quality of Service (QoS)
[18] Rise Time
[19] Steady-State Error
[20] Settling Time
[21] Overshoot