Journal of Mineral Resources Engineering, 9(4): 39-59, (2024)

Imam Khomeini International University
Vol. 9, No. 4, Winter 2024

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

The Evolutionary Tripartite Game of the Government, Mine Management, and Miners in Ensuring the Safety of Mines

Fazli Allah Abadi A.[1], Ataee-pour M.[2*]

1- M.Sc Student, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 09 Apr. 2023 **Accepted: 30 Oct. 2023**

Abstract: In order to investigate the relationship between the management and executive components of the mine and to improve the safety level of the system, this paper introduces a new method for evaluating and managing the safety of the mining system. For this purpose, game theory has been used to solve mining safety issues. Game theory is a structured tool that can examine interactions between two or more players to understand their actions in certain situations. In this paper, evolutionary game is used because of expressing the dynamics of relationships between players. The introduced model simulates the interactions between the government, managers, and miners under different conditions; also,the influence of regulatory factors on them in the system is evaluated. The results show that the effect of each factor on system safety is different and players affect the system safety according to each regulatory factor. Among these factors, the influence of punishments applied by game supervisors on the behavior of the mine management and mine workers was the greatest. So that with the increase of fines, the players adopted strategies aligned with safe production in a short time. Subsequently, the impact of government incentives was also investigated and it was determined that in exchange for increasing the reward factor to the management and mine workers, a change in strategy and safe production will be established in the mine.

Keywords: Evolutionary game theory, Triparitite game, Mine management, Safety issues.

How to cite this article
Fazli Allah Abadi, A., and Ataee-pour, M. (2024). *"The evolutionary tripartite game of the government, mine management, and miners in ensuring the safety of mines"*. Journal of Mineral Resources Engineering, 9(4): 39-59.
DOI: 10.30479/JMRE.2023.18489.1630

*Corresponding Author Email: *map60@aut.ac.ir*

COPYRIGHTS
©2024 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.
This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCTION

Safety within the mining industry is of utmost importance, demanding meticulous attention and effective management. Given the inherent high risks associated with mining activities, ensuring the well-being of workers and the provision of secure working environments are imperative. Safety incidents in mining operations persist as critical concerns [1]. The extensive nature of mining activities necessitates a comprehensive focus on safety and environmental considerations to attain desired objectives. The establishment of robust safety standards is intrinsically linked to the motivation and awareness of those engaged in mining operations [2]. Factors such as the absence of continuous supervision by supervisors, workers' indifference to safety protocols, and the inherent hazards of mining significantly contribute to accidents within mines [3]. In response to these challenges, this paper delves into the interplay between supervisory and executive components within the mining industry and introduces a novel approach aimed at elevating safety standards within mining systems. To enhance and sustain safety in mining operations, it is imperative to implement appropriate strategies and management approaches. This entails creating a communicative bridge between managerial and executive elements to heighten worker awareness regarding safety, deploying advanced equipment and technologies and fostering a culture of safety compliance within the mining milieu [4].

Diverse factors wield influence over mining safety, encompassing government regulations, financial incentives, safety transgressions, safety incidents, and the efficacy of safety management and supervision. A comprehensive examination of these elements and their impact on the behaviours and decisions of various stakeholders in safety management can facilitate the refinement and optimization of safety protocols in mining operations. Employing the potent analytical framework of evolutionary GT, this paper embarks on an exploration of the application of this theory in addressing safety concerns within the mining domain. By harnessing the power of game theory, the intricate interactions between the involved stakeholders can be scrutinized, especially under dynamic and specific conditions. The dynamic nature of this framework is underpinned by a dynamic synchronization approach, serving as a game-solving algorithm. Subsequently, this paper utilizes MATLAB software to investigate the influence of supervisory management parameters on the choices made by mine workers regarding compliance and non-compliance with safety protocols.

METHODS

Through the evolutionary GT, a dynamic feedback loop has been constructed to model interactions between the management and operational elements, aimed at enhancing the safety of mine workers and optimizing the managerial approach in mining operations. GT involves the mathematical modeling of outcomes in a strategic environment where individual success in decision-making is contingent on the choices made by others [5]. To formulate a game, certain assumptions regarding the game type, player strategies, and associated rewards and punishments must be established. In the context of evolutionary GT, the superiority of a strategy is determined by examining the changing frequencies of different strategies over a specified modeling period. This dynamic assessment can be carried out using a replicator dynamics model, which tracks how the prevalence of various strategies evolves within a population over time. Within the framework of the safety monitoring game in mining, the players are driven by the objective of maximizing their payoffs over the modeling period. As the model progresses through time, players monitor and assess the consequences of their chosen strategies, subsequently fine-tuning their strategies for future rounds. This dynamic adaptation allows players to strive for the ultimate goal of optimizing the mine safety. The game comprises three pivotal players: the government, mine management, and mine workers, each serving as the principal participants in the core game. The government assumes the role of overseeing safety regulations within the mine, while mine management is entrusted with the responsibility of ensuring safety at the mining site. Acting as external entities, the government and mine management are charged with the task of guaranteeing safety within the mining environment. The third player in the game is the mine workers, and all three players are driven by rational decision-making, with their strategic choices designed to maximize their respective outcomes. After specifying the game's parameters and making assumptions about the chosen strategies, players achieve various payoffs. In order to check the stability of the players, after determining the game payoff matrix, the achievement of each player can be determined with the probability of choosing each of the stated strategies. Using the function of each player's payoff, one can

understand how to choose a strategy during the duration of the model. Ultimately, utilizing the predefined data, the payoff functions for each of the three players are computed. This simulation serves as a valuable tool for comprehending how the regulatory parameters of the overseeing authority (as represented by the government) impact the behavior of operational players and how different strategies are selected over the course of the modeling period.

FINDINGS AND ARGUMENT

For a more in-depth analysis of the players' outcomes in the evolutionary game, considering constraints and dynamic equilibrium equations, this study employs MATLAB software for the simulation of the evolutionary game. Subsequently, to simulate the evolutionary game model effectively, the parameters influencing the players' achievements must be defined. As previously mentioned, the study aims at revealing the connection between players' strategies and their payoffs. To examine the players' behaviors, government punishments with various values were initially introduced into their achievements. Equal punishments for the supervisors in the game were simultaneously simulated at four values of 5, 10, 15, and 20.

To further investigate the evolutionary behaviour of the players, their equilibrium equations were analyzed in a time interval called "Time". This interval is divided into 100 time units for simulation purposes. At every time unit, the likelihood of selecting the government's strategy is determined by the value of F(x), while the mining management's choice is influenced by F(y), and miners' decisions are shaped by F(z). In the next analysis, the effect of government subsidies to achieve safety provision is discussed. The amount of government subsidy for the provision of equipment, which is determined by the parameter μ, varies between 0 and 1. The influence of punishments and subsidies on the evolutionary path of the safety game is shown in Figure 1.

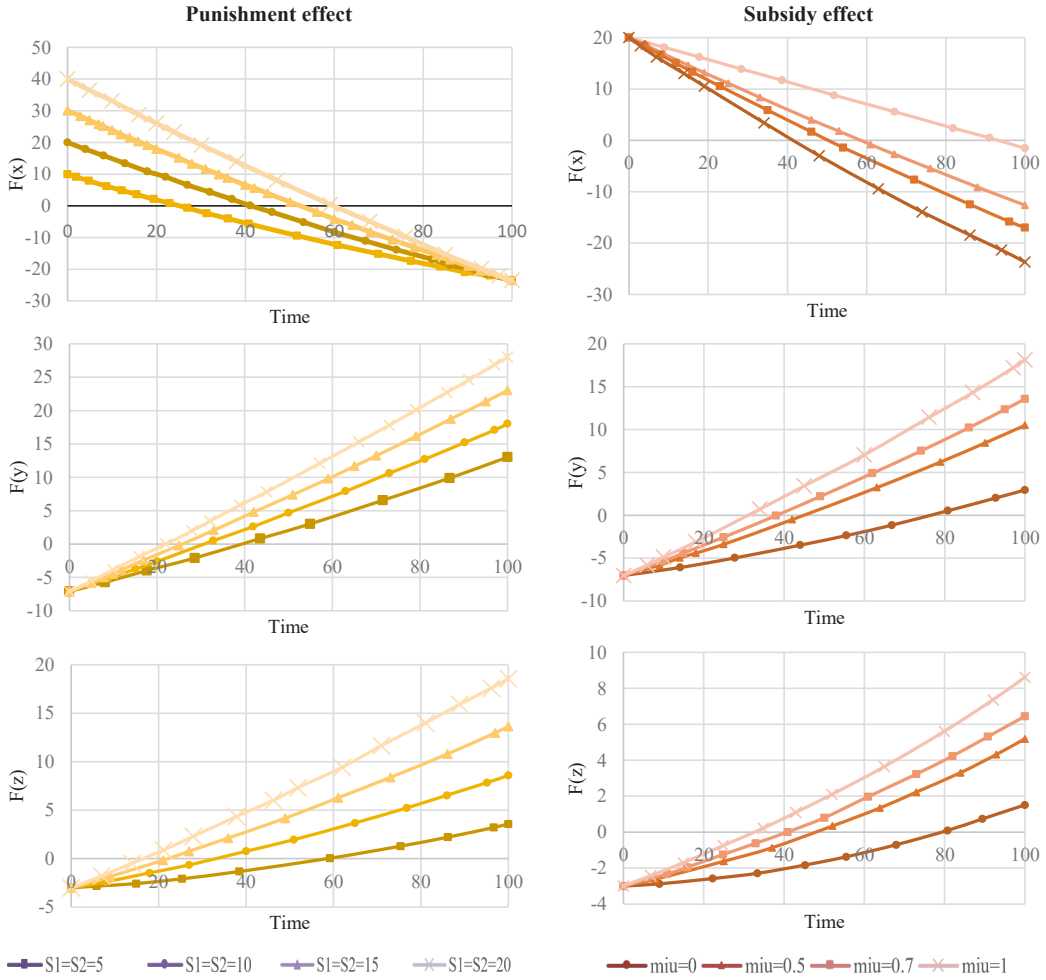


Figure 1. The effect of punishments and subsidies on players' strategy choices

The study investigated the impact of government punishment on the behaviour of three key players involved in the mining safety game, namely the government, mine management, and miners. Various punishment scenarios were examined and it was observed that the higher punishment increased the government's inclination toward the stricter regulation. The management's behaviour shifted from non-regulation to adopting safety measures as punishment were imposed, and miners tended to comply with safety regulations when subjected to higher punishment. In addition, the study explored the influence of government subsidies on safety equipment purchases. It was found that as the subsidy coefficient (μ) increased, the government quickly shifted towards non-regulation and non-support, reflecting rational decision-making to maximize their income. Overall, the study provided valuable insights into the dynamics of safety management in mining, highlighting the importance of regulatory measures and incentives in shaping the behaviour of the involved parties.

CONCLUSIONS

In the context of a three-player evolutionary game, the initial phase involved a comprehensive analysis of interactions and achievement functions for each participant within the mine safety system through the use of game tables. Subsequently, following the establishment of the three-player game model, the study delved into the evolutionary dynamics of the safety system under various regulatory scenarios. Based on the core premise, the government imposes punishment on executive participants, specifically miners and mine managers, in the event of their adoption of unsafe strategies. The simulation of the evolutionary game model revealed that the decision-making behaviours of these executive participants significantly influence the overall outcomes for the regulator. This interplay gives rise to conflicting interests within the game, ultimately resulting in a stable equilibrium at the coordinates (0, 1, 1). This equilibrium signifies that the government opts for a non-regulatory strategy, while mine managers and workers choose strategies involving the implementation of safety equipment and compliance with regulations, respectively. The application of punishment values was executed in a fixed and incrementally ascending fashion within the evolutionary model. This ascending trend induces a transformation in the strategies employed by the executive participants, directing them toward safety assurance strategies, and thereby swiftly curbing the incidence of unsafe practices within mines. Conversely, an escalation in the government subsidy rate proves highly effective in mitigating safety-related incidents in mining operations. Notably, when the government subsidy rate falls below 0.5, the motivating impact of utilizing safety equipment by the mine management and adhering to regulations by workers takes longer to manifest, compared to situations with a subsidy rate exceeding 0.5.

REFERENCES

[1] Li, J., Deng, C. C., Xu, J., Ma, Z., Shuai, P., and Zhang, L. (2023). *"Safety Risk Assessment and Management of Panzhihua Open Pit (OP)-Underground (UG) Iron Mine Based on AHP-FCE, Sichuan Province, China"*. Sustainability, 15(5): 4497. DOI: https://doi.org/10.3390/su15054497.

[2] Sherin, S., Raza, S., and Ahmad, I. (2023). *"Conceptual Framework for Hazards Management in the Surface Mining Industry—Application of Structural Equation Modeling"*. Safety, 9(2): 31. DOI: https://doi.org/10.3390/safety9020031.

[3] Kurniawan Nasution, D., Charloq, and Rujiman (2023). *"The influence of mining safety management system planning on the safety performance of pt. dairi prima mineral in dairi regency"*. International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation, 4(3): 957-60. DOI: http://dx.doi.org/10.54660/.ijmrge.2023.4.3.957-960.

[4] Nguembi, I. P., Yang, L., and Appiah, V. S. (2023). *"Safety and risk management of Chinese enterprises in Gabon's mining industry"*. Heliyon, 9(10): e20721.

[5] Nida-Rümelin, J. (2023). *"A theory of practical reason"*. Palgrave Macmillan Cham, 1st Ed., pp. 283. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17319-6.

نشریه مهندسی منابع معدنی، سال ۱۴۰۳، دوره نهم، شماره ۴، ص ۵۹-۳۹

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE)

دوره نهم، شماره ٤، زمستان ١٤٠٣، صفحه ٤٣ تا ٥٩
Vol. 9, No. 4, Winter 2024, pp. 43-59

علمی-پژوهشی

بازی تکاملی سه‌جانبه دولت، مدیریت و کارکنان معدن در تامین ایمنی معادن

امیر فضلی اله آبادی[۱]، مجید عطایی پور[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۸

چکیده

برای بررسی ارتباط میان اجزای نظارتی و اجرایی معدن و به منظور بهبود سطح ایمنی سیستم، این مقاله روش جدیدی را برای ارزیابی و مدیریت ایمنی سیستم معادن معرفی می‌کند. بدین منظور در این مقاله از کاربرد نظریه بازی‌ها برای حل مسایل ایمنی معادن استفاده شده است. نظریه بازی‌ها ابزار ساختاریافته‌ای است که تعاملات بین دو یا چند بازیکن را بررسی می‌کند تا اقدامات آن‌ها را در شرایط معین درک کند. در این مقاله از بازی تکاملی به دلیل بیان پویایی روابط میان بازیکنان، استفاده شده است. مدل معرفی شده تعاملات بین دولت، مدیران و معدنچیان را تحت شرایط مختلف شبیه‌سازی می‌کند و تأثیر عوامل نظارتی بر آن‌ها در سیستم ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تاثیر هر عامل بر ایمنی سیستم متفاوت است و بازیکنان، متناسب با هر عامل نظارتی بر ایمنی سیستم تاثیر می‌گذارند. از جمله این عوامل، تاثیرگذاری جریمه‌های اعمالی ناظر بازی بر رفتار مدیریت معدن و کارگران معدن در بیشترین میزان بود. به طوری که با افزایش جریمه‌ها، بازیکنان در زمان کوتاهی استراتژی‌های همسو با تولید ایمن را در پیش گرفتند. در ادامه تاثیر مشوق‌های دولتی نیز بررسی و مشخص شد که به ازای افزایش ضریب پاداش به مدیریت و کارگران معدن تغییر استراتژی و تولید ایمن در معدن برقرار خواهد شد.

کلمات کلیدی

نظریه بازی‌ها تکاملی، بازی سه‌جانبه، مدیریت معدن، مسایل ایمنی.

استناد به این مقاله

فضلی اله آبادی، ا.، عطایی پور، م.؛ ۱۴۰۳؛ "**بازی تکاملی سه‌جانبه دولت، مدیریت و کارکنان معدن در تامین ایمنی معادن**". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره نهم، شماره ۴، ص ۵۹-۳۹.

DOI: 10.30479/JMRE.2023.18489.1630

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: map60@aut.ac.ir

حق‌مؤلف © نویسندگان
ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

۱- مقدمه

ایمنی در صنعت معدن یکی از مسایل حائز اهمیت است که نیازمند توجه و مدیریت دقیق است. به دلیل خطرات بالایی که در فعالیت‌های معدنی وجود دارد، ایمنی کارکنان و تامین شرایط کار ایمن در معادن امری ضروری است. حوادث ایمنی معادن همچنان جزو مهم‌ترین نکات مورد بحث است. عملیات استخراج بیش از حد نیاز به بررسی ایمنی و محیط زیست گسترده برای دستیابی به چنین اهدافی دارد. استاندارد ایمنی بالا در بهره‌برداری، ناشی از انگیزه و آگاهی عملیات معدن است. عدم نظارت پیوسته ناظرین بر کارگران، کم توجهی کارگران به اصول ایمنی و خطرات معدنکاری از عوامل مهم در ایجاد حوادث در معادن است [۱]. با توجه به موارد بیان شده، مقاله حاضر به بررسی ارتباط بین اجزای نظارتی و اجرایی در صنعت معدن می‌پردازد و یک روش جدید برای بهبود سطح ایمنی سیستم معادن را معرفی می‌کند. در این مقاله، از کاربرد نظریه بازی‌های تکاملی[1] برای حل مسایل ایمنی معادن استفاده شده است. با کمک گرفتن از نظریه بازی‌ها می‌توان تعاملات بین بازیکنان را در شرایط معین و پویا بررسی و تحلیل کرد. به دلیل پویایی بازی، روش همسان‌ساز پویا[2] به عنوان الگوریتم حل بازی تعریف و در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار متلب[3]، تاثیر پارامترهای نظارتی مدیریت معدن، در انتخاب استراتژی پیروی و عدم پیروی توسط کارگران معدن بررسی شد.

۲- پیشینه پژوهش

برای بهبود و حفظ ایمنی در معادن، نیاز به رویکردها و استراتژی‌های مناسب در مدیریت و نظارت بر ایمنی وجود دارد که شامل ایجاد یک حلقه ارتباطی میان عوامل مدیریتی و عوامل اجرایی برای آگاهی کارکنان درباره ایمنی، استفاده از تجهیزات و فناوری‌های پیشرفته و ایجاد فرهنگ رعایت نکات ایمنی در محیط معدن است [۲]. عوامل مختلفی بر ایمنی معادن تاثیرگذار می‌گذارد. از جمله این عوامل می‌توان به قوانین و مقررات دولتی، تحریکات و تشویق‌های مالی، جرایم و حوادث ایمنی و همچنین نحوه مدیریت و نظارت بر ایمنی اشاره کرد [۳]. بررسی این عوامل و تاثیر آن‌ها بر رفتار و تصمیمات نهادهای مختلف در مدیریت ایمنی معادن، بهبود و بهینه‌سازی فرآیند ایمنی در معادن را تسهیل می‌کند [۴]. این رویکرد را می‌توان با استفاده از نظریه بازی‌های تکاملی به عنوان یک ابزار تحلیلی قدرتمند، درک و بررسی کرد. موضوع اکثر مطالعات صورت پذیرفته بر اهمیت مکانیزم‌های پاداش و مجازات در ترویج تولید ایمن و اجرای تدابیر ایمنی تاکید داشتند [۵]. یافته‌ها نشان داده است که تشدید پاداش و مجازات برای شرکت‌های معدنی و دولت‌های محلی به ترغیب اجرای تدابیر ایمنی منجر شده است. علاوه بر این، مشخص شده است که یک مکانیزم مناسب پاداش و جریمه، رفتار شرکت‌های معدنی را تغییر می‌دهد و احتمال تولید ایمن را بهبود می‌بخشد [۶]. در خصوص کاربرد نظریه بازی تکاملی، محققان به بررسی مسایل تولید ایمنی معادن و نحوه تاثیر رفتار شرکت‌های معدنی و ارگان‌های نظارتی بر فرآیند تکامل پرداختند. در خصوص اعمال پارامترهای نظارتی، مدل بازی تکاملی به عنوان اهرمی برای نظارت دولت در نظر گرفته شد و تاثیر مشوق‌ها و جرایم دولت بر سرمایه‌گذاری ایمنی معادن تجزیه و تحلیل گردید [۷]. در این راستا یک مدل بازی تکاملی چندطرفه برای تحلیل انتخاب استراتژی در مدیریت ایمنی معادن زغال سنگ و تاثیر نظارت و بازرسی دولت مورد بررسی قرار گرفت [۸]. در مقاله‌ای دیگر، از نظریه بازی‌های تکاملی برای توصیف تعاملات بین نهادهای مختلف در سیستم تولید ایمنی معادن در چین استفاده شد و با استفاده از شبیه‌سازی‌های پویا، پایداری معدن در خصوص پارامترهای مختلف نظارتی تجزیه و تحلیل و راه‌حل‌های تعادلی شناسایی گردید [۹]. نویسندگان مقاله، پویایی‌ها و استراتژی‌های نهادهای مختلف در مقابله با اهداف یکدیگر را تحلیل کردند. در بخش دیگری از مقالات، تاثیر نظارت دولتی، بر سرمایه‌گذاری در ایمنی معادن برجسته شد. در این تحقیقات تدابیری برای بهبود نظارت ایمنی مطرح و سیاست‌گذاری‌هایی برای رفع موانع ارایه گردید. بدین منظور در تحقیقی از یک مدل بازی تکاملی برای تحلیل رفتار کارگران معادن در نقض قوانین استفاده و پیشنهادهایی برای مدیریت چنین رفتارهایی در شرکت‌های معدنی ارایه شد [۱۰]. به طور خلاصه، این مقالات بر اهمیت پارامترهای اقتصادی، پارامترهای نظارتی و سیاست‌های جبرانی در تاثیرگذاری بر رفتار و ایمنی کارگران معادن تاکید کردند. در آخرین زمینه مورد بحث در رابطه با ایمنی معادن، محققان به بررسی تکامل پویا و ریسک‌های رفتاری کارگران معادن بر اساس نظریه بازی‌ها پرداختند. بررسی حاکی از آن بود که درآمد کارگران با ایمنی رفتار گروهی رابطه مثبتی داشت و این موضوع نشان داد که با افزایش سطح پاداش، سطح ایمنی گروهی بهبود یافت [۱۱]. شنگ[4] از نظریه بازی برای تحلیل رفتارهای

صورت پذیرفته کارگران در محیط معدن زغال سنگ استفاده و عواملی مانند هزینه بازرسی، شدت مجازات، از دست دادن حقوق و درجه محدودیت را به عنوان عوامل مهم برای مقابله با این رفتارها شناسایی کرد [۱۲]. این مقالات همچنین بر لزوم اتخاذ تدابیر موثر کنترلی برای تضمین سیاست‌های پایداری در نظارت ایمنی معادن تاکید کردند [۱۳]. بررسی این تحقیقات نشان داد که اقدامات متنوعی برای بهبود و بهینه‌سازی فرآیند ایمنی در معادن امکان‌پذیر است. بهره‌گیری از نظریه بازی‌های تکاملی به عنوان یک ابزار تحلیلی، این اهمیت را به وضوح نشان می‌دهد.

اگرچه تمامی این مطالعات به اهمیت و نقش ارتقای ایمنی در معادن اشاره دارند، اما هنوز نقش مدیریت معدن در تامین ایمنی معادن مورد بررسی قرار نگرفته است. درحالی که نقش مهم مدیران معدنی به عنوان تصمیم‌گیرندگان و همچنین تامین‌کننده تجهیزات ایمنی به عنوان یک راهکار عملی و موثر در ارتقای ایمنی معادن بسیار حیاتی است. این تحقیق سعی می‌کند با استفاده از رویکرد نظریه بازی تکاملی، تعاملات بین دولت، مدیران و معدنچیان را برای بهبود وضعیت ایمنی معادن مورد بررسی و تحلیل قرار دهد.

۳- نظریه بازی‌ها

نظریه بازی‌ها روشی است که در قرن بیستم و بیست و یکم میلادی برای بررسی تعاملات بین گروه‌ها، افراد یا بازیکنان توسعه یافت. نظریه بازی‌ها، شاخه‌ای از ریاضیات کاربردی است که در علوم اجتماعی و به ویژه در اقتصاد، زیست‌شناسی، مهندسی، علوم سیاسی و فلسفه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. نظریه بازی‌ها در تلاش است تا به وسیله ریاضیات، نتایج یک بازی که در آن موفقیت فرد در انتخاب کردن، وابسته به انتخاب دیگران است، برآورده کند [۱۵]. در یک بازی، با گروهی از بازیکن‌ها سروکار داریم که هر یک از بازیکنان تلاش می‌کنند دریافتی خود را به حداکثر برسانند، بنابراین هر بازیکن هنگام تصمیم‌گیری برای حرکت بهینه خویش باید کلیه واکنش‌های ممکن بازیکنان دیگر را نسبت به حرکت خود در نظر گیرد. وی حرکات بازیکنان دیگر را با قطعیت نمی‌داند، اما باید درباره حرکت خویش با نوعی توجیه معقول تصمیم‌گیری کند [۱۶].

نظریه بازی‌ها در مطالعه طیف گسترده‌ای از موضوعات کاربرد دارد. از جمله نحوه تعامل تصمیم‌گیرندگان در محیط رقابتی به شکلی که نتایج تصمیم هر عامل، موثر بر نتایج کسب شده سایر عوامل است. در واقع ساختار اصلی نظریه بازی‌ها در بیشتر تحلیل‌ها شامل جدولی چند بعدی است که در هر بعد مجموعه‌ای از گزینه‌ها قرار گرفته‌اند که در درایه‌های این جدول نتایج کسب شده برای عوامل در ازای ترکیب‌های مختلف از گزینه‌های مورد انتظار است [۱۷]. یکی از اصلی‌ترین شرایط به‌کارگیری این نظریه در تحلیل محیط‌های رقابتی است [۱۸]. برای ایجاد یک بازی، باید مفروضاتی در مورد نوع بازی، استراتژی‌های بازیکنان و همچنین پاداش و جریمه تصمیمات هر یک از طرفین ایجاد شود [۱۹].

۳-۱- مفاهیم و اصطلاحات

در ادامه برای آشنایی با نظریه بازی‌ها لازم است واژگان اصلی مورد استفاده تعریف شود. مهم‌ترین اصطلاحات مربوط به این روش در زیر آورده شده است [۲۲-۲۰]:

الف)بازیکنان: افرادی هستند که در یک بازی نسبت به تصمیم‌گیری و اتخاذ یک فرآیند اقدام می‌کنند و منافع آن‌ها در یک ارتباط متقابل با یکدیگر قرار دارند که ممکن است شامل افراد عادی، شرکت‌ها، گروه‌ها، دولت و نظایر آن باشد.

ب) استراتژی: استراتژی هر بازیکن عبارت از آن مجموعه رفتارها است که بازیکن می‌تواند از میان آن‌ها یکی را برای یکبار انتخاب کند. به عبارت دیگر استراتژی، انتخاب‌های موجود و پیش روی یک بازیکن در یک بازی است.

ج) دستاورد: مقدار برد یا باخت و آنچه در انتهای یک بازی عاید بازیکنان می‌شود با دستاورد بیان می‌شود. به عبارتی دستاورد میزان سود و زیان که بازیکن در بازی به دست می‌آورد را مشخص می‌کند.

د) عقلانیت: هدف نهایی هر یک از بازیکنان در بازی، رسیدن به بالاترین یا بهترین دستاورد ممکن است. اغلب در نظریه بازی‌ها فرض بر این است که افراد به خوبی توان محاسبه استراتژی و تبعیت از آن‌ها را دارند. این فرض اساسی عقلانیت نام دارد. به دنبال این هدف مدل باید از توان محاسبه استراتژی بازیکنان مطلع شود و بداند بازیکنان در چه حد قادرند در عمل از استراتژی‌های تبیین شده خود تبعیت کنند.

ه) قواعد بازی: فرض می‌شود که قوانین بازی را همه بازیکنان یک بازی می‌دانند. در نظریه بازی‌ها قاعده بازی شامل فهرست بازیکنان، استراتژی‌های هر بازیکن و دستاورد ترکیبی بازیکنان است و فرض رفتاری این است که هر بازیکن به طور

عقلانی درصدد بهینه‌سازی منافع خود است.

و) جدول بازی: در بازی‌های با دو بازیکن می‌توان دستاوردهای هر بازی را در قبال انتخاب استراتژی‌های متفاوت بازیکنان به صورت یک جدول نشان داد که دارای M سطر (مربوط به تعداد M استراتژی بازیکن اول) و N ستون (مربوط به تعداد N استراتژی بازیکن دوم) است. به چنین جدولی، جدول دستاورد یا ماتریس پرداخت (درآمد) بازی می‌گویند.

ح) تعادل: منظور از تعادل در نظریه بازی‌ها این است که هیچ بازیکنی تمایلی برای تغییر استراتژی خود به صورت یک جانبه ندارد و همچنین هیچ یک از بازیکنان در وضعیت تعادلی قادر به بهبود دستاوردهای دریافتی خود با تغییر استراتژی خود نیستند. مهم‌ترین مفهومی که در نظریه بازی‌ها به عنوان تعادل بیان می‌شود، تعادل نَش[۵] است.

تعادل نش یک روش مبتنی بر عقلانیت است که قبل از شروع بازی یک پیش‌بینی از پاسخ خروجی به بازیکنان می‌دهد. هر بازی ممکن است شامل صفر، یک و یا چند نقطه تعادل نَش باشد. برای پیدا کردن نقاط تعادلی نش باید تمامی سلول‌های جدول بازی بررسی شود [۲۳]. اثبات وجود تعادل نش در یک سلول به این معناست که تمامی بازیکنان بازی یک استراتژی دارند که از تعادل نش برخوردارند. اگر سلول‌های موجود در بازی با $a_1,a_2,\cdots,a_n$ نمایش داده شود، سلولی که در آن تعادل نش برقرار است با a^* نمایش داده می‌شود. همان‌طور که در رابطه ۱ نمایش داده شده است a^* سلولی است که تمامی بازیکنان موجود در بازی در آن شرکت داشتند و استراتژی a_n^* را بازی کردند (n شماره بازیکن است).

$$a^* = \{a_1^*, a_2^*, \cdots, a_n^*\} \quad (۱)$$

اگر سلول مربوط به بازیکن n اُم از مجموعه a^* خارج شود، a_{-n}^* حاصل می‌شود. در a_{-n}^* بازیکنان تعادل نش را دنبال نمی‌کنند. به صورت ریاضی a_{-n}^* را می‌توان مشابه رابطه ۲ نمایش داد.

$$a_{-n}^* = \{a_1^*, a_2^*, \cdots, a_{n-1}^*, a_{n+1}^*, \cdots, a_n^*\} \quad (۲)$$

به صورت تعریف ریاضی تعادل نش همانند رابطه ۳ بیان می‌شود.

$$u_n(a_n^*, a_{-n}^*) \geq u_n(a_n, a_{-n}^*) \quad (۳)$$

رابطه ۳ یعنی دستاوردی که نصیب بازیکن n اُم از بازی a^* می‌شود، بزرگتر و یا مساوی تمامی حالات موجود در بازی باشد (اگر بازیکنان دیگر نیز همان بازی a^* را بازی کنند). برای مثال تعادل نش در بازی دو نفره جدول ۱ بررسی می‌شود. در جدول زیر هر بازیکن دارای دو استراتژی است و در مجموع ۴ سلول وجود دارد. مقادیر دستاوردهای بازیکنان طبق فرض و عدد اول از سمت چپ در سلول نشان‌دهنده دستاورد بازیکن اول و عدد دوم در سلول نشان‌دهنده دستاورد بازیکن دوم است.

جدول ۱: جدول بازی

		بازیکن ۲	
	استراتژی بازیکن ۲ / استراتژی بازیکن ۱	استراتژی A (S_A)	استراتژی B (S_B)
بازیکن ۱	استراتژی A (S_A)	-۴ ، -۴	-۱ ، -۱۰
	استراتژی B (S_B)	-۱۰ ، -۱	-۲ ، -۲

در اولین مرحله سلول S_B- S_B بررسی می‌شود. برای اینکه سلول تعادل نش باشد ابتدا دستاورد یکی از دو بازیکن موجود در بازی بررسی می‌شود. برای این کار با چشم‌پوشی از دستاوردهای بازیکن دوم، دستاورد بازیکن اول در S_B با دستاورد خودش در S_A مقایسه می‌شود (برای بررسی دستاورد بازیکن اول، دستاوردهای بازیکن دوم ثابت نگه داشته می‌شود و بالعکس). طبق جدول ۱، دستاورد بازیکن اول در S_B برابر با ۲- و در S_A برابر با ۱- است، بنابراین در سلول S_B- S_B به دلیل انگیزه تخطی برای بازیکن اول، تعادل نشی وجود ندارد. نکته قابل توجه این است که اگر انگیزه تخطی برای یک بازیکن در سلولی دیده شود، نیازی به بررسی بازیکنان دیگر نیست. در مرحله دوم سلول S_B برای بازیکن اول و S_A برای بازیکن دوم بررسی می‌شود. در این سلول با ثابت نگه داشتن دستاوردهای بازیکن دوم در استراتژی A، دستاورد بازیکن اول در S_B برابر با ۱۰- و در S_A برابر با ۴- است، بنابراین در این سلول نیز انگیزه تخطی برای بازیکن اول وجود دارد.

در مرحله سوم سلول S_B برای بازیکن دوم و S_A برای بازیکن اول بررسی می‌شود. در این سلول با ثابت نگه داشتن دستاوردهای بازیکن دوم در استراتژی B، به دلیل بزرگتر بودن دستاورد در S_A برای بازیکن اول نسبت S_B، انگیزه تخطی برای بازیکن اول وجود ندارد (۱- >۲-). پس از برقراری تعادل نش برای بازیکن اول نوبت به بررسی تعادل بازیکن دوم می‌شود.

برای بررسی تعادل بازیکن دوم، بازیکن اول باید استراتژی ثابت S_A را بازی کند. در این مرحله دستاورد بازیکن دوم در S_B برابر با ۱۰- و در S_A برابر با ۴- است. پس در این سلول انگیزه تخطی برای بازیکن دوم وجود دارد. پس این سلول نیز تعادل نش نیست.

در مرحله آخر سلول S_A -S_A بررسی می‌شود. برای بررسی تعادل بازیکن اول، با ثابت نگه داشتن دستاوردهای بازیکن دوم در استراتژی (۱) مشخص می‌شود که انگیزه تخطی برای بازیکن اول وجود ندارد (۴- >۱۰-). در ادامه برای بررسی انگیزه تخطی در بازیکن دوم با ثابت نگه داشتن دستاوردهای بازیکن اول در استراتژی (۱) مشخص می‌شود که انگیزه تخطی برای بازیکن دوم نیز وجود ندارد (۴- >۱۰-). پس مشخص می‌شود که سلول S_A -S_A یک تعادل نش است [۲۴].

۳-۲- تقسیم‌بندی بازی‌ها

بازی‌ها را می‌توان از جهات مختلفی دسته‌بندی کرد. در یک دسته‌بندی جامع بر اساس ویژگی‌های مشترک، بازی‌ها به هشت منظر زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۴]:

۳-۲-۱- دستاوردها و نتیجه نهایی

بر اساس این طبقه‌بندی، بازی‌ها به دو نوع بازی مجموع صفر و مجموع غیرصفر تقسیم می‌شوند. در بازی‌های با جمع صفر سود دریافتی یک بازیکن دقیقا معادل زیان بازیکن دیگر است. برای مثال خرید یک کالا به صورت نقدی و یکجا با فرض وجود دو بازیکن (فروشنده و خریدار) به عنوان یک بازی مجموع صفر بیان می‌شود. در مقابل، در حالتی که تعداد گل‌های زده دو تیم فوتبال برابر باشد، تعداد امتیاز دریافتی طرفین برابر ۱ بوده و به عنوان یک بازی مجموع غیرصفر معرفی می‌شود.

۳-۲-۲- توافق یا عدم توافق بازیکنان

بر اساس این طبقه‌بندی، بازی‌ها به دو نوع بازی مشارکتی و غیرمشارکتی تقسیم می‌شوند. در بازی‌های مشارکتی بازیکنان با یکدیگر در تعامل هستند و می‌توانند با همدیگر تبانی کنند. بازی‌های غیر مشارکتی ساختاری از ارتباطات دارد که مبتنی بر رفتار هر بازیکن به صورت جداگانه است. برای مثال مدیریت و نظارت بر رفتار کارکنان یک بازی مشارکتی است، به این دلیل که ناظرین و شرکت‌کنندگان طبق قوانینی با یکدیگر به توافق می‌رسند ولی در مسایل بهره‌برداری از منابع مشترک، بازیکنان شرکت‌کننده در بازی به دنبال بیشینه‌سازی سود خود هستند. این نوع مسایل به دلیل تفاوت استراتژی‌ها و دستاورد (درآمد) به یک توافق همگانی بین بازیکنان منجر نمی‌شود و یک بازی غیرمشارکتی به حساب می‌آید.

۳-۲-۳- تقارن یا عدم تقارن اطلاعات بازیکنان

بر اساس این طبقه‌بندی، بازی‌ها به دو نوع بازی اطلاعات کامل و اطلاعات ناقص تقسیم می‌شوند. بازی با اطلاعات کامل بازی است که هر یک از بازیکنان هرگاه تصمیمی بگیرد، بر همه حرکت‌های پیشین که توسط سایر بازیکنان انجام شده است وقوف کامل دارد. برای مثال شطرنج یک بازی متوالی با اطلاعات کامل است، چرا که در هر مرحله از فرآیند تصمیم‌گیری، هر بازیکن از همه حرکت‌های قبلی که خود و رقیبش انجام داده‌اند، اطلاع دارند. اما اگر بازیکنان مجموعه‌ای از اطلاعات را بنا به دلایلی در اختیار نداشته باشند، آن را بازی با اطلاعات ناقص می‌نامند. پیشنهاد قیمت در مزایده نمونه‌ای از بازی اطلاعات ناقص است.

۳-۲-۴- همزمانی یا ناهمزمانی حرکت بازیکنان

بر اساس این طبقه‌بندی، بازی‌ها به دو نوع بازی ایستا و پویا تقسیم می‌شوند. در بازی‌های ایستا، حرکات بازیکنان همزمان است و همه بازیکنان در یک زمان تصمیم‌گیری می‌کنند (مانند بازی فوتبال یا شرکت در یک مناقصه یا مزایده‌ای که پیشنهادها از طریق بازکردن پاکت‌های مهر و موم شده در یک زمان ارایه می‌شود). در بازی‌های پویا، حرکات بازیکنان پی در پی است بدین معنا که هر بازیکن پس از مشاهده بازی رقیب، بازی خود را انجام می‌دهد (مانند بازی شطرنج).

۳-۲-۵- تاریخچه بازی

بر اساس این طبقه‌بندی، بازی‌ها به دو نوع بازی با آگاهی کامل و آگاهی ناکامل تقسیم می‌شوند. در بازی با آگاهی کامل، هر بازیکن از حرکت یا تصمیم قبلی بازیکن (بازیکنان) رقیب اطلاع دارد. برای مثال بازی شطرنج را در نظر بگیرید. در هر زمان که نوبت بازیکن است که بازی کند، او از آن چه که رخ داده (تمامی حرکت‌های انجام شده توسط خود و رقیب و مهره‌های بیرون رفته) آگاهی دارد، اما در بازی با آگاهی ناکامل، بازیکنان از گذشته و تاریخچه بازی شامل حرکت یا

تصمیم دیگر بازیکن (بازیکنان)، اطلاعی ندارند (مانند شرکت در بازی پرتاب سکه در حالتی که یک بازیکن پس از پرتاب سکه دست خود را برای پوشش نتیجه، روی آن می‌گذارد. در اینصورت بازیکن دیگر بدون آگاهی از نتیجه بازی رقیب خود، باید سکه را پرتاب کند).

۳-۲-۶- تعداد بازیکنان

بر اساس این طبقه‌بندی، بازی‌ها به دو نوع بازی دو نفره و چند نفره تقسیم می‌شوند. در بازی‌های دونفره تنها دو بازیکن مشغول بازی هستند، ولی در بازی‌های چندنفره، گروهی از افراد در حال بازی با یکدیگر هستند.

۳-۲-۷- تعداد تکرار مراحل بازی

بر اساس این طبقه‌بندی، بازی‌ها به دو نوع بازی تک مرحله‌ای و چندمرحله‌ای تکرارشونده تقسیم می‌شوند. بسیاری از تصمیمات کوتاه‌مدت در تجارت، مانند قیمت‌گذاری از نوع بازی‌های تکرارشونده چند مرحله‌ای است که در آن‌ها یک تعامل مداوم میان رقابت‌کنندگان وجود دارد. ولی در بازی شطرنج پس از پایان، نتیجه پس از یک مرحله بازی به دست می‌آید.

۳-۲-۸- عقلانیت بازیکنان

بر اساس این طبقه‌بندی، بازی‌ها به دو نوع بازی کلاسیک و تکاملی تقسیم می‌شوند. بازیکنان در نظریه بازی‌های کلاسیک بر اساس هوشمندی و عقلانیت استراتژی خود را انتخاب می‌کنند تا بیشترین منفعت نصیب آن‌ها شود، ولی اگر در بازی بیان شده عقلانیت نقض شود، نظریه بازی تکاملی جایگزین نظریه بازی کلاسیک می‌شود. مفهوم نظریه بازی‌های تکاملی از علم زیست‌شناسی گرفته شده است. در نظریه بازی‌های تکاملی بازیکنان جامعه‌ای هستند که به واسطه رفتاری که انتخاب می‌کنند، دسته‌بندی می‌شوند. دستاورد در بازی کلاسیک همان شایستگی[۶] در نظریه بازی‌های تکاملی است. میزان برتری و یا شایستگی بازیکن در نظریه بازی‌های تکاملی از بقای آن در طول بازی مشخص می‌شود، بنابراین در این مفهوم، افرادی که شایسته‌ترند در جامعه زیادتر می‌شوند و افرادی که شایستگی کمتری دارند، کاهش می‌یابند [۲۵]. در نظریه بازی تکاملی، توجه به تغییرات زمانی و تکامل استراتژی‌ها اهمیت بالایی دارد. این دیدگاه می‌تواند برای مدل کردن فرآیندهای پویا و تحولی کاربرد بیشتری نسبت به بازی کلاسیک داشته باشد.

۴- الگوریتم حل بازی

بیان برتری یک استراتژی در نظریه بازی تکاملی، در تغییرات فراوانی استراتژی‌ها در مدت زمان مدل مشخص می‌شود. با استفاده از مدل همسان‌ساز پویا، می‌توان بررسی کرد که چگونه فراوانی استراتژی‌های مختلف در یک جمعیت و در طول زمان تغییر می‌کند. این استراتژی‌ها می‌توانند ویژگی‌ها یا اقدامات افراد در جمعیت را نمایان سازند. تغییر در فراوانی استراتژی‌ها به وسیله دستاوردهای مرتبط با آن استراتژی و برازش آن‌ها تعیین می‌شود. روش همسان‌ساز پویا یک رویکرد سازنده برای توصیف و حل دینامیک بازی‌های تکاملی است. این روش اولین بار توسط تیلور و یانکر در سال ۱۹۷۸ معرفی شد [۲۶]. هدف اصلی در حل یک بازی، رسیدن به یک تعادل بین بازیکنان با اهداف متفاوت در بازی است. فرض می‌شود که یک بازی به همراه دو بازیکن و دو استراتژی متفاوت A و B وجود دارد. در بازه زمانی t، بازیکنان به صورت دوتایی به رقابت می‌پردازند. در جدول ۲ جدول بازی نمایش داده شده است:

جدول ۲: جدول بازی

		بازیکن ۲	
	استراتژی بازیکن ۲ / استراتژی بازیکن ۱	A	B
بازیکن ۱	A	a	b
	B	c	d

فرض می‌شود بازی معرفی شده شامل دو بازیکن و دستاورد هر کدام در مقابل آن نشان داده شده است. بازی معرفی شده از نوع متقارن است. فرض بعدی این است در بازه زمانی کوچک ، تنها کسری ε از جمعیت در مسابقات دوتایی شرکت می‌کنند، یعنی بازی می‌کنند. پارامتر $P_i(t)$ تعداد بازیکنانی است که در زمان t استراتژی A و B بازی می‌کنند، به ترتیب $P(t)=P_A(t)+P_B(t)$ تعداد کل بازیکنان و $x(t)=(P_A(t)/P(t))$ کسری از جمعیت بازی است که استراتژی A را بازی می‌کنند. در مقابل $1-x(t)$ از جمعیت استراتژی B را دنبال می‌کنند. در ادامه رابطه ۴ تغییر جمعیت بازیکن A و B را در زمان $t+\varepsilon$ نشان می‌دهد [۱۸].

$$P_i(t+\varepsilon) = (1-\varepsilon)P_i(t) + \varepsilon P_i(t)U_i(t) \quad i = A, B \qquad (۴)$$

در رابطه ۴، $P_i(t+\varepsilon)$ تغییرات جمعیتی بازیکنان در زمان $t+\varepsilon$ و $U_i(t)$ دستاورد بازیکن i اُم است.

با در نظر گرفتن بازیکنان $U_A(t)=ax(t)+ b(1-x(t))$ و $U_B(t)=cx(t)+d(1- x(t))$ به ترتیب دستاورد متوسط افرادی هستند که A و B بازی می‌کنند. با فرض مثبت بودن دستاورد بازیکنان، پارامترهای $P_B(t)$ و $P_A(t)$ همیشه مقادیر غیرمنفی دارند و احتمال x مقداری میان صفر تا یک دارد.

$$P(t+\varepsilon) = (1-\varepsilon)P(t) + \varepsilon P(t)\bar{U}(t) \qquad (۵)$$

رابطه ۵ تعداد کل بازیکنان را نشان می‌دهد که در آن $\bar{U}(t)=x(t)U_A(t)+(1-x(t))U_B(t)$ میانگین دستاورد بازیکنان است. وقتی رابطه ۴ بر ۵ تقسیم شود، معادله‌ای برای فراوانی استراتژی A به دست می‌آید.

$$x(t+\varepsilon) - x(t) = \varepsilon \frac{x(t)[U_A(t) - \bar{U}(t)]}{1 - \varepsilon + \varepsilon\bar{U}(t)} \qquad (۶)$$

اکنون اگر هر دو طرف رابطه ۶ بر ε تقسیم شود و حد ε به صفر میل داده شود معادله همسان‌ساز آن به صورت رابطه ۷ درمی‌آید [۱۹].

$$\frac{dx(t)}{dt} = x(t)[U_A(t) - \bar{U}(t)] \qquad (۷)$$

یکی از اهداف مهم در استفاده از بازی تکاملی بررسی چگونگی تغییرات استراتژی‌های بازیکنان است. این گام پس از تشکیل معادلات همسان‌ساز با یافتن نقاط پایدار و ناپایدار بازی آغاز می‌شود. برای پیدا کردن نقاط پایدار و ناپایدار بازی می‌توان از معادله همسان‌ساز و مشتق معادله همسان‌ساز بازیکنان کمک گرفت. به طور کلی سه حالت برای وضعیت پایداری بازی پیش می‌آید [۲۷]:

- هنگامی که معادله همسان‌ساز و مشتق معادله همسان‌ساز همسو نباشند (یکی مثبت و دیگری منفی باشد): در این وضعیت امکان همزیستی استراتژی‌ها وجود دارد. به عبارت دیگر، فراوانی استراتژی بازیکن در این وضعیت در حال کاهش است. در این نقطه از بازی، بازیکنان به تعادل پایدار تکاملی می‌رسند.
- هنگامی که معادله همسان‌ساز و مشتق معادله همسان‌ساز همسو باشند (هر دو مثبت و یا هر دو منفی باشند): در این وضعیت، فراوانی استراتژی‌ها به مرور زمان افزایش می‌یابد که نشان از این است که جمعیت در یک حالت تعادل نیست بلکه در حال تکامل است. به عبارت دیگر استراتژی‌ها فعلی ممکن است به مرور زمان بر سایر استراتژی‌ها غلبه کنند. در این نقطه از بازی، بازیکنان به تعادل ناپایدار تکاملی می‌رسند.
- هنگامی که معادله همسان‌ساز و مشتق معادله همسان‌ساز برابر صفر باشند: در این وضعیت از بازی، بازیکنان در مرز تعادل تکاملی قرار دارند.

۵- بازی تکاملی نظارت ایمنی معدن

در بازی نظارت برای تامین ایمنی معادن، بازیکنان در صدد این هستند که دستاورد خود را از بازی در طول مدت زمان مدل حداکثر کنند. با گذشت زمان مدل، بازیکنان دستاوردهای به وجود آمده از هر استراتژی را مشاهده و مقایسه می‌کنند و سپس با توجه به استراتژی پیش رو تنظیم و تصحیح استراتژی‌های آینده ادامه می‌یابد و بدین ترتیب بازیکنان به کمک پویایی بازی به دنبال رسیدن به هدف بیشینه‌سازی ایمنی معادن هستند. پویایی مدل همان‌طور که ذکر شد با کمک نظریه بازی تکاملی بررسی و تحلیل می‌شود.

۵-۱- طراحی و توضیحات بازی

در این بخش به معرفی بازیکنان و دستاورد آن‌ها پرداخته می‌شود. این بازی شامل سه بازیکن دولت، مدیریت معدن و معدنچیان معدن است. این سه بازیکن، شرکت‌کنندگان اصلی بازی اصلی هستند. در اینجا دولت وظیفه نظارت بر بخش مقررات ایمنی معدن را دارد. بازیکن دوم در بازی مدیریت معدن است که به عنوان مسوول معدن وظیفه برقراری ایمنی در معدن را برعهده دارد. به طور کلی تخطی معدنچیان از قوانین و مقررات در درجه اول علت مستقیم حادثه‌ها در معادن است. به عنوان عامل خارجی دولت و مدیریت معدن وظیفه برقراری ایمنی در معدن را بر عهده دارند. بازیکن سوم در بازی کارگران معدن هستند. هر سه بازیکن منطقی هستند و انتخاب‌های استراتژیک آن‌ها بر اساس بیشینه کردن دستاورد است. فرض‌های اولیه در بازی این است که هیچکدام از اعضای بازیکنان یکسان نیستند و هیچ گونه رشوه و اطلاعاتی میان بازیکنان رد و بدل نمی‌شود. در ادامه چندین فرض صورت گرفته در بازی معرفی شده بیان می‌شود.

۵-۲- فرض‌های بازی

فرض اول: در شرایط عقلانیت محدود، دولت، مدیریت معدن و کارگران معدن آزادانه استراتژی خود را مطابق میل خود تغییر دهند. احتمال اینکه دولت استراتژی نظارت و یا عدم نظارت را در پیش بگیرد. احتمال نظارت دولت با x نشان داده می‌شود. مقدار x بین صفر تا یک متغیر است. مدیریت معدن به عنوان دومین بازیکن برای برقراری ایمنی می‌تواند دو استراتژی به کارگیری تجهیزات ایمنی در معادن و عدم به کارگیری تجهیزات ایمنی را در پیش بگیرد. احتمال انتخاب از بین دو استراتژی اشاره شده با y نشان داده می‌شود. y مقداری مابین صفر تا ۱ دارد. در آخر استراتژی‌های بازیکن سوم یعنی کارگران معدن بیان می‌شود. کارگران دو استراتژی پیروی از قوانین و مقررات ایمنی و عدم پیروی از قوانین و مقررات ایمنی را در پیش رو دارند. احتمال پیروی و یا عدم پیروی کارگران از قوانین با z نشان داده می‌شود. مقدار z بین صفر تا یک متغیر است. جدول ۳ گزینه‌های پیش روی بازیکنان را نشان می‌دهد.

جدول ۳: گزینه‌های موجود در بازی

کارگران معدن	مدیریت معدن	دولت	وضعیت
رعایت مقررات	تهیه تجهیزات ایمنی	حمایت	۱
عدم رعایت مقررات	تهیه تجهیزات ایمنی	حمایت	۲
رعایت مقررات	عدم تهیه تجهیزات ایمنی	حمایت	۳
عدم رعایت مقررات	عدم تهیه تجهیزات ایمنی	حمایت	۴
رعایت مقررات	تهیه تجهیزات ایمنی	عدم حمایت	۵
عدم رعایت مقررات	تهیه تجهیزات ایمنی	عدم حمایت	۶
رعایت مقررات	عدم تهیه تجهیزات ایمنی	عدم حمایت	۷
عدم رعایت مقررات	عدم تهیه تجهیزات ایمنی	عدم حمایت	۸

فرض دوم: استفاده از تجهیزات ایمنی توسط مدیریت معدن و کارگران معدن اثرات مثبتی بر ایمنی معدن دارد. M_m و M_c به ترتیب نشان‌دهنده هزینه تجهیزات ایمنی به کار رفته برای مدیریت معدن و کارگران معدن است. این دو پارامتر در صورت انتخاب استراتژی به کارگیری تجهیزات ایمنی توسط مدیریت معدن و پیروی از قوانین و مقررات ایمنی توسط کارگران معدن در دستاورد قرار می‌گیرد. در صورت انتخاب استراتژی‌های به کارگیری تجهیزات ایمنی توسط مدیریت معدن و پیروی از قوانین و مقررات توسط کارگران معدن، دولت به عنوان پاداش به ترتیب مقادیری به عنوان r و r' به مدیریت معدن و کارگران معدن می‌دهد. مقدار پاداش دریافتی برای کارگران معدن با حقوق دریافتی آن‌ها که مقداری ثابت است جمع می‌شود. حقوق کارگران معدن با R نشان داده می‌شود. کارگران معدنی در استراتژی عدم پیروی از قوانین و مقررات ضریبی به عنوان افزایش بهره‌وری در استخراج دریافت می‌کنند. این مقدار با d نشان داده می‌شود.

در ادامه در صورت انتخاب استراتژی عدم به کارگیری تجهیزات ایمنی توسط مدیریت معدن، اگر کارگران معدن استراتژی پیروی از قوانین و مقررات را انتخاب کنند، در این وضعیت مدیریت معدن با توجه به عدم خرید تجهیزات ایمنی و انتخاب استراتژی ایمن توسط کارگران سودی به میزان h می‌کند. استراتژی پیروی از قوانین در صورتی که دولت نظارتی بر کارگران نداشته باشد یک ضرر به میزان v برای آن‌ها دارد. این مقدار برابر با پاداشی است که کارگران معدن در استراتژی پیروی از قوانین دریافت می‌کردند.

فرض سوم: همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد دولت می‌تواند دو نوع استراتژی نظارتی را اتخاذ کند. در اولین استراتژی دولت می‌کوشد با نظارت و حمایت‌های مالی به معدن ایمنی کارگران را افزایش دهد. در استراتژی بعدی دولت بر کار مدیریت و کارگران معدن نظارت و حمایتی نمی‌کند. این امر بدان معناست که اگر مدیریت معدن قصد خرید تجهیزات ایمنی را داشته باشد هیچگونه یارانه‌ای از دولت دریافت نمی‌کند. در استراتژی نظارتی دولت، اگر مدیریت و کارگران معدن به ترتیب استراتژی‌های عدم به کارگیری تجهیزات ایمنی در معدن و عدم پیروی از قوانین و مقررات را انتخاب کنند، دولت با اعمال جریمه‌ها بر آن‌ها نظارت می‌کند. با فرض اینکه جریمه دولتی با S نشان داده شود، این مقدار از درآمدهای مدیریت معدن و کارگران معدنی کاسته می‌شود. در فرض بعدی، دولت اگر استراتژی حمایتی خود را در پیش گیرد و دو بازیکن دیگر بخواهند از تجهیزات ایمنی در معدن استفاده کنند، دولت به عنوان یارانه درصدی از خرید تجهیزات را به مدیریت معدن پرداخت می‌کند. این پارامتر با مقدار μ نشان داده می‌شود. مقدار μ عددی میان صفر تا یک است.

۵-۳- جدول دستاورد بازی

پس از بیان مشخصات و فرض‌های بازی تکاملی با توجه

به استراتژی انتخابی، بازیکنان به دستاوردهای متنوعی دست می‌یابند. هدف اصلی این بازی، برقراری ایمنی در معدن و کاهش حوادث است. این دستاوردها در جدول دستاورد بازی قابل مشاهده هستند و نشان می‌دهند که هر بازیکن با انتخاب استراتژی‌های خود چه دستاوردی را دریافت می‌کند.

انتخاب استراتژیک بازیکنان در فرآیند تجهیز معادن برای ایمنی کارگران در نهایت ترکیبی استراتژیک برای بازی تکاملی سه جانبه در میان دولت، مدیریت معدن و کارگران معدن را تشکیل می‌دهد. در ادامه برای مشاهده دستاورد، جدول درآمدی هر یک از بازیکنان در جدول ۴ آورده شده است.

۴-۵- بررسی پایداری بازی

بعد از مشخص شدن جدول‌های دستاورد بازی، می‌توان دستاورد هر یک از بازیکنان را با احتمال انتخابی هر یک از استراتژی‌های بیان شده مشخص کرد. در ابتدا دستاورد دولت مشخص می‌شود. در استراتژی اول دستاورد حمایت و نظارت ایمنی بر معدن U_{G1} و در استراتژی دوم عدم حمایت و نظارت ایمنی بر معدن U_{G2} بررسی می‌شود.

$$\begin{aligned} U_{G1} &= yz(-\mu(M_m + M_c) - r - r') + \\ &\quad y(1-z)(-\mu M_m - r + S_2) + \\ &\quad z(1-y)(-\mu M_m + S_1 - r') + \\ &\quad (1-y)(1-z)(S_1 + S_2) \\ U_{G2} &= yz(-r) + y(1-z)(-r) + z(1-y)(0) + \\ &\quad (1-y)(1-z)(0) \\ U_G &= xU_{G1} + (1-x)U_{G2} \end{aligned} \quad (۸)$$

در مرحله بعدی متوسط دستاورد مدیریت معدن با توجه به استراتژی‌های گفته شده به دوصورت U_{M1} و U_{M2} آورده شده است. در اینجا U_{M1} دستاورد مدیریت معدن در زمانیست که تجهیزات ایمنی در معدن نصب و راه‌اندازی شود. U_{M2} استراتژی دیگر مدیریت معدن است که در آن معدن از تجهیزات ایمنی استفاده نمی‌کند.

$$\begin{aligned} U_{M1} &= xz(r - (1-\mu)M_m) + \\ &\quad x(1-z)(r - (1-\mu)M_m) + \\ &\quad z(1-x)(r - M_m) + (1-x)(1-z)(r - M_m) \\ U_{M2} &= xz(-S_1) + x(1-z)(-S_1) + z(1-x)(h) + \\ &\quad (1-x)(1-z)(0) \\ U_M &= yU_{M1} + (1-y)U_{M2} \end{aligned} \quad (۹)$$

در مرحله آخر دستاورد بازیکن سوم یعنی کارگران معدن بیان می‌شود. دو استراتژی بازیکن به ترتیب با پارامترهای U_{C1} و U_{C2} بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} U_{C1} &= xy(r' + R - (1-\mu)M_c) + \\ &\quad x(1-y)(r' + R - (1-\mu)M_c) + \\ &\quad y(1-x)(R - v) + (1-y)(1-x)(R) \\ U_{C2} &= xy(Rd - S_2) + x(1-y)(Rd - S_2) + \\ &\quad y(1-x)(Rd) + (1-y)(1-x)(Rd) \\ U_C &= zU_{C1} + (1-z)U_{C2} \end{aligned} \quad (۱۰)$$

در ادامه برای حل دستاورد در نظریه بازی‌های تکاملی نیاز به حل معادله به صورت همسان‌ساز پویا است. مشابه تعریف بخش ۲-۳ و رابطه ۷، معادله همسان پویا دولت در رابطه ۱۱

جدول ۴: جدول دستاوردهای بازیکنان

			کارگران معدن	
			پیروی از قوانین و مقررات ایمنی (z)	عدم پیروی از قوانین و مقررات ایمنی (1-z)
دولت	حمایت و نظارت ایمنی بر معدن (x)	مدیریت معدن	بکارگیری تجهیزات ایمنی در معدن (y)	$\begin{bmatrix} -\mu(M_m + M_c) - r - r' \\ r - (1-\mu)M_m \\ r' + R - (1-\mu)M_c \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\mu M_m - r + S_2 \\ r - (1-\mu)M_m \\ Rd - S_2 \end{bmatrix}$
			عدم بکارگیری تجهیزات ایمنی در معدن (1-y)	$\begin{bmatrix} -\mu M_m + S_1 - r' \\ -S_1 \\ r' + R - (1-\mu)M_c \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} S_1 + S_2 \\ -S_1 \\ Rd - S_2 \end{bmatrix}$
	عدم حمایت و نظارت ایمنی بر معدن (1-x)	مدیریت معدن	بکارگیری تجهیزات ایمنی در معدن (y)	$\begin{bmatrix} -r \\ r - M_m \\ R - v \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -r \\ r - M_m \\ Rd \end{bmatrix}$
			عدم بکارگیری تجهیزات ایمنی در معدن (1-y)	$\begin{bmatrix} 0 \\ h \\ R \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Rd \end{bmatrix}$

ارایه شده است:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(\mathrm{U_{G1}} - \mathrm{U_G}) = x(x-1)(S_1 y - S_2 - S_1 + S_2 z + r_1 z + M_m \mu y + M_m \mu z - M_m \mu y z + M_c \mu y z) \quad (11)$$

رابطه همسان‌ساز پویا مدیریت معدن را می‌توان مطابق رابطه ۱۲ بسط داد:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(\mathrm{U_{M1}} - \mathrm{U_M}) = y(y-1)(r - h - M_m + hx + hz + S_1 x + M_m \mu x - hxz) \quad (12)$$

در آخرین مرحله از تشکیل روابط، رابطه همسان‌ساز کارگران معدن به دست می‌آید. رابطه ۱۳ نشان‌دهنده رابطه بسط داده شده برای بازیکن سوم است:

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(\mathrm{U_{C1}} - \mathrm{U_C}) = z(z-1)(R - rd - M_c x + r'x + S_2 x - vy + M_c \mu x + vxy) \quad (13)$$

در رابطه با به کارگیری تجهیزات ایمنی معدن ، بازیکنان موجود در بازی به طور پیوسته استراتژی خود را تغییر می‌دهند و سعی در این است که بازی به سمت استراتژی پایدار سوق یابد. معادلات سیستم دینامیکی بازی سه جانبه دولت، مدیریت معدن و کارگران معدن به شرح زیر است:

$$\begin{cases} F(x) = S_1 y - S_2 - S_1 + S_2 z + r_1 z + M_m \mu y + M_m \mu z - M_m \mu y z + M_c \mu y z \\ F(y) = r - h - M_m + hx + hz + S_1 x + M_m \mu x - hxz \\ F(z) = R - rd - M_c x + r'x + S_2 x - vy + M_c \mu x + vxy \end{cases}$$

برای تعیین نقطه تعادل به کارگیری تجهیزات ایمنی معدن بین سه بازیکن دولت، مدیریت معدن و کارگران معدن روابط موجود در روابط بالا برابر صفر قرار می‌گیرند. با توجه به فرض اول می‌توان گفت محیط احتمالاتی بازیکنان در یک فضای سه بعدی قرار دارد. برای به دست آوردن استراتژی پایدار تکاملی، طبق فرضیات نظریه بازی‌ها تکاملی زمانی که معادلات همسان‌ساز و مشتق معادلات همسان‌ساز از لحاظ مقدار خلاف جهت شوند به نقطه تعادلی میان بازیکنان در بازی خواهیم رسید. مشتق توابع درآمدی بازیکنان در رابطه ۱۴ نشان داده شده است.

$$\begin{cases} F'(x) = (1-2x)[\mu \mathrm{M_e} - S_1 - S_2 + S_1 y + S_1 z] \\ F'(y) = (1-2y)[\mathrm{M_e} - r - S_1 x] \\ F'(z) = (1-2z)[-r' - S_2 x] \end{cases} \quad (14)$$

سه معادله در رابطه ۱۴ به ترتیب مشتق تابع درآمدی دولت، مدیریت معدن و کارگران معدن است.

۵-۴-۱- تحلیل استراتژی ثبات تکاملی دولت

در این بخش به تحلیل استراتژی ثبات تکاملی دولت پرداخته می‌شود. برای تعیین وضعیت استراتژی پایداری دولت باید مقدار دو معادله F(x) و F'(x) مشخص شود. در گام نخست با توجه به معادله F(x) می‌توان در سه وضعیت همانند جدول ۵ آن را بررسی کرد. در گام بعدی برای تعیین وضعیت کلی پایداری دولت در بازی تکاملی، نیاز به بررسی مشتق معادله همسان ساز یعنی F'(x) است. این معادله با توجه به ساختارش از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول که احتمال نظارت دولت (پارامترهای داخل پرانتز) در آن دخیل است و بخش دوم که مرتبط با پارامترهای نظارتی بازی (پارامترهای داخل کروشه) است.

با توجه به اینکه انتخاب استراتژی بازیکن در نهایت به نقطه پایداری می‌رسد، به همین منظور پیدا کردن مقادیر معادله همسان‌ساز و مشتق آن برای فهمیدن استراتژی انتخابی بازیکنان لازم است. برای بررسی بهتر، تمامی وضعیت‌های موجود در جدول ۵ بررسی گردیده است. در این جدول پس از بررسی معادلات، نحوه انتخاب استراتژی توسط دولت (ناظر بازی) شرح داده می‌شود.

۵-۴-۲- تحلیل پایداری استراتژی مدیریت معدن

در این بخش به تحلیل استراتژی ثبات تکاملی مدیریت معدن پرداخته می‌شود. برای تعیین وضعیت استراتژی پایداری مدیریت معدن باید مقدار دو معادله F(y) و F'(y) مشخص شود. در گام نخست با توجه به معادله F(y) می‌توان در سه وضعیت همانند جدول ۶ آن را بررسی کرد. در گام بعدی برای تعیین وضعیت کلی پایداری مدیریت معدن در بازی تکاملی، نیاز به بررسی مشتق معادله همسان ساز یعنی F'(y) است. این معادله با توجه به ساختارش از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول که احتمال نظارت مدیریت معدن در آن دخیل است و بخش دوم که مرتبط با پارامترهای بازی است.

با توجه به اینکه انتخاب استراتژی بازیکن در نهایت به نقطه پایداری می‌رسد، به همین منظور پیدا کردن مقادیر معادله همسان‌ساز و مشتق آن برای فهمیدن استراتژی انتخابی بازیکنان لازم است. برای بررسی بهتر، تمامی وضعیت‌های موجود در جدول ۶ بررسی شده است.

جدول ۵: وضعیت پایداری دولت

استراتژی انتخابی	مشتق معادله همسان‌ساز دولت F'(x)	معادله همسان‌ساز دولت F(x)	وضعیت
هیچ تفاوتی میان استراتژی‌های دولت وجود ندارد.	$F'(x)=0$	$F(x)=0$	۱
برای دولت x=1 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت دولت استراتژی حمایتی را انتخاب می‌نماید.	مقدار $[\mu M_e - S_1 - S_2 + S_1 y + S_1 z]$ مثبت باشد آنگاه: زمانی که x=0 باشد آنگاه $F'(x)>0$ زمانی که x=1 باشد آنگاه $F'(x)<0$	$F(x)>0$	۲
برای دولت x=0 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت دولت استراتژی عدم حمایت را انتخاب می‌نماید.	مقدار $[\mu M_e - S_1 - S_2 + S_1 y + S_1 z]$ منفی باشد آنگاه: زمانی که x=0 باشد آنگاه $F'(x)<0$ زمانی که x=1 باشد آنگاه $F'(x)>0$		
برای دولت x=1 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت دولت استراتژی حمایتی را انتخاب می‌نماید.	مقدار $[\mu M_e - S_1 - S_2 + S_1 y + S_1 z]$ مثبت باشد آنگاه: زمانی که x=0 باشد آنگاه $F'(x)<0$ زمانی که x=1 باشد آنگاه $F'(x)>0$	$F(x)<0$	۳
برای دولت x=0 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت دولت استراتژی عدم حمایت را انتخاب می‌نماید.	مقدار $[\mu M_e - S_1 - S_2 + S_1 y + S_1 z]$ منفی باشد آنگاه: زمانی که x=0 باشد آنگاه $F'(x)>0$ زمانی که x=1 باشد آنگاه $F'(x)<0$		

جدول ۶: وضعیت پایداری مدیریت معدن

استراتژی انتخابی	مشتق معادله همسان‌ساز مدیریت معدن F'(y)	معادله همسان‌ساز مدیریت معدن F(y)	وضعیت
هیچ تفاوتی میان استراتژی‌های مدیریت معدن وجود ندارد.	$F'(y)=0$	$F(y)=0$	۱
برای مدیریت معدن y=1 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت مدیریت معدن استراتژی تامین تجهیزات ایمنی را انتخاب می‌نماید.	مقدار $[M_e - r - S_1 x]$ مثبت باشد آنگاه: زمانی که y=0 باشد آنگاه $F'(y)>0$ زمانی که y=1 باشد آنگاه $F'(y)<0$	$F(y)>0$	۲
برای مدیریت معدن y=0 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت مدیریت معدن استراتژی عدم تامین تجهیزات ایمنی را انتخاب می‌نماید.	مقدار $[M_e - r - S_1 x]$ منفی باشد آنگاه: زمانی که y=0 باشد آنگاه $F'(y)<0$ زمانی که y=1 باشد آنگاه $F'(y)>0$		
برای مدیریت معدن y=1 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت مدیریت معدن استراتژی تامین تجهیزات ایمنی را انتخاب می‌نماید.	مقدار $[M_e - r - S_1 x]$ مثبت باشد آنگاه: زمانی که y=0 باشد آنگاه $F'(y)<0$ زمانی که y=1 باشد آنگاه $F'(y)>0$	$F(y)<0$	۳
برای مدیریت معدن y=0 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت مدیریت معدن استراتژی عدم تامین تجهیزات ایمنی را انتخاب می‌نماید.	مقدار $[M_e - r - S_1 x]$ منفی باشد آنگاه: زمانی که y=0 باشد آنگاه $F'(y)>0$ زمانی که y=1 باشد آنگاه $F'(y)<0$		

۵-۴-۳- تحلیل پایداری استراتژی کارگران معدن

در آخرین بررسی همانند وضعیت پایداری دو بازیکن گفته شده، دستاورد کارگران معدن را در سه وضعیت می‌توان تحلیل کرد. در ادامه با توجه به جدول ۷ می‌توان گفت که با فرض مثبت بودن ضریب احتمال پیروی از قوانین و مقررات توسط کارگران معدن زمانی‌که مقدار F(z) و F'(z) از لحاظ مقدار در خلاف یکدیگر قرار گیرد، استراتژی پایدار تکاملی رخ می‌دهد. در مقابل زمانی‌که مقدار F(z) و F'(z) از لحاظ مقدار همسو با یکدیگر باشد، بازی تکاملی در وضعیت ناپایدار قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه انتخاب استراتژی بازیکن در نهایت به نقطه پایداری می‌رسد، به همین منظور پیدا کردن مقادیر معادله همسان‌ساز و مشتق آن برای فهمیدن استراتژی انتخابی بازیکنان لازم است. برای بررسی بهتر، تمامی وضعیت‌های موجود در جدول ۷ بررسی شده است.

۶- شبیه‌سازی و بحث

برای بررسی بیشتر دستاورد بازیکنان در بازی تکاملی با توجه به محدودیت‌ها و معادلات همسان‌ساز پویا، این تحقیق برای شبیه‌سازی بازی تکاملی از نرم افزار متلب استفاده کرد. در ادامه برای شبیه‌سازی مدل بازی تکاملی پارامترهای موجود در دستاورد بازیکنان باید مقداردهی شوند. پارامترهای مورد استفاده در بازی تکاملی سه جانبه در جدول ۸ آمده است. در بخش‌های بعدی به تحلیل شبیه‌سازی مدل بازی تکاملی از دیدگاه سه بازیکن موجود در بازی پرداخته شده است.

۶-۱- تاثیر جریمه‌های دولت

همان‌طور که گفته شد با پیش‌بینی مقادیر دستاورد بازیکنان، استراتژی انتخابی آن‌ها نیز مشخص می‌شود. برای بررسی رفتار بازیکنان، در قدم اول جرایم دولتی با مقادیر مختلفی در دستاورد بازیکنان جایگذاری شدند. در ادامه مقادیر جریمه‌های دولتی یکسان فرض (S_1=S_2) و در چهار مقدار ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مقایسه شد.

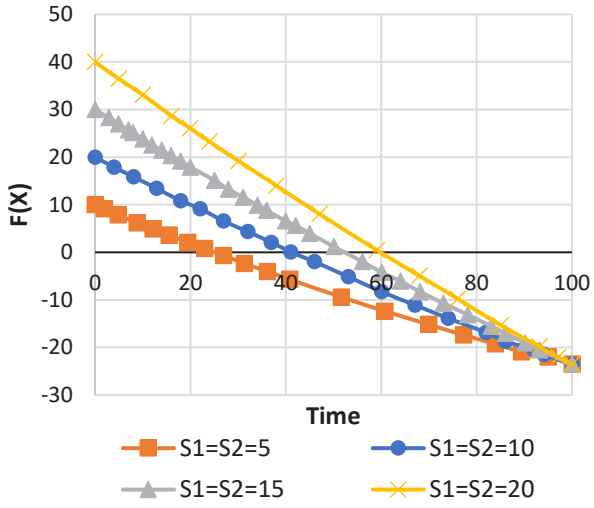
در ادامه برای تحلیل رفتار تکاملی بازیکنان معادلات همسان‌ساز آن‌ها در بازه زمانی T بررسی شد. بازه زمانی به صد واحد زمان شبیه‌سازی تقسیم شده است. در هر واحد زمانی احتمال انتخاب استراتژی توسط بازیکنان (x,y,z) به میزان ۰٫۰۱ افزایش می‌یابد. مسیر تکامل سیستم ایمنی معدن با سه بازیکن موجود تحت جرایم مختلف در شکل‌های ۱ تا ۳ آمده است.

جدول ۷: وضعیت پایداری کارگران معدن

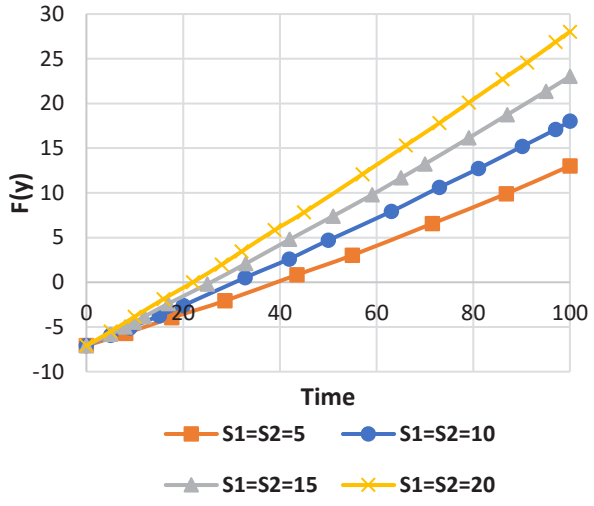
استراتژی انتخابی	مشتق معادله همسان‌ساز کارگران معدن F'(z)	معادله همسان‌ساز کارگران معدن F(z)	وضعیت
هیچ تفاوتی میان استراتژی‌های مدیریت معدن وجود ندارد.	$F'(z)=0$	$F(z)=0$	۱
برای کارگران معدن z=1 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت کارگران معدن استراتژی پیروی از قوانین و مقررات را انتخاب می‌نمایند.	مقدار $[-r'-S_2x]$ مثبت باشد آنگاه: زمانی که z=0 باشد آنگاه $F'(z)>0$ زمانی که z=1 باشد آنگاه $F'(z)<0$	$F(z)>0$	۲
برای کارگران معدن z=0 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت کارگران معدن استراتژی عدم پیروی از قوانین و مقررات را انتخاب می‌نمایند.	مقدار $[-r'-S_2x]$ منفی باشد آنگاه: زمانی که z=0 باشد آنگاه $F'(z)<0$ زمانی که z=1 باشد آنگاه $F'(z)>0$		
برای کارگران معدن z=1 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت کارگران معدن استراتژی پیروی از قوانین و مقررات را انتخاب می‌نمایند.	مقدار $[-r'-S_2x]$ مثبت باشد آنگاه: زمانی که z=0 باشد آنگاه $F'(z)<0$ زمانی که z=1 باشد آنگاه $F'(z)>0$	$F(z)<0$	۳
برای کارگران معدن z=0 یک نقطه پایدار می‌باشد. این بدان معناست طی این وضعیت کارگران معدن استراتژی عدم پیروی از قوانین و مقررات را انتخاب می‌نمایند.	مقدار $[-r'-S_2x]$ منفی باشد آنگاه: زمانی که z=0 باشد آنگاه $F'(z)>0$ زمانی که z=1 باشد آنگاه $F'(z)<0$		

جدول ۸: پارامترهای بازی تکاملی

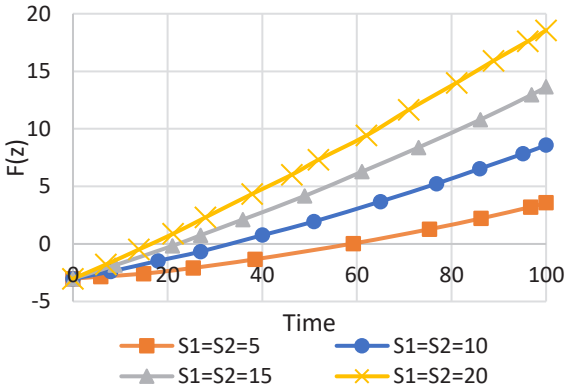
M_m	۱۵
M_e	۷
r	۳
r'	۱٫۵
h	۳
d	۳
v	۳
R	۳



شکل ۱: تاثیر جریمه‌های ناظر بازی بر معادله همسان‌ساز دولت



شکل ۲: تاثیر جریمه‌های ناظر بر معادله همسان‌ساز مدیریت معدن



شکل ۳: تاثیر جریمه‌های ناظر بر معادله همسان‌ساز کارگران

با توجه به شکل ۱ می‌توان گفت تمامی حالات جریمه ناظر باعث شد که در زمان‌های اولیه مدل به دلیل مثبت بودن معادله همسان‌ساز، وضعیت پایدار تکاملی سیستم دولت در حالت یک قرار گیرد. در ادامه با گذشت زمان در مدل، وضعیت سیستم با منفی شدن معادله همسان‌ساز در حالت صفر قرار می‌گیرد و این بدان معناست که دولت در این وضعیت استراتژی عدم نظارت و حمایت از معدن را انتخاب می‌کند. همان‌طور که از شکل ۱ پیداست با افزایش مقادیر جریمه، تمایل دولت بر نظارت بیشتر است. در جریمه‌های با مقادیر ۵ و ۱۰ دولت در زمان کوتاهی استراتژی خود را تغییر می‌دهد و استراتژی عدم نظارت را برمی‌گزینند.

در شکل ۲ برخلاف شکل ۱، وضعیت پایدار تکاملی سیستم مدیریت معدن به دلیل منفی بودن معادله همسان‌ساز آن از منفی آغاز می‌شود. این بدان معناست که در زمان‌های اولیه مدیریت معدن استراتژی عدم به کارگیری تجهیزات را انتخاب کرده است. ولی با توجه به گذشت زمان در مدل و اعمال جریمه‌های ناظر استراتژی مدیریت معدن تغییر کرده و در ادامه استراتژی به کارگیری تجهیزات ایمنی را انتخاب می‌کند. اعمال جریمه‌های ناظر تاثیر مستقیمی بر رفتار مدیریت معدن داشته است، به طوری که با افزایش جریمه‌های دولتی تغییر استراتژی توسط مدیریت معدن نیز سرعت می‌یابد.

با توجه به شکل ۳ می‌توان گفت در جریمه‌های بالا کارگران معدن در زمان کوتاهی استراتژی پیروی از قوانین و مقررات را انتخاب می‌کنند. در ادامه با کمتر شدن مقادیر جریمه دستاورد کارگران معدن شیب کمتری پیدا می‌کند و زمان بیشتری طول می‌کشد تا به وضعیت تکاملی ۱ یعنی انتخاب استراتژی پیروی از قوانین برسند.

۶-۲- تاثیر یارانه دولت

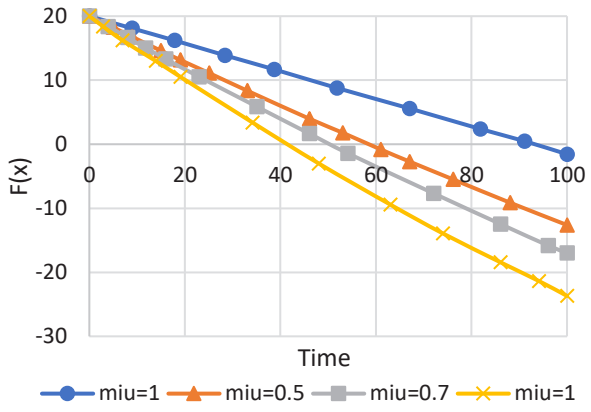
در ادامه بررسی‌ها در دومین بخش میزان تاثیر یارانه دولت برای خرید تجهیزات ایمنی مورد بحث قرار می‌گیرد. میزان یارانه دولتی برای خرید تجهیزات همان‌طور که گفته شد با پارامتر μ نشان داده می‌شود و مقداری بین صفر تا ۱ اختیار می‌کند. در ادامه میزان تاثیر یارانه دولتی بر مسیر تکامل بازی ایمنی در مقادیر ۰، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ در شکل‌های ۴ تا ۶ آمده است.

با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت در بازه صفر تا ۱ پارامتر μ دستاورد ناظر در ابتدا مثبت است و با گذشت زمان به سمت منفی میل می‌کند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در زمان‌های اولیه مدل به دلیل مثبت بودن معادله همسان‌ساز، وضعیت پایدار تکاملی سیستم دولت در حالت یک قرار گیرد. در ادامه با گذشت زمان در مدل، وضعیت سیستم با منفی شدن معادله همسان‌ساز در حالت صفر قرار می‌گیرد و این بدان معناست که دولت در این وضعیت استراتژی عدم نظارت و حمایت از معدن را انتخاب می‌کند. در ادامه بررسی می‌توان گفت که با افزایش میزان ضریب پرداختی برای خرید تجهیزات ایمنی از سوی دولت میل دولت به تغییر استراتژی و انتخاب استراتژی عدم حمایت و نظارت در زمان کوتاه‌تر، بیشتر می‌شود. این تصمیم به دلیل منطقی بودن بازیکن و تلاش برای افزایش دادن مقدار درآمد خود از بازی است.

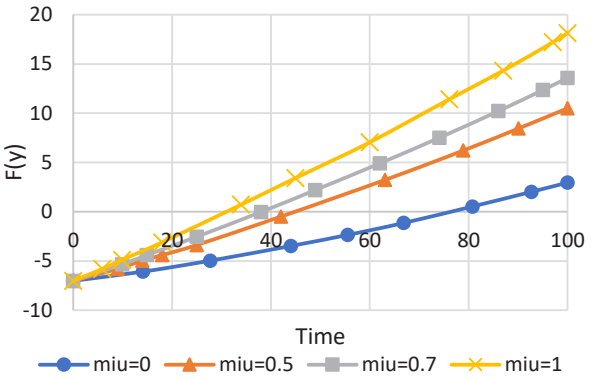
بررسی شکل ۵ و ۶ نشان می‌دهد که در ابتدا دستاورد مدیریت و کارگران معدن منفی بوده است و این به معنی عدم اجرا مقررات ایمنی از سوی دو بازیکن است ولی با گذشت زمان و اعمال مشوق‌های دولتی مدیریت معدن و همچنین کارگران معدن استراتژی‌های همسو با تولید ایمن را در پیش خواهند گرفت. همچنین با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان گفت هرچه ضریب یارانه پرداختی از سوی دولت بیشتر باشد، مدیریت و کارگران معدن در زمان کوتاهتری استراتژی‌های ایمن را انتخاب می‌کنند.

نتایج این مقاله شامل تجزیه و تحلیل تکرار پویا، تجزیه و تحلیل پایداری تکامل و آزمایش‌های شبیه‌سازی عددی در بین سه ذینفع سازمان، معدن‌کاران و مدیران در تولید ایمنی معدن است. بحث درباره نتایج حاصل از شبیه‌سازی بازی تکاملی تامین ایمنی معدن به دو نکته مهم اشاره دارد:

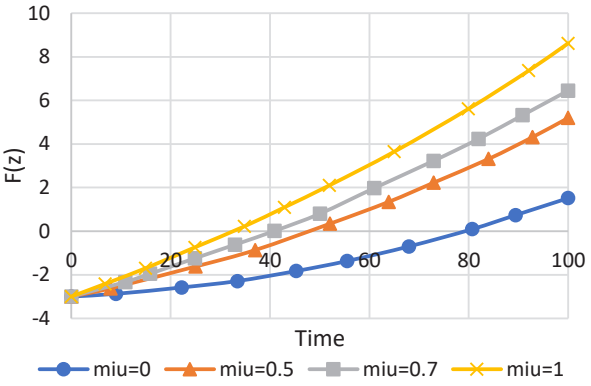
در استفاده از استراتژی یارانه و جریمه ثابت، افزایش شدت جریمه برای معدنچیان و دستگاه نظارتی می‌تواند در مدت



شکل ۴: تاثیر یارانه بر معادله همسان‌ساز دولت



شکل ۵: تاثیر یارانه ناظر بازی بر معادله همسان‌ساز مدیریت معدن



شکل ۶: تاثیر یارانه ناظر بازی بر معادله همسان‌ساز کارگران معدن

زمان کوتاهی رفتارهای ناایمن آن‌ها را کاهش دهد. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی بازی تکاملی آمده است، انتخاب رفتار عدم پیروی از قوانین و مقررات معدن توسط معدنچیان، پایداری مدل تکاملی در زمان بیشتری به طول می‌انجامد. این

رفتار مهم‌ترین و اصلی‌ترین علت حوادث ایمنی معادن است و تصمیم‌گیری معدنچیان نقش مهمی در بهره‌برداری از تولید ایمنی معدن دارد. بازیکنان در بازی تمایل به افزایش دستاورد خود از بازی بوده و از دریافت جریمه‌ها اجتناب کنند. هنگامی که ناظران معدن به دلیل وضعیت نامناسب ایمنی معادن، جریمه خود را افزایش می‌دهند، اگر معدنچیان یا مدیریت معدن همچنان رفتار ناایمن را انتخاب کنند، جریمه می‌شوند، بنابراین معدنچیان و مدیریت معدن به ترتیب به دنبال انتخاب استراتژی پیروی از قوانین و مقررات و بهره‌گیری از تجهیزات ایمنی برای معدن هستند تا پاداش ایمنی را دریافت کنند. در رابطه با انتخاب استراتژی توسط مدیریت معدن می‌توان گفت که در صورت انتخاب استراتژی تامین تجهیزات ایمنی برای معدن، از جریمه‌های دولتی مصون مانده و برای کسب دستاورد بیشتر حاضر به نصب تجهیزات و دریافت پاداش ایمنی است. در بررسی استراتژی دولت می‌توان گفت که مسیر پایداری این بازیکن به دلیل تفاوت در تابع پرداخت با دیگر بازیکنان موجود در بازی متفاوت است. به همین دلیل یکی از نقاط پایدار بازی تکاملی در نقطه (۰،۱،۱) رخ می‌دهد، در این نقطه دولت استراتژی عدم نظارت و مدیران و کارگران معدن به ترتیب استراتژی به کارگیری تجهیزات ایمنی و پیروی از قوانین را انتخاب می‌کنند. ادبیات‌های بررسی شده استراتژی حمایتی و نظارتی برای دولت تاکید شده است و تامین ایمنی را جزو یکی از اهداف اصلی این بازیکن می‌دانند.

روند تغییر استراتژی بازیکنان در یک بازی تکاملی از سوی نقطه‌ای ناپایدار به یک نقطه پایدار است. از نتایج شبیه‌سازی عددی، می‌توان به این نکته پی برد که نقطه تعادل ایده‌آل بازی در احتمال برابر با (۱، ۱، ۱) رخ می‌دهد. این نقطه به معنای اجرای سیاست نظارتی توسط دولت، اجرای سیاست تامین تجهیزات ایمنی توسط مدیریت معدن و رعایت مقررات توسط کارگران است. این نقطه پایدار ایده‌آل زمانی برآورده می‌شود که سه شرط روبه‌رو دست یابد: ۱- جریمه خالص دولت برای مدیریت معدن و معدنچیان از یارانه پرداختی به آن‌ها بیشتر باشد. ۲- پاداش دریافتی از سوی دولت به مدیریت معدن از درصد پرداختی باقیمانده برای تجهیزات ایمنی برای معدن بیشتر باشد. ۳- پارامتر افزایش بهره‌وری در صورت عدم رعایت از قوانین برای کارگران معدنی کوچکتر از پاداش دریافتی از سوی ناظران باشد. طبق این سه شرط ذینفعان می‌توانند به شرایط ایده‌آل وضعیت تولید ایمنی دست یابند. علاوه بر این، می‌توان گفت به دلیل وابستگی دستاوردهای بازیکنان با یکدیگر هرچه نسبت اولیه استراتژی ناظران بیشتر به سمت اعمال نظارت باشد، زمان همگرایی کارگران معدنی به حالت رعایت از مقررات ایمنی پایدار کوتاه‌تر است.

۷- نتیجه‌گیری

در بازی تکاملی سه جانبه در ابتدا تعامل و توابع دستاورد هر کدام از بازیکنان در سیستم ایمنی معدن با استفاده از جدول‌های بازی تجزیه و تحلیل شد، سپس بعد از ساخت مدل بازی سه جانبه، فرآیند تکامل سیستم ایمنی تحت شرایط مختلف نظارتی مورد بحث قرار گرفت.

با توجه به فرض مساله، جریمه دولتی در صورت انتخاب استراتژی‌های ناایمن در دستاورد عوامل اجرایی یعنی معدنچیان و مدیریت معدن اعمال می‌شود. با شبیه‌سازی مدل بازی تکاملی به این نتیجه خواهیم رسید که رفتار انتخابی عوامل اجرایی عامل مهمی در تعیین میزان دستاورد حاصل شده برای ناظر است. این وابستگی باعث ایجاد تقابل منافع در این بازی شده است و یک پایداری را در نقطه (۰،۱،۱) حاصل می‌کند. این بدان معناست که دولت استراتژی عدم نظارت و مدیران و کارگران معدن به ترتیب استراتژی به کارگیری تجهیزات ایمنی و پیروی از قوانین را انتخاب می‌کنند. مقادیر جریمه به صورت ثابت و به صورت روند صعودی در مدل تکاملی اعمال شد. این روند صعودی باعث تغییر استراتژی بازیکنان اجرایی به سوی استراتژی‌های تامین ایمنی می‌شود و به سرعت، وقوع رفتارهای ناایمن را در معادن کنترل می‌کند. از سوی دیگر، افزایش نرخ یارانه دولتی نیز در کنترل حوادث ایمنی در معادن بسیار موثر است. هنگامی که نرخ یارانه تعیین شده توسط دولت کمتر از ۰٫۵ باشد، اثر انگیزشی به کارگیری تجهیزات ایمنی در معدن توسط مدیریت معدن و پیروی از قوانین و مقررات توسط کارگران، در زمان طولانی‌تری نسبت به نرخ یارانه بالاتر از ۰٫۵ رخ می‌دهد.

۸- مراجع

[1] Li, J., Deng, C. C., Xu, J., Ma, Z., Shuai, P., and Zhang, L. (2023). *"Safety Risk Assessment and Management of Panzhihua Open Pit (OP)-Underground (UG) Iron Mine Based on AHP-FCE, Sichuan Province, China"*. Sustainability, 15(5): 4497. DOI: https://doi.org/10.3390/su15054497.

[2] Sherin, S., Raza, S., and Ahmad, I. (2023). *"Conceptual Framework for Hazards Management in the Surface Mining Industry—Application of Structural Equation*

Modeling". Safety, 9(2): 31. DOI: https://doi.org/10.3390/safety9020031.

[3] Kurniawan Nasution, D., Charloq, and Rujiman (2023). *"The influence of mining safety management system planning on the safety performance of pt. dairi prima mineral in dairi regency"*. International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation, 4(3): 957-60. DOI: http://dx.doi.org/10.54660/.ijmrge.2023.4.3.957-960.

[4] Nguembi, I. P., Yang, L., and Appiah, V. S. (2023). *"Safety and risk management of Chinese enterprises in Gabon's mining industry"*. Heliyon, 9(10): e20721.

[5] Lu, R., Wang, X., Yu, H., and Li, D. (2018). *"Multiparty Evolutionary Game Model in Coal Mine Safety Management and Its Application"*. Complex, 2018: 9620142.

[6] Liu, J., Li, S., Bao, W., and Xu, K. (2022). *"Could the Management System of Safety Partnership Change Miners' Unsafe Behavior?"*. Sustainability, 14(20): 1-14.

[7] Ma, L., Liu, Q., Qiu, Z., and Peng, Y. (2020). *"Evolutionary game analysis of state inspection behaviour for coal enterprise safety based on system dynamics"*. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 28: 100430.

[8] Lu, J., Liu, W., Yu, K., and Zhou, L. (2022). *"The Dynamic Evolution Law of Coal Mine Workers' Behavior Risk Based on Game Theory"*. Sustainability, 14(7): 4015.

[9] Li, Y., Zhang, Y., Dai, H. X., and Zhao, Z. (2020). *"Game Modelling and Strategy Research on Trilateral Evolution for Coal-Mine Operational Safety Production System: A Simulation Approach"*. Complex, 2020: 2685238.

[10] Wang, X., Lu, R., Yu, H., and Li, D. (2019). *"Stability of the Evolutionary Game System and Control Strategies of Behavior Instability in Coal Mine Safety Management"*. Complex, 2019: 6987427.

[11] You, Q., Yu, K., Zhou, L., Zhang, J., Lv, M., and Wang, J. (2023). *"Research on risk analysis and prevention policy of coal mine workers' group behavior based on evolutionary game"*. Resources Policy, 80(2023): 103262.

[12] Sheng, T., Zhang, Y., and Wei, Q. (2011). *"FTA-Based Human Unsafe Behavior Control in Coal Mine Intrinsic Safety Management"*. Advanced Materials Research, 291-294: 3207-3211.

[13] He, H., Xing, R., Han, K., and Yang, J. (2021). *"Environmental risk evaluation of overseas mining investment based on game theory and an extension matter element model"*. Scientific Reports, 11(1): 16364.

[14] Von Neumann, J., and Morgenstern, O. (2007). *"Theory of games and economic behavior"*. Princeton university press, pp. 776.

[15] Nida-Rümelin, J. (2023). *"A theory of practical reason"*. Palgrave Macmillan Cham, 1st Ed., pp. 283. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17319-6.

[16] Ferguson, T. (2013). *"Game Theory"*. Notes for a Course in Game Theory, available at www.gametheory.net (accessed on 2012 Dec. 10) 2013 at UCLA.

[17] Molloy, T. L., Charaja, J. I., Hohmann, S., and Perez, T. (2022). *"Inverse optimal control and inverse noncooperative dynamic game theory"*. Springer International Publishing, pp. 266. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-93317-3.

[18] Ho, E., Rajagopalan, A., Skvortsov, A., Arulampalam, S., and Piraveenan, M. (2022). *"Game Theory in defence applications: a review"*. Sensors, 22(3): 1032.

[19] Aliprantis, C., and Chakrabarti, S. (2000). *"Games and Decision Making"*. New York: Oxford University Press.

[۲۰] موسوی جهرمی، ی.؛ ۱۳۸۸؛ "**مبانی علم اقتصاد**". انتشارات دانشگاه پیام نور.

[۲۱] سوری، ع.؛ ۱۳۸۶؛ "**نظریه بازی‌ها و کاربردهای اقتصادی**". دانشکده علوم اقتصادی، انتشارات نور علم.

[۲۲] احمدی، ا.، معماریانی، ع.؛ ۱۳۸۵؛ "**نظریه بازی**". موسسه انتشاراتی جهان جام جم، تهران.

[23] Ye, M., Li, D., Han, Q.-L., and Ding, L. (2022). *"Distributed Nash equilibrium seeking for general networked games with bounded disturbances"*. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 99: 1-12.

[24] Figueroa, E. (2013). *"The Mining Conflict Game: A Proposal to Disentangle and Settle Mining Conflicts Using Game Theory"*. Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=3313139. DOI: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3313139.

[25] McNamara, J. M., and Leimar, O. (2020). *"Game theory in biology: concepts and frontiers"*. Oxford University Press, USA.

[26] Maschler, M., Zamir, S., and Solan, E. (2020). *"Game theory"*. Cambridge University Press. DOI: https://doi.org/10.1017/CBO9780511794216.

[27] Friedman, D. (1998). *"On economic applications of*

evolutionary game theory". Journal of Evolutionary Economics, 8: 15-43.

---

[1] Evolutionary game theory

[2] Replicator dynamic

[3] MATLAB

[4] Sheng

[5] Nash equilbrium

[6] Fitness