

تخصیص بهینه منابع امنیتی با استفاده از نظریه بازی‌ها

محمدتقی پرتوی^۱

چکیده

امنیت یک نگرانی مهم در سراسر دنیا است. در بیشتر حوزه‌های امنیتی، منابع امنیتی برای حفاظت، محدود هستند. تهدیدات جهانی تروریسم، قاچاق مواد مخدر و سایر جرائم، نیاز به استقرار منابع امنیتی محدود برای به حداکثر رساندن اثربخشی آن‌ها را افزایش داده است. نظریه‌ی بازی‌ها روشی منطقی برای تخصیص منابع امنیتی به اهداف مورد نظر دشمن فراهم می‌کند. نظریه بازی‌ها رفتار ریاضی حاکم بر یک موقعیت رقابتی را مورد بررسی قرار می‌دهد. هدف این مقاله مطالعه مدل بازی‌های استاکلبرگ، اهمیت و کاربرد آن‌ها در تخصیص منابع امنیتی محدود در ایجاد امنیت است. در این مدل ابتدا مدافع راهبرد خود را اتخاذ می‌کند و سپس مهاجم با مشاهده راهبرد مدافع، راهبرد خود را انتخاب می‌کند. مدافع با آگاهی از این موضوع، باید راهبرد بهینه خود را انتخاب کند. در اغلب مسائل امنیتی، مدافع با چند نوع مهاجم با اهداف متفاوت مواجه می‌شود. این بازی‌ها، بازی‌های استاکلبرگ چندهدفی (بازی امنیتی چندهدفی) نامیده می‌شوند که به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفی فرموله می‌شوند. از نظرات خبرگان برای تعیین عایدی‌های بازی استفاده شده است و برای مدل‌سازی عدم قطعیت ناشی از قضاوت خبرگان، نظریه عدم قطعیت به کار برده شده است. سپس روش مجموع وزنی برای حل این نوع بازی‌ها پیشنهاد شده است. در نهایت کاربردی از مدل حاصل در ایجاد امنیت در مرزها بیان شده است.

واژگان کلیدی: نظریه‌ی بازی، بازی امنیتی، بهینه‌سازی چندهدفی، نظریه عدم قطعیت، راهبرد بهینه.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

^۱ عضو هیأت علمی دانشگاه فرماندهی و ستاد ارتش جمهوری اسلامی ایران

Optimal Allocation of Security Resources by Using Games Theory

Partovi M.T¹

ABSTRACT

Security is one of the most important concerns around the world. In most fields of security, accessibility to security resources for protection is limited. Some important issues, including universal threats of terrorism, drug-smuggling, has increased our requirement of settling limited security resources in order to maximize the efficiency of resources. Game theory provides a logical method in order for allocating security resources to prevent enemies' targets. In addition, it helps us to analyze a competitive situation using a mathematical approach. The aim of this paper is to study Stackleberg games model and its applications in allocating limited security resources. In this model, first, the defender chooses its strategy and then the attacker, with information of what the defender chose, chooses its strategy. Now, the defender has to make its decision. In most security problems, the defender maybe confronts two or more different attackers which they have their own targets. These games are called multi-objective Stackelberg Games which is formulated as multi-objective optimization problem. For determining the payoffs of each player, the experts' opinions are employed and also for modelling the uncertainty due to the experts' opinions, the theory of uncertainty is used. Then the method of weighted summation for this type of games has been used. Finally, an application of this model for providing security in borders is expressed.

Keywords: Game Theory, Security Game, Multi-objective Optimization, Uncertainty Theory, Optimal Strategy.

¹ Faculty member of Aja Command and Staff University

۱ - مقدمه

یکی از مسائل مهم حوزه دفاع، استفاده بهینه از منابع امنیتی محدود است. کارشناسان حوزه دفاع همواره به دنبال کشف راه‌حلی برای تخصیص بهینه منابع امنیتی به اهداف مورد نظر هستند، به طوری که بیشترین اثربخشی را داشته باشند. برای این مسأله ممکن است روش‌های مختلفی ارائه شده باشد، اما با در نظر گرفتن راهبرد دشمن و مشاهده راهبرد مدافع توسط آن‌ها، مسأله مورد نظر پیچیده‌تر خواهد شد. در این مسأله، ابتدا مدافع راهبرد خود را انتخاب می‌کند و سپس مهاجمان با مشاهده راهبرد مدافع به انتخاب راهبرد خود خواهند پرداخت. همچنین مدافع در همان ابتدا می‌داند که پس از انتخاب راهبردش، مهاجمان آن را مشاهده خواهند کرد، بنابراین باید راهبرد خود را با این آگاهی انتخاب کند که به نظر می‌رسد مدل‌سازی آن کمی پیچیده باشد. این‌که چگونه این مسأله باید مدل‌سازی شود و در نهایت راهبرد بهینه مدافع انتخاب شود، موضوع اصلی تحقیق می‌باشد.

در زندگی روزمره با موقعیت‌های مختلف تصمیم‌گیری مواجه می‌شویم، چگونه وقتی نمی‌دانیم طرف مقابل چه فکری می‌کند، بهترین تصمیم را بگیریم؟ نظریه بازی‌ها شاخه‌ای از تحقیق در عملیات است که رفتار ریاضی حاکم بر یک موقعیت راهبردی را مورد بررسی قرار می‌دهد. پس از انتشار کتاب نظریه بازی‌ها و رفتار اقتصادی توسط وان نیومن و مورگنسترن [1]، نظریه بازی به سرعت رشد یافت و کاربرد وسیعی در علوم مختلف پیدا کرد. کاربرد نظریه بازی‌ها و اهمیت آن در علوم اجتماعی به سرعت رشد یافت. اکنون نظریه بازی به‌طور گسترده در روان‌شناسی، فلسفه، علوم سیاسی، جامعه‌شناسی و اقتصاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین نظریه بازی‌ها برای تحلیل روابط بین‌الملل به ویژه در کشورهای با آرمان‌ها و منافع متضاد به کار گرفته می‌شود. سرهنگ ایور هاپوود [2] در مقاله خود اهمیت نظریه بازی‌ها را در تصمیم‌گیری فرماندهی نشان داد. او نبردهای مختلفی از جنگ جهانی دوم را از دید نظریه بازی‌ها بررسی کرد و نتیجه گرفت که تصمیم رهنامه نظامی مشابه با جواب به دست آمده از نظریه بازی‌ها است. ارزیابی سرهنگ هاپوود انجمن تحقیق در عملیات را تشویق کرد تا روش‌های نظریه بازی را بیشتر مورد بررسی قرار دهند و در تصمیم‌گیری‌های نظامی از این نظریه استفاده کنند. در دهه اخیر نظریه بازی‌ها را به‌طور گسترده در مسائل نظامی و امنیتی مورد استفاده قرار داده‌اند (برای اطلاعات بیشتر مرجع [3] را ببینید). رزم‌نامه دزد و پلیس [4]، امنیت شبکه‌های رایان‌های [5]، سیستم دفاع موشکی ضدبالستیک [6] و تروریسم [7] از جمله این کاربردها هستند. اخیراً اقدامات کاربردی در این زمینه در کشور آمریکا و در شهرهای لس‌آنجلس و نیویورک صورت گرفته است [3]. در حالت کلی، نظریه بازی‌ها به دو دسته بازی طبقه‌بندی می‌شود: بازی‌های همکارانه و بازی‌های غیرهمکارانه. بیگدلی و همکاران در کارهای قبلی بازی‌های ماتریسی و دو ماتریسی را در محیط فازی مورد بررسی قرار دادند و موقعیت آورانسه در جنگ جهانی دوم را به صورت یک بازی ماتریسی با عایدی‌های فازی مدل‌سازی کردند و نشان دادند که راهبردهای به دست آمده از روش

پیشنهادی با تصمیم رهنامه آمریکا مطابقت دارد [8]. همچنین بازی مذاکرات هسته‌ای بین دو کشور را به صورت یک بازی دوماتریسی چندهدفی مدل‌سازی کرده و یک روش برای محاسبه‌ی نقاط تعادل بهینه پارتوی ضعیف آن ارائه دادند [8]. تلاش‌های دیگر آن‌ها را می‌توانید در منابع [8] مشاهده کنید.

در این مقاله، بازی‌های امنیتی چندهدفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدل‌سازی بازی از قضاوت کارشناسان خیره در اعمال عایدی‌های بازیکنان برای هر پیامد بازی استفاده می‌شود. با توجه به فهم مبهم کارشناسان و اطلاعات نادقیق آن‌ها، مدل بازی شامل عدم قطعیت خواهد بود که برای مدل‌سازی آن، نظریه عدم قطعیت پیشنهاد می‌شود. ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی می‌شود. در بخش مبانی نظری مقدماتی از بازی‌های استاکلبرگ و بازی‌های امنیتی با یک مثال شرح داده می‌شود. همچنین خلاصه‌ای از نظریه عدم قطعیت به کار رفته در مقاله شرح داده می‌شود. در بخش بعد، بازی امنیتی چندهدفی ناقطعی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، یک کاربرد از این نوع بازی‌ها در زمینه‌ی امنیت مرزها ارائه می‌شود، و این‌که نتیجه‌گیری مقاله در بخش آخر ارائه می‌گردد.

۲- مبانی نظری

بازی‌های استاکلبرگ بیزی و بازی‌های امنیتی

در این بخش، مقدماتی از بازی‌های استاکلبرگ بیزی^۱ و بازی‌های امنیتی^۲ بیان می‌شود. قبل از پرداختن به بازی‌های استاکلبرگ بیزی، بازی‌های استاکلبرگ شرح داده می‌شود. بازی‌های استاکلبرگ که بازی‌های رهبر-پیرو نیز نامیده می‌شوند برای اولین بار در سال ۱۹۵۲ میلادی توسط استاکلبرگ و براساس برخی از پدیده‌های انحصاری‌سازی در اقتصاد ارائه شد. در بازی‌های استاکلبرگ یک بازیکن به‌عنوان رهبر (پیشرو)^۳ و بقیه به‌عنوان دنباله‌رو (پیرو)^۴ عمل می‌کنند. بنابراین مسئله در این حالت در واقع یافتن راهبرد بهینه برای رهبر است با این فرض که پیروان مطابق با راهی منطقی که براساس راهبرد رهبرشان است تابع هدف خود را بهینه می‌کنند. رهبر باید بداند که دنباله‌رو اعمال او را مشاهده می‌کند. یک دنباله‌رو نباید به هیچ وجه یک پیشرو غیراستاکلبرگ را لحاظ کند و پیشرو باید این را بداند. اولین حرکت به معنای بارزترین تعهد است. اگر پیشرو حرکتی داشته باشد، در این صورت نمی‌تواند آن را پس بگیرد و خنثی کند و این به معنای تعهد به یک عمل است. علاقمندیم تا این بازی‌ها را با یک مثال امنیتی [3] شرح دهیم. در یک حوزه‌ی امنیتی یک مدافع همواره باید از یک مجموعه از اهداف با توجه به منابع امنیتی محدود محافظت کند در حالی که یک مهاجم قادر است از

1. Bayesian Stackelberg Games

2. Security games

3. Leader

4. Follower

راهبردهای مدافع آگاهی یابد و بعد از تصمیمی هوشمندانه حمله کند. در صورتی که مدافع را در نقش پیشرو و مهاجم را در نقش دنباله‌رو فرض کنیم، این دقیقاً با بازی استاکلبرگ متناسب است. یک فرودگاه ساده با دو پایانه را در نظر بگیرید. فرض کنید تنها یک واحد پلیس امنیتی در این فرودگاه باشد و یک نوع دشمن داشته باشند. فرض می‌کنیم که پایانه ۱ مهم‌تر از پایانه ۲ باشد. ماتریس بازی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

جدول (۱) ماتریس بازی

مهاجم

	پایانه ۱	پایانه ۲
مدافع	پایانه ۱	پایانه ۲
	۵ و (-۳)	۱ و (-۱)
	۵ و (-۵)	۲ و (-۱)

اقداماتی که پلیس می‌تواند اتخاذ کند در سطرها و اقدامات دشمن در ستون‌های ماتریس نمایش داده شده است یعنی پلیس می‌تواند یکی از دو پایانه را برای محافظت انتخاب کند و دشمن نیز یکی از دو پایانه را برای حمله در نظر خواهد گرفت. عایدی‌های حاصل از انتخاب جفت راهبردها در ماتریس بازی نمایش داده شده است و می‌توان نتیجه انتخاب جفت راهبردها را با هم مقایسه کرد. توجه داشته باشید که عایدی‌ها توسط کارشناسان حوزه امنیت تعیین می‌شود که ممکن است نشان‌دهنده سود یا هزینه و ... باشند. برای به دست آوردن این داده‌ها می‌توان پرسشنامه‌ای را با توجه به مسئله موردنظر تهیه کرد و با پاسخ دادن آن‌ها توسط متخصصین حوزه، نتیجه انتخاب راهبردها را کمی‌سازی کرد. با توجه به فرض مهم‌تر بودن پایانه ۱ نسبت به ۲، اگر پلیس از پایانه ۱ محافظت کند، دشمن با این تصمیم پلیس به پایانه ۲ حمله می‌کند که یک شکست برای پلیس خواهد بود. همچنین حالت‌های دیگر را می‌توان از ماتریس بازی مورد بررسی قرار داده و نتیجه انتخاب راهبردها را بررسی کرد. حال فرض کنید اقدامات پلیس به صورت تصادفی باشد؛ برای مثال پلیس در ۶۰٪ روزها در پایانه ۱ و در ۴۰٪ روزها در پایانه ۲ حضور داشته باشد. واضح است که در این صورت پلیس نتیجه بهتری خواهد گرفت؛ زیرا یک دشمن با رفتار هوشمندانه خواهد دانست که پلیس ۶۰٪ روزها در پایانه ۱ و ۴۰٪ روزها در پایانه ۲ حضور دارد ولی نمی‌تواند تشخیص دهد که فردا در کدام پایانه حضور دارند. در این نوع بازی راهبردهای پلیس به صورت تصادفی انتخاب می‌شود که آن‌ها را راهبردهای آمیخته پلیس می‌نامند. سؤال کلیدی در این‌جا این است که آیا تقسیم ۶۰٪-۴۰٪ راهکار بهینه برای تقسیم منابع امنیتی مدافع است یا این تقسیم باید به صورت دیگری باشد.

حال بازی استاکلبرگ بیزی را شرح می‌دهیم. در بازی‌های دارای عدم قطعیت بیزی با چند نوع دشمن سروکار خواهیم داشت. در مثال بالا ممکن است یک دشمن پایانه ۱ را مهم‌تر از پایانه ۲ بداند و دشمنی دیگر پایانه ۲ را مهم‌تر بداند و یا برای یک دشمن دو پایانه اهمیت یکسانی داشته باشند، بنابراین یک ماتریس عایدی نخواهیم داشت در حقیقت باید با در نظر گرفتن دشمنان مختلف ماتریس‌های عایدی را تشکیل دهیم.

در بازی‌های امنیتی به دنبال یافتن تعادل استاکلبرگ قوی هستیم. در این تعادل فرض می‌شود که دشمن آگاهی کاملی از راهبرد آمیخته‌ی مدافع دارد و با پاسخ کاملاً منطقی در مقابل راهبرد مدافع به دنبال بیشینه‌سازی مطلوبیت مورد انتظارش است. در یک تعادل استاکلبرگ مدافع انگیزه‌ای برای تغییر راهبردش ندارد چون راهبردش بهینه است و مهاجم انگیزه‌ای برای تغییر پاسخش ندارد زیرا پاسخ بهینه در برابر راهبرد مدافع است.

نظریه عدم قطعیت

مطالب مربوط به این زیربخش از مرجع [9] ارایه شده است.

فرض کنید Γ یک مجموعه ناتهی باشد و L یک σ -جبر روی Γ باشد. اگر Γ شمارش‌پذیر باشد، L مجموعه توانی Γ است. اگر Γ شمارش‌ناپذیر باشد (مانند $[0,1]$ ، Γ)، L جبر بورل است. هر عنصر L یک پیشامد نامیده می‌شود. اندازه غیرقطعی تابعی از L به $[0,1]$ است. تابع M روی L را یک تابع اندازه‌پذیر غیرقطعی گویند هرگاه در چهار اصل موضوعه زیر صدق کند:

$$1- \quad M\{\Gamma\} = 1 \quad (\text{نرمال بودن}) \text{ اندازه غیرقطعی مجموعه } \Gamma \text{ برابر یک است، یعنی}$$

$$2- \quad M\{\Lambda\} + M\{\Lambda^c\} = 1 \quad (\text{خود دوگانی}) \text{ برای هر پیشامد } \Lambda, \text{ داریم}$$

$$3- \quad M\{\cup_{i=1}^{\infty} \Lambda_i\} \leq \sum_{i=1}^{\infty} M\{\Lambda_i\}, \quad \{\Lambda_i\} \text{ پیشامدهای شمارا از پیشامدهای}$$

$$4- \quad M\{\Lambda_1\} \leq M\{\Lambda_2\} \quad (\text{یکنوایی}) \text{ هرگاه } \Lambda_1 \subset \Lambda_2 \text{ داریم}$$

سه‌تایی (Γ, L, M) یک فضای عدم قطعیت نامیده می‌شود. به‌منظور به‌دست آوردن یک اندازه غیرقطعی از پیشامدهای مرکب، اندازه غیرقطعی حاصل‌ضربی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

فرض کنید (Γ_k, L_k, M_k) فضاهای عدم قطعیت به ازای $K = 1, 2, \dots$ باشند، در نظر بگیرید $\Gamma = \Gamma_1 \times \Gamma_2 \times \dots$ و $L = L_1 \times L_2 \times \dots$ ؛ اندازه غیرقطعی حاصل‌ضربی روی σ -جبر ضربی L به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M\left\{\prod_{k=1}^{\infty} \Lambda_k\right\} = \bigwedge_{k=1}^{\infty} M_k\{\Lambda_k\} = \min_k M_k\{\Lambda_k\}$$

یک متغیر غیرقطعی، یک تابع اندازه‌پذیر ξ از یک فضای عدم قطعیت (Γ, L, M) به \mathbb{R} است. در عمل به‌منظور شرح یک متغیر غیرقطعی، مفهوم توزیع عدم قطعیت به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi(x) = M\{\xi \leq x\} \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

به عنوان نمونه تابع زیگزاگ $Z(a, b, c)$ یک تابع عدم قطعیت است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{2(b-a)} & a \leq x \leq b \\ \frac{x+c-2b}{2(c-b)} & b \leq x \leq c \\ 1 & x \geq c \end{cases}$$

که در آن a, b, c اعداد حقیقی و $a < b < c$ می باشد.

یکی از مفاهیم اصلی در نظریه عدم قطعیت مفهوم امید ریاضی یک متغیر غیرقطعی است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$E[\xi] = \int_0^{\infty} M\{\xi \geq r\} dr - \int_{-\infty}^0 M\{\xi \leq r\} dr$$

که در آن باید حداقل یکی از انتگرال ها متناهی باشد. به راحتی امید ریاضی متغیر غیرقطعی زیگزاگ $Z(a, b, c)$ به صورت $\frac{a+2b+c}{4}$ به دست می آید.

اگر ξ و η دو متغیر غیرقطعی مستقل با مقادیر موردانتظار متناهی باشند، به ازای اعداد حقیقی a و b داریم $E[a\xi + b\eta] = aE[\xi] + bE[\eta]$

یک روش رتبه بندی متغیرهای غیرقطعی را می توان به کمک مقادیر موردانتظار آن ها به صورت زیر بیان کرد:

$$\xi \geq \eta \iff E(\xi) \geq E(\eta)$$

۳- بازی امنیتی چندهدفی

بازی امنیتی چندهدفی یک بازی چندنفره بین یک مدافع و n نوع مهاجم است. مدافع سعی دارد تا با استفاده از m منبع یکسان امنیتی از اهداف $T = \{t_1, t_2, \dots, t_p\}$ محافظت کند که m منبع به صورت پیوسته در بین اهداف توزیع شده است. این مسئله با مدل استاکلبرگ سازگار است که در آن مدافع راهبرد خود را انتخاب کرده و مهاجمان با مشاهده این انتخاب، بهترین پاسخ را می دهند. راهبرد مدافع را می توان به صورت یک بردار پوشش $C = (c_{t_1}, \dots, c_{t_p}) \in C$

در آن به ازای $k = 1, \dots, p$ مقدار پوشش داده شده از هدف t_k است و احتمال موفقیت مدافع را در جلوگیری از هر حمله ای به هدف t_k نشان می دهد. در این مسئله فرض می شود که هزینه پوشش هر هدف با منابع در دسترس، یکسان است. تقسیم این منابع به صورت محض برای مدافع مناسب نخواهد بود زیرا در این حالت ممکن است برخی اهداف را پوشش ندهد و مهاجمان از این نقطه

ضعف برای حمله به این اهداف استفاده کنند؛ بنابراین مدافع راهبردهای آمیخته را در نظر می‌گیرد که در آن منابع به مجموعه بزرگ‌تری از اهداف تخصیص می‌یابند. این در حالی است که مهاجمان قادرند این راهبردهای آمیخته را مشاهده کنند. فضای راهبرد مدافع به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$C = \left\{ c = (c_{t_1}, \dots, c_{t_p}) \mid 0 \leq c_{t_k} \leq 1, k = 1, \dots, p, \sum_{t_k \in T} c_{t_k} \leq m \right\}$$

راهبرد آمیخته برای مهاجم نوع i با بردار $a_i = (a_i^{t_1}, a_i^{t_2}, \dots, a_i^{t_p})$ نمایش داده می‌شود که در آن $a_i^{t_k}$ احتمال حمله مهاجم نوع i به هدف t_k است.

با انتخاب هر راهبرد توسط مدافع و مهاجم مقادیر عایدی نصیب هر یک از بازیکنان می‌شود. تعیین این مقادیر در دنیای واقعی شامل عدم قطعیت در اطلاعات است که می‌توان از نظریه عدم قطعیت برای مدل‌سازی آن استفاده کرد.

فرض کنید $\tilde{U}_i^{c,d}(t_k)$ نشان‌دهنده‌ی مطلوبیت مدافع باشد زمانی که t_k توسط مهاجم نوع i انتخاب شده باشد و از طرف مدافع پوشش داده شده باشد، این مطلوبیت به صورت یک متغیر غیرقطعی نمایش داده می‌شود. اگر t_k پوشش داده نشده باشد جریمه مدافع با متغیر غیرقطعی $\tilde{U}_i^{u,d}(t_k)$ نمایش داده می‌شود. مطلوبیت مهاجم به طور مشابه با متغیرهای غیرقطعی $\tilde{U}_i^{c,a}(t_k)$ و $\tilde{U}_i^{u,a}(t_k)$ نمایش داده می‌شود. در حقیقت در این مدل بازی برای هر هدف t_k ، چهار عایدی وجود دارد که دو عایدی برای مدافع در دو حالت پوشش و عدم پوشش هدف است و دو عایدی برای مهاجم نوع i در این دو حالت می‌باشد.

برای یک نمایه‌ی راهبرد $\langle c, a_i \rangle$ در بازی بین مدافع و مهاجم نوع i ، مطلوبیت‌های مورد انتظار برای دو بازیکن به ترتیب به صورت زیر می‌باشد:

$$\tilde{U}_i^d(c, a_i) = \sum_{t_k \in T} a_i^{t_k} \tilde{U}_i^d(c_{t_k}, t_k), \quad (1)$$

$$\tilde{U}_i^a(c, a_i) = \sum_{t_k \in T} a_i^{t_k} \tilde{U}_i^a(c_{t_k}, t_k), \quad (2)$$

که در آن

$$\tilde{U}_i^d(c_{t_k}, t_k) = c_{t_k} \tilde{U}_i^{c,d}(t_k) + (1 - c_{t_k}) \tilde{U}_i^{u,d}(t_k) \quad (3)$$

$$\tilde{U}_i^a(c_{t_k}, t_k) = c_{t_k} \tilde{U}_i^{c,a}(t_k) + (1 - c_{t_k}) \tilde{U}_i^{u,a}(t_k) \quad (4)$$

به ترتیب عایدی دریافت شده مدافع و مهاجم نوع i هستند در صورتی که به هدف t_k حمله شده باشد و به مقدار c_{t_k} پوشش داده شده باشد.

مفهوم جواب استاندارد برای یک بازی استاکلیبرگ دو نفره، تعادل استاکلیبرگ قوی است که مدافع با انتخاب یک راهبرد بهینه براساس این فرض که مهاجم قادر به مشاهده‌ی راهبردش می‌باشد و یک

پاسخ بهینه را با قطع روابط به نفع مدافع^۱ انتخاب خواهد کرد، به حرکت اول متعهد می‌شود. به عبارت دیگر در یک تعادل استاکلبرگ قوی، مهاجم هدفی را انتخاب می‌کند که بیشترین عایدی را برای مدافع دارد. مهاجم این هدف را از مجموعه‌ی شامل تمام اهدافی انتخاب می‌کند که با توجه به راهبرد مدافع بیشترین عایدی را برای مهاجم نتیجه می‌دهند. فرض کنید $\tilde{U}_i^d(c)$ و $\tilde{U}_i^a(c)$ به ترتیب نشان‌دهنده عایدی دریافت شده توسط مدافع و مهاجم نوع i باشند زمانی که مدافع پوشش C را انتخاب کرده و مهاجم با قطع رابطه به نفع مدافع به بهترین هدف حمله می‌کند (با مشخص شدن بهترین هدف، عایدی‌ها تابعی برحسب C خواهند شد؛ یعنی با یک روند پسر و ابتدا راهبرد بهینه مهاجم را برحسب C محاسبه می‌کنیم و سپس راهبرد بهینه‌ی مدافع را به دست می‌آوریم).

بنابراین با چند نوع مهاجم، اهداف مدافع را می‌توان به صورت بردار $\tilde{U}^d(c) = (\tilde{U}_1^d(c), \dots, \tilde{U}_n^d(c))$ نمایش داد.

با استفاده از معیار رتبه‌بندی براساس مقدار مورد انتظار، بازی امنیتی چندهدفی منجر به مسئله بهینه‌سازی چندهدفی زیر می‌شود:

$$\max_{c \in C} (E(U_1^d(c)), \dots, E(U_n^d(c))) \quad (5)$$

در این مسئله یک هدف متفاوت برای هر نوع مهاجم متناظر شده است. زیرا حفاظت در برابر انواع مهاجمان ممکن است به عایدی‌های متفاوتی برای مدافع منجر شود که مستقیماً قابل مقایسه نیستند. حل چنین مسئله بهینه‌سازی چندهدفی اساساً متفاوت از حل مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفی است. جواب‌های این مسئله را جواب‌های بهینه پارتوی امنیتی نامیده و در ادامه تعریف می‌کنیم. قبل از آن، چند نماد را به صورت زیر معرفی می‌کنیم.

برای دو بردار $u, u' \in \mathbb{R}^n$

$$\begin{aligned} u = u' &\Leftrightarrow u_i = u'_i, i = 1, \dots, n; \\ u \leq u' &\Leftrightarrow u_i \leq u'_i, i = 1, \dots, n; \\ u < u' &\Leftrightarrow u_i < u'_i, i = 1, \dots, n; \\ u \leq u' &\Leftrightarrow u_i \leq u'_i, \quad u \neq u'. \end{aligned}$$

اگر بخواهیم مفهوم جواب بهینه برنامه‌ریزی خطی تک‌هدفی را برای این مسئله نیز به کار ببریم، تعریف زیر را داریم:

تعریف: $c^* \in C$ را جواب بهینه کامل مسئله برنامه‌ریزی خطی چندهدفی موردانتظار گوئیم هرگاه برای هر $c \in C$

$$E(U_i^d(c^*)) \geq E(U_i^d(c)), \quad i = 1, \dots, n.$$

¹ Breaking ties in favor of the defender

در حالت کلی چنین جوابی برای مسائل برنامه‌ریزی چندهدفی وجود ندارد. زیرا در این مسائل چندین هدف به‌طور هم‌زمان بیشینه می‌شوند و اهداف معمولاً در تقابل یکدیگرند. بنابراین جواب بهینه پارتو به‌صورت زیر برای این مسائل تعریف می‌شود:

تعریف: $c^* \in C$ را جواب بهینه پارتوی مسئله برنامه‌ریزی چندهدفی موردانتظار گوئیم هرگاه نقطه‌ای مانند $c \in C$ موجود نباشد به‌طوری‌که:

$$E(U_i^d(c)) \geq E(U_i^d(c^*)) \quad i = 1, \dots, n.$$

برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفی (۵) روش‌های مختلفی بیان شده است که با توجه به شرایط مسئله و همکاری تصمیم‌گیرندگان در روند حل مسئله، یکی از این روش‌ها را می‌توان به‌کار برد. ما روش مجموع وزنی را برای حل این مسائل پیشنهاد می‌کنیم. در این روش ابتدا از مدافع خواسته می‌شود تا احتمال رویارویی با هر نوع مهاجم را مشخص کند. پس از بیان این مقادیر احتمال، مسئله را به‌صورت زیر خواهیم داشت که یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفی است و به راحتی با روش سیمپلکس قابل حل است.

$$\underset{c \in C}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^n w_i E(U_i^d(c)) \quad (6)$$

که در آن وزن w_i به ازای $i = 1, \dots, n$ نشان‌دهنده احتمال رویارویی مدافع با مهاجم نوع i ام است. با حل این مسئله به کمک نرم‌افزار لینگو جواب بهینه پارتوی (کارآی) مدافع به‌دست می‌آید که نشان‌دهنده نحوه تخصیص منابع امنیتی به اهداف موردنظر می‌باشد.

۴- کاربرد بازی امنیتی چندهدفی در امنیت مرزها

حوزه‌های امنیتی مختلفی در جهان واقعی وجود دارد که در زمان تصمیم‌گیری روی یک سیاست امنیتی چندین هدف را مدنظر قرار می‌دهند. در این بخش می‌خواهیم یک کاربرد از بازی‌های امنیتی چندهدفی را برای تصمیم‌گیری در زمینه‌ی حفاظت از مرزهای کشور ارائه دهیم. مناطق مرزی یکی از نقاط حساس کشور به‌شمار می‌روند. شناخت تأثیر عوامل اجتماعی، فرهنگی، سیاسی و اقتصادی بر امنیت این مناطق از اساسی‌ترین نکات در درک آسیب‌پذیری‌های امنیتی به‌منظور جلوگیری از هرگونه تنش و کنش‌های ضدامنیتی به‌شمار می‌رود. جمهوری اسلامی ایران به لحاظ موقعیت در یکی از حساس‌ترین مناطق جهان واقع گردیده است. کشوری که از تحولات محیط پیرامونی بیشترین تأثیرپذیری را دارد و متقابلاً یکی از بازیگران مؤثر بوده است. با توجه به گسترده بودن مسئله، با وجود توانایی اجرایی شدن آن، تنها به بیان مسئله به‌صورت محدود اکتفا می‌کنیم؛ زیرا این مسئله از دیدگاه نویسندگان و به‌صورت محدود و با هدف نشان دادن کاربرد بازی‌های امنیتی درنظر گرفته شده است؛

در صورتی که ممکن است اهداف و پارامترهای بیشتری از دیدگاه امنیتی و نظامی درگیر شوند. تدابیر امنیتی در مرزهای کشور در بخش‌های مختلف ممکن است متفاوت باشد. به‌عنوان مثال در مرزهای شرقی کشور ممکن است اتفاقاتی رخ دهد که در مرزهای غربی رخ نمی‌دهند؛ بنابراین تصمیماتی که در این مرزها گرفته می‌شود ممکن است به عواملی با وزن‌های متفاوت یا عوامل کاملاً متفاوت از هم وابسته باشند. به‌عنوان مثال در مرزهای شرقی بسیاری از جریان‌های مذهبی و طایفه‌های استان سیستان و بلوچستان، تکیه بر اقوام و رویکرد بومی‌گرایی را یکی از راه‌های ایجاد امنیت و کمک به رشد و توسعه استان می‌دانند. برخی با بیان این‌که رابطه اقتصادی منطقه بر امنیت آن سایه می‌اندازد، می‌گویند باید تدابیری اندیشیده شود تا همزمان هم مسائل امنیتی، نظامی و انتظامی در منطقه دنبال شود و هم رفاه و آسایش مردم منطقه و مرزداران ارتقاء یابد. به‌عنوان مثالی دیگر تدابیر امنیتی که به‌صورت موقت در روزهای قبل و بعد از اربعین در نظر گرفته می‌شود تنها در برخی مرزهای غربی کشور اتفاق می‌افتد. برخی از مشکلاتی که عوامل امنیتی در این روزها با آن درگیر می‌شوند عبارتند از: عبور افرادی از مرز بدون داشتن گذرنامه، عبور مجرمان و تروریست‌ها. در حالت کلی اگر سیستم امنیتی کشورمان را به‌عنوان مدافع در بازی امنیتی در نظر بگیریم واضح است که دشمنان مختلفی در حفاظت از مرزها دارد از جمله تروریست‌ها، افرادی که کالا قاچاق می‌کنند، افرادی که مواد مخدر قاچاق می‌کنند، افرادی که بدون داشتن گذرنامه و به‌صورت غیرقانونی می‌خواهند از کشور خارج یا به کشور وارد شوند و غیره. راه‌کارهای مختلفی برای مقابله با این دشمنان وجود دارد. به‌عنوان مثال راهبردی که در مقابل افراد بدون گذرنامه اتخاذ می‌شود با راه‌کاری که برای تروریست‌ها در نظر گرفته می‌شود متفاوت است. همچنین ممکن است با اتخاذ یک راهبرد در برابر یک دشمن، دشمن دیگر نیز تا حدی کنترل شود. مدافع می‌تواند هریک از راهبردهای خود را که توسط گروه تحلیل‌گران سیاسی و نظامی پیشنهاد می‌شوند انتخاب کند و یا این‌که راهبردهای آمیخته را در مقابل این دشمنان به کار برد؛ بنابراین با توجه به این‌که یک مدافع (سیستم امنیتی کشور) باید از حملات مهاجمان مختلف به اهداف موردنظر جلوگیری کند، این مسئله را می‌توان به‌صورت یک بازی امنیتی چندهدفی در نظر گرفت. برای ساخت این مدل نیاز داریم تا عایدی‌های بازی و تاکتیک‌های مختلف دفاعی و حملات احتمالی را مشخص کنیم که این کار می‌تواند به کمک متخصصین مسائل امنیتی صورت گیرد. با توجه به مطالب بخش قبل، برای حل این مسئله با یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی روبه‌رو خواهیم شد که روش‌های متفاوتی برای حل این نوع مسئله وجود دارد و روش حل را می‌توان با توجه به همکاری‌های سیستم امنیتی انتخاب کرد. با حل این مسئله راهبردهای آمیخته‌ای را می‌یابیم که راهبردهای بهینه پارتوی امنیتی مدافع نامیده می‌شوند؛ به این معنی که راهبرد دیگری را نمی‌توانید بیابید که در تمامی اهداف به خوبی آن‌ها عمل کرده و حداقل در یک هدف بهتر از آن‌ها باشند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بازی‌های امنیتی چندهدفی در محیط عدم قطعیت، اهمیت و کاربرد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این مسائل، ابتدا مدافع راهبرد خود را اتخاذ می‌کند و سپس مهاجمان با مشاهده راهبرد حریف، راهبرد خود را انتخاب می‌کنند. مدافع در انتخاب راهبرد خود می‌داند که پس از اتخاذ توسط مهاجمان مشاهده خواهد شد؛ بنابراین باید این مهم را در انتخاب راهبرد خود مدنظر قرار دهد. با استفاده از این مدل می‌توان تخصیص بهینه منابع امنیتی محدود را تعیین کرد. در این مدل پس از بررسی راهبردهای مدافع و مهاجم، عایدی‌های آن‌ها توسط خبرگان حوزه مشخص می‌شود. با توجه به عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان، از نظریه عدم قطعیت در بیان این عایدی‌ها استفاده شد و جواب مدل بر این اساس تعریف گردید. روش مجموع وزنی برای یافتن نقطه تعادل کارآی مورد انتظار پیشنهاد شد. نمونه‌ای از کاربرد مدل در ایجاد امنیت در مرزها بیان شد.

تعدادی از ویژگی‌ها و قابلیت‌های مدل پیشنهادی به شرح موارد زیر قابل برشماری است:

- ۱) تحلیل و بررسی راهبردهای مهاجم و مدافع
 - ۲) بررسی خروجی‌های حاصل از ارایه راهبردهای دو طرف
 - ۳) استفاده از نظریه بازی برای مدل‌سازی موقعیت رقابتی
 - ۴) استفاده از نظریه عدم قطعیت در مدل‌سازی اطلاعات نادقیق
 - ۵) تصادفی‌سازی راهبردها
 - ۶) استفاده از بهینه‌سازی چندهدفی در محاسبه نقطه تعادل کارا
- با توجه به این‌که بازی‌های امنیتی به صورت عملی در کشورهای مختلف در حال اجرا است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که از این مدل‌ها در تحلیل مسائل امنیتی کشور به صورت کارآمد و مؤثر استفاده شود.

مراجع

- [۱] Neumann J. V. and Morgenstern O. (1944). "Theory of Games and Economic Behavior" Wiley, New York.
- [۱] Haywood O. G. (1989). "Military Decision and Game Theory" Wiley, Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 2, No. 4, PP 365-385.
- [۲] Tambe M. (2012). "Security and game theory, algorithms, deployed systems, lessons learned" Cambridge university press.
- [۳] Gatti N. (2008). "Game Theoretical Insights in Strategic Patrolling: Model and Algorithm in Normal-Form" in ECAI-08, pp. 403-407.
- [۴] Lye K and Wing J. M. (2005). "Game Strategies in Network Security" International Journal of Information Security, vol. 4, no. 1-2, pp.71-86.
- [۵] Brown M., An B., Kiekintveld C., Ordóñez F. and Tambe M. (2014). "An extended study on multi-objective security games" Auton Agent Multi-Agent Syst, 28:31-71.
- [۶] Sandler T. and D. G. A. M, (2003). "Terrorism and Game Theory" Simulation and Gaming, vol. 34, no. 3, pp. 319-337.
- [۸] Bigdeli H., hassanpour H., Tayyebi J. (2016). "The optimistic and pessimistic solutions of single and multiobjective matrix games with fuzzy payoffs and analysis of some of military problems" Defence Sci & Tech, Accepted, (In Persian).
- [۹] Liu, B. (2007). Uncertainty theory (2nd ed.). Berlin: Springer.
- [۱۰] Owen G. (1995). "Game Theory" Academic Press, San Diego, Third Edition.
- [۱۱] Sakawa M. (1993). "Fuzzy sets and interactive multiobjective optimization" Plenum press, New York and London.
- [۱۲] Sakawa M. and Nishizaki I. (2009). "Cooperative and Noncooperative Multi-Level Programming" Springer, New York and London.