

حل بازی‌های امنیتی چندهدفی با عایدی‌های بازه‌ای

محمدرضا محمدی تودشکی^۱، سهیل زهرایی^۲

چکیده

امنیت یکی از پارامترهای کلیدی در هر جامعه است که تاثیر مستقیم در فرآیند آن جامعه خواهد داشت. در بیشتر حوزه‌های امنیتی، منابع امنیتی برای حفاظت و ایجاد امنیت کامل، محدود هستند. یکی از راه‌های حل این مشکل استفاده از نظریه بازی‌ها است. نظریه بازی‌ها روشی منطقی برای تخصیص منابع امنیتی به اهداف مورد نظر دشمن فراهم می‌کند. هدف این مقاله بررسی بازی‌های امنیتی، اهمیت، مدل‌سازی، حل و کاربرد آن‌ها در تصمیم‌گیری و تصمیم‌سازی دفاعی در محیط عدم قطعیت است. در این مقاله بازی‌های امنیتی بین یک مدافع و چند مهاجم مورد بررسی قرار گرفته و مطلوبیت‌های بازیکنان و نحوه محاسبه آنها شرح داده شده است. با توجه به عدم قطعیت موجود در ارائه عایدی‌های بازی توسط خبرگان، مطلوبیت‌ها به صورت بازه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. این بازی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفی با اهداف بازه‌ای مدل‌سازی شده است. یک روش برای حل این مسئله چند هدفی پیشنهاد شده است. به عنوان نمونه کاربردی از این نوع بازی‌ها در ایجاد امنیت در مرزهای هوایی بیان شده و مدل این مسئله به صورت یک بازی امنیتی چند هدفی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که بسیاری از مسائل پیچیده نظامی را می‌توان با استفاده از بازی‌های امنیتی مورد بررسی قرار داد و الگوی حل بهینه آن را طراحی نمود.

واژگان کلیدی: نظریه بازی؛ بازی امنیتی؛ بهینه‌سازی چندهدفی؛ راهبرد بهینه.

^۱ پژوهشگر پژوهشکده عالی جنگ دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا

Solving Multiobjective Security Games with Interval Payoffs

Mohammad reza Mohammadi toudeshki^۱ , Sohail Zahraee^۲

ABSTRACT

Security is one of the key parameters in any society that will have a direct impact on the process of that society. In most areas of security, security resources are limited for protection and full security. One way to solve this problem is to use game theory. Game theory provides a logical way to allocate security resources to enemy targets. The aim of this article is to examine security games, their importance, modeling, solving and application in defense decision making and decision making in an uncertain environment. In this article, security games between a defender and several attackers are examined and the utilities of the players and how they are calculated are described. Due to the uncertainty in the presentation of payoffs by experts, the utilities are considered as interval. The game is modeled as a multi-objective optimization problem with interval-valued objective functions. There are several ways to solve this problem. A practical example of this type of game is the creation of security at the air border, and the model of this issue has been studied as a multi-objective security game. Finally, it can be concluded that many complex military problems can be explored using security games and an optimal solution model can be designed.

Keywords: *Game theory; security game; multi-objective optimization; optimal strategy.*

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

^۱ Researcher, Institute for the Study of War, Army Command and Staff University

^۲ Researcher, Army Command and Staff University

۱- مقدمه

با انتشار کتاب نظریه بازی‌ها و رفتار اقتصادی توسط نویسندگانی همچون وان نیومن و مورگنسترن [۱]، نظریه بازی رشد فراوانی پیدا نمود و نمونه‌های کاربردی بسیاری در علوم مختلف پیدا کرد. جهان در اکتبر سال ۱۹۶۲ جهان در آستانه‌ی نبرد هسته‌ای قرار داشت. اتحاد جماهیر شوروی در حال استقرار موشک‌های هسته‌ای در کوبا بود، جایی که تنها ۱۴۵ کیلومتر با خاک آمریکا فاصله داشت و آمریکایی‌ها برچیدن فوری این عملیات را تقاضا می‌کردند. در غیر آن صورت، آنچه نباید می‌شد؛ اتفاق می‌افتاد. وجود آن موشک‌ها تهدیدی بود که کِنِدی، رئیس جمهور وقت ایالات متحده، نمی‌توانست آن را نادیده بگیرد. در عین حال، او می‌دانست که یک واکنش غلط می‌تواند به جنگ هسته‌ای و مرگ میلیون‌ها نفر منجر شود. بعضی از مشاوران کندی پیشنهاد یک حمله‌ی هوایی سنگین می‌دادند تا چند دوجین موشکی را که شوروی در کوبا به سمت آمریکا نشانه رفته بود، نابود و منهدم کنند. خطر این کار در این بود که احتمالاً شوروی، به جای این که فقط شاهد نابودی کلاهک‌های هسته‌ای‌اش باشد، به حمله‌ی هسته‌ای علیه آمریکا دست بزند. بعضی دیگر پیشنهاد محاصره‌ی دریایی می‌دادند تا از استقرار موشک‌های بیشتر در جزیره جلوگیری شود و در ضمن، تقاضای برچیدن قبلی‌ها هم پا بر جا باشد، اما گروهی از این هراس داشتند که مبادا این اقدام مؤثر نباشد. به مدت چند روز سرنوشت ساز دو ابر قدرت در حال سبک و سنگین کردن گزینه‌های خود بودند، در حالی که به خوبی از عواقب گرفتن یک تصمیم غلط آگاه بودند. رئیس جمهور آمریکا محاصره‌ی دریایی را انتخاب کرد و در همان وقت برای حمله‌ی هوایی علیه کوبا آماده شد. چند روز بعد، پس از مذاکرات پر تب‌وتاب پشت پرده، اتحاد جماهیر شوروی موشک‌هایش را برچید و جهان دوباره نفس راحتی کشید. بحران موشکی کوبا یکی از نقاط عطف تاریخ قرن بیستم است، اما در عین حال نمونه‌ای از مساله‌ای است که همه‌ی ما در زندگی روزمره به دفعات بسیار با آن مواجه می‌شویم.

سرهنگ الیور هایوود [۲] در مقاله‌ای اهمیت نظریه بازی را در تصمیم‌گیری فرماندهان نشان داد و نبردهای مختلفی را از جنگ جهانی دوم توسط نظریه بازی بررسی نمود و نتیجه گرفت که تصمیم فرماندهان نظامی مشابه با جواب به دست آمده از نظریه بازی است. ارزیابی سرهنگ هایوود 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 دهه‌ی اخیر نظریه‌ی بازی‌ها را به طور گسترده در مسائل نظامی و امنیتی مورد استفاده قرار داده‌اند (برای اطلاعات بیشتر مرجع [۳] را ببینید).

سناریوهای دزد و پلیس [۴]، امنیت شبکه‌های کامپیوتری [۵]، سیستم دفاع موشکی ضدبالستیک [۶] و تروریسم [۷] از جمله این کاربردها هستند. اخیراً اقدامات کاربردی در این زمینه در کشور آمریکا و در شهرهای لس آنجلس و نیویورک صورت گرفته است [۳].

حال سوال اینجاست: چگونه وقتی نمی‌دانیم طرف مقابل چه فکری می‌کند، بهترین تصمیم را بگیریم؟ نظریه‌ی بازی‌ها شاخه‌ای از تحقیق در عملیات است که رفتار ریاضی حاکم بر یک موقعیت راهبردی را مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین نظریه‌ی بازی‌ها برای تحلیل روابط بین الملل به ویژه در کشورهای با آرمان‌ها و منافع متضاد به کار گرفته می‌شود. نظریه‌ی بازی‌ها به دو نوع بازی مهم طبقه‌بندی می‌شود: بازی‌های همکارانه و بازی‌های غیر همکارانه [۸]. بازی‌های ماتریسی و دو ماتریسی را در محیط فازی مورد بررسی قرار گرفته و موقعیت آورانشه در جنگ جهانی دوم را به صورت یک بازی ماتریسی با عایدی‌های فازی مدل‌سازی شده است و در آنجا نشان داده شده که راهبردهای به دست آمده از روش پیشنهادی با تصمیم دکتترین آمریکا مطابقت دارد [۹، ۱۰]. همچنین بازی مذاکرات هسته ای بین دو کشور را به صورت یک بازی دوماتریسی چندهدفی مدل‌سازی کرده و یک روش برای محاسبه‌ی نقاط تعادل بهینه‌ی پارتوی ضعیف آن ارائه دادند [۱۱]. در مرجع [۱۲] بازی‌های امنیتی در محیط عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله عایدی‌ها به صورت اعداد فازی نمایش داده شده‌اند و یک روش برای حل این مسائل ارائه شده است. در مرجع [۱۳] بازی‌های امنیتی چندهدفی با استفاده از مسائل دو سطحی مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله، بازی‌های امنیتی معرفی شده توسط گروه تحقیقاتی تامب و همکارانش [۳] مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش انجام تحقیق در این مقاله با استفاده از روش‌های موجود در تحقیق عملیات است. ادامه‌ی مقاله به صورت زیر سازماندهی می‌شود. در بخش دوم مقدماتی از بازی‌های استاکلبرگ و بازی‌های امنیتی با یک مثال شرح داده می‌شود. در بخش سوم بازی امنیتی چندهدفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم آن یک کاربرد از این نوع بازی‌ها در زمینه‌ی امنیت مرزها ارائه می‌شود، و نتیجه‌گیری مقاله در بخش آخر ارائه می‌گردد.

۲- مبانی نظری

در این بخش مفاهیم مقدماتی بازی امنیتی به طور خلاصه از مراجع [۱۲ و ۱۳] بیان می‌گردد.

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 اولین بار در سال ۱۹۵۲ میلادی توسط استاکلبرگ و براساس برخی از پدیده‌های انحصاری‌سازی در اقتصاد ارائه شد. در بازی‌های استاکلبرگ یک بازیکن به

^۱ Bayesian Stackelberg Games

^۲ Security games

عنوان رهبر (پیشرو)^۱ و بقیه به عنوان دنباله‌رو (پیرو)^۲ 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. در این جا جهت درک بهتر این بازی‌ها را با یک مثال امنیتی [۳] شرح می‌دهیم. 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 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 است. ماتریس بازی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

مهاجم

	پایانه ۱	پایانه ۲
مدافع	۳-۵	۱-۱
	۵-۵	۱-۲
	پایانه ۱	پایانه ۲

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

^۱ Leader^۲ Follower

که عایدی‌ها توسط کارشناسان حوزه امنیت تعیین می‌شود که ممکن است نشان دهنده‌ی سود یا هزینه و ... باشند. برای به دست آوردن این داده‌ها می‌توان پرسشنامه‌ای را با توجه به مسئله‌ی مورد نظر 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 نتیجه‌ی 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 نتیجه‌ی 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 آمیخته‌ی پلیس می‌نامند و دشمن در مقابل این راهبرد با یک اقدام -یک حمله- واکنش خواهد داد که یک راهبرد محض است. سوال 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 فوق 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 ماکسیمم سازی 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.

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 $T = \{1, 2, \dots, p\}$ محافظت کند که m منبع به صورت پیوسته در بین اهداف توزیع شده است و $p \geq m$. این مسئله با مدل استاکلبرگ سازگار است که در آن مدافع راهبرد خود را انتخاب کرده و مهاجمان با مشاهده‌ی این انتخاب، بهترین پاسخ را می‌دهند. راهبرد مدافع را می‌توان به صورت یک بردار پوشش $C = (c_1, \dots, c_p) \in C$ نشان داد که در آن به ازای $k = 1, \dots, p$ مقدار پوشش داده شده از هدف k است و احتمال موفقیت مدافع را در جلوگیری از هر حمله‌ای به هدف k نشان می‌دهد. در این مسئله فرض می‌شود که هزینه‌ی 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 مجموعه‌ی 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:

$$C = \left\{ c = (c_1, \dots, c_p) \mid 0 \leq c_k \leq 1, k = 1, \dots, p, \sum_{k \in T} c_k \leq m \right\}$$

راهبرد آمیخته برای مهاجم نوع i با بردار $a_i = (a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^p)$ نمایش داده می‌شود که در آن a_i^k احتمال حمله مهاجم نوع i به هدف k است.

فرض کنید $U_i^{c,d}(k) = [U_i^{c,dL}(k), U_i^{c,dR}(k)]$ نشان دهنده‌ی مطلوبیت مدافع باشد زمانی که k توسط مهاجم نوع i انتخاب شده باشد و از طرف مدافع پوشش داده شده باشد. اگر k پوشش داده نشده باشد جریمه‌ی مدافع با $U_i^{u,d}(k) = [U_i^{u,dL}(k), U_i^{u,dR}(k)]$ نمایش داده می‌شود. مطلوبیت مهاجم به طور مشابه با $U_i^{c,a}(k)$ و $U_i^{u,a}(k)$ نمایش داده می‌شود که به صورت بازه‌ای نمایش داده می‌شوند. در حقیقت در این مدل بازی برای هر هدف 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 است.

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 است:

$$[U_i^{dL}(c, a_i), U_i^{dR}(c, a_i)] = \left[\sum_{k \in T} a_i^k U_i^{dL}(c_k, k), \sum_{k \in T} a_i^k U_i^{dR}(c_k, k) \right] \quad (۱)$$

$$[U_i^{aL}(c, a_i), U_i^{aR}(c, a_i)] = \left[\sum_{k \in T} a_i^k U_i^{aL}(c_k, k), \sum_{k \in T} a_i^k U_i^{aR}(c_k, k) \right] \quad (۲)$$

که در آن

$$U_i^{dL}(c_k, k) = c_k U_i^{c,dL}(k) + (1 - c_k) U_i^{u,dL}(k)$$

$$U_i^{dR}(c_k, k) = c_k U_i^{c,dR}(k) + (1 - c_k) U_i^{u,dR}(k) \quad (۳)$$

$$U_i^{aL}(c_k, k) = c_k U_i^{c,aL}(k) + (1 - c_k) U_i^{u,aL}(k)$$

$$U_i^{aR}(c_k, k) = c_k U_i^{c,aR}(k) + (1 - c_k) U_i^{u,aR}(k) \quad (۴)$$

به ترتیب کران‌های چپ و راست عایدی دریافت شده‌ی مدافع و مهاجم نوع i هستند در صورتی که به هدف k حمله شده باشد و به مقدار c_k پوشش داده شده باشد.

با توجه به نحوه تصمیم‌گیری در بازی امنیتی و در نظر گرفتن همزمان مهاجمان، مدل بازی به صورت یک مسأله برنامه‌ریزی دوسطحی زیر ارائه می‌شود:

$$\max_{c \in C} ([U_1^{dL}(c, a_1), U_1^{dR}(c, a_1)], \dots, [U_n^{dL}(c, a_n), U_n^{dR}(c, a_n)])$$

$$\sum_{k=1}^p c_k \leq m$$

$$0 \leq c_k \leq 1 \quad k = 1, \dots, p$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{که در آن } a_i \text{ جواب مسئله زیر است} \\ \max_{a_i} [U_i^{aL}(c, a_i), U_i^{aR}(c, a_i)] \\ \sum_{k=1}^p a_i^k = 1, i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\} a_i^k \geq 0, i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, p$$

با به کار بردن شرایط کروش کان تاگر در سطح پایین مسأله فوق، مسأله به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\begin{aligned} & \max_{c \in C} ([U_1^{dL}(c, a_1), U_1^{dR}(c, a_1)], \dots, [U_n^{dL}(c, a_n), U_n^{dR}(c, a_n)]) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{k=1}^p c_k \leq m \\ & 0 \leq c_k \leq 1 \quad k = 1, \dots, p, \\ & \lambda_i^L \frac{\partial U_i^{dL}(c, a_i)}{\partial a_i^k} + \lambda_i^R \frac{\partial U_i^{dR}(c, a_i)}{\partial a_i^k} - \mu_i^L + \mu_k^i = 0, \quad k = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, n \\ & \mu_k^i a_i^k = 0 \quad k = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, n \\ & \sum_{k=1}^p a_i^k = 1, \quad i = 1, \dots, n \\ & a_i^k \geq 0, \quad k = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, n \\ & \mu_k^i \geq 0, \quad \lambda_i^L, \lambda_i^R \geq 0, \quad k = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

همانگونه که ملاحظه می‌کنید، محاسبه راهبردهای بهینه مدافع منجر به حل مسأله بهینه‌سازی چندهدفی با اهداف بازه‌مقدار شده است. با در نظر گرفتن احتمال برخورد مدافع با هر مهاجم، می‌توان وزن هر هدف را در مسأله بهینه‌سازی چندهدفی فوق تعیین کرد. لذا با اعمال این وزن‌ها در مسأله فوق داریم:

$$\begin{aligned} & \max_{c \in C} \left[\sum_{i=1}^n \omega_i U_i^{dL}(c, a_i), \sum_{i=1}^n \omega_i U_i^{dR}(c, a_i) \right] \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{k=1}^p c_k \leq m \\ & 0 \leq c_k \leq 1 \quad k = 1, \dots, p \\ & \lambda_i^L \frac{\partial U_i^{dL}(c, a_i)}{\partial a_i^k} + \lambda_i^R \frac{\partial U_i^{dR}(c, a_i)}{\partial a_i^k} - \mu_i^L + \mu_k^i = 0 \quad k = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, n \\ & \mu_k^i a_i^k = 0 \quad k = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, n \\ & \sum_{k=1}^p a_i^k = 1 \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

$$a_i^k \geq 0, \mu_k^i \geq 0, \quad \lambda_i^L, \lambda_i^R \geq 0, \quad k = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, n$$

اکنون با در نظر گرفتن مرکز بازه، محاسبه راهبردهای بهینه مدافع منجر به حل مسأله برنامه‌ریزی ریاضی تک هدفی زیر می‌شود.

$$\max_{c \in C} \left[\sum_{i=1}^n \omega_i U_i^{dL}(c, a_i), \sum_{i=1}^n \omega_i U_i^{dR}(c, a_i) \right]$$

$$s.t. \quad \sum_{k=1}^p c_k \leq m$$

$$0 \leq c_k \leq 1 \quad k = 1, \dots, p$$

$$\lambda_i^L \frac{\partial U_i^{dL}(c, a_i)}{\partial a_i^k} + \lambda_i^R \frac{\partial U_i^{dR}(c, a_i)}{\partial a_i^k} - \mu_k^L + \mu_k^R = 0 \quad k = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, n$$

$$\mu_k^L a_i^k = 0 \quad k = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{k=1}^p a_i^k = 1 \quad i = 1, \dots, n$$

$$a_i^k \geq 0, \mu_k^L \geq 0, \lambda_i^L, \lambda_i^R \geq 0, \quad k = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, n$$

۴- مدل‌سازی بازی امنیتی چندهدفی در امنیت مرزهای هوایی

مدل بازی ارائه شده در این مقاله، مدل امنیتی چند هدفی را مورد بررسی قرار می‌دهد. نمونه این بازی در جهان واقعیت انتخاب راهبرد مناسب در امنیت مرزهای هوایی است و نویسندگان سعی دارند تا با مدل‌سازی آن اقدامات و عایدی بازیکنان را شرح دهند.

بررسی عوامل مدل‌سازی امنیت مرزهای هوایی

آسمان یکی از نقاط حساس کشور به شمار می‌رود. شناخت معابر و نقاط ضعف راداری که بر اثر کاهش همپوشانی رادارها در برابر هواپیمای رادارگریز به وجود می‌آید؛ می‌تواند در امنیت آسمان کشور در برابر تهاجم هوایی موثر باشد. کشور ایران به دلیل وجود همجواری با پانزده کشور و همچنین قرار گرفتن سه منطقه مهم ژئوپلیتیک در مجاورت ایران در یکی از حساس‌ترین مناطق جهان واقع گردیده است.

همچنین کشوری‌ست که از تحولات محیط پیرامونی بیشترین تاثیرپذیری را دارد و متقابلاً یکی از بازیگران موثر بوده است.

با توجه به گسترده بودن مسئله، با وجود توانایی اجرائی شدن آن، تنها به بیان مسئله به صورت محدود اکتفا می‌کنیم زیرا این مسئله از دیدگاه نویسندگان و به صورت محدود و با هدف نشان دادن کاربرد بازی‌های امنیتی در نظر گرفته شده است در صورتی که ممکن است اهداف و پارامترهای بیشتری از در این دیدگاه درگیر شوند.

تدابیر امنیتی در مرزهای هوایی کشور در بخش‌های مختلف ممکن است متفاوت باشد. به عنوان مثال در مرزهای شرقی کشور ممکن است اتفاقاتی رخ دهد که در مرزهای غربی رخ نمی‌دهند. لذا تصمیماتی که در این مرزها گرفته می‌شود ممکن است به عواملی با وزن‌های متفاوت یا عوامل کاملاً متفاوت از هم وابسته باشند. به عنوان نمونه ممکن است تهدید هوایی ایجاد شده در مرزهای شرقی توسط هواپیماهایی صورت پذیرد که رادار گریز نبوده و تحت پوشش هواپیمای جنگ الکترونیک نخواهند وارد مرزهای هوایی کشور گردند در صورتی که در مرزهای جنوبی با توجه به وجود کشورهای فرامنطقه هواپیماهای مهاجم با تاکتیک ارتفاع بالا و تحت پوشش هواپیمای جنگ الکترونیک و یا در مرز غربی هواپیماهای کاملاً رادارگریز قصد تجاوز را داشته باشند. در حالت کلی اگر سیستم امنیتی کشورمان را به عنوان مدافع در بازی امنیتی در نظر بگیریم واضح است که دشمنان مختلفی در حفاظت از آسمان کشور وجود دارد، هواپیماهای مهاجم رادارگریز، هواپیماهای مهاجم با ارتفاع بالا، هواپیماهای مهاجم با ارتفاع پست، موشک‌های کروز و ...

راهکارهای مختلفی برای مقابله با این دشمنان وجود دارد. به عنوان مثال راهبردی که در مقابل هواپیمای ارتفاع پست اتخاذ می‌شود با راهکاری که برای هواپیمای رادارگریز در نظر گرفته می‌شود متفاوت است. همچنین ممکن است با اتخاذ یک راهبرد در برابر یک دشمن، دشمن دیگر نیز تا حدی کنترل شود. به طور مثال راهبرد مقابله با هواپیماهای مهاجم با ارتفاع کم می‌تواند برای مقابله در برابر موشک‌های کروز نیز موثر باشد. منابع مختلف امنیتی در این تحلیل نیز سامانه‌های دفاعی ارتفاع پست، سامانه‌های دفاعی ارتفاع متوسط و بلند و هواپیماهای گشتی هوایی خواهند بود که هر کدام با تعیین ضریب موفقیت خاصی برای اهداف دفاع شده به کار خواهند رفت. مدافع می‌تواند هر یک از راهبردهای خود را که توسط گروه تحلیلگران نظامی پیشنهاد می‌شوند انتخاب کند و یا اینکه راهبردهای آمیخته را در مقابل این دشمنان به کار برد. لذا با توجه به اینکه یک مدافع (سیستم امنیتی کشور) باید از

حملات مهاجمان مختلف به اهداف مورد نظر جلوگیری کند، این مسئله را می‌توان به صورت 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 نظامی صورت گیرد. با توجه به مطالب بخش قبل، برای حل این مسئله با یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی روبرو 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 بهینه‌ی 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. البته با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی به یک جواب رضایت بخش برای مدافع دست می‌یابیم.

نمونه کاربردی

همان‌گونه که بیان شد در دنیای واقعی مسأله بسیار گسترده و پیچیده است، با این حال در این بخش برای بیان کاربرد و نحوه کار روس پیشنهادی مثال بسیار ساده‌ای ارائه می‌شود. توجه کنید که این مثال واقعی نیست و سناریو و داده‌ها کاملاً ساختگی و دور از واقعیت در مقیاس کوچک است.

به عنوان نمونه منطقه‌ای از یک کشور را در نظر می‌گیریم. این منطقه از نظر ساختاری دارای اهداف مهمی همچون پایگاه هوایی، پالایشگاه، بنادر حساس و ... است که دشمن در حملات خود قصد از بین بردن و یا متوقف کردن فعالیت آن را برای مدتی دارد. در این نمونه دو هدف باند پروازی فرودگاه و پالایشگاه را در نظر می‌گیریم که از نظر دشمن این دو هدف نسبت به بقیه اهداف حساس‌تر است.

در این نمونه مهاجم از تاکتیک‌های مختلف استفاده می‌کند که شامل حمله با موشک‌های کروز دورایستا، حمله با هواپیماهای ارتفاع بالا و حمله هوایی با هواپیما در ارتفاع پست است. هر کدام از این تاکتیک‌ها برای اهداف خود دارای دقت و میزان خسارت متفاوتی هستند به عنوان مثال در حملات موشک کروز میزان دقت و خسارت در باند پروازی نسبت میزان دقت و آسیب به پالایشگاه بیشتر است زیرا در صورت عدم برخورد به یک نقطه از محل‌های اصابت مورد نیاز بر روی باند، عملاً بقیه اصابت‌ها بی‌اثر می‌گردد در صورتی که اصابت به هر نقطه از پالایشگاه اثر خود را داشته و آن سامانه را غیر فعال می‌سازد.

مدافع نیز از ابزارهای تدافعی محدود خود شامل موشک‌های زمین به هوا و هواپیماهای گشتی استفاده می‌کند. مدافع سعی دارد با استفاده بهینه از سامانه‌های تدافعی خود به بهترین وجه به صورت ترکیبی از اهداف مورد نظر دفاع نماید اما با توجه به محدودیت موجود نمی‌تواند پوشش پدافندی لازم را با استفاده از هر دو سامانه تامین نماید از این رو اقدام به طرح ریزی پدافندی می‌نماید و لازم است جهت بهینه بودن آن تناسب لازم را بدست آورد.

عایدی به دست آمده از هر نوع تهاجم توسط نخبگان به دست می‌آید اما در این جا برای مثال به صورت ساختگی عایدی‌هایی را قرار می‌دهیم. در این نمونه حمله با موشک کروز هجوم نوع ۱، حمله هواپیماهای ارتفاع بالا هجوم نوع ۲ و حمله هوایی با هواپیما در ارتفاع پست هجوم نوع ۳ در نظر گرفته شده است.

پالایشگاه		فرودگاه		
پوشش داده نشده	پوشش داده شده	پوشش داده نشده	پوشش داده شده	
[۱,۳]	[۳,۵]	[۰,۵,۱]	[۴,۵]	مدافع
[۲,۴]	[۰,۲]	[۴,۳]	[۰,۲]	هجوم نوع ۱

جدول ۱. عایدی بین مدافع و هجوم از نوع ۱

پالایشگاه		فرودگاه		
پوشش داده نشده	پوشش داده شده	پوشش داده نشده	پوشش داده شده	
[۰,۰]	[۲,۴]	[۱,۳]	[۳,۵]	مدافع
[۴,۶]	[۱,۳]	[۳,۵]	[۰,۲]	هجوم نوع ۲

جدول ۲. عایدی بین مدافع و هجوم از نوع ۲

پالایشگاه		فرودگاه		
پوشش داده نشده	پوشش داده شده	پوشش داده نشده	پوشش داده شده	
[۱،۳]	[۴،۶]	[۱،۳]	[۴،۶]	مدافع
[۲،۴]	[۰،۰]	[۲،۴]	[۰،۰]	هجوم نوع ۳

جدول ۳. عایدی بین مدافع و هجوم از نوع ۳

هر جدول نشان دهنده بازی بین مدافع و هجوم مورد نظر است. سطرهای جداول نشان دهنده بازیکنان و ستون‌ها نشان دهنده اهداف مورد نظر است. عایدی بازیکنان در دو حالت پوشش و عدم پوشش هدف ارائه شده است. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد برای قرار دادن عایدی‌های بازیکنان از نظرات خبرگان استفاده خواهد شد. برای این کار پرسش‌نامه مناسبی تهیه و در اختیار کارشناسان متخصص حوزه مربوطه قرار می‌گیرد و با استفاده از پاسخ‌های به دست آمده می‌توان مقادیر عایدی را مشخص نمود. همچنین می‌توان با استفاده از ماشین یادگیرنده در این زمینه استفاده کرد.

با فرض اینکه مدافع یک منبع امنیتی دارد که باید در دفاع از دو هدف مورد استفاده قرار دهد، می‌توان مدل برنامه‌ریزی ریاضی را برای محاسبه راهبردهای بهینه مدافع به صورت زیر نوشت.

$$\max \left\{ \frac{1}{6} a_1^V c_1 + \frac{1}{3} a_1^V + \frac{2}{3} a_1^V c_2 + a_1^V + \frac{2}{3} a_1^V c_1 + \frac{2}{3} a_1^V + a_1^V c_2 + \frac{4}{3} a_1^V c_1 + \frac{2}{3} a_1^V + a_1^V c_2 + \frac{2}{3} a_1^V \right\}$$

s.t.

$$\lambda_1^L(4 - 4c_1) + \lambda_1^R(6 - 4c_1) - \mu_1 + \mu_1^L = 0$$

$$\lambda_1^L(2 - 2c_2) + \lambda_1^R(4 - 2c_2) - \mu_1 + \mu_1^R = 0$$

$$\lambda_2^L(3 - 3c_1) + \lambda_2^R(5 - 3c_1) - \mu_2 + \mu_2^L = 0$$

$$\lambda_2^L(4 - 3c_2) + \lambda_2^R(6 - 3c_2) - \mu_2 + \mu_2^R = 0$$

$$\lambda_3^L(2 - 2c_1) + \lambda_3^R(4 - 4c_1) - \mu_3 + \mu_3^L = 0$$

$$\lambda_3^L(2 - 2c_2) + \lambda_3^R(4 - 4c_2) - \mu_3 + \mu_3^R = 0$$

$$\mu_1^L a_1^L = 0, \quad \mu_2^L a_2^L = 0, \quad \mu_3^L a_3^L = 0$$

$$\mu_1^L a_1^L = 0, \quad \mu_1^R a_1^R = 0, \quad \mu_2^L a_2^L = 0.$$

$$0 \leq c_1 \leq 1, \quad 0 \leq c_2 \leq 1$$

$$c_1 + c_2 \leq 1$$

$$a_1^L + a_1^R = 1$$

$$a_2^L + a_2^R = 1$$

$$a_3^L + a_3^R = 1$$

$$a_1^L, a_1^R, a_2^L, a_2^R, a_3^L, a_3^R \geq 0.$$

$$\lambda_i^L, \lambda_i^R, \mu_i^L, \mu_i^R \geq 0, \quad i = 1, 2, 3$$

با حل این مسأله توسط نرم‌افزار لینگو داریم:

$$c_1 = 0.33, \quad c_2 = 0.67$$

این جواب به این معنی است که مدافع یک منبع امنیتی دارد که با حضور ۳۳٪ در هدف اول و ۶۷٪ در هدف دوم به بیشترین موفقیت می‌رسد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله بازی‌های امنیتی، اهمیت و کاربرد آنها مورد بررسی قرار گرفت. دو نوع پیچیدگی در مدل این مسائل در نظر گرفته شد. اولین پیچیدگی راجع به در نظر گرفتن چندین مهاجم با اهداف مختلف بود که برای رفع این مشکل از بهینه‌سازی چند هدفی استفاده شد. پیچیدگی دوم مربوط به عدم قطعیت در داده‌ها است که در این مقاله عایدی‌های بازیکنان به صورت بازه‌ای در نظر گرفته شد. برای حل این مسأله یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفی به دست آمد. با در نظر گرفتن احتمال برخورد با هر مهاجم مسأله بهینه‌سازی چندهدفی به صورت یک مسأله برنامه‌ریزی ریاضی بازه مقدار نوشته شد. در نهایت برای حل مسأله حاصل و محاسبه راهبردهای بهینه مدافع، یک مسأله برنامه‌ریزی ریاضی تک هدفی پیشنهاد شد که در آن مرکز بازه به عنوان تابع هدف مسأله در نظر گرفته شد. سرانجام یک مسأله کاربردی از این نوع مسائل مورد مطالعه قرار گرفته و به کمک روش پیشنهادی بررسی گردید. به عنوان یک پیشنهاد برای کار آتی می‌توان از روش‌های فرا ابتکاری برای حل مدل مورد نظر استفاده کرد.

۶- مراجع

- [۱] J. V. Neumann, O. Morgenstern; Theory of Games and Economic Behavior; Wiley, New York (۱۹۴۴).
- [۲] O. G. Haywood Jr; Military Decision and Game Theory ;Journal of the Operations Research Society of America, Vol. ۲, No. ۴, PP ۳۶۵-۳۸۵ (۱۹۸۹).
- [۳] M. Tambe, Security and game theory, algorithms, deployed systems, lessons learned, Cambridge university press, ۲۰۱۲.
- [۴] N. Gatti, "Game Theoretical Insights in Strategic Patrolling: Model and Algorithm in Normal-Form," in ECAI-۰۸, ۲۰۰۸, pp. ۴۰۳-۴۰۷.
- [۵] K. Lye and J. M. Wing, "Game Strategies in Network Security," International Journal of Information Security, vol. ۴, no. ۱-۲, pp. ۷۱-۸۶, ۲۰۰۵.
- [۶] G. Brown, M. Carlyle, J. Kline, and K. Wood, "A Two-Sided Optimization for Theater Ballistic Missile Defense," in Operations Research, vol. ۵۳, ۲۰۰۵, pp. ۲۶۳-۲۷۵.
- [۷] T. Sandler and D. G. A. M., "Terrorism and Game Theory," Simulation and Gaming, vol. ۳۴, no. ۳, pp. ۳۱۹-۳۳۷, ۲۰۰۳.
- [۸] G. Owen; Game Theory; Academic Press, San Diego, Third Edition (۱۹۹۵).
- [۹] H. Bigdeli, H. hassanpour, and J. Tayyebi, "The optimistic and pessimistic solutions of single and multiobjective matrix games with fuzzy payoffs and analysis of some of military problems," Defence Sci. & Tech., Vol. ۸, no. ۲, pp. ۱۳۳-۱۴۵, ۲۰۱۸(In Persian).
- [۱۰] Bigdeli, H., Hassanpour, H. and Tayyebi, J. A satisfactory strategy of multiobjective two-person matrix games with fuzzy payoffs, Iranian Journal of Fuzzy Systems, ۲۰۱۵.
- [۱۱] Bigdeli, H., Hassanpour, H. and Tayyebi, J. Constrained Bimatrix Games with Fuzzy Goals and its Application in Nuclear Negotiations, Submitted paper, ۲۰۱۶.
- [۱۲] Bigdeli, H., Hassanpour, H. and Tayyebi, J. Multiobjective security game with fuzzy payoffs, Iranian Journal of Fuzzy Systems, ۱۶ (۱), ۸۹-۱۰۱, ۲۰۱۹.
- [۱۳] H. Bigdeli, H. Hassanpour, Modeling and solving of multi-objective security game using multiobjective bilevel programming and its application in security of Metro system, Journal of Electronic and Cyber Defense, ۲۰۱۸.