مجله علمی- پژوهشی "پدافند الکترونیکی و سایبری"
ویژه‌نامه کنفرانس بین‌المللی ترکیبیات، رمزنگاری و محاسبات، ص ۳۸ -۳۱

مدل‌سازی و حل مسئله‌ی بازی امنیتی چندهدفی با استفاده از مسئله دوسطحی چندهدفی و کاربرد آن در امنیت مترو

حمید بیگدلی[۱*]، حسن حسن‌پور[۲]

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، دانشگاه بیرجند
(دریافت: ۹۵/۰۷/۰۵، پذیرش: ۹۶/۰۳/۰۷)

چکیده

در این مقاله بازی‌های امنیتی چندهدفی بین یک مدافع و چند نوع مهاجم مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف این مقاله انتخاب راهبرد بهینه مدافع با منابع امنیتی محدود در مقابل حملات احتمالی چند نوع مهاجم به اهداف مورد نظر است. بازی امنیتی چندهدفی مذکور به صورت یک مسئله دوسطحی چندهدفی فرموله شده است. سپس با استفاده از شرایط بهینگی کان- تاکر مسئله به یک مسئله چندهدفی یک سطحی تبدیل می‌شود و روش برنامه‌ریزی آرمانی برای حل آن پیشنهاد می‌گردد. در نهایت، کاربردی از این نوع بازی‌ها در ایجاد امنیت در ایستگاه‌های مترو ارائه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: نظریه بازی، بازی امنیتی، برنامه‌ریزی آرمانی، بهینه‌سازی دوسطحی چندهدفی

۱- مقدمه

در اکتبر سال ۱۹۶۲ اتحاد جماهیر شوروی با استقرار موشک‌های هسته‌ای در کوبا، امنیت آمریکا را تهدید کرد و آمریکایی‌ها خواستار لغو این عملیات شدند. آمریکایی‌ها گزینه‌های مختلفی را مورد بررسی قرار دادند. یکی از آن‌ها پیشنهاد نابودی موشک‌ها توسط حمله هوایی بود. اتخاذ این تصمیم ممکن بود منجر به حمله هسته‌ای شوروی علیه آمریکا شود. گزینه دیگر پیشنهاد محاصره دریایی بود که از استقرار موشک‌های بیش‌تر جلوگیری شود و حمله هوایی هم صورت بگیرد. به مدت چند روز دو کشور در حال بررسی گزینه‌های خود بودند. رئیس‌جمهور آمریکا محاصره دریایی را انتخاب کرد و در همان وقت برای حمله هوایی علیه کوبا آماده شد. پس از چند روز مذاکره، اتحاد جماهیر شوروی موشک‌هایش را برچید. این مسأله نمونه‌ای از اتفاقاتی است که در زندگی روزمره به دفعات با آن مواجه می‌شویم. چگونه وقتی از تصمیم طرف مقابل آگاهی نداریم، بهترین تصمیم را اتخاذ کنیم؟ نظریه بازی شاخه‌ای از تحقیق در عملیات است که رفتار ریاضی حاکم بر یک موقعیت راهبردی را مورد بررسی قرار می‌دهد. پس از انتشار کتاب نظریه بازی و رفتار اقتصادی توسط وان نیومن و مورگنسترن[۱] [۱]، نظریه بازی به سرعت رشد یافت و کاربردهای وسیعی در علوم مختلف پیدا کرد. سرهنگ الیور هایوود[۲] [۲] در مقاله خود اهمیت نظریه بازی را در تصمیم‌گیری فرماندهی نشان داد. او نبردهای مختلفی از جنگ جهانی دوم را از دید نظریه بازی بررسی کرد و نتیجه گرفت که تصمیم دکترین 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 دهه اخیر، نظریه بازی به طور گسترده در مسائل نظامی و امنیتی مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. سناریوهای دزد و پلیس [۴]، امنیت شبکه‌های رایانه‌ای [۵]، نظام دفاع موشکی ضدبالستیک [۶] و تروریسم [۷] ازجمله این کاربردها هستند. اخیراً اقدامات کاربردی در این زمینه در کشور آمریکا و در شهرهای لس‌آنجلس و نیویورک صورت گرفته است [۳]. نظریه بازی به دو نوع بازی مهم طبقه‌بندی می‌شود: بازی‌های همکارانه و بازی‌های غیرهمکارانه [۸]. نویسندگان در کارهای قبلی [۱۱-۹] بازی‌های ماتریسی و دوماتریسی را در محیط فازی مورد بررسی قرار دادند و یک موقعیت در جنگ جهانی دوم را به صورت یک بازی ماتریسی با عایدی‌های فازی مدل‌سازی کرده و نشان دادند که راهبردهای به دست آمده از روش پیشنهادی با

* رایانامه نویسنده مسئول: h.bigdeli@birjand.ac.ir

1- Von Neumann and Morgenstern

2- Oliver Haywood

تصمیم دکترین آمریکا مطابقت دارد. هم‌چنین بازی مذاکرات هسته‌ای بین دو کشور را به صورت یک بازی دوماتریسی چندهدفی مدل‌سازی کرده و یک روش برای محاسبه نقاط تعادل کارای ضعیف آن ارائه دادند. در بسیاری از مسائل حوزه دفاع تصمیم‌گیری و انتخاب راهبرد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این‌گونه مسائل، تصمیم‌گیری منطقی موجب افزایش کارایی نظام خواهد شد. در بسیاری از این مسائل، مدافع دارای منابع امنیتی محدود است و سعی دارد از حملات چندین مهاجم به اهداف جلوگیری کند. نظریه بازی روشی منطقی برای تخصیص منابع امنیتی به اهداف مورد نظر دشمن فراهم می‌کند. در این مقاله، بازی‌های امنیتی چندهدفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این نوع از بازی‌ها بین یک مدافع و چند نوع مهاجم انجام می‌گیرد. در این نوع از بازی‌ها به دنبال یافتن یک راهبرد بهینه برای مدافع هستیم. هدف از این تحقیق، ارائه یک روش برای محاسبه راهبرد بهینه مدافع است در شرایطی که منابع امنیتی مدافع برای حفاظت از اهداف محدود است و مدافع با چندین نوع مهاجم روبرو می‌شود. این نوع از بازی‌ها ممکن است در بسیاری از موقعیت‌های موجود در حوزه دفاع به کار گرفته شود. در این مقاله کاربردی از آن در ایجاد امنیت در ایستگاه‌های مترو بیان می‌شود. این بازی می‌تواند در مسائل امنیتی دیگری هم‌چون امنیت سایبری، امنیت مرزهای کشور و ... مورد استفاده قرار گیرد. بازی‌های امنیتی چندهدفی توسط گروه تحقیقاتی تامب[1] و همکارانش [۱۲] معرفی شد. این گروه در کار تحقیقاتی خود این نوع از بازی‌ها را معرفی کرده و کاربردهایی از آن را در دنیای واقعی نشان دادند. آن‌ها چندین هدف را برای تصمیم‌گیرنده اول در نظر گرفتند و لذا مسئله را به صورت مسئله بهینه‌سازی چندهدفی بیان کردند. در مقاله مذکور، مدل چندهدفی به دست آمده با فرض داشتن بهترین هدف برای تصمیم گیرنده دوم بیان شده است و هیچ روشی برای یافتن این هدف و در نتیجه محاسبه نقاط تعادل بازی ارائه نشده است و تنها به روش‌های حل مسئله چندهدفی پرداخته شده است. در این مقاله مسئله بازی امنیتی چندهدفی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی دوسطحی مدل‌سازی می‌شود که تصمیم گیرنده اول در سطح بالا قرار داشته و با یک مسئله چندهدفی روبرو می‌شود و تصمیم‌گیرنده دوم در سطح پائین با یک مسئله تک هدفی روبرو خواهد شد. با نوشتن شرایط بهینگی در سطح دوم به دنبال محاسبه راهبرد کارا برای تصمیم‌گیرنده اول هستیم. این راهبرد نشان می‌دهد که مدافع با منابع امنیتی محدود خود چگونه حملات مهاجمان را به حداقل برساند. ادامه مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش ۲ مفاهیم پایه‌ای از بازی‌های امنیتی و مسائل بهینه‌سازی دوسطحی و چندهدفی مطرح می‌شود. بخش ۳ به بازی‌های امنیتی چندهدفی می‌پردازد و یک روش برای یافتن راهبردهای رضایت‌بخش این مسائل ارائه می‌شود. در بخش ۴ کاربردی از این نوع بازی‌ها در ایجاد امنیت در ایستگاه‌های مترو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

1- Tambe

۲- مفاهیم مقدماتی

در این بخش، مقدماتی از برنامه‌ریزی دوسطحی، بازی‌های امنیتی[2] و بهینه‌سازی چندهدفی بیان می‌شود.

بازی‌های استاکلبرگ[3] 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 عنوان رهبر (پیشرو)[4] و بقیه به‌عنوان دنباله‌رو (پیرو)[5] عمل می‌کنند. بنابراین مسئله در این حالت در واقع یافتن راهبرد بهینه برای رهبر است با این فرض که پیروان مطابق با راهی منطقی براساس راهبرد رهبر، 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. اگر پیش‌رو حرکتی داشته باشد، در این صورت نمی‌تواند آن‌را پس بگیرد و این به معنای تعهد به یک عمل است. بهتر است این بازی‌ها را با یک مثال امنیتی [۳] شرح دهیم. در یک حوزه امنیتی یک مدافع همواره باید از یک مجموعه از اهداف با توجه به منابع امنیتی محدود محافظت کند، درحالی‌که یک مهاجم قادر است از راهبردهای مدافع آگاهی یابد و بعد از تصمیمی هوشمندانه حمله کند. درصورتی‌که مدافع را در نقش پیش‌رو و مهاجم را در نقش دنباله‌رو فرض کنیم، این دقیقاً با بازی استاکلبرگ مطابقت دارد.

یک فرودگاه ساده با دو پایانه را در نظر بگیرید. فرض کنید تنها یک واحد پلیس امنیتی در این فرودگاه مستقر 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 عایدی

	پایانه ۱	پایانه ۲
پایانه۱	(۳-و۵)	(۱و۱-)
پایانه۲	(۵و۵-)	(۱-و۲)

2- Security games
3- Stuckelborg
4- Leader
5- Follower

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. مولفه‌های اول و دوم به ترتیب نشان‌دهنده عایدی مدافع و مهاجم هستند. مولفه اول شاخصی کمی مربوط به قدرت پلیس در اقدام و مولفه دوم شاخصی کمی در قدرت دشمن در حمله است. به عنوان مثال، اگر دشمن پایانه ۱ را برای حمله انتخاب کند، با توجه به این‌که پلیس در پایانه ۱ حضور دارد لذا دشمن شکست سختی خواهد دید. این موقعیت با عایدی ۵ برای پلیس و ۳- برای دشمن نشان داده شده است که این مقادیر با توجه به سناریو و توسط افراد خبره در این زمینه تعیین می‌شود. 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 مورد نظر تهیه کرد و با پاسخ‌دادن آن‌ها توسط متخصصین حوزه، نتیجه انتخاب راهبردها را کمی‌سازی کرد. با توجه به فرض مهم‌تربودن 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. 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 و دشمن در مقابل این راهبرد با یک اقدام –یک حمله- واکنش خواهد داد. سوال کلیدی در این‌جا این است که آیا تقسیم ۶۰٪-۴۰٪ راه‌کار بهینه برای تقسیم منابع امنیتی مناسب است یا این تقسیم باید به صورت دیگری باشد؟

یکی از روش‌های حل این نوع از مسائل بازی، مدل‌سازی مسئله به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی [۱۳] است. در مسائل برنامه‌ریزی دوسطحی ابتدا رهبر تصمیم خود را مشخص می‌کند و سپس پیرو با آگاهی از تصمیم رهبر تابع هدفش را بهینه می‌سازد. با توجه به این قاعده رهبر نیز تصمیم خود را طوری اتخاذ می‌کند که انتظار پاسخ معقول پیرو در مقابل تصمیمش را دارد. جواب به دست آمده به صورت روند فوق را جواب تعادل استاکلبرگ می‌نامند. یک مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی برای محاسبه تعادل استاکلبرگ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\underset{x}{maximize}\ z_1(x,y)=c_1x+d_1y$$

که y جواب مسئله زیر است

$$\begin{aligned}&\underset{y}{maximize}\ z_2(x,y)=c_2x+d_2y\\&Ax+By\le b\\&x\ge 0, y\ge 0\end{aligned}\qquad (۱)$$

که در آن، به ازای $i=1,2$ ، c_i یک بردار سطری n_1 بعدی، d_i یک بردار سطری n_2 بعدی، ماتریس‌های ضرایب A و B به ترتیب ماتریس‌هایی $m\times n_1$ و $m\times n_2$ و b یک بردار ستونی m بعدی است. در مسئله برنامه‌ریزی دو سطحی (۱)، $z_1(x,y)$ و $z_2(x,y)$ به ترتیب نمایش‌دهنده توابع هدف رهبر و پیرو هستند و y,x به ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای تصمیم رهبر و پیرو می‌باشند. فرض می‌شود که هر تصمیم گیرنده از تابع هدف و محدودیت‌های حریف آگاهی دارد. ابتدا رهبر تصمیم‌گیری می‌کند و سپس پیرو با آگاهی از تصمیم رهبر، تصمیم خود را اتخاذ می‌کند. یعنی پس از انتخاب راهبرد x توسط رهبر، پیرو مسئله برنامه‌ریزی خطی زیر را حل می‌کند:

$$\begin{aligned}&\underset{y}{maximize}\ z_2(x,y)=c_2x+d_2y\\&By\le b-Ax\\&y\ge 0\end{aligned}\qquad (۲)$$

با حل این مسئله، جواب بهینه $y(x)$ به‌عنوان پاسخ منطقی پیرو به دست می‌آید. رهبر با این فرض که پیرو پاسخ منطقی $y(x)$ را خواهد داد تابع هدف $z_1(x,y(x))$ خود را بیشینه می‌کند. در این صورت، جواب به دست آمده را جواب استاکلبرگ گویند. برای حل این مسئله در روش کان- تاکر [۱۳] مسئله رهبر با محدودیت‌های شامل شرایط بهینگی کان- تاکر مسئله پیرو (۲) حل می‌شود. شرایط کان- تاکر برای مسئله (۲) به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}&uB-v=-d_2\\&u(Ax+By-b)-vy=0\\&Ax+By\le b\\&y\ge 0, u^T\ge 0, v^T\ge 0\end{aligned}\qquad (۳)$$

که در آن، u یک بردار سطری m بعدی و v یک بردار سطری n_2 بعدی است.

اکنون مسئله پیرو (۲) با شرایط (۳) جایگزین گردیده و مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی (۱) به صورت معادل زیر که یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی یک سطحی است فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} &\text{maximize } z_1(x,y) = c_1x + d_1y \\ &s.t. \quad uB - v = -d_2 && (۴) \\ &\qquad u(Ax + By - b) - vy = 0 && (۵) \\ &\qquad Ax + By \le b && (۶) \\ &\qquad x \ge 0, y \ge 0, u^T \ge 0, v^T \ge 0 && (۷) \end{aligned}$$

از محدودیت‌های (۴) و (۵) می‌توان v را حذف کرد و محدودیت تساوی (۵) را به صورت زیر نوشت که شرایط کمبود مکمل نام دارند.

$$u(b - Ax - By) + (uB + d_2)y = 0 \qquad (۸)$$

فرض کنید A_i و B_i به ترتیب بردارهای سطری iام ماتریس A و B و B^j و d_{2j} به ترتیب بردار ستونی j ام ماتریس B و عنصر j ام بردار d_2 باشند. رابطه (۹) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{m} u_i (b_i - A_i x - B_i y) + \sum_{j=1}^{n} y_j (uB^{2j} + d_{2j}) = 0 \quad (۹)$$

که با توجه به قیود (۳) و (۴) با معادلات زیر معادل است:

$$u_i(b_i - A_i x - B_i y) = 0 \qquad i = 1, \dots, m$$
$$y_j(uB^{2j} + d_{2j}) = 0 \qquad j = 1, \dots, n_2$$

لذا شرط $u_i = 0$ یا $b_i - A_i x - B_i y = 0$ برای $i = 1, \dots, m$ و شرط $uB^j + d_{2j} = 0$ یا $y_j = 0$ برای $j = 1, \dots, n_2$ باید به‌طور هم‌زمان برقرار باشند. با معرفی بردارهای $w_1 = (w_{11}, \dots, w_{1m})$ و $w_2 = (w_{21}, \dots, w_{2n_2})$، با مولفه‌های صفر یا یک، این شرایط به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} &0 \le u \le Mw_1 \\ &0 \le b - Ax - By \le M(e - w_1^T) \\ &0 \le uB + d_2 \le Mw_2 && (۱۰) \\ &0 \le y \le M(e - w_2^T) \end{aligned}$$

که در آن، e یک بردار m بعدی با مولفه‌های یک و M یک مقدار ثابت بزرگ است. بنابراین مسئله برنامه‌ریزی ریاضی (۴) با مسئله برنامه‌ریزی صفر- یک آمیخته زیر معادل است.

$$\begin{aligned} &\text{maximize } z_1(x,y) = c_1x + d_1y \\ &s.t. \quad 0 \le u^T \le Mw_1^T \\ &\qquad 0 \le b - Ax - By \le M(e - w_1^T) && (۱۱) \\ &\qquad 0 \le (uB + d_2)^T \le Mw_2^T \\ &\qquad 0 \le y \le M(e - w_2^T) \\ &\qquad x \ge 0 \end{aligned}$$

اکنون توضیح مختصری در مورد بهینه‌سازی چندهدفی ارائه می‌دهیم. در حالت کلی یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} &\max f(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x)) \\ &\text{s.t. } x \in X \end{aligned}$$

اگر بخواهیم مفهوم بهینگی جواب مسئله برنامه‌ریزی تک‌هدفی را برای این مسئله نیز به کار بریم تعریف زیر را خواهیم داشت.

تعریف ۲-۱- اگر به ازای هر $x \in X$ و $i = 1, \dots, k$، $f_i(x) \le f_i(x^*)$ نقطه $x^* \in X$ را جواب بهینه کامل مسئله فوق می‌نامند.

با توجه به این‌که چنین جوابی همواره وجود ندارد، به ویژه زمانی‌که اهداف در تقابل یک‌دیگر باشند، مفهوم کارایی به صورت زیر تعریف می‌شود.

تعریف ۲-۲- نقطه $x^* \in X$ را جواب کارای مسئله چندهدفی فوق گویند هرگاه نقطه دیگری مانند $x \in X$ موجود نباشد به طوری که به ازای هر $i = 1, \dots, k$، $f_i(x^*) \le f_i(x)$ و برای حداقل یک j، $f_j(x^*) \ne f_j(x)$.

۳- بازی امنیتی چندهدفی

بازی امنیتی چندهدفی یک بازی چندنفره بین یک مدافع و n نوع مهاجم است. مدافع سعی دارد با استفاده از m منبع یکسان امنیتی از اهداف $T = \{1, 2, \dots, p\}$ محافظت کند که m منبع به صورت پیوسته بین اهداف قابل توزیع است. راهبرد مدافع را می‌توان به صورت یک بردار پوشش $c = (c_1, \dots, c_p)$ نشان داد که در آن به ازای $k = 1, \dots, p$، c_k 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 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:

$$C = \left\{ c = (c_1, \dots, c_p) \mid 0 \le c_k \le 1,\ \sum_{k=1}^{p} c_k \le m \right\} \qquad (۱۲)$$

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. لذا فضای راهبرد مهاجم نوع i به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$A = \left\{ a_i = \left(a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^p\right) \mid a_i^k \ge 0,\ \sum_{k=1}^{p} a_i^k = 1 \right\} \quad (۱۳)$$

فرض کنید $U_i^{c,d}(k)$ نشان‌دهنده مطلوبیت مدافع باشد زمانی‌که k توسط مهاجم نوع i انتخاب شده باشد و از طرف مدافع پوشش داده شده باشد. اگر k پوشش داده نشده باشد جریمه مدافع با $U_i^{u,d}(k)$ نمایش داده می‌شود. مطلوبیت مهاجم به طور مشابه با $U_i^{u,a}(k)$ و $U_i^{c,a}(k)$ نمایش داده می‌شود. 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، و دو عایدی برای مهاجم نوع i در این دو حالت می‌باشد.

برای یک نمایه 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:

$$U_i^d(c, a_i) = \sum_{k=1}^{p} a_i^k U_i^d(c_k, k), \qquad (۱۴)$$

$$U_i^a(c, a_i) = \sum_{k=1}^{p} a_i^k U_i^a(c_k, k), \qquad (۱۵)$$

که در آن،

$$U_i^d(c_k, k) = c_k U_i^{c,d}(k) + (1 - c_k) U_i^{u,d}(k) \qquad (۱۶)$$

$$U_i^a(c_k, k) = c_k U_i^{c,a}(k) + (1 - c_k) U_i^{u,a}(k) \qquad (۱۷)$$

به ترتیب عایدی دریافت‌شده مدافع و مهاجم نوع i هستند، درصورتی‌که به هدف k حمله شده باشد و به مقدار c_k پوشش داده شده باشد.

در این بازی ابتدا مدافع تصمیم خود را اتخاذ می‌کند. وی در تصمیم‌گیری خود n نوع مهاجم را لحاظ کرده و به دنبال بیشینه‌سازی مطلوبیت‌هایش در برابر انواع مهاجمان است. او می‌خواهد منابع خود را به گونه‌ای تخصیص دهد که بتواند حتی‌الامکان اهداف را در مقابل انواع مهاجمان پوشش دهد. مهاجم نوع i از این تصمیم مدافع آگاهی دارد و پاسخی منطقی به این تصمیم خواهد داد. یعنی پس از مشاهده تصمیم مدافع بهترین هدف را برای حمله انتخاب می‌کند. بنابراین بازی امنیتی مذکور را می‌توان با مسئله برنامه‌ریزی دو سطحی زیر فرمول‌بندی کرد.

$$\begin{aligned}
&\max_{c} \left(U_1^d(c, a_1), \dots, U_n^d(c, a_n) \right) \\
&s.t.\quad \sum_{k=1}^{p} c_k \le m \\
&\qquad 0 \le c_k \le 1,\ k = 1, \dots, p \\
&\qquad \max_{a_i}\ U_i^a(c, a_i) \\
&\qquad s.t.\ \sum_{k=1}^{p} a_i^k = 1 \\
&\qquad\qquad a_i^k \ge 0,\ k = 1, \dots, p
\end{aligned} \qquad (۱۸)$$

با ثابت نگه‌داشتن سیاست بهینه c مدافع، مسئله بهینه‌سازی مهاجم نوع i که یک پاسخ بهینه در مقابل تصمیم c خواهد داد به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned}
&\max\ \ U_i^a(c, a_i) \\
&s.t\quad \sum_{k=1}^{p} a_i^k = 1 \\
&\qquad a_i^k \ge 0 \quad k = 1, \dots, p
\end{aligned} \qquad (۱۹)$$

بنابراین برای راهبرد c مدافع، پاسخ بهینه a_i مهاجم نوع i در شرایط بهینگی زیر صدق می‌کند:

$$\begin{aligned}
&v^i \ge (c_k U_i^{c,a}(k) + (1 - c_k) U_i^{u,a}(k)),\ k \in T \\
&a_i^k (v^i - (c_k U_i^{c,a}(k) + (1 - c_k) U_i^{u,a}(k))) = 0,\ k \in T \\
&\sum_{k=1}^{p} a_i^k = 1 \\
&a_i^k \ge 0,\ k \in T
\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

بنابراین، با درنظر گرفتن n مهاجم، برای مدافع مسئله بهینه‌سازی چندهدفی زیر را خواهیم داشت:

$$\max\ (U_1^d(c,a_1),\ldots,U_n^d(c,a_n))$$

$$\begin{aligned}
s.t.\quad & \sum_{k=1}^{p} c_k \le m \\
& v^i - (c_{t_k} U_i^{c,a}(k) + (1-c_k) U_i^{u,a}(k)) \ge 0 \\
& \qquad\qquad ,k \in T, i = 1,\ldots,n \\
& 0 \le a_i^k \le M\,\delta_i^k \quad ,k \in T, i = 1,\ldots,n \\
& 0 \le v^i - (c_k U_i^{c,a}(k) + (1-c_k) U_i^{u,a}(k)) \le \\
& \qquad (e - \delta_i^{t_k})M \quad k \in T, i = 1,\ldots,n \qquad \text{(۲۱)} \\
& \sum_{k=1}^{p} a_i^k = 1 \quad i = 1,\ldots,n \\
& v^i \in \mathbb{R}, \delta_i^k \in \{0,1\} \quad i = 1,\ldots,n, k = 1,\ldots,p \\
& a_i^k \ge 0 \qquad k = 1,\ldots,p \\
& 0 \le c_k \le 1 \quad k = 1,\ldots,p
\end{aligned}$$

که در آن، M یک مقدار ثابت بزرگ است.

برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفی (۲۱) روش‌های مختلفی ارائه شده است [۱۴]. ما روش برنامه‌ریزی آرمانی را برای حل این مسائل پیشنهاد می‌کنیم. در این روش، ابتدا از تصمیم‌گیرنده خواسته می‌شود تا آرمان خود را برای هر هدف ارائه کند. ($\hat{g}_i, i = 1,\ldots,n$) درصورتی‌که تصمیم‌گیرنده نتواند این‌کار را انجام دهد n مسئله تک‌هدفی را حل کرده و از مقادیر بهینه به‌دست‌آمده در معرفی آرمان‌های مدافع برای اهداف کمک می‌گیریم. پس از ارائه آرمان‌ها، مسئله‌ای به صورت زیر خواهیم داشت که یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفی صفر- یک آمیخته است و با روش شاخه و کران [۱۵] قابل حل است.

$$\min \sum_{i=1}^{n} w_i \left(d_i^+ + d_i^-\right)$$

$$\begin{aligned}
s.t \qquad & \sum_{k=1}^{p} c_k \le m \\
& 0 \le a_i^k \le M\,\delta_i^k \qquad k \in T, i = 1,\ldots,n \\
& 0 \le v^i - (c_k U_i^{c,a}(\mathrm{k}) + \left(1-c_k\right) U_i^{u,a}(\mathrm{k})) \le \\
& \qquad \left(e - \delta_i^{t_k}\right)M \quad k \in T, i = 1,\ldots,n \qquad \text{(۲۲)} \\
& \sum_{k=1}^{p} a_i^k = 1 \quad i = 1,\ldots,n \\
& v^i \in \mathbb{R}, \delta_i^k \in \{0,1\} \qquad i = 1,\ldots,n,\ k \in T \\
& U_i^d(c,a_i) + d_i^+ - d_i^- = \hat{g}_i \quad i = 1,\ldots,n \\
& 0 \le c_k \le 1 \qquad k = 1,\ldots,p \\
& d_i^+, d_i^- \ge 0 \quad i = 1,\ldots,n
\end{aligned}$$

که در آن، d_i^+ و d_i^- به ترتیب متغیرهای انحرافی بیش‌تر از آرمان و کم‌تر از آرمان می‌باشند. به عبارت دیگر:

$$d_i^+ = \begin{cases} U_i^d - \hat{g}_i & U_i^d \ge \hat{g}_i \\ 0 & U_i^d \le \hat{g}_i \end{cases}$$

و

$$d_i^- = \begin{cases} \hat{g}_i - U_i^d & \hat{g}_i \ge U_i^d \\ 0 & \hat{g}_i \le U_i^d \end{cases}$$

وزن w_i نشان‌دهنده اهمیت تابع هدف iام ($i = 1,\ldots,n$) است. جواب به دست آمده از این مسئله یک جواب رضایت بخش برای مدافع می‌باشد.

۴- کاربرد بازی امنیتی چندهدفی در امنیت مترو

حوزه‌های امنیتی مختلفی در جهان واقعی وجود دارد که در زمان تصمیم‌گیری در مورد یک سیاست امنیتی، چندین هدف را مدنظر قرار می‌دهند. در این بخش می‌خواهیم یک کاربرد از بازی‌های امنیتی چندهدفی را برای تصمیم‌گیری در زمینه حفاظت از ایستگاه‌های مترو ارائه دهیم.

مترو شامل چندین ایستگاه است و روزانه هزاران مسافر را جابه‌جا می‌کند. در کل، در مترو سه نوع مهاجم با اهداف مشخص می‌تواند شناسایی شود. مسافران بی بلیط، مجرمان و تروریست‌ها. تعداد قابل ملاحظه‌ای از اقدامات امنیتی ممکن است در مترو وجود داشته باشد مانند استفاده از دوربین‌ها، گشت‌ها و بازرسی‌های تصادفی. بنابراین، بهتر است به نحوه تخصیص نیروهای امنیتی محدود برای حفاظت از ایستگاه‌های مترو بپردازیم تا بیش‌ترین امنیت در مترو برقرار شود. سه نوع مهاجم متفاوت در این مسئله مشاهده می‌شود که ترجیحات مختلفی دارند و ممکن است پاسخ‌های متفاوتی داشته باشند. به عنوان مثال، مسافران بی‌بلیط معمولاً ایستگاه‌های شلوغ را انتخاب می‌کنند و بیش‌تر مجرمان ایستگاه‌های خلوت را برای رسیدن به هدف‌شان برمی‌گزینند. تروریست‌ها ممکن است برای رسیدن به اهداف سیاسی خود به ایستگاه‌هایی ضربه بزنند که از لحاظ اقتصادی و فرهنگی اهمیت داشته باشند. هم‌چنین، مسئولین امنیتی (مدافع) ممکن است راهبردهای متفاوتی برای جلوگیری از هر نوع مهاجم داشته باشند. ورود مسافران بی‌بلیط هزینه‌ای را برای مترو به دنبال دارد. مدافع با استقرار سیاست‌های امنیتی در برابر مسافران بی‌بلیط از هزینه از دست رفته جلوگیری خواهد کرد. میزان صدمه به اموال و جرائم خشونت‌آمیز توسط مجرمان نیز هزینه بالایی برای مترو خواهد داشت و باعث ایمنی پائین و

درنتیجه کاهش مسافران خواهد شد. تجاوز، سرقت، قتل و ... از جمله این جرائم است. تهدیدات تروریست‌ها ما را بر آن می‌دارد تا سیاست امنیتی خاصی برای مقابله در این خصوص اتخاذ کنیم چراکه در بیش‌تر حملات تروریستی در کشورهای مختلف، تروریست‌ها مترو را یکی از اهداف خود قرار داده‌اند. علی‌رغم احتمال نسبتاً کم‌حمله تروریستی، اقدامات امنیتی طراحی‌شده در این زمینه با توجه به تعداد قابل توجه افراد در معرض خطر همواره باید یک اولویت باشد. مسئولین امنیتی نیاز است تا تمام تهدیدات اعمال‌شده توسط انواع مهاجمان را به منظور ارائه راهبرد امنیتی موثر در نظر بگیرند. بنابراین، دفاع در مقابل هر نوع مهاجم می‌تواند به عنوان یک هدف برای مدافع در نظر گرفته شود، درحالی‌که این اهداف کاملاً متضاد نیستند. به عنوان مثال، اقدام در مقابل مسافران بی‌بلیط ممکن است از وقوع جرم نیز بکاهد. البته با تمرکز زیاد بر روی یک مهاجم ممکن است مهاجم دیگر نادیده گرفته شود. بنابراین، نیاز است تا مسئولین امنیتی منابع امنیتی محدود خود را در این ایستگاه‌ها طوری تخصیص دهند که امنیت مترو بالاتر رود. با توجه به مطالب بخش قبل، برای مقابله با سه نوع مهاجم 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 نظام امنیتی انتخاب کرد. با حل این مسئله، راهبردهای آمیخته‌ای را می‌یابیم که راهبردهای کارای امنیتی مدافع نامیده می‌شوند؛ به این معنی که راهبرد دیگری را نمی‌توان یافت که تمامی اهداف به خوبی آن‌ها عمل کرده و حداقل یک هدف بهتر از آن‌ها باشند. البته با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی به یک جواب رضایت بخش برای مدافع دست می‌یابیم. اکنون فرض کنید بازی امنیتی مذکور بین مسئولین امنیتی (مدافع) و سه نوع مهاجم (مسافران بی‌بلیط، مجرمان و تروریست‌ها) با درنظرگرفتن دو ایستگاه مترو و یک منبع امنیتی به صورت جداول (۴-۲) نمایش داده شود:

جدول (۲): نمایش بازی بین مدافع و مهاجم نوع۱

	ایستگاه ۱		ایستگاه ۲	
	پوشش داده شده	پوشش داده نشده	پوشش داده شده	پوشش داده نشده
مدافع	۵	-۲	۱۰	۳
مهاجم نوع ۱	-۱	۴	-۱	۱۰

جدول (۳): نمایش بازی بین مدافع و مهاجم نوع ۲

	ایستگاه ۱		ایستگاه ۲	
	پوشش داده شده	پوشش داده نشده	پوشش داده شده	پوشش داده نشده
مدافع	۱	۰	۲	-۲
مهاجم نوع ۲	-۱	۱	۰	۵

جدول (۴): نمایش بازی بین مدافع و مهاجم نوع ۳

	ایستگاه ۱		ایستگاه ۲	
	پوشش داده شده	پوشش داده نشده	پوشش داده شده	پوشش داده نشده
مدافع	۲	-۱	۳	-۲
مهاجم نوع ۳	-۲	۱	-۳	۴

مسئله بهینه‌سازی چندهدفی (۲۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$
\begin{aligned}
& maximize\ \{a_1^1(5c_1-2(1-c_1))+a_1^2(10c_2+3(1-c_2)),\\
& a_2^1(c_1+0(1-c_1))+a_2^2(2c_2-2(1-c_2)),\\
& a_3^1(2c_1-(1-c_{t_1}))+a_3^2(3c_2-2(1-c_2))\ \}\\
& s.t \qquad c_1+c_2\le 1\\
& \qquad 0\le v^1-\left(-c_1+4\left(1-c_1\right)\right)\le\left(1-\delta_1^1\right)M\\
& \qquad 0\le v^1-\left(-c_2+10\left(1-c_2\right)\right)\le\left(1-\delta_1^2\right)M\\
& \qquad 0\le v^2-\left(-c_1+\left(1-c_1\right)\right)\le\left(1-\delta_2^1\right)M\\
& \qquad 0\le v^2-\left(-3c_2+4\left(1-c_2\right)\right)\le\left(1-\delta_2^2\right)M\\
& \qquad 0\le v^3-\left(-2c_1+\left(1-c_1\right)\right)\le\left(1-\delta_3^1\right)M\\
& \qquad 0\le v^3-\left(-3c_2+4\left(1-c_2\right)\right)\le\left(1-\delta_3^2\right)M \qquad (22)\\
& \qquad a_1^1+a_1^2=1\\
& \qquad a_2^1+a_2^2=1\\
& \qquad a_3^1+a_3^2=1\\
& \qquad a_i^k\ge 0, i=1,2,3\ , k=1,2\\
& \qquad 0\le a_1^1\le M\ \delta_1^1\\
& \qquad 0\le a_2^1\le M\ \delta_1^2\\
& \qquad 0\le a_3^1\le M\ \delta_2^1\\
& \qquad 0\le a_1^2\le M\ \delta_2^2\\
& \qquad 0\le a_2^2\le M\ \delta_3^1\\
& \qquad 0\le a_3^2\le M\ \delta_3^2\\
& \qquad \delta_i^k\in\{0,1\}, i=1,2,3\ , k=1,2\\
& \qquad 0\le c_1\le 1\\
& \qquad 0\le c_2\le 1
\end{aligned}
$$

مسئله برنامه‌ریزی آرمانی برای محاسبه راهبرد رضایت بخش مدافع به صورت زیر می‌باشد:

$$
\begin{aligned}
&\text{minimize } \tfrac{1}{3}\left(d_1^+ + d_1^-\right) + \tfrac{1}{3}\left(d_2^+ + d_2^-\right) + \tfrac{1}{3}\left(d_3^+ + d_3^-\right)\\
&s.t \qquad c_1 + c_2 \leqq 1\\
&\qquad 0 \le v^1 - \left(-c_1 + 4\left(1-c_1\right)\right) \le \left(1-\delta_1^1\right)M\\
&\qquad 0 \le v^1 - \left(-c_2 + 10\left(1-c_2\right)\right) \le \left(1-\delta_1^2\right)M\\
&\qquad 0 \le v^2 - \left(-c_1 + \left(1-c_1\right)\right) \le \left(1-\delta_2^1\right)M\\
&\qquad 0 \le v^2 - \left(-3c_2 + 4\left(1-c_2\right)\right) \le \left(1-\delta_2^2\right)M\\
&\qquad 0 \le v^3 - \left(-2c_1 + \left(1-c_1\right)\right) \le \left(1-\delta_3^1\right)M\\
&\qquad 0 \le v^3 - \left(-3c_2 + 4\left(1-c_2\right)\right) \le \left(1-\delta_3^2\right)M\\
&\qquad a_1^1 + a_1^2 = 1\\
&\qquad a_2^1 + a_2^2 = 1\\
&\qquad a_3^1 + a_3^2 = 1\\
&\qquad a_1^1\left(5c_1 - 2\left(1-c_1\right)\right) + a_1^2\left(10c_2 + 3\left(1-c_2\right)\right) + d_1^+ - d_1^- = 7.8\\
&\qquad a_2^1\left(c_1 + 0\left(1-c_1\right)\right) + a_2^2\left(2c_2 - 2\left(1-c_2\right)\right) + d_2^+ - d_2^- = 0.44\\
&\qquad a_3^1\left(2c_1 - \left(1-c_1\right)\right) + a_3^2\left(3c_2 - 2\left(1-c_2\right)\right) + d_3^+ - d_3^- = 0.86\\
&\qquad a_i^k \ge 0, i = 1,2,3, k = 1,2\\
&\qquad \delta_i^k \in \{0,1\}, i = 1,2,3, k = 1,2\\
&\qquad 0 \le a_1^1 \le M\,\delta_1^1\\
&\qquad 0 \le a_2^1 \le M\,\delta_1^2\\
&\qquad 0 \le a_3^1 \le M\,\delta_2^1\\
&\qquad 0 \le a_1^2 \le M\,\delta_2^2\\
&\qquad 0 \le a_2^2 \le M\,\delta_3^1\\
&\qquad 0 \le a_3^2 \le M\,\delta_3^2\\
&\qquad 0 \le c_1 \le 1\\
&\qquad 0 \le c_2 \le 1
\end{aligned}
\tag{23}
$$

با حل این مسئله با استفاده از نرم‌افزار لینگو[1] به دست می‌آوریم:

$c_1 = 0.43,$

$c_2 = 0.57,$

$a_1^1 = 0,$

$a_1^2 = 1,$

$a_2^1 = 0,$

$a_2^2 = 1,$

$a_3^1 = 0,$

$a_3^2 = 1$

این به این معنی است که مدافع برای حفاظت از دو ایستگاه با یک منبع امنیتی باید حضور منبع امنیتی را به صورت تصادفی با ۴۳٪ در ایستگاه ۱ و ۵۷٪ در ایستگاه ۲ برنامه‌ریزی کند.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مسئله بازی امنیتی چندهدفی مورد بررسی قرار گرفت. برای حل این مسئله، یک روش برنامه‌ریزی دو سطحی چندهدفی که منجر به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفی می‌شود، پیشنهاد شد. برای بیان اعتبار و کاربرد روش یک مثال عملی برای بررسی امنیت مترو ارائه گردید. در دنیای واقعی ممکن است توابع عایدی بازیکنان به صورت قطعی بیان نشود یا آرمان‌های بازیکنان مبهم باشند. در این صورت می‌توان از نظریه مجموعه‌های فازی برای رفع مشکل استفاده کرد که در پژوهش‌های آینده به بحث در این زمینه خواهیم پرداخت. بازی‌های امنیتی به صورت عملی در کشورهای مختلف در حال اجراست و پیشنهاد می‌شود که از این بازی‌ها در تحلیل مسائل امنیتی کشورمان استفاده شود.

1- Lingo

۶- مراجع

[1] J. V. Neumann and O. Morgenstern, “Theory of Games and Economic Behavior,” Wiley, New York, 1944.

[2] O. G. Haywood, “Military Decision and Game Theory,” Wiley, Journal of the Operations Research Society of America, vol. 2, no. 4, pp. 365-385, 1989.

[3] M. Tambe, “Security and game theory, algorithms, deployed systems, lessons learned,” Cambridge university press, 2012.

[4] N. Gatti, “Game Theoretical Insights in Strategic Patrolling: Model and Algorithm in Normal-Form,” in ECAI-08, pp. 403–407, 2008.

[5] K. Lye and J. M. Wing, “Game Strategies in Network Security,” International Journal of Information Security, vol. 4, no. 1–2, pp. 71–86, 2005.

[6] G. Brown, M. Carlyle, J. Kline, and K. Wood, “A Two-Sided Optimization for Theater Ballistic Missile Defense,” in Operations Research, vol. 53, pp. 263–275, 2005.

[7] T. Sandler and D. G. A. M, “Terrorism and Game Theory,” Simulation and Gaming, vol. 34, no. 3, pp. 319–337, 2003.

[8] G. Owen, “Game Theory,” Academic Press, San Diego, Third Edition, 1995.

[9] 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., Accepted, (In Persian).

[10] H. Bigdeli and H. Hassanpour, “A satisfactory strategy of multiobjective two person matrix games with fuzzy payoffs,” Iranian Journal of Fuzzy Systems, vol. 13, pp. 17-33, 2016.

[11] H. Bigdeli, H. Hassanpour, and J. Tayyebi, “Constrained Bimatrix Games with Fuzzy Goals and its Application in Nuclear Negotiations,” Submitted paper.

[12] M. Brown, B. An, C. Kiekintveld, F. Ordóñez, and M. Tambe, “An extended study on multi-objective security games” Auton Agent Multi-Agent Syst., vol. 28, pp. 31–71, 2014.

[13] M. Sakawa and I. Nishizaki, “Cooperative and Noncooperative Multi-Level Programming,” Springer, New York and London, 2009.

[14] M. Sakawa, “Fuzzy sets and interactive multiobjective optimization,” Plenum press, New York and London, 1993.

[15] M. S. Bazaraa and J. J. Jarvis, “Linear Programming and Network Flows,” John Wiley & Sons, Inc., NewYork , 1977.