12th International Conference on Industrial Engineering
(ICIE 2016)
Iran Institute of Industrial Engineering
Kharazmi University
12th International Conference on Industrial Engineering

استراتژی‌های بهینه دفاع از سیستم‌های تجدیدپذیر با رویکرد بهبود قابلیت اطمینان

مهدی رحیمدل میبدی[a]، امیرحسین امیری[b]، مهدی کرباسیان[c]

[a] دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران

[b] دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران

[c] دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

نویسنده مسئول: مهدی رحیمدل میبدی (rahimdel.m@gmail.com)

چکیده

قابلیت اطمینان، چالش کیفیت در قرن حاضر و از برجسته‌ترین ابعاد مرغوبیت محصول است. در واقع، امروزه انقلاب کیفیت به پایان نرسیده است، بلکه با انقلاب قابلیت اطمینان در تحوّلی دیگر است. در این تحقیق، با هدف بهبود قابلیت اطمینان، مدل‌سازی برای سرمایه‌گذاری حفاظت از سیستم‌ها درنظر گرفته شده است که در این سیستم‌ها، مدافع با توجه به هزینه موردنیاز تجهیزات دفاع، به دنبال حداقل‌نمودن خسارت وارده از سوی مهاجم می‌باشد، در صورتی‌که هدف مهاجم تخریب حداکثری اهداف با توجه به هزینه تجهیزات حمله است. در این مسأله، فاکتور تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها معرفی شده است که معیارهای تعیین‌کننده آن غیرمستقل هستند و با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تکنیک‌های آماری چندمتغیره، ضریب تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها تعیین می‌شوند. به‌طور کلّی در این تحقیق، با توجه به احتمالات موجود در حمله موفق، ضریب تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها، ساختار قابلیت اطمینان سیستم و رویکرد تئوری بازی‌ها در پیدانمودن نقطه تعادل، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین میزان سرمایه‌گذاری دفاع از تمامی زیرسیستم‌ها، ارائه شده است. در نهایت، مدل ارائه‌شده تحقیق برای یک نمونه کاربردی، استفاده‌شده و نتایج نهائی آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: قابلیت اطمینان، تجدیدپذیری، دفاع، همبستگی، تئوری بازی‌ها.

۱. مقدمه

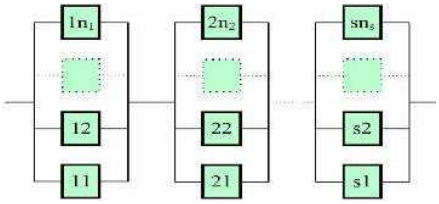
زیرساخت‌های حسّاس و مهم هر کشور که نیاز به فعالیت مداوم و کارا، در راستای مأموریت‌های تعیین‌شده دارند، می‌بایست از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار باشند و با توجه به نقش حیاتی آنها در ثبات، آرامش و امنیت زندگی اجتماعی مردم، نیاز مبرم به حفظ و نگهداری دارند. در راستای تحقق این هدف، به‌کارگیری استراتژی‌های بهینه برای تعیین میزان سرمایه‌گذاری دفاع از سیستم‌های حسّاس، که ارتباط مستقیمی با افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های مذکور دارد، یکی از دغدغه‌های اصلی دولت‌ها می‌باشد. در مقابل، هدف اصلی مهاجم، به‌کارگیری سیاست‌های بهینه تهاجمی، برای حمله به سیستم‌های حسّاس و تخریب حداکثری آنها است. تاکنون تحقیقات زیادی برای تعیین استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله انجام شده است. لیکن بسیاری از محققین، از مفاهیم و کاربردهای تئوری بازی‌ها برای تعیین استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله استفاده نموده‌اند. در مدل ارائه‌شده ژین یانگ و همکاران، پس از تعیین تمامی استراتژی‌های دو طرف بازی و معیارهای سنجش آنها، هرکدام از استراتژی‌ها با متغیرهای کلامی و با توجه به اصول تئوری دمپستر- شیفر مورد سنجش قرار می‌گیرند و پس از محاسبه ماتریس نهایی تصمیم‌گیری و استفاده از تئوری بازی‌ها، نقطه تعادل در صورت وجود تعیین می‌شود[۱]. یانگ و همکاران، سرمایه‌گذاری بهینه امنیت اطلاعات با توجه به انواع مختلف حمله‌ها را مدل‌سازی نمودند [۲]. هاسکن و لوتین، با هدف مینیمم نمودن ماکزیمم خسارت مورد انتظار از منظر مدافع، یک سیستم سری- موازی درنظر گرفتند که هر کدام از اجزاء آن، دارای میزان ظرفیت متفاوتی می‌باشد و برای حل مدل، از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند[۳]. در مدل مورد تحقیق هاسکن، با توجه به نقاط هدف سیستم‌ها که دارای ساختارهایی مانند سری، موازی و پیچیده می‌باشند یک مدل براساس تئوری بازی‌ها ارائه شده است و میزان سرمایه‌گذاری بهینه دفاع و حمله، با توجه به آگاهی کامل مهاجم از اهداف مدافع، تعیین می‌شود[۴]. همچنین در تحقیق انجام‌شده لوتین و همکاران، دفاع بهینه از اجزاء یکسان ولی با محافظ گروهی از آنها مدل‌سازی شده است که در این تحقیق، مهاجم برای حمله به اجزاء می‌بایست ابتدا محافظ گروهی آنها را تخریب نماید[۵]. در زمینه تخصیص قابلیت اطمینان، محققین، عوامل گوناگونی را درنظر گرفته و مورد بررسی قرارداده‌اند که به عنوان نمونه می‌توان به پژوهش سیرامداس و همکاران، اشاره نمود[۶]. در این تحقیق، با توجه به شش معیار پیچیدگی، هزینه، سطح تکنولوژیکی، زمان عملکرد، میزان بحرانی‌بودن و تعمیرپذیری، یک رابطه براساس منطق فازی ارائه شده است که نتیجه آن وزن قابلیت اطمینان برای هرکدام از زیرمجموعه ها است. همچنین هریش و شارما[۷]، با هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان و دردسترس‌پذیری سیستم و کمینه‌سازی هزینه و وزن اجزاء، به

مدل‌سازی تخصیص قابلیت اطمینان پرداختند.

این پژوهش، به استناد تحقیقات انجام‌شده گذشته در زمینه موضوع تحقیق و با توجه به نواقص و کمبودهای موجود در آنها، یک مدل کاربردی و واقعی‌تری برای بهبود تخصیص سرمایه‌گذاری دفاع از سیستم‌ها ارائه می‌نماید. موضوع مهمی که در این تحقیق معرفی شده است، میزان تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها است که وابسته به عوامل زیادی مانند هزینه ساخت نمونه معادل، تکنولوژی ساخت، زمان تولید مجدد، امکان تعمیرپذیری و میزان پیچیدگی ساخت می‌باشد. لیکن در این تحقیق با درنظر گرفتن شاخص تجدیدپذیری و همچنین فرض عدم استقلال عوامل تعیین‌کننده آن، میزان تجدیدپذیری هرکدام از زیرسیستم‌ها، ارزیابی می‌شوند و در نهایت با معرفی ضریب تجدیدپذیری برای هرکدام از زیرسیستم‌ها، استراتژی تعیین سرمایه‌گذاری دفاع از زیرسیستم‌ها، مدل‌سازی و تحلیل می‌شوند. در بخش دوّم این مقاله، روش پیشنهادی این تحقیق برای ارزیابی زیرسیستم‌ها با درنظر گرفتن عامل تجدیدپذیری و عدم استقلال معیارهای سنجش این فاکتور، ارائه می‌شود. در بخش سوم، چگونگی مدل‌سازی استراتژی‌های بهینه دفاع از سیستم‌ها، با درنظرگرفتن عامل تجدیدپذیری، بیان شده است. در بخش چهارم، یک مثال عددی برای تبیین چگونگی محاسبات و پیاده‌سازی مدل پیشنهادی، نشان داده شده است و در نهایت در بخش پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای مطالعات آتی مطرح می‌شود.

۲. ارزیابی تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها

در مسأله موردنظر این تحقیق، s سیستم وجود دارد که هر سیستم شامل n_i زیرسیستم با ساختار عملکردی موازی است و ارتباط تمامی سیستم‌ها با یکدیگر به صورت سری می‌باشد. شکل ۱، ساختار قابلیت اطمینان مسأله موردنظر را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ساختار قابلیت اطمینان مسأله تحقیق

یکی از فاکتورهای مهم و اساسی در پایایی سیستم‌ها، میزان تجدیدپذیری زیرسیستم‌های مربوط به آن است که وابسته به عوامل زیادی است. مهمترین این عوامل، عبارتند از: هزینه ساخت نمونه معادل، تکنولوژی ساخت، زمان تولید مجدد، امکان تعمیرپذیری و میزان پیچیدگی ساخت. برای تعیین میزان اهمیت و وزن فاکتور تجدیدپذیری هر زیرسیستم، می‌توان با توجه به عوامل تأثیرگذار مذکور، از روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه، استفاده نمود. لیکن در این تحقیق فرض استقلال معیارها که یکی از مفروضات استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه می‌باشد، درنظر گرفته نشده است. بنابراین فرض مسأله بر وابستگی عوامل تأثیرگذار در میزان تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها می‌باشد. برای حل معضل پیش‌آمده می‌توان از ترکیب روش *PCA* و یکی از روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه مانند *TOPSIS* استفاده نمود که این روش در مقاله برادران و همکاران، مورد تایید قرار گرفته است[۸]. لیکن در این تحقیق با اصلاح تناقضات موجود در آن مدل به خصوص نرمال‌سازی اولیه، از روش زیر استفاده شده است:

ابتدا، ارزیابی میزان تجدیدپذیری هرکدام از زیرسیستم‌ها با توجه به معیارهای تصمیم‌گیری (غیرمستقل) مربوطه، توسط گروه خبرگان و با استفاده از متغیرهای کلامی، انجام می‌شود. پس از جمع‌آوری ماتریس‌های تصمیم‌گیری از خبرگان ارزیاب، متغیرهای کلامی به اعداد فازی ذوزنقه‌ای مربوطه تبدیل می‌شوند و ماتریس نهایی تصمیم‌گیری با استفاده از میانگین هندسی ماتریس‌ها، محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه یکی از شرایط اساسی برای تمامی روش‌های تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه، مستقل‌بودن معیارهای تصمیم‌گیری است، لیکن در صورت وجود همبستگی بین معیارهای تصمیم‌گیری، می‌توان از تکنیک‌های آماری چندمتغیره برای بهبود تحلیل و ارزیابی گزینه‌های تصمیم‌گیری استفاده نمود که در این تحقیق، استفاده از روش *PCA* پیشنهاد شده است. برای تعیین وزن نهائی تجدیدپذیری هرکدام از زیرسیستم‌ها، با درنظرگرفتن ماتریس نهائی تصمیم‌گیری به‌دست آمده، انجام گام‌های ذیل پیشنهاد می‌شود:

گام ۱: با توجه به وجود معیارهای منفی و مثبت تصمیم‌گیری، با استفاده از روش بی‌مقیاس‌سازی فازی و درنظرگرفتن اعداد فازی مربوطه (با فرمت $(\varsigma,\sigma,\tau,\upsilon)$) ماتریس نرمال‌شده محاسبه می‌شود (برای معیارهای مثبت از رابطه (۱) و برای معیارهای منفی از رابطه (۲) استفاده می‌شود).

$$n_{ij} = \frac{a_{ij} - \varsigma_j^M}{\upsilon_j^M - \varsigma_j^M} \quad (۱)$$

$$n_{ij} = \frac{\upsilon_j^M - a_{ij}}{\upsilon_j^M - \varsigma_j^M} \quad (۲)$$

برای قطعی‌سازی اعداد فازی مربوطه، می‌توان از رابطه (۳) استفاده نمود [۹].

$$C_{\tilde{n}_i} = \frac{\tau_i^2 + \upsilon_i^2 + \tau_i\upsilon_i - \varsigma_i^2 - \sigma_i^2 - \varsigma_i\sigma_i}{3(\tau_i + \upsilon_i - \varsigma_i - \sigma_i)} \quad (۳)$$

گام ۲: پس از محاسبه ماتریس بی‌مقیاس‌شده موزون (با ضرب‌نمودن ماتریس بی‌مقیاس‌شده در ماتریس قطری اوزان معیارها)، ماتریس واریانس کوواریانس مربوطه، مقادیر ویژه این ماتریس (PC) و امتیازات مؤلفه‌های اصلی آن، محاسبه می‌شود.

گام ۳: با توجه به اینکه مؤلفه‌های اصلی به‌دست‌آمده، به تعداد گزینه‌های تصمیم‌گیری می‌باشند، حاصل‌ضرب وزن نرمال‌شده آنها در ماتریس امتیازات

مؤلفه‌های اصلی، به عنوان ماتریس معیار موزون، تعیین می‌شود.

گام ۴: با توجه به تشکیل معیارهای جدید، می‌بایست جهت (مثبت یا منفی) آنها را با استفاده از رابطه (۴) تعیین نمود:

$$d_j = \sum_{j=1}^{n} l_{ij} * e_j \qquad (۴)$$

l_{ij}، ضرایب متغیرهای سازنده مؤلفه‌های اصلی و e_j، میزان اهمیت معیارهای اولیه می‌باشد. در صورتی‌که d_j کوچکتر از صفر باشد، معیار (یا PC) مربوط به آن، منفی بوده و در غیر این‌صورت، مثبت می‌باشد.

گام ۷: با توجه به نتایج حاصل از گام‌های ۳ و ۴ و با استفاده از تکنیک $TOPSIS$، رتبه‌بندی و میزان اهمیت هرکدام از زیرسیستم‌ها، تعیین می‌شوند که این روش یکی از تکنیک‌های کاربردی تصمیم‌گیری برای ارزیابی گزینه‌ها با در نظر گرفتن معیارهای تصمیم‌گیری می‌باشد[۱۰]. نتایج نهایی حاصل از این روش، با میزان نزدیکی نسبی گزینه‌ها به راه‌حل ایده‌آل (h_{ij}) ارزیابی می‌شوند. درنهایت، ضریب تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها (z_{ij})، با فرض ثابت‌بودن بودجه کل سرمایه‌گذاری‌های دفاع از سیستم‌ها، با استفاده از حل مدل برنامه‌ریزی خطی با روابط (۵) و (۶) تعیین می‌شوند.

$$\frac{z_i}{z_1} = \frac{h_i}{h_1} \quad , \quad i = 2, \dots .. s, \qquad j = 1, \dots, n_i \, . \qquad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} z_{ij} = \sum_{i=1}^{s} n_i \quad . \qquad (۶)$$

رابطه (۵) فرض معادل‌بودن نسبت ضرایب تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها و نسبت میزان نزدیکی نسبی آنها به گزینه ایده‌آل را نشان می‌دهد که در آن، زیرسیستم یک، به عنوان معیار مقایسه با تمامی زیرسیستم‌ها، درنظر گرفته شده است. ترکیب این رابطه با رابطه (۶)، تعیین‌کننده ضرایب تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها می‌باشد که نسبت به زیرسیستم مبنا (یک) ارزیابی می‌شود.

۳. مدل‌سازی استراتژی‌های دفاع از سیستم‌ها

با توجه به ساختار قابلیت اطمینان مسأله مورد نظر که در شکل (۱) نشان داده شده است، مدافع برای حفاظت از زیرسیستم‌ها، سرمایه‌گذاری‌های متفاوت f_{ij} را با هزینه واحد c_{ij} انجام می‌دهد و مهاجم نیز به طور مشابه برای حمله به هریک از زیرسیستم‌ها، F_{ij} را با هزینه واحد C_{ij} سرمایه‌گذاری می‌نماید که ij، نشان‌دهنده هدف jام از زیرسیستم iام است. همچنین از نظر مدافع، ارزش کل سیستم برابر با v و برای مهاجم، برابر با V می‌باشد. قابلیت اطمینان دفاع از هر هدف (زیرسیستم) بستگی به میزان سرمایه‌گذاری برای محافظت از اهداف از طرف مدافع و میزان سرمایه‌گذاری برای حمله‌نمودن به اهداف از طرف مهاجم دارد و در نتیجه، تعیین‌کننده موفقیت حمله و دفاع می‌باشد. یک روش ساده برای تعریف احتمال عدم حمله موفق روی هدف ij، استفاده از نسبت ارائه‌شده توسط آقای تالوک [۱۱] است که به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$\pi_{ij} = \frac{f_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}} \qquad (۷)$$

که در آن m_{ij} میزان شدت رقابت بر سر هدف ij است و یک مشخصه رقابت با توجه به نوع هدف ij می‌باشد.

مطلوبیت مدافع، بیشینه‌نمودن قابلیت اطمینان دفاع از تمامی زیرسیستم‌ها و کل سیستم و کمینه‌نمودن هزینه (در صورت وجود محدودیت بودجه) می‌باشد. بنابراین می‌توان دو تابع هدف به صورت روابط (۸) و (۹) را برای مطلوبیت موردنظر مدافع در نظر گرفت:

$$M \quad : u_1 = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} z_{ij}\, \pi_{ij}\, v_{ij} + R_{sp}\, v \, . \qquad (۸)$$

$$M \quad : u_2 = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} c_{ij}\, f_{ij} \quad . \qquad (۹)$$

در رابطه (۸)، R_{sp}، قابلیت اطمینان کل سامانه (سری- موازی) است و با توجه به ضریب تجدیدپذیری هر زیرسیستم، مقدار ارزش انفرادی زیرسیستم‌ها، برابر با حاصلضرب این ضریب در ارزش واقعی آن، در نظر گرفته شده است. بنابراین، تابع هدف مناسب برای بهینه‌سازی مطلوبیت مدافع، به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود.

$$M \quad : u = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} \frac{f_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}} z_{ij}\, v_{ij} + v\prod_{i=1}^{s}\left(1 - \left(\prod_{j=1}^{n_i} \frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}}\right)\right) - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} c_{ij}\, f_{ij} \quad . \qquad (۱۰)$$

از سوی دیگر، مهاجم متمایل به افزایش احتمال خطر (1-π_{ij}) می‌باشد. بنابراین به طور مشابه، تابع هدف مناسب برای بهینه‌سازی مطلوبیت مهاجم، به صورت رابطه (۱۱) خواهد بود.

$$M \quad : U = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} \frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}} V_{ij} + V\left(1 - \prod_{i=1}^{s}\left(1 - \prod_{j=1}^{n_i}\left(\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}}\right)\right)\right) - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}\, F_{ij} \, . \qquad (۱۱)$$

برای به‌دست‌آوردن راه‌حل از مفاهیم بنیادی نقطه تعادل نش [۱۲] در تئوری بازی‌ها استفاده می‌شود که در آن هیچ‌یک از طرفین بازی به صورت یکطرفه عمل نمی‌کند بلکه با توجه به منطقی‌بودن بازیکنان، مناسب‌ترین پاسخ تعیین می‌شود. بنابراین برای تعیین نقطه تعادل هر هدف، می‌بایست نقطه (نقاط) تعادل اهداف را تعیین نمود که این‌کار با توجه به عدم وجود محدودیت در توابع هدف، از مشتق مرتبه اول برای هر زیرسیستم و حل هم‌زمان آنها مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) قابل محاسبه خواهد بود.

$$z_{ik}\frac{m_{ik} F_{ik}^{m_{ik}} f_{ik}^{(m_{ik}-1)}}{(f_{ik}^{m_{ik}} + F_{ik}^{m_{ik}})^2} + v\,\frac{m_{ij} F_{ij}^{m_{ij}} f_{ij}^{(m_{ij}-1)}}{(f_{ik}^{m_{ik}} + F_{ik}^{m_{ik}})^2} Q_a Q_b - c_{ik} = 0 \, , \quad k=1,\dots,s \quad , l=1,\dots, n_i \, . \qquad (۱۲)$$

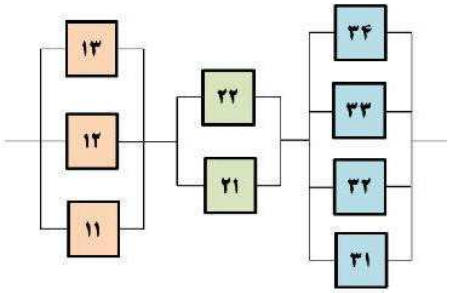
$$\frac{m_k f_k {}^{m_k} F_k^{(m_k-1)}}{(f_k {}^{m_k}+F_k^{m_k})^2}+V\frac{m_{kl} f_k {}^{m_k} F_k^{(m_k-1)}}{(f_k {}^{m_k}+F_k^{m_k})^2}Q_u Q_b - C_k = 0\,, \qquad k=1,\dots,s \quad , \quad l=1,\dots,n_i\,. \tag{۱۳}$$

$$Q_u=\prod_{\substack{i=k\\ j\neq L}}^{n_i}\frac{F_i^{m_i}}{f_i {}^{m_i}+F_i^{m_i}} \quad , \quad Q_b=\prod_{\substack{i=1\\ i\neq K}}^{N}\left(1-\prod_{j=1}^{n_i}\frac{F_i^{m_i}}{f_i {}^{m_i}+F_i^{m_i}}\right) \quad , \quad i=1,\dots,s \quad , \quad j=1,\dots,n_i\,.$$

نتیجه نهایی برنامه‌ریزی غیرخطی مذکور، نقطه تعادل را نشان می‌دهد و تعیین‌کننده میزان سرمایه‌گذاری بهینه دفاع برای هرکدام از زیرسیستم‌های حسّاس می‌باشد. برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مذکور، در ابعاد کوچک مسأله، می-توان از نرم‌افزارهای کاربردی در این زمینه مانند *Lingo* و *Gams* استفاده نمود. ولی درصورت بزرگ شدن ابعاد مسأله، می‌بایست با استفاده از روش‌های فرابتکاری، الگوریتم بهینه‌یابی مسأله را طراحی و اجرا نمود[۱۳].

۴. مثال عددی

در این قسمت، برای نشان‌دادن چگونگی استفاده از مدل پیشنهادی و تحلیل نتایج مربوطه، یک مثال کاربردی ارائه می‌شود. فرض کنید هدف مسأله موردنظر، تخصیص سرمایه‌گذاری دفاع از سامانه‌ای متشکل از سه سیستم می‌باشد که به ترتیب، شامل ۳، ۲ و ۴ زیرسیستم موازی می‌باشند. شکل (۲)، ساختار قابلیت اطمینان این سامانه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. ساختار قابلیت اطمینان مطالعه موردی

ارزیابی نهایی تمامی زیرسیستم‌های موردنظر با توجه به عامل تجدیدپذیری و معیارهای تصمیم‌گیری مثبت هزینه ساخت نمونه معادل(A_1)، تکنولوژی ساخت(A_2)، زمان تولید مجدد(A_3) و میزان پیچیدگی ساخت (A_4) و معیار تصمیم‌گیری منفی امکان تعمیرپذیری(A_5)، مطابق جدول (۱) می‌باشد. همچنین ارزش کل سیستم برای مدافع برابر با ۲۰۰ و برای مهاجم برابر با ۱۵۰ بوده و هزینه واحد دفاع و حمله و ضرایب شدت مربوط به هر زیرسیستم در جدول (۱)، نشان داده شده است.

جدول ۱. اطلاعات اولیه مثال کاربردی

	m_{ij}	C_{ij}	c_{ij}	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1	معیار (همبسته)
				۰/۲	۰/۲	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۲	وزن معیار
زیرسیستم‌ها	۱/۲	۴	۵	(۷،۸،۸،۹)	(۵،۶،۷،۸)	(۷،۸،۸،۹)	(۷،۸،۸،۹)	(۹،۱۰،۱۰،۱۰)	**۱۱**
	۱/۳	۳	۳	(۵،۶،۷،۸)	(۵،۶،۷،۸)	(۳،۴،۵،۶)	(۷،۸،۸،۹)	(۵،۶،۷،۸)	**۱۲**
	۱	۴	۵	(۵،۶،۷،۸)	(۳،۴،۵،۶)	(۹،۱۰،۱۰،۱۰)	(۵،۶،۷،۸)	(۳،۴،۵،۶)	**۱۳**
	۱	۵	۶	(۲،۳،۳،۴)	(۹،۱۰،۱۰،۱۰)	(۲،۳،۳،۴)	(۵،۶،۷،۸)	(۰،۱،۱،۲)	**۲۱**
	۱/۵	۸	۷	(۳،۴،۵،۶)	(۰،۱،۱،۲)	(۷،۸،۸،۹)	(۳،۴،۵،۶)	(۲،۳،۳،۴)	**۲۲**
	۱/۵	۵	۴	(۷،۸،۸،۹)	(۳،۴،۵،۶)	(۳،۴،۵،۶)	(۲،۳،۳،۴)	(۰،۱،۱،۲)	**۳۱**
	۱/۵	۴	۸	(۳،۴،۵،۶)	(۹،۱۰،۱۰،۱۰)	(۷،۸،۸،۹)	(۹،۱۰،۱۰،۱۰)	(۹،۱۰،۱۰،۱۰)	**۳۲**
	۱	۶	۵	(۷،۸،۸،۹)	(۳،۴،۵،۶)	(۷،۸،۸،۹)	(۵،۶،۷،۸)	(۳،۴،۵،۶)	**۳۳**
	۱	۷	۵	(۳،۴،۵،۶)	(۵،۶،۷،۸)	(۳،۴،۵،۶)	(۷،۸،۸،۹)	(۵،۶،۷،۸)	**۳۴**

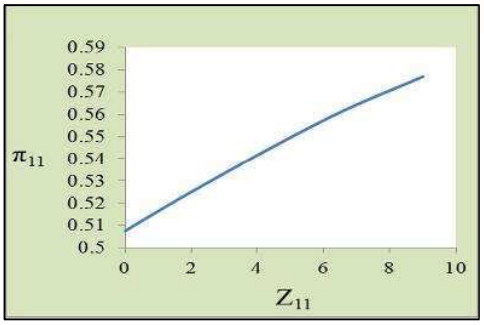
ضرایب تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها با استفاده از روابط (۱) تا (۶) تعیین می‌شوند. سپس با مدل‌سازی استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله، نقطه تعادل موردنظر مسأله، با استناد به روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود. نتایج نهایی مسأله در جدول (۲)، نشان داده شده است.

جدول ۲. ضرایب تجدیدپذیری و میزان سرمایه‌گذاری دفاع از زیرسیستم‌ها

زیرسیستم	۱۱	۱۲	۱۳	۲۱	۲۲	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴
h_{ij}	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۸۲	۰/۳۸	۰/۶۳
z_{ij}	۱/۴۰	۱/۳۰	۰/۸۵	۱/۰۲	۰/۳۳	۰/۲۲	۱/۷۷	۰/۸۱	۱/۳۶
f_{ij}	۲/۰۶۸	۴/۲۱۷	۱/۶۷۳	۲/۶۸۲	۴/۲۱۰	۰/۳۸۹	۰/۵۸۳	۰/۶۴۷	۱/۱۲۴

با توجه به نتایج نهائی موجود در جدول(۲)، در صورت مشابه‌بودن تمامی پارامترها مانند ضرایب شدت، هزینه‌های دفاع و حمله و ساختار قابلیت اطمینان، افزایش ضریب تجدیدپذیری تأثیر مستقیم در افزایش سرمایه‌گذاری دفاع از زیرسیستم‌ها دارد. به طور مثال با توجه به تشابه مقدار پارامترهای زیرسیستم‌های ۳۳ و ۳۴، میزان سرمایه‌گذاری دفاع از زیرسیستم ۳۴ به‌علت برتری ضریب تجدیدپذیری، بیشتر از میزان سرمایه‌گذاری دفاع از زیرسیستم ۳۳ شده است.

برای تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به تغییرات مقدار ضریب تجدیدپذیری، یکی از زیرسیستم‌ها (به عنوان مثال، زیرسیستم ۱۱)، انتخاب شده و با تغییردادن مقدار ضریب تجدیدپذیری و حل مدل پیشنهادی، نتایج نهایی آن ثبت می‌شود. با توجه به رابطه (۱) و نتایج نهایی به‌دست‌آمده، تغییرات قابلیت اطمینان زیرسیستم ۱۱ (π_{11}) نسبت به افزایش ضریب تجدیدپذیری مربوطه (z_{11})، مطابق شکل (۳) می‌باشد.



شکل ۳. تغییرات قابلیت اطمینان زیرسیستم ۱۱ نسبت به ضریب z_{11}

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب تجدیدپذیری زیرسیستم ۱۱، قابلیت اطمینان این زیرسیستم نیز افزایش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای مطالعات آتی

در این تحقیق، با معرفی فاکتور تجدیدپذیری و معیارهای غیرمستقل تعیین‌کننده آن، یک مدل برنامه‌ریزی خطی به استناد نتایج روش‌های *PCA* و *TOPSIS*، ارائه شد که نتایج نهایی آن، تعیین ضریب تجدیدپذیری برای هرکدام از زیرسیستم‌ها بود. در مرحله بعد، با هدف اطمینان‌پذیری و رویکرد تئوری بازی‌ها، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله ارائه شد که در مسأله موردنظر، مطلوبیت مدافع، افزایش قابلیت اطمینان کل سامانه و هریک از زیرسیستم‌ها با توجه به ضریب تجدیدپذیری آنها و کاهش هزینه موردنیاز تجهیزات دفاع درنظر گرفته شد. در مقابل، مطلوبیت مهاجم، افزایش موفقیت در حمله به سیستم‌های حسّاس و کاهش هزینه تجهیزات حمله منظور شد. نتایج نهایی مدل‌سازی مذکور، تعیین مقدار سرمایه‌گذاری برای دفاع از زیرسیستم‌ها است. تحلیل حساسیت مدل ارائه شده تحقیق، نشان‌دهنده این نتیجه منطقی بود که افزایش ضریب تجدیدپذیری زیرسیستم‌ها، در بالابردن قابلیت اطمینان زیرسیستم مورد نظر تأثیر مثبت دارد. به منظور انجام مطالعات بیشتر در زمینه موضوع تحقیق، می‌توان به ارائه الگوریتم‌های مفید و فرابتکاری برای بهینه‌یابی نتایج موردنظر در مسائل پیچیده و بزرگ پرداخت. همچنین برای تحقیقات آتی، مدل‌سازی استراتژی‌های دفاع و حمله با وجود همبستگی بین زیرسیستم‌ها، پیشنهاد می‌شود.

منابع

[1] Xinyang Deng, Xi Zheng, Xiaoyan Su, Felix T.S. Chan , Yong Hu, Rehan Sadiq,Yong Deng. ,2014. An evidential game theory framework in multi Criteria decision making process, Applied Mathematics and Computation, 244, 783–793.

[2] Yong Wua, Gengzhong Feng, Nengmin Wang, Huigang Liang., 2015. Game of information security investment: Impact of attack types and network vulnerability, Expert Systems with Applications, 42, 6132–6146.

[3] Kjell Hausken, Gregory Levitin., 2009. Minmax defense strategy for complex multi state systems, Reliability Engineering and System Safety, 94, 577– 587.

[4] Kjell Hausken., 2010. Defense and attack of complex and dependent systems, Reliability Engineering and System Safety, 95, 29-42.

[5] Gregory Levitin, Kjell Hausken, Yuanshun Dai., 2014. Optimal defense with variable number of overarching and individual protections, Reliability Engineering and System Safety, 123, 81–90.

[6] V. Sriramdas , S.K. Chaturvedi, H. Gargama., 2013. Level Diagrams analysis of Pareto Front for multiobjective system redundancy allocation, Reliability Engineering and System Safety, 41, 3444–3449.

[7] Harish Garg , S.P. Sharma., 2013. Multi-objective reliability-redundancy allocation problem using particle swarm optimization, Computers & Industrial Engineering, 64, 247–255.

[8] وحید برادران، رضا برادران کاظم زاده، امیرحسین امیری و حامد موگویی. ۱۳۹۱. توسعه رویکرد تحلیل مؤلفه های اصلی برای حل مسائل تصمیم گیری چندمعیاره با معیارهای وابسته، نشریه تخصصی مهندسی صنایع، ۴۶، ۱۴۵-۱۳۳.

[9] Wang, Y. M., Yanga, J. B., Xua, D. L., & Chin, K. S., 2006. On the centroids of fuzzy numbers, Fuzzy Sets and Systems, 157, 919–926.

[10] Hwang, C. -L. and Yoon, K., 1981. Multiple attribute decision making: Methods and Applications: A Stateof-the-Art Survey, Springer-Verlag, New York.

[11] Tullock G., 1980. Efficient rent-seeking. In: Buchanan JM, Tollison RD, Tullock G, editors. Toward a theory of the rent-seeking society, College Station: Texas A&M University Press, 97–112.