مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال هشتم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶؛ ص ۳۴۸-۳۳۹

راهبردهای پایدار تکاملی دفاع از دارایی‌های حیاتی و حساس با وجود حملات مجازی و رویکرد قابلیت اطمینان

مهدی رحیم‌دل میبدی[1*]، امیرحسین امیری[2]، مهدی کرباسیان[3]
۱- دانش‌آموخته دکتری دانشگاه پیام نور تهران، ۲- دانشیار دانشگاه شاهد، ۳- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
(دریافت: ۹۵/۰۶/۲۲، پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۷)

چکیده

امروزه، وقوع بحران و پیامدهای حاصل از آن، یکی از عوامل اساسی تهدید سازمان‌ها بوده و می‌بایست برای تعیین راهبردهای کارآمد و پایدار، با توجه به شرایط دفاع و حمله، برنامه‌ریزی مناسب انجام شود. در این تحقیق با هدف بهبود قابلیت اطمینان، ابتدا الگویی برای مدل‌سازی راهبردهای بهینه دفاع و حمله در حالت ایستا ارائه می‌شود که در آن، مهاجم برای فریب دادن مدافع، تعدادی حملات مجازی ایجاد می‌نماید. در این مدل ایستا، با توجه به قابلیت اطمینان حمله ناموفق، قدرت تشخیص مدافع در شناسایی حملات مجازی و رویکرد نظریه بازی‌ها در پیدا نمودن نقطه تعادل، یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی برای تعیین میزان سرمایه‌گذاری دفاع و حمله تمامی زیرسامانه‌ها، پیشنهاد شده است. سپس با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل پیشنهادی ایستا، پویایی سامانه و مفاهیم نظریه تکاملی بازی‌ها، یک روش جدید و پویا برای تعیین راهبردهای پایدار دفاع و حمله معرفی می‌شود که در آن، مدافع دو راهبرد دفاع بر مبنای واقعی بودن تمام و یا ۹۰ درصد حملات و مهاجم نیز دو راهبرد استفاده و یا عدم استفاده از حملات مجازی را برگزیده‌اند. درنهایت، مدل ارائه شده تحقیق برای یک مثال عددی، استفاده شده و نتایج آن مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

کلید واژه‌ها: حمله مجازی، قابلیت اطمینان، سرمایه‌گذاری دفاع، راهبرد پایدار، نظریه تکاملی بازی‌ها

Evolutionary Stable Strategies to Defend the Critical and Sensitive Assets within False Attacks and Reliability Approach

M. Rahimdel Meybodi[*], A. H. Amiri, M. Karbasian
Payam Noor University
(Received: 12/09/2016; Accepted: 16/01/2017)

Abstract

Today, the crisis and its consequences, is one of the main threatening factors in organizations, and to determine efficient and sustainable strategies, according to the terms of defense and attack, proper planning must be done. In this study, with the aim of improving reliability, first, modeling the optimal strategies to defend and attack in the stationary state is presented, provided that the attacker to deceive the defender will create a number of false attacks. In the static model, considering the probability of a successful attack, defender capability in identifying false attacks, reliability block diagram and game theory approach in finding the balance point, a nonlinear programming model is proposed to determine the amount of investment defend and attack. Then, according to the results of the static model, system dynamics and implications of evolutionary game theory, a new and dynamic approach to determine sustainability strategies of defense and attack is presented, that defender use two strategies based on actual or 90% of all adopted attacks and the attacker also use two strategies use or not to use false attacks. Finally, presented model is illustrated for an applied case and final findings are analyzed.

Keywords: False Attack, Reliability, Investment Defend, Stable Strategy, Evolutionary Game Theory

*Corresponding Author E-mail: rahimdel.m@gmail.com

۱. مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین اهداف سازمان‌ها، تعیین راهبردهای مطلوب و پایدار برای دفاع از دارایی‌های حساس و حیاتی است و برای رسیدن به این هدف، می‌بایست با توجه به شرایط دفاع و حمله، راهبردهای کارآمد و استوار تعیین شوند. زیرساخت‌های حساس و مهم هر کشور، دارایی‌هایی هستند که با توجه به نقش حیاتی آن‌ها در ثبات، آرامش و امنیت زندگی اجتماعی مردم، نیاز مبرم به حفظ و نگهداری دارند. برای بیان نمونه‌هایی از این زیرساختارها، می‌توان مراکز نظامی، جاده‌ها، منابع انرژی، سامانه‌های مخابراتی، منابع آبی، مراکز تجاری، مدارس و بیمارستان‌ها را عنوان نمود. مدافع، می‌بایست در مقابل حملات احتمالی مهاجم به مناطق حساس، اقدامات حفاظتی را به عمل آورد و خسارت مورد انتظار زیرساختارها را تا حد امکان، کمینه نمایند. به عبارتی دیگر، مدافع می‌بایست قابلیت اطمینان عملکرد زیرساختارها را که اجرای اهداف به صورت پایدار هست، افزایش دهد. در مقابل، هدف مهاجم بیشینه نمودن خسارت مورد انتظار به سامانه است.

یکی از ابزارهای مهم برای تعیین راهبردهای بهینه دفاع و حمله، استفاده از مبانی و مفاهیم نظریه تکاملی بازی‌ها است. این روش، رویکردی متفاوت برای تحلیل بازی‌هاست که در هر مرحله آن، به طور تصادفی تعدادی بازیکن با هم بازی می‌کنند و در پایان هر دوره، گروه‌هایی که نتایج بهتری کسب کرده باشند، رشد کرده و دیگران کوچک خواهند شد. با تکرار کافی این فرآیند، به طور ایده‌آل، جمعیت به وضعیتی پایدار همگرا خواهد شد که احتمالاً بهترین پاسخ را برای هر بازیکن مشخص می‌کند.

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه تعیین راهبردهای بهینه دفاع و حمله انجام شده است. بیر و همکاران [۱]، مدلی برای حفاظت از سامانه‌های سری و موازی با اجزای غیر یکسان ارائه نمودند که در آن هدف مهاجم حداکثر نمودن احتمال تخریب اهداف، و هدف مدافع حداقل نمودن احتمال تخریب اهداف است. در تحقیق میلر [۲]، شرایط راهبردهای بازدارنده با کمترین و بیشترین تأثیرات، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. آرس و همکاران [۳]، مدلی برای تعیین نقطه تعادل مسئله‌ای را ارائه نمودند که در آن مهاجم می‌تواند در مقابل سرمایه‌گذاری مدافع برای دفاع، حمله معمولی و یا انتحاری را انتخاب نماید. رنجبر و پیرایش [۴]، پس از بررسی مدل احتمالی حمله موفقیت‌آمیز مهاجم به اجزای سامانه و ترکیب آن با خسارات وارده به مدافع، ریسک سامانه را ارزیابی نمودند. سپس با قرینه سازی مسئله بهینه‌سازی کوله‌پشتی، مدلی برای کاهش ریسک سامانه بر مبنای اختصاص بودجه پدافندی ارائه نمودند. وو و همکاران [۵]، به تجزیه و تحلیل میزان تخریب یک شبکه، با توجه به حملات مهاجم پرداختند. لی و همکاران [۶]، چگونگی تأثیر آسیب‌پذیری از حملات مهاجم، در صورت دسته‌بندی نمودن حمله به شبکه‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

در مدل مورد تحقیق هاسکن [۷]، دو سامانه سری- موازی و موازی- سری (از منظر قابلیت اطمینان) در نظر گرفته شده است و راهبردهای بهینه دفاع و حمله، با توجه به رویکرد قابلیت اطمینان، کاربردهای نظریه بازی‌ها، احتمال حمله موفقیت‌آمیز، ارزش زیرسامانه‌ها و محدودیت بودجه تعیین می‌شود. این محقق، برای بهبود مدل ارائه شده خود، با توجه به نقاط هدف سامانه‌ها که دارای ساختارهایی مانند سری، موازی و پیچیده هستند یک مدل بر اساس نظریه بازی‌ها ارائه نموده است که در آن مدافع در پی حداقل نمودن خسارت وارده و مهاجم در پی حداکثر نمودن آن است. برای این کار یک تابع خسارت که برابر با احتمال حمله موفق روی اهداف است، تعریف می‌شود که وابسته به میزان سرمایه‌گذاری دفاع و حمله و همچنین وابسته به مشخصه دیگری که شدت اهمیت آن اهداف هستند، است. در این مدل، میزان سرمایه‌گذاری بهینه دفاع و حمله، با توجه به آگاهی کامل مهاجم از اهداف مدافع، تعیین می‌شود [۸]. در تحقیق دیگری از هاسکن و لوتین [۹]، با در نظر گرفتن یک سامانه سری که در آن، مدافع، اهداف مجازی تولید می‌کند و مهاجم قادر به تشخیص غیر واقعی بودن آن‌ها نیست، تعداد بهینه اهداف مجازی با توجه به هدف کاهش احتمال حمله موفقیت‌آمیز، تعیین می‌شود.

در سال‌های اخیر، بسیاری از محققین، از مفاهیم و کاربردهای نظریه تکاملی بازی‌ها برای مدل‌سازی تحقیقات خود استفاده نموده‌اند. ویبول [۱۰]، پس از ارائه مفاهیم بنیادی نظریه تکاملی بازی‌ها، مزایا و کاربردهای این رویکرد را در مقایسه با نواقص رویکرد سنتی و ایستای نظریه بازی‌ها، بیان نموده است. استفاده از مفاهیم گراف تکاملی به عنوان رویکردی برای تحقیق در زمینه تأثیر ساختار جامعه در مدل‌سازی نظریه تکاملی و پویای بازی‌ها مورد توجه بسیاری از محققین بوده است [۱۱ و ۱۲].

هلمن و استادیگ [۱۳]، سیر تکاملی شبکه‌های اجتماعی و اقتصادی را با استناد به مفاهیم نظریه تکاملی بازی‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. ژیو و همکاران [۱۴] با توجه به تراکنش‌های پی‌درپی و متعدد در مسائل زنجیره دو سطحی زنجیره تأمین، با استناد به رویکرد تکاملی نظریه بازی‌ها، یک مدل تصمیم‌گیری پویا برای ارزیابی رفتار مسئله مورد نظر در دوره‌های زمانی آینده ارائه نمودند. گیلبرتو و همکاران [۱۵]، با استناد به مفاهیم نظریه تکاملی بازی‌ها، دو مسئله هم‌زمان و تلفیقی بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی را با توجه به محدودیت‌های موجود در مسئله،

بهینه‌سازی نمودند. ژوانگ وی و همکاران [۱۶]، با استفاده از رویکرد تکاملی بازی‌ها، مدل‌هایی برای ارزیابی امنیت سامانه‌های اطلاعاتی شبکه و عملکرد پدافند دفاعی، ارائه نمودند.

این پژوهش، به استناد تحقیقات انجام شده گذشته در زمینه موضوع تحقیق و با توجه به نواقص و کمبودهای موجود در آن‌ها، یک مدل جدید و پویا برای تعیین راهبردهای بهینه دفاع و حمله مبتنی بر نظریه تکاملی بازی‌ها، ارائه می‌نماید. یکی از جنبه‌های نوآوری در مدل پیشنهادی و پویای این تحقیق، در نظر گرفتن وجود حملات مجازی از طرف مهاجم است که در آن، نسبتی از کل حملات مهاجم، مجازی (مصنوعی) است. لیکن، مدافع در تشخیص صحیح حملات مجازی به صورت احتمالی اقدام می‌نماید. همچنین در تحقیقات گذشته، راهبردهای بهینه دفاع و حمله با استفاده از قوانین نظریه بازی‌ها در محیط ایستا تعیین شده است، لیکن در این تحقیق، با توجه به مزایای مختلف استفاده از نظریه تکاملی و پویای بازی‌ها، از مفاهیم این فن، در تعیین راهبردهای پایدار دفاع و حمله، استفاده شده است. به طور کلی در مدل پیشنهادی این تحقیق، ابتدا، پارامترهای مربوط به مطلوبیت‌های مدافع و مهاجم که شامل احتمالات حمله موفق، ارزش سامانه و زیرسامانه‌ها، ساختار قابلیت اطمینان سامانه، احتمال تشخیص صحیح مدافع از مجازی بودن حملات و محدودیت‌های هزینه تجهیزات دفاع و حمله بوده و از حل مدل ایستای مربوطه، به‌دست آمده‌اند، دریافت می‌شوند. سپس راهبردهای مختلف مدافع و مهاجم و مطلوبیت‌های مربوط به آن‌ها، ارزیابی می‌شوند. درنهایت با استفاده از مفاهیم نظریه تکاملی بازی‌ها و مدل‌سازی مربوطه، راهبرد بهینه و پایدار، تعیین شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

در بخش دوم این مقاله، پس از معرفی مسئله مورد تحقیق و مفروضات آن، چگونگی مدل‌سازی راهبردهای بهینه دفاع و حمله در شرایط ایستا، بیان شده است. در بخش سوم، روش پیشنهادی این تحقیق برای تعیین راهبرد پایدار دفاع و حمله با رویکرد نظریه تکاملی بازی‌ها، ارائه شده است. در بخش چهارم، یک مثال عددی برای تبیین چگونگی محاسبات و پیاده‌سازی مدل پیشنهادی نشان داده شده است. در بخش پنجم، حساسیت نتایج مدل پیشنهادی با توجه به تغییرات پارامترهای اصلی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و درنهایت در بخش ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای مطالعات آتی مطرح می‌شود.

۲. روش تحقیق

مسئله مورد نظر این تحقیق، تعیین راهبردهای پایدار دفاع و حمله یک زیرساخت حساس است که شامل s سامانه با ساختار عملکردی سری بوده و هر سامانه شامل n_i زیرمجموعه با ساختار عملکردی موازی است. بنابراین برای عملکرد سامانه iام، می‌بایست حداقل یک زیرسامانه به طور مطلوب فعالیت نماید. فهرست واژه‌ها و اصطلاحات مورد استفاده در روش پیشنهادی این تحقیق، در جدول (۱) به اختصار توضیح داده شده است.

جدول ۱. فهرست واژه‌ها و اصطلاحات

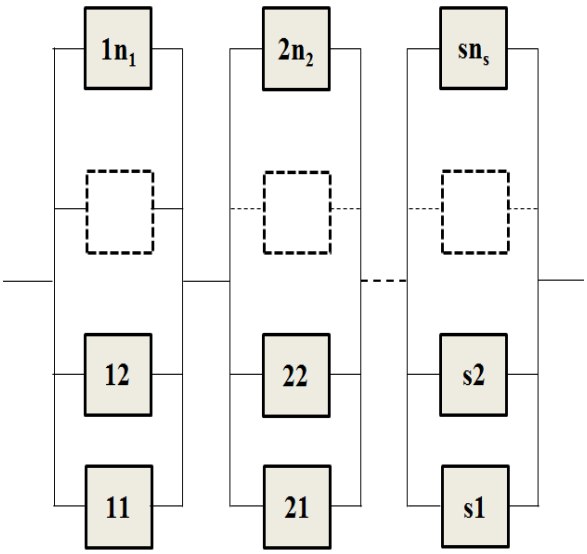
عنوان	واژه
تعداد سامانه‌ها	s
تعداد زیرسامانه‌های سامانه iام	n_i
زیرسامانه jام از سامانه iام	ij
سرمایه‌گذاری واحد مدافع برای دفاع از ij	f_{ij}
سرمایه‌گذاری واحد مهاجم برای حمله به ij	F_{ij}
هزینه واحد تجهیزات دفاع برای هدف ij	c_{ij}
هزینه واحد تجهیزات حمله به هدف ij	C_{ij}
هزینه واحد حمله مجازی به هدف ij	$\bar{C}_{ij}$
ارزش مدافع برای هر هدف ij	v_{ij}
ارزش مهاجم برای هر هدف ij	V_{ij}
میزان شدت رقابت هدف ij	m_{ij}
ارزش مدافع برای کل سامانه	v
ارزش مهاجم برای کل سامانه	V
بیشینه هزینه مورد نظر مدافع	c_{max}
بیشینه هزینه مورد نظر مهاجم	C_{max}
نسبت واقعی بودن حملات به هدف ij از منظر مدافع	α_{ij}
نسبت حملات واقعی به هدف ij	β_{max}
احتمال عدم حمله موفق به هدف ij	q_{ij}
مطلوبیت مدافع	u
مطلوبیت مهاجم	U

مهاجم برای فریب دادن مدافع، تعدادی حمله مجازی (غیر واقعی) انجام می‌دهد تا با این کار بتواند، احتمال حمله موفقیت‌آمیز به اهداف را افزایش دهد. همچنین مدافع به علت عدم آگاهی، واقعی بودن این حملات را با احتمال α_{ij} تشخیص می‌دهد که ij، نشان دهنده هدف jام از زیرسامانه iام است. مدافع برای حفاظت از زیرسامانه‌ها، سرمایه‌گذاری‌های متفاوت f_{ij} را با هزینه واحد c_{ij} انجام می‌دهد. لیکن، مهاجم برای حمله به هر یک از زیرسامانه‌ها، سرمایه‌گذاری‌های واقعی F_{ij} که درصد تعداد آن‌ها نسبت به تعداد کل حملات، برابر با β_{ij} است را با هزینه واحد C_{ij} انجام می‌دهد و برای حملات مجازی (که درصد تعداد آن‌ها نسبت به تعداد کل حملات، برابر با (β_{ij} -۱) است) هزینه واحد $\bar{C}_{ij}$ را سرمایه‌گذاری می‌کند. همچنین از نظر مدافع، ارزش هر هدف ij برابر با v_{ij} و ارزش کل سامانه برابر با v است و به طور مشابه برای مهاجم، هر هدف ij، ارزشی برابر با V_{ij} و کل سامانه، ارزشی برابر با V دارد.

قابلیت اطمینان هر هدف بستگی به میزان سرمایه‌گذاری برای محافظت از اهداف از طرف مدافع و میزان سرمایه‌گذاری برای حمله نمودن از طرف مهاجم دارد و در نتیجه، تعیین کننده موفقیت حمله و دفاع است. یک روش ساده برای تعریف احتمال حمله موفق روی هدف ij، استفاده از نسبت ارائه شده توسط آقای تالوک [۱۷] است که به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$q_{ij} = \frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}} \quad . \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، m_{ij} میزان شدت رقابت بر سر هدف ij و یک مشخصه رقابت با توجه به نوع هدف ij است. با توجه به رویکرد نظریه بازی‌ها، مدافع و مهاجم در یک لحظه، راهبردهای خود را تعیین می‌کنند و بنابراین هنگام تصمیم‌گیری، هیچ اطلاعی راجع به انتخاب و تصمیم رقیب خود ندارند. شکل (۱) ساختار قابلیت اطمینان مسئله مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ساختار قابلیت اطمینان سری – موازی

۲-۱. راهبردهای بهینه دفاع و حمله در شرایط ایستا

برای ارزیابی نقطه تعادل و راهبرد بهینه دفاع و حمله، ابتدا می‌بایست مطلوبیت مدافع و مهاجم تعیین شود. با در نظر گرفتن تابع احتمال حمله ناموفق ($1-q_{ij}$)، مدافع در پی افزایش این احتمال برای کل سامانه و هر کدام از زیرمجموعه‌های آن است. همچنین در صورت وجود محدودیت بودجه، مطلوبیت مدافع، کمینه نمودن هدف دیگر یعنی هزینه مورد نیاز تجهیزات دفاع نیز است. بنابراین می‌توان مطلوبیت مورد نظر مدافع را به صورت رابطه (۲) در نظر گرفت. در این رابطه، میزان سرمایه‌گذاری واقعی مدافع برای دفاع برابر با $\alpha_{ij}f_{ij}$ است. زیرا مدافع، احتمال تعداد حملات واقعی را برابر با α_{ij} تشخیص می‌دهد. همچنین با توجه به نسبت حملات موفق (β_{ij}) میزان سرمایه‌گذاری واقعی مهاجم برای حمله، برابر با $\beta_{ij}F_{ij}$ است. از سوی دیگر، مهاجم متمایل به افزایش احتمال حمله موفق و خرابی کل سامانه و هر کدام از زیرمجموعه‌های آن است. همچنین در صورت وجود محدودیت هزینه، مطلوبیت مهاجم، کمینه نمودن هزینه کل تجهیزات نیز هست. بنابراین می‌توان مطلوبیت مورد نظر مهاجم را به صورت رابطه (۳) در نظر گرفت.

برای به‌دست آوردن راه‌حل از مفاهیم بنیادی نقطه تعادل نش [۱۸] در نظریه بازی‌ها استفاده می‌شود که در آن هیچ یک از طرفین بازی به صورت یک طرفه عمل نمی‌کند بلکه با توجه به منطقی بودن بازیکنان، مناسب‌ترین پاسخ تعیین می‌شود. بنابراین برای تعیین نقطه تعادل هر هدف، می‌بایست مسئله برنامه‌ریزی غیر خطی با روابط (۸-۴) حل شود که در آن، از تعمیم شرایط کوهن- تاکر استفاده شده است [۱۹]. بهترین حالت تابع هدف، صفر بودن آن است زیرا این تابع به ازای هر راه‌حل عملی، غیر منفی می‌شود.

$$Max:\ u = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} \frac{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}} + (\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}} v_{ij} + v\prod_{i=1}^{s}\left(1 - \prod_{j=1}^{n_i} \frac{(\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}} + (\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}}\right) - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{ij}c_{ij}f_{ij} \ . \qquad (۲)$$

$$Max:\ U = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n} \frac{(\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}} + (\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}} V_{ij} + V\left(1 - \prod_{i=1}^{s}\left(1 - \prod_{j=1}^{n_i} \frac{(\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}} + (\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}}\right)\right) - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} F_{ij}\left(\beta_{ij}C_{ij} + (1-\beta_{ij})\bar{C}_{ij}\right) . \qquad (۳)$$

$$Min:\ \lambda_{1,1}\left(c_{max} - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{ij}c_{ij}f_{ij}\right) + \lambda_{2,1}\left(C_{max} - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} F_{ij}\left(\beta_{ij}C_{ij} + (1-\beta_{ij})\bar{C}_{ij}\right)\right). \qquad (۴)$$

s.t. :

$$\alpha_{kl} m_{kl} \frac{(\beta_{kl}F_{kl})^{m_{kl}}(\alpha_{kl}f_{kl})^{(m_{kl}-1)}}{((\alpha_{kl}f_{kl})^{m_{kl}}+(\beta_{kl}F_{kl})^{m_{kl}})^2}(v_{kl}+ v\, Q_a Q_b)-(1+\lambda_{1,1})\alpha_{kl}c_{kl}=0\ ,\quad k=1,\dots,s\ ,\quad l=1,\dots,n_i\ . \tag{۵}$$

$$\beta_{kl} m_{kl} \frac{(\alpha_{kl}f_{kl})^{m_{kl}}(\beta_{kl}F_{kl})^{(m_{kl}-1)}}{((\alpha_{kl}f_{kl})^{m_{kl}}+(\beta_{kl}F_{kl})^{m_{kl}})^2}(V_{kl}+VQ_aQ_b)-(1+\lambda_{2,1})(\beta_{kl}C_{kl}+(1-\beta_{kl})\bar{C}_{kl})=0\ ,\ k=1,\dots,s\ ,\ l=1,\dots,n_i\ . \tag{۶}$$

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}\alpha_{ij}c_{ij}f_{ij}\le c_{max}\,. \tag{۷}$$

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}F_{ij}\,(\beta_{ij}C_{ij}+(1-\beta_{ij})\bar{C}_{ij})\le C_{max}\,. \tag{۸}$$

$$Q_a=\prod_{\substack{i=k\\ j\neq h}}^{n_i}\frac{(\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}}+(\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}}\ ,\ Q_b=\prod_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{s}(1-\prod_{j=1}^{n_i}\frac{(\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}}+(\beta_{ij}F_{ij})^{m_{ij}}})$$

در روابط مذکور، c_{max} و C_{max} به ترتیب، بیشینه هزینه مورد نظر مدافع و مهاجم است. نتیجه نهایی برنامه‌ریزی غیر خطی مذکور، نقطه تعادل در حالت ایستا را نشان می‌دهد و تعیین کننده میزان سرمایه‌گذاری بهینه دفاع و حمله برای هر کدام از زیرمجموعه‌ها است. برای حل مدل برنامه‌ریزی غیر خطی مذکور، در ابعاد کوچک مسئله، می‌توان از نرم‌افزارهای کاربردی در این زمینه مانند Lingo و GAMS استفاده نمود. ولی در صورت بزرگ شدن ابعاد مسئله، می‌بایست با استفاده از روش‌های فرا ابتکاری، الگوریتم بهینه‌یابی مسئله را طراحی و اجرا نمود [۲۰ و ۲۱].

۲-۲. تعیین راهبرد پایدار دفاع و حمله با رویکرد نظریه تکاملی بازی‌ها

نتایج نهایی به‌دست آمده از بخش قبل، میزان سرمایه‌گذاری‌های بهینه دفاع و حمله در شرایط ایستا و لحظه تصمیم‌گیری در مبدأ زمان است. لیکن با گذر زمان و در نظر گرفتن پویایی و شرایط حاکم بر مدل، تصمیم‌گیری بازیکنان (مدافع و مهاجم)، تغییر می‌کند. در چنین شرایطی می‌بایست تعیین راهبرد برتر را با توجه به معیار پایداری زمانی، مدل‌سازی نمود. در مسئله مورد نظر این تحقیق، دو راهبرد انتخابی برای مدافع و مهاجم وجود دارد. اولین راهبرد مورد نظر مدافع، «دفاع بر مبنای واقعی بودن تمامی حملات» است که در این حالت، در رابطه (۲) α_{ij} برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. دومین راهبرد مدافع، «دفاع برمبنای واقعی بودن ۹۰ درصد تمامی حملات» است که در این حالت، α_{ij} برابر با ۰/۹ است. همچنین، اولین راهبرد مهاجم، «استفاده از حملات مجازی» بوده و دومین راهبرد مربوطه، «عدم استفاده از حملات مجازی» است که در این حالت β_{ij} برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مطلوبیت‌های مورد نظر مدافع و مهاجم، ماتریس بهره‌وری دفاع-حمله به صورت جدول (۲) تعیین می‌شود.

جدول۲. ماتریس دفاع- حمله

مهاجم / مدافع	استفاده از حملات مجازی (A)	عدم استفاده از حملات مجازی (NA)
دفاع بر مبنای واقعی بودن تمامی حملات (F)	(u_1, U_1): $\alpha_{ij}=1$	$(\bar{u}_1, U_2)$: $\alpha_{ij}=\beta_{ij}=1$
دفاع بر مبنای واقعی بودن ۹۰ درصد حملات (NF)	$(u_2, \bar{U}_1)$: $\alpha_{ij}=0.9$	$(\bar{u}_2, \bar{U}_2)$: $\alpha_{ij}=0.9\ ,\ \beta_{ij}=1$

با توجه به مفاهیم نظریه تکاملی بازی‌ها، بهبود مداوم تدابیر گذشته بازیکنان، منجر به شکل‌گیری «راهبرد پایدار تکاملی» می‌شود. در مسئله مورد نظر این تحقیق، اگر $x(0\le x\le 1)$ نشان دهنده نسبتی از تعداد مدافع‌هایی باشد که راهبرد «دفاع بر مبنای واقعی بودن تمامی حملات» را انتخاب نموده‌اند، بنابراین، نسبت مدافع‌هایی که راهبرد «دفاع برمبنای واقعی بودن ۹۰ درصد حملات» را برگزیده‌اند (1-x) است. همچنین اگر $y(0\le y\le 1)$ نشان دهنده نسبتی از تعداد مهاجم‌هایی باشد که راهبرد «استفاده از حملات مجازی» را انتخاب نموده‌اند، بنابراین نسبت مهاجم‌هایی که راهبرد «عدم استفاده از حملات مجازی» را برگزیده‌اند (1-y) است. با این مفروضات، می‌توان راهبرد پایدار تکاملی را برای مدافع، مهاجم و سامانه تعیین نمود.

برای تعیین راهبرد پایدار تکاملی مدافع، ابتدا ارزش مورد انتظار مدافع از انتخاب هر کدام از راهبردهای موجود، مطابق روابط (۹ و ۱۰) محاسبه می‌شود.

$$E(P_F)=Y(u_1)+(1-Y)(\bar{u}_1)\ . \tag{۹}$$

$$E(P_{NF})=Y(u_2)+(1-Y)(\bar{u}_2)\,. \tag{۱۰}$$

بنابراین، متوسط بهره‌وری مورد انتظار مدافع، با استفاده از رابطه (۱۱) ارزیابی می‌شود.

$$E(F) = XE(P_F) + (1-X)E(P_{NF}) \ . \qquad (۱۱)$$

معادله پویای مدافع در واحد زمانی، برای ارزیابی راهبرد پایدار تکاملی، با توجه به رابطه (۱۲) تعیین می‌شود [۲۲].

$$\frac{dX}{dt} = X[E(P_F) - E(F)] = X(1-X)(A_X - YB_X). \qquad (۱۲)$$

$$A_X = u_1 + u_2 - (\bar{u}_1 + \bar{u}_2) \quad , \quad B_X = \bar{u}_1 - \bar{u}_2 \ .$$

به طور مشابه، معادله پویای مهاجم در واحد زمانی، برای ارزیابی راهبرد پایدار تکاملی، با توجه به رابطه (۱۳) تعیین می‌شود.

$$\frac{dY}{dt} = Y[E(P_A) - E(A)] = Y(1-Y)(A_Y - XB_Y). \qquad (۱۳)$$

$$A_Y = U_1 + U_2 - (\bar{U}_1 + \bar{U}_2) \quad , \quad B_Y = \bar{U}_1 - \bar{U}_2 \ .$$

برای ارزیابی راهبرد پایدار تکاملی کل سامانه، با توجه به معادلات پویای زمانی مدافع و مهاجم، ابتدا ماتریس ژاکوبین، مطابق رابطه (۱۴) تعیین می‌شود.

$$J = \begin{bmatrix} (1-2X)(A_X - YB_X) & XY(X-1) \\ XY(Y-1) & (1-2Y)(A_Y - XB_Y) \end{bmatrix} \qquad (۱۴)$$

با توجه به شرط لازم و کاف برای راهبرد پایدار تکاملی، مبنی بر اینکه می‌بایست در ماتریس ژاکوبین، دترمینان (det)، مثبت بوده ولی مجموع عناصر قطر اصلی ماتریس (trace)، منفی باشد، تجزیه و تحلیل پایداری نقاط تعادل سامانه انجام می‌شود [۲۳]. جدول (۳)، دترمینان و مجموع درایه‌ها و جدول (۴) تجزیه و تحلیل پایداری برای تمامی نقاط تعادل سامانه را نشان می‌دهد.

بنابراین، پس از محاسبه ضرایب معادلات مربوط به راهبردهای پایدار تکاملی (A_X , B_X , A_Y , B_Y) که از نتایج نهایی راهبردهای دفاع و حمله در حالت ایستا، به‌دست می‌آیند، می‌توان راهبرد پایدار سامانه را ارزیابی و تحلیل نمود.

جدول۳. دترمینان و مجموع درایه‌های ماتریس ژاکوبین

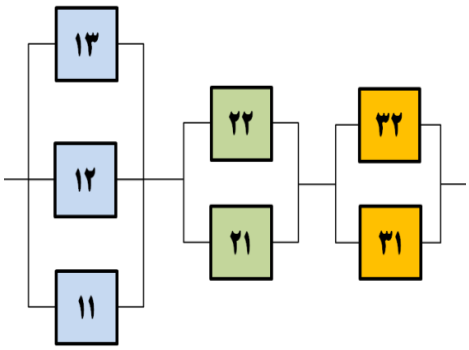
نقطه تعادل (X,Y)	det (J)	trace(J)
(۰،۰)	$A_X A_Y$	$A_X + A_Y$
(۰،۱)	$A_Y(B_X - A_X)$	$A_X - B_X - A_Y$
(۱،۰)	$A_X(B_Y - A_Y)$	$A_Y - B_Y - A_X$
(۱،۱)	$(B_X - A_X)(B_Y - A_Y)$	$B_X - A_X + B_Y - A_Y$

جدول ۴. تجزیه و تحلیل پایداری نقاط تعادل سامانه

ماهیت نقطه تعادل	علامت trace(J)	علامت det(J)
ناپایدار	+	+
پایدار	-	+
نقطه عطف	+	-
نقطه عطف	-	-

۳. نتایج و بحث

فرض کنید هدف مسئله مورد نظر، تعیین راهبرد پایدار تکاملی دفاع و حمله برای زیرساختی متشکل از سه سامانه تأمین کننده آب، برق و گاز یک منطقه است که به ترتیب، شامل ۳، ۲ و ۲ زیرسامانه موازی هستند. شکل (۲) ساختار قابلیت اطمینان این مثال کاربردی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. ساختار قابلیت اطمینان مثال کاربردی

سایر اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی این مسئله در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵. اطلاعات اولیه مثال کاربردی

ij	۱۱	۱۲	۱۳	۲۱	۲۲	۳۱	۳۲
c_{ij}	۰/۷	۰/۹	۰/۶	۰/۹	۰/۷	۱	۱/۲
C_{ij}	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۱	۱	۱/۳	۱/۳
$\bar{C}_{ij}$	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۷	۰/۷	۰/۹	۰/۹
v_{ij}	۱۰	۸	۱۱	۱۲	۱۲	۱۱	۱۲
V_{ij}	۱۰	۷	۱۰	۱۲	۱۲	۱۱	۱۲
m_{ij}	۱/۳	۲	۱/۳	۲	۱/۵	۲	۱/۳
α_{ij}	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۱	۰/۷	۰/۸	۰/۸
β_{ij}	۰/۷	۰/۷	۰/۸	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۷	۰/۷
v=۱۸۰ , V=۱۰۰ , c_{max}=۱۳۰ , C_{max}=۸۰							

به استناد مدل برنامه‌ریزی غیر خطی روش، نقاط تعادل ایستای سرمایه‌گذاری دفاع و حمله برای هر کدام از زیرسامانه‌ها به صورت جدول (۶) تعیین می‌شود.

جدول ۶. مقادیر بهینه سرمایه‌گذاری دفاع و حمله مثال کاربردی

متغیرهای حمله		متغیرهای دفاع	
F_{11}	۴/۶۷۲	۶/۵۶۴	f_{11}
F_{12}	۴/۷۸۱	۶/۰۱۶	f_{12}
F_{13}	۴/۵۶۴	۷/۰۴۷	f_{13}
F_{21}	۵/۹۱	۸/۲۱۸	f_{21}
F_{22}	۵/۲۱۸	۷/۰۴	f_{22}
F_{31}	۲/۸۲۵	۴/۷۷۴	f_{31}
F_{32}	۳/۸۰۲	۴/۸۳	f_{32}

با توجه به ماتریس دفاع- حمله (مطابق جدول (۲))، مطلوبیت‌های مدافع و مهاجم با در نظر گرفتن شرایط و حل مسائل برنامه‌ریزی غیر خطی مربوطه، عبارتند از:

u_1= ۱۶۱/۶۷ $\bar{u}_1$ = ۱۳۳/۰۸ u_2 = ۱۶۱/۶۶ $\bar{u}_2$ = ۱۶۵/۹۵

U_1= ۱۸/۰۵۵ $\bar{U}_1$ = ۲۶/۸۲۳ U_2 =۱۲/۷۵۹ $\bar{U}_2$ = ۷/۴۸۸

بنابراین، ضرایب پارامترهای معادلات پویای زمانی، به صورت ذیل تعیین می‌شوند:

A_X = ۲۴/۳ B_X = -۳۲/۸۷

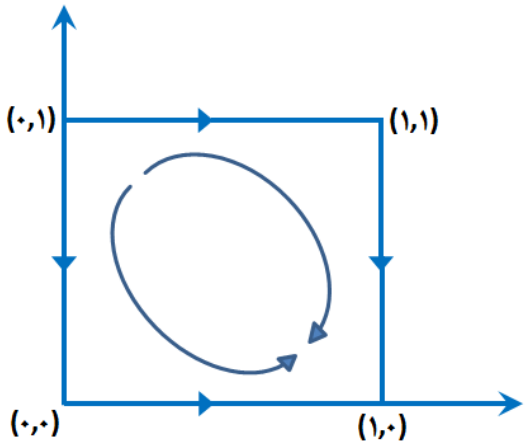
A_Y = -۳/۵ B_Y = ۱۹/۳۳

برای بررسی رفتارهای مختلف سامانه مورد نظر در رسیدن به راهبردهای پایدار تکاملی، با توجه به جدول‌های (۳ و ۴)، می‌توان شرایط رسیدن به راهبردهای مختلف را به صورت جدول (۷) نشان داد.

جدول ۷. شرایط رسیدن به راهبردهای مختلف پایدار تکاملی

شرایط پایداری	نقطه تعادل (X,Y)
$A_X < 0 \quad , \quad A_Y < 0$	(۰،۰)
$B_X > A_X \ , \ A_Y > 0$	(۰،۱)
$B_Y > A_Y \ , \ A_X > 0$	(۱،۰)
$B_X < A_X \ , \ B_Y < A_Y$	(۱،۱)

با توجه به تجزیه و تحلیل پایداری، نقاط تعادل سامانه (۰،۱) به عنوان راهبرد پایدار تکاملی سامانه، تعیین می‌شود. بنابراین، در بلند مدت، مدافع، راهبرد «دفاع بر مبنای واقعی بودن تمامی حملات» را انتخاب می‌نماید، لیکن، راهبرد مهاجم در بلند مدت، «عدم استفاده از حملات مجازی» است. شکل (۳) روند دستیابی به راهبرد پایدار تکاملی را نشان می‌دهد.



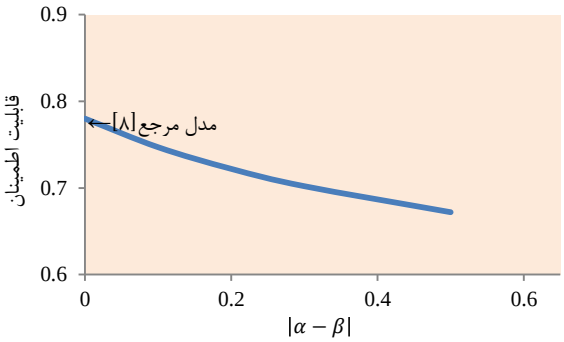
شکل ۳. روند دستیابی به راهبرد پایدار تکاملی

ذکر این نکته لازم است که در کوتاه مدت و با تشکیل ماتریس بهره‌وری (مطابق جدول (۸)) و همچنین، با استناد به اصول منطقی نقطه تعادل نش، نمی‌توان نقطه تعادل قطعی را در این حالت، تعیین نمود.

جدول۸. ماتریس دفاع- حمله مثال عددی

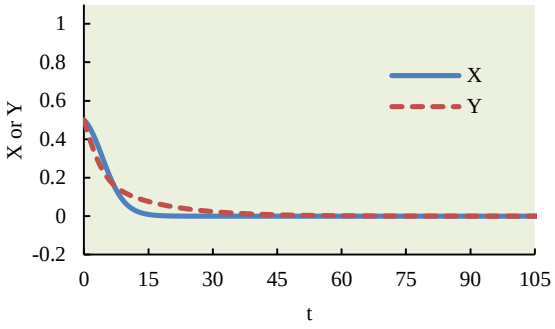
مهاجم / مدافع	استفاده از حملات مجازی (A)	عدم استفاده از حملات مجازی (NA)
دفاع بر مبنای واقعی بودن تمامی حملات (F)	(۱۶۱/۶۷$^{+}$ ، ۱۸/۰۵۵)	(۱۳۳/۰۸ ، ۲۶/۸۲۳$^{\#}$)
دفاع بر مبنای واقعی بودن ۹۰ درصد حملات (NF)	(۱۶۱/۶۶ ، ۱۲/۷۵۹$^{\#}$)	(۱۶۵/۹۵$^{+}$ ، ۷/۴۸۸)

مدل پیشنهادی تحقیق را می‌توان، در دو حالت ایستا و پویا، تجزیه و تحلیل نمود. در حالت ایستا، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد نظر، میزان اختلاف تشخیص صحیح مدافع نسبت به مجازی بودن حملات مهاجم است. برای تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به تغییرات پارامتر مذکور، با در نظر گرفتن تشخیص کاملاً صحیح مدافع ($\alpha=\beta$) و حل نمودن مدل برنامه‌ریزی مربوطه، مقادیر سرمایه‌گذاری‌های دفاع و حمله، تعیین شده و قابلیت اطمینان کل سامانه محاسبه می‌شود. ذکر این نکته لازم است که این حالت، مشابه مدل پیشنهادی آقای هاسکن است [۸]. سپس با افزایش تدریجی اختلاف پارامترهای α وβ، حل مدل برنامه‌ریزی مربوطه و تعیین قابلیت اطمینان کل سامانه، می‌توان رفتار مدل پیشنهادی تحقیق را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد که این کار در شکل (۴) نشان داده شده است.



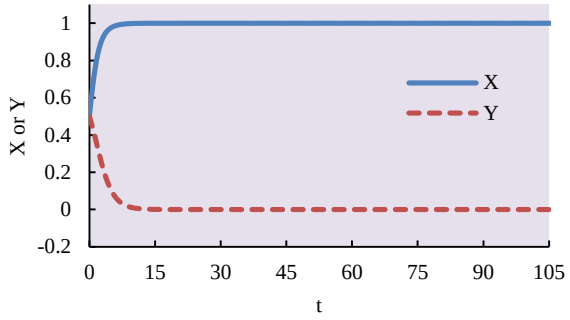
شکل ۴. روند تغییرات قابلیت اطمینان کل سامانه نسبت به افزایش $|\alpha-\beta|$

با توجه به نتایج موجود در شکل (۴)، می‌توان روند کاهشی قابلیت اطمینان کل سامانه نسبت به افزایش اختلاف پارامترهای α وβ را مشاهده نمود. برای مدل پیشنهادی تحقیق در حالت پویا، با توجه به اطلاعات اولیه مثال کاربردی و در نظر گرفتن روابط (۱۲ و ۱۶)، می‌توان تغییرات راهبردهای مورد نظر مدافع و مهاجم را در طول زمان، تجزیه و تحلیل نمود. در این تحقیق، به استناد معادلات دیفرانسیل مربوطه و استفاده از نرم‌افزار کاربردی متلب، آهنگ تغییرات راهبردهای مورد نظر مدافع و مهاجم در طول زمان، بررسی شده است. ذکر این نکته لازم است که برای یکسان‌سازی مقادیر پارامترها، تمامی کمیت‌ها در بازه [۰،۱] استاندارد شده‌اند. با توجه به نتایج موجود در جدول (۸)، نقطه تعادل (۰،۰) تنها در صورتی راهبرد پایدار تکاملی است که مطلوبیت‌های مدافع و مهاجم از به‌کارگیری راهبردهای دوم، بیشتر از به‌کارگیری راهبردهای اول باشد. برای بررسی این موضوع، در مثال کاربردی مورد نظر (با در نظر گرفتن $A_X = -2$)، روند دستیابی به راهبرد پایدار تکاملی به صورت شکل (۵) است.



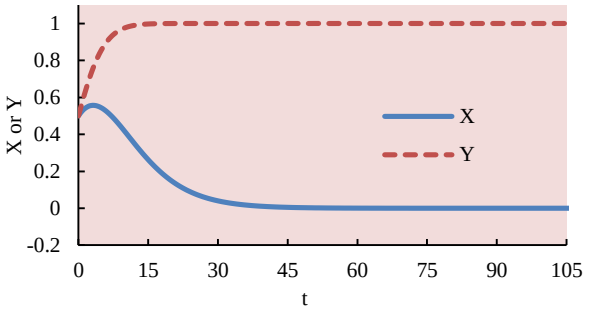
شکل ۵. روند دستیابی به راهبرد (۰،۰)

همچنین، در صورتی که $(u_1+u_2) < 2\bar{u}_1$ و همزمان $(U_1+U_2) > (\bar{U}_1+\bar{U}_2)$ باشد، نقطه تعادل پایدار برای سامانه، (۰،۱) است. برای بررسی این موضوع، در مثال کاربردی مورد نظر (با در نظر گرفتن $B_X = 32$ و $A_Y = 30$) روند دستیابی به راهبرد پایدار تکاملی به صورت شکل (۶) است.



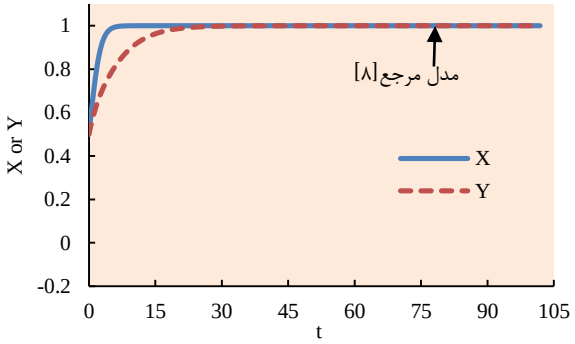
شکل ۶. روند دستیابی به راهبرد (۰،۱)

راهبرد (۱،۰) زمانی پایدار می‌شود که $(U_1+U_2) < 2\bar{U}_1$ و همزمان $(u_1+u_2) > (\bar{u}_1+\bar{u}_2)$ باشد، این موضوع، با توجه به شرایط موجود در مثال، مطابق شکل (۷) است.



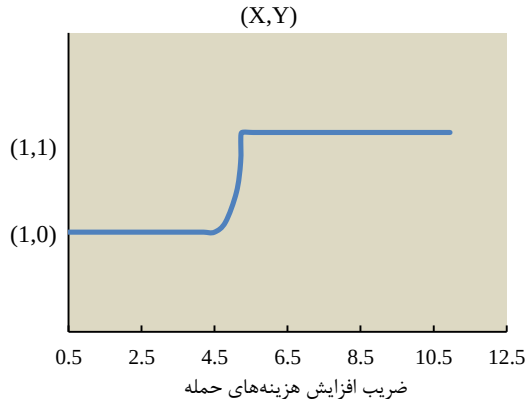
شکل ۷. روند دستیابی به راهبرد (۱،۰)

همچنین، نقطه تعادل (۱،۱) تنها در صورتی راهبرد پایدار تکاملی است که $(u_1+u_2) > 2\bar{u}_1$ و همزمان $(U_1+U_2) > 2\bar{U}_1$ باشد، برای بررسی این موضوع، اگر در مثال کاربردی مورد نظر، $A_Y = 30$ باشد، روند دستیابی به راهبرد پایدار تکاملی به صورت شکل (۸) است.



شکل ۸. روند دستیابی به راهبرد (۱،۱)

مدل پیشنهادی پویای تحقیق را می‌توان با تغییرات مقادیر پارامترهای اصلی آن، مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. به عنوان مثال، روند تغییرات راهبرد پایدار تکاملی، نسبت به تغییرات ضریب هزینه‌های واحد حمله (C_{ij}) مطابق شکل (۹) است.



شکل ۹. تغییرات راهبردها نسبت به افزایش هزینه‌های حمله

شکل (۹) نشان می‌دهد که با افزایش ضریب هزینه‌های حمله نسبت به یک مقدار مبنا (۵/۲۱۵)، راهبرد پایدار تکاملی (۱،۱) بوده، ولی با کاهش هزینه‌های واحد حمله از مقدار مبنا، گرایش پایدار سامانه، استفاده از راهبرد (۰،۱) می‌شود. البته با ضرایب هزینه حمله نزدیک به مقدار مبنا، ناپایداری در راهبرد مورد نظر سامانه مشاهده می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

تعیین راهبردهای استوار، یکی از موضوعات اساسی دوام و بقای سازمان ها است. این تحقیق با نگاه اطمینان‌پذیری و رویکرد نظریه بازی‌ها، یک الگوی مفید و کاربردی برای تعیین راهبردهای پایدار دفاع و حمله، با توجه به شرایط حاکم بر سامانه مورد نظر ارائه نمود. در مسئله پیشنهادی این تحقیق، وجود حملات مجازی مهاجم برای فریب دادن مدافع و همچنین افزایش خسارت وارده به سامانه، در نظر گرفته شد که در آن، مدافع علی‌رغم عدم شناسایی قطعی این حملات مجازی، در تشخیص آن‌ها به صورت احتمالی عمل می‌نماید. سپس برای تعیین میزان سرمایه‌گذاری‌های دفاع و حمله تمامی زیرسامانه‌ها در مبدأ زمان، با توجه به قابلیت اطمینان حمله ناموفق، قدرت تشخیص مدافع در شناسایی حملات مجازی و رویکرد نظریه بازی‌ها در پیدا نمودن نقطه تعادل، یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی، ارائه شد. سپس با استناد به نتایج به‌دست آمده از مدل ایستا و مفاهیم نظریه تکاملی بازی‌ها، مدل پیشنهادی این تحقیق برای تعیین راهبردهای پایدار تکاملی، معرفی شد که در این روش، با توجه به اهداف بلند مدت مدافع مبنی بر دو راهبرد دفاع بر مبنای واقعی بودن تمام و یا ۹۰ درصد حملات و همچنین راهبردهای پایدار مهاجم، شامل دو راهبرد استفاده و یا عدم استفاده از حملات مجازی، شرایط رسیدن به راهبردهای مختلف، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. درنهایت، مدل ارائه شده تحقیق، برای یک نمونه کاربردی، مورد استفاده قرار گرفت و نتایج نهایی مربوط به آن، مورد محاسبه و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تحلیل حساسیت مدل ارائه شده تحقیق در حالت ایستا، نشان دهنده این نتیجه منطقی بود که افزایش تشخیص صحیح مدافع نسبت به حملات مجازی، تأثیر مستقیمی در افزایش قابلیت اطمینان کل سامانه دارد. همچنین، تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی تحقیق در حالت پویا، نشان‌دهنده تأثیر تغییرات مطلوبیت‌ها و پارامترهای مدل پیشنهادی در تعیین راهبردهای پایدار تکاملی بود و بنابراین تغییرات مقادیر آن‌ها موجب تغییر در راهبردهای پایدار شد. به منظور انجام مطالعات بیشتر در زمینه موضوع تحقیق، می‌توان به ارائه الگوریتم‌های مفید و فرا ابتکاری برای بهینه‌یابی نتایج مورد نظر در مسائل پیچیده و بزرگ و در نظر گرفتن برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح، پرداخت. همچنین برای تحقیقات آتی، ارائه مدلی برای تعیین راهبردهای پایدار دفاع و حمله با وجود همبستگی عملکردی اهداف، پیشنهاد می‌شود.

۵. مراجع

[1] Bier, V. M.; Nagaraj, A.; Abhichandani, V. “Protection of Simple Series and Parallel Systems with Components of Different Values”; Reliab. Eng. Syst. Safe. 2005, 87, 315-323.

[2] Miller, G. D. “Terrorist Decision Making and the Deterrence Problem”; J. Conflict. Resolut. 2013, 36, 132-151.

[3] Arce, D. G.; Kovenock, D.; Roberson, B. “Weakest-link Attacker-Defender Games with Multiple Attack Technologies”; Nav. Res. Log. 2012, 59, 457-469.

[4] Ranjbar, M. H.; Pirayesh, A. “Providing a Method to Assess and Reduce the Risk of Power System against Terrorist Threats”; Advanced Defence Sci. & Tech. 2016, 10, 327–337 (In Persian).

[5] Wu, B.; Tang, A.; Wu, J. “Modeling Cascading Failures in Interdependent Infrastructures under Terrorist Attacks”; Reliab. Eng. Syst. Safe. 2016, 147, 1-8.

[6] Li, R. Q.; Sun, S. W.; Ma, Y. L.; Wang, L.; Xia, C. Y. “Effect of Clustering on Attack Vulnerability of Interdependent Scale-free Networks”; Chaos, Soliton & Fractals 2015, 80, 109-116.

[7] Hausken, K. “Strategic Defense and Attack for Reliability Systems”; Reliab. Eng. Syst. Safe. 2008, 181, 1740–1750.

[8] Hausken, K. “Defense and Attack of Complex and Dependent Systems”; Reliab. Eng. Syst. Safe. 2010, 95, 29-42.

[9] Hausken, K.; Levitin, G. “Protection *vs.* False Targets in Series Systems”; Reliab. Eng. Syst. Safe. 2009, 94, 973–981.

[10] Weibull, J. W. “Evolutionary Game Theory”; MIT Press, 1995.

[11] Maciejewski, W. “Reproductive Value in Graph-Structured Populations”; J. Theor. Biol. 2014, 340, 285–293.

[12] Allen, B.; Nowak, M. A. “Games on Graphs. EMS Survey”; Math. Sci. 2014, 340, 113–151.

[13] Hellmann, T.; Staudigl, M. "Evolution of Social Networks"; Eur. J. Oper. Res. 2014, 234, 583–596.

[14] Chyi, J. L.; Chung, Y. T.; Chayakrit, C.; Ming, D. "Dynamic Decision-Making in a Two-Stage Supply Chain with Repeated Transactions"; Int. J. Prod. Econ. 2012, 137, 211–225.

[15] Gilberto, A. S. S.; Renato, A. K.; Rodrigo, C. C. "A Differential Evolution Approach for Solving Constrained Min–Max Optimization Problems"; Exp. Syst. Appl. 2012, 39, 13440–13450.

[16] Jiang, W.; Fangbin, X. "Evaluating Network Security and Optimal Active Defense Based on Attack–Defense Game Theory"; Chinese. J. Comput. 2009, 32, 44–53.

[17] Levitin, G.; Hausken, K. "Individual *vs.* Overarching Protection against Strategic Attacks"; J. Oper. Res. Soc. 2012, 63, 969–981.

[18] Fontanini, W.; Ferreira, P. A. V. "A Game-Theoretic Approach for the Web Services Scheduling Problem"; Exp. Syst. Appl. 2014, 41, 4743–4751.

[19] Abdolalipour, A.; Nazemi, J.; Toloie Eshlaghi, A.; Hosseinzadeh Lotfi, F. "Service Recovery Chain Response Time Coordinating Mathematical Model through Bilevel Programming Approach"; J. Manage. Res. Iran 2014, 17, 196–222.

[20] Mirfakhraddiny, S. A.; Babaei Meybodi, H.; Morovati Sharifabadi, A. "Predicting Energy Consumption of Iran via a Hybrid Model of Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms and Comparing It with Traditional Models"; J. Manage. Res. Iran, 2013, 18, 171–191.

[21] Konak, A.; Kulturel-Konak, S.; Lawrence, V. S. "A Game-Theoretic Genetic Algorithm for the Reliable Server Assignment Problem under Attacks"; Comput. Ind. Eng. 2015, 85, 73–85.

[22] Zhide, C.; Cheng, Q.; Yihui, Q.; Li, X.; Wei, W. "Dynamics Stability in Wireless Sensor Networks Active Defense Model"; J. Comput. Syst. Sci. 2014, 80, 1534–1548.

[23] Zhenyuan, G.; Xingfu, Z. "Impact of Discontinuous Harvesting on fishery Dynamics in a Stock-effort Fshing Model"; J. Commun. Nonlinear. Sci. Numer. Sim. 2015, 20, 594–603.