Archive of SID

راهبردهای پایدار تکاملی دفاع و حمله برای اهداف وابسته و چندحالته با رویکرد قابلیت اطمینان

مهدی رحیمدل میبدی*: دانش‌آموخته دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور تهران، Rahimdel.m@gmail.com
امیرحسین امیری: دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد
مهدی کرباسیان: دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۶

چکیده

برنامه‌ریزی راهبردهای مفید و پایدار، یکی از مهم‌ترین اهداف سازمان‌ها برای دفاع از سیستم‌های حساس است. در این تحقیق، مدل‌سازی برای بهینه‌یابی سرمایه‌گذاری دفاع و حمله‌ی سیستم‌های پیچیده در نظر گرفته شده است که زیرسیستم‌های موجود در آن‌ها، به یکدیگر وابسته هستند و عمل نکردن یک زیرسیستم در عملکرد مطلوب سایر زیرسیستم‌ها به صورت احتمالی تأثیرگذار است. در مدل ایستای پیشنهادی این تحقیق، با توجه به احتمالات موجود در حمله‌ی موفق، ضریب وابستگی زیرسیستم‌ها، حالت‌های مختلف عملکرد سیستم، ساختار قابلیت اطمینان و رویکرد تئوری بازی‌ها در پیدا نمودن نقطه‌ی تعادل، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین میزان سرمایه‌گذاری دفاع و حمله‌ی تمامی زیرسیستم‌ها، ارائه شده است. سپس با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل پیشنهادی ایستا، پویایی سیستم و مفاهیم نظریه‌ی تکاملی بازی‌ها، یک روش جدید و پویا برای تعیین راهبردهای پایدار دفاع و حمله معرفی می‌شود. با توجه به الگوی ارائه‌شده، راهبردهای پایدار تکاملی در طول زمان، از منظر مدافع، مهاجم و کل سیستم، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت، مدل ارائه‌شده‌ی تحقیق برای یک مثال عددی، استفاده شده و نتایج آن مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: *قابلیت اطمینان، دفاع، وابستگی، سیستم‌های چندحالته، تئوری تکاملی بازی‌ها*

Evolutionary Stable Strategies of Defend and Attack for Dependent and Multi-State Systems with Reliability Approach

Mahdi Rahimdel Meybodi[1*], Amirhossein Amiri[2], Mahdi Karbasian[3]

Abstract

Planning of useful and sustainable strategies is one of the most important goals of organizations to defend critical systems. In this research, a modeling is considered for investment optimization of defense and attack in complex with interdependent subsystems, in which failure of a subsystem will possibly affect the optimal performance of other subsystems. In this study, a static model is proposed that according to the probabilities of a successful attack, subsystems dependency ratio, different modes of operation of the system, reliability structure and game theory approach in determining balancing point, presents a nonlinear planning model to determine the amount of investment in defending and attacking of all subsystems. Then, according to the results obtained from the proposed static model, the dynamics of the system and the concepts of evolutionary game theory, a new and dynamic method is introduced to determine the stable strategies for defense and attack. According to the proposed model, the evolutionarily stable strategy will be examined over time, from the perspective of a defender, attacker, and the whole system. Finally, the proposed model is applied to a numerical example and its results are analyzed.

Keywords: *Reliability; Defense; Dependency; Multi-state systems; Evolutionary game theory.*

1 Ph.D. Student of Industrial Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran; Email: Rahimdel.m@gmail.com.
2 Associate Professor, Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran.
3 Associate Professor, Industrial Engineering Department, Malek ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

یکی از مهم‌ترین اهـداف سازمان‌ها، تعیین راهبـردهای مطلوب و پایدار بـرای دفـاع از سیستم‌های حساس و حیاتی است و بـرای رسیدن به این هدف، باید با توجه به شرایط دفاع و حمله، راهبـردهای کارآمد و استوار تعیین شوند. سازمان‌ها به‌منزله‌ی مدافع، باید در مقابل حملات احتمالی دشمنان به سیستم‌ها، اقدامات حفاظتی را به‌عمل آورند و خسارت مورد انتظار زیرساختارها را، تا حد امکان، کمینه نمایند. به عبارتی دیگر، مدافع باید قابلیت اطمینان عملکرد زیرساختارها را که اجرای اهداف به صورت پایدار است، افزایش دهد. در مقابل، هدف مهاجم بیشینه نمودن خسارت مورد انتظار به سیستم است.

زیـرسیسـتم‌هـای مـوجـود در یـک سیستم، ممکن است با یکدیگر وابستگی عملکردی داشته باشند. در این حالت، عدم عملکرد و یا انهدام یک زیرسیستم، تأثیر نامطلوبی در عملکرد سایر زیرسیستم‌های وابسته به آن دارد. بنابراین، مدافع باید تا حدّ امکان، میزان وابستگی عملکردی زیرسیستم‌ها را کاهش دهد تا مطلوبیت دفاع از کل سیستم افزایش یابد. در مقابل، مطلوبیت مهاجم با افزایش وابستگی بین زیرسیستم‌ها افزایش می‌یابد.

در سال‌هـای اخـیـر، نـظریـه‌ی تـکـاملی بـازی‌هـا بـه‌صورت روزافـزون مورد توجه محققان قرار گرفته است. این توجه از سه حقیقت نشأت گرفته است: اول اینکه تکامل، لزوماً همان تکامل بیولوژیک نیست، تکامل در این زمینه می‌تواند مفهومی معادل تکامل نگرشی مربوط به تغییر در اعتقادات، سیاست‌ها و راهبردها را به‌همراه داشته باشد. دوم اینکه، بسیاری از فرضیه‌های عقلانی که زیربنای نظریه‌ی تکاملی بازی‌ها را تشکیل می‌دهند، در بیشتر موارد، مناسب‌تر از فرضیه‌های زیربنایی نظریه‌ی کلاسیک بازی‌ها برای مدل‌سازی راهبردها هستند و در نهایت، این حقیقت که نظریه‌ی تکاملی بازی‌ها نظریه‌ای پویاست، مؤلفه‌ی مهمی است که نظریه‌ی کلاسیک بازی‌ها از آن بی‌بهره است. در مجموع، یک نظریه‌ی پویا بدون هیچ سؤالی کامل‌تر و در نتیجه ارجح‌تر از نظریه‌ی ایستا خواهد بود، اما دلایل کافی از شاخه‌های دیگر علم وجود دارد که نشان می‌دهد تا زمانی‌که در یک شاخه، نظریه‌ی ایستای آن کاملاً درک نشده است، تلاش برای ارائه‌ی نظریه‌ای پویا کاملاً بیهوده است.

یکی از ابزارهای مهم برای تعیین راهبردهای بهینه‌ی دفاع و حمله، استفاده از مبانی و مفاهیم نظریه‌ی تکاملی بازی‌ها است. این روش، رویکردی متفاوت برای تحلیل بازی‌هاست که در هر مرحله‌ی آن، به‌طور 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 فرایند، به‌طور ایدئال، جمعیت به وضعیتی پایدار همگرا خواهد شد که احتمالاً بهترین پاسخ برای هر بازیکنی را مشخص می‌کند.

تاکنون تحقیقات زیادی برای تعیین راهبردهای بهینه‌ی دفاع و حمله انجام شده است و بسیاری از محققان، در این زمینه، از مفاهیم و کاربردهای تئوری بازی‌ها، استفاده نموده‌اند. در مدل ارائه‌شده‌ی یانگ و همکاران، سرمایه‌گذاری بهینه‌ی امنیت اطلاعات با توجه به انواع مختلف حمله‌ها ارزیابی شده است [۱]. هاسکن، با توجه به نقاط هدف سیستم‌ها، که دارای ساختارهایی مانند سری، موازی و پیچیده هستند، یک مدل بر اساس تئوری بازی‌ها ارائه نموده است که در آن مدافع به دنبال حداقل نمودن خسارت وارده و مهاجم در پی حداکثر نمودن آن است. برای این کار یک تابع خسارت که برابر با احتمال حمله‌ی موفق روی اهداف است، تعریف می‌شود که وابسته به میزان سرمایه‌گذاری دفاع و حمله و همچنین وابسته به مشخصه‌ی دیگری است که شدت اهمیت آن اهـداف هستند. در ایـن مـدل، میزان سرمایه‌گذاری بهینه‌ی دفاع و حمله، با توجه به آگاهی کامل مهاجم از اهداف مدافع، تعیین می‌شود [۲]. در تحقیق دیگری از هاسکن، با ارزیابی میزان تهدید هر هدف توسط مهاجم، تأثیر اقدامات امنیتی برای محافظت از اهداف بحرانی، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است [۳]. همچنین در تحقیق لوتین و همکاران، دفاع بهینه از اجـزا یکسان ولی با محافظ گروهی از آن‌ها مدل‌سازی شده است که در این تحقیق، مهاجم برای حمله به اجزا باید ابتدا محافظ گروهی آن‌ها را تخریب نماید [۴].

در زمینـه‌ی تجزیه و تحلیل راهبـردهـای دفـاع و حمله‌ی سیستم‌های وابسته و چندحالته نیز تاکنون تحقیقات مفیدی انـجـام شـده اسـت. چـن و هـمـکـاران، تـجـزیـه و تحلیل خرابی ساختارهای پیچیده و شبکه‌ای را با توجه به حملات وارد شده به این سیستم‌ها، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [۵]. همچنین، نمونه‌ی مشابه این بررسی را می‌توان در تحقیق وو و همکاران، مـشـاهـده نـمـود [۶]. لـی و هـمـکـاران، چـگـونـگـی دسـتـه‌بـنـدی آسیب‌پذیری حملات وارد شده به شبکه‌های وابسته را مورد بررسی قرار دادند [۷]. وانگ و همکاران، چگونگی پایداری یک شبکه‌ی وابسته، در برابر حملات را مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار دادند [۸]. ژانـگ و همکاران، پایداری شبکه‌های وابسته‌ی حمل و نقل در مقابل اهداف مورد حمله را بررسی و ارزیابی نمودند [۹]. در تحقیق ژینهوا و همکاران، مدلی بر اساس شبکه‌ی بیزین ارائه شده است که در آن با توجه به روابط موجود در شبکه‌های بیزین و احتمالات موجود در آن (برای وقوع حوادث)، قابلیت اطمینان کل سیستم، محاسبه می‌شود. در مدل ارائه‌شده‌ی این تحقیق، اجزای سیستم می‌توانند حداکثر سه حالت کارکردی داشته باشند و همچنین اثرات خرابی مشترک بین اجزا نیز بررسی و تحلیل شده‌اند [۱۰]. در مدل ارائه‌شده‌ی هوآن و همکاران، سیستم‌هایی در نظر گرفته شده‌اند که در آن‌ها اجزا، چندحالته و قابل تعمیر هستند و کارایی آن‌ها با بارگذاری اشتراکی است. سیستم مورد نظر، با وجود حالت‌های کارکردی چندگانه، باید تقاضاهای مورد نظر را پاسخ‌گو باشد. البته هر جزو می‌تواند کارایی اضافی خود را به سایر اجزا انتقال دهد و در صورت عدم پاسخ‌گویی تقاضای هر زیرسیستم، کل سیستم ناکارا می‌شود. این مدل بر اساس تابع مولد سراسری پایه‌گذاری شده است و قابلیت اطمینان لحظه‌ای و همچنین قابلیت دسترس‌پذیری سیستم، مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۱].

در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان، از مفاهیم و کاربردهای تئوری تکاملی بازی‌ها برای مدل‌سازی تحقیقات خود استفاده

www.SID.ir

Archive of SID

نموده‌اند. استفاده از مفاهیم گراف تکاملی به‌منزله‌ی رویکردی برای تحقیق در زمینه‌ی تأثیر ساختار جامعه در مدل‌سازی تئوری تکاملی و پویای بازی‌ها مورد توجه بسیاری از محققان بوده است [۱۲]. چانگیون و همکاران، پویا بودن تقاضا با پیوستگی زمانی را بر اساس یک رویکرد تئوری تکاملی بازی توصیف نمودند [۱۳]. گانگشو و ند، از تئوری تکاملی بازی‌ها برای پیش‌بینی یک بازی دونفره‌ی همکارانه و با اطلاعات کامل و ناقص، استفاده نمودند [۱۴]. گیلبرتو و همکاران، با استناد به مفاهیم تئوری تکاملی بازی‌ها، دو مسئله‌ی همزمان و تلفیقی بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی را با توجه به محدودیت‌های موجود در مسئله، بهینه‌سازی نمودند [۱۵]. ویهوی و همکاران، با توجه به مفاهیم بنیادی تئوری تکامی بازی‌ها، یک مدل دفاع از شبکه‌ی ارتباطی بی‌سیم ارائه نمودند [۱۶]. ژوانگ وی و همکاران، با استفاده از رویکرد تکاملی بازی‌ها، مدل‌هایی برای ارزیابی امنیت سیستم‌های اطلاعاتی شبکه و عملکرد پدافند دفاعی، ارائه نمودند [۱۷].

مقاله‌ی حاضر، به استناد تحقیقات انجام‌شده‌ی گذشته در زمینه‌ی موضوع تحقیق و با توجه به نواقص و کمبودهای موجود در آن‌ها، یک مدل جدید، کاربردی و پویا برای تعیین راهبردهای بهینه‌ی دفاع و حمله‌ی سیستم‌های وابسته و چندحالته، مبتنی بر تئوری تکاملی بازی‌ها و رویکرد بهبود قابلیت اطمینان، ارائه می‌نماید که هرکدام از این سیستم‌ها، دارای چند زیرسیستم است که با یکدیگر دارای وابستگی عملیاتی هستند. در این سیستم‌ها، مدافع به دنبال حداقل نمودن خسارت وارده از سوی مهاجم است، در صورتی‌که هدف مهاجم، تخریب حداکثری اهداف است.

یکی از مهم‌ترین موضوع‌هایی که در این تحقیق به آن پرداخته شده است، در نظر گرفتن حالت‌های مختلف عملکرد سیستم با وجود میزان وابستگی عملیاتی زیرسیستم‌های مربوط به آن است و با توجه به این موضوع، توابع مطلوبیت مدافع و مهاجم مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند. همچنین در تحقیقات گذشته، راهبردهای بهینه‌ی دفاع و حمله با استفاده از قوانین تئوری بازی‌ها در محیط ایستا تعیین شده است، لیکن در این تحقیق، با توجه به مزایای مختلف استفاده از تئوری تکاملی و پویای بازی‌ها، از مفاهیم این تکنیک، در تعیین راهبردهای پایدار دفاع و حمله، استفاده شده است. به طور کلی، در مدل پیشنهادی این تحقیق، ابتدا با توجه به احتمالات موجود در حمله‌ی موفق، ضریب وابستگی زیرسیستم‌ها، حالت‌های مختلف عملکرد سیستم، ساختار قابلیت اطمینان و رویکرد تئوری بازی‌ها در پیدا نمودن نقطه‌ی تعادل، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین میزان سرمایه‌گذاری دفاع و حمله‌ی تمامی زیرسیستم‌ها، در حالت ایستا ارائه می‌شود. سپس راهبردهای مختلف مدافع و مهاجم و مطلوبیت‌های مربوط به آن‌ها، ارزیابی می‌شوند. در نهایت با استفاده از مفاهیم تئوری تکاملی بازی‌ها و مدل‌سازی مربوطه، راهبرد بهینه و پایدار، تعیین می‌شود و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

راهبردهای بهینه‌ی دفاع و حمله در شرایط ایستا

مسئله‌ی مورد نظر این تحقیق، تعیین راهبردهای بهینه‌ی دفاع و حمله‌ی یک سیستم حساس است که در این سیستم، n زیرسیستم وجود دارد و تمامی زیرسیستم‌ها با یکدیگر وابستگی عملیاتی دارند. همچنین، مدافع و مهاجم با توجه به آگاهی از یکدیگر و قواعد عقلانی و منطقی، راهبردی را به‌منزله‌ی نقطه‌ی تعادل، انتخاب می‌نمایند.

از نظر مدافع، ارزش هر هدف (زیرسیستم) i برابر با v_i است و به طور مشابه برای مهاجم، هر هدف i، ارزشی برابر با V_i دارد. با توجه به فرض مسئله‌ی مورد نظر مبنی بر وجود وابستگی بین اهداف، ضریب وابستگی بین دو هدف i و j، به صورت احتمالی و با α_{ij} نشان داده می‌شود. α_{ij}، احتمال عدم عملکرد هدف j در صورت خرابی (انهدام) هدف iام است. به صورت مشابه، α_{ji}، احتمال عدم عملکرد هدف i در صورت خرابی (انهدام) هدف jام است.

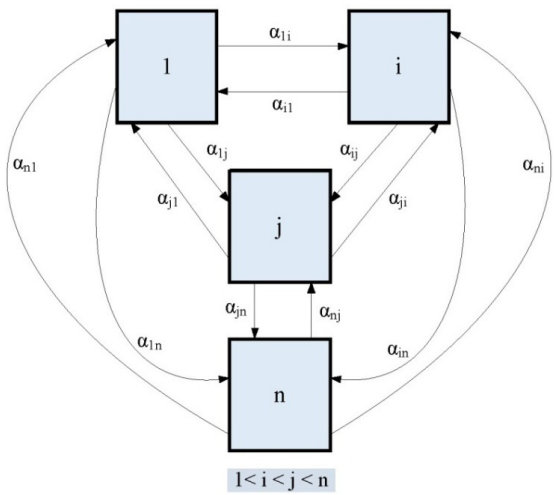
همچنین، مدافع برای حفاظت از زیرسیستم‌ها، سرمایه‌گذاری‌های متفاوت f_i را با هزینه‌ی واحد ci انجام می‌دهد و مهاجم نیز به‌طور مشابه برای حمله به هر یک از زیرسیستم‌ها، F_i را با هزینه‌ی واحد C_i سرمایه‌گذاری می‌نماید که i، نشان‌دهنده‌ی هدف (زیرسیستم) iام است. با توجه به تعریف مسئله‌ی تحقیق، می‌توان ساختار وابستگی مسئله‌ی مورد نظر تحقیق را به صورت تصویر ۱ نشان داد.

قابلیت اطمینان هر هدف بستگی به میزان سرمایه‌گذاری برای محافظت اهداف از طرف مدافع و میزان سرمایه‌گذاری برای حمله نمودن از طرف مهاجم دارد و در نتیجه، تعیین‌کننده‌ی موفقیت حمله و دفاع است.

یک روش ساده برای تعریف احتمال یک حمله‌ی موفق روی هدف i، استفاده از نسبت ارائه شده توسط تالوک [۱۸] است که به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

رابطه‌ی ۱:

$$q_i = \frac{F_i^{m_i}}{f_i^{m_i} + F_i^{m_i}} \quad .$$



تصویر ۱: ساختار وابستگی مسئله

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱: حالت‌های مختلف عملکردی سیستم n هدفه

حالت (k)	هدف ۱	...	هدف n	قابلیت اطمینان سیستم (R)	ارزش مورد انتظار مدافع (s)	ارزش مورد انتظار مهاجم (S)
1	Op	...	Op	$p_1p_2...p_n$	$v_1+v_2+...v_n$	0
2	Op	...	Fa	$p_1p_2...q_n$	$(1-\alpha_{n1})v_1+$ $(1-\alpha_{n2})v_2+...$	$\alpha_{n1}V_1+\alpha_{n2}V_2+V_3+$ $...+V_n$
...	...	...	...	...	...	...
$2^{(n-1)}+1$	Fa	...	Op	$q_1p_2...p_n$	$(1-\alpha_{12})v_2+... +$ $(1-\alpha_{1n})v_n$	$V_1+\alpha_{12}V_2+ ...+\alpha_{1n}V_n$
...	...	...	...	...	...	...
2^n	Fa	...	Fa	$q_1q_2q_3$	0	$V_1+V_2+...+V_n$

Op:عملکرد صحیح هدف Fa:خرابی (انهدام) هدف

که در آن m_i، میزان شدت رقابت هدف i بوده و یک مشخصه رقابت با توجه به نوع هدف i است [۱۹].

به ازای هر کدام از اهداف i، با توجه به احتمال موفقیت حمله (رابطه‌ی ۱)، می‌توان تابع احتمال عدم موفقیت حمله (p_i) را به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف نمود.

رابطه‌ی ۲:
$$p_i = \frac{f_i^{m_i}}{f_i^{m_i} + F_i^{m_i}} \quad .$$

با در نظر گرفتن تابع احتمال خطر (q_i)، مدافع در پی کاهش این احتمال و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان (p_i) است. از سوی دیگر مهاجم متمایل به افزایش احتمال خطر (q_i) است. لیکن، با توجه به وجود ضریب وابستگی بین اهداف (زیرسیستم‌ها)، عملکرد سیستم، شامل حالت‌های مختلفی (برابر با ۲^n حالت) می‌شود که در هرکدام از حالت‌ها، ارزش مورد انتظار سیستم برای مدافع و مهاجم، تغییر می‌کند. در جدول ۱، حالت‌های مختلف عملکردی سیستم، مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به مفروضات مسئله مبنی بر وجود محدودیت بودجه، مطلوبیت مدافع، کمینه نمودن هدف دیگر یعنی هزینه‌ی کل نیز هست. بنابراین می‌توان مطلوبیت مورد نظر مدافع را به صورت رابطه‌ی ۳ در نظر گرفت:

رابطه‌ی ۳:
$$Max:\ u = \sum_{k=۱}^{۲^n} R_k s_k - \sum_{i=۱}^{n} c_i f_i$$

R_k قابلیت اطمینان سیستم در حالت kام و s_k ارزش مورد انتظار مدافع در حالت kام است.

از سوی دیگر، مهاجم متمایل به افزایش احتمال حمله‌ی موفق و خرابی کل سیستم و هر کدام از زیرمجموعه‌های آن است. همچنین در صورت وجود محدودیت هزینه، مطلوبیت مهاجم، کمینه نمودن هزینه‌ی کل تجهیزات نیز هست. بنابراین می‌توان مطلوبیت مورد نظر مهاجم را به صورت رابطه‌ی ۴ در نظر گرفت که در آن S_k ارزش مورد انتظار مهاجم در حالت kام است.

رابطه‌ی ۴:
$$Max:\ U = \sum_{k=۱}^{۲^n} R_k S_k - \sum_{i=۱}^{n} C_i F_i$$

با توجه به ماهیت اهداف متناقض مسئله، برای به‌دست‌آوردن راه‌حل، از مفاهیم بنیادی نقطه‌ی تعادل نش [۲۰] در تئوری بازی‌ها استفاده می‌شود که در آن هیچ‌یک از طرفین بازی به صورت یک‌طرفه عمل نمی‌کنند، بلکه با توجه به منطقی بودن بازیکنان، مناسب‌ترین پاسخ تعیین می‌شود. بنابراین برای تعیین نقطه‌ی تعادل هر هدف، باید مسئله‌ی برنامه‌ریزی غیرخطی با روابط ۵ تا ۹ حل شود که در آن، از تعمیم شرایط کوهن- تاکر استفاده شده است [۲۱]. بهترین حالت تابع هدف، صفر بودن آن است، زیرا این تابع به ازای هر راه‌حل عملی، غیرمنفی می‌شود.

رابطه‌ی ۵:
$$Min:\lambda_{۱,۱}\left(c_{max} - \sum_{i=۱}^{n} c_i f_i\right) + \lambda_{۲,۱}\left(C_{max} - \sum_{i=۱}^{n} C_i F_i\right)$$

رابطه‌ی ۶:
$$\frac{\partial(\sum_{k=۱}^{۲^n} R_k s_k)}{\partial f_i} - (۱+\lambda_{۱,۱})c_i - (۱+\lambda_{۱,۲})b_i = ۰$$
$$i = ۱,\dots,n \ .$$

رابطه‌ی ۷:
$$\frac{\partial(\sum_{k=۱}^{۲^n} R_k S_k)}{\partial F_i} - (۱+\lambda_{۲,۱})C_i - (۱+\lambda_{۲,۲})O_i = ۰ \ ,$$
$$i = ۱,\dots,n \ .$$

رابطه‌ی ۸:
$$\sum_{i=۱}^{n} c_i f_i \le c_{max} \ .$$

رابطه‌ی ۹:
$$\sum_{i=۱}^{n} C_i F_i \le C_{max} \ .$$

$$f_i, F_i, \lambda_{۱,۱}, \lambda_{۱,۲}, \lambda_{۲,۱}, \lambda_{۲,۲} \ge ۰$$

در روابط فوق، c_{max} و C_{max} به ترتیب، بیشینه هزینه‌ی مورد نظر مدافع و مهاجم است. نتیجه‌ی نهایی برنامه‌ریزی غیرخطی مذکور، نقطه‌ی تعادل در حالت ایستا را نشان می‌دهد و تعیین‌کننده‌ی میزان سرمایه‌گذاری بهینه‌ی دفاع و حمله برای هرکدام از زیرمجموعه‌ها است. برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مذکور، در ابعاد کوچک مسئله، می‌توان از نرم‌افزارهای کاربردی در این زمینه مانند Lingo و Gams استفاده نمود. ولی

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲: ماتریس دفاع- حمله

مهاجم / مدافع	راهبرد (A)	راهبرد (NA)
راهبرد (D)	(u_1, U_1)	$(\bar{u}_1, 0)$
راهبرد (ND)	$(u_2, \bar{U}_1)$: $Max(\alpha_{ij})=0$	$(\bar{u}_2, 0)$: $Max(\alpha_{ij})=0$

در صورت بزرگ شدن ابعاد مسئله، باید با استفاده از روش‌های فراابتکاری، الگوریتم بهینه‌یابی مسئله را طراحی و اجرا نمود [۲۲].

تعیین راهبرد پایدار دفاع و حمله با رویکرد تئوری تکاملی بازی‌ها

نتایج نهایی به‌دست‌آمده از بخش قبل، میزان سرمایه‌گذاری‌های بهینه‌ی دفاع و حمله در شرایط ایستا و لحظه‌ی تصمیم‌گیری در مبدأ زمان است. لیکن با گذر زمان و در نظر گرفتن پویایی سیستم، شرایط حاکم بر مدل و تصمیم‌گیری بازیکنان (مدافع و مهاجم)، تغییر می‌کند. در چنین شرایطی باید راهبرد برتر را با توجه به معیار پایداری زمانی، مدل‌سازی نمود.

در مسئله‌ی مورد نظر این تحقیق، دو راهبرد انتخابی برای مدافع و مهاجم وجود دارد. اولین راهبرد مورد نظر مدافع (راهبرد D)، استقرار تجهیزات دفاع از زیرسیستم‌ها بر مبنای نتایج حاصل از مدل ایستا است. لیکن، مدافع در راهبرد دوم خود (راهبرد ND) در نظر دارد تا بزرگ‌ترین میزان وابستگی بین زیرسیستم‌ها را از بین ببرد یعنی $\text{Max}(\alpha_{ij})=0$. ذکر این نکته لازم است که در این راهبرد، مدافع باید برای از بین بردن میزان وابستگی مربوطه، به میزان $c\alpha_{ij}$ هزینه نماید. همچنین مهاجم، راهبردهای حمله نمودن (راهبرد A) و عدم حمله (راهبرد NA) را به‌منزله‌ی گزینه‌های خود انتخاب نموده است. با توجه به مطلوبیت‌های مورد نظر مدافع و مهاجم (روابط ۳ و ۴) ماتریس بهره‌وری دفاع ـ حمله به صورت جدول ۲ تعیین می‌شود.

با توجه به مفاهیم تئوری تکاملی بازی‌ها، بهترین راهبرد در طول دوره‌ی تکامل بازی، راهبردی است که پایدار و بدون تغییر باشد. بهبود مداوم تدابیر گذشته‌ی بازیکنان، منجر به شکل‌گیری «راهبرد پایدار تکاملی[1]» می‌شود. در مسئله‌ی مورد نظر این تحقیق، اگر $x(0 \le x \le 1)$ نشان‌دهنده‌ی نسبتی از تعداد مدافع‌هایی باشد که راهبرد «D» را انتخاب نموده‌اند، بنابراین نسبت مدافع‌هایی که راهبرد «ND» را برگزیده‌اند (x-۱) است. همچنین اگر $y(0 \le y \le 1)$ نشان‌دهنده‌ی نسبتی از تعداد مهاجم‌هایی باشد که راهبرد «A» را انتخاب نموده‌اند، بنابراین نسبت مهاجم‌هایی که راهبرد «NA» را برگزیده‌اند (y-۱) است. با این مفروضات، می‌توان راهبرد پایدار تکاملی را برای مدافع، مهاجم و سیستم، تعیین نمود.

برای تعیین راهبرد پایدار تکاملی مدافع، ابتدا ارزش مورد انتظار مدافع از انتخاب هرکدام از راهبردهای موجود، مطابق روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود.

رابطه‌ی ۱۰: $E(P_D) = Y(u_1) + (1-Y)(\bar{u}_1)$

رابطه‌ی ۱۱: $E(P_{ND}) = Y(u_2) + (1-Y)(\bar{u}_2)$

بنابراین متوسط بهره‌وری مورد انتظار مدافع، با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ ارزیابی می‌شود.

رابطه‌ی ۱۲: $E(D) = XE(P_D) + (1-X)E(P_{ND})$

معادله‌ی پویای مدافع در واحد زمانی، برای ارزیابی راهبرد پایدار تکاملی، با توجه به رابطه‌ی ۱۳ تعیین می‌شود [۲۳].

رابطه‌ی ۱۳:

$$\frac{dX}{dt} = X\left[E(P_D) - E(D)\right] = X(1-X)(A_X - YB_X)$$

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

معادله‌ی پویای مهاجم در واحد زمانی، مشابه معادله‌ی پویای مدافع، با توجه به رابطه‌ی ۱۴ تعیین می‌شود.

رابطه‌ی ۱۴ :

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

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

در نهایت، برای ارزیابی راهبرد پایدار تکاملی کل سیستم، با توجه به معادلات پویای زمانی مدافع و مهاجم، ابتدا ماتریس ژاکوبین، مطابق رابطه‌ی ۱۵ تعیین می‌شود.

رابطه‌ی ۱۵:

$$J = \begin{bmatrix} (1-2X)(A_X + YB_X) & X(1-X)(B_X) \\ Y(1-Y)(B_Y) & (1-2Y)(A_Y + XB_Y) \end{bmatrix}$$

با توجه به شرط لازم و کافی برای راهبرد پایدار تکاملی، مبنی بر اینکه باید در ماتریس ژاکوبین، دترمینان (det) مثبت، ولی مجموع عناصر قطر اصلی ماتریس (trace)، منفی باشد، تجزیه و تحلیل پایداری نقاط تعادل سیستم انجام می‌شود [۲۴].

جدول ۳، دترمینان و مجموع درایه‌ها و جدول ۴ تجزیه و تحلیل پایداری برای تمامی نقاط تعادل سیستم را نشان می‌دهد.

بنابراین، پس از محاسبه‌ی 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 سیستم را ارزیابی و تحلیل نمود.

مثال عددی

در این قسمت، برای نشان دادن چگونگی استفاده از مدل پیشنهادی و تحلیل نتایج مربوطه، یک مثال کاربردی ارائه می‌شود. فرض کنید هدف مسئله‌ی مورد نظر، تعیین راهبرد پایدار تکاملی دفاع و حمله برای سیستمی متشکل از سه زیرسیستم وابسته‌ی تأمین‌کننده‌ی برق یک منطقه است که ساختار وابستگی آن‌ها به صورت تصویر ۲ است.

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

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳: دترمینان و مجموع درایه‌های ماتریس ژاکوبین

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

جدول ۴: تجزیه و تحلیل پایداری نقاط تعادل سیستم

ماهیت نقطه‌ی تعادل	علامت trace(J)	علامت det (J)
ناپایدار	+	+
پایدار	−	+
نقطه‌ی عطف	+	−
نقطه‌ی عطف	−	−

جدول ۵: اطلاعات اولیه‌ی مطالعه‌ی موردی

زیرسیستم	c_i	C_i	v_i	V_i	m_i
۱	۸/۵	۹/۳	۸۵	۴۸	۲
۲	۹	۹/۸	۹۰	۴۵	۳
۳	۸	۸/۸	۸۰	۴۰	۲
$c_{max}=100,\ C_{max}=70,\ c\alpha_{12}=95$					

جدول ۶: مقادیر بهینه‌ی سرمایه‌گذاری دفاع و حمله برای مطالعه‌ی موردی

متغیرهای حمله		متغیرهای دفاع	
F_1	۳/۲۹	f_1	۲/۴۵۸
F_2	۲/۶	f_2	۱/۲۷۸
F_3	۰	f_3	۳/۷۳

به استناد روش پیشنهادی و استفاده از آن با توجه به داده‌های جداول ۱ و ۵، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مثال عددی به صورت زیر است:

Min: $\lambda_{1,1}(۱۰۰-۸,۵f_1- 9f_3-۸f_2)+ \lambda_{2,1}(۷۰- 9,۳F_1- 9,۸F_3-۸,۸F_2)$

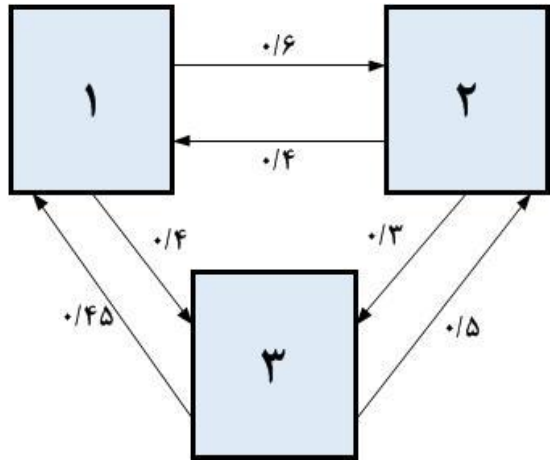
s.t. :

$(۲/f_1)p_1q_1(۲۵۵p_2p_3+ 91,۷۵p_2q_3+ ۱۰۷q_2p_3+ ۱۲,۷۵q_2q_3) -$
$(۲/f_1)p_1q_1(۸۶p_2p_3- 9p_2q_3+ ۲۴q_2p_3) - ۸,۵(۱+\lambda_{1,1})=۰$

$(۲/f_2)p_2q_2(۲۵۵p_1p_3+ 91,۷۵p_1q_3+ ۱۰۷q_1p_3+ ۱۲,۷۵q_1q_3) -$
$(۲/f_2)p_2q_2(۸۶p_1p_3- 9p_1q_3+ ۲۴q_1p_3) - 9(۱+\lambda_{1,1})=۰$

$(۲/f_3)p_3q_3(۲۵۵p_1p_2+ 91,۷۵p_1q_2+ ۱۰۷q_1p_2+ ۱۲,۷۵q_1q_2) -$
$(۲/f_3)p_3q_3(۸۶p_1p_2- 9p_1q_2+ ۲۴q_1p_2) - ۸(۱+\lambda_{1,1})=۰$

$(۲/F_1)p_1q_1(۸۴,۱p_2q_3+ ۷۶,۲q_2p_3+ ۱۲۵,۸q_2q_3) -(۲/F_1)p_1q_1$
$(۹۱p_2p_3+ ۱۳۷,۵p_2q_3+ ۱۲۱q_2p_3+ ۱۳۳q_2q_3) + 9,۳(۱+\lambda_{2,1})=۰$



تصویر ۲: ساختار وابستگی مثال عددی

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۷: تجزیه و تحلیل پایداری نقاط تعادل سیستم مثال کاربردی

ماهیت نقطه‌ی تعادل	trace(J)	det (J)	نقطه‌ی تعادل (X,Y)
ناپایدار	۲۵۸/۵۳	۱۶۶۹۶/۷۵	(۰,۰)
پایدار	-۱۵۴/۹۶	۳۶۷۲/۵	(۰,۱)
نقطه‌ی عطف	۱۱۸/۳۱	-۲۰۴۷۷/۱	(۱,۰)
نقطه‌ی عطف	-۱۲۵	-۴۵۰۴	(۱,۱)

$$(۲/F_۲)p_۴q_۴(۸۴,۱p_۱q_۳+۷۶,۲q_۱p_۳+۱۲۵,۸q_۱q_۲)-(۲/F_۲)p_۴q_۴$$
$$(۹۱p_۱p_۳+۱۳۷,۵p_۱q_۳+۱۲۱q_۱p_۳+۱۳۳q_۱q_۳)+۹,۸(۱+\lambda_{۲,۱})=۰$$

$$(۲/F_۲)p_۴q_۴(۸۴,۱p_۱q_۳+۷۶,۲q_۱p_۳+۱۲۵,۸q_۱q_۲)-(۲/F_۲)p_۴q_۴$$
$$(۹۱p_۱p_۳+۱۳۷,۵p_۱q_۳+۱۲۱q_۱p_۳+۱۳۳q_۱q_۳)+۸,۸(۱+\lambda_{۲,۱})=۰$$

$$۸,۵f_۱+۹f_۲+۸f_۳\leq ۱۰۰$$

$$۹,۳F_۱+۹,۸F_۲+۸F_۳\leq ۷۰$$

$$(p_i=\frac{f_i^{m_i}}{f_i^{m_i}+F_i^{m_i}},\ q_i=۱-p_i)$$

نتایج نهایی مسئله‌ی مورد نظر که نقاط تعادل سرمایه‌گذاری دفاع و حمله برای هر کدام از زیرسیستم‌ها است، به صورت جدول ۶ تعیین می‌شوند.

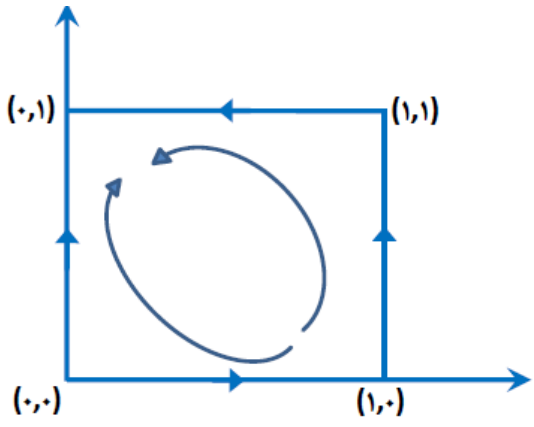
بنابراین با توجه به داده‌های جداول ۵ و ۶ و روابط ۱۳ و ۱۴، ضرایب پارامترهای معادلات پویای زمانی، تعیین می‌شوند:

$A_X=۱۳۲/۷۶۳$ $\quad B_X=-۱۶۱/۹۶۴$

$A_Y=۱۲۵/۷۶۴$ $\quad B_Y=۲۸/۴۷۴$

سپس ماتریس ژاکوبین، برای ارزیابی راهبرد پایدار تکاملی کل سیستم، با توجه به معادلات پویای زمانی مدافع و مهاجم، مطابق رابطه‌ی ۱۵ محاسبه می‌شود. در نهایت، تجزیه و تحلیل پایداری نقاط تعادل سیستم مطابق جدول ۷ انجام می‌شود.

نتایج موجود در جدول ۷ نشان می‌دهد که راهبرد پایدار تکاملی در طول زمان، استقرار تجهیزات دفاع از زیرسیستم‌ها بر مبنای نتایج حاصل از مدل ایستا و عدم حمله‌ی مهاجم است. تصویر ۳ فرایند تکامل سیستم را نشان می‌دهد.



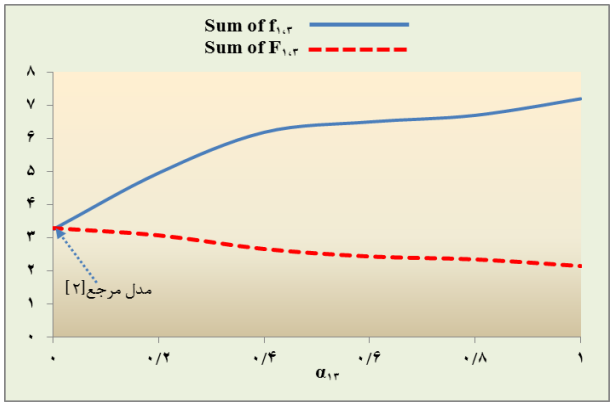
تصویر ۳: فرایند تکامل سیستم برای مثال کاربردی

تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی تحقیق را می‌توان، در دو حالت ایستا و پویا، تجزیه و تحلیل نمود. در حالت ایستا، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد نظر، تغییرات میزان وابستگی زیرسیستم‌ها است. برای این کار، ابتدا با در نظر گرفتن میزان وابستگی دو زیرسیستم و حل نمودن مدل برنامه‌ریزی غیرخطی پیشنهادی، مجموع سرمایه‌گذاری‌های دفاع و حمله، مورد محاسبه قرار می‌گیرد. ذکر این نکته لازم است که با در نظرگرفتن استقلال کامل زیرسیستم‌ها (عدم وابستگی بین زیرسیستم‌ها)، برنامه‌ریزی غیرخطی مربوطه، مشابه مدل پیشنهادی آقای هاسکن است [۲]. در مرحله‌ی بعد، با تغییر دادن میزان وابستگی بین دو زیرسیستم منتخب و حل نمودن مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مربوط به آن‌ها، مجموع سرمایه‌گذاری‌های دفاع و حمله مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در این تحقیق، تغییرات میزان وابستگی بین دو زیرسیستم ۱ و ۳ ($\alpha_{۱۳}$)، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و نتایج نهایی آن، مطابق تصویر ۴ است.

با توجه به نتایج موجود در تصویر ۴، می‌توان روند افزایشی مجموع سرمایه‌گذاری دفاع از زیرسیستم‌های ۱ و ۳، نسبت به افزایش میزان وابستگی بین آن‌ها را مشاهده نمود.

برای مدل پیشنهادی تحقیق در حالت پویا، با توجه به اطلاعات اولیه‌ی مثال کاربردی و در نظر گرفتن روابط ۱۳ و ۱۴، 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 Matlab، 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 کمیّت‌ها در بازه‌ی [۰،۱] استاندارد شده‌اند.



تصویر ۴: روند تغییرات مجموع سرمایه‌گذاری‌های دفاع و حمله نسبت به افزایش $\alpha_{۱۳}$

www.SID.ir

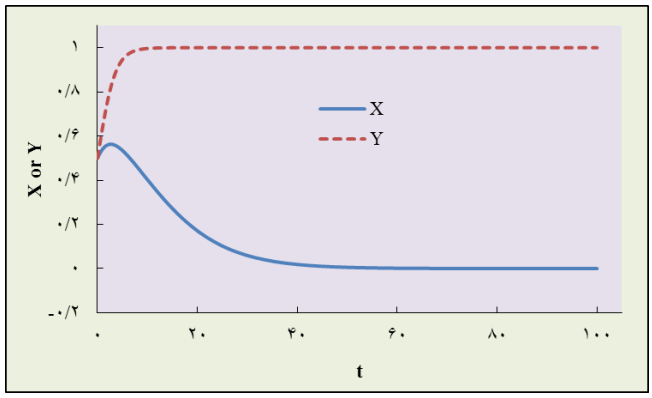
Archive of SID

جدول ۸: شرایط رسیدن به راهبردهای مختلف پایدار تکاملی

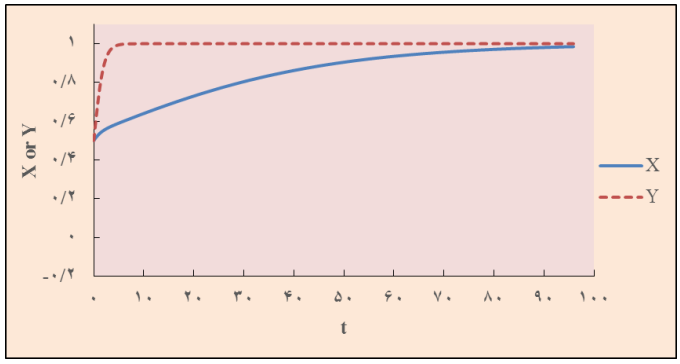
شرایط پایداری	نقطه‌ی تعادل (X,Y)
$\bar{u}_1 < \bar{u}_2 \quad , \quad \bar{U}_1 < 0$	(۰،۰)
$u_1 < u_2 \quad , \quad \bar{U}_1 > 0$	(۰،۱)
$\bar{u}_1 > \bar{u}_2 \quad , \quad U_1 < 0$	(۱،۰)
$u_1 > u_2 \quad , \quad U_1 > 0$	(۱،۱)

برای بررسی رفتارهای مختلف سیستم مورد نظر در رسیدن به راهبردهای پایدار تکاملی، با توجه به جداول ۳ و ۴، می‌توان شرایط رسیدن به راهبردهای مختلف را به صورت جدول ۸ نشان داد.

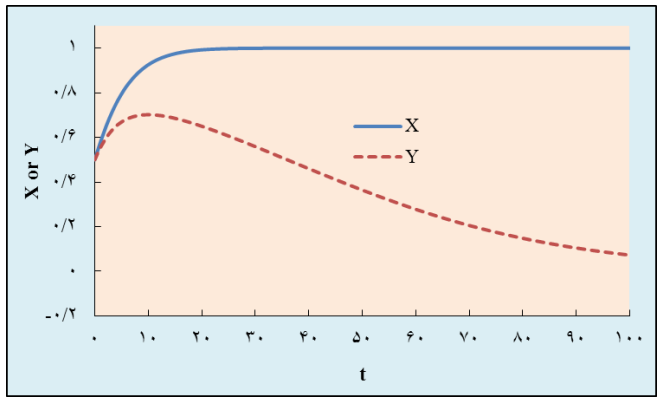
با توجه به نتایج موجود در جدول ۸، شرایط پایداری برای داده‌های مثال کاربردی، در نقطه‌ی تعادل (۱،۰) است. تصویر ۵، روند دستیابی به راهبرد پایدار تکاملی برای مثال کاربردی را نشان می‌دهد.



تصویر ۵: روند دستیابی به راهبرد (۰،۱)



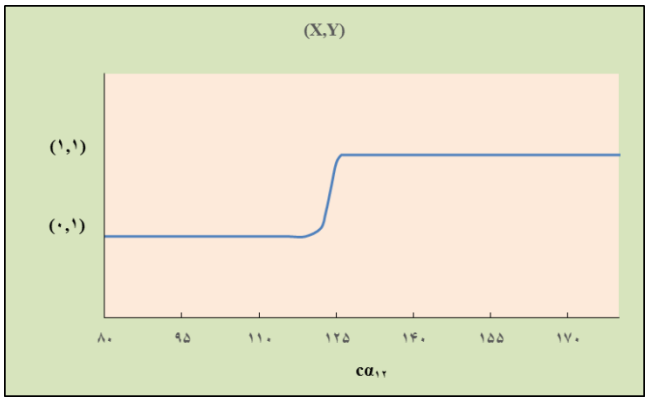
تصویر ۶: روند دستیابی به راهبرد (۱،۱)



تصویر ۷: روند دستیابی به راهبرد (۱،۰)

www.SID.ir

Archive of SID



تصویر ۸: تغییرات راهبردها نسبت به افزایش $ca_{۱۲}$

برای سایر حالت‌های دیگر پایداری سیستم نیز می‌توان تجزیه و تحلیل‌های مورد نیاز را انجام داد. برای نمونه با توجه به جدول ۸، راهبرد (۱، ۱) زمانی پایدار می‌شود که $u_۱ > u_۲$ و همزمان $U_۱ > ۰$ باشد. این موضوع، با توجه به شرایط موجود در مثال کاربردی، با در نظر گرفتن افزایش ۳۰ واحدی هزینه از بین بردن میزان وابستگی بیشینه ($ca_{۱۲}$=۱۲۵) مطابق تصویر ۶ است.

همچنین، در صورت افزایش ۵۰ واحدی هزینه ca۱۲ و کاهش هم‌زمان مطلوبیت مهاجم در استراتژی اول خود ($U_۱$=-۱۰)، راهبرد پایدار مطابق تصویر ۷ برابر با (۱،۰) می‌شود.

راهبردهای پایدار تکاملی را می‌توان با توجه به تغییرات میزان هزینه‌ی عدم وابستگی زیرسیستم‌ها، مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. این کار، با تغییرات مقدار ca_{Max} و ارزیابی مدل پیشنهادی انجام می‌شود که نتایج نهایی آن در تصویر ۸ نشان داده شده است.

همان‌طور که در تصویر ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش هزینه‌ی استقلال بیشترین وابستگی ($ca_{۱۲}$) نسبت به یک مقدار مبنا (۱۲۴/۲)، راهبرد پایدار تکاملی (۱، ۱) است، ولی با کاهش هزینه‌ی مذکور از مقدار مبنا، گرایش پایدار سیستم، استفاده از راهبرد (۰،۰) می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای مطالعات آتی

تعیین راهبردهای مطلوب، کارآمد و پایدار، یکی از موضوعات اساسی دوام و بقای سازمان‌ها است. این تحقیق با نگاه اطمینان‌پذیری و رویکرد تئوری بازی‌ها، یک الگوی مفید و کاربردی برای تعیین راهبردهای پایدار دفاع و حمله، با توجه به شرایط حاکم بر سیستم مورد نظر ارائه نمود که در آن، وابستگی عملکردی زیرسیستم‌ها و حالت‌های مختلف عملکرد کل سیستم، در نظر گرفته شد. در مدل پیشنهادی ایستای تحقیق، با توجه به احتمال حمله‌ی موفق، ضریب وابستگی زیرسیستم‌ها، حالت‌های مختلف عملکرد سیستم، ساختار قابلیت اطمینان و رویکرد تئوری بازی‌ها در پیدا نمودن نقطه‌ی تعادل، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین میزان سرمایه‌گذاری دفاع و حمله‌ی تمامی زیرسیستم‌ها، ارائه شد. سپس با استناد به نتایج به‌دست آمده از مدل ایستا و مفاهیم نظریه‌ی تکاملی بازی‌ها، مدل پیشنهادی این تحقیق، برای تعیین راهبردهای پایدار تکاملی، معرفی شد که در این روش، با توجه به اهداف بلندمدت، مدافع مبنی بر دو راهبرد «استقرار تجهیزات دفاع از زیرسیستم‌ها بر مبنای نتایج حاصل از مدل ایستا» و «از بین‌بردن بزرگ‌ترین میزان وابستگی بین زیرسیستم‌ها» و راهبردهای مورد نظر برای مهاجم شامل «حمله نمودن» و «عدم حمله»، ماتریس بهره‌وری دفاع - حمله، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در نهایت، مدل ارائه‌شده‌ی تحقیق، برای یک نمونه‌ی کاربردی، مورد استفاده قرار گرفت و نتایج نهایی مربوط به آن، مورد محاسبه و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تحلیل حساسیت مدل ارائه‌شده‌ی تحقیق در حالت ایستا، نشان‌دهنده‌ی این نتیجه‌ی منطقی بود که افزایش میزان وابستگی بین زیرسیستم‌ها، تأثیر مستقیمی در افزایش سرمایه‌گذاری دفاع از آن‌ها دارد. همچنین، تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی تحقیق در حالت پویا، نشان‌دهنده‌ی تأثیر میزان مطلوبیت‌ها و پارامترهای مدل پیشنهادی در تعیین راهبردهای پایدار تکاملی بود و بنابراین، تغییرات مقادیر آن‌ها موجب تغییر در راهبردهای پایدار شد.

به‌منظور انجام مطالعات بیشتر در زمینه‌ی موضوع تحقیق، می‌توان به ارائه‌ی الگوریتم‌های مفید و فراابتکاری برای بهینه‌یابی نتایج مورد نظر در مسائل پیچیده و بزرگ و در نظر گرفتن برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح، پرداخت. همچنین برای تحقیقات آتی، ارائه‌ی گزینه‌های مختلف برای راهبردهای پایدار دفاع و حمله و ارزیابی و تحلیل آن‌ها، پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت

1. Evolutionary Stable Strategy (ESS)

منابع

1. Yong. W, Gengzhong. F, Nengmin. W, Huigang. L. (2015). Game of information security investment: Impact of attack types and network vulnerability. *Expert Systems with Applications*, 42(1), 6132–6146.
2. Hausken. K. (2010). Defense and attack of complex and dependent systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 95(1), 29-42.
3. Hausken K., He F. (2016). On the Effectiveness of Se-

www.SID.ir

Archive of SID

defense game theory. *Chinese Journal of Computer,* 32(4), 44–53.

18. 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,* PP. 97–112.

19. Rahimdel. M. M, Amiri. A, & Karbasian. M. (2016). Optimal strategies for defense of sensitive systems with false targets and reliability approach. *Journal of Crisis Management*, 8(1), 87–96 (in Persian).

20. Fontanini. W, Ferreira.P.A.V. (2014). A game- theoretic approach for the web services scheduling problem. *Expert Systems with Applications,* 41(1), 4743–4751.

21. Zhongping. W, Lijun. M, Guangmin. W. (2014). Estimation of distribution algorithm for a class of nonlinear bilevel programming problems. *Information Sciences,* 256(1), 184–196.

22. Konak. A, Kulturel-Konak. S, & Lawrence. V. S. (2015). A game-theoretic genetic algorithm for the reliable server assignment problem under attacks. *Computers & Industrial Engineering*, 85(1), 73–85.

23. Zhide. C, Cheng. Q, & Yihui. Q, Li. X, & Wei. W. (2014). Dynamics stability in wireless sensor networks active defense model. *Journal of Computer and System Sciences,* 80(1), 1534–1548.

24. Zhenyuan. G, Xingfu. Z. (2015). Impact of discontinuous harvesting on fishery dynamics in a stock-effort fishing model. *Journal of Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation,* 20(1), 594–603.

curity Countermeasures for Critical Infrastructures. *Risk Analysis*, 89(1), 39-53.

4. Levitin G., Hausken K., Yuanshun D. (2014). Optimal defense with variable number of overarching and individual protections. *Reliability Engineering and System Safety*, 123(1), 81–90.

5. Chen Z., Du W.B., Cao X.B., Zhou X.L. (2015). Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack. *Chaos Solitons & Fractals*, 80(1), 7-12.

6. Wu B., Tang A., Wu J. (2016). Modeling cascading failures in interdependent infrastructures under terrorist attacks. *Reliability Engineering & System Safety,* 147(1), 1-8.

7. Li R.q., Sun S.w., Ma Y.l., Wang L., Xia C. y. (2015). Effect of clustering on attack vulnerability of interdependent scale-free networks. *Chaos Solitons & Fractals,* 80(1), 109-116.

8. Wang J., Wu Y., Li Y. (2015). Attack robustness of cascading load model in interdependent networks. *International Journal of Modern Physics,* 26(3), 78-91.

9. Zhang P., Cheng B., Zhao Z., Li D., Lu G., Wang Y., Xiao J. (2013). The robustness of interdependent transportation networks under targeted attack. *Epl*, 103(6), 115-127.

10. Jinhua M., Yanfeng L., Hong-Zhong H., Yu L., Xiao-Ling Z. (2013). Reliability analysis of multi-state system with common cause failure based on bayesian networks. *Maintenance and reliability*, 15(2), 169–175.

11. Huan Y., Jun Y., Huadong M. (2014). Reliability analysis of repairable multi-state system with common bus performance sharing. *Reliability engineering and system safety*, 132(1), 90–96.

12. Allen. B, Nowak. M.A. (2014). Games on Graphs: EMS Survey. *Mathematics Science*, 340(1), 113–151.

13. Changhyun. K, Terry. L. F, Reetabrata. M, Tao. Y & Baichun. F. (2009). Non-cooperative competition among revenue maximizing service providers with demand learning. *European Journal of Operational Research*, 197(1), 981–996.

14. Gangshu. C, Ned. K. (2009). An evolutionary game theoretic perspective on e-collaboration: The collaboration effort and media relativeness. *European Journal of Operational Research*, 194(1), 821–833.

15. Gilberto. A.S.S, Renato. A. K, & Rodrigo. C. C. (2012). A differential evolution approach for solving constrained min–max optimization problems" *Expert Systems with Applications*, 39(1), 13440–13450.

16. Yihui. Q, Zhide. C, & Li. X. (2010). Active defense model of wireless sensor networks based on evolutionary game theory. *6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing*, PP. 1–4.

17. Jiang. W, Fangbin. X. (2009). Evaluating network security and optimal active defense based on attack–

www.SID.ir