پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۱، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵

استراتژی‌های پایدار تکاملی دفاع و حمله با وجود اهداف مجازی و رویکرد قابلیت اطمینان

مهدی رحیمدل میبدی[۱]، امیرحسین امیری[۲*]، مهدی کرباسیان[۳]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۱۹

چکیده

یکی از مهم‌ترین اهداف سازمان‌ها، تعیین استراتژی‌های مطلوب و پایدار برای دفاع از سیستم‌های حساس و حیاتی است و برای رسیدن به این هدف باید با توجه به شرایط دفاع و حمله، راهبردهای کارآمد و استوار تعیین شوند. در این تحقیق با هدف بهبود قابلیت اطمینان، نخست الگویی برای مدلسازی استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله در حالت ایستا ارائه می‌شود که در آن، مدافع برای فریب‌دادن مهاجم، تعدادی اهداف مجازی ایجاد می‌کند. در این مدل ایستا، با توجه به احتمالات موجود در حمله موفق، قدرت تشخیص مهاجم در شناسایی اهداف مجازی و رویکرد تئوری بازی‌ها در پیدا کردن نقطه تعادل، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین میزان سرمایه‌گذاری دفاع و حمله تمامی زیرسیستم‌ها، پیشنهاد شده است. سپس با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل پیشنهادی ایستا، پویایی سیستم و مفاهیم نظریه تکاملی بازی‌ها، یک روش جدید و پویا برای تعیین استراتژی‌های پایدار دفاع و حمله معرفی می‌شود. با توجه به الگوی ارائه‌شده، استراتژی پایدار تکاملی در طول زمان برای مدافع مبنی بر استفاده و یا عدم استفاده از اهداف مجازی، از منظر مهاجم شامل حمله کردن و یا عدم حمله و همچنین از منظر سیستمی مورد بررسی قرار می‌گیرند. درنهایت، مدل ارائه شده تحقیق برای یک مثال عددی، استفاده شده و نتایج آن مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

---

* نویسنده مسئول مقاله: E-mail: amiri@shahed.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

واژه‌های کلیدی: **قابلیت اطمینان، دفاع، حمله، استراتژی پایدار، تئوری تکاملی بازی‌ها.**

۱- مقدمه

امروزه سازمان‌ها و سیستم‌های آنها در محیطی پر از چالش و تحول قرار گرفته‌اند. بنابراین شرط ادامه کار سازمان‌ها در چنین محیط پویایی، همگامی با تحولات محیط، اتخاذ تصمیم‌های درست و مدیریت به‌موقع این اتفاقات است. از طرف دیگر، پاسخگویی درست، مستلزم به‌کارگیری استراتژی‌های مناسب می‌باشد. در تعیین راهبردهای بهینه دفاع و حمله نیز که عوامل تأثیرگذار در مدلسازی استراتژی‌های مربوط به آن، در طول زمان، متغیر هستند، درنظر گرفتن پویایی شرایط حاکم بر مدل، لازم و ضروری است. در سیستم‌های دفاع و حمله، مدافع باید قابلیت اطمینان عملکرد زیرساختارها را که اجرای اهداف به صورت پایدار است، افزایش دهد. در مقابل، هدف مهاجم بیشینه کردن خسارت موردانتظار به سیستم است.

در سال‌های اخیر، نظریه تکاملی بازی‌ها به‌صورت روزافزون مورد توجه محققان قرار گرفته است. این توجه از سه حقیقت نشأت گرفته است: اول اینکه تکامل (به آن صورتی که نظریه تکاملی بازی‌ها با آن سر و کار دارد) به طور لزوم 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 نظریه تکاملی بازی‌ها را تشکیل می‌دهند، در بیشتر موارد، مناسب‌تر از فرضیه‌های زیربنایی نظریه کلاسیک بازی‌ها برای مدلسازی راهبردها هستند و در نهایت، این حقیقت که نظریه تکاملی بازی‌ها نظریه‌ای پویاست، مؤلفه مهمی است که نظریه کلاسیک بازی‌ها از آن بی‌بهره است. در مجموع، یک نظریه پویا بدون هیچ سؤالی کامل‌تر و در نتیجه ارجح‌تر از نظریه ایستا خواهد بود، اما دلایل کافی از شاخه‌های دیگر علم وجود دارد که نشان می‌دهد تا زمانی‌که در یک شاخه، نظریه ایستای آن کاملاً درک نشده است، تلاش برای ارائه نظریه‌ای پویا کاملاً بیهوده است.

یکی از ابزارهای مهم برای تعیین استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله، استفاده از

Archive of SID

www.SID.ir

مبانی و مفاهیم نظریه تکاملی بازی‌ها می‌باشد. این روش، رویکردی متفاوت برای تحلیل بازی‌هاست که در هر مرحله 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 ایده‌آل، جمعیت به وضعیتی پایدار همگرا خواهد شد که احتمالاً بهترین پاسخ برای هر بازیکنی را مشخص می‌کند.

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از مفاهیم و کاربردهای تئوری بازی‌ها برای تعیین استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله انجام شده است. ژین یانگ و همکاران، مدلی ارائه کردند که در آن، پس از تعیین تمامی استراتژی‌های دو طرف بازی و معیارهای سنجش آنها، هرکدام از استراتژی‌ها 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]. در مدل ارائه شده یانگ و همکاران، سرمایه‌گذاری بهینه امنیت اطلاعات با توجه به انواع مختلف حمله‌ها ارزیابی شده است [۲]. در مدل مورد تحقیق هاسکن، دو سیستم سری- موازی و موازی- سری (از منظر قابلیت اطمینان) در نظر گرفته شده است و استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله، با توجه به رویکرد قابلیت اطمینان، کاربردهای تئوری بازی‌ها، احتمال حمله موفقیت‌آمیز، ارزش زیرسیستم‌ها و محدویت بودجه، تعیین می‌شود [۳]. این محقق برای بهبود مدل ارائه شده خود، با توجه به نقاط هدف سیستم‌ها که دارای ساختارهایی مانند سری، موازی و پیچیده هستند، یک مدل براساس تئوری بازی‌ها ارائه کرده است که در آن مدافع در پی حداقل کردن خسارت وارد شده و مهاجم در پی حداکثر کردن 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، می‌باشد. در این مدل، میزان سرمایه‌گذاری بهینه دفاع و حمله، با توجه به آگاهی کامل مهاجم از اهداف مدافع، تعیین می‌شود[۴]. همچنین در تحقیق انجام شده لوتین و همکاران، دفاع بهینه از اجزای یکسان ولی با محافظ گروهی از آنها مدلسازی شده است که در این تحقیق، مهاجم برای حمله به

Archive of SID

www.SID.ir

اجزا باید نخست محافظ گروهی آنها را تخریب کند [۵].

در سال‌های اخیر بسیاری از محققان، از مفاهیم و کاربردهای تئوری تکاملی بازی‌ها برای مدلسازی تحقیقات خود استفاده کرده‌اند. ویبول پس از ارائه مفاهیم بنیادی تئوری تکاملی بازی‌ها، مزایا و کاربردهای این رویکرد را در مقایسه با نواقص رویکرد سنتی و ایستای تئوری بازی‌ها، بیان کرده است [۶]. استفاده از مفاهیم گراف تکاملی به عنوان رویکردی برای تحقیق در زمینه تأثیر ساختار جامعه در مدلسازی تئوری تکاملی و پویای بازی‌ها مورد توجه بسیاری از محققان بوده است[۷ ؛ ۸]. همچنین برخی از محققان، برای ارزیابی بازی‌ها با جامعه آماری محدود، از مدل‌های تصادفی پویای تکاملی استفاده کرده‌اند[۹؛ ۱۰]. هلمن و استادیگ، سیر تکاملی شبکه‌های اجتماعی و اقتصادی را با استناد به مفاهیم تئوری تکاملی بازی‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند[۱۱]. چانگیون و همکاران، پویا بودن تقاضا با پیوستگی زمانی را براساس یک رویکرد تئوری تکاملی بازی توصیف نمودند [۱۲]. گانگشو و ند، از تئوری تکاملی بازی‌ها برای پیش‌بینی یک بازی دونفره همکارانه و با اطلاعات کامل و ناقص، استفاده کردند [۱۳]. ژیو و همکاران با توجه به تراکنش‌های پی در پی و متعدد در مسائل زنجیره دوسطحی زنجیره تأمین، با استناد به رویکرد تکاملی تئوری بازی‌ها، یک مدل تصمیم‌گیری پویا برای ارزیابی رفتار مسئله مورد نظر در دوره‌های زمانی آینده ارائه کردند [۱۴]. گیلبرتو و همکاران با استناد به مفاهیم تئوری تکاملی بازی‌ها، دو مسئله همزمان و تلفیقی بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی را با توجه به محدودیت‌های موجود در مسئله بهینه‌سازی نمودند [۱۵]. کرامر و همکاران نیز با استفاده از دو تکنیک تئوری تکاملی بازی‌های همکارانه و الگوریتم ژنتیک، طراحی مسیرهای حمل‌ونقل کشتی را بهینه نمودند [۱۶]. ویهوی و همکاران، با توجه به مفاهیم بنیادی تئوری تکامی بازی‌ها، یک مدل دفاع از شبکه ارتباطی بی‌سیم ارائه کردند[۱۷]. ژوانگ وی و همکاران، با استفاده از رویکرد تکاملی بازی‌ها، مدل‌هایی برای ارزیابی امنیت سیستم‌های اطلاعاتی شبکه و عملکرد پدافند دفاعی، ارائه نمودند [۱۸].

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

Archive of SID

www.SID.ir

استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله مبتنی بر تئوری تکاملی بازی‌ها، ارائه می‌کند. یکی از جنبه‌های نوآوری در مدل پیشنهادی و پویای این تحقیق، تعیین مطلوبیت طرفین مدافع و مهاجم از منظر قابلیت اطمینان کل سیستم موردنظر و زیرمجموعه‌های مربوط به آن می‌باشد. همچنین در تحقیقات گذشته، استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله با استفاده از قوانین تئوری بازی‌ها در محیط ایستا تعیین شده است، اما 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. به‌طور کلی در مدل پیشنهادی این تحقیق، نخست پارامترهای مربوط به مطلوبیت‌های مدافع و مهاجم که شامل احتمالات حمله موفق، ارزش سیستم و زیرسیستم‌ها، ساختار قابلیت اطمینان سیستم، احتمال تشخیص صحیح مهاجم از مجازی‌بودن زیرسیستم‌ها و محدودیت‌های هزینه، حجم و وزن تجهیزات دفاع و حمله، بوده و از حل مدل ایستای مربوطه، به‌دست آمده‌اند، دریافت می‌شوند. سپس استراتژی‌های مختلف مدافع و مهاجم و مطلوبیت‌های مربوط به آنها، ارزیابی می‌شوند. درنهایت با استفاده از مفاهیم تئوری تکاملی بازی‌ها و مدلسازی مربوط به آن، استراتژی بهینه و پایدار، تعیین شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در جدول ۱ نوآوری‌های موجود در روش پیشنهادی این تحقیق در مقایسه با سایر تحقیقات انجام شده در زمینه موضوع تحقیق بیان شده است (موضوعاتی که دارای نوآوری کامل می‌باشند، با زمینه تیره نشان داده شده است).

در بخش دوّم این مقاله، پس از معرفی مسئله مورد تحقیق و مفروضات آن، چگونگی مدلسازی استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله در شرایط ایستا بیان شده است. در بخش سوم، روش پیشنهادی این تحقیق برای تعیین استراتژی پایدار دفاع و حمله با رویکرد تئوری 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، آنالیز حسّاسیت روی پارامترهای مدل پیشنهادی انجام شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و درنهایت در بخش ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای مطالعات آتی مطرح می‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱ جنبه‌های نوآوری روش پیشنهادی تحقیق

گروه بندی موضوعات مرتبط با حوزه مورد تحقیق			شماره مرجع					مقاله حاضر
			[۱]	[۲]	[۳]	[۴]	[۵]	
تعیین استراتژی بهینه دفاع و حمله	نوع استراتژی	محدود و گسسته	*					
		نامحدود و پیوسته		*	*	*	*	*
	ماهیت استراتژی	ایستا	*	*	*	*	*	*
		پویا						*
	وجود محدودیت‌ها	مدافع						*
		مهاجم						*
	وضعیت اهداف	واقعی	*	*	*	*	*	*
		مجازی						*
	تشخیص مهاجم	قطعی	*	*	*	*	*	
		احتمالی						*
	تکنیک مورد استفاده	مشتق مرتبه اول			*	*	*	
		برنامه‌ریزی غیرخطی						*
		معادلات زمانی دیفرانسیل						*

۲- استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله در شرایط ایستا

مسئله مورد نظر این تحقیق، تعیین استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله یک سامانه حسّاس می‌باشد که در این سامانه، s سیستم با ساختار عملکردی سری وجود دارد که هر سیستم شامل n_i زیرمجموعه واقعی با ساختار عملکردی موازی است. بنابراین برای عملکرد سیستم iام، باید حداقل یک زیرسیستم به‌طور مطلوب فعالیت نماید. مدافع برای فریب‌دادن مهاجم، در هر سیستم تعدادی هدف مجازی (غیر واقعی) ایجاد می‌کند تا با این کار بتواند، احتمال حمله موفقیت‌آمیز به اهداف واقعی را کاهش دهد. لیکن مهاجم به علت عدم آگاهی، واقعی بودن این زیرسیستم‌ها را با احتمال τ_{ij} تشخیص می‌دهد که ij، نشان‌دهنده هدف jام از زیرسیستم iام است. بنابراین هر سیستم در مجموع، شامل N_i زیرسیستم واقعی و مجازی می‌باشد. مدافع برای حفاظت از زیرسیستم‌ها، سرمایه‌گذاری‌های متفاوت f_{ij}را با هزینه واحد c_{ij} انجام می‌دهد و مهاجم نیز به‌طور مشابه برای حمله به هریک از زیرسیستم‌ها، F_{ij}را با هزینه واحد C_{ij} سرمایه‌گذاری

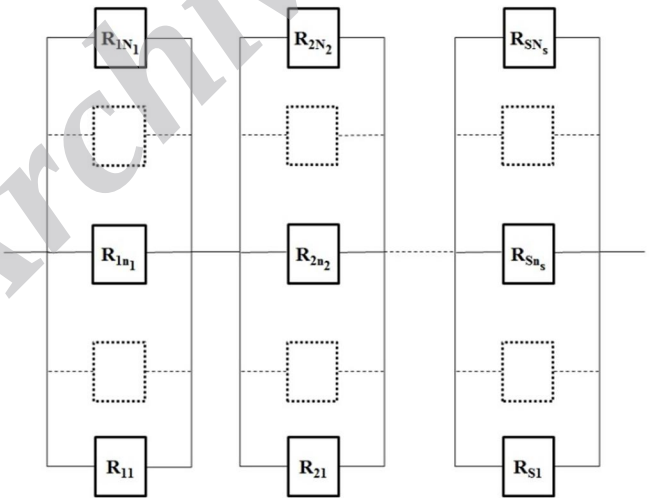
Archive of SID

www.SID.ir

می‌کند، همچنین از نظر مدافع، ارزش هر هدف ij برابر با v_{ij} و ارزش کل سیستم برابر با v می‌باشد و به‌طور مشابه برای مهاجم، هر هدف ij، ارزشی برابر با V_{ij} و کل سیستم، ارزشی برابر با V دارد. قابلیت اطمینان هر هدف بستگی به میزان سرمایه‌گذاری برای محافظت از اهداف از طرف مدافع و میزان سرمایه‌گذاری برای حمله‌کردن از طرف مهاجم دارد و در نتیجه، تعیین‌کننده موفقیت حمله و دفاع می‌باشد. یک روش ساده برای تعریف احتمال حمله ناموفق روی هدف ij، استفاده از نسبت ارائه شده توسط آقای تالوک [۱۹] است که به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

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

که در آن m_{ij} میزان شدت رقابت بر سر هدف ij و یک مشخصه رقابت با توجه به نوع هدف ij است. با توجه به رویکرد تئوری بازی‌ها، مدافع و مهاجم در یک لحظه، استراتژی‌های خود را تعیین می‌کنند و بنابراین زمان تصمیم‌گیری، هیچ اطلاعی راجع به انتخاب و تصمیم رقیب خود ندارند. شکل ۱ ساختار قابلیت اطمینان مسئله موردنظر را نشان می‌دهد.



شکل ۱ ساختار قابلیت اطمینان سامانه سری – موازی

Archive of SID

www.SID.ir

برای ارزیابی نقطه تعادل و استراتژی بهینه دفاع و حمله، نخست باید مطلوبیت مدافع و مهاجم، تعیین شود. با درنظرگرفتن تابع احتمال حمله ناموفق (p_{ij})، مدافع در پی افزایش این احتمال برای کل سامانه و هرکدام از زیرمجموعه‌های آن می‌باشد. همچنین در صورت وجود محدودیت بودجه، مطلوبیت مدافع، کمینه‌کردن هدف دیگر یعنی هزینه مورد نیاز تجهیزات دفاع نیز می‌باشد. بنابراین می‌توان مطلوبیت موردنظر مدافع را به صورت رابطه (۲) در نظر گرفت. از سوی دیگر، مهاجم متمایل به افزایش احتمال حمله موفق و خرابی کل سامانه و هرکدام از زیرمجموعه‌های آن است. همچنین در صورت وجود محدودیت هزینه، مطلوبیت مهاجم، کمینه‌نمودن هزینه کل تجهیزات نیز می‌باشد. بنابراین می‌توان مطلوبیت موردنظر مهاجم را به صورت رابطه (۳) در نظر گرفت.

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

$$Max:\ U = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\tau_{ij}V_{ij} + V\left(1-\prod_{i=1}^{s}\left(1-\prod_{j=1}^{N_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}+(1-\tau_{ij})f_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\right)\right) - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i}C_{ij}F_{ij}\ . \qquad (۳)$$

برای به دست آوردن راه‌حل از مفاهیم بنیادی نقطه تعادل نش [۲۰] در تئوری بازی‌ها استفاده می‌شود که در آن هیچ‌یک از طرفین بازی به صورت یک‌طرفه عمل نمی‌کنند بلکه با توجه به منطقی‌بودن بازیکنان، مناسب‌ترین پاسخ تعیین می‌شود. بنابراین برای تعیین نقطه تعادل هر هدف، باید مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی با روابط (۴) تا (۸) 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.

$$Min: \lambda_{1,1}\left(c_{max} - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i}c_{ij}f_{ij}\right) + \lambda_{2,1}\left(C_{max} - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i}\tau_{ij}C_{ij}F_{ij}\right). \qquad (۴)$$

s.t. :

Archive of SID

www.SID.ir

$$v_{kl}\frac{m_{kl}F_{kl}{}^{m_{kl}}f_{kl}^{(m_{kl}-1)}}{(f_{kl}{}^{m_{kl}}+F_{kl}^{m_{kl}})^2}+\ v\ \frac{m_{kh}F_{kh}{}^{m_{kh}}f_{ij}^{(m_{kh}-1)}}{(f_{kh}{}^{m_{kh}}+F_{kh}^{m_{kh}})^2}Q_aQ_b-\left(1+\lambda_{1,1}\right)c_{kl}=0\ ,\ k=1,\dots,s\ \ ,\quad h=1,\dots.n_i\ \ ,\ \ l=1,\dots,N_i\ . \tag{۵}$$

$$\tau_{kl}(v_{kl}\frac{m_{kl}f_{kl}{}^{m_{kl}}F_{kl}^{(m_{kl}-1)}}{(f_{kl}{}^{m_{kl}}+F_{kl}^{m_{kl}})^2}+\ V\frac{m_{kl}f_{kl}{}^{m_{kl}}F_{kl}^{(m_{kl}-1)}}{(f_{kl}{}^{m_{kl}}+F_{kl}^{m_{kl}})^2}Q_cQ_d)-\left(1+\lambda_{2,1}\right)C_{kl}=0\ ,\ k=1,\dots,s\ \ ,\ \ l=1,\dots,N_i\ . \tag{۶}$$

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i}c_{ij}f_{ij}\ \leq\ c_{max}\ . \tag{۷}$$

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i}C_{ij}F_{ij}\leq C_{max}\ . \tag{۸}$$

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

$$Q_c=\prod_{\substack{i=k\\ j\neq l}}^{N_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}+(1-\tau_{kl})f_{ij}{}^{m_{ij}}}{f_{ij}{}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\ \ ,\ \ Q_d=\prod_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{s}(1-\prod_{j=1}^{N_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}+(1-\tau_{kl})f_{ij}{}^{m_{ij}}}{f_{ij}{}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}).$$

در روابط مذکور، c_{max} و C_{max} به‌ترتیب، بیشینه هزینه موردنظر مدافع و مهاجم است. نتیجه نهایی برنامه‌ریزی غیرخطی مذکور، نقطه تعادل در حالت ایستا را نشان می‌دهد و تعیین‌کننده میزان سرمایه‌گذاری بهینه دفاع و حمله برای هرکدام از زیرمجموعه‌ها می‌باشد. برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مذکور، در ابعاد کوچک مسئله، می‌توان از نرم‌افزارهای کاربردی در این زمینه مانند Lingo و Gams استفاده کرد. ولی درصورت بزرگ‌شدن ابعاد مسئله، باید با استفاده از روش‌های فراابتکاری، الگوریتم بهینه‌یابی مسئله را طراحی و اجرا کرد [۲۲ ؛ ۲۳].

۳- تعیین استراتژی پایدار دفاع و حمله با رویکرد تئوری تکاملی بازی‌ها

نتایج نهایی به‌دست‌آمده از بخش قبل، میزان سرمایه‌گذاری‌های بهینه دفاع و حمله در شرایط ایستا و لحظه تصمیم‌گیری در مبدأ زمان است. لیکن با گذر زمان و

Archive of SID

www.SID.ir

درنظرگرفتن پویایی و شرایط حاکم بر مدل، تصمیم‌گیری بازیکنان (مدافع و مهاجم) تغییر می‌کند. در چنین شرایطی باید تعیین استراتژی برتر را با توجه به معیار پایداری زمانی، مدلسازی کرد. در مسئله مورد نظر این تحقیق، دو راهبرد انتخابی برای مدافع و مهاجم وجود دارد. راهبردهای موردنظر مدافع، استفاده و عدم استفاده از اهداف مجازی است و مهاجم، حمله و عدم حمله را به عنوان راهبردهای خود انتخاب کرده است. با توجه به مطلوبیت‌های موردنظر مدافع و مهاجم، ماتریس بهره‌وری دفاع-حمله به‌صورت جدول ۲ تعیین می‌شود.

جدول ۲ ماتریس دفاع- حمله

مهاجم / مدافع	حمله *(A)*	عدم حمله *(NA)*
استفاده از اهداف مجازی *(F)*	$(u\,,U)$	$(\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i} v_{ij} + v - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i} c_{ij}f_{ij}\ ,0)$
عدم استفاده از اهداف مجازی *(NF)*	$(\bar{u}\,,\bar{U})$	$(\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} v_{ij} + v - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} c_{ij}f_{ij}\ ,0)$

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} \frac{f_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}} v_{ij} + v\prod_{i=1}^{s}\left(1-\prod_{j=1}^{n_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\right) - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} c_{ij}f_{ij}$$

$$\bar{U} = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} \frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}} V_{ij} + V\left(1-\prod_{i=1}^{s}\left(1-\prod_{j=1}^{n_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\right)\right) - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}F_{ij}$$

با توجه به مفاهیم تئوری تکاملی بازی‌ها، بهبود مداوم تدابیر گذشته بازیکنان، منجر به شکل‌گیری «استراتژی پایدار تکاملی»[۲] می‌شود. در مسئله مورد نظر این تحقیق، اگر $x(0 \le x \le 1)$ نشان‌دهنده نسبتی از تعداد مدافع‌هایی باشد که استراتژی «دفاع از سامانه با استفاده از اهداف مجازی» را انتخاب کرده‌اند، بنابراین نسبت مدافع‌هایی که استراتژی «دفاع از سامانه بدون استفاده از اهداف مجازی» را

Archive of SID

www.SID.ir

برگزیده‌اند *(1-x)* است. همچنین اگر $y(0 \le y \le 1)$ نشان‌دهنده نسبتی از تعداد مهاجم‌هایی باشد که استراتژی «حمله به سامانه» را انتخاب نموده‌اند، بنابراین نسبت مهاجم‌هایی که استراتژی «عدم حمله به سامانه» را برگزیده‌اند *(1-y)* است. با این مفروضات می‌توان استراتژی پایدار تکاملی را برای مدافع، مهاجم و سیستم تعیین کرد.

۳-۱- استراتژی پایدار تکاملی مدافع

برای تعیین استراتژی پایدار تکاملی مدافع، نخست ارزش موردانتظار مدافع از انتخاب هرکدام از استراتژی‌های موجود، مطابق روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$E(P_F) = Y(u) + (1-Y)\Big(\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i} v_{ij} + v - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i} c_{ij} f_{ij} \Big) . \quad (۹)$$

$$E(P_{NF}) = Y(\bar{u}) + (1-Y)\Big(\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} v_{ij} + v - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} c_{ij} f_{ij} \Big) . \quad (۱۰)$$

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

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

معادله پویای مدافع در واحد زمانی، برای ارزیابی استراتژی پایدار تکاملی، با توجه به رابطه (۱۲) تعیین می‌شود [۲۴].

$$\begin{aligned} &\frac{dX}{dt} = X[E(P_F) - E(F)] = \\ &X(1-X)\Bigg(\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=(n_i+1)}^{N_i} v_{ij} - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=(n_i+1)}^{N_i} c_{ij} f_{ij} - \\ &Y \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=(n_i+1)}^{N_i} \frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}} v_{ij} \Bigg) = X(1-X)(A_X - YB_X). \end{aligned} \quad (۱۲)$$

Archive of SID

www.SID.ir

۳-۲- استراتژی پایدار تکاملی مهاجم

ارزش مورد انتظار مهاجم از انتخاب هرکدام از استراتژی‌های موجود و متوسط بهره‌وری موردانتظار مهاجم، به‌ترتیب مطابق روابط (۱۳) تا (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$E(P_A) = X(U) + (1 - X)(\bar{U}) \ . \tag{۱۳}$$

$$E(P_{NA}) = X(0) + (1 - X)(0) = 0 \, . \tag{۱۴}$$

$$E(A) = Y\big(E(P_A)\big) + (1 - Y)\big(E(P_{NA})\big) \tag{۱۵}$$

بنابراین معادله پویای مهاجم در واحد زمانی برای ارزیابی استراتژی پایدار تکاملی با توجه به رابطه (۱۶) تعیین می‌شود.

$$\frac{dY}{dt} = Y[E(P_A) - E(A)] = Y(1 - Y)(A_Y - XB_Y). \tag{۱۶}$$

$$A_Y = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} \frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}} V_{ij} + V\left(1 - \prod_{i=1}^{s}\left(1 - \prod_{j=1}^{n_i} \frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}}\right)\right) - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}F_{ij} - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} O_{ij}F_{ij}$$

$$B_Y = V\left(\prod_{i=1}^{s}\left(1 - \prod_{j=1}^{n_i} \frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}}\right) - \prod_{i=1}^{s}\left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} \frac{F_{ij}^{m_{ij}} + (1-\tau_{ij})(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}}\right)\right) - \left(\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=(n_i+1)}^{N_i} \frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{(\alpha_{ij}f_{ij})^{m_{ij}} + F_{ij}^{m_{ij}}} \tau_{ij}V_{ij}\right)$$

۳-۳- استراتژی پایدار تکاملی سیستم

برای ارزیابی استراتژی پایدار تکاملی کل سیستم، با توجه به معادلات پویای زمانی مدافع و مهاجم، نخست ماتریس ژاکوبین مطابق رابطه (۱۷) تعیین می‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir

$$J = \begin{bmatrix} (1-2X)(A_X - YB_X) & X(1-X)(-YB_X) \\ Y(1-Y)(-XB_Y) & (1-2Y)(A_Y - XB_Y) \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

با توجه به شرط لازم و کافی برای استراتژی پایدار تکاملی، مبنی بر اینکه می‌باید در ماتریس ژاکوبین، دترمینان (*det*)، مثبت بوده ولی مجموع عناصر قطر اصلی ماتریس (*trace*)، منفی باشد، تجزیه و تحلیل پایداری نقاط تعادل سیستم انجام می‌شود [۲۵]. جدول ۳ دترمینان و مجموع درایه‌ها و جدول ۴ تجزیه و تحلیل پایداری برای تمامی نقاط تعادل سیستم را نشان می‌دهد. بنابراین پس از محاسبه ضرایب معادلات مربوط به استراتژی‌های پایدار تکاملی (A_X, B_X, A_Y, B_Y) که از نتایج نهایی استراتژی‌های دفاع و حمله در حالت ایستا، به‌دست می‌آیند، می‌توان استراتژی پایدار سیستم را ارزیابی و تحلیل کرد.

جدول ۳ دترمینان و مجموع درایه‌های ماتریس ژاکوبین

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

جدول ۴ تجزیه و تحلیل پایداری نقاط تعادل سیستم

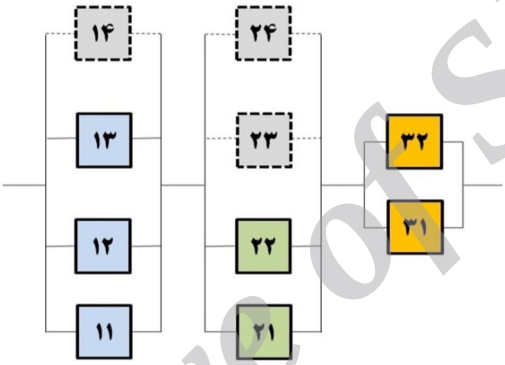
ماهیت نقطه تعادل	علامت trace(J)	علامت det(J)
ناپایدار	+	+
پایدار	-	+
نقطه عطف	+	-
نقطه عطف	-	-

Archive of SID

www.SID.ir

۴- مثال کاربردی

فرض کنید هدف مسئله مورد نظر، تعیین استراتژی پایدار تکاملی دفاع و حمله برای سامانه‌ای متشکل از سه سیستم تأمین‌کننده آب، برق و گاز یک منطقه است که به‌ترتیب، شامل ۳، ۲ و ۲ زیرسیستم موازی هستند. همچنین تعداد اهداف مجازی برای سیستم‌های مذکور به‌ترتیب برابر با ۱، ۲ و صفر می‌باشند. شکل ۲ ساختار قابلیت اطمینان این سامانه را نشان می‌دهد (اهداف مجازی با خطوط نقطه‌چین مشخص شده‌اند).



شکل ۲ ساختار قابلیت اطمینان مثال کاربردی

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

جدول ۵ اطلاعات اولیه مطالعه موردی

ij	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۳۱	۳۲
c_{ij}	۱/۲	۱/۴	۱/۱	۰/۲	۱/۴	۱/۲	۰/۲	۰/۲	۱/۵	۱/۷
C_{ij}	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۱	۱	۱	۱	۱/۳	۱/۳
v_{ij}	۱۰	۸	۱۱	۲	۱۲	۱۲	۲	۲	۱۱	۱۲
V_{ij}	۱۰	۷	۱۰	۴	۱۲	۱۲	۳	۴	۱۱	۱۲
m_{ij}	۱/۳	۲	۱/۳	۱	۲	۱/۵	۱	۱	۲	۱/۳
τ_{ij}	۱	۰/۸	۰/۹	۰/۶	۱	۱	۰/۲	۰/۸	۱	۱
v=۱۸۰ , V=۱۰۰ , c_{max}=۱۳۰ , C_{max}=۸۰										

Archive of SID

www.SID.ir

به استناد مدل برنامه‌ریزی غیرخطی روش، نقاط تعادل ایستای سرمایه‌گذاری دفاع و حمله برای هرکدام از زیرسیستم‌ها به صورت جدول ۶ تعیین می‌شود.

جدول ۶ مقادیر بهینه سرمایه‌گذاری دفاع و حمله مثال کاربردی

متغیرهای حمله		متغیرهای دفاع	
۱۱/۷۴۱	F_{11}	۱۰/۶۷۴	f_{11}
۱۴/۳۳۱	F_{12}	۱۳/۲۱۵	f_{12}
۱۱/۸۸۷	F_{13}	۱۳/۱۱۵	f_{13}
۴/۵۹۴	F_{14}	۱/۹۹۵	f_{14}
۹/۰۱۱	F_{21}	۱۳/۶۱۳	f_{21}
۶/۷۴۵	F_{22}	۱۱/۹۶۹	f_{22}
۱/۵۲۷	F_{23}	۲/۱۵۸	f_{23}
۲/۲۲۱	F_{24}	۲/۲۲۳	f_{24}
۱۵/۷۸۸	F_{31}	۲۰/۸۸۲	f_{31}
۹/۴۶۸	F_{32}	۱۰/۷۳۲	f_{32}

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

$$A_X = ۴/۷۲۵ \qquad B_X = ۳/۲۵۷ \qquad A_Y = -۱۴/۰۲ \qquad B_Y = ۲/۰۶۲$$

با توجه به تجزیه و تحلیل پایداری نقاط تعادل سیستم (۰،۱) به عنوان استراتژی پایدار تکاملی سیستم، تعیین می‌شوند.

۵- تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی

با توجه به اطلاعات اولیه مثال کاربردی و درنظرگرفتن روابط (۱۲) و (۱۶) می‌توان تغییرات استراتژی‌های موردنظر مدافع و مهاجم را در طول زمان، تجزیه و تحلیل کرد. در این تحقیق، به استناد معادلات دیفرانسیل مربوطه و استفاده از نرم‌افزار کاربردی Matlab، آهنگ تغییرات استراتژی‌های موردنظر مدافع و مهاجم در طول

Archive of SID

www.SID.ir

زمان بررسی شده است. ذکر این نکته لازم است که برای یکسان‌سازی مقادیر پارامترها، تمامی کمیّت‌ها در بازه [۱،۱−] استاندارد شده‌اند. برای بررسی رفتارهای مختلف سیستم موردنظر در رسیدن به استراتژی‌های پایدار تکاملی، با توجه به جدول‌های ۳ و ۴، می‌توان شرایط رسیدن به استراتژی‌های مختلف را به‌صورت جدول ۷ نشان داد (ضریب B_X همواره مثبت است).

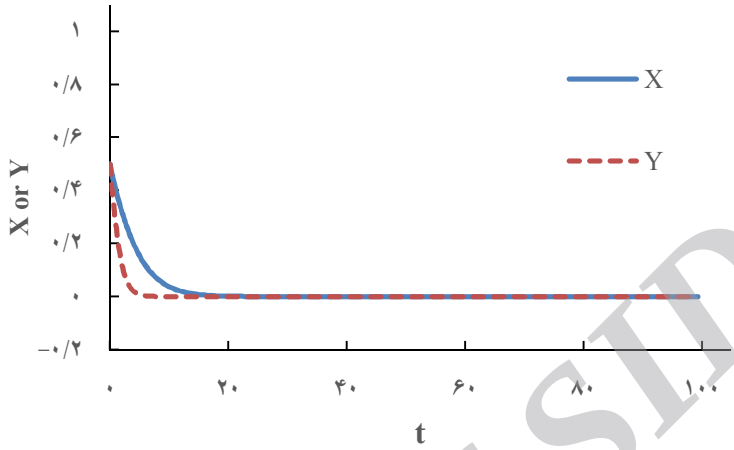
جدول ۷ شرایط رسیدن به استراتژی‌های مختلف پایدار تکاملی

شرایط پایداری	نقطه تعادل (X,Y)
$A_X < 0 \ , \ A_Y < 0$	(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)

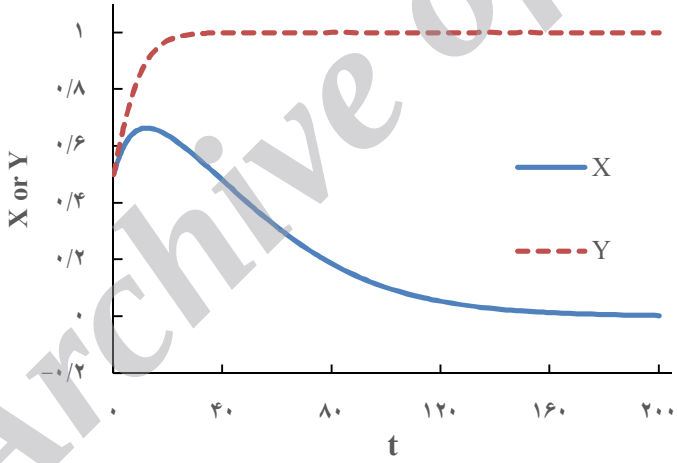
با توجه به نتایج موجود در جدول ۷، نقطه تعادل (۰،۰) تنها در صورتی استراتژی پایدار تکاملی است که نخست میزان کل هزینه‌های دفاع از اهداف مجازی، بیشتر از مجموع ارزش تمامی این اهداف برای مدافع باشد، دوم میزان کل هزینه‌های حمله به اهداف واقعی، بیشتر از مجموع ارزش احتمالی تخریب سیستم و تمامی اهداف واقعی برای مهاجم باشد. برای بررسی این موضوع، اگر در مثال کاربردی موردنظر، $A_X = -۴/۷۲۵$ باشد، روند دستیابی به استراتژی پایدار تکاملی به صورت شکل ۳ است. همچنین در صورتی که مجموع کل هزینه‌های دفاع از اهداف مجازی و ارزش احتمالی تخریب این اهداف، بیشتر از مجموع ارزش تمامی این اهداف برای مدافع باشد و همزمان میزان کل هزینه‌های حمله به اهداف واقعی، کمتر از مجموع ارزش احتمالی تخریب سیستم و تمامی اهداف واقعی برای مهاجم باشد، نقطه تعادل پایدار برای سیستم، (۱،۰) است. برای بررسی این موضوع، اگر در مثال کاربردی موردنظر، $B_X = ۵/۲۵۷$ و $A_Y = ۴/۰۲$ باشد، روند دستیابی به استراتژی پایدار تکاملی به صورت شکل ۴ است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳ روند دستیابی به استراتژی (۰،۰)



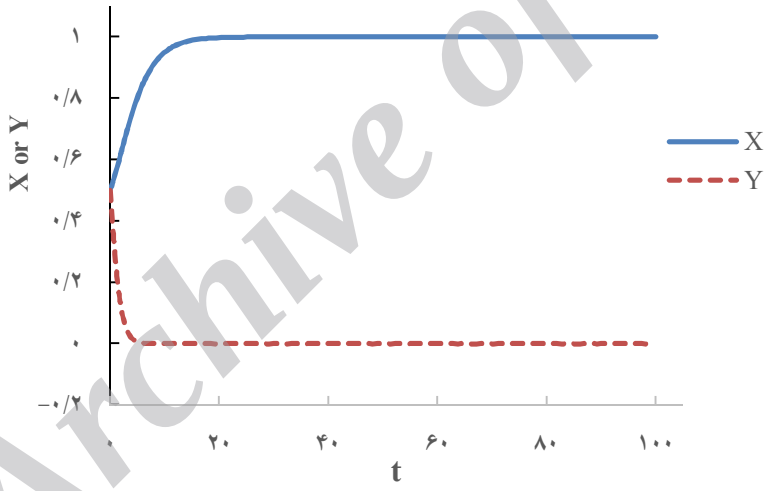
شکل ۴ روند دستیابی به استراتژی (۰،۱)

استراتژی (۱،۰) زمانی پایدار می‌شود که مجموع کل هزینه‌های حمله به اهداف واقعی و ارزش احتمالی تخریب تمامی اهداف، بیشتر از مجموع ارزش اهداف واقعی برای مهاجم باشد و همزمان میزان کل هزینه‌های دفاع از اهداف مجازی،

Archive of SID

www.SID.ir

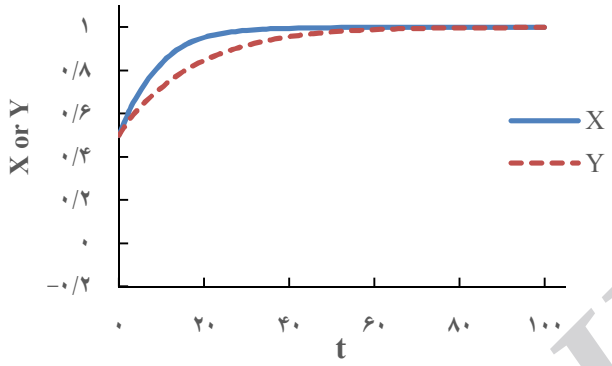
کمتر از مجموع ارزش تمامی این اهداف برای مدافع باشد. در این‌صورت، نقطه تعادل پایدار برای سیستم، استفاده مدافع از اهداف مجازی و عدم حمله مهاجم می‌شود. این موضوع، با توجه به شرایط موجود در مثال، مطابق شکل ۵ است. همچنین، نقطه تعادل (۱،۱) تنها در صورتی استراتژی پایدار تکاملی است که اولاً مجموع کل هزینه‌های دفاع از اهداف مجازی و ارزش احتمالی تخریب این اهداف، کمتر از مجموع ارزش تمامی این اهداف برای مدافع باشد،دوم مجموع کل هزینه‌های حمله به اهداف واقعی و ارزش احتمالی تخریب تمامی اهداف، کمتر از مجموع ارزش اهداف واقعی برای مهاجم باشد. برای بررسی این موضوع، اگر در مثال کاربردی موردنظر، A_Y =-۳/۰۲ باشد، روند دستیابی به استراتژی پایدار تکاملی به‌صورت شکل ۶ است.



شکل ۵ روند دستیابی به استراتژی (۱،۰)

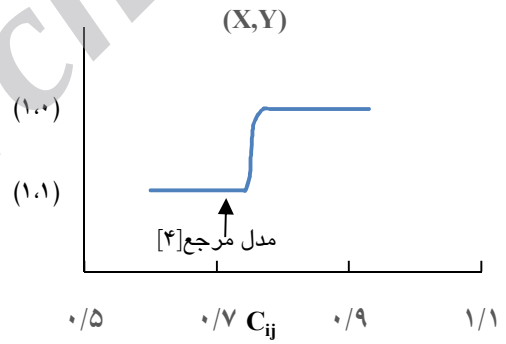
Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۶ روند دستیابی به استراتژی (۱،۱)

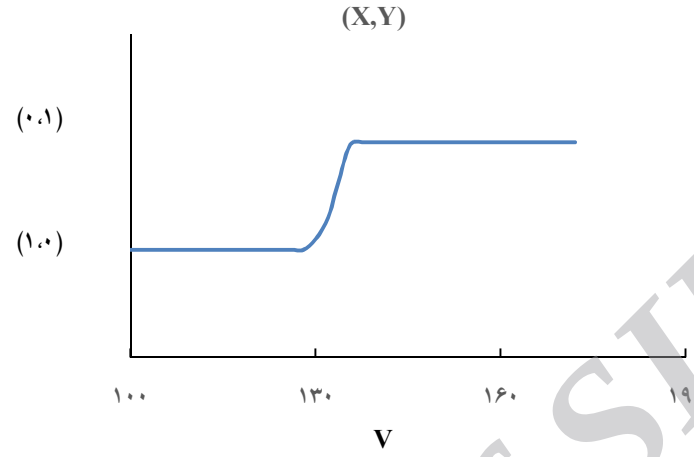
مدل پیشنهادی تحقیق را می‌توان با تغییرات مقادیر پارامترهای اصلی آن، مورد تجزیه و تحلیل قرار داد، برای مثال، روند تغییرات استراتژی پایدار تکاملی، نسبت به تغییرات هزینه‌های واحد حمله (C_{ij}) و ارزش سیستم از منظر مهاجم (V) به‌ترتیب، مطابق شکل‌های ۷ و ۸ است و نتایج مربوطه با مدل آقای هاسکن [۴] مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین در صورت معادل‌بودن پارامترها با مقادیر نزدیک به مقدار مبنا، ناپایداری در استراتژی موردنظر سیستم وجود خواهد داشت.



شکل ۷ تغییرات استراتژی‌ها نسبت به Cij

Archive of SID

www.SID.ir



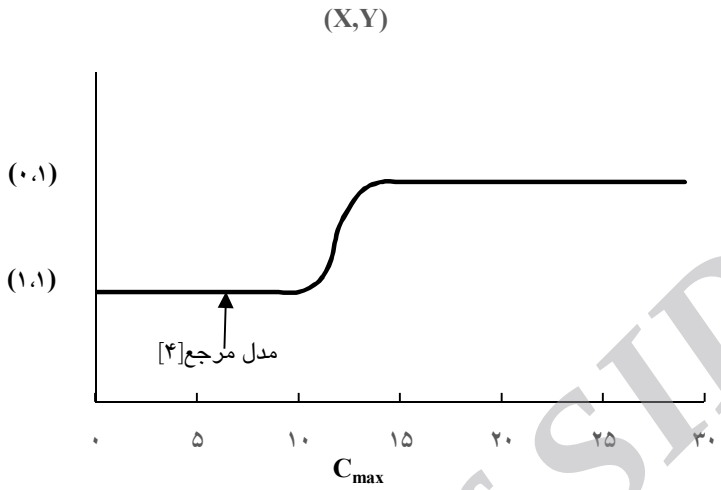
شکل ۸ تغییرات استراتژی‌ها نسبت به V

شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش هزینه‌های حمله نسبت به یک مقدار مبنا (۰/۷۵۳۵)، استراتژی پایدار تکاملی (۱،۰) بوده است ولی با کاهش هزینه‌های واحد حمله از مقدار مبنا، گرایش پایدار سیستم، استفاده از اهداف مجازی توسط مدافع و حمله‌نمودن مهاجم می‌شود. همچنین با توجه به نمودار شکل ۸، با افزایش ارزش سیستم از منظر مهاجم نسبت به یک مقدار مبنا (۱۳۲)، استراتژی پایدار تکاملی (۱،۰) به (۰،۱) تغییر می‌کند. در این صورت، گرایش پایدار سیستم، استفاده نکردن از اهداف مجازی به‌وسیله مدافع و حمله‌کردن مهاجم می‌شود.

درنهایت برای بررسی تغییرات پارامترهای مربوط به محدودیت‌ها، با در نظرگرفتن برابری ارزش سیستم برای مدافع و مهاجم، تغییرات بیشینه هزینه‌های حمله ($Cmax$)، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد (شکل ۹) و بیانگر این موضوع است که با افزایش سقف هزینه‌های حمله از یک مقدار مبنا (۱۱/۶)، استراتژی پایدار تکاملی، (۰،۱) است ولی با کاهش بیشینه هزینه‌های حمله از این مقدار مبنا، استراتژی پایدار تکاملی به (۱،۱) تغییر پیدا می‌کند.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۹ تغییرات استراتژی پایدار تکاملی نسبت به تغییرات بیشینه هزینه‌های حمله

۶- نتیجه‌گیری

یکی از موضوعات حیاتی سازمان‌ها، طراحی و مدلسازی استراتژی‌های پایدار دفاع و حمله با هدف افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد. 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 کرد. در روش پیشنهادی این تحقیق، نخست یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله در شرایط ایستا ارائه شد که در مسئله مورد نظر، مطلوبیت مدافع، افزایش قابلیت اطمینان کل سامانه و هریک از زیرسیستم‌ها و کاهش هزینه مورد نیاز تجهیزات دفاع درنظر گرفته شد. در مقابل، مطلوبیت مهاجم، افزایش موفقیت در حمله به سیستم و کاهش هزینه تجهیزات حمله تعریف شد. در مدلسازی مسئله مورد تحقیق، وجود اهداف مجازی مدافع برای فریب‌دادن مهاجم و همچنین کاهش خسارت وارد شده به سیستم، در نظر گرفته شد که در آن، مهاجم علی‌رغم شناسایی نداشتن قطعی این اهداف مجازی، در تشخیص آنها به صورت احتمالی عمل می‌کند. نتایج نهایی مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مذکور، میزان سرمایه‌گذاری‌های بهینه دفاع و حمله در مبدأ زمان برای تمامی اهداف موردنظر بود.

Archive of SID

www.SID.ir

سپس با استناد به نتایج به‌دست آمده از مدل ایستا و مفاهیم نظریه تکاملی بازی‌ها، مدل پیشنهادی این تحقیق برای تعیین استراتژی‌های پایدار تکاملی معرفی شد که در این روش، با توجه به اهداف بلندمدت مدافع مبنی بر استفاده کردن و یا عدم استفاده از اهداف مجازی و همچنین استراتژی‌های پایدار مهاجم، شامل حمله کردن و یا عدم حمله، شرایط رسیدن به استراتژی‌های مختلف، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. درنهایت، مدل ارائه شده تحقیق، برای یک نمونه کاربردی، مورداستفاده قرار گرفت و نتایج نهایی مربوط به آن، مورد محاسبه و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تحلیل حساسیت مدل ارائه شده تحقیق، نشان‌دهنده این نتایج منطقی بود که پارامترهای تشکیل‌دهنده مدل، اعم از میزان هزینه‌های دفاع از اهداف واقعی و مجازی و هزینه‌های حمله به آنها، ارزش سیستم و زیرسیستم‌ها از منظر مدافع و مهاجم، ارزش احتمالی تخریب اهداف و ... نقش اساسی در تعیین استراتژی‌های پایدار تکاملی دارند و تغییرات مقادیر آنها موجب تغییر در استراتژی‌های پایدار می‌شود.

به منظور انجام مطالعات بیشتر در زمینه موضوع تحقیق، می‌توان به ارائه الگوریتم‌های مفید و فراابتکاری برای بهینه‌یابی نتایج مورد نظر در مسائل پیچیده و بزرگ پرداخت. همچنین برای تحقیقات آینده، ارائه مدلی برای تعیین استراتژی‌های پایدار دفاع و حمله با وجود همبستگی عملکردی اهداف پیشنهاد می‌شود.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Evolutionary Stable Strategy (ESS)

۸- منابع

[1] Xinyang D., Xi. Z., Xiaoyan S., Felix T.S.C., Yong H., Rehan S., Yong D. (2014) "An evidential game theory framework in multi Criteria decision-making process", *Applied Mathematics and Computation*, 244 (1):783–793.

[2] 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.

[3] Hausken K. (2008) "Strategic defense and attack for reliability systems", *Reliability Engineering and System Safety*, 181(1): 1740–1750.

Archive of SID

www.SID.ir

[4] Hausken K. (2010) "Defense and attack of complex and dependent systems", *Reliability Engineering and System Safety*, 95(1): 29-42.

[5] 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.

[6] Weibull J.W. (1995) "*Evolutionary Game Theory"*, MIT Press.

[7] Maciejewski W. (2014) "Reproductive value in graph-structured populations", *Journal of Theoretical Biology,* 340(1): 285–293.

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

[9] Nowak M. A., Tarnita C. E., Antal T. (2010) "Evolutionary dynamics in structured populations", *Journal of Theoretical Biology*, 365(1): 19–30.

[10] Imhof L. A., Nowak M. A. (2006) "Evolutionary game dynamics in a Wright–Fisher process", *Journal of Mathematical Biology*, 52(5): 667–681.

[11] Hellmann T., Staudigl M. (2014) "Evolution of social networks", *European Journal of Operational Research*, 234(1): 583–596.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Chyi J. L, Chung Y. T, Chayakrit. C., Ming D. (2012) "Dynamic decision-making in a two-stage supply chain with repeated transactions", *International Journal of Production Economics,* 137(1): 211–225.

[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] Cramer A., Sudhof S., Zivi E. (2009) "Evolutionary algorithms for minimax problems in robust design", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(1): 444–453.

Archive of SID

www.SID.ir

[17] 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.

[18] Jiang W., Fangbin X. (2009) "Evaluating network security and optimal active defense based on attack–defense game theory", *Chinese Journal of Computer*, 32(4): 44–53.

[19] 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.

[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] Abdolalipour A., Nazemi J., Toloie Eshlaghi A., Hosseinzadeh Lotfi F. (2014) "Service recovery chain response time coordinating mathematical model through bilevel programming approach", *Management Research in Iran*, 17(2):196–222 (in Persian).

[22] Mirfakhraddiny S. A, Babaei Meybodi H., Morovati Sharifabadi A. (2013) "Predicting energy consumption of Iran via a hybrid model of artificial neural networks and genetic algorithms and comparing it with traditional models", *Management Research in Iran*, 18(1): 171–191 (in Persian).

[23] 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.

[24] 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(10): 1534–1548.

[25] 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.

Archive of SID

www.SID.ir