تخصیص سرمایه‌گذاری دفاع از سیستم‌های همبسته با رویکرد بهبود قابلیت اطمینان

مهدی رحیمدل میبدی
دانشجوی دکتری مهندسی صنایع ، دانشگاه پیام نور تهران
امیرحسین امیری*
دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد
مهدی کرباسیان
دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده امروزه دفاع از مناطق و منابع حسّاس، موضوعی بنیادی است که وسعت وگستره آن، تمامی زیر ساخت‌های کلیدی را دربر می‌گیرد و برای رسیدن به هدف کاهش خسارات و صدمات ناشی از حمله مهاجم، به‌کارگیری استراتژی‌های آگاهانه و مفید، لازم و ضروری است. در این تحقیق، مدل‌سازی برای بهینه‌یابی سرمایه‌گذاری حفاظت از سیستم‌هایی درنظر گرفته شده است که ساختار قابلیت اطمینان آنها به صورت سری- موازی بوده و دارای همبستگی عملکردی با یکدیگر هستند. به‌طور کلّی در این تحقیق، ابتدا با درنظرگرفتن استقلال عملکردی زیرسیستم‌ها، احتمالات موجود در حمله موفق، ساختار قابلیت اطمینان سیستم و رویکرد تئوری بازی‌ها در پیدانمودن نقطه تعادل، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین میزان سرمایه‌گذاری دفاع از سیستم‌ها، ارائه شده است. سپس با تعیین روابط قابلیت اطمینان با وجود همبستگی عملکردی بین زیرسیستم‌ها، یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای تعیین ضریب همبستگی زیرسیستم‌ها و تخصیص مجدد سرمایه‌گذاری برای دفاع از سیستم‌ها، معرفی می‌شود. در نهایت، مدل ارائه‌شده تحقیق برای یک مثال عددی استفاده‌شده و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

کلمات کلیدی قابلیت اطمینان، دفاع، تخصیص سرمایه‌گذاری، همبستگی، تئوری بازی‌ها

۱- مقدمه

زیرساخت‌های حسّاس و مهم هر کشور، دارایی‌هائی هستند که با توجه به نقش حیاتی آنها در ثبات، آرامش و امنیت زندگی اجتماعی مردم، نیاز مبرم به حفظ و نگهداری دارند. بنابراین، یکی از سیاست‌های کلان بقای دولت‌ها، به‌کارگیری استراتژی‌های آگاهانه و مفید، برای حفاظت از این سیستم‌ها است. از منظر اطمینان‌پذیری، مدافع می‌بایست قابلیت اطمینان عملکرد زیرساختارها را که اجرای اهداف به صورت پایدار می‌باشد، افزایش دهد. این هدف، ارتباط مستقیمی با میزان سرمایه‌گذاری برای دفاع از سیستم‌های مذکور دارد. در مقابل، مطلوبیت مهاجم، بیشینه‌نمودن خسارت موردانتظار به سیستم است.

تاکنون تحقیقات زیادی برای تعیین استراتژی‌های بهینه دفاع از سیستم‌ها انجام شده است. ژیو و روکو، با رویکرد شبیه‌سازی، ایمنی شبکه‌های پیچیده در معرض خطر مهاجم را ارزیابی نمودند[۱]. سندلر و سیکویرا، از دیدگاه علوم و اقتصاد سیاسی، استراتژی‌های مطلوب دفاع را مدل‌سازی نمودند[۲]. بسیاری از محققین، از مفاهیم و کاربردهای تئوری بازی‌ها برای تعیین استراتژی‌های بهینه دفاع و حمله استفاده نموده‌اند. ژین یانگ و همکاران، مدلی ارائه نمودند 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 [۳].

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۱۵

*(Corresponding author) amiri@shahed.ac.ir

در مدل ارائه‌شده یانگ و همکاران، سرمایه‌گذاری بهینه امنیت اطلاعات با توجه به انواع مختلف حمله‌ها ارزیابی شده است [۴]. در مدل مورد تحقیق هاسکن، دو سیستم سری- موازی و موازی- سری در نظر گرفته شده است و استراتژی‌های بهینه دفاع وحمله، با توجه به رویکرد قابلیت اطمینان، کاربردهای تئوری بازی‌ها، احتمال حمله موفقیت‌آمیز، ارزش زیرسیستم‌ها و محدویت بودجه، تعیین می‌شود[۵]. این محقق، برای بهبود مدل ارائه‌شده خود، با توجه به نقاط هدف سیستم‌ها که دارای ساختارهایی مانند سری، موازی و پیچیده می‌باشند یک مدل براساس تئوری بازی‌ها ارائه نموده است که در آن مدافع در پی حداقل نمودن خسارت وارده و مهاجم در پی حداکثر نمودن آن می‌باشد. برای این‌کار یک تابع خسارت که برابر با احتمال حمله موفق روی اهداف می‌باشد 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[۶]. همچنین در تحقیق انجام‌شده لوتین و همکاران، دفاع بهینه از اجزاء یکسان ولی با محافظ گروهی از آنها مدل‌سازی شده است که در این تحقیق، مهاجم برای حمله به اجزاء می‌بایست ابتدا محافظ گروهی آنها را تخریب نماید[۷].

هرچند اکثر محققین در مدل‌های ارائه‌شده خود، فرض استقلال عملکردی زیرسیستم‌ها را درنظر گرفته‌اند[۸]، لیکن سیستم‌ها ممکن است شامل اجزاء و زیرسیستم‌هایی باشند که دارای همبستگی عملکردی نسبت به یکدیگر باشند و عدم کارکرد مطلوب یک زیرسیستم، در عملکرد صحیح و مطلوب یک یا چند زیرسیستم دیگر، تأثیر داشته باشد. این ویژگی باعث تغییرات اساسی در ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان کل سیستم می‌شود. وابستگی بین اجزاء یک سیستم، ممکن است به دلیل خرابی‌های با علل مشترک (CCF[1]) برای حداقل دو جزء باشد که این‌گونه سیستم‌ها، توسط برخی از محققین مانند ژینگ و لوتین، مورد بررسی قرار گرفته‌اند[۹]. همیل و جوزف، خرابی‌های اجزاء همبسته (COCOF[2]) را در سیستم‌های نرم‌افزاری مورد بررسی قرار دادند و تأثیرات آن‌را در قابلیت اطمینان نرم‌افزار، تجزیه و تحلیل نمودند[۱۰]. کریستینسن و همکاران، با مدل‌سازی تأثیرات خرابی‌های اجزاء همبسته در ساختارهای قابلیت اطمینان سری و موازی، فواصل اطمینان برای پارامترهای همبستگی را پیشنهاد دادند[۱۱]. براساس یافته‌های فیوندلا، با فرض نرمال بودن توزیع احتمالات وقوع خرابی‌ها و هدف تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های وابسته، همبستگی منفی اجزاء، باعث کاهش قابلیت اطمینان کل سیستم در حالت سری و افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم در حالت موازی می‌شود. البته در صورت وجود همبستگی مثبت بین اجزاء، نتیجه معکوسی حاصل می‌شود[۱۲]. کوئی‌لین و همکاران، ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه انتقال قدرتی را مدل‌سازی نموده‌اند که بین خطوط انتقال، همبستگی وجود دارد و نشان داده شد که در این شبکه انتقال بزرگ، وجود همبستگی مثبت بین خطوط انتقال، باعث کاهش قابلیت اطمینان کل سیستم می‌شود و نسبت به حالتی که خطوط انتقال، مستقل از یکدیگر باشند دارای قابلیت اطمینان کمتری می‌باشد[۱۳]. فیوندلا و همکاران، با توجه به میزان همبستگی بین اجزاء یک سیستم، توزیع برنولی چندمتغیره، ماتریس واریانس کوواریانس اجزاء سیستم و ماتریس قابلیت اطمینان اجزاء سیستم، روابط قابلیت اطمینان را برای هریک از اجزاء و درنهایت برای کل سیستم، محاسبه نمودند[۱۴]. فرانک و تهانی، مدلی ارائه نمودند که در آن، فرض شده است یک رویداد خرابی، منجر به خرابی همزمان در چند جزء از اجزاء یک سیستم شود و پس از ارزیابی تأثیر اینگونه خرابی‌ها بر روی قابلیت اطمینان، حدود بالا و پایین قابلیت اطمینان سیستم محاسبه می‌شوند و پایین بودن اختلاف این حدود به عنوان معیاری برای مطلوبیت دقت پیش‌بینی درنظر گرفته شده است[۱۵]. در تحقیق فیوندلا و ژینگ، سیستم‌هایی در نظر گرفته شده‌اند که در آنها، تمامی قطعات، یکسان و همانند بوده ولی دارای همبستگی می‌باشند و روابط قابلیت اطمینان سیستم برای حالت‌های مختلف ساختاری اعم از سری، موازی و پیچیده، تعیین شده است. با توجه به یافته‌های این پژوهش، افزایش همبستگی در سیستمهای سری، باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم و میانگین مدت زمان تا خرابی(MTTF[3]) می‌شود، برعکس، در سیستم های موازی، افزایش همبستگی بین قطعات، باعث کاهش موارد مذکور می‌شود[۱۶].

این پژوهش، به استناد تحقیقات انجام‌شده گذشته در زمینه موضوع تحقیق و با توجه به نواقص و کمبودهای موجود در آنها، یک مدل کاربردی و واقعی‌تری برای بهبود تخصیص سرمایه‌گذاری دفاع از سیستم‌ها ارائه می‌نماید. مدل پیشنهادی این تحقیق، دارای ساختاری سری- موازی از منظر قابلیت اطمینان می‌باشد و تمامی زیرسیستم‌های موجود در یک سیستم، دارای همبستگی عملکردی با یکدیگر هستند. در تحقیقات گذشته، فقط محدودیت هزینه برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است، درصورتی‌که مدل ارائه‌شده این تحقیق، محدودیت‌های بودجه موردنیاز برای تجهیزات دفاع و هزینه و وزن تجهیزات حمله را در نظر می‌گیرد. همچنین در تحقیقات انجام‌شده پیشین، میزان

1. Common Cause Failures (CCF)
2Correlated Components Failures (COCOF).

3Mean Time To Failure (MTTF).

سرمایه‌گذاری دفاع از سیستم‌ها، بدون درنظرگرفتن فاکتور همبستگی زیرسیستم‌ها، محاسبه شده است، لیکن در این تحقیق، با دریافت تخصیص اولیه میزان سرمایه‌گذاری‌ها، تخصیص مجدد و بهبودیافته‌ای برای سرمایه‌گذاری دفاع از تمامی زیرسیستم‌ها با ورود ضریب همبستگی زیرسیستم‌ها، مدل‌سازی می‌شود.

در جدول ۱ نوآوری‌های موجود در روش پیشنهادی این تحقیق در مقایسه با سایر تحقیقات انجام‌شده 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، مسأله مورد تحقیق و مفروضات آن، توضیح داده می‌شود که در آن، چگونگی مدل‌سازی استراتژی‌های بهینه دفاع از سیستم‌ها با وجود استقلال عملکردی زیرسیستم‌ها، بیان شده است. در بخش سوم، روش پیشنهادی این تحقیق برای تخصیص مجدد سرمایه‌گذاری‌های دفاع با وجود همبستگی بین زیرسیستم‌ها، ارائه می‌شود. 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 در نهایت در بخش ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای مطالعات آتی مطرح می‌شود.

۲- تعریف مسأله

مراکز نظامی، جاده ها، منابع انرژی، سیستمهای مخابراتی، منابع آبی، مراکز تجاری، مدارس و بیمارستانها، نمونه‌های بارزی از سیستم‌های حساس می‌باشند. ساختار چیدمان این سیستم‌ها با توجه به نوع عملکرد آنها می‌تواند به صورت‌های گوناگونی مانند سری، موازی، مختلط و پیچیده باشد. دولت‌ها به عنوان یک مدافع، می‌بایست در مقابل حملات احتمالی دشمنان به مناطق حسّاس، اقدامات حفاظتی انجام داده و خسارت مورد انتظار زیرساختارها را تا حد امکان، کمینه نمایند. به عبارتی دیگر، مدافع می‌بایست قابلیت اطمینان عملکرد زیرساختارها را، که انجام اهداف به صورت پایدار می‌باشد، افزایش دهد. در مقابل، هدف مهاجم بیشینه‌نمودن خسارت موردانتظار به سیستم است.

جدول ۱: جنبه‌های نوآوری روش پیشنهادی تحقیق

گروه بندی موضوعات مرتبط با حوزه مورد تحقیق			شماره مقاله						مقاله حاضر
			[۳]	[۶]	[۷]	[۱۳]	[۱۴]	[۱۵]	[۱۶]	
تعیین استراتژی بهینه دفاع و حمله	تعداد استراتژی	محدود	*							
		نامحدود		*	*					*
	وجود محدودیت‌ها	مدافع								*
		مهاجم								*
	وضعیت زیرسیستم‌ها	مستقل	*	*	*					
		همبسته								*
	تکنیک مورد استفاده	برنامه‌ریزی خطی		*	*					
		برنامه‌ریزی غیرخطی								*
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های همبسته	ماهیت خرابی	علل مشترک				*				
		همبستگی عملکردی								*
	وجود محدودیت‌های سیستم									*
	روابط مورد استفاده	روابط قابلیت اطمینان								*
		توزیع برنولی چندمتغیره								*
	تکنیک مورد استفاده	روش تلفیقی تخصیص قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی خطی								*

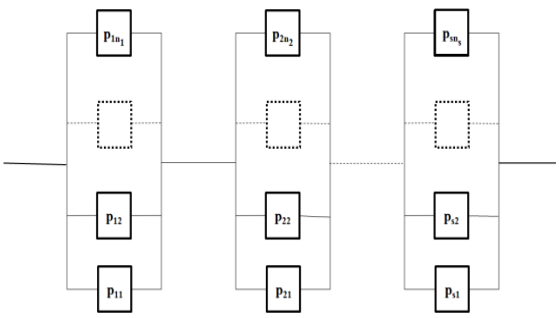
در مسأله موردنظر این تحقیق، s سیستم وجود دارد که هر سیستم شامل n_i زیرسیستم با ساختار عملکردی موازی است و ارتباط تمامی سیستم‌ها با یکدیگر به صورت سری می‌باشد. مدافع برای حفاظت از زیرسیستم‌ها، سرمایه‌گذاری‌های متفاوت f_{ij} را با هزینه واحد c_{ij} انجام می‌دهد و مهاجم نیز به طور مشابه برای حمله به هریک از زیرسیستم‌ها، F_{ij} را با هزینه واحد C_{ij} سرمایه‌گذاری می‌نماید که ij، نشان‌دهنده هدف jام از زیرسیستم iام است. همچنین از نظر مدافع، ارزش هر هدف ij برابر با v_{ij} و ارزش کل سیستم برابر با v می‌باشد و به طور مشابه برای مهاجم، هر هدف ij، ارزشی برابر با V_{ij} و کل سیستم، ارزشی برابر با V دارد. قابلیت اطمینان هر هدف (زیرسیستم) بستگی به میزان سرمایه‌گذاری برای محافظت از اهداف از طرف مدافع و میزان سرمایه‌گذاری برای حمله‌نمودن به اهداف از طرف مهاجم دارد و در نتیجه، تعیین‌کننده موفقیت حمله و دفاع است.

شکل ۱ ساختار قابلیت اطمینان مسأله موردنظر را نشان می‌دهد. همچنین فهرست پارامترها و متغیرهای تصمیم مورد استفاده در روش پیشنهادی این تحقیق، در جدول ۲ به اختصار، توضیح داده شده است.

یک روش ساده برای تعریف احتمال عدم حمله موفق روی هدف ij، استفاده از نسبت ارائه‌شده در رابطه (۱) است [۱۷]:

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

که در آن m_{ij} میزان شدت رقابت بر سر هدف ij است و یک مشخصه رقابت با توجه به نوع هدف ij است. مطلوبیت مدافع، بیشینه‌نمودن قابلیت اطمینان دفاع از تمامی زیرسیستم‌ها و کل سیستم و کمینه‌نمودن هزینه (در صورت وجود محدودیت بودجه) است.



شکل ۱: ساختار قابلیت اطمینان مسأله تحقیق

بنابراین می‌توان دو تابع هدف به صورت روابط ۲ و ۳ را برای مطلوبیت موردنظر مدافع در نظر گرفت [۶]:

$$Max:\ u_1 = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} q_{ij} v_{ij} + R_{sp} v\ . \qquad (۲)$$

$$Min:\ u_2 = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i} c_{ij} f_{ij}\ . \qquad (۳)$$

R_{sp}، قابلیت اطمینان کل سامانه (سری- موازی) است.

جدول ۲: فهرست پارامترها و متغیرهای تصمیم مساله

پارامترها:	
s	تعداد سیستم‌ها
n_i	تعداد زیرسیستم‌های سیستم iام
ij	زیرسیستم jام از سیستم iام
c_{ij}	هزینه واحد تجهیزات دفاع برای هدف ij
C_{ij}	هزینه واحد تجهیزات حمله برای هدف ij
v_{ij}	ارزش مدافع برای هر هدف ij
V_{ij}	ارزش مهاجم برای هر هدف ij
m_{ij}	میزان شدت رقابت هدف ij
v	ارزش مدافع برای کل سیستم
V	ارزش مهاجم برای کل سیستم
c_{max}	بیشینه هزینه موردنظر مدافع
C_{max}	بیشینه هزینه موردنظر مهاجم
O_{ij}	وزن واحد برای تجهیزات حمله به هدف ij
O_{max}	بیشینه وزن تجهیزات حمله
u	مطلوبیت مدافع
U	مطلوبیت مهاجم
ρ_{ij}	میزان همبستگی بین زیرسیستم‌های i و j
r_i	قابلیت اطمینان موردانتظار زیرسیستم i
متغیرهای تصمیم:	
f_{ij}	سرمایه‌گذاری واحد مدافع برای دفاع از ij
F_{ij}	سرمایه‌گذاری واحد مهاجم برای حمله به ij
q_{ij}	احتمال عدم حمله موفق به هدف ij
f_{cij}	سرمایه‌گذاری واحد مجدد برای دفاع از ij

بنابراین، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مناسب برای بهینه‌سازی مطلوبیت مدافع، به صورت روابط ۴ و ۵ خواهد بود.

$$Max:\ u = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}\frac{f_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}v_{ij} + v\prod_{i=1}^{s}\left(1-\left(\prod_{j=1}^{n_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\right)\right) - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}c_{ij}f_{ij}\ . \quad (۴)$$

s.t. :

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i}c_{ij}f_{ij} \le c_{max}\ ,\ f_{ij}\ge 0. \quad (۵)$$

که در آن، c_{max} بیشینه هزینه موردنظر مدافع می‌باشد.

از سوی دیگر مهاجم متمایل به افزایش احتمال خطر ($1-q_{ij}$) است. همچنین در صورت وجود محدودیت‌های بودجه و وزن، مطلوبیت مهاجم، کمینه‌نمودن دو هدف دیگر یعنی هزینه و وزن کل تجهیزات نیز می‌باشد. بنابراین به طور مشابه، مدل برنامه‌ریزی خطی مناسب برای بهینه‌سازی مطلوبیت مهاجم، با درنظرگرفتن محدودیت‌های مربوطه به صورت روابط ۶ تا ۸ خواهد بود. که در آن، O_{ij} وزن موردنیاز برای هر واحد سرمایه‌گذاری حمله به هدف jام از زیرسیستم iام، C_{max} بیشینه هزینه موردنظر مهاجم و O_{max} بیشینه وزن تجهیزات حمله است.

$$Max:\ U = \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}V_{ij} + V\left(1-\prod_{i=1}^{s}\left(1-\prod_{j=1}^{n_i}\left(\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\right)\right)\right) - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}C_{ij}F_{ij} - \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{N_i}O_{ij}F_{ij}\ . \quad (۶)$$

st. :

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}C_{ij}F_{ij} \le C_{max}\ . \quad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}O_{ij}F_{ij} \le O_{max}\ ,\ F_{ij}\ge 0. \quad (۸)$$

برای به‌دست‌آوردن راه‌حل از مفاهیم بنیادی نقطه تعادل نش [۱۸] در تئوری بازی‌ها استفاده می شود که در آن هیچ‌یک از طرفین بازی به صورت یکطرفه عمل نمی‌کند بلکه با توجه به منطقی‌بودن بازیکنان، مناسب‌ترین پاسخ تعیین می‌شود. بنابراین برای تعیین نقطه تعادل هر هدف، می‌بایست مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی با روابط ۹ تا ۱۱ و محدودیت‌های مربوطه، حل شود که در آن، از تعمیم شرایط کوهن- تاکر استفاده شده است [۱۹]. ذکر این نکته لازم است که از مفروضات موردنظر برنامه‌ریزی غیرخطی مذکور، محدب‌بودن مجموعه متغیرهای تصمیم (f_{ij} و F_{ij}) و مشتق‌پذیر بودن توابع مطلوبیت و محدودیت‌ها نسبت به این متغیرها است که این موارد در حل مدل برنامه‌ریزی غیر خطی پیشنهادی رعایت شده است. شرایط لازم کوهن- تاکر (روابط ۱۰، ۱۱ و محدودیت‌های مربوطه)، شرط کافی هم برای بهینگی خواهد بود، زیرا با توجه به مفروضات قیدشده، برنامه‌ریزی مذکور، محدب می‌باشد.

$$Min: \lambda_{1,1}\left(c_{max}-\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}c_{ij}f_{ij}\right)+\lambda_{2,1}\left(C_{max}-\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}C_{ij}F_{ij}\right)+\lambda_{2,1}\left(O_{max}-\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}O_{ij}F_{ij}\right). \quad (۹)$$

s.t. :

$$v_{kl}\frac{m_{kl}F_{kl}^{m_{kl}}f_{kl}^{(m_{kl}-1)}}{(f_{kl}^{m_{kl}}+F_{kl}^{m_{kl}})^2}+\ v\ \frac{m_{ij}F_{ij}^{m_{ij}}f_{ij}^{(m_{ij}-1)}}{(f_{kl}^{m_{kl}}+F_{kl}^{m_{kl}})^2}Q_aQ_b-\left(1+\lambda_{1,1}\right)c_{kl}=0\ ,\quad k=1,\dots,s\quad ,\ l=1,\dots,n_i\ . \quad (۱۰)$$

$$V_{kl}\frac{m_{kl}f_{kl}^{m_{kl}}F_{kl}^{(m_{kl}-1)}}{(f_{kl}^{m_{kl}}+F_{kl}^{m_{kl}})^2}+\ V\frac{m_{kl}f_{kl}^{m_{kl}}F_{kl}^{(m_{kl}-1)}}{(f_{kl}^{m_{kl}}+F_{kl}^{m_{kl}})^2}Q_aQ_b-\left(1+\lambda_{2,1}\right)C_{kl}-\left(1+\lambda_{2,2}\right)O_{kl}=0\ , \quad (۱۱)$$
$$k=1,\dots,s\quad ,\quad l=1,\dots,n_i\ .$$

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

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}C_{ij}F_{ij} \le C_{max}\ .$$

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{n_i}O_{ij}F_{ij} \le O_{max}\ .$$

$$Q_a=\prod_{\substack{i=k\\ j\neq L}}^{n_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\ ,\ Q_b=\prod_{i\neq k}^{s}\left(1-\prod_{j=1}^{n_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{f_{ij}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\right)\ ,\ i=1,\dots,s\ \ ,\quad j=1,\dots,n_i\ .$$

بنابراین، بهترین حالت تابع هدف، صفربودن آن است زیرا این تابع به ازای هر راه‌حل عملی، غیرمنفی می‌شود و جواب حاصل از آن، شرایط نقطه تعادل را نشان می‌دهد. نتیجه نهایی برنامه‌ریزی غیرخطی مذکور، نقطه تعادل را نشان می‌دهد و تعیین‌کننده میزان سرمایه‌گذاری بهینه دفاع برای هرکدام از زیرسیستم‌های حسّاس می‌باشد. برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مذکور، در ابعاد کوچک مسأله، می‌توان از نرم‌افزارهای کاربردی در این زمینه مانند *Lingo* و *Gams* استفاده نمود. ولی درصورت بزرگ شدن ابعاد مسأله، می‌بایست با استفاده از روش‌های فراابتکاری، الگوریتم بهینه‌یابی مسأله را طراحی و اجرا نمود[۲۰].

روابط بیان‌شده، با توجه به شرط استقلال عملکردی تمامی زیرسیستم‌ها، تعیین شده‌اند، لیکن، با توجه به مفروضات تحقیق و در نظرگرفتن همبستگی عملکردی زیرسیستم‌ها با یکدیگر، همبستگی آماری مدّنظر می‌باشد که با توجه به تأثیرات (مثبت و یا منفی) عدم عملکرد یک زیرسیستم بر میزان عملکرد صحیح سایر زیرسیستم‌ها، لحاظ می‌شود. در مسأله پیشنهادی این تحقیق، اهداف زیرمجموعه هرکدام از سیستم‌ها دارای همبستگی عملکردی با یکدیگر هستند که مهاجم از این موضوع، آگاهی ندارد. بنابراین برای تخصیص مجدد سرمایه‌گذاری دفاع از زیرسیستم‌ها، می‌بایست تأثیر همبستگی بین زیرسیستم‌ها نیز مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. این موضوع با معرفی ضریب همبستگی برای زیرسیستم‌ها و برنامه‌ریزی مناسب برای تخصیص مجدد سرمایه‌گذاری دفاع، در بخش بعدی بیان شده است.

۳- تخصیص مجدد سرمایه‌گذاری دفاع با وجود همبستگی بین زیرسیستم‌ها

اگر یک سیستم با n زیرسیستم غیرمستقل وجود داشته باشد و قابلیت اطمینان هر زیرسیستم با متغیر تصادفی z_i نشان داده شود، می‌توان قابلیت اطمینان موردانتظار هر زیرسیستم ($E(z_i)$) را با r_i و میزان همبستگی بین دو زیرسیستم را با ρ_{ij} نشان داد. بنابراین اگر ماتریس‌های **R** و **M**، نشان‌دهنده قابلیت اطمینان موردانتظار و میزان همبستگی بین هر دو زوج زیرسیستم باشد، می‌توان توزیع تابع *MVB(R,M)* را به عنوان توزیع برنولی چند متغیره شناخت. زیرا مقادیر **R** در بازه [۱و۰] و مقادیر **M** در بازه [۱و-۱] قرار دارند که این موضوع از ویژگی‌های پارامتری توابع توزیع چند متغیره است[۲۱]. برای تبدیل‌نمودن پارامترهای *MVB* سیستم موردنظر به تابعی از متغیرهای پوآسون مستقل، از احتمال تابع تجمعی توزیع پوآسون که به صورت رابطه ۱۲ است، استفاده می‌شود:

$$f(k;\lambda) = Pr\{X = k\} = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \qquad (۱۲)$$

که در آن، k تعداد وقوع رویداد و $\lambda >$ ۰ نرخ وقوع رویداد است. اگر یکی از این متغیرهای پوآسون، یک یا چند رویداد را تجربه نماید، همه زیرسیستم‌های همبسته‌ای که شامل این متغیر می‌باشند، دچار خرابی و نقص عملکرد خواهند شد. بنابراین برای داشتن حالت بدون خرابی، می‌بایست احتمال وقوع صفر رویداد، ارزیابی شود که با توجه به رابطه ۱۲، این احتمال برابر با $e^{-\lambda}$ می‌شود. با معادل‌سازی این احتمال با قابلیت اطمینان زیرسیستم موردنظر، نتیجه‌گیری می‌شود که یک توزیع پوآسون با نرخ وقوع رویداد $ln(1/r_i)$، با احتمال r_i، هیچ‌گونه خرابی را تجربه نمی‌کند و با توجه به وجود همبستگی بین زیرسیستم‌ها، نرخ وقوع رویداد مشترک بین زیرسیستم‌های i و j به صورت رابطه ۱۳ تعریف می‌شود[۱۴].

$$\lambda_{ij} = ln\left(1 + \rho_{ij}\sqrt{\frac{(1-r_i)(1-r_j)}{r_i r_j}}\right) \qquad (۱۳)$$

با توجه به مطالب مذکور، ماتریس اولیه نرخ وقوع رویداد مشترک به صورت رابطه ۱۴ خواهد بود. بنابراین با وجود ماتریس واریانس-کوواریانس و قابلیت اطمینان هریک از اجزاء سیستم، می‌توان ماتریس اولیه را تعیین نمود.

$$\Lambda^0 = \begin{bmatrix} ln(\frac{1}{r_1}) & ln\left(1+\rho_{12}\sqrt{\frac{(1-r_1)(1-r_2)}{r_1 r_2}}\right) & \cdots & ln\left(1+\rho_{1n}\sqrt{\frac{(1-r_1)(1-r_n)}{r_1 r_n}}\right) \\ \cdots & ln(\frac{1}{r_2}) & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & ln(\frac{1}{r_n}) \end{bmatrix} \qquad (۱۴)$$

برای به‌دست‌آوردن حالت‌های مختلفی که منجر به وقوع خرابی می‌شوند، می‌بایست به صورت متوالی، به اندازه کوچکترین مقدار عدد غیرصفر ماتریس از بقیه عناصر کاسته شود و مجموعه زیرسیستم‌های مربوطه، تعیین شوند. این کار تا رسیدن به ماتریس کاملاً صفر انجام می‌شود و با توجه به ساختار قابلیت اطمینان سیستم، شاخص‌های قابلیت اطمینان، ارزیابی می‌شوند. در ساده‌ترین حالت، زمانی‌که تمامی زیرسیستم‌ها با یکدیگر مشابه و یکسان (با قابلیت اطمینان برابر با r) باشند و ضریب همبستگی بین تمامی آنها برابر با ρ باشد، ارزیابی قابلیت اطمینان برای سیستم‌های موازی با n جزء به صورت رابطه ۱۵ می‌باشد [۱۶].

$$R_{Pc} = \frac{1-(1-r\beta)^n}{\beta} \qquad (۱۵)$$

$$\beta = \left(1 + \rho\frac{(1-r)}{r}\right) \qquad (۱۶)$$

که در آن، R_{pc}، قابلیت اطمینان سیستم موازی با وجود همبستگی بین زیرسیستم‌ها است. در صورت عدم همبستگی (استقلال زیرسیستم‌ها) مقدار $ß=1$ می‌شود و قابلیت اطمینان کل سیستم، برابر با رابطه صحیح $R_p=1-(1-r)^n$ می‌شود. در این تحقیق، برای برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی و امکان‌پذیری مدل‌سازی آن، برای هرکدام از سیستم‌ها، زیرسیستم‌هایی با قابلیت اطمینان برابر و میزان همبستگی یکسان در نظر گرفته شده است.

از طرفی دیگر، در ساده‌ترین روش تخصیص قابلیت اطمینان، در سیستمi با ساختار موازی متشکل از n زیرسیستم، برای رسیدن به یک عدد قابلیت اطمینان مبنا (R_i) می‌توان از روش تسهیم برابر استفاده نمود که با فرض استقلال زیرسیستم‌ها، از رابطه ۱۷ به‌دست می‌آید.

$$r = 1-(1-R_i)^{1/n} \qquad (۱۷)$$

ولی در صورت وجود همبستگی بین زیرسیستم‌ها، با توجه به رابطه ۱۵، برای رسیدن به عدد قابلیت اطمینان مبنا، می‌بایست معادله مربوطه (با درجه n) حل شود که جواب صحیح به‌دست آمده برای قابلیت اطمینان هریک از اجزاء، با استفاده از معادله مذکور، با r_{ci} نشان داده می‌شود. با توجه به مفروضات مسأله مبنی بر اینکه حداکثر مجموع میزان سرمایه‌گذاری دفاع از سیستم‌ها برابر با مجموع سرمایه‌گذاری‌های به‌دست‌آمده از مرحله قبل می‌باشد، همچنین براساس معادل‌بودن نسبت قابلیت اطمینان تجهیزات دفاع از سیستم‌ها و نسبت قابلیت اطمینان عملکردی سیستم‌ها، می‌بایست ضریب همبستگی برای هر سیستم، تعیین شود که این ضریب، معیاری برای افزایش و یا کاهش میزان سرمایه‌گذاری دفاع از سیستم‌ها با توجه به ساختار قابلیت اطمینان سیستم‌ها، میزان همبستگی بین زیرسیستم‌ها و مقادیر اولیه به‌دست‌آمده برای سرمایه‌گذاری‌ها، می‌باشد. در این تحقیق، تعیین ضریب همبستگی برای هر سیستم i (k_i)، با استفاده از حل معادله برنامه‌ریزی خطی با روابط ۱۸ تا ۲۰، پیشنهاد شده است.

رابطه ۱۸ بیانگر هدف بیشینه‌نمودن قابلیت اطمینان کل سامانه موردنظر می‌باشد که ساختار قابلیت اطمینان آن، به صورت سری-موازی است. ذکر این نکته لازم است که با توجه به ثابت‌بودن میزان سرمایه‌گذاری مهاجم برای حمله به علت عدم آگاهی مهاجم از همبستگی بین زیرسیستم‌های هر سیستم، برای ارزیابی مجدد احتمال حمله موفق (به استناد رابطه(۱)) با توجه به تأثیر میزان همبستگی، می‌بایست ضریب افزایشی (یا کاهشی) همبستگی، فقط در میزان سرمایه‌گذاری دفاع هر زیرسیستم، ضرب شود. رابطه ۱۹ فرض معادل‌بودن نسبت قابلیت اطمینان تجهیزات دفاع از سیستم‌ها (سمت راست معادله) و نسبت قابلیت اطمینان عملکردی سیستم‌ها را نشان می‌دهد که در آن، سیستم یک، به عنوان معیار مقایسه با تمامی سیستم‌ها، درنظر گرفته شده است.

$$Max: \prod_{i=1}^{s}\left(1-\prod_{j=1}^{n_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{(k_i f_{ij})^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\right) \qquad (۱۸)$$

$$s.t.:$$

$$\frac{\left(1-\prod_{j=1}^{n_i}\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{(k_i f_{ij})^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\right)}{\left(1-\prod_{j=1}^{n_1}\frac{F_{ij}^{m_{1j}}}{(k_1 f_{1j})^{m_{1j}}+F_{1j}^{m_{1j}}}\right)} = \frac{\left(1-\prod_{j=1}^{n_i}\left(\frac{F_{ij}^{m_{ij}}}{{f_{ij}}^{m_{ij}}+F_{ij}^{m_{ij}}}\right)\right)}{\left(1-\prod_{j=1}^{n_1}\left(\frac{F_{1j}^{m_{1j}}}{{f_{1j}}^{m_{1j}}+F_{1j}^{m_{1j}}}\right)\right)}\cdot\frac{\frac{r_{ci}}{r_i}}{\frac{r_{c1}}{r_1}} \quad , \quad i=2,\dots..s. \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{i=1}^{s}k_i f_i \le \sum_{i=1}^{s} f_i \quad , \quad f_i=\sum_{j=1}^{n_i} f_{ij} \quad . \qquad (۲۰)$$

این رابطه، در تعیین ضریب همبستگی، نقش مؤثری دارد. زیرا با توجه به روابط موجود برای تعیین قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها با وجود استقلال آنها (رابطه ۱۷) و همچنین در صورت همبسته‌بودن آنها (رابطه ۱۵)، می‌توان تأثیر همبستگی بین زیرسیستم‌ها را در ارزیابی قابلیت اطمینان کل سیستم، مدل‌سازی و ارزیابی نمود. در واقع، رابطه ۱۹، بیانگر الزام افزایش نسبی قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های متعلق به سیستم‌هایی می‌باشد که میزان همبستگی آنها بیشتر از دیگر سیستم‌ها است. رابطه ۲۰ نیز متضمن رعایت فرض حداکثری مجموع میزان سرمایه‌گذاری مجدد است. ضرایب تاثیر همبستگی به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی خطی مذکور، با توجه به میزان همبستگی موجود بین زیرسیستم‌های هر سیستم، کوچکتر و یا بزرگتر از یک خواهد بود. درنهایت، تخصیص مجدد سرمایه‌گذاری دفاع از زیرسیستم‌ها با توجه به تأثیر همبستگی (f_{cij})، با استفاده از رابطه ۲۱ به‌دست می‌آید:

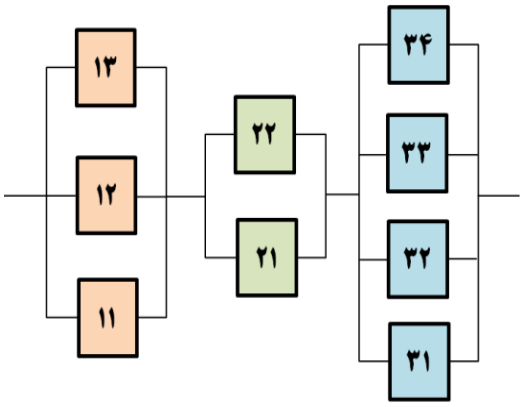
$$f_{cij} = k_i f_{ij},\ i = 1, \ldots . s\ ,\ j = 1, \ldots . n_i\ . \qquad (۲۱)$$

ذکر این نکته لازم است که با توجه به مقادیر نهائی به‌دست‌آمده برای میزان سرمایه‌گذاری دفاع از زیرسیستم‌ها (رابطه ۲۱)، می‌توان به استناد رابطه ۱، احتمالات حمله موفقیت‌آمیز را محاسبه نمود.

۴- مثال عددی

در این قسمت، برای نشان‌دادن چگونگی استفاده از مدل پیشنهادی و تحلیل نتایج مربوطه، یک مثال عددی ارائه می‌شود. فرض کنید هدف مسأله موردنظر، تخصیص سرمایه‌گذاری دفاع از سامانه‌ای متشکل از سه سیستم می‌باشد که به ترتیب، شامل ۳، ۲ و ۴ زیرسیستم موازی می‌باشند. میزان همبستگی بین زیرسیستم‌های سیستم‌های مذکور به ترتیب برابر با ۰/۳۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۵ است. شکل ۲ ساختار قابلیت اطمینان این سامانه را نشان می‌دهد.

سایر اطلاعات موردنیاز برای مدل‌سازی این مسأله در جدول ۳ نشان داده شده است و قابلیت اطمینان عملکردی موردانتظار هرکدام از سیستم‌ها، ۰/۹۵ تعیین شده است.



شکل۲: ساختار قابلیت اطمینان مثال عددی

جدول ۳: اطلاعات اولیه مطالعه موردی

ij	۱۱	۱۲	۱۳	۲۱	۲۲	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴
c_{ij}	۰/۹	۰/۸	۰/۹	۱/۵	۱/۵	۰/۸	۰/۷	۰/۷	۰/۸
C_{ij}	۰/۸	۰/۷	۰/۸	۲	۱/۸	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۵
O_{ij}	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
v_{ij}	۱۰	۸	۱۱	۱۴	۱۵	۱۰	۱۰	۱۲	۱۱
V_{ij}	۱۰	۱۰	۱۰	۱۲	۱۲	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
m_{ij}	۱	۱	۱	۲	۲	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
v=۲۰۰ , V=۱۰۰ , c_{max}=۴۰, C_{max}=۲۵ , O_{max}=۱۰									

ذکر این نکته لازم است که سه سیستم مذکور نسبت به یکدیگر دارای استقلال عملکردی هستند. باتوجه به روابط ارائه‌شده در بخش‌های دوّم و سوّم، در صورت استقلال عملکردی زیرسیستم‌ها، سرمایه‌گذاری بهینه دفاع (f_{ij})، حمله (F_{ij}) و احتمال حمله ناموفق (q_{ij}) در نقطه تعادل و در صورت وجود همبستگی عملکردی زیرسیستم‌ها، سرمایه‌گذاری مجدد دفاع (f_{cij}) و احتمال حمله ناموفق (q_{cij})، به صورت جدول ۴ تعیین می‌شود و بیانگر این موضوع است که در صورت وجود همبستگی عملکردی، افزایش تعداد زیرسیستم‌ها با ساختار موازی، ارتباط مستقیمی با افزایش ضریب تأثیر همبستگی (k_i) دارد. بنابراین افزایش سرمایه‌گذاری دفاع در سیستم ۳ که شامل چهار زیرسیستم می‌باشد، با کاهش سرمایه‌گذاری مربوطه در سیستم ۲ (که شامل فقط دو زیرسیستم است) جبران می‌شود.

جدول ۴: سرمایه‌گذاری‌های بهینه دفاع درصورت استقلال و همبستگی زیرسیستم‌ها

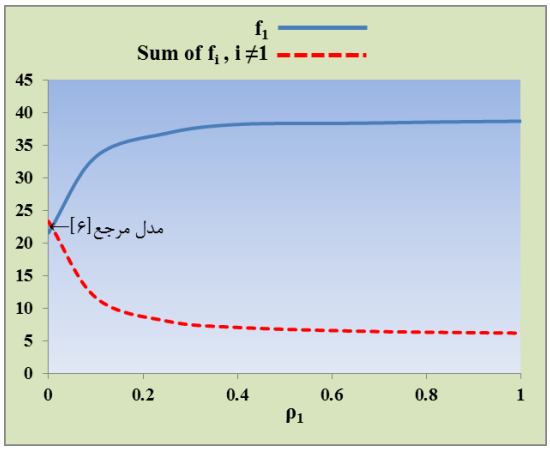
زیرسیستم	f_{ij}	F_{ij}	q_{ij}	k_i	f_{cij}	q_{cij}
۱۱	۳/۹۶	۲/۳۳	۰/۶۳	۰/۹۴	۳/۷۲	۰/۶۱
۱۲	۴/۰۶	۲/۷۷	۰/۵۹	۰/۹۴	۳/۸۲	۰/۵۸
۱۳	۴/۱۲	۲/۲۷	۰/۶۴	۰/۹۴	۳/۸۷	۰/۶۳
۲۱	۲/۲۱	۰/۶۸	۰/۹۱	۰/۳۷	۰/۸۱	۰/۵۹
۲۲	۲/۷۶	۱/۴۱	۰/۷۹	۰/۳۷	۱/۰۱	۰/۳۴
۳۱	۶/۲۳	۷/۴۱	۰/۴۳	۱/۱۳	۷/۰۴	۰/۴۸
۳۲	۸/۸۲	۶/۹۳	۰/۵۹	۱/۱۳	۹/۹۸	۰/۶۳
۳۳	۷/۸۱	۸/۸۰	۰/۴۶	۱/۱۳	۸/۸۳	۰/۵۰
۳۴	۶/۷۵	۷/۴۰	۰/۴۷	۱/۱۳	۷/۶۳	۰/۵۱

۵- تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی تحقیق را می‌توان، در زمینه‌های مختلف، تجزیه و تحلیل نمود. در این تحقیق، حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به تغییرات میزان همبستگی بین زیرسیستم‌ها، افزایش(کاهش) تعداد زیرسیستم‌های همبسته و همچنین تغییرات ضرایب شدت زیرسیستم‌ها، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

همچنین برای مقایسه و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، نتایج حاصل از روش پیشنهادی مرجع [۶] مورد استفاده قرار گرفته است. زیرا ورودی‌های مسأله مرجع مذکور، تشابه زیادی با مسأله این تحقیق دارد.

برای تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به تغییرات میزان همبستگی بین زیرسیستم‌ها، برای مثال عددی این تحقیق، حالتی در نظر گرفته می‌شود که در آن، پارامترهای مدل پیشنهادی برای تمامی زیرسیستم‌ها، با یکدیگر معادل باشند و زیرسیستم‌ها دارای استقلال عملکردی باشند. ابتدا، نتایج مدل پیشنهادی برای این حالت محاسبه می‌شوند. ذکر این نکته لازم می‌باشد که این حالت، مشابه مدل پیشنهادی مرجع [۶] است. سپس با افزایش تدریجی میزان همبستگی بین زیرسیستم‌های یکی از سیستم‌ها (که در این تحقیق، سیستم یک انتخاب شده است) نتایج نهایی مدل پیشنهادی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. در شکل ۳ روند تغییرات مجموع سرمایه‌گذاری‌های دفاع نسبت به ρ_1 نشان داده شده است و بیان‌گر این مطلب است که با افزایش میزان همبستگی بین زیرسیستم‌های سیستم ۱، میزان سرمایه‌گذاری برای دفاع از سیستم ۱، افزایش می‌یابد و برعکس، مجموع سرمایه گذاری برای دفاع از سایر سیستم‌ها (سیستم‌های ۲ و ۳) روند نزولی دارد.



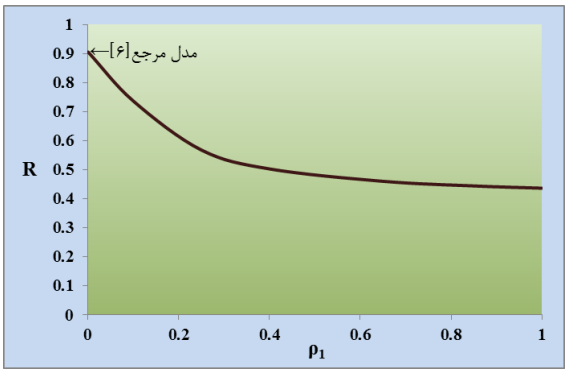
شکل۳: روند تغییرات مجموع سرمایه‌گذاری‌های دفاع نسبت به ρ_1

وقوع این حالت‌ها منطقی است، زیرا با توجه به این موضوع که افزایش میزان همبستگی در سیستم‌های موازی، قابلیت اطمینان کل سیستم را کاهش می‌دهد، می‌بایست برای رسیدن به حد قابل قبولی از اطمینان عملکرد سیستم ۱، سرمایه‌گذاری بیشتری انجام شود، بنابراین با وجود ثابت‌بودن مجموع سرمایه‌گذاری برای دفاع از کل سامانه موردنظر، در صورت افزایش میزان سرمایه‌گذاری برای دفاع از سیستم ۱، مجموع سرمایه‌گذاری‌ها برای سایر سیستم‌ها، کاهش می‌یابد.

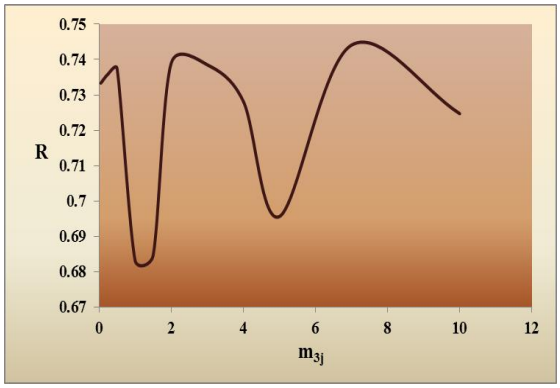
همچنین، برای تحلیل روند تغییرات قابلیت اطمینان کل سامانه، می‌توان تغییرات مربوطه نسبت به افزایش میزان همبستگی عملکردی بین زیرسیستم‌های سیستم ۱ را مورد بررسی قرار داد که نتایج نهایی این موضوع در شکل ۴ نشان داده شده است و همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان همبستگی بین زیرسیستم‌های سیستم ۱، قابلیت اطمینان کل سامانه موردنظر، کاهش می‌یابد. بیشترین عدد قابلیت اطمینان، برای مدلی مشابه مدل مرجع [۶] می‌باشد که در آن، تمام زیرسیستم‌ها دارای استقلال عملکردی هستند ولی با افزایش میزان همبستگی عملکردی بین زیرسیستم‌های سیستم ۱، قابلیت اطمینان کل سامانه روند کاهشی دارد که علت آن، ثابت‌بودن میزان کل سرمایه‌گذاری‌ها و کاهش قابلیت اطمینان سیستم ۱ (با ساختار موازی و وجود همبستگی عملکردی بین زیرسیستم‌های آن) است.

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های دفاع، ضرایب شدت زیرسیستم‌ها (m_{ij}) می‌باشد که می‌توان، تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی را نسبت به تغییرات این پارامتر انجام داد. برای این‌کار، با درنظرگرفتن وجود

همبستگی عملکردی بین زیرسیستم‌های سیستم ۳ و ثابت‌بودن تمامی پارامترها، ضرایب شدت زیرسیستم‌های سیستم ۳، تغییر داده می‌شوند و ارزیابی‌های مربوط به مدل پیشنهادی، انجام می‌شود.



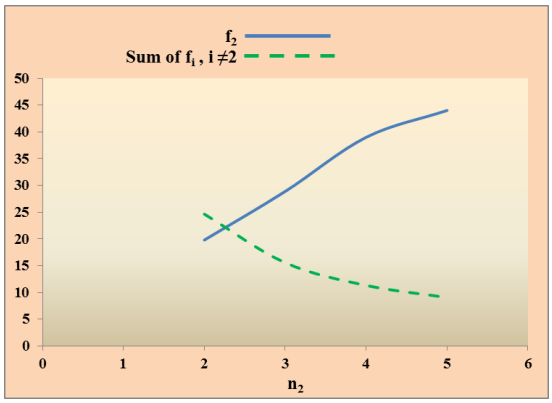
شکل۴: روند تغییرات قابلیت اطمینان کل سامانه نسبت به ρ_1



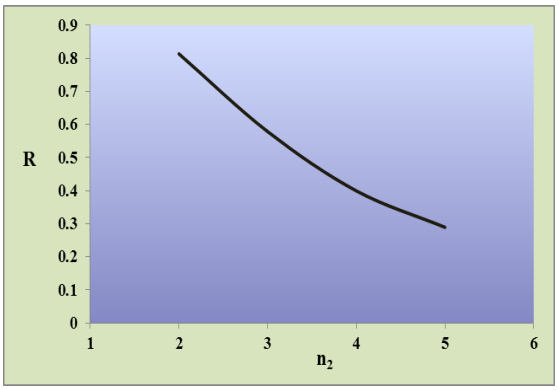
شکل۵: روند تغییرات قابلیت اطمینان کل سامانه نسبت به (m_{3j})

نتایج نهایی مربوطه در شکل ۵ نشان داده شده است و با توجه به نتایج موجود، می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری نمود که با در نظر گرفتن مفاهیم بنیادی تئوری بازی‌ها در تعیین نقطه تعادل و استناد به این موضوع در مرحله اولیه مدل پیشنهادی، تغییرات ضرایب شدت زیرسیستم‌های سیستم ۳، روند شبه سینوسی در میزان قابلیت اطمینان کل سامانه موردنظر دارند.

در نهایت، سیستم ۲ برای انجام تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به افزایش زیرسیستم‌های همبسته، انتخاب می‌شود. در این مرحله، با در نظرگرفتن وجود همبستگی بین زیرسیستم‌های سیستم ۲، استقلال زیرسیستم‌های سایر سیستم‌ها (سیستم‌های ۱ و ۳) و ثابت‌بودن سایر پارامترها، با افزایش‌دادن تعداد زیرسیستم‌های سیستم ۲، مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می گیرد که نتایج نهایی تغییرات مجموع سرمایه‌گذاری‌های دفاع در شکل ۶ نشان داده شده است و بیان‌گر این موضوع می‌باشد که با افزایش تعداد زیرسیستم‌های سیستم ۲، سرمایه‌گذاری برای دفاع از سیستم ۲، روند صعودی دارد و برعکس، مجموع سرمایه‌گذاری برای دفاع از سایر سیستم‌ها (سیستم‌های ۱ و ۳) رفتار کاهشی دارد که علت این رخدادها، جبران‌نمودن کاهش قابلیت اطمینان سیستم ۲ و ثابت‌بودن میزان سرمایه‌گذاری دفاع از کل سامانه است.



شکل۶: روند تغییرات مجموع سرمایه‌گذاری دفاع نسبت به n_2



شکل۷: روند تغییرات قابلیت اطمینان کل سامانه نسبت به n_2

همچنین، برای تحلیل روند تغییرات قابلیت اطمینان کل سامانه، می‌توان تغییرات مربوطه نسبت به افزایش تعداد زیرسیستم‌های سیستم ۲ را مورد بررسی قرار داد که نتایج نهایی این موضوع در شکل ۷ نشان داده شده است.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای مطالعات آتی

مطلوبیت و کارآمدی سیاست‌های دفاع از سیستم‌های حساس و حیاتی، یکی از مهم‌ترین اهداف دولت‌ها می‌باشد. این تحقیق با هدف افزایش قابلیت اطمینان و رویکرد تئوری بازی‌ها، ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین سرمایه‌گذاری‌های بهینه دفاع از سیستم‌ها ارائه نمود که در آن، فرض استقلال عملکردی تمامی زیرسیستم‌ها در نظر گرفته شد. در مدل پیشنهادی این تحقیق، مطلوبیت مدافع، افزایش قابلیت اطمینان کل سامانه و هریک از زیرسیستم‌ها و کاهش هزینه موردنیاز تجهیزات دفاع

بود. در مقابل، مطلوبیت مهاجم، افزایش موفقیت در حمله به سیستم‌های حسّاس و کاهش هزینه و وزن تجهیزات حمله منظور شد. در مرحله بعد، با توجه به فرض اصلی مسأله تحقیق، مبنی بر وجود همبستگی عملکردی بین زیرسیستم‌های هر سیستم و عدم اطلاع مهاجم از آن، پس از تعیین روابط قابلیت اطمینان سیستم‌ها با وجود عدم استقلال عملکردی بین زیرسیستم‌ها، یک مدل برنامه‌ریزی خطی با هدف افزایش قابلیت اطمینان کل سامانه و فرض معادل‌بودن نسبت قابلیت اطمینان تجهیزات دفاع از سیستم‌ها و نسبت قابلیت اطمینان عملکردی سیستم‌ها و همچنین رعایت فرض حداکثری مجموع میزان سرمایه‌گذاری مجدد دفاع، ارائه شد که خروجی نهایی این مدل، تعیین ضریب همبستگی برای تخصیص مجدد سرمایه‌گذاری دفاع از زیرسیستم‌ها می‌باشد.

تحلیل حساسیت مدل ارائه‌شده تحقیق، نشان‌دهنده این نتایج منطقی بود که با افزایش میزان همبستگی بین زیرسیستم‌ای یک سیستم، میزان سرمایه‌گذاری برای دفاع از آن سیستم، افزایش می‌یابد و برعکس، مجموع سرمایه‌گذاری برای دفاع از سایر سیستم‌ها رفتار کاهشی دارد. لیکن در این حالت، قابلیت اطمینان دفاع از کل سامانه، روند نزولی دارد. همچنین با افزایش زیرسیستم‌های غیرمستقل در یک سیستم، میزان سرمایه‌گذاری دفاع از آن سیستم، روند صعودی دارد و با توجه به ثابت‌بودن مجموع سرمایه‌گذاری دفاع، قابلیت اطمینان کل سامانه، به صورت تدریجی، کاهش می‌یابد.

به منظور انجام مطالعات بیشتر در زمینه موضوع تحقیق، می‌توان به ارائه مدل‌های مفید و ابتکاری برای ارزیابی ضرایب همبستگی در سیستم‌های پیچیده و کاملاً همبسته، پرداخت. همچنین برای تحقیقات آتی، ارائه مدلی پایدار برای تعیین استراتژی‌های تکاملی دفاع و حمله با وجود آگاهی مهاجم از همبستگی بین زیرسیستم‌ها، پیشنهاد می‌شود.

مراجع

[1] Zio E, Rocco C.M. (2008). “Security assessment in complex networks exposed to terrorist hazard: A simulation approach.” *International Journal of Critical Infrastructures*, Vol. 4, No. 1, PP. 80–95.

[2] Sandler T, Siqueira K. (2009). “Games and terrorism: recent developments.” *Simulation and Gaming*, Vol. 40, No. 2, PP. 164–192.

[3] Xinyang D, Xing Z, Xiaoyan S, Felix C , Yong H, Rehan S,Yong D. (2014). “An evidential game theory framework in multi Criteria decision making process.” *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 244, No. 1, PP.783–793.

[4] 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*, Vol. 42, No. 1, PP. 6132–6146.

[5] Hausken K. (2008). “Strategic defense and attack for reliability systems.” *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 181, No. 1, PP.1740–1750.

[6] Hausken K. (2010). “Defense and attack of complex and dependent systems.” *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 95, No. 1, PP. 29-42.

[7] Levitin G, Hausken K, Dai Y. (2014). “Optimal defense with variable number of overarching and individual protections.” *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 123, No. 1, PP. 81–90.

[8] Feller W. An introduction to probability and its application. 3rd ed. NewYork: Wiley; 1968.

[9] Xing L, Levitin G. (2013). “BDD-based reliability valuation of phased-mission systems with internal/external common-cause failures.” *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 112, No. 4, PP. 145–153.

[10] Hamill M, Goseva-Popstojanova K. (2009). “Common trends in software fault and failure data.” *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 35, No. 4, PP.484–496.

[11] Kristiansen M, Winther R, Natvig B. (2011). “A bayesian hypothesis testing approach for finding upper bounds for probabilities that pairs of software components fail simultaneously.” *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 18, No. 3, PP. 209–236.

[12] Fiondella L. (2010). “Reliability and sensitivity analysis of coherent systems with negatively correlated component failures.” *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 17, No. 5, PP. 505–529.

[13] Lin Y.K, Chang P.C, Fiondella L. (2012). “A study of correlated failures on the network reliability of power transmission systems.” *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 43, No. 1, PP. 954–960.

[14] Fiondella L, Rajasekaran S, Gokhale S. (2013). "Efficient software reliability analysis with correlated component failures." *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 62, No. 1, PP. 244–255.

[15] Frank P.C, Tahani C.M. (2015). "Predictive inference for system reliability after common-cause component failures." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 135, No. 1, PP. 27–33.

[16] Fiondella L, Xing L. (2015). "Discrete and continuous reliability models for systems with identically distributed correlated components." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 133, No. 1, PP. 1–10.

[17] 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.

[18] Fontanini W, Ferreira P.A.V. (2014). "A game-theoretic approach for the web services scheduling problem." *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, No. 1, PP. 4743–4751.

[19] Zhongping W, Lijun M, Guangmin W. (2014). "Estimation of distribution algorithm for a class of nonlinear bilevel programming problems." *Information Sciences*, Vol. 256, No. 1, PP. 184–196.

[20] Konak A, Kulturel-Konak S, Lawrence V. S. (2015). "A game-theoretic genetic a lgorithm for the reliable server assignment problem under attacks." *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 85, No. 1, PP. 73–85.

[21] Prentice R. (1986). "Binary regression using an extended beta-binomial distribution, with discussion of correlation induced by covariate measurement errors." *Journal of American Statistical Association*, Vol. 81, No. 394, PP. 321–327.