

پردازش و ادغام اطلاعات سخت و نرم در فرماندهی و کنترل سایبری

علی جبار رشیدی^۱، سعداله سبحانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۰

چکیده

کاربردهای متنوع و تاثیرات گسترده فضای سایبر در اکثر حوزه‌های کاربردی نظامی و غیرنظامی، باعث رشد سریع داده‌ها، اطلاعات، دانش، فناوری، روش‌ها، ابزارها و سامانه‌های سایبری شده است. یکی از نیازهای مهم و راهبردی در چرخه فرماندهی و کنترل در حوزه سایبری، قابلیت استخراج، پردازش، ادغام و تحلیل داده‌ها و اطلاعات از منابع گوناگون برای رسیدن به آگاهی وضعیتی مطلوب از محیط عملیات سایبری می‌باشد. با توجه به جنبه‌های گوناگون این مسئله، استفاده از داده‌های نرم یعنی داده‌ها و اطلاعات قابل ارائه توسط منابع انسانی در کنار داده‌های سخت یعنی داده‌ها و اطلاعات منابع ماشینی، می‌تواند در رسیدن به تشخیص و تصمیم دقیق‌تر و مطمئن‌تر کمک کند. از اصلی‌ترین موضوعات تحقیقاتی در این مسئله، طراحی مدل مفهومی و فرآیند پردازشی مناسب برای تحلیل و استنتاج مبتنی بر داده و اطلاعات با امکان مرتبط‌سازی اطلاعات متنوع از منابع گوناگون با یکدیگر و مدل‌سازی انواع عدم قطعیت در داده‌های سخت و نرم و ادغام این داده‌ها است.

در این مقاله یک رویکرد مبتنی بر هستان‌شناسی برای پردازش و ادغام داده‌های سخت و نرم در فرماندهی و کنترل سایبری ارائه شده است که در آن به جنبه‌های مختلف این مسئله شامل معماری و مدل فرآیندی پردازش و استنتاج اطلاعات مبتنی بر هستان‌شناسی، روش بازنمایی عدم قطعیت و قابلیت اعتماد در داده‌های سخت و نرم و ادغام این داده‌ها، تبدیل باورها به احتمالات برای امکان تصمیم‌گیری روی فرضیه‌های مورد بررسی، طراحی مدل هستان‌شناسی برای اهداف فرماندهی و کنترل سایبری، و طراحی و پیاده‌سازی منطق استنتاج و ادغام اطلاعات مبتنی بر هستان‌شناسی پرداخته شده است. نتایج به کارگیری مدل پیشنهادی در یک سناریوی نمونه از فرماندهی و کنترل سایبری، عملیاتی بودن آن را در ادغام داده‌های سخت و نرم سایبری نشان می‌دهد. علاوه بر قابلیت مناسب برای استنتاج و ادغام، یکی از ویژگی‌های قابل توجه رویکرد پیشنهادی، قابلیت توسعه و مقیاس‌پذیری آن برای تطبیق با گسترش‌های جدید در ابزارها و نیازمندی‌های فضای فرماندهی و کنترل سایبری است.

واژگان کلیدی: ادغام اطلاعات سخت و نرم، استنتاج مبتنی بر قاعده، عدم قطعیت، فرماندهی و کنترل سایبری، هستان‌شناسی.

^۱ عضو هیأت علمی (دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشیار) rashidi@mut.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۲ دانشجوی دکتری (دانشگاه صنعتی مالک اشتر) ssobhani@gmail.com

1- مقدمه

کاربردهای متنوع و تاثیرات گسترده فضای سایبر در اکثر حوزه‌های کاربردی نظامی و غیرنظامی، باعث رشد سریع داده‌ها، اطلاعات، دانش، فناوری، روش‌ها، ابزارها و سامانه‌های سایبری شده است. یکی از نیازهای مهم و راهبردی در چرخه فرماندهی و کنترل در حوزه سایبری، قابلیت استخراج، پردازش، ادغام و تحلیل داده‌ها و اطلاعات از منابع گوناگون برای رسیدن به آگاهی وضعیتی مطلوب از محیط عملیات سایبری می‌باشد. به محض آشکار شدن یک هشدار حمله یا نفوذ توسط حسگرهای امنیتی، فرمانده یا تحلیلگر سایبری باید بتواند به اطلاعات و دانش مختلفی از آن حمله یا نفوذ، از قبیل ضعف‌ها و آسیب‌پذیری‌های مورد استفاده توسط حمله، پیامدهای احتمالی حمله، و روش‌های مقابله یا کم اثر کردن حمله دسترسی پیدا کند.

با توجه به جنبه‌های مختلف این مسئله، در کنار استفاده از داده‌ها و اطلاعات منابع ماشینی، داده‌ها و اطلاعات قابل ارائه توسط منابع انسانی می‌تواند در رسیدن به تشخیص و تصمیم دقیق‌تر و مطمئن‌تر کمک کند. این منابع انسانی شامل کاربران عادی، کارشناسان و تحلیل‌گرهای امنیتی و فرماندهان صحنه سایبری می‌تواند باشد.

انواع داده‌ها و اطلاعات ورودی قابل استفاده در سامانه‌های ادغام² اطلاعات به دو دسته کلی داده‌های سخت و داده‌های نرم³ تقسیم بندی می‌شود. داده‌های سخت به داده‌ها و اطلاعات بدست آمده از حسگرهای ماشینی و داده‌های نرم به داده‌ها و اطلاعات بدست آمده از منابع انسانی گفته می‌شود [2]. در حوزه فضای فرماندهی و کنترل سایبری، داده‌های نرم شامل موارد کلی زیر می‌تواند باشد:

- گزارش کاربران یا مدیران شبکه از فعالیت‌ها و رخدادهای مشکوک و یا وضعیت عادی یا غیرعادی
- درای‌های سایبری در فضای تحت دسترسی خود
- اظهارنظر یک کارشناس یا تحلیل‌گر نسبت به متغیرهایی

از فضای سایبری مورد بررسی

- اظهارنظر یک کارشناس یا تحلیل‌گر نسبت به قابلیت اعتماد یک منبع داده یا اعتبار نتایج یک پردازش داده‌های نرم می‌تواند اطلاعات بدست آمده از داده‌های سخت را تأیید یا تکمیل کند. مثلاً گزارش مدیر شبکه مبنی بر کند شدن عملکرد سرور، احتمال وقوع یک حمله را که از روی داده‌های سخت بدست آمده، تقویت می‌کند. یا اینکه در یک سناریوی حمله، ممکن است برخی گام‌های حمله به خاطر استفاده مهاجم از یک مجوز تعریف شده، تشخیص داده نشود و گزارش کاربر مبنی بر فعالیت‌های غیرنرمال در صفحه کاربری‌اش، می‌تواند اطلاعات موردنیاز برای تشخیص حمله را تکمیل کند.

هر کدام از داده‌های سخت و داده‌های نرم و منابع آنها دارای ویژگی‌های خاص خود است و انواع مختلفی از عدم قطعیت و ناکاملی اطلاعات می‌تواند در آنها وجود داشته باشد. با توجه به این تفاوت‌ها ادغام داده‌های نرم با داده‌های سخت دارای مشکلات و چالش‌های خاصی هم در سطح معماری و هم در سطح تکنیک‌ها و الگوریتم‌ها است. از جمله اینکه با توجه به تنوع منابع اطلاعاتی و گوناگونی دانش و اطلاعات مورد استفاده، لازم است چارچوب و فرآیندی برای استنتاج و ادغام اطلاعات طراحی و پیاده سازی شود که بتواند بستر مورد نیاز برای مرتبط سازی اقلام اطلاعاتی مختلف با یکدیگر و مدل‌سازی منطق استنتاج لازم برای پاسخگویی به پرسش‌ها و نیازهای اطلاعاتی تحلیل‌گر یا فرمانده سایبری را فراهم کند.

در کار قبلی از همین نویسندگان [1]، به ارائه یک چارچوب مبتنی بر هسته‌شناسی برای ادغام داده‌های سخت و نرم در تحلیل امنیت سایبری پرداخته شده است که در آن از هسته‌شناسی همراه با قواعد استنتاج مبتنی بر آن، برای مدل کردن مفاهیم و متغیرهای مسئله و استنتاج وضعیت بر اساس داده‌های دریافتی استفاده شده است. در این مقاله با تکمیل و توسعه کار قبلی برای کاربرد فرماندهی و کنترل سایبری، به موضوعات و چالش‌های مختلف مسئله ادغام داده‌های سخت و نرم پرداخته

³Hard data and Soft data²Fusion

شده است که شامل موارد زیر می‌باشد:

- ارائه معماری و مدل فرآیندی مبتنی بر هستان‌شناسی برای پردازش، استنتاج و ادغام اطلاعات
- بازنمایی یکپارچه انواع متنوع عدم قطعیت در داده‌های سخت و نرم و ادغام این داده‌ها
- در نظر گرفتن قابلیت اعتماد منابع داده‌ها در فرآیند ادغام
- تبدیل باورها به احتمالات برای امکان تصمیم‌گیری روی فرضیه‌های مورد بررسی
- طراحی مدل هستان‌شناسی برای اهداف فرماندهی و کنترل سایبری
- طراحی و پیاده‌سازی منطق استنتاج و ادغام اطلاعات برای پاسخگویی به پرسش‌ها و نیازهای اطلاعاتی تحلیل‌گر یا فرمانده سایبری.

2- کلیات

2-1. سابقه تحقیقات

در تحقیقات مختلفی از جمله [3]، [4]، [5]، [6] و [7]، به اهمیت استفاده از داده‌های نرم در کنار داده‌های سخت، چالش‌های ادغام این داده‌ها و ارائه راهکار در این زمینه پرداخته شده است. در [1] با بررسی این تحقیقات، به مقایسه آنها از جنبه‌های مختلف از جمله مسئله مورد بررسی، معماری طراحی شده برای پردازش و ادغام اطلاعات و چارچوب نظری انتخابی برای مدل‌سازی عدم قطعیت و ادغام داده‌ها پرداخته شده است. در تحقیقات اخیر نیز موضوع بهره‌گیری از داده‌های سخت و نرم در کنار هم و ادغام و یکپارچه‌سازی آنها در کاربردهای مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله در [16] به ادغام داده‌ها از منابع مختلف سخت و نرم در مدیریت شرایط اضطراری با هدف بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و بهره‌وری منابع پرداخته شده است. در [17] ادغام تصمیمات انسان و ماشین در شناسایی بیومتریک حساس به هزینه مورد بررسی قرار گرفته و برای مسئله شناسایی امضاء دستی روی چک‌های بانکی با هدف کمینه کردن هزینه‌های تشخیص اشتباه، از نیروی خبره انسانی در کنار یک ماشین تولید کننده امتیاز بهره گرفته شده

است. برای ادغام تصمیم‌ها از روش ترکیب طبقه‌بندها مبتنی بر رأی اکثریت و عملگرهای منطقی ترکیب استفاده شده است. در [18] یک چارچوب استدلالی مبتنی بر نظریه دمپستر-شفر برای ادغام داده‌ها و تصمیم‌گیری در حل مسئله بهره‌وری انرژی در بناهای تاریخی ارائه شده است. مدل ارائه شده، داده‌های سخت از قبیل مدل‌های انرژی و پیش‌بینی‌های اقتصادی و داده‌های نرم شامل نظرات انسانی در بررسی فاکتورهای سیاسی-اقتصادی را برای ارزیابی گزینه‌های تصمیم به کار گرفته است.

با توجه به بررسی صورت گرفته، محدودیت‌ها و کاستی‌های زیر در تحقیقات پیشین ادغام داده‌های سخت و نرم وجود دارد:

- ضعف در ارائه یک چارچوب یا ساختار مفهومی برای مدل‌سازی مفاهیم و متغیرهای مسئله و روابط بین آنها
- مناسب بودن چارچوب ادغام ارائه شده برای مسائل محدود با ویژگی‌های خاص: مثلاً شبکه‌های بیزین فازی (یکی از روش‌های مورد استفاده در تحقیقات پیشین)، برای حل مسائلی که دارای متغیرهای محدود با روابط احتمالاتی بین آنها بوده و دانش پیشین در مورد احتمالات وجود داشته باشد، مناسب است.

بنابراین از بررسی تحقیقات پیشین، نیاز به ارائه یک چارچوب و روش ادغام داده‌های سخت و نرم مناسب برای مسئله فرماندهی و کنترل سایبری احساس می‌شود. در این مقاله به ارائه یک راهکار مبتنی بر هستان‌شناسی برای پردازش و ادغام داده‌های سخت و نرم در مسئله فرماندهی و کنترل سایبری پرداخته شده است. در کارهای قبلی در حوزه ادغام داده‌های سخت و نرم، از هستان‌شناسی به عنوان ابزاری برای مدل‌سازی مفهومی مسئله و مبنای مرتبط‌سازی و ادغام داده‌ها استفاده نشده است.

از طرف دیگر در حوزه‌های مرتبط با فرماندهی و کنترل سایبری و آگاهی وضعیتی سایبری، تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است که بر اساس هدف‌گذاری و رویکرد اصلی این مقاله یعنی استنتاج مبتنی بر هستان‌شناسی، به برخی از آنها اشاره می‌شود. بر اساس [1]، یک نیازمندی مهم در کسب آگاهی وضعیتی سایبری با استفاده از منابع داده‌ای مختلف، طراحی یک

پردازش و ادغام اطلاعات سخت و نرم در فرماندهی و کنترل سایبری

کاستی اصلی مرتبط با موضوع این پژوهش، در تحقیقات پیشین آگاهی وضعیتی سایبری، استفاده ناکافی از داده نرم در کنار داده‌های سخت است. همچنین در رویکردهای مبتنی بر هستان‌شناسی ارائه شده در این حوزه، به موضوع ادغام داده‌ها و شواهد از منابع چندگانه و به ویژه با عدم قطعیت‌های متنوع، در فرآیند استنتاج و تخمین وضعیت سایبری، خوب پرداخته نشده است.

2-2. مفاهیم و داده‌ها در فرماندهی و کنترل سایبری

فرماندهی و کنترل سایبری بصورت کلی شامل کسب آگاهی لازم از وضعیت فضای سایبری مورد بررسی و گرفتن تصمیم مناسب برای اقدام در جهت امن سازی یا مقاوم سازی فضای سایبری خودی، مقابله با حملات و تهدیدات سایبری دشمن، و یا اهداف تعیین شده دیگر است. رسیدن به این مطلوب، نیازمند شناسایی به موقع حملات و تهدیدها روی دارایی‌های حیاتی یک سازمان یا یک شبکه، بدست آوردن تخمینی از وضعیت امنیت و کارکرد کل شبکه یا عناصری از آن مثلاً وضعیت امنیتی یک سرویس خاص، شناخت کافی از اهداف و انگیزه‌های دشمن و روش‌ها و ابزارهای مورد استفاده برای حمله و همچنین شناخت کافی از گزینه‌های در دسترس برای رفع، کاهش اثر و مقابله با حملات سایبری است.

فرماندهی و کنترل سایبری دارای جنبه‌های مختلف و مفاهیم متنوعی است. یک جنبه از آن شامل اهداف و عملکردهای مورد انتظار، انواع اطلاعات و دانش مرتبط با حوزه و فرآیندهای عملیاتی لازم می‌باشد. جنبه دیگری از آن به روش‌ها و ابزارهای قابل استفاده برای کسب اطلاعات و شناخت لازم از محیط عملیات سایبری و همچنین تأثیرگذاری در این محیط مربوط می‌شود. جنبه دیگر به نحوه ارزیابی از میزان رسیدن به اهداف و انتظارات تعیین شده اشاره دارد. یکی از مفاهیم نظری و فنی مرتبط با جنبه‌های فوق، مفهوم آگاهی وضعیتی سایبری است. در ادامه به برخی از این جنبه‌ها و مفاهیم پرداخته می‌شود.

یکی از جنبه‌های این مسئله، مفاهیم مطرح در این حوزه و

مدل مفهومی یکپارچه از مفاهیم و موجودیت‌های فضای مسئله است. با توجه به قابلیت‌ها و مزایایی که هستان‌شناسی در مدل کردن مفاهیم مسئله و نمایش دانش حوزه دارد، توسعه یک هستان‌شناسی امنیت، یک راه‌حل ممکن برای این نیازمندی است. در این زمینه در کارهای تحقیقاتی مختلفی از جمله [8]، [9]، [10] و [11] از هستان‌شناسی و قواعد استنتاج مبتنی بر آن، برای اهداف و کاربردهای آگاهی وضعیتی سایبری از قبیل رده‌بندی خودکار آسیب‌پذیری‌ها و هشدارهای حمله، مدل کردن اطلاعات و عملیات سامانه‌های مدیریت اطلاعات و رخدادهای امنیتی، تعیین خط‌مشی‌های امنیتی، تشخیص نفوذ، ارزیابی امنیتی شبکه و سامانه‌های کامپیوتری و ارزیابی تأثیر حمله روی سامانه‌ها استفاده شده است.

در [12] به عنوان محصول یک تلاش مشارکتی برای تعریف و توسعه یک زبان استاندارد برای نمایش ساخت یافته اطلاعات تهدیدهای سایبری، معماری و زبان STIX⁴ ارائه شده است. این معماری و زبان، امکان توصیف و مشخص‌سازی اطلاعات موردنیاز برای کاربردهایی از قبیل تجزیه و تحلیل تهدیدهای سایبری، مدیریت فعالیت‌های واکنشی و مقابله‌ای و به اشتراک‌گذاری اطلاعات را فراهم می‌کند. در [13] بر اساس استانداردها و طبقه‌بندی‌های موجود از مفاهیم امنیت سایبری، هستان‌شناسی امنیت سایبری برای مدل کردن یکپارچه اطلاعات و دانش تهدید طراحی و ارائه شده است. سپس بر اساس هستان‌شناسی طراحی شده، یک چارچوب یکپارچه‌سازی اطلاعات تهدید به همراه الگوریتم تبدیل داده مورد نیاز ارائه شده است. چارچوب ارائه شده، امکان نمایش و ذخیره‌سازی یکپارچه و به اشتراک‌گذاری انواع مختلف اطلاعات تهدید از منابع چندگانه را فراهم می‌کند. در [14] یک رویکرد مبتنی بر هستان‌شناسی برای ساختن شبکه‌های بیزین ارائه شده است. با توجه به اینکه هستان‌شناسی امنیت دانش لازم را در مورد مفاهیم مختلف حوزه امنیت و ارتباط بین این مفاهیم فراهم می‌کند، این دانش می‌تواند در ساختن شبکه بیزین برای تعیین احتمال تهدید به کار گرفته شود.

⁴Structured Threat Information eXpression

- میزان پیچیدگی ابزارها و روش‌های مورد استفاده برای حمله و نفوذ
- مقدار تجمعی نمره آسیب‌پذیری‌های بهره‌کشی شده در حمله
- مقدار تخمینی از سطح آسیب بالقوه یا بالفعل حمله
- مقدار تخمینی برای انگیزه و نیت مهاجم
- تخمینی از میزان پیشرفت یا موفق شدن حمله در رسیدن به اهداف احتمالی آن (مثلا میزان جلو رفتن در گام‌های زنجیره حمله)
- سطح آسیب‌پذیری یک سیستم یا سرویس در مقابل حملات مشخص
- احتمال به خطر افتادن یک میزبان بر اساس هشدارهای نفوذ و آسیب‌پذیری مرتبط با آن میزبان
- میزان بحرانی بودن وضعیت امنیت یا کارایی یک سرور یا کل شبکه
- میزان از دست رفتن امنیت یک سرور بر اساس تأثیر حمله روی وجوه امنیت (CIA)
- میزان به خطر افتادن شبکه بر اساس تعداد میزبان‌ها و سرویس‌های به خطر افتاده و اهمیت سرویس‌ها
- احتمال وقوع یک حمله مشخص بر روی یک سرور
- پیشنهاد یک راهکار مقابله برای پیشگیری یا رفع اثر یک حمله
- پیشنهاد پیاده‌سازی یک سیاست امنیتی برای مقاوم‌سازی یک زیرساخت

2-3. مدل باور انتقال پذیر

مدل باور انتقال پذیر⁵ (TBM) توسعه‌ای از نظریه شواهد دمپستر-شفر⁶ است. نظریه دمپستر-شفر مدل‌های مختلفی را

ارتباط معنایی بین آنهاست. بر اساس دانش ارائه شده از حوزه امنیت سایبری، یک آسیب‌پذیری موجود در یک مقصد، می‌تواند توسط یک حمله به کار گرفته شود که موجب به خطر افتادن مقصد و آسیب دیدن یک ویژگی امنیت از قبیل محرمانگی، یکپارچگی و دسترس‌پذیری منابع شود. حسگرهای شبکه از قبیل سامانه تشخیص نفوذ، پوششگر آسیب‌پذیری، و دیواره آتش، رخدادهای مشکوک را با تجزیه و تحلیل اطلاعات بر اساس پیکربندی و آسیب‌پذیری‌های سیستم و شبکه کشف می‌کنند و بر اساس آن، هشدارهایی را تولید می‌کنند.

انواع داده‌ها در فرماندهی و کنترل سایبری

داده‌ها و اطلاعات پردازشی شامل داده‌های ورودی، نتایج میانی پردازش‌ها و نتایج نهایی هستند. نمونه‌هایی از این داده‌ها و اطلاعات در محیط عملیات سایبری و فضای مسئله این تحقیق، شامل موارد زیر خواهد بود:

- اطلاعاتی از دارایی‌ها و آسیب‌پذیری‌های آنها
 - وجود یک آسیب‌پذیری در یک سرویس
 - گزارش‌هایی از فعالیت‌ها و رخدادهای شناسایی شده و وضعیت دارایی‌ها
 - گزارش یک فعالیت مشکوک یا یک اقدام نفوذ و حمله در شبکه
 - به خطر افتادن یک میزبان یا سرویس
 - گام‌های حمله یا سناریوهای حمله شناسایی شده
 - اطلاعات و دانش از راهکارهای مقابله با تهدیدات
 - سیاست‌های امنیتی مناسب برای مقاوم‌سازی یک زیرساخت
 - وصله‌های امنیتی منتشر شده برای رفع آسیب‌پذیری‌های مشخص
 - اقدامات واکنشی مناسب برای مقابله با حملات مشخص
 - نتایج پردازش‌ها که شامل اطلاعات سطح بالاتر از حمله یا وضعیت دارایی‌ها است

⁶Desmpster-Shafer theory of Evidence

⁵Transferable Belief Model

پردازش و ادغام اطلاعات سخت و نرم در فرماندهی و کنترل سایبری

که در آن 2^Ω به مفهوم تمام زیرمجموعه‌های ممکن Ω است. کمیت $m(A)$ که جرم A نامیده می‌شود، درجه اطمینان از رخداد خود پیشامد A و نه هیچ زیرمجموعه مشخص دیگر آن است.

تابع باور: تابع مجموعه‌ای $Bel: 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$ را تابع باور گویند اگر دارای شرایط زیر باشد:

$$\begin{aligned} Bel(\emptyset) &= 0 \\ Bel(\Omega) &= 1 \\ Bel(A_1 \cup A_2 \dots \cup A_n) \\ &\geq \sum_{i=1}^n Bel(A_i) - \sum_{i>j}^n Bel(A_i \cap A_j) \\ &\quad - (-1)^n Bel(A_1 \cap A_2 \dots \cap A_n) \end{aligned}$$

مقدار $Bel(A)$ درجه باوری است که بر پایه اطلاعات و شواهد موجود، به رخدادن پیشامد A داده می‌شود. برای هر مجموعه $A \subseteq \Omega$ داریم:

$$Bel(A) = \sum_{X \subseteq A} m(X)$$

یعنی باور اختصاص یافته به مجموعه $A \subseteq \Omega$ برابر با مجموع جرم تمام زیرمجموعه‌های آن است.

همچنین بین تابع جرم و تابع باور رابطه زیر برقرار است:

$$m(A) = \sum_{X|X \subseteq A} (-1)^{|A-X|} Bel(X)$$

تابع امکان‌پذیری یا **موجه‌نمایی:** تابع مجموعه‌ای $Pl: 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$ را تابع امکان‌پذیری⁴ گویند اگر شرایط زیر را داشته باشد:

$$\begin{aligned} Pl(\emptyset) &= 0 \\ Pl(\Omega) &= 1 \\ Pl(A_1 \cap A_2 \dots \cap A_n) \\ &\leq (-1)^n Pl(A_1 \cup A_2 \dots \cup A_n) \\ &\quad + \sum_{i>j}^n Pl(A_i \cup A_j) - \sum_{i=1}^n Pl(A_i) \end{aligned}$$

درواقع $Pl(A)$ درجه اطمینانی است که برای رخدادن دقیقاً

پوشش می‌دهد که همگی از توابع باور⁷ بهره می‌برند. هدف این مدل‌ها و مدل باور انتقال پذیر، مدل کردن درجه باور⁸ افراد است، و درجه باور میزان یا درجه موافقت آن‌ها در مورد یک موضوع را نشان می‌دهد. مدل باور انتقال پذیر، بر اساس دو سطح توسعه یافته است که در یک سطح آن با نام سطح عقیدتی⁹ به مدل کردن درجه باور منابع مختلف نسبت به فرضیه‌های مورد بررسی و ترکیب این باورها می‌پردازد و در سطح دوم که سطح شرط‌بندی¹⁰ نامیده می‌شود، مقادیر باور به مقادیر احتمال تبدیل و به عبارت دیگر منتقل می‌شود تا در فرآیند تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرد [15].

درواقع، در مدل باور انتقال پذیر، یک مدل ذهنی دو سطحی جهت تمایز میان دو جنبه از باورها لحاظ شده است: باورها به‌عنوان تفکرات وزن‌دار، و باورها برای تصمیم‌گیری. باورها در سطح عقیدتی با استفاده از توابع باور مقدار می‌گیرد و ممکن است مقدار آن‌ها اصلاح شود، و زمانی که تصمیمی باید اتخاذ شود، یک انتقال شرط‌بندی¹¹ از توابع باور به توابع احتمال صورت می‌گیرد، که حاصل آن احتمالات شرط‌بندی نامیده می‌شود. احتمالات شرط‌بندی باورها را نمایش نمی‌دهد بلکه توسط آن‌ها برانگیخته می‌شود.

در ادامه به شرح مفاهیم و توابع مورد استفاده در این مدل پرداخته می‌شود.

تعاریف پایه

تابع جرم: یک مجموعه غیر تهی متناهی در نظر بگیرید که آن را چارچوب تشخیص¹² می‌نامند و با نماد Ω نشان می‌دهند. تابع $m: 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$ را تابع جرم یا تخصیص باور پایه¹³ گویند، اگر دارای شرایط زیر باشد:

$$\begin{aligned} m(\emptyset) &= 0 \\ \sum_{A \subseteq \Omega} m(A) &= 1 \end{aligned}$$

¹Pignistic transformation

¹Frame of discernment

¹Basic belief assignment (bba)

¹Plausibility function

⁷Belief functions

⁸Degree of belief

⁹Credal level

¹Pignistic level

$$m_{1,2}(A) = \sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C)$$

انتقال شرط بندی

در صورتی که بخواهیم براساس باورهایی که به دست آمده است تصمیم گیری کنیم، باید توابع باوری که در سطح عقیدتی ایجاد شده اند را به توابع احتمال نگاشت کنیم. در مدل باور انتقال پذیر، عملیات نگاشت از تابع باور به تابع احتمال، تحت عنوان انتقال شرط بندی انجام می شود و تابع احتمال نتیجه با نمایش **BetP** یک احتمال شرط بندی نامیده می شود که اندازه احتمال برای اتخاذ تصمیم است. مقدار **BetP** به ازای هر عضو ω از Ω به صورت زیر بدست می آید.

$$BetP(\omega) = \sum_{A: \omega \in A \in \mathcal{R}} \frac{m(A)}{|A|(1 - m(\emptyset))}$$

3- راه حل پیشنهادی

راه حل پیشنهادی برای مسئله طرح شده شامل سه جنبه است: جنبه اول آن مربوط به نحوه مدل سازی مفهومی از مسئله است، جنبه دوم راه حل، مربوط به طراحی معماری و چارچوب فرآیندی پردازش، استنتاج و ادغام داده ها است، و جنبه سوم شامل نظریه و مدل انتخابی برای نحوه بازنمایی و ادغام داده ها با انواع متنوع عدم قطعیت است.

راه حل انتخابی برای مدل سازی مفهومی مسئله، استفاده از مدل هستان شناسی است. هستان شناسی یک دید ساختارمند از مفاهیم موجود در یک حوزه و روابط معنایی بین مفاهیم را فراهم می کند. همچنین با استفاده از عناصر دیگری شامل پایگاه دانش، قواعد منطق یا استنتاج، و زبان های پرس و جو، که مبتنی بر هستان شناسی ساخته می شوند، می توان به استدلال و استنتاج روی داده ها و اطلاعات پرداخت. بنابراین طرح کلی مدل پیشنهادی بر این اساس است که از هستان شناسی به عنوان زبانی برای توصیف و مدل سازی مفاهیم مورد استفاده در کاربرد فرماندهی و کنترل سایبری بهره گرفته شده است.

پیشامد A و یا هر پیشامد دیگری که با A اشتراکی دارد، قائل می شویم. برای هر مجموعه $A \subseteq \Omega$ داریم:

$$Pl(A) = \sum_{X \cap A \neq \emptyset} m(X)$$

عملیات کاستن باور

در مدل باور انتقال پذیر در صورتی که باور شما نسبت به قابل اعتماد بودن یک منبع داده کامل نباشد، می توان مقادیر تابع جرم متناظر با داده آن منبع را متناسب با میزان قابل اعتماد بودن منبع، پایین آورد. با فرض اینکه $\alpha \leq 1$ میزان باور شما نسبت به قابل اعتماد بودن منبع داده باشد، مقادیر جدید تابع جرم، با اعمال عملگر کاستن باور¹⁵، مطابق رابطه زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned} m^*(A) &= \alpha * m(A) \quad A \neq \Omega \\ m^*(\Omega) &= \alpha * m(\Omega) + (1 - \alpha) \end{aligned}$$

قاعده ترکیب دمپستر و شفر

در صورتی که چندین مجموعه شواهد از منابع مختلف برای یک موضوع ارائه شده باشد، می توانیم با استفاده از قواعد و عملگرهای ترکیب معرفی شده، آنها را با یکدیگر ترکیب کنیم تا باور پایه در مورد شواهد مجموعه مشترک آن ها به دست آید. با فرض اینکه $m_1(\cdot)$ و $m_2(\cdot)$ توابع جرم متناظر با مجموعه شواهد دو منبع مستقل از هم در چارچوب تشخیص Ω باشند، بر اساس قاعده ترکیب دمپستر-شفر¹⁶ تابع جرم ترکیبی برای هر مجموعه $A \subseteq \Omega$ با استفاده از رابطه زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned} m_{1,2}(A) &= [m_1 \oplus m_2](A) \\ &= \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C)}{1 - \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C)} \quad A \neq \phi \end{aligned}$$

در رابطه فوق، عبارت $\sum_{B \cap C \neq \emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C)$ در مخرج کسر نشان دهنده میزان عدم توافق یا ناسازگاری در دو مجموعه از شواهد است. مخرج کسر برای نرمال سازی مقادیر جرم ترکیبی استفاده می شود.

در مدل باور انتقال پذیر برای بدست آوردن ترکیب عطفی¹⁷ چند مجموعه شواهد، فرآیند نرمال سازی وجود ندارد، بنابراین از رابطه زیر استفاده می شود:

¹Conjunctive combination

¹⁵Discounting

¹⁶Dempster-Shafer rule of combination

زبان استاندارد برای نوشتن قوانین مبتنی بر هستان‌شناسی در وب معنایی است.

مؤلفه «پایگاه دانش آسیب‌پذیری‌ها، حملات و راهکارهای مقابله»، دربرگیرنده انواع مختلف اطلاعات و دانش موجود در زمینه امنیت سایبری از قبیل اطلاعات ضعف‌ها و آسیب‌پذیری‌های کشف شده، الگوهای حملات، ابزارها و بدافزارهای مرتبط، وصله‌های امنیتی برای رفع آسیب‌پذیری‌ها، و انواع مختلف روش‌ها و راهکارهای مقابله و کاهش اثر تهدیدها خواهد بود. این پایگاه دانش با توجه به تنوع ساختارهای دانش قابل استفاده، ساختار و قالب بومیایی باید داشته باشد.

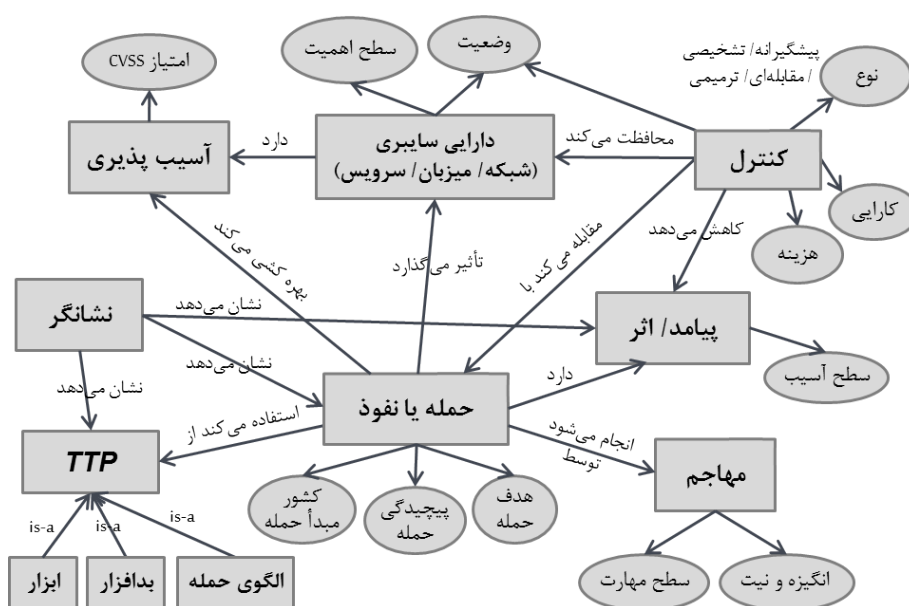
مؤلفه «مخزن اطلاعاتی شبکه/تهدیدات/کنترل‌ها»، پایگاه اطلاعاتی موتور استنتاج است و اطلاعات پیکربندی شبکه، آسیب‌پذیری‌های شناسایی شده در شبکه، هشدارهای حمله و نفوذ گزارش شده، کنترل‌های پیاده شده و همچنین اطلاعات وضعیتی شبکه و سرویس‌ها در آن ذخیره شده و در مراحل دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مؤلفه «تولید نمونه هستان‌شناسی برای کاربرد/سناریوی مورد بررسی»، بر اساس مدل هستان‌شناسی طراحی شده و اطلاعات مورد استفاده سناریوی مورد بررسی، نمونه هستان‌شناسی متناظر با آن را تولید می‌کند. نمونه هستان‌شناسی

2-3. مدل هستان‌شناسی طراحی شده برای کاربرد فرماندهی و کنترل سایبری

مدل هستان‌شناسی بر اساس اهداف تعیین شده برای مسئله و دانش حوزه طراحی می‌شود. بر اساس مفهوم شناسی صورت گرفته از حوزه فرماندهی و کنترل سایبری، هستان‌شناسی مورد استفاده برای اهداف این تحقیق، مطابق شکل (2) طراحی شده است.

مؤلفه «تولید نمونه هستان‌شناسی برای کاربرد/سناریوی مورد بررسی»، بر اساس مدل هستان‌شناسی طراحی شده و اطلاعات مورد استفاده سناریوی مورد بررسی، نمونه هستان‌شناسی متناظر با آن را تولید می‌کند. نمونه هستان‌شناسی



شکل 2. مدل هستان‌شناسی طراحی شده برای اهداف فرماندهی و کنترل سایبری.

پردازش و ادغام اطلاعات سخت و نرم در فرماندهی و کنترل سایبری

این هستان‌شناسی شامل کلاس‌های «دارایی سایبری»، آسیب‌پذیری، «حمله یا نفوذ»، TTP، «پیامد یا اثر حمله»، مهاجم، نشانگر و کنترل است. هر کدام از این کلاس‌ها دارای خصیصه‌هایی هستند، مثلاً کلاس حمله دارای خصیصه‌های پیچیدگی حمله و هدف حمله است و کلاس مهاجم دارای خصیصه‌های «انگیزه و نیت» و «سطح مهارت» است.

کلاس TTP نشان دهنده مجموعه روش‌ها و ابزارهای مورد استفاده برای به انجام رساندن حمله بوده و شامل زیرکلاس‌های الگوی حمله، بدافزار و ابزار است. کلاس پیامد نشان دهنده هرگونه اثر، آسیب، خسارت و نتایج غیرمجاز حمله از جمله اختلال و خرابی در کارکرد دارایی‌ها، نقض محرمانگی و صحت داده‌ها، و آسیب به دسترس‌پذیری سرویس‌ها می‌باشد. کلاس نشانگر شامل هرگونه نشانه از به وقوع پیوستن یک حمله یا فعالیت مشکوک در فضای مورد بررسی و همچنین نشانه‌های مشاهده شده از آثار و پیامدهای حمله است.

کلاس کنترل در مدل هستان‌شناسی طراحی شده، به مجموعه سیاست‌ها، راهبردها و اقداماتی اشاره دارد که در جهت حفظ اهداف طرح ریزی شده برای سازمان یا شبکه خودی و مقابله با اهداف دشمن قابل پیاده کردن است. این کنترل‌ها به دسته‌های مختلفی از جمله موارد زیر قابل شکستن است: کنترل پیشگیرانه مثلاً یک سیاست در مورد رفع آسیب‌پذیری‌های کشف شده در سریع‌ترین زمان ممکن، کنترل تشخیصی مثلاً استفاده از ابزارهای لازم برای شناسایی جزئیات یک حمله انجام شده، کنترل مقابله‌ای مثلاً بستن ترافیک برخی از مسیرهای شبکه برای جلوگیری از انتشار حمله، کنترل ترمیمی، و کنترل کاهش مخاطره مثلاً پشتیبان‌گیری به موقع از اطلاعات حساس.

گزاره‌هایی که نشانگر اطلاعات دریافتی یا حاصل استنتاج‌ها هستند، مبتنی بر هستان‌شناسی طراحی شده خواهند بود. نمونه‌هایی از گزاره‌های مبتنی بر هستان‌شناسی در فضای فرماندهی و کنترل سایبری بر اساس اطلاعات ورودی یا نتایج پردازش‌ها شامل موارد زیر است:

- اطلاعات دارایی‌های سایبری فضای مورد بررسی
- o وجود نمونه‌هایی از کلاس دارایی سایبری، مثلاً

گزاره Asset(?host1) برای بیان وجود میزبان host1 به عنوان یک دارایی.

- خروجی‌های پوششگر آسیب‌پذیری
 - o وجود نمونه‌هایی از کلاس آسیب‌پذیری
 - o وجود یک رابطه بین نمونه‌ای از کلاس دارایی با نمونه‌ای از کلاس آسیب‌پذیری، مثلاً گزاره hasVuln(?host1,?vul1) برای بیان وجود آسیب‌پذیری vul1 در دارایی host1
- خروجی ابزارهای امنیتی مورد استفاده مثل IDS و دیواره آتش
 - o وجود نمونه‌ای از کلاس حمله یا نفوذ
 - o وجود نمونه‌ای از کلاس TTP
 - o وجود نمونه‌ای از کلاس پیامد حمله
 - o وجود یک رابطه بین نمونه‌ای از کلاس حمله با نمونه‌هایی از کلاس‌های دیگر
- نتایج پردازش‌ها و استنتاج‌ها
 - o مشخص کردن یک مقدار برای صفت انگیزه و نیت مهاجم
 - o مشخص کردن یک مقدار برای شدت یا پیچیدگی حمله
 - o مشخص کردن یک مقدار برای صفت وضعیت یک دارایی

3-3. منطق استنتاج

برای اینکه از داده‌ها و اطلاعات ذخیره شده در یک نمونه هستان‌شناسی، به نتایج موردنیاز مسئله برسیم، نیاز به طراحی منطق استنتاج داریم. منطق استنتاج طراحی شده دارای سه جنبه است: استفاده از قواعد استنتاج برای نتیجه گرفتن گزاره‌های جدید بر اساس گزاره‌های موجود، بازیابی اطلاعات خاص از هستان‌شناسی مبتنی بر نیازهای تعیین شده، و گنجاندن توابع و عملگرهای ادغام در فرآیند استنتاج. در ادامه نحوه پرداختن به این جنبه‌ها در راهکار پیشنهادی مقاله بیان شده است.

در استدلال مبتنی بر هستان‌شناسی از دو زبان پایه برای

?at1), related_to(?x,?a1)

→ compromised(?a1, 0.7)

با ادغام میزان احتمال یا قطعیتی که در کنار استنتاجها وجود دارد، می توان به اطمینان و قطعیت بیشتری برای نتیجه مشتق شده (در این مثال، حالت به مخاطره افتادن دارای a1) دست پیدا کرد.

همانطور که گفته شد، در استدلال مبتنی بر هستان شناسی، یک نیاز دیگر، ارائه پرس و جوهای بازیابی اطلاعات از هستان شناسی است و از زبان SPARQL برای این هدف استفاده می شود. SPARQL زبان پرس و جو برای وب معنایی است و امکان استخراج اطلاعات استنتاجی مورد نیاز از روی اطلاعات ذخیره شده در هستان شناسی را فراهم می کند. در این مقاله از این زبان برای جواب دادن به برخی نیازهای اطلاعاتی منطق استنتاج استفاده شده است. نمونه ای از کد نوشته شده با زبان SPARQL بصورت زیر است که در آن برای حملات ذخیره شده در هستان شناسی با در نظر گرفتن آسیب پذیری های بهره کشی شده توسط هر حمله، بیشترین امتیاز cvss آسیب پذیری را تعیین می کند. این مقدار در فرمول های تعیین پیچیدگی حمله قابل استفاده است.

```
select ?attack (max(?cvss_score) as
?max_vul_cvss_score) where {
    ?attack exploits ?vulnerability .
    ?vulnerability has ?cvss_score .
}
group by ?attack
```

3-4. ادغام داده های سخت و نرم

ادغام داده ها و اطلاعات در فضای مسئله این تحقیق، صورت های مختلفی دارد. یک شکل آن در واقع بر اساس یک قاعده استنتاج صورت می گیرد. یعنی وقتی داده ها و شواهدی که مربوط به متغیرهای مختلفی از مسئله هستند و با برقرار بودن شرایط تعیین شده در بدنه یک قاعده استنتاج به ازای داده های موجود، یک داده جدید نتیجه گرفته می شود، در واقع نوعی ادغام داده صورت گرفته است. ولی صورت اصلی ادغام داده ها در مسئله این تحقیق، مربوط به ادغام داده ها و شواهد متناظر با یک متغیر یا فرضیه است که در ادامه بصورت کامل بیان می شود.

طراحی و بیان منطق استنتاج بهره گرفته می شود: زبان SWRL برای بیان قواعد استنتاج، و زبان SPARQL برای بیان پرس و جوهای بازیابی اطلاعات. SWRL یک زبان استاندارد برای نوشتن قواعد استنتاج مبتنی بر هستان شناسی در وب معنایی است. یک قاعده استنتاج شامل بدنه و نتیجه است که بدنه قاعده شامل گزاره های مرتبط با داده ها و گزاره های استنتاج شده ی مراحل قبلی است که با عملگرهای عطفی و فصلی باهم ترکیب می شوند و نتیجه قاعده، گزاره استنتاجی جدید است. در ادامه بر اساس چند مثال از فضای سایبری، نحوه به کارگیری قواعد استنتاج مبتنی بر هستان شناسی برای استنتاج گزاره های جدید نشان داده می شود.

قاعده زیر بر اساس وجود آسیب پذیری مشخص در یک دارای و امکان بهره کشی آن آسیب پذیری توسط حمله خاص، تحت خطر بودن آن دارای توسط حمله مشخص شده را استنتاج می کند. گزاره استنتاج شده می تواند در قواعد استنتاج بعدی استفاده شود.

Asset(?h1) & Vulnerability(?v) & hasVuln(?h1,?v) & Attack(?a) & exploit(?a,?v) → underAttack(?h1,?a);

قاعده زیر بر اساس انگیزه و سطح مهارت مهاجم، هدف و شدت حمله را استنتاج می کند.

Attack(?a) ∧ Attacker(?b) ∧ RunAttack(?b, ?a) ∧ motivation(?b, "political-gain") ∧ skill_level(?b, "advanced") → attack_goal(?a, "destroy") ∧ attack_severity(?a, "high");

در فرآیند استنتاج ممکن است یک گزاره از طریق شواهد و قواعد مختلفی نتیجه گرفته شود که در این صورت لازم خواهد بود نتایج باهم ادغام شده و یک باور و قطعیت سراسری برای آن گزاره (فرضیه) محاسبه شود. همچنین امکان نوشتن تابعی برای ادغام داده ها و فراخوانی تابع در داخل قاعده وجود دارد. برای مثال در صورتی که بدنه هر دو قاعده زیر درست باشد، حالت به مخاطره افتادن دارای a1 از دو طریق نتیجه گرفته می شود:

Asset(?a1), Vulnerability(?v1), has_vul(?a1, ?v1), Attack(?at1), exploits(?at1, ?v1)

→ compromised(?a1, 0.6)

Asset(?a1), Attack(?at1), Alert(?x), indicates(?x,

پردازش و ادغام اطلاعات سخت و نرم در فرماندهی و کنترل سایبری

- data_source, $x \in X$, value
- data_source, $s \in DS$, reliability
- data_source, $d \in Data$, validity

Results شامل نتایج نهایی تولید شده در فرآیند استنتاج و ادغام خواهد بود.

در ادغام داده‌های سخت و نرم ما با این مسئله مواجه هستیم که باید اطلاعات با انواع مختلفی از عدم قطعیت را با هم ادغام کنیم. اطلاعات فراهم شده توسط حسگرها یا پردازش‌های ماشینی عموماً دارای عدم قطعیت احتمالاتی هستند، در حالی که اطلاعات فراهم شده توسط انسان، معمولاً دارای عدم قطعیت از نوع باور و امکان هستند. با توجه به این تفاوت در نوع عدم قطعیت داده‌های سخت و نرم، برای ادغام این داده‌ها با هم، نیاز به یک چارچوب نظری برای نمایش و مدل‌سازی عدم قطعیت بصورت یکپارچه وجود دارد. مدل باور انتقال‌پذیر با توجه به ویژگی‌ها و مزایایی که دارد، گزینه مناسبی برای این هدف است. بر اساس یک رویکرد مبتنی بر مدل باور انتقال‌پذیر، می‌توانیم انواع مختلف نمایش‌های عدم قطعیت شامل نمایش احتمالی، نمایش فازی و نمایش امکانی را به یک نمایش یکسان بر اساس نظریه باور تبدیل کنیم. در این صورت می‌توان با به‌کارگیری قوانین ترکیب باور معرفی شده مانند قانون ترکیب دمپستر، به ادغام شواهد بدست آمده از منابع مختلف اقدام کرد.

مراحل ادغام داده‌های سخت و نرم

بر اساس رویکرد پیشنهادی مبتنی بر مدل باور انتقال‌پذیر، مراحل ادغام داده‌های سخت و نرم به ازای چندین داده سخت و نرم ارائه شده برای یک متغیر یا فرضیه، مطابق شکل 3 خواهد بود که در ادامه شرح داده شده است.

تشکیل توابع جرم

برای تشکیل توابع جرم متناظر با داده‌ها، ابتدا چارچوب تشخیص مبتنی بر مقادیر ممکن متغیر یا فرضیه مربوطه و داده‌های ارائه شده، تعیین می‌شود. سپس مقادیر احتمالاتی داده‌های سخت و مقادیر باور داده‌های نرم با استفاده از فرمول‌های مربوطه به مقادیر تابع جرم در چارچوب تشخیص تعیین شده تبدیل می‌شود.

در صورتی که در طول فرآیند استنتاج، داده‌ها و شواهد مختلفی برای یک متغیر یا فرضیه از فضای مسئله داشته باشیم، با ادغام این داده‌ها و شواهد، دقت و اطمینان بیشتری در مورد مقادیر ممکن آن متغیر یا فرضیه بدست می‌آوریم و بنابراین با اطمینان بیشتری می‌توانیم تصمیم‌گیری لازم را انجام دهیم. یک نکته مهم در زمینه ادغام داده‌ها این است که در کنار داده‌های ارائه شده، مقداری به عنوان قابلیت اطمینان منبع داده یا میزان اعتبار و صحت داده می‌تواند وجود داشته باشد.

با فرض اینکه هر کدام از منابع داده سخت و نرم مورد استفاده، اطلاعات و مقادیری را در مورد متغیرهای تعریف شده در فضای مسئله و جنبه‌های اعتبار و قابلیت اعتماد منابع داده ارائه می‌کنند، صورت‌بندی مسئله ادغام داده‌های سخت و نرم به شکل زیر قابل طرح است:

$FusionProblem = (X, DS, Data, Results)$

X عبارت است از مجموعه متغیرهای فضای مسئله که در راه‌حل مبتنی بر هستان‌شناسی شامل موارد زیر خواهد بود:

- صفات و خصیصه‌های کلاس‌های هستان‌شناسی (مثلاً نمره شدت آسیب‌پذیری، یا سطح مهارت یک مهاجم)
- فرضیه‌هایی در مورد وجود نمونه‌هایی از کلاس‌های هستان‌شناسی و یا مقادیر خاصی برای خصیصه‌هایی از نمونه‌های موجود (مثلاً فرضیه به وقوع پیوستن یک نفوذ مشخص، فرضیه به خطر افتادن یک دارایی، و فرضیه بالا بودن پیچیدگی حمله شناسایی شده)

DS عبارت است از مجموعه منابع داده‌ها که می‌تواند بصورت کلی (از قبیل ابزار حسگری، کاربران عادی، تحلیل‌گرهای امنیتی، مدیران یا فرماندهان صحنه) یا بصورت جزئی و موردی (ابزار تشخیص نفوذ، سامانه مدیریت اطلاعات و رویدادهای امنیتی، کارشناس 1، کارشناس 2، مدیر امنیت 1) مشخص شود.

$Data$ عبارت است از مجموعه داده‌ها که می‌تواند مربوط به مقادیر متغیرها، مربوط به قابلیت اعتماد منابع داده‌ها و یا مربوط به میزان اعتبار و صحت داده‌های دیگر باشد. بنابراین هر عضو d از مجموعه داده‌ها به یکی از سه صورت زیر خواهد بود:

داده شده به منبع هر داده، توابع جرم کاسته شده را بدست آورده و به روزرسانی می‌کنیم. با فرض اینکه $\alpha \leq 1$ میزان درجه اعتماد تخصیص داده شده به یک منبع داده باشد، مقادیر جدید تابع جرم برای داده‌های آن منبع با استفاده از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$m^*(A) = \alpha * m(A) \quad A \neq \Omega$$

$$m^*(\Omega) = \alpha * m(\Omega) + (1 - \alpha)$$

ادغام داده‌ها

سپس توابع جرم بدست آمده برای شواهد مختلف را با استفاده از قاعده ترکیب دمپستر-شفر با هم ادغام می‌کنیم.

$$m_{1,2}(A) = [m_1 \oplus m_2](A)$$

$$= \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C)}{1 - \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C)} \quad A \neq \phi$$

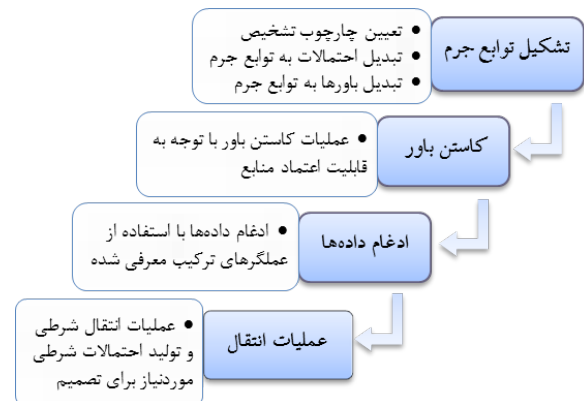
عملیات انتقال برای تصمیم

در نهایت در صورت نیاز به تصمیم روی فرضیه‌های خاصی از چارچوب تشخیص، عملیات انتقال سطح شرط بندی از مقادیر باور به مقادیر احتمال انجام شده و احتمالات متناظر با فرضیه‌های مورد بررسی مشخص می‌شوند.

$$BetP(\omega) = \sum_{A: \omega \in A} \frac{m(A)}{|A|}$$

3-5. به کارگیری روش ادغام پیشنهادی در یک سناریو

در این قسمت بر اساس یک سناریوی نمونه، انواع مختلف داده‌های سخت و نرم قابل ارائه به سامانه و نحوه ادغام آنها با استفاده از روش پیشنهادی مقاله، نشان داده شده است. فرض کنید که با شناسایی یک حمله سایبری می‌خواهیم بر اساس پارامترهایی از قبیل کشور مبدأ حمله، میزان پیچیدگی حمله، و درجه شدت آسیب‌های بالقوه حمله، در مورد اقدامات واکنشی مناسب تصمیم گیری کنیم. برای این کار در درجه اول لازم است مبتنی بر اهداف و سیاست‌گذاری‌های تعیین شده و با استفاده از نظرات افراد خبره یا منابع دانشی دیگر، فرمول‌ها و قوانین مورد نیاز را که تعیین کننده تصمیم‌های مناسب به ازای مقادیر مختلف این پارامترها هستند، تدوین شود. با فرض وجود این فرمول‌ها و قوانین، در مرحله بعد باید با پردازش‌های لازم روی



شکل 3. مراحل ادغام داده‌های سخت و نرم در رویکرد پیشنهادی

با فرض چارچوب تشخیص $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ فرمول‌های مورد استفاده در روش پیشنهادی ارائه می‌شود. به ازای چارچوب‌های تشخیص با تعداد اعضای بیشتر یا کمتر هم مشابه همین فرمول‌ها قابل استفاده است. در صورتی که داده سخت ارائه شده شامل مقادیر احتمال برای تمام اعضای چارچوب تشخیص باشد، مقادیر تابع جرم بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{Data: } p(\omega_1) = p_1, p(\omega_2) = p_2,$$

$$p(\omega_3) = p_3 \quad \sum p_i = 1$$

Mass function:

$$m(\omega_1) = p_1, m(\omega_2) = p_2, m(\omega_3) = p_3$$

و در صورتی که داده سخت ارائه شده شامل مقادیر احتمال

برای برخی از اعضای چارچوب تشخیص (مثلاً ω_1 و ω_2) باشد، مقادیر تابع جرم متناظر بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{Data: } p(\omega_1) = p_1, p(\omega_2) = p_2 \quad \sum p_i \leq 1$$

$$\text{Mass function: } m(\omega_1) = p_1, m(\omega_2) = p_2,$$

$$m(\Omega) = 1 - (p_1 + p_2)$$

در صورتی که داده نرم ارائه شده، بر اساس چارچوب نظریه باور، شامل مقادیر باور به ازای زیرمجموعه‌های مختلف چارچوب تشخیص باشد، مقادیر تابع جرم متناظر بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{Data: Bel}(A) \quad \text{for some } A \subseteq \Omega$$

$$\text{Mass function: } m(X) = \sum_{A|A \subseteq X} (-1)^{|A-X|} \text{Bel}(A)$$

کاستن باور

در ادامه مراحل ادغام، با اعمال عملگر کاستن باور روی توابع جرم متناظر با داده‌ها با توجه به درجه اعتماد تخصیص

پردازش و ادغام اطلاعات سخت و نرم در فرماندهی و کنترل سایبری

آمریکا	0,2
آمریکا یا انگلیس	0,4
چین	0,1
نامشخص	0,3

تحلیلگر 2 نظر و باور خود را نسبت به حالت‌های مختلف کشور مبدأ حمله بصورت زیر ارائه داده است.

میزان باور تحلیلگر 2	کشور مبدأ حمله
0,4	آمریکا
0,2	انگلیس
0,2	چین یا سایر
0,2	نامشخص

فرمانده سایبری میزان اعتماد خود را نسبت به داده‌های ارائه شده بصورت زیر تعیین کرده است.

میزان اعتماد	منبع داده
0,8	پردازش ماشینی
0,9	تحلیلگر 1
0,7	تحلیلگر 2

برای ادغام داده‌های فوق ابتدا همه داده‌ها را با استفاده از نظریه مدل باور انتقال پذیر ارائه می‌کنیم. بر این اساس توابع جرم متناظر با داده‌ها بصورت زیر تشکیل می‌شود:

چارچوب تشخیص:

$$\Omega = \{a \equiv \text{آمریکا}, b \equiv \text{انگلیس}, c \equiv \text{چین}, d \equiv \text{سایر}\}$$

توابع جرم متناظر با داده سخت:

$$m_1(a) = 0.4, \quad m_1(b) = 0.3, \quad m_1(c) = 0.2, \quad m_1(d) = 0.1$$

توابع جرم متناظر با داده نرم 1:

$$m_2(a) = 0.2, \quad m_2(\{a, b\}) = 0.4, \quad m_2(c) = 0.1, \quad m_2(\Omega) = 0.3$$

توابع جرم متناظر با داده نرم 2:

$$m_3(a) = 0.4, \quad m_3(b) = 0.2, \quad m_3(\{c, d\}) = 0.2, \quad m_3(\Omega) = 0.2$$

مقادیر درجه اعتماد به منابع داده‌ها:

$$\alpha_1 = 0.8, \quad \alpha_2 = 0.9, \quad \alpha_3 = 0.7$$

داده‌های ارائه شده و در صورت نیاز ادغام داده‌ها، مقادیر متناظر با پارامترهای تصمیم‌گیری را تعیین کنیم. و در مرحله آخر با اجرای قوانین تصمیم‌گیری، واکنش مناسب برای پاسخ به حمله را مشخص کنیم.

در این مثال «کشور مبدأ حمله» به عنوان یک پارامتر یا متغیر مسئله در نظر گرفته شده است. برای این متغیر می‌توان بر اساس داده‌هایی که توسط حسگرهای مختلف در مورد آی‌پی‌های مبدأ یا مقصد ترافیک‌های مشکوک تولید شده است و با پردازش این داده‌ها، احتمالاتی در مورد کشور مبدأ حمله تعیین کرد. همچنین تحلیلگرهای امنیتی ناظر صحنه بر اساس اطلاعات و دانشی که از منابع مختلف دارند، می‌توانند به ارائه نظر خود در این زمینه بپردازند. در واقع این افراد باور و اعتقاد ذهنی خود را نسبت به حالت‌های ممکن کشور مبدأ حمله مشخص می‌کنند. از طرف دیگر ممکن است فرمانده سایبری میزان اعتماد متفاوتی نسبت به نتایج پردازش ماشینی و نظرات تحلیلگرهای مختلف داشته باشد و لازم است میزان اعتماد به منابع داده هم در ادغام اطلاعات دخالت داده شود.

مقادیر ممکن این متغیر شامل موارد زیر در نظر گرفته شده است: آمریکا، انگلیس، چین و سایر

داده سخت که نتیجه پردازش ماشینی روی داده‌های حسگری است، بصورت زیر ارائه شده است:

مقدار احتمال	کشور مبدأ حمله	نماد اختصاری
0,4	آمریکا	a
0,3	انگلیس	b
0,2	چین	c
0,1	سایر	d

تحلیلگر 1 نظر و باور خود را نسبت به حالت‌های مختلف کشور مبدأ حمله بصورت زیر ارائه داده است. مقدار متناظر با نامشخص در جدول به معنی باور تحلیلگر نسبت به قابل تعیین نبودن کشور مبدأ حمله از روی شواهد موجود است. در واقع این مقدار نشان دهنده میزان ناآگاهی تحلیلگر در مورد کشور مبدأ حمله است.

میزان باور تحلیلگر 1	کشور مبدأ حمله
----------------------	----------------

$$m_{1,2,3}(b) = 0.224$$

$$m_{1,2,3}(c) = 0.098$$

$$m_{1,2,3}(d) = 0.032$$

$$m_{1,2,3}(\{a, b\}) = 0.057$$

$$m_{1,2,3}(\{c, d\}) = 0.019$$

$$m_{1,2,3}(\Omega) = 0.06$$

ممکن است لازم باشد که بر اساس مقادیر احتمالی حالت‌های مختلف این متغیر یعنی کشور مبدأ حمله، استنتاج یا تصمیم‌گیری‌های خاصی صورت بگیرد. مثلاً ممکن است بر اساس یک قانون ثبت شده در سیستم، در صورتی که با احتمال بالاتر از 0,8 کشور مبدأ حمله آمریکا یا انگلیس باشد، اقدام واکنشی خاصی باید انجام شود.

در مدل باور انتقال پذیر برای این منظور، با استفاده از عملیاتی با عنوان انتقال شرطبندی، مقادیر باور به مقادیر احتمال تبدیل می‌شود.

$$P_{bet}(a) = 0.51 + \frac{0.057}{2} + \frac{0.06}{4} = 0.553$$

$$P_{bet}(b) = 0.224 + \frac{0.057}{2} + \frac{0.06}{4} = 0.267$$

$$P(\text{AttackSourceCountry} = \text{America or England}) = 0.553 + 0.267 = 0.82$$

3-6. نکات پیاده‌سازی موتور استنتاج و ادغام

چارچوب پیاده‌سازی این تحقیق به این صورت است که ابتدا اطلاعات و داده‌های دریافتی در یک نمونه‌هستان شناسی ذخیره می‌شود، این نمونه‌ی هستان شناسی توسط یک موتور استنتاج (شامل مجموعه‌ای از قوانین استنتاج) پردازش شده و گزاره‌های استنتاجی تولید می‌شود. پیاده‌سازی برنامه با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون و چارچوب جنگو انجام شده است. جنگو یک چارچوب نرم‌افزاری تحت وب آزاد و متن‌باز است که امکان اجرای برنامه‌های به زبان پایتون را فراهم می‌کند.

در پیاده‌سازی تحقیق، از دو مؤلفه زیر استفاده شده است:

- مؤلفه owready2 که امکان کار با هستان شناسی و عملیات استنتاج روی آن را فراهم می‌کند.
- مؤلفه pyds که امکان عملیات ادغام با روش دمپستر-شفر را فراهم می‌کند.

ابتدا با اعمال عملگر کاستن باور معرفی شده در مدل باور انتقال پذیر، روی توابع جرم متناظر با داده‌ها با توجه به درجه اعتماد تخصیص داده شده به منبع هر داده، توابع جرم کاسته شده را بدست آورده و به روزرسانی می‌کنیم.

$$m_1^*(a) = \alpha_1 * m_1(a) = 0.8 * 0.4 = 0.32$$

$$m_1^*(b) = 0.8 * 0.3 = 0.24$$

$$m_1^*(c) = 0.8 * 0.2 = 0.16$$

$$m_1^*(d) = 0.8 * 0.1 = 0.08$$

$$m_1^*(\Omega) = \alpha_1 * m_1(\Omega) + (1 - \alpha_1) = 0.2$$

$$m_2^*(a) = \alpha_2 * m_2(a) = 0.9 * 0.2 = 0.18$$

$$m_2^*(\{a, b\}) = 0.9 * 0.4 = 0.36$$

$$m_2^*(c) = 0.9 * 0.1 = 0.09$$

$$m_2^*(\Omega) = \alpha_2 * m_2(\Omega) + (1 - \alpha_2) = 0.37$$

$$m_3^*(a) = \alpha_3 * m_3(a) = 0.7 * 0.4 = 0.28$$

$$m_3^*(b) = 0.7 * 0.2 = 0.14$$

$$m_3^*(\{c, d\}) = 0.7 * 0.2 = 0.14$$

$$m_3^*(\Omega) = \alpha_3 * m_3(\Omega) + (1 - \alpha_3) = 0.44$$

سپس توابع جرم به روز شده متناظر با داده‌های نرم را با استفاده از قاعده ترکیب دمپستر با هم ادغام می‌کنیم.

$$k = 1 - (m_2(a)m_3(b) + m_2(a)m_3(\{c, d\}) + m_2(\{a, b\})m_3(\{c, d\}) + m_2(c)m_3(a) + m_2(c)m_3(b)) = 0.8614$$

$$m_{2,3}(a) = \frac{1}{k} * (m_2(a)m_3(a) + m_2(a)m_3(\Omega) + m_2(\{a, b\})m_3(a) + m_2(\Omega)m_3(a)) = \frac{(0.18 * 0.28 + 0.18 * 0.44 + 0.36 * 0.28 + 0.37 * 0.28)}{0.8614} = \frac{0.334}{0.8614} = 0.39$$

$$m_{2,3}(b) = \frac{m_2(\{a, b\})m_3(b) + m_2(\Omega)m_3(b)}{k} = 0.12$$

$$m_{2,3}(\{a, b\}) = \frac{m_2(\{a, b\})m_3(\Omega)}{k} = 0.18$$

$$m_{2,3}(c) = \frac{m_2(c)m_3(\{c, d\}) + m_2(c)m_3(\Omega)}{k} = 0.06$$

$$m_{2,3}(\{c, d\}) = \frac{m_2(\Omega)m_3(\{c, d\})}{k} = 0.06$$

$$m_{2,3}(\Omega) = \frac{m_2(\Omega)m_3(\Omega)}{k} = 0.19$$

در ادامه توابع جرم بدست آمده از ادغام داده‌های نرم را با توابع جرم متناظر با داده سخت ادغام می‌کنیم که در نتیجه آن مقادیر زیر حاصل می‌شود.

$$m_{1,2,3}(a) = 0.51$$

پردازش و ادغام اطلاعات سخت و نرم در فرماندهی و کنترل سایبری

شامل معماری و مدل فرآیندی پردازش و استنتاج اطلاعات مبتنی بر هستان‌شناسی، روش بازنمایی عدم قطعیت و قابلیت اعتماد در داده‌های سخت و نرم و ادغام این داده‌ها، تبدیل باورها به احتمالات برای امکان تصمیم‌گیری روی فرضیه‌های مورد بررسی، طراحی مدل هستان‌شناسی برای اهداف فرماندهی و کنترل سایبری، و طراحی و پیاده‌سازی منطق استنتاج و ادغام اطلاعات مبتنی بر هستان‌شناسی پرداخته شده است. در رویکرد پیشنهادی از هستان‌شناسی به عنوان زبانی برای توصیف و مدل‌سازی مفاهیم مورد استفاده در کاربرد فرماندهی و کنترل سایبری بهره گرفته شده و یک معماری و فرآیند پردازشی مناسب برای تحلیل و استنتاج مبتنی بر هستان‌شناسی ارائه شده است. با راه‌حل ارائه شده در این مقاله، نشان داده شد که هستان‌شناسی با امکانات و ابزارهای قابل تعریف مبتنی بر آن، بستر لازم برای مرتبط سازی و ادغام داده‌های سخت و نرم را فراهم می‌کند.

داده‌ها و اطلاعات ورودی شامل داده‌های سخت یعنی داده‌ها و اطلاعات منابع ماشینی و داده‌های نرم یعنی داده‌ها و اطلاعات قابل ارائه توسط منابع انسانی در نظر گرفته شده است، تا بتوان با استفاده از مزایای هر کدام از انواع داده‌های سخت و نرم به تشخیص و تصمیم دقیق‌تر و مطمئن‌تری دست پیدا کرد. با توجه به انواع متفاوت عدم قطعیت در داده‌های سخت و نرم، برای ادغام آنها نیاز به نمایش یکپارچه انواع عدم قطعیت وجود دارد که برای این هدف از نظریه باور و مدل باور انتقال پذیر استفاده شده است و برای ادغام خواهد نیز قاعده ترکیب دمپستر-شفر به کار گرفته شده است. همچنین با توجه به نیاز به تصمیم‌گیری در چرخه فرماندهی و کنترل سایبری از قابلیت سطح شرط‌بندی در مدل باور انتقال پذیر بهره گرفته شده است که در آن باورها در انتهای کار به احتمالات شرطی موردنیاز برای اتخاذ تصمیم تبدیل می‌شود.

در هستان‌شناسی طراحی شده برای اهداف فرماندهی و کنترل سایبری، مفاهیمی از قبیل دارایی‌ها (شامل شبکه، میزبان و سرویس)، آسیب‌پذیری، حمله یا نفوذ، مهاجم، TTP (روش‌ها و ابزارهای انجام حمله)، پیامد یا اثر حمله، نشانگر (هر گونه رخداد یا وضعیت نشان دهنده حمله یا نفوذ) و کنترل (روش‌های

همچنین بر اساس نیاز صورت مسئله، فیلدهای استنتاجی جدیدی به کلاس‌های هستان‌شناسی اضافه شده و عملیات لازم برای بدست آوردن مقدار آنها پیاده سازی شده است. برای مثال فیلد `compromised_value` در کلاس `Asset` تعریف شده است که بر اساس مقدار مجموعه‌ای فیلد `compromised` و در صورت نیاز ادغام مقادیر مختلف تعیین مقدار می‌شود. عملیات ادغام بر اساس عملگر ترکیب نظریه ادغام دمپستر-شفر طراحی و پیاده سازی شده است.

with onto:

```
class Asset (Thing):
```

```
def compromised_value(self):
```

```
    n = len(self.compromised)
```

```
    if (n == 0):
```

```
        return 0
```

```
    elif (n == 1):
```

```
        return self.compromised[0]
```

```
    else:
```

```
        m1 = MassFunction( {'a':self.compromised[0],
                            'b':1-self.compromised[0]})
```

```
        i = 1;
```

```
        while i < n:
```

```
            m2 = MassFunction( {'a':self.compromised[i],
                                'b':1-self.compromised[i]})
```

```
            m1 = m1.combine_conjunctive(m2)
```

```
            i += 1
```

```
        # end of while
```

```
        return m1.bel('a')
```

سپس با اجرای قواعد تعریف شده با استفاده از مؤلفه `pellet` که یک موتور استدلال‌گر مبتنی بر هستان‌شناسی است، استنتاج‌های لازم صورت می‌گیرد و با فراخوانی مقادیر فیلدهای موردنیاز برای نمایش و ارائه، توابع مربوطه فراخوانی و اجرا شده و نتایج موردنظر تولید می‌شود.

4- جمع بندی

در این مقاله یک رویکرد مبتنی بر هستان‌شناسی برای پردازش و ادغام داده‌های سخت و نرم در فرماندهی و کنترل سایبری ارائه شده است که در آن به جنبه‌های مختلف این مسئله

اقدام لازم برای پیشگیری، مقابله و کاهش اثر تهدیدها) در نظر گرفته شد. گزاره‌هایی که نشانگر اطلاعات دریافتی یا حاصل استنتاج‌ها هستند، مبتنی بر هستان‌شناسی طراحی شده خواهند بود. منطق استنتاج طراحی شده نیز شامل سه جنبه است: استفاده از زبان SWRL برای بیان قواعد استنتاج مبتنی بر هستان‌شناسی به منظور نتیجه گرفتن گزاره‌های جدید بر اساس گزاره‌های موجود، استفاده از زبان SPARQL برای بیان پرس‌وجوهای بازیابی اطلاعات از هستان‌شناسی مبتنی بر نیازهای تعیین شده، و گنجاندن توابع و عملگرهای ادغام در فرآیند استنتاج.

نتایج به کارگیری مدل پیشنهادی در یک سناریوی نمونه از فرماندهی و کنترل سایبری، عملیاتی بودن آن را در ادغام داده‌های سخت و نرم سایبری نشان می‌دهد. علاوه بر قابلیت مناسب برای استنتاج و ادغام، یکی از ویژگی‌های قابل توجه رویکرد پیشنهادی، قابلیت توسعه و مقیاس‌پذیری آن برای تطبیق با گسترش‌های جدید در ابزارها و نیازمندی‌های فضای فرماندهی و کنترل سایبری است.

از پژوهش‌های قابل انجام در ادامه این تحقیق به موارد زیر می‌توان اشاره کرد: استفاده از چارچوب‌های نظری دیگر برای مدل‌سازی عدم قطعیت و ادغام داده‌ها (برای مثال نظریه اندازه فازی و عملگرهای تجمیع مبتنی بر آن)، وارد کردن مفهوم بازنمایی‌های عدم قطعیت و یکپارچه کردن آنها در مدل هستان‌شناسی، و به کارگیری مدل ارائه شده در تحلیل و ارزیابی داده‌های حملات و رویدادهای معتبر از قبیل حمله استاکس‌نت.

5- مراجع

- Security and Digital Forensics 7 4, no. 2-3: 104-123, 2012.
- [10] Gao, Jian-bo, Bao-wen Zhang, Xiao-hua Chen, and Zheng Luo. "Ontology-based model of network and computer attacks for security assessment." *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)* 18, no. 5: 554-562, 2013.
- [11] Wu, Songyang, Yong Zhang, and Wei Cao. "Network security assessment using a semantic reasoning and graph based approach." *Computers & Electrical Engineering* 64: 96-109, 2017.
- [12] Barnum, Sean. "Standardizing cyber threat intelligence information with the Structured Threat Information eXpression (STIX)." *MITRE Corporation* 11: 1-22, 2012.
- [13] Zhao, Yishuai, Bo Lang, and Ming Liu. "Ontology-based unified model for heterogeneous threat intelligence integration and sharing." In *Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID), 2017 11th IEEE International Conference on*, pp. 11-15. IEEE, 2017.
- [14] Fenz, Stefan. "An ontology-based approach for constructing Bayesian networks." *Data & Knowledge Engineering*, vol.73, pp.73-88, 2012.
- [15] Smets, Philippe. "Data fusion in the transferable belief model." *Information Fusion*, 2000. *FUSION 2000. Proceedings of the Third International Conference on*. Vol. 1. IEEE, 2000.
- [16] McMullen, Sonya AH, Mac J. McMullen, Peter Forster, David Ison, and Patti J. Clark. "Emergency management: Exploring hard and soft data fusion modeling with unmanned aerial systems and non-governmental human intelligence mediums." In *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*, pp. 502-520. Springer, Cham, 2016.
- [17] Coetzer, Johannes, Jacques Swanepoel, and Robert Sabourin. "Dynamic fusion of human and machine decisions for efficient cost-sensitive biometric authentication." In *2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference*, pp. 1-6. IEEE, 2020.
- [18] Orr, S. "Data fusion to synthesise quantitative evidence, value and socio-economic factors: A framework and example of Dempster-Shafer theory." In *Proceedings of the 3rd International Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings*, vol. 3, pp. 163-171. Uppsala University, 2018.
- [1] رشیدی، علی جبار، سبحانی، سعداله، حسینی، سیدمجتبی. (1398). ارائه چارچوب مبتنی بر هستان‌شناسی برای ادغام داده‌های سخت و نرم در تحلیل امنیت سایبری. *پدافند الکترونیکی و سایبری*، 7(4)، 79-89.
- [2] Hall, David L., Michael McNeese, James Llinas, and Tracy Mullen. "A framework for dynamic hard/soft fusion." In *2008 11th International Conference on Information Fusion*, pp. 1-8. IEEE, 2008.
- [3] Llinas, James, Rakesh Nagi, David Hall, and John Lavery. "A multi-disciplinary university research initiative in hard and soft information fusion: Overview, research strategies and initial results." In *2010 13th International Conference on Information Fusion*, pp. 1-7. IEEE, 2010.
- [4] Jenkins, Michael P., Geoff A. Gross, Ann M. Bisantz, and Rakesh Nagi. "Towards context aware data fusion: Modeling and integration of situationally qualified human observations to manage uncertainty in a hard+ soft fusion process." *Information Fusion*, vol. 21, pp. 130-144, 2015.
- [5] Khaleghi, Bahador. *Distributed Random Set Theoretic Soft/Hard Data Fusion*. PhD diss. University of Waterloo, 2012.
- [6] Wickramaratne, Thanuka L. *An Analytical Framework for Soft and Hard Data Fusion: A Dempster-Shafer Belief Theoretic Approach*. PhD diss. MIAMI UNIV CORAL GABLES FL, 2012.
- [7] Keyvan Golestan, Fakhri Karray, and Mohamed S. Kamel. "An integrated approach for fuzzy multi-entity bayesian networks and semantic analysis for soft and hard data fusion." In *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2014 IEEE International Conference on*, 2015.
- [8] Xu, Guangquan, Yan Cao, Yuanyuan Ren, Xiaohong Li, and Zhiyong Feng. "Network security situation awareness based on semantic ontology and user-defined rules for Internet of Things." *IEEE Access* 5: 21046-21056, 2017.
- [9] Gonzalez Granadillo, Gustavo, Yosra Ben Mustapha, Nabil Hachem, and Herve Debar. "An ontology-driven approach to model SIEM information and operations using the SWRL formalism." *International Journal of Electronic*