



The Function of Electromagnetic Technology in Defense Policy

Alireza Rezaei ^{1*}  | Mehdi Eskandari Khoshguo ²

1. Corresponding Author: Associate Professor, Department of Political Science and International Relations, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. Email: ir.alirezarezaei@gmail.com
2. PhD student in Public International Law, Department of Law, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

Volume info

Vol. 35
Series: 135
Autumn 2026
P.P: 93-139

Article Type

Research Paper

Article History

Received:
2025-11-12
Revised:
2025-12-15
Accepted:
2026-01-05
Published:
2026-08-23

ISSN – E-ISSN

ISSN: 2008-6121
E-ISSN: 2645-5218



Abstract

In the contemporary world, electromagnetic technologies have become one of the key elements in the defense policy and national security of countries, which have created significant developments in this field. The present study aims to explain the function of these technologies as tools that affect the defense strategies of countries. The main question of the present study, which is written in a descriptive-analytical manner, is how electromagnetic technologies can affect the defense policies of countries and what challenges and opportunities they create in this regard? By examining the basic concepts, history and development of electromagnetic technologies, this study provides comprehensive and substantiated information that includes details about the various applications of such technologies in military fields such as radar, electromagnetic weapons and electronic warfare. The research findings indicate that electromagnetic technologies have led to fundamental changes in the defense strategies of countries and, while revising new defense approaches, have also strengthened the ability to manage unforeseen threats. The aforementioned technologies have also led to the emergence of new threats, especially in the field of cybersecurity, which requires policymakers to constantly review and adapt their strategies. Therefore, electromagnetic technologies, as an inseparable tool of defense policies, have created profound developments in the field of national security.

Keywords: Electromagnetic technology, defense policy, power, deterrence, international cooperation.

Cite this Article: Rezaei, A., & Eskandari Khoshguo, M. (2026). The Function of Electromagnetic Technology in Defense Policy. *Scientific Journal of Defense Policy*, 35(135), 93-139. doi : 10.47176/dpj.2026.1885



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights



Publisher: Imam Hossein University.

کارکرد فناوری الکترومغناطیس در سیاست دفاعی

علیرضا رضایی^{۱*} | مهدی اسکندری خوشگو^۲

۱. نویسنده مسئول: دانشیار، گروه علوم سیاسی و روابط بین الملل، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

Email: ir.alirezarezaei@gmail.com

۲. دانشجوی دکتری حقوق بین الملل عمومی، گروه حقوق، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

چکیده

فناوری‌های الکترومغناطیس در دنیای معاصر به یکی از عناصر کلیدی در سیاست دفاعی و امنیت ملی کشورها تبدیل شده‌اند که تحولات چشمگیری را در این حوزه ایجاد کرده‌اند. پژوهش حاضر، با هدف تبیین کارکرد این فناوری‌ها به عنوان ابزارهای تأثیرگذار بر استراتژی‌های دفاعی کشورها نگاشته شده است. پرسش اصلی پژوهش حاضر که به شیوه توصیفی - تحلیلی نگاشته شده، این است که چگونه فناوری‌های الکترومغناطیس می‌توانند بر سیاست‌های دفاعی کشورها تأثیر بگذارند و چه چالش‌ها و فرصت‌هایی را در این راستا به وجود می‌آورند؟ با بررسی مفاهیم پایه‌ای، تاریخچه و توسعه فناوری‌های الکترومغناطیس، این پژوهش اطلاعات جامع و مستدلی را ارائه می‌دهد که شامل جزییات در مورد کاربردهای مختلف چنین فناوری‌هایی در حوزه‌های نظامی نظیر رادار، تسلیحات الکترومغناطیس و جنگ الکترونیک است. یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که فناوری‌های الکترومغناطیس موجب تغییراتی بنیادی در استراتژی‌های دفاعی کشورها شده و ضمن تجدید نظر در رویکردهای جدید دفاعی، توانایی مدیریت تهدیدات پیش‌بینی نشده را نیز تقویت می‌بخشند. فناوری‌های یادشده، همچنین به ظهور تهدیدات نوینی، بخصوص در زمینه امنیت سایبری، منجر شده است که ایجاب می‌کند سیاست‌گذاران به طور مداوم به بازنگری و تطبیق استراتژی‌های خود بپردازند. بنابراین، فناوری‌های الکترومغناطیس، به عنوان ابزاری جدایی‌ناپذیر از سیاست‌های دفاعی، تحولات ژرفی را در عرصه امنیت ملی ایجاد کرده‌اند.

کلیدواژه‌ها: فناوری الکترومغناطیس، سیاست دفاعی، قدرت، بازدارندگی، همکاری‌های بین‌المللی.

استناد: رضایی، علیرضا؛ اسکندری خوشگو، مهدی. (۱۴۰۵). کارکرد فناوری الکترومغناطیس در سیاست دفاعی.

فصلنامه سیاست دفاعی، ۳۵(۱۳۵)، ۹۳-۱۳۹. doi: 10.47176/dpj.2026.1885

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).



مقدمه

دنیای معاصر به دلیل تحولات سریع و پیوسته در فناوری، به عرصه‌ای پیچیده و چندبعدی تبدیل شده است که درون‌مایه آن امنیت ملی و دفاعی است. یکی از برجسته‌ترین تحولات یادشده، ظهور و گسترش فناوری‌های الکترومغناطیس است که به‌طور قابل توجهی بر نحوه تعامل کشورها، استراتژی‌های دفاعی و مدیریت تهدیدات تأثیر گذاشته‌اند. فناوری الکترومغناطیس، که به‌طور کلی شامل امواج رادیویی، لیزرها و سامانه‌های الکترونیکی است، به عنوان ابزاری کلیدی در مدلسازی و تجزیه و تحلیل مسائل مربوط به امنیت ملی شناخته می‌شود. در این راستا، پژوهش حاضر، به بررسی کارکردهای فناوری الکترومغناطیس در سیاست دفاعی و پیچیدگی‌های آن در دنیای کنونی می‌پردازد تا به فهم بهتری از تأثیرات فناوری الکترومغناطیس بر استراتژی‌های نظامی و امنیتی یاری رساند. تقریباً در تمامی سطوح اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی، نیاز به ابزارهای پیشرفته‌تر برای افزایش کارایی و دقت در مدیریت بحران و پاسخ به تهدیدات روزافزون احساس می‌شود. مخصوصاً در زمینه امنیت ملی، فناوری‌های الکترومغناطیس به عنوان عامل مؤثری در ایجاد توفیق در مواجهه با تهدیدات گوناگون از جمله تهدیدات سایبری، تروریسم و جنگ‌های کلاسیک عمل کرده‌اند. چنین موضوعی به‌ویژه در دورانی که فناوری‌های دشمنی نیز به سرعت در حال تحول هستند، از اهمیت بیشتری برخوردار است و لذا نیاز به تحلیل دقیق و همه‌جانبه در این حوزه اجتناب‌ناپذیر است. ضرورت پژوهش در این خصوص به چند عامل کلیدی برمی‌گردد. اولاً، با توجه به پیشرفت‌های روزافزون فناوری الکترومغناطیس و نقش آن در تقویت یا تضعیف استراتژی‌های امنیتی کشورها، تحلیل دقیق فناوری الکترومغناطیس و استفاده بهینه از آن در دستور کار تصمیم‌گیران قرار می‌گیرد. دوماً، فناوری‌های الکترومغناطیس از سویی ابزاری قدرتمند برای نظارت و شناسایی تهدیدات هستند و از سویی دیگر، می‌توانند به عنوان سلاحی علیه زیرساخت‌های امنیتی استفاده شوند. قاعده مذکور، نشان‌دهنده پیچیدگی‌های اخلاقی و حقوقی استفاده از فناوری‌های مذکور است و نیاز به تدوین راهکارهایی مناسب برای مدیریت و کنترل این فناوری‌ها را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. علاوه بر این، توانایی فناوری‌های الکترومغناطیس برای تبدیل شدن به ابزاری مؤثر در تامین امنیت ملی و نظم اجتماعی، نیاز به بررسی و تحلیل عمیق از جوانب

مختلف کارکرد آنها را ایجاب می‌کند. تحولات عرصه بین‌الملل در این حوزه، ضرورت مشارکت‌های بین‌المللی و همکاری‌های نظامی را نیز به تصویر می‌کشد که در آن کشورها می‌توانند با به اشتراک گذاشتن تجربیات و فناوری‌های خود به تقویت امنیت جهانی کمک کنند. به‌خصوص، ظهور قابلیت‌های جدید در جنگ الکترونیک و سیستم‌های شناسایی پیشرفته، نیاز به رویکردی نوین در تحلیل و تبیین چالش‌ها و فرصت‌های موجود در عرصه دفاعی را بیشتر کرده است. از طرفی، دانشمندان، پژوهشگران و تحلیلگران صنایع دفاعی و امنیتی به دلیل وابستگی هر چه بیشتر جوامع به فناوری، نیاز به تجزیه و تحلیل دقیق و جامع از چالش‌های ناشی از ایمنی و کنترل این فناوری‌ها دارند. به همین دلیل، پژوهش حاضر در نظر دارد تا با تبیین کارکرد فناوری‌های الکترومغناطیس در سیاست‌های دفاعی، ادبیات علمی و تجربی موجود را غنی‌تر کند و اطلاعات جدیدی را به مباحث رایج در امنیت ملی و دفاعی اضافه نماید. مسئله اصلی پژوهش مذکور، به تحلیل منطق و کارکرد فناوری الکترومغناطیس در سیاست‌های دفاعی برمی‌گردد. در شرایطی که ایران و دیگر کشورها با تهدیدات امنیتی متنوعی از جمله تروریسم، ناامنی‌های ناشی از تحولات اجتماعی و تهدیدات هسته‌ای مواجه‌اند، درک عمیق‌تری از تأثیر فناوری الکترومغناطیس بر استراتژی‌های نظامی ضرورت دارد. سؤالاتی که در این زمینه باید پاسخ داده شوند شامل این موارد است. چگونه فناوری‌های الکترومغناطیس می‌توانند توانایی نظامی و امنیتی کشورها را افزایش دهند؟ چه چالش‌ها و فرصت‌هایی از لحاظ اخلاقی، قانونی و اجتماعی در ارتباط با بهره‌برداری از چنین فناوری‌هایی وجود دارد؟ آیا این فناوری‌ها می‌توانند به‌عنوان دگرگون‌کننده‌های استراتژیک در سیاست‌های دفاعی عمل کنند؟ فرضیه اصلی این پژوهش به این صورت بیان می‌شود که فناوری الکترومغناطیس به‌عنوان یک عامل کلیدی در سیاست‌های دفاعی، قادر است با تحول‌سازی استراتژی‌های نظامی، بهبود قدرت شناسایی و پیشگیری از تهدیدات و افزایش قابلیت‌های جنگ الکترونیک، به ارتقاء امنیت ملی کشورها یاری رساند. فرضیه مذکور، به دنبال بررسی این موضوع است که آیا فناوری الکترومغناطیس می‌تواند به‌عنوان یک محرک برای تغییر پارادایم‌های امنیتی و دفاعی کشورها شناخته شود و چگونه کشورهای مختلف می‌توانند از این فناوری‌ها به نحو مطلوب استفاده کنند.

مبانی نظری

فناوری الکترومغناطیس

فناوری الکترومغناطیس به طوری کلی به مجموعه‌ای از دانش‌ها و کاربردهایی اطلاق می‌شود که به بررسی و استفاده از امواج الکترومغناطیس می‌پردازند. امواج الکترومغناطیس که متشکل از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند، در سراسر طیف الکترومغناطیس شامل امواج رادیویی، میکروویو، مادون قرمز، نور مرئی و اشعه‌های فرابنفش قرار می‌گیرند. در دنیای امروزی، الکترومغناطیس به عنوان پایه و اساس بسیاری از فن‌آوری‌های ارتباطی و انتقال اطلاعات در نظر گرفته می‌شود. فناوری الکترومغناطیس شامل طیف وسیعی از ابزارها و سیستم‌ها است که در زمینه‌های مختلف، نظیر مخابرات، رادار، تشخیص و شناسایی و تسلیحات، کاربرد دارند. بخصوص در حوزه نظامی، فناوری‌های الکترومغناطیس نقش حیاتی در ارتقاء قابلیت‌ها و توانایی‌های دفاعی کشورها ایفا می‌نمایند. در زمینه‌های نظامی، فناوری‌های مبتنی بر الکترومغناطیس به عنوان ابزاری مؤثر در شناسایی، هدف‌گیری و ارتباطات نظامی عمل می‌نمایند. سیستم‌های راداری با استفاده از موج‌های الکترومغناطیس قادر به شناسایی، ردیابی و تجزیه و تحلیل تهدیدات هوایی و زمین هستند، که چنین موضوعی موجب افزایش دقت و کارایی نیروهای نظامی می‌شود. رشد گسترده دستگاه‌های الکترونیکی و دستگاه‌های ارتباطی و استفاده گسترده از تجهیزاتی از قبیل رادارها، دستگاه‌های ارتباطی تلفن همراه، GPS و وسایل خانگی در سال‌های اخیر، موجب افزایش تداخل امواج الکترومغناطیس شده است (رشیدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۰۷). در عین حال، ارتباطات بی‌سیم مبتنی بر فناوری الکترومغناطیس امکان برقراری ارتباطات ایمن، فوری و جامع را در میدان جنگ فراهم می‌آورد و به تسهیل مدیریت عملیات کمک می‌کند. تاریخچه فناوری‌های الکترومغناطیس به اواسط قرن نوزدهم با کارهای پیشگامان علمی نظیر هاوکینز، فرادی و جیمز کلارک ماکسول برمی‌گردد. ماکسول با ارائه نظریه‌ای جامع در زمینه الکترومغناطیس به تجزیه و تحلیل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی پرداخت و معادلاتی را فرمول‌بندی کرد که به تحلیل رفتار امواج الکترومغناطیس کمک می‌کردند. پیشرفت‌های یادشده، زمینه‌ساز دستاوردهای چشمگیر در زمینه ارتباطات و تسلیحات نظامی شدند. در نیمه دوم قرن نوزدهم، توسعه رادار و

مخابرات بی سیم به طور چشمگیری توجه محققان و نظامیان را جلب کرد. مخصوصاً در جنگ جهانی اول، رادار به ابزاری ضروری برای شناسایی و ردیابی دشمنان تبدیل شد و با ظهور رادارهای جدید در جنگ جهانی دوم، نقش فناوری الکترومغناطیس در تعیین سرنوشت نبردها بسیار کلیدی گردید. در این دوره، استفاده از رادارها به عنوان ابزاری استراتژیک در نبردها باعث شد که کشورهایی مانند بریتانیا و ایالات متحده برتری قابل توجهی نسبت به دشمنان خود پیدا نمایند (مارتین ۱، ۲۰۱۶: ۳۴). در دهه های بعد، با پیشرفت فناوری اطلاعات و رقابت های جهانی، کشورها به سرعت به دنبال توسعه و بهبود سیستم های ارتباطی خود برآمدند. ظهور ارتباطات بی سیم، سیستم های انتقادی راداری مدرن و ایجاد شبکه های ارتباطی با استفاده از امواج الکترومغناطیس، به کشورها، امکان داد تا توانمندی های نظامی و دفاعی خود را به طرز چشمگیری ارتقا دهند. در قرن بیست و یکم، با ظهور فناوری های نوین نظیر لیزر و تسلیحات مبتنی بر امواج الکترومغناطیس، از جمله سلاح های الکتروسلولی و ریل گانی، مشاهده می شود که فناوری الکترومغناطیس همچنان یکی از محورهای اصلی توسعه دفاع نظامی و استراتژیک است. تسلیحات مذکور، به دلیل دقت بالا، سرعت و قابلیت کنترل قابل توجه، توجه بسیاری از کشورهای پیشرفته را به خود جلب کرده اند و تغییرات قابل توجهی در نحوه جنگیدن و مدیریت بحران های نظامی ایجاد کرده اند. فناوری الکترومغناطیس دارای کاربردهای گسترده ای در زمینه های مختلف است که از نظامی تا غیرنظامی گسترش می یابد. مخصوصاً در حوزه نظامی، فناوری های الکترومغناطیس قادر هستند تأثیر عمیقی بر شکل گیری و عمل کرد استراتژی های دفاعی بگذارند. در زمینه تسلیحات مدرن، به کارگیری فناوری های الکترومغناطیس قادر است به افزایش قدرت آتش، دقت اهداف و ایمنی عملیات ها کمک نماید. سامانه های راداری به عنوان یکی از مهم ترین فناوری های الکترومغناطیس، نقش حیاتی در شناسایی و ردیابی اهداف ایفا می کنند. رادار به صورت فعال (با ارسال پالس های الکترومغناطیس) یا غیرفعال (با دریافت امواج منعکس شده) عمل می کند. سامانه ها قادر به شناسایی اهداف هوایی و زمینی در فاصله های طولانی و در شرایط نامساعد جوی هستند. رادارهای مدرن می توانند به طور همزمان چندین هدف را شناسایی و ردیابی نمایند و اطلاعات دقیق تری را به نیروهای نظامی ارائه دهند. رادارهای پیشرفته با استفاده از فناوری های

جدید از جمله رادارهای آرایه فازی، توانایی ردیابی و شناسایی تهدیدات را به حداقل زمان ممکن کاهش می‌دهند. تسلیحات الکترومغناطیس به دلیل توانایی‌های بی‌نظیر خود در هدف‌گیری دقیق و قدرت تخریب بالا، به عنوان نمادی از جنگ مدرن شناخته می‌شوند. سلاح‌های مثل سلاح‌های ریل‌گانی که امواج الکترومغناطیس را برای شلیک گلوله‌ها به کار می‌برند، قادر هستند آسیب‌ها را با سرعت بسیار بالا و بدون استفاده از مواد منفجره ایجاد کنند. چنین تسلیحاتی به دلیل سرعت و دقت خود در جنگ‌های مدرن سهم بسزایی در تغییر معادلات نظامی دارند. فناوری‌های ارتباطی مبتنی بر امواج الکترومغناطیس، امکان برقراری ارتباطات فوری و امن را برای نیروهای نظامی فراهم می‌آورند (استراوسفولگل، ۱، ۲۰۰۹: ۱۲). فناوری‌های الکترومغناطیس شامل شبکه‌های بی‌سیم، سیستم‌های ارتباطی ماهواره‌ای و پروتکل‌های مختلف انتقال داده هستند که به نیروهای نظامی این توانایی را می‌دهند که با یکدیگر همکاری نمایند و اطلاعات حیاتی را در حداقل زمان ممکن منتقل کنند. از آن‌جا که در میدان جنگ، زمان و دقت بسیار مهم هستند، چنین ارتباطاتی به عنوان ابزاری کلیدی در تصمیم‌گیری‌های سریع و کارآمد عمل می‌نمایند. فناوری الکترومغناطیس، به دلیل تأثیرات عمیق خود بر قدرت نظامی و استراتژی‌های دفاعی، اهمیت ویژه‌ای در ساختار سیاست‌های دفاعی کشورها دارد. در شرایطی که جهان با تهدیدات امنیتی پیچیده‌ای مواجه است، کشورها به دنبال توسعه و بهره‌برداری حداکثری از فناوری الکترومغناطیس هستند. توانمندی کشورهای در استفاده از فناوری‌های الکترومغناطیس می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر توازن قوا در سطح جهانی داشته باشد. کشورهایی که قادرند از فناوری‌های الکترومغناطیس بهره‌برداری بهتری داشته باشند، به طور طبیعی در موقعیت‌های قوی‌تری نسبت به سایر کشورها قرار می‌گیرند. قدرت تکنولوژیکی به عنوان عاملی مؤثر در دیپلماسی سیاسی و نظامی نیز عمل می‌نماید و قادر است به شکل‌گیری اتحادهای جدید و برقراری روابط مؤثرتر میان کشورها منجر شود. استفاده از فناوری‌های الکترومغناطیس به عنوان ابزاری برای تقویت قابلیت‌های دفاعی، هنگامی که با سیاست‌های صلح‌آمیز و دیپلماتیک ترکیب می‌شود، می‌تواند به ایجاد یک نظام بین‌المللی پایدارتر منجر گردد. در این راستا، همکاری‌های بین‌المللی در زمینه توسعه و به اشتراک گذاری فناوری‌های نظامی و الکترومغناطیس قادر است فرصت‌های جدیدی برای

افزایش امنیت جهانی و کاهش تنش‌ها ایجاد کند. نظریات مختلف در زمینه روابط بین‌الملل و امنیت ملی می‌توانند به تحلیل و درک بهتر تأثیرات فناوری الکترومغناطیس کمک کنند. نظریه‌های واقع‌گرایی و لیبرالیسم از جمله این نظریات هستند که قادر هستند به ما در بررسی چگونگی ارتباط فناوری‌های جدید با الگوهای قدرت و همکاری‌های بین‌المللی یاری رسانند. واقع‌گرایی به عنوان یکی از دیدگاه‌های اصلی در تحلیل روابط بین‌الملل، تأکید بر سهم قدرت و منافع ملی را دارد. بر اساس نظریه یادشده، کشورهای دارای فناوری‌های پیشرفته و توانمندی در بهره‌برداری از فناوری‌های الکترومغناطیس، برتری بیشتری در توازن قدرت خواهند داشت (سئول ۱، ۲۰۱۸: ۱۵). فناوری الکترومغناطیس به عنوان یک عامل کلیدی در ایجاد قدرت نظامی و استراتژیک تلقی می‌شود. لیبرالیسم نیز بر روی مفهوم همکاری و دیپلماسی تأکید دارد. نظریه مذکور، به بررسی این موضوع می‌پردازد که چگونه کشورها می‌توانند از فناوری‌های الکترومغناطیس برای تقویت روابط اقتصادی و نظامی خود استفاده نمایند و به ایجاد یک نظام بین‌الملل پایدارتر کمک کنند.

تأثیر فناوری الکترومغناطیس بر روابط بین‌الملل

فناوری الکترومغناطیس به عنوان ابزاری برای تقویت قدرت نظامی کشورها شناخته می‌شود. سامانه‌های پیشرفته راداری، سلاح‌های الکترومغناطیس و سیستم‌های ارتباطی نوین، همه و همه به کشورها امکان می‌دهند که سرعت و دقت در اقدامات نظامی خود را افزایش دهند. بر اساس تحقیقی که در زمینه مذکور انجام شده، کشورهای مجهز به فناوری‌های نوین الکترومغناطیس قادرند در میادین جنگ تصمیمات فوری و موثری اتخاذ کنند و در این راستا از توانمندی‌های ویژه‌ای برخوردار می‌شوند. سلاح‌های انرژی بالا که توانایی ویرانی هدف‌هایی را با استفاده از لیزرهای قدرتمند دارند، قادر هستند به عنوان ابزاری برای محدود کردن توانایی‌های دشمن بدون نیاز به درگیری مستقیم فیزیکی استفاده شوند. توانمندی‌های تبیین‌شده، به کشورها اجازه می‌دهد که راهبردهای نظامی جدیدی را تدوین نمایند که در آن بتوانند دیگر قدرت‌های نظامی را به چالش بکشند. فناوری الکترومغناطیس همچنین قادر است به تغییر در ساختارهای نظامی و استراتژی‌های دفاعی منجر شود. به کارگیری فناوری‌های الکترومغناطیس باعث می‌شود کشورها

¹Seoul

توانایی شناسایی و پاسخ به تهدیدات را به صورت کارآمدتری داشته باشند. چنین موردی به خصوص در شرایط بحرانی که زمان و دقت از اهمیت زیادی برخوردار است، می تواند مزیت های قابل توجهی را فراهم آورد. به علاوه، در گزارشی که توسط آژانس های نظامی بین المللی منتشر شده، به ظرفیت های جدید فنی و نظامی که به واسطه استفاده از فناوری های الکترومغناطیس به دست آمده اند، اشاره شده است. کشورها می توانند با ایجاد وحدت های نظامی و تبادل اطلاعات، از پیشرفت های یکدیگر استفاده کنند و به این ترتیب یک شبکه امنیتی قوی تر ایجاد نمایند. فناوری های الکترومغناطیس قادر هستند توازن قوا را در سطح بین المللی متحول سازند. پیشرفت در فناوری های الکترومغناطیس به کشورهایی که در نوآوری های نظامی پیشرو هستند امکان می دهد که به عنوان قدرت های برتر معرفی شوند. به عنوان مثال، کشورهای مانند ایالات متحده و چین با سرمایه گذاری های کلان در فناوری های الکترومغناطیس و توسعه تسلیحات پیشرفته، می توانند موقعیت خود را در عرصه های بین المللی تقویت نمایند. وضعیت یادشده، قادر است به بروز تنش های بین المللی و رقابت های تسلیحاتی جدید منجر شود. کشورها باید توجه خاصی به این نکته داشته باشند که هرگونه عقب ماندگی در زمینه فناوری های الکترومغناطیس ممکن است به نفع رقبای آنها باشد و این موضوع می تواند باعث افزایش نابرابری های جهانی شود (هاینس ۱، ۲۰۲۲: ۱۲). افزایش قدرت نظامی ناشی از فناوری های الکترومغناطیس همچنین ممکن است به ظهور تهدیدات جدید منجر شود. به عنوان مثال، استفاده از سلاح های الکترومغناطیس قادر است به عنوان ابزارهای نظامی جدید در تضاد با روابط دیپلماتیک عمل نماید و به توسعه جنگ های الکترومغناطیس و سایبری منجر شود. چنین تهدیداتی بخصوص در دوره ای که کشورها در حال رویارویی با چالش های نوین امنیتی هستند، اهمیت بالایی پیدا می کنند و نیاز به توسعه استراتژی های جدید برای مدیریت تهدیدات یادشده را ایجاد می نمایند. دیپلماسی الکترومغناطیس به عنوان یک مفهوم نوین در عرصه دیپلماتیک به تعاملات نظامی و امنیتی مبتنی بر فناوری های الکترومغناطیس اشاره دارد. دیپلماسی الکترومغناطیس، می تواند موجب تقویت همکاری ها و ایجاد پیوندهای جدید بین کشورها شود. به عنوان نمونه، همکاری های مشترک در زمینه تحقیق و توسعه فناوری های الکترومغناطیس قادر است باعث

افزایش امنیت جمعی و کاهش تنش‌ها در روابط بین‌الملل گردد. کشورهایی که از فناوری‌های پیشرفته بهره‌مند هستند، قادر هستند از این توانمندی‌ها برای تسهیل مذاکرات و توافقات بین‌المللی استفاده کنند. توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های الکترومغناطیس به کشورها امکان می‌دهد که در مذاکرات دیپلماتیک از موقعیت‌های برتری بهره‌برداری نمایند. تسلیحات پیشرفته، نه تنها به قدرت نظامی کشورها افزوده، بلکه می‌توانند به ابزاری مؤثر برای اعمال نفوذ در مذاکرات سیاسی نیز بدل شوند. تفکر در این حوزه، باعث می‌شود که کشورها در درون خود به دنبال افزایش قابلیت‌های دفاعی باشند و در نتیجه، فناوری‌های الکترومغناطیس موجب تقویت قدرت‌های نظامی شده و زمینه‌ساز رقابت‌های جدید در عرصه دیپلماسی گردد. استفاده از فناوری‌های پیشرفته در سلاح‌ها و تسلیحات نظامی مستلزم وجود مقررات و چارچوب‌های مشخص بین‌المللی است که بتواند از سوءاستفاده‌های احتمالی جلوگیری کند. در زمینه بیان شده، نیاز به رسولیان بین‌المللی و معاهدات مربوط به کنترل تسلیحات الکترومغناطیس وجود دارد تا از گسترش چنین تسلیحاتی جلوگیری و اصول اخلاقی در استفاده از آن‌ها مشخص شود. وجود قوانین و مقررات بین‌المللی مانند توافق‌نامه‌های عدم گسترش سلاح‌های هسته‌ای، باید به عنوان الگویی برای تعیین رویکردهای جدید دیپلماسی الکترومغناطیس قرار گیرد. همچنین، توجه به ابعاد انسانی و اجتماعی فناوری‌های نظامی می‌تواند به تلطیف روابط بین‌الملل کمک نماید و از بی‌ثباتی‌های امنیتی بکاهد. آینده دیپلماسی الکترومغناطیس بستگی به همکاری‌ها و تعاملات مؤثر بین کشورهای مختلف دارد (گرتنتر^۱، ۲۰۲۱: ۵۴). کشورهای در حال توسعه باید از فناوری‌های الکترومغناطیس بهره‌برند و در تعاملات بین‌المللی خود به‌طور فعال‌تر شرکت کنند. همکاری‌های بین‌المللی در زمینه فناوری‌های دفاعی و تبادل اطلاعات قادر است به بهبود امنیت جهانی یاری رساند و از بروز بحران‌ها و رقابت‌های ناهنجار در روابط بین‌الملل جلوگیری نماید. به دلیل تغییرات سریع در فناوری و تحولات بین‌المللی، کشورها باید از انعطاف‌پذیری در تصمیم‌گیری‌های دیپلماتیک خود بهره‌برند و از توانمندی‌های فناوری‌های الکترومغناطیس به عنوان ابزاری فعال در جهت ایجاد صلح و ثبات بهره‌برداری نمایند. همکاری بین‌المللی در زمینه تحقیقات فناوری و نوآوری‌های نظامی می‌تواند به عنوان یک الگو برای ایجاد زمینه‌های ضروری برای دیپلماسی مؤثر عمل نماید.

¹ Grinter

نقش فناوری الکترومغناطیس در انقلاب و تحول در امور نظامی

دانش بشر در خصوص کاربردهای متنوع طیف امواج الکترومغناطیس در دهه‌های اخیر توسعه بسیار چشمگیری داشته است. یکی از کاربردهای طیف الکترومغناطیس در حوزه نظامی، به‌کارگیری آن جهت تأثیرگذاری بر عملکرد فیزیولوژیکی و شناختی انسان است (طالبی و انصاری، ۱۴۰۲: ۳). در آینده نزدیک حوزه جدیدی با نام اقدامات الکترومغناطیس سایبری به فضای عملیاتی نبردها اضافه خواهد شد که شیوه فرماندهی را دگرگون خواهد کرد (عبدالهی و همکاران، ۱۴۰۰: ۶۷). فناوری الکترومغناطیس، به‌عنوان رکن اساسی تحول در عرصه نظامی، به‌صورت چندچندبعدی و بر بستر اصول فیزیکی پیچیده‌ای که بر پایه انتشار امواج الکترومغناطیس، تشدید میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، القای جریان‌های الکتریکی در محیط‌های مختلف و تعامل این پدیده‌ها با ساختارهای فیزیکی مختلف پایه‌ریزی شده است، نقش یک کاتالیزور قدرتمند در تغییر سنت‌های نظامی و پیدایش ابعاد نوین عملیات‌های جنگی ایفا کرده است. از نخستین زمان‌های ایجاد رادارهای ابتدایی که با بهره‌گیری از اثر دیناماس فایلد الکترومغناطیس توانستند هدف‌های هوایی را در فواصل چند صد کیلومتری تشخیص دهند، تا ظهور سامانه‌های رادارهای فاز آرایه‌ای که قادر به تغییر الگوی پرتوهای الکترومغناطیس در زمان حقیقی، بدون نیاز به حرکت مکانیکی آرایه، می‌باشند. تکامل تکنولوژیکی نه صرفاً به‌دقت تشخیص هدف، بلکه به سرعت واکنش، پوشش فرکانسی گسترده و قابلیت مقابله با تکنیک‌های حواس‌پرتی پیشرفته منجر شده است. در حوزه‌های ارتباطات نظامی، تبدیل سیگنال‌ها به فرم‌های مدولاسیون دیجیتال پیشرفته و ترکیب فناوری الکترومغناطیس با تکنیک‌های MIMO^۱ باعث افزایش ظرفیت باند، بهبود کیفیت سرویس در محیط‌های پویای جنگی و کاهش احتمال قطع ارتباط می‌شود. به‌طوری‌که سامانه‌های ارتباطی ترکیبی می‌توانند جریانی دائم از داده‌ها را با تأخیر میکروثانیه‌ای بین سکوها، زمین، هواپیماها، پهپادها و ماهواره‌ها برقرار سازند. همگرایی در ساختارهای اطلاعاتی مخصوصاً در عملیات‌های فرماندهی، کنترل و اطلاع‌رسانی تحولی اساسی به ارمغان آورده است. چرا که حسگرهای الکترومغناطیس نظیر رادارهای تصویری SAR^۲، رادارهای ژئودزی و دستگاه‌های لیزری می‌توانند داده‌های با وضوح بالا و پهنای باند بالا را در

1 Multiple Input Multiple Output

2 Synthetic Aperture Radar

زمان واقعی به مرکز فرماندهی تحویل دهند، که این امر به بهبود تصمیم‌گیری‌های تاکتیکی و استراتژیک کمک شایان‌سازد. در حوزه جنگ الکترومغناطیس یا جنگ الکترونیکی، توانمندی‌های پیشرفته‌ای بوجود آمده‌اند که از مفهوم ساده خنثی‌سازی یا اطلاعات‌رسانی عبور می‌کنند و به استفاده همزمان از فناوری‌های پیکسل‌گذاری طیفی می‌پردازند. به عنوان مثال، تکنیک‌های تشخیص و نابودی سامانه‌های ارتباطی دشمن بوسیله پالس‌های میکروویو با توان بالا که قادرند سیگنال‌های GPS، سوارهای ارتباطی و حتی رادارهای هسته‌ای را در باندهای بحرانی مخفی‌سازی یا انحراف دهند (لوسی^۱، ۲۰۲۲: ۵۵). در کنار این، امکان استفاده از پالس‌های الکترومغناطیس کوتاه‌مدت برای تخریب خودکار سامانه‌های الکترونیکی دشمن، به‌ویژه در باندهای دقیق فراصوتی و فرکانس رادیومیکرو، به‌عنوان یک ابزار تخریبی در میداین نبرد استراتژیک شناخته شده است. چنین خالق انرژی، بر پایه تحریک قطعاً به‌سرعت الکترون‌ها در مواد هدایت‌شده به‌صورت ناهمگن و شفاف به کار می‌رود و می‌تواند همانند یک نواسازی سراسری، کارکرد مدارهای بین‌الکترونیکی را برای مدت زمان متغیر به‌طور موقت یا دائم از کار ببرد. بخش اساسی دیگری که فناوری الکترومغناطیس به‌صورت پیشگامانه در انقلاب نظامی شکل داده است، سلاح‌های پرتوهای متمرکز دیجیتالی نظیر لیزرهای سفت‌بار و گازهای میکروویو یا سوشال می‌باشند. سلاح‌ها با بهره‌گیری از تقطیع انرژی الکترومغناطیس در باندهای خاص، قادرند به‌صورت مستقیم و بدون واسطه، بر روی هدف‌های هوایی، زمینی یا دریایی انرژی حرارتی یا الکترومغناطیس وارد کنند و به‌سرعت ساختارهای حساس الکترونیکی، سلاح‌های راهنمایی‌شده و حتی ترکیب‌های شیلدهای شتاب‌دار را از کار ببرد. به‌علاوه، فناوری‌های فتونیک و واقعیت افزوده می‌توانند بر پایه سیگنال‌های الکترومغناطیس برای ارائه نمایه‌های زمان-واقعی از میدان جنگ، وضعیت تخلیه ذخیره‌های انرژی، یا گازهای رادار-پذیر، اطلاعات تکمیلی حیاتی به هوانوردان و پرستاران در طول عملیات‌های تبادل آتش ارائه دهند. اطلاعات یادشده، می‌تواند از طریق شفاف‌سازی لایه‌های مخفی‌سازی که با بهره‌گیری از متامواد دست‌ساز به‌صورت سازگار با واکنش‌های فرکانسی الکترومغناطیس عمل می‌کنند، در باندهای میکروویو و مایکروویو استفاده شود. متامواد می‌توانند تابش امواج را به گونه‌ای جهت‌دار می‌سازند که اشیاء

1 Losey

هدف در محدوده‌های فوق‌العاده پوشش فرکانسی به نظر می‌رسند، در نتیجه از تشخیص رادارهای دشمن مخفی می‌مانند، یا به صورت تعویضی به سرعت موج‌های بازتابی را تخریب می‌کنند. از منظر حسی سنجی و شناساگری، طراحی آنتن‌های فرایپهنای باند و ساختارهای مینیاتوریافته باعث توانمندی در جمع‌آوری داده‌های چندپارامتری از محیط جنگی می‌شود. آنتن‌ها نه صرفاً می‌توانند در باندهای RF تا THz سیگنال‌ها را با حساسیت بالا دریافت کنند بلکه می‌توانند به صورت همزمان در چندین باند فرکانسی کار کنند و در نتیجه اطلاعات ترکیبی از پوشش رادار، هدایت لیزری و تشخیص شبی را ترکیب و تجزیه و تحلیل نمایند. چنین قابلیت، مخصوصاً در سامانه‌های ترکیبی جنگ هوایی و دفاع موشکی نقش مهمی داشته. چرا که ترکیب سیگنال‌های راداری با داده‌های خوراکی‌نوردی و داده‌های رادارهای فرابنفش، امکان شناسایی هدف‌های با سازه‌های بیش از ۲۰۵ سانتی‌متر در فواصل لامپ‌دهی را فراهم می‌آورد، که بعضاً بهبود اختلاف پوشش در سطح چند دسی‌متر تا زیر یکسانی سانتی‌متر را فراهم می‌سازد (مک کریگت^۱، ۲۰۲۱: ۹۲). پیشرفت مذکور، نه صرفاً امکان ردیابی دقیق پره‌های باله‌دار و موشک‌های کروز با پره‌های بسیار ریز را میسر می‌سازد، بلکه بستر مناسبی برای پیاده‌سازی سامانه‌های دفاعی چندسطحی فراهم می‌کند که در آن رادارهای فرایپهنای باند، لیزرهای نوری و حسگرهای ماکروسکوپی الکترومغناطیس به صورت همزمان و هم‌ساز به پردازش داده‌های زمانی-فرکانسی می‌پردازند. در این مسیر، پردازش سیگنال‌های مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری عمیق و فیلترهای کالمان توزیع شده، بخصوص در شبکه‌های پویای کشتی‌ها و ایستگاه‌های زمینی، قادرند از حجم عظیم بازتاب‌های راداری، نویزهای الکترومغناطیس زیربنایی و تداخل‌های مصنوعی مانیفست‌ها را استخراج و به صورت بدون تاخیر اطلاعات جنگی سازنده‌ای تولید کنند. بنابراین، یک لایه تصمیم‌گیری هوشمند که به صورت خودسازمانده در القای انرژی به هدف‌های متحرک یا استقرار دفاع الکترومغناطیس کاربرد دارد، شکل می‌گیرد. یکی از جذاب‌ترین حوزه‌های نوظهور، رادارهای کوانتومی هستند که با بهره‌گیری از اثر هم‌بستگی بین فوتون‌های زوجی می‌توانند نسبت به هدف‌های با مسدودکننده‌های راداری کلاسیک به طور قابل توجهی حساسیت بیشتری نشان دهند. فناوری الکترومغناطیس نه صرفاً می‌تواند سیگنال‌های برگشتی حتی در حضور پوشش‌های

شفاف را با نسبت سیگنال-به-نویز بیش از دو برابر نسبت به رادارهای فتویی سنتی فراهم کند، بلکه با اعمال تکنیک‌های هم‌زمان‌ساز بر بسترهای مسیر یاب ژئودزی، امکان تشخیص دقیق موقعیت سه-بعدی هدف در فواصل هزار کیلومتری را فراهم می‌سازد. ترکیب این رادارهای کوانتومی با میدان‌های الکترومغناطیس قوی است که در سطح فضا (فضای نزدیک به ماه) مستقر می‌شوند، امکان پیاده‌سازی سامانه‌های دفاعی فضایی را می‌دهد که می‌توانند تهدیدات بالستیک نه تنها را شناسایی، بلکه پیش از برخورد، با استفاده از پرتوهای میکروویو یا لیزری انرژی‌زا به سرعت هدف را تخریب یا منحرف کنند (مالسی ۱، ۲۰۲۲: ۴۱). چنین موردی، یک تحول بنیادی در مفهوم استراتژیک تعادل ترسانی به وجود می‌آورد، زیرا برای دشمن دیگر راهی برای عبور از شیلدهای الکترومغناطیس وجود ندارد. در کنار تحولات یادشده، فناوری‌های فرافراکانس «نانو-موج» نیز نقش اساسی در کشف و شناسایی هدف‌های مخفی شده در مواد شفاف برای امواج رادیویی ایفا می‌کنند. باند موردنظر، نه صرفاً به تشخیص تراکم‌های آب‌گریز یا سنگین‌نواهای مخفی در زیردریایی‌ها اجازه می‌دهد، بلکه می‌تواند برای انتقال اطلاعات ارتباطی با سرعتی نزدیک به یا حتی فراتر از ترتیبی چند پتانیوم در کانال‌های فضا-زمینی استفاده شود، به گونه‌ای که ارتباطات بین یک سامانه زیرآبی بدون نیاز به سطوح سطحی یا ماهواره‌های پیوست‌پذیر، قابلیت اطمینان‌پذیری فوق‌العاده‌ای داشته و در معرض دسترسی‌های الکترومغناطیس دشمن به حداقل می‌رسد. جلوه‌های دیگری که به صورت تمام‌جایگیرانه بر ساختارهای نظامی سرایت کرده‌اند، شامل سلاح‌های پرتوهای الکترومغناطیس متمرکز با توان بالا هستند. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، لیزرهای فوق‌العاده گران‌قدرت می‌توانند در عرض کسری از یک ثانیه سطوحی را که از ترکیب سرامیک، فولاد و ترکیبات ترکیبی ساختارهای مقاومت در برابر حرارت ساخته‌اند، به سرعت تبخیر کنند. قابلیت یادشده، نه صرفاً برای سرنگونی سلاح‌های پرتابه‌دار با سرعت صوتی و فوق‌صوتی به کار می‌رود، بلکه می‌تواند در مهار پرواز پهپادهای کوچک و حتی پهپادهای نرم‌افزاری که برای نظارت و جمع‌آوری هوش اطلاعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مؤثر باشد. با توجه به پیشرفت‌های مادی که امکان ساخت لیزرهای گرانشی مصنوعی با استفاده از متامواد نیمه‌رساناهای گرافنی و بایومیکروتیک‌ها را فراهم می‌آورد، می‌توان پرتوهای لیزری را به صورت انطباقی شکل

داد به طوری که مسیر انرژی در طول مسیر پرواز به دقت تنظیم شده و از انحرافات ناشی از جوی یا تغییرات دما به حداقل ممکن برسد. به این ترتیب، کارایی سلاح‌های انرژی‌زا در شرایط واریانس جوی یا رطوبت بالا نیز حفظ می‌شود. در حوزه جنگ الکترومغناطیس نیز روش‌های ترکیبی «پاشش ترکیبی» ظهور یافته‌اند. استراتژی مذکور، نه تنها شامل مزاحمت رادیویی به صورت گسترده در باندهای S-Band، X-Band و Ku-Band برای مختل کردن رادارهای هوایی مخالف می‌شود، بلکه همزمان از درگیری‌های الکترومغناطیس با توان کیلوژول آنالیز ک میکروویو برای تخریب الکترونیک‌های حساس، استفاده می‌گردد. در قالب این حملات، ترکیب پالس‌های کوتاه مدت با پهنای باند گسترده و شکل‌گیری الگوهای زمان-پالس باعث می‌شود که سامانه‌های پادمان‌های دفاعی نتوانند به سرعت به دستورات واکنش نشان دهند. در واقع، این ترکیب یک «آشوب ساب‌نانو» در محیط الکترومغناطیس ایجاد می‌کند که حتی در نهایت می‌تواند به صورت معکوس فرکانس توزیع شده را تحت تأثیر قرار دهد و خطر فازهای رایج در گفتگوهای دیجیتال را به حدی کاهش دهد که فقدان کلیدهای رمزنگاری برای دشمن غیرقابل دسترس شود (لیندا دوو، ۲۰۰۹: ۲۶). نقش اساسی امیدانس توافقی و تطبیق‌پذیری امیدانس در سامانه‌های ضد EMP نیز از اهمیت پنهان نیست. تکنیک‌های پیوسته تنظیم امیدانس با استفاده از مدارهای الکترومغناطیس مبتنی بر نیم‌رساناهای گرافن، به گونه‌ای عمل می‌کند که هر موج الکترومغناطیس که به ساختارهای حیاتی می‌رسد، بلافاصله با یک واکنش «پوشش» پاسخ می‌دهد. پوشش مذکور، می‌تواند از تخریب دائمی قطعات حساس جلوگیری کند، در حالی که انرژی بیش از حد را به صورت بازتاب به فضا هدایت می‌کند. همین‌طور، در لایه‌های مزدوج پوشش‌های موگاپین که از ترکیب نانولایه‌های با ضریب شکست متغیر استفاده می‌کنند، امکان تجزیه و تحلیل دقیق فاز موجی را فراهم می‌کند. چنین مسئله‌ای، به ویژه در سامانه‌های تشخیص هدف‌های مخفی که با استفاده از جذب‌پذیری فرکانس بالایی سطح رادار را به حداقل می‌رسانند، کمک می‌نماید، چرا که با تنظیم فاز بازتابی می‌توان امواج بازگشتی را به گونه‌ای ترکیب کرد که در فرکانس‌های عملیاتی دشمن نابینا شوند. مدل‌سازی عددی بر پایه معادلات ماکسول با روش‌های فینیت-المنت یا فینیت-دفرنس به مهندسان امکان می‌دهد تا این ترکیب‌های متاپردازش‌های فرکانس-باند گسترده

را در فضای واقعی شبیه‌سازی کنند و هزینه تولید فیزیکی را به صورت قابل قابل تغییر کاهش دهند. در نتیجه، فرایند چرخه طراحی-تولید-استفاده به صورت چرخه‌ای با زمان بازخورد کمتر از چند ساعت امکان پذیر می شود. تجمع این متااستراتژی‌های پوشش با سامانه‌های هدایت لیزری نه صرفاً قابلیت‌های مخفی سازی فرکانسی را تقویت می کند، بلکه امکان «پوشش فعال» را می دهد. در این حالت، حسگرهای فتوئنتیکی در طول موج‌های نزدیک به اینفر-قرمز و فرابنفش دسترسی بلادرنگ به اطلاعات موقعیت نسبی دشمن دارند، سپس از طریق آرایه‌های میکرو-آنتن‌های تک پیکسل-قابلیت-پیکسل دار که می توانند فاز و شدت پرتو را در زمان واقعی تنظیم کنند، ساختارهای نوری-الکترومغناطیس را به گونه‌ای بازسازی می نمایند که تصویر زمینه واقعی را به صورت مستمر به نقش می آورند. این گونه، کشتی‌های ناوشی، هواپیماهای مبارزه‌ای و حتی سربازان پیاده نظام می توانند به صورت «بیکاری» در باندهای رادار و بینایی-الکترومغناطیس ظاهر شوند، در حالی که ارتباطات داخلی خود را همچنان از طریق شبکه‌های زیرفشانی یا لایه‌های کوانتومی همه جهت منتقل می کنند تا در برابر توهین‌های الکترومغناطیس مقاومت نشان دهند. در عرصه سلاح‌های پرتوهای الکترومغناطیس، تمرکزی که در سال‌های اخیر از لیزرهای دیود و فیبر به سمت میکروویوهای توان بالا تغییر یافت، نشان از یک مسیر تکامل مشترک دارد. سلاح‌های یادشده، نه صرفاً برای نابودی فیزیکی هدف‌های سامانه‌ای مانند موشک‌های پرتابی یا سامانه‌های راهرسی بلکه برای «ریست کردن» الکترونیک‌های میکرو-الکترونیک با زمان پاسخ در مقیاس نانو ثانیه مورد استفاده قرار می گیرند. معماری‌های توزیع شده که از مولدهای سلفی ن دستگاه دار مبتنی بر نیمه هادی گالیوم نیترید بهره می گیرند، می توانند پالس‌های کوتاه مدت با توان پیک ۱ تا ۱۰ گیگاوات تولید کنند (کاستریلو ۱، ۲۰۲۲: ۶). پالس‌ها پس از عبور از فازهای چند-پرده‌ای و آمپلیفایرهای میدل-فرکانس، به سرعت به صورت «تشت الکترونی» در فضای هدف منتشر می شوند. اثر ایمپالس الکترومغناطیس بر مدارات سیمی، موسوم به «حالت پذیری جاری» باعث شدیدگی خودکار دیودهای شاتکی می شود، در حالی که در مدارهای دیجیتال، زلزله الکترومغناطیس می تواند با ایجاد افزونگی مقادیر Gate-Oxide به سرعت باعث گسستگی لوجیکال ماندگار شود. ویژگی مذکور، استراتژی تخریبی را به عنوان ابزار اصلی «حذف دیجیتال»

در میدان نبرد تبدیل کرده است، به گونه‌ای که امکان شکست‌پذیری موقت یا دائم سامانه‌های نظارتی دشمن بدون نیاز به تخریب فیزیکی شود. دستگاه‌های القایی نیز به عنوان یک خروجی دیگر از فناوری الکترومغناطیس به خوبی شناخته می‌شوند. در این سلاح، جریان‌های میلی آمپر تا مگاآمپر در یک خط لامپ توزیع می‌شوند که باعث ایجاد نیروی لورنتز عظیم می‌شود. نیروی حاصل می‌تواند بالاستیک‌های سنگین را با سرعت ماکسیمال 5.2 km/s پرتاب کند، در حالی که نیروی رانده‌ی مدارهای الکتروستاتیک به صورت «الکترو دینامیک» با استفاده از ساختارهای تغذیه‌پذیر به صورت اسباب‌درمانی تنظیم می‌شود. فناوری پیشین مادون قرمز و رادارهای چند-پرتو در این سامانه‌ها به منظور ردیابی دقیق مسیر پرتابه، تعیین زمان پرتاب بهینه و خودکار سازی فازهای انرژی استفاده می‌شود. چنین ترکیبی می‌تواند از طریق الگوریتم‌های پیش‌بینی گر بر پایه یادگیری تقویتی زمان بندی دقیق پالس‌های توان را به حدی تنظیم کند که شارژ شتاب‌دهنده به صورت بهینه از حداکثر انرژی مصرفی بدون ورود به حاکی‌های «سخن‌پریشی» در مدارهای سبک بهینه‌سازی شود. نتایج این بهینه‌سازی در میدان نبرد، نه صرفاً افزایش سرعت و برد اسلحه را به ارمغان می‌آورد، بلکه با کاهش زمان بازگشت و ارتعاشات مکانیکی، امکان استفاده از چنین سلاحی در بسترهای ناوبری پویا همچون کشتی‌های سریع یا هواپیماهای بدون سرنشین را میسر می‌سازد.

یافته‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها

کارکردها و چالش‌های فناوری الکترومغناطیس در سیاست دفاعی

تکامل فناوری‌های نظامی نقش محوری در شکل‌دهی به جنگ‌های مدرن و استراتژی‌های دفاعی ایفا کرده است. از نظر تاریخی، جنگ از اشکال ابتدایی بین جوامع قبیله‌ای به درگیری‌های پیچیده بین کشورهای صنعتی تبدیل شده است. پیشرفت با دگرگونی‌های چشمگیر فناوری مشخص می‌شود که روش‌ها و استراتژی‌های به کار رفته در نبرد را متحول کرده است. به عنوان مثال، توسعه کشتی‌های زرهی در دهه ۱۸۶۰، مسلسل‌ها در دهه ۱۸۹۰ و تانک‌ها و هواپیماهای سرنشین‌دار در دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰، پویایی درگیری‌های میدان نبرد را اساساً تغییر داد. قرن بیستم شاهد تغییرات چشمگیری بود، زیرا اصول تولید انبوه و استاندارد سازی در آموزش نظامی، سازماندهی و تسلیحات به کار گرفته شد و سبب ایجاد ارتش‌های انبوه وفادار به دولت-ملت‌های

مدرن شد. انقلاب صنعتی سرعت جنگ را افزایش داد و نوآوری‌هایی مانند ناوهای هواپیمابر و رادار در دهه‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ و همچنین سلاح‌های هسته‌ای در دهه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ را به دنبال داشت. هر یک از این پیشرفت‌ها نه صرفاً نبرد را متحول کرد، بلکه بر ساختارهای اقتصادی زیربنایی جوامع درگیر جنگ نیز تأثیر گذاشت و منعکس‌کننده ایده‌ای بود که توسط آلوین و هایدی تافلر مطرح شده بود مبنی بر اینکه انجام جنگ، آینده‌ای از روش‌های خلق ثروت است. با افزایش وابستگی جنگ به فناوری‌های پیشرفته، طیف الکترومغناطیس به عنوان یک حوزه حیاتی ظهور کرد. نقش طیف الکترومغناطیس شامل کارکردهای مختلفی مانند نظارت، ارتباطات و حمله الکترونیکی است که برای عملیات نظامی مدرن ضروری هستند. اهمیت این حوزه در درگیری‌های معاصر، مانند جنگ روسیه و اوکراین، برجسته شده است و نیاز فوری به قابلیت‌های یکپارچه جنگ الکترونیک را برجسته می‌کند. از نظر تاریخی، افزایش رقابت در درون طیف الکترومغناطیس سبب پیشرفت‌های استراتژیک و فناوری شده است، به طوری که دشمنان از فناوری‌های پیشرفته برای کسب مزایای نظامی استفاده می‌کنند. تکامل مداوم، مستلزم سازگاری و نوآوری مداوم در سیاست‌های دفاعی است، زیرا کشورها تلاش می‌کنند تا آزادی عملیاتی خود را در این طیف حیاتی تضمین کنند. چالش‌های ناشی از محدودیت‌های نظارتی و اقدامات خصمانه، چشم‌انداز را پیچیده‌تر می‌کند و خواستار تمرکز استراتژیک بر حفظ تسلط در طیف الکترومغناطیس برای عملیات نظامی مؤثر است. فناوری الکترومغناطیس نقش محوری در استراتژی‌های دفاعی مدرن ایفا می‌کند و کارکردهای متعددی دارد که اثربخشی نظامی و قابلیت‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد. کارکردهای یادشده را می‌توان به طور کلی به جنگ الکترونیک، مدیریت طیف و اطلاعات سیگنال‌ها طبقه‌بندی کرد. (مک کریگت ۱، ۲۰۲۱: ۹۳).

جنگ الکترونیک شامل استفاده از طیف الکترومغناطیس برای کنترل، حمله یا ایجاد مانع در عملیات دشمن است. هدف اصلی جنگ الکترونیک، سلب امتیاز طیف الکترومغناطیس از دشمنان و در عین حال تضمین دسترسی بدون مانع نیروهای خودی به آن است. حوزه مذکور، شامل سه فعالیت اصلی است: حمله الکترونیکی، حفاظت الکترونیکی و پشتیبانی الکترونیکی. حمله الکترونیکی به عملیاتی اطلاق می‌شود که حسگرهای الکترونیکی دشمن، مانند رادار و سیستم‌های

ارتباطی را با ارسال سیگنال‌های نویز مانند (پارازیت) یا سیگنال‌های فریبنده که سیستم‌های دشمن را گمراه می‌کنند، تضعیف یا مختل می‌کند. برای مثال، درگیری‌های اخیر، از جمله درگیری‌های اوکراین، اثربخشی تکنیک‌های پارازیت‌اندازی را در مختل کردن سیگنال‌های GPS نشان داده‌اند که بر دقت سیستم‌های تسلیحاتی تأثیر می‌گذارد. در مقابل، حفاظت الکترونیکی شامل اقداماتی است که برای محافظت از حسگرهای خودی در برابر حملات الکترونیکی دشمن انجام می‌شود. چنین موردی، شامل استراتژی‌هایی است که تاب‌آوری سیستم‌های ارتباطی را در برابر پارازیت و سایر اشکال تداخل افزایش می‌دهد و تضمین می‌کند که عملیات نظامی می‌تواند بدون اختلال ادامه یابد. مدیریت مؤثر طیف فرکانسی برای هماهنگی و اجرای عملیات در داخل طیف الکترومغناطیس ضروری است. مدیریت شامل عملکردهایی مانند مدیریت فرکانس، هماهنگی با کشورهای میزبان و حل مسائل مربوط به تداخل طیف فرکانسی مشترک می‌شود. پیچیدگی محیط عملیاتی، درجه بالایی از هماهنگی را ایجاد می‌کند تا اطمینان حاصل شود که نیروهای نظامی می‌توانند بدون مانع از اقدامات خودی یا دشمن از طیف الکترومغناطیس استفاده کنند. اطلاعات سیگنال یک جزء حیاتی از عملیات دفاعی مدرن است که شامل جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل ارتباطات الکترونیکی رهگیری شده می‌شود. اطلاعات سیگنال را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد: اطلاعات الکترونیکی، که بر سیگنال‌های غیر ارتباطی تمرکز دارد و اطلاعات ارتباطی که با ارتباطات رهگیری شده سروکار دارد. عملکرد جمع‌آوری اطلاعات، نیروهای نظامی را قادر می‌سازد تا از توانایی‌ها و نیت دشمن بینش کسب کنند و در موقعیت‌های جنگی یک مزیت استراتژیک ایجاد کنند. ادغام فناوری الکترومغناطیس در سیاست دفاعی، چالش‌های بنیادی را ایجاد می‌کند که بر اثربخشی عملیاتی و برنامه‌ریزی استراتژیک تأثیر می‌گذارد. (لیندا دوو^۱، ۲۰۰۹: ۲۷). در عصر حاضر، توسعه فناوری اطلاعات و ارتباطات به ویژه فناوری‌های مرتبط با فضای سایبری، در حوزه غیرنظامی که دروازه آن اینترنت است، به عنوان یک سلاح در میدان نبرد مطرح می‌باشد و کاربرد آن در آینده نزدیک برای توفیق عملیات‌های نظامی امری انکارناپذیر خواهد بود (عبداللهی و حق نگهدار، ۱۳۹۴: ۱۱۳). پیشرفت سریع فناوری، به ویژه در حوزه‌هایی مانند هوش مصنوعی و سیستم‌های بدون سرنشین، جنگ‌های مدرن را متحول کرده

¹ Linda Douw

است، اما در عین حال آسیب‌پذیری‌هایی را نیز ایجاد کرده است که می‌تواند توسط دشمنان مورد سوءاستفاده قرار گیرد. علیرغم کاربردهای امیدوارکننده این فناوری‌ها، استقرار آنها اغلب با مشکلاتی مانند نیاز به منابع انرژی قابل توجه و محدودیت‌های زیست‌محیطی که می‌توانند بر عملکرد تأثیر بگذارند، مواجه است. در نتیجه، نیروهای نظامی با تأخیر در استقرار و آموزش با تجهیزات وابسته به طیف فرکانسی مواجه می‌شوند که می‌تواند آمادگی عملیاتی را به خطر بیندازد. افزایش اتکا به فناوری تجاری، نگرانی‌هایی را در مورد امنیت و قابلیت اطمینان سیستم‌هایی که ممکن است تحت آزمایش و ارزیابی دقیق نظامی قرار نگرفته باشند، ایجاد می‌کند. با افزایش سرمایه‌گذاری‌های خصوصی در شرکت‌های فناوری دفاعی، نیاز به اطمینان از همسویی این نوآوری‌ها با اهداف امنیت ملی و تحمل سختی‌های شرایط جنگی وجود دارد. یکی از چالش‌های اصلی در به‌کارگیری قابلیت‌های جنگ الکترومغناطیس، پیچیدگی ذاتی طیف الکترومغناطیس است. مدیریت مؤثر طیف الکترومغناطیس برای عملیات تهاجمی و دفاعی بسیار مهم است. حملات الکترونیکی، مانند پارازیت و جعل سیگنال، با هدف تضعیف قابلیت‌های دشمن از طریق مختل کردن سیستم‌های ارتباطی و ناوبری آنها انجام می‌شوند. تاکتیک‌ها اغلب نیاز به هماهنگی پیچیده و تنظیمات در لحظه دارند تا اطمینان حاصل شود که نیروهای خودی تحت تأثیر منفی همان اقدامات مخرب قرار نمی‌گیرند. ارزیابی حملاتی که از جنگ الکترونیک استفاده می‌کنند می‌تواند پیچیده باشد، به خصوص زمانی که چنین قابلیت‌هایی برای ایجاد اثرات غیر جنبشی طراحی شده‌اند که ممکن است خطر آسیب فیزیکی را نیز به همراه داشته باشند. برای مثال، استفاده از لیزرهای پرانرژی در صورت عدم کنترل دقیق می‌تواند ناخواسته به زیرساخت‌های غیرنظامی یا تأسیسات پزشکی آسیب برساند، که این امر ملاحظات قانونی و اخلاقی را در مورد انجام جنگ مطرح می‌کند. چشم‌انداز در حال تغییر درگیری‌های جهانی، همانطور که در مطالعات موردی اخیر مانند جنگ‌های اوکراین و غزه نشان داده شده است، اهمیت استراتژیک برتری طیف الکترومغناطیس را برجسته می‌کند. کنترل طیف الکترومغناطیس می‌تواند به طور قاطع بر اثربخشی نظامی و ایمنی غیرنظامیان تأثیر بگذارد. دستیابی و حفظ این کنترل مستلزم درک جامع از قابلیت‌های خودی و دشمن و همچنین چارچوب‌های قانونی حاکم بر استفاده از فناوری الکترومغناطیس در جنگ است. تعامل بین جنگ الکترومغناطیس و عملیات اطلاعاتی، محیط

استراتژیک را پیچیده می‌کند. توانایی شکل‌دهی، مختل کردن و بهره‌برداری از استفاده خصمانه از طیف الکترومغناطیس نه صرفاً نیازمند مهارت تکنولوژیکی است، بلکه درک دقیقی از اصول جنگ اطلاعاتی و پیامدهای اخلاقی چنین عملیاتی را نیز می‌طلبد. جنگ در طول قرن‌ها تکامل یافته و از درگیری‌های ابتدایی میان جوامع قبیله‌ای به درگیری‌های پیچیده با کشورهای صنعتی تبدیل شده است. پیشرفت از سلاح‌های ابتدایی مانند تیر و کمان به سیستم‌های پیشرفته مانند تفنگ، تانک و موشک، تأثیر عمیق پیشرفت‌های علمی و فناوری بر استراتژی و عملیات نظامی را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که قرن بیستم شاهد پیشرفت‌های سریع فناوری بود که پیوسته میدان نبرد را تغییر شکل می‌داد و مزایای نظامی قابل توجهی را به اولین کشورهای که فناوری‌های جدید را به کار گرفتند، ارائه می‌داد. تاریخ همچنین نشان می‌دهد که برتری اولیه فناوری می‌تواند زودگذر باشد، زیرا دشمنان اقدامات متقابلی را برای خنثی کردن این مزایا توسعه می‌دهند. کاربرد استدلال قیاسی در تحلیل حقوقی، به ویژه در مورد عملیات نظامی، تلاشی ارزشمند اما بالقوه پرخطر بوده است. اگرچه ترسیم شباهت‌ها بین رویه‌های نظامی معاصر و سوابق تاریخی می‌تواند بینش‌های مفیدی ارائه دهد، اما درک کاملی از قابلیت‌ها و محدودیت‌های فناوری فعلی را نیز ضروری می‌سازد. دستورالعمل‌های تالین به عنوان نمونه‌های قابل توجهی عمل می‌کنند که اصول حقوق بین‌الملل طراحی شده برای جنگ سنتی را در عملیات نظامی مدرن در فضای مجازی به کار می‌برند. (کاستریلو ۱، ۲۰۲۲: ۸). چنین استدلال قیاسی برای حقوق‌دانان، استراتژیست‌های نظامی و محققان به طور یکسان ضروری است، زیرا چارچوب‌های قانونی حاکم بر تعامل نظامی در حوزه‌های مختلف را شکل می‌دهد. پیشرفت‌های اخیر در فناوری الکترومغناطیس در بهبود عملیات میدان نبرد نقش مهمی داشته‌اند. به عنوان مثال، تمرکز ارتش ایالات متحده بر هوش مصنوعی و جنگ شبکه‌ای، نحوه رویکرد سربازان به سناریوهای جنگی را تغییر می‌دهد. برنامه‌هایی مانند فرماندهی و کنترل مشترک همه‌جانبه با هدف ایجاد یک شبکه یکپارچه که سربازان، پهپادها، هواپیماها و کشتی‌های دریایی را به هم متصل می‌کند، آگاهی موقعیتی و قابلیت‌های تصمیم‌گیری را بهبود می‌بخشد. افزایش وابستگی به زیرساخت‌های دیجیتال، آسیب‌پذیری‌هایی را ایجاد می‌کند، به ویژه در زمینه درگیری‌های احتمالی با دشمنانی

مانند چین. نقش بخش تجاری در تقویت قابلیت‌های نظامی به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. شرکت‌های نوآور می‌توانند با ارائه راه‌حل‌های پیشرفته در آگاهی از میدان نبرد، سیستم‌های بدون سرنشین و جمع‌آوری اطلاعات، اثربخشی ارتش ایالات متحده را در جنگ‌های نامنظم افزایش دهند. سابقه تاریخی که توسط رئیس جمهور فرانکلین دی. روزولت، که بر قدرت صنعتی آمریکا در طول جنگ جهانی دوم تأکید کرد، تعیین شد، امروزه همچنان طنین‌انداز است و بر لزوم همکاری بخش خصوصی در توسعه فناوری‌های نظامی پیشرفته تأکید دارد. علیرغم مزایایی که پیشرفت‌های فناوری ارائه می‌دهند، ارتش ایالات متحده با چالش‌های قابل توجهی در تطبیق با چشم‌انداز امنیتی در حال تحول که با تهدیدات نامتقارن از سوی دشمنانی مانند چین و روسیه مشخص می‌شود، روبرو است. تأکید بر جنگ نامنظم، مستلزم واکنشی چابک است که از فناوری‌های جدید بهره می‌برد و در عین حال نوآوری را در ساختارهای نظامی تقویت می‌کند. اریک اشمیت نسبت به خطرات ناشی از سکون بوروکراتیک هشدار داده و از دولت خواسته است تا شرایط مساعدی را برای پیشرفت فناوری و سرمایه‌گذاری در قابلیت‌های حیاتی لازم برای حفظ برتری نظامی ایجاد کند. با ادامه تکامل استراتژی‌های نظامی، ادغام فناوری‌های نوظهور با شیوه‌های نظامی سنتی برای دستیابی به موفقیت عملیاتی در درگیری‌های آینده ضروری خواهد بود. تکامل فناوری الکترومغناطیس در سیاست دفاعی با یک تحول مداوم مشخص می‌شود که پیشرفت‌های جدید را در عملیات نظامی ادغام می‌کند. با ورود به قرن بیست و یکم، پیش‌بینی می‌شود فناوری‌هایی مانند انرژی هدایت‌شده، هوش مصنوعی و محاسبات کوانتومی نقش‌های محوری در شکل‌دهی به استراتژی‌ها و قابلیت‌های جنگی آینده ایفا کنند. فناوری‌های یادشده، نه صرفاً عملیات تهاجمی و دفاعی را تقویت می‌کنند، بلکه الگوهای جدیدی را برای چگونگی تعامل نیروهای نظامی با دشمنان در حوزه‌های مختلف ایجاد می‌کنند. ادغام فناوری‌های پیشرفته، فرماندهان نظامی را قادر می‌سازد تا قابلیت‌های برتر طیف الکترومغناطیس را ایجاد کنند، که برای فرماندهی و کنترل در جنگ‌های مدرن حیاتی هستند. استراتژی برتری طیف الکترومغناطیس ۲۰۲۰ رویکردهایی را برای ارتقای عملیات نظامی ایالات متحده با توسعه زیرساخت‌های چابک و کاملاً یکپارچه طیف الکترومغناطیس ترسیم می‌کند و تضمین می‌کند که نیروهای آمریکایی می‌توانند عملیات نظامی را به طور مؤثر برنامه‌ریزی، حس، مدیریت و کنترل کنند. انتظار می‌رود

این تأکید بر برتری طیف الکترومغناطیس بر سرمایه‌گذاری‌های آینده، مخصوصاً در حوزه تحقیق و توسعه با هدف نوسازی سیستم‌های قدیمی، تأثیر بگذارد. انتظار می‌رود فناوری‌های نوظهور پیامدهای قابل توجهی برای امنیت ملی داشته باشند. وزارت دفاع بر حوزه‌های متنوعی از جمله رباتیک، سیستم‌های مافوق صوت و فناوری‌های پیشرفته تولید مانند چاپ سه‌بعدی تمرکز دارد. پیش‌بینی می‌شود که این نوآوری‌ها، تولید در حجم بالا و آمادگی عملیاتی را تسهیل کنند و در نتیجه، توانایی ایالات متحده را برای پاسخگویی به تهدیدات جهانی افزایش دهند. نکته قابل توجه این است که توسعه فناوری‌های کوانتومی نویدبخش گشودن قابلیت‌های جدید در عملیات نظامی است و چشم‌انداز استراتژیک را بیش از پیش پیچیده می‌کند. با تشدید رقابت ژئوپلیتیکی، اهمیت همکاری با متحدان و شرکا از اهمیت بالایی برخوردار می‌شود. ایالات متحده تشویق می‌شود تا از طریق بهبود فرآیندهای فروش نظامی خارجی و ابتکارات توسعه مشترک، اشتراک‌گذاری فناوری و صادرات دفاعی را تسهیل کند. چنین تلاش‌های مشترکی در مقابله با تاکتیک‌های جنگ نامنظم مورد استفاده دشمنان و در بهره‌برداری از نوآوری‌های بخش تجاری برای افزایش قابلیت‌های دفاعی ضروری است. ظهور تهدیدات هیبریدی مستلزم یک پاسخ چندوجهی است که پیشرفت‌ها در جنگ اطلاعاتی، عملیات سایبری و سایر تاکتیک‌های غیرمتعارف را در بر می‌گیرد. اهمیت استراتژیک طیف الکترومغناطیس پتانسیل حوادث بین‌المللی را افزایش داده و توافقات مختلفی را بین کشورها ضروری ساخته است. چنین اهمیتی با پیشرفت‌های مداوم در قابلیت‌های نظامی و اطلاعاتی کشورهایی مانند چین، روسیه و ایران که تهدیدهای فزاینده‌ای را برای نیروها و منافع ایالات متحده، به ویژه در حوزه جنگ‌های نامنظم، ایجاد می‌کنند، برجسته‌تر می‌شود. (تورنکوایست ۱، ۲۰۲۰: ۱۶). همانطور که اریک اشمیت، مدیرعامل سابق گوگل، تأکید کرد، ایالات متحده باید با تقویت نوآوری و پیشرفت فناوری، خود را با این چشم‌انداز در حال تحول وفق دهد تا جایگاه خود را در امور جهانی حفظ کند. انتظار می‌رود کشورهای متخاصم با ایالات متحده به همکاری خود ادامه دهند و منابع نظامی، فناوری و اقتصادی خود را که می‌تواند عملیات نظامی ایالات متحده را تضعیف کند، به اشتراک بگذارند. ماهیت دوگانه‌ی طیف فرکانسی، مدیریت و استراتژی‌های عملیاتی را برای ملت‌های سراسر جهان پیچیده می‌کند. قدرت‌های غربی

و شرقی، ضرورت سرمایه‌گذاری در سیستم‌های وابسته به طیف فرکانسی را برای تأمین منافع نظامی و ملی خود تشخیص داده‌اند و این امر بر نظامی‌سازی طیف فرکانسی از زمان جنگ سرد تأکید دارد. وابستگی دوگانه به سرویس‌های مبتنی بر طیف الکترومغناطیس نه صرفاً نگرانی‌های امنیتی را افزایش می‌دهد، بلکه بر اقتصاد جهانی که به شدت به این فناوری‌ها متکی است نیز تأثیر می‌گذارد. برای عبور مؤثر از این چالش‌ها، ایجاد چارچوب‌های مدیریتی قوی برای عملیات طیف الکترومغناطیس بسیار ضروری است. چنین مدیریتی باید با هدف ارتقای اهداف استراتژیک و پشتیبانی از برتری نظامی در حوزه‌های مختلف، از جمله هوا، زمین، دریا، فضا و فضای مجازی، انجام شود. حفظ برتری طیف الکترومغناطیس برای تضمین اثربخشی عملیاتی، توانمندسازی پرسنل نظامی در تصمیم‌گیری کارآمد و پیشبرد قابلیت‌های مشترک با شرکای تجاری حیاتی است. همزمان با افزایش قابلیت‌های طیف الکترومغناطیس کشورها، پیامدهای آن برای سیاست امنیتی و دفاعی بین‌المللی همچنان در حال تکامل خواهد بود و این امر مستلزم راهبردهای تطبیقی برای پرداختن به پیچیدگی‌های رقابت قدرت‌های بزرگ در حوزه الکترومغناطیس است.

فناوری الکترومغناطیس و قدرت نرم

فناوری الکترومغناطیس، به‌عنوان یکی از ساختارهای بنیادین تمدن مدرن، نه صرفاً نقش سنتی خود را به‌عنوان ابزارهای سخت نظامی، تولید صنعتی و زیرساخت‌های فیزیکی حفظ کرده است، بلکه در سطح بین‌المللی به‌وسیله توانمندی‌های غیرمستقیم و نرم خود تبدیل به یک نیروی پیشرو در حوزه «قدرت نرم» گردیده است. برای درک این تحول پیش از هر چیز باید به دو مفهوم اساسی استناد کرد: نخست، مفهوم «قدرت نرم» که توسط جوزف نای به‌عنوان توانایی یک دولت برای جذب، متقاعدن و تأثیرگذاری بر دیگران بدون استفاده از زور یا پرداخت مالی تعریف می‌شود. دوم، ماهیت فناوری الکترومغناطیس که بر اصول امواج رادیومغناطیسی، جریان الکتریکی و میدان‌های مغناطیسی استوار است و شامل شبکه‌های مخابراتی سلولی، سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای، حسگرهای بی‌سیم، سامانه‌های انرژی هوشمند، سلاح‌های انرژی‌زا و فناوری‌های پزشکی تصویربرداری می‌شود. ترکیب این دو مفهوم، بستر یک چارچوب تحلیلی فراهم می‌آورد که به‌وسیله آن می‌توان نقش فناوری‌های الکترومغناطیس را در تشکیل و تقویت قدرت نرم

دولت‌ها در عرصه روابط بین‌الملل بررسی کرد. در اولین سطح، زیرساخت‌های مخابراتی پیشرفته همچون شبکه‌های ۵G و ۶G که بر بستر فناوری الکترومغناطیس ساخته می‌شوند، امکان دسترسی بی‌درنگ به حجم عظیمی از اطلاعات، محتواهای فرهنگی، خبری و آموزشی را برای کاربران داخلی و خارجی فراهم می‌سازند. دسترسی گسترده نه تنها یک بستر فنی برای تبادل اقتصادی و تجاری می‌سراید، بلکه به عنوان یک کانال دیپلماتیک دیجیتال عمل می‌کند. محتواهای تولیدشده توسط یک کشور می‌توانند به سرعت در شبکه‌های اجتماعی، سرویس‌های استریم و پلتفرم‌های آموزشی گسترش یابند و به این ترتیب تصویر مثبت، جذاب و نوآورانه آن کشور را در ذهن مخاطبان جهانی تثبیت کنند. وقتی یک دولت توانسته باشد زیرساخت‌های ارتباطی بی‌وقفه، پرسرعت و امنی را ارائه دهد، به طور خودکار یک نیروی جذب فرهنگی ایجاد می‌کند که می‌تواند دانشجویان، کارآفرینان، سرمایه‌گذاران و حتی گردشگران دیجیتال را به سوی خود جلب کند. جذابیت دیجیتال، مستقیماً در چارچوب قدرت نرم به عنوان عامل جذب شناخته می‌شود. در دومین سطح، سامانه‌های ناوبری مبتنی بر الکترومغناطیس، از جمله GPS، GLONASS و BeiDou، به عنوان ستون فقرات هرگونه فعالیت اقتصادی، لجستیکی و حتی نظامی در سطح جهان شناخته می‌شوند. هر کشور که بتواند این سامانه‌ها را به صورت جهانی سرویس‌دهی کند و استانداردهای فنی آن را در نهادهای بین‌المللی مانند ITU یا ICAO به رسمیت شناخته شود، به سرعت بستری برای ایجاد وابستگی متقابل می‌سازد. کشورهایی که حمل‌ونقل، کشاورزی دقیق، عملیات اضطراری یا حتی نظامی خود را بر این سامانه‌ها می‌سازند، به صورت فنی به منبع فناوری وابسته می‌شوند. وابستگی در مذاکرات دیپلماتیک به عنوان یک کارت فشار ملایم عمل می‌کند، زیرا هر گونه تغییر یا قطع سرویس می‌تواند عواقب جدی برای عملکرد روزمره آن‌ها داشته باشد. (استراوسفوجل ۱، ۲۰۰۹: ۱۸). به عبارت دیگر، تجاری‌سازی فناوری‌های ناوبری نه تنها یک ابزار اقتصادی است، بلکه یک ابزار سیاسی است که امکان بهره‌برداری از توانمندی‌های فنی برای رسیدن به اهداف استراتژیک را فراهم می‌سازد. حسگرهای بی‌سیم و اینترنت اشیا که بر پایه امواج الکترومغناطیس کار می‌کنند، در شهرهای هوشمند، کشاورزی دقیق، پیش‌بینی بلایای طبیعی و مدیریت منابع آب نقش مهمی ایفا می‌گردند. فناوری‌ها هنگامی که تحت یک چارچوب

حکومتی باز و شفاف توسعه می‌یابد، می‌تواند ارزش‌های «پایداری»، «کارآمدی» و «مسئولیت‌پذیری» را به‌صورت قابل مشاهده برای شهروندان داخلی و جوامع بین‌المللی ارائه دهند. شهرداری‌هایی که از این فناوری‌ها برای بهبود کیفیت هوا، کاهش ترافیک و بهینه‌سازی مصرف انرژی استفاده می‌کنند، به‌سرعت به‌عنوان مدل‌سازان شهرهای آینده شناخته می‌شوند و این تصویر مثبت می‌تواند به‌عنوان یک ابزار جذب دانش‌آموختگان، متخصصان و سرمایه‌گذاران ژئوبخش شود. در این مسیر، فناوری ایم به‌عنوان یک «زبان نرم» عمل می‌کند که از طریق آن ارزش‌های زیست‌محیطی و توسعه پایدار به‌صورت عملی به دیگران نشان داده می‌شود. در حوزه انرژی، فناوری‌های الکترومغناطیس نقش کلیدی در تولید، توزیع و مدیریت انرژی تجدیدپذیر ایفا می‌نمایند. مسئله مذکور، شامل توربین‌های بادی با سیستم‌های کنترل الکترومغناطیس پیشرفته، پانل‌های خورشیدی با مبدل‌های اینورتر هوشمند و شبکه‌های هوشمند می‌شود که قادر به تعادل لحظه‌ای بین عرضه و تقاضا هستند. وقتی یک کشور پیشگام در پیاده‌سازی این فناوری‌ها بوده و توانسته باشد پروژه‌های بزرگ انرژی پاک را به‌صورت بین‌المللی به‌سرانجام برساند، تصویرش به‌عنوان یک «کشور دوستدار محیط زیست» و «پیشنهاددهنده راه‌حل‌های اقلیمی» مستحکم می‌شود. چنین تصویری، نه تنها در مذاکرات بین‌المللی در چارچوب‌های اقلیمی (مانند توافق‌نامه پاریس) وزن بیشتری می‌یابد، بلکه به‌عنوان یک منبع اعتبار نرم می‌تواند زمینه همکاری‌های علمی-فنی، دریافت سرمایه‌گذاری‌های بین‌المللی و جذب دانشجویان بین‌المللی در حوزه انرژی‌های نو را فراهم آورد. بنابراین، فناوری‌های انرژی که تحت بستر امواج الکترومغناطیس عمل می‌کنند، به‌عنوان نماینده‌ای از تعهد اخلاقی و تکنولوژیک یک کشور در برابر چالش‌های جهانی، نفوذ قدرت نرم را گسترش می‌دهند. سلاح‌های انرژی‌زا و فناوری‌های دفاعی مبتنی بر الکترومغناطیس نیز اگرچه به‌صورت ظاهری در طبقه‌بندی قدرت سخت قرار می‌گیرند، اما می‌توانند با یک استراتژی دقیق به‌سمت ارتقای نرم‌گری نیز سوق پیدا کنند. (مالسی ۱، ۲۰۲۲: ۴۶).

انتشار اطلاعات در مورد پیشرفت‌های علمی-فنی این سلاح‌ها، به‌خصوص از طریق نشریات علمی، کارگاه‌های بین‌المللی و هم‌نشینی‌های دفاعی، می‌تواند به دیگر کشورها این تصویر را منتقل کند که یک دولت نه صرفاً توان منافع نظامی خود را تقویت می‌کند، بلکه توان علمی و فناوری‌اش را

به صورت شفاف به اشتراک می‌گذارد. شفافیت در اینخصوص، می‌تواند اعتماد بین‌المللی ایجاد کند و فرصت‌های همکاری در زمینه کنترل تسلیحات، توسعه فناوری‌های دفاعی مسالمت‌آمیز و پژوهش‌های مشترک را فراهم آورد. به عبارت دیگر، همان‌گونه که یک نیروی نظامی بدون مشروعیت می‌تواند به سرعت به نقض امنیت بین‌المللی منجر شود، یک نیروی دفاعی شفاف و مبتنی بر فناوری پیشرفته می‌تواند به عنوان یک نماد مسئولیت‌پذیری علمی مورد تحسین قرار گیرد و به این ترتیب در چارچوب قدرت نرم اثر می‌گذارد.

فناوری الکترومغناطیس و قدرت سخت

در عصر دیجیتال و رایانش، فناوری الکترومغناطیس نه فقط به عنوان زمینه‌ای مهندسی، بلکه به عنوان عنصری اساسی در ساختارهای قدرت دولتی ظاهر می‌شود. فناوری الکترومغناطیس شامل رادارها، سامانه‌های مخابراتی پرسرعت، سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای، سلاح‌های انرژی‌پذیر (مانند امواج پالس الکترومغناطیس، لیزرهای مستقیم‌دار و ریل‌گان‌ها) و ابزارهای جنگ الکترونیک است. از سویی، این اجزاء توانمندی‌های نظامی را به صورت مستقیم تقویت می‌سازند. از سوی دیگر، زیرساخت‌های ارتباطی، فرماندهی-کنترل و حفاظت از شبکه‌های اساسی را بهبود می‌دهند و در نهایت، بستر قدرت سخت یک دولت را گسترش می‌دهند. برای فهم عمیق این پدیده، لازم است تا آن را در چارچوب نظریات متنوع روابط بین‌الملل می‌نگریم. نظریه واقع‌گرایی، لیبرالیسم، ساخت‌گرایی، مکتب انگلیسی و حتی دیدگاه‌های انتقادی، همگی می‌توانند لایه‌های متفاوتی از تأثیر فناوری الکترومغناطیس بر قدرت سخت را بازگو کنند. از نقطه نظر واقع‌گرایان، قدرت بین‌المللی به گونه‌ای توصیف می‌شود که «توانایی یک دولت برای اعمال فشار بر دیگران» و «توانایی دفاع در برابر تهدیدات» بر پایه دارایی‌های مادی و نظامی است. در این چارچوب، فناوری الکترومغناطیس یک منبع مادی به شمار می‌آید که همانند سلاح‌های هسته‌ای یا شیمیایی در مقیاس قدرت دولت عمل می‌کند. سلاح‌های انرژی‌پذیر، به ویژه پالس فناوری الکترومغناطیس که می‌توانند در یک لحظه سیگنال‌های الکترونیکی دشمن را از کار بیندازند، توان تخریبی بالایی دارند اما هزینه عملیاتی کمتری نسبت به سلاح‌های پرتابه‌دار سنتی متطلب می‌کنند. ویژگی مذکور، به این معناست که یک کشور می‌تواند با سرمایه‌گذاری نسبی نسبتاً کم، توانمندی

تهدیدی پیدا کند که به صورت «تهدید تضمینی» عمل می‌کند. حتی اگر هرگز این سلاح به کار گرفته نشود، تنها وجود آن ممکن است تصمیم‌گیری‌های مخالفان را تغییر دهد. همان‌طور که رادارهای پیشرفته AESA یا سامانه‌های جمعی توان شناسایی، پیگیری و خنثی‌سازی اهداف را در زمان واقعی فراهم می‌کنند، رقیب را در یک وضعیت امنیتی-دروغی قرار می‌دهند: هرچه یک کشور سلاح‌های الکترومغناطیس بیشتری بسازد، دیگران نیز به سرعت برای حفظ تعادل، تکنیک‌های دفاعی یا هجومی خود را ارتقا می‌دهند. در این رقابت، توانمندی‌های فناوری الکترومغناطیس به عنوان معیاری جبران‌پذیر برای ناتوانی‌های نظامی سنتی مطرح می‌شود. برای مثال، یک دولت که توانایی ساخت لیزری برای خنثی‌سازی موشک‌های بالستیک دارد، می‌تواند نسبت به ابرقدرت‌های دیگر که سلاح‌های هسته‌ای دارند، در یک بُعد خاص برتری جویند. بنابراین، در تحلیل واقع‌گرایانه، فناوری الکترومغناطیس به عنوان یک «دارایی سخت» شناخته می‌شود که نه صرفاً ظرفیت تخریبی، بلکه تأثیرات استراتژیک بر تعادل قدرت بین‌دولتی را شکل می‌دهد. (مک کریگت ۱، ۲۰۱۳ الف: ۶۵)

اگرچه لیبرالیست‌ها بر این باورند که تعامل، مؤسسات بین‌المللی و نهادهای اقتصادی می‌توانند قدرت نظامی را محدود کنند، اما این نگاه نمی‌تواند پیشرفت‌های فناوری الکترومغناطیس را که همزمان می‌تواند نیروهای نظامی و نظام‌های ارتباطی را تقویت کند، نادیده بگیرد. شبکه‌های مخابراتی گسترده، سامانه‌های موقعیت‌یابی ماهواره‌ای (GPS، GLONASS، BeiDou) و فناوری‌های نسل پنجم و ششم (۶G/۵G) زیرساخت‌های اساسی برای تجارت جهانی، تبادل اطلاعات و همکاری‌های علمی هستند. این همان فناوری‌های الکترومغناطیس هستند که به وسیله «اتصال‌پذیری» به توسعه صلح‌ساز کمک می‌نمایند. بنابر این، لیبرالیست‌ها معتقدند که قدرت سخت ناشی از فناوری الکترومغناطیس می‌تواند به صورت «دو سویه» عمل کند: یک‌طرفه می‌تواند قدرت نظامی را تقویت نماید، اما در عین حال می‌تواند سازوکارهای شفاف‌سازی، اعتمادسازی و اقتصادهای باز را پشتیبانی کند. این امر سبب کاهش هزینه‌های استفاده از زور می‌شود، زیرا دو کشور می‌توانند از طریق تجارت و ارتباطات به جای جنگ، منافع متقابل را به دست آورند. از این رو، نهادهای بین‌المللی نظیر اتحادیه مخابرات بین‌المللی یا معاهدات مربوط به جلوگیری از استفاده

ناعدلانه از سلاح‌های الکترومغناطیس نقش اساسی در «نظم‌سازی» فضای فناوری الکترومغناطیس ایفا می‌کنند. توافق‌های مشترک بر مبنای «اعتماد متقابل» می‌توانند محدودیت‌هایی بر صدور و به کارگیری سلاح‌های الکترومغناطیس تعیین کنند. به عنوان مثال، معاهده‌ای درباره «پروژه EMP پذیر» می‌تواند قواعدی برای اطلاع‌رسانی پیش از آزمایش‌های بزرگ تنظیم نماید. چارچوب‌های نهادی همانند سدهای قانونی عمل می‌کنند و از تشدید رقابت‌های فضایی فناوری الکترومغناطیس جلوگیری می‌سازند، به گونه‌ای که هر دولت برای دسترسی به فناوری الکترومغناطیس باید از طریق مذاکرات و سازوکارهای بین‌المللی به دست آورد، نه صرفاً از طریق گسترش یکجانبه توان نظامی. به این ترتیب، لیبرالیست‌ها بر این باورند که اگرچه فناوری الکترومغناطیس می‌تواند قدرت سخت را افزایش دهد، اما می‌تواند به واسطه نهادهای بین‌المللی و تعاملات اقتصادی، ابزار صلح و همکاری هم بشود. ساخت‌گرایی، بر خلاف دو مکتب قبلی، تمرکز خود را بر معانی و هویت‌های نهفته در فناوری‌ها می‌گذارد. از دیدگاه ساخت‌گرایان، سلاح‌های الکترومغناطیس یا لیزرها صرفاً اشیاء فیزیکی نیستند. آن‌ها به عنوان نمادهایی برای نشان دادن توانایی فناوری پیشرفته، نوآوری و «مدرن‌سازی» به کار می‌روند. نمادها می‌توانند هویت ملی را در فضای بین‌المللی شکل دهند. برای مثال، اظهارات رسمی چین در مورد توانایی‌های الکترومغناطیس‌اش نه صرفاً به ارائه توان فنی می‌پردازد، بلکه پیامدهای نمادین برای جامعه بین‌المللی دارد: چین را به عنوان یک قدرت پیشرو در عصر اطلاعات معرفی می‌کند و این تصویر می‌تواند در مذاکرات دیپلماتیک و تعاملات اقتصادی مزیتی محسوب شود. همچنین، روایت‌های داخلی درباره «ساختن سلاح‌های الکترومغناطیس برای دفاع از سرزمین» می‌توانند در داخل کشور روح ملی‌گرایی و پشتیبانی جمعی از پروژه‌های دفاعی را تقویت کنند. این گونه داستان‌پردازی‌ها نه صرفاً مشروعیت سیاسی برای هزینه‌های گزاف در حوزه تحقیق و توسعه نظامی می‌سازند، بلکه مرزهای شناختی مردمان را به سوی یک هویت «مقاوم در برابر تهدیدات الکترومغناطیس» می‌کشند. به عبارت دیگر، فناوری الکترومغناطیس در چشم ساخت‌گرایان تبدیل به نماد قدرت علمی-فنی دولتی می‌شود که به وسیله آن دولت می‌تواند خود را به عنوان «نگهبان فضای اطلاعاتی» معرفی نماید. تصویر مذکور، در همان زمان می‌تواند به عنوان ابزار دیپلماتیک برای تقویت نفوذ در سازمان‌های بین‌المللی یا برای جلب سرمایه‌گذاری‌های خصوصی مورد استفاده قرار گیرد. در این

چارچوب، تکنولوژی خود نه تنها یک شیء فیزیکی است، بلکه یک گفتمان تولید می‌کند که در تعامل با دیگر کشورها و با نهادهای داخلی، رابطه قدرت-شناخت را بازتعریف می‌نماید. در ادامه، اگر از منظر مکتب انجمن انگلیسی نگاه کنیم، فناوری الکترومغناطیس نه صرفاً به عنوان یک عامل نظامی، بلکه به عنوان یک مؤلفه کلیدی در شکل‌گیری «جامعه بین‌المللی» مطرح می‌شود. مکتب یادشده، بر این باور است که نظم جهانی از ترکیبی از اصل قدرت. نهادها و ارزش‌ها تشکیل می‌شود. در این ترکیب، فناوری‌های الکترومغناطیس می‌توانند دوگانگی اساسی داشته باشند. یک سو، ایجاد «پروتکل‌های جهانی» برای مدیریت استفاده از باندهای فرکانسی، تنظیم استانداردهای مخابراتی و تصویب معاهدات منع به کارگیری سلاح‌های الکترومغناطیس، می‌تواند به عنوان ابزارهای قانونی برای حفظ «ساختار» جامعه بین‌المللی عمل کند. چارچوب‌های مذکور، مخصوصاً پس از تحولات داده‌محور پس‌حدیدده که نقش اطلاعاتی و ارتباطی در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک بیش از پیش نمایان شد، به صورت سازوکارهای نهادینه «قوانین فضایی الکترومغناطیس» تبدیل گشته‌اند. (هاینس ۱، ۲۰۲۲: ۱۶). به منظور مثال، تصمیم‌گیری‌های سازمان ملل درباره مراقبت از باندهای فرکانسی در اقدامات آسیا-پاسیفیک، یا مذاکرات میان‌المللی درباره «پیشگیری از تخریب عمدی زیرساخت‌های الکترومغناطیس» نمونه‌های ملموس این نوع توازن بین کارکردهای ارتشی و تعهدات سازمانی هستند. از سوی دیگر، اگر یک یا چند قدرت برتر، به تنهایی دسترسی به سلاح‌های الکترومغناطیس پیشرفته را حفظ کرده و از این تکنولوژی به عنوان ابزار «نقض نظم» استفاده نمایند، می‌تواند ساختار موجود را زیر سؤال بگیرد و به جای تقویت جامعه بین‌المللی، یک رقابت تازه «تقسیم‌سالاری» را ایجاد کند. به این معنی که باندهای فرکانسی به صورت نابرابر بین دولت‌ها تقسیم شود و قدرتی که کنترل این باندها را دارد، بتواند دسترسی دیگران به اطلاعات، ناوبری و حتی سامانه‌های دفاعی را محدود کند. در این بستر، قوانین نئورئالیسمی مکتب انگلیسی نقشی مؤثر در توجیه «نقض» یا «تفسیر» این قوانین به منظور حفظ منافع استراتژیک دارد. همان‌طور که گرانت بوردی در مورد «فضای جنگی الکترومغناطیس» اظهار داشته است: «قواعد بین‌المللی تا زمانی که قابل اجرا نباشند، صرفاً کاغذی هستند. و سرمایه‌گذاری در توان فناوری الکترومغناطیس می‌تواند از این نقطه ضعف بهره‌برداری کند». پس از این تفاسیر،

1 Haines

می‌توان به سطحی دیگر، یعنی نظریه‌های انتقادی نیز پرداخته و نحوه شکل‌گیری «دانش-قدرت» پیرامون فناوری الکترومغناطیس را مورد سؤال قرار داد. از این منظر، توسعه سلاح‌های الکترومغناطیس، رادارهای پیشرفته و شبکه‌های مخابراتی نه صرفاً بازتابی از تقاضای امنیتی دولت‌هاست، بلکه بازتابی از ساختارهای سرمایه‌داری حاکم بر صنایع دفاعی است. آن‌چنان که شرکت‌های بزرگ دفاعی در کشورهای پیشرفته، از سرمایه‌گذاری‌های دولتی در فناوری‌های الکترومغناطیس به عنوان منبعی برای بهره‌برداری تجاری در بازارهای مدنی استفاده می‌نمایند.

نقش فناوری الکترومغناطیس در موازنه قدرت

فناوری الکترومغناطیس به عنوان یکی از اساسی‌ترین پایه‌های پیشرفت علمی و صنعتی، نقش بی‌سابقه‌ای در شکل‌گیری و بازتعریف توازن قدرت میان دولت‌ها ایفا کرده است. فناوری الکترومغناطیس که شامل تمام پدیده‌های مرتبط با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، انتشار امواج الکترومغناطیس در باندهای مختلف فرکانسی و کاربردهای مختلفی از جمله ارتباطات، سنجش، انرژی و تسلیحات می‌شود، نه صرفاً ابزارهای فنی جدیدی را به دست صنایع و نظام‌های دفاعی می‌سپارد، بلکه چارچوب‌های جدیدی را برای رقابت‌های ژئوپولیتیک، همکاری‌های بین‌المللی و استراتژی‌های امنیتی شکل می‌دهد. در آغاز قرن بیستم، کشف و بهره‌برداری از امواج رادیویی امکان انتقال اطلاعات به فواصل وسیع را فراهم کرد. رادیو به عنوان نخستین وسیله ارتباطی جمعی، نه صرفاً به دولت‌ها این امکان را داد که پیام‌های خود را به شهروندان یا بخش‌های دشمن برسانند، بلکه به جنگ‌های اطلاعاتی و پروپاگاندا اجازه داد که با سرعتی بی‌سابقه گسترش یابند. توانایی انتشار نشر از طریق امواج رادیویی، مرزهای جغرافیایی را درنوردید و در نتیجه قدرت حاکمیتی را از یک مدل متمرکز به یک مدل توزیع‌شده تبدیل کرد. دولت‌ها می‌توانستند پیام‌های خود را نه صرفاً در حوزه داخلی، بلکه در سطوح بین‌المللی پخش کنند و به این ترتیب نفوذ فرهنگی و سیاسی خود را گسترش دهند. با پیشرفت تکنولوژی، باندهای میکروویو و امواج کمیک بخصوص در دوران جنگ سرد، به ابزارهای کلیدی در حوزه‌های مخابراتی، رادار، تشخیص و هدایت موشک تبدیل شدند. سامانه‌های رادار، که بر پایه انتشار و بازتاب امواج الکترومغناطیس عمل می‌کردند، توانستند اطلاعات دقیق درباره موقعیت هواپیماها، کشتی‌ها و موشک‌ها فراهم

کنند. اطلاعات نه صرفاً در تدوین استراتژی‌های نظامی مؤثر بودند، بلکه نقش مهمی در ایجاد توازن یا عدم توازن قدرت در منطقه‌های بحرانی ایفا کردند. دولت‌هایی که توانستند رادارهای پیشرفته‌تری را به کار گیرند، به‌دست‌رسی به داده‌های هوایی و دریایی برتری می‌دررفتند که این خود می‌توانست تصمیم‌گیری‌های استراتژیک را به نفع آن‌ها تغییر دهد. به‌علاوه، تکنیک‌های رمزنگاری و مخابرات ایمن مبتنی بر امواج رادیو، برای حفظ محرمانگی ارتباطات حساس نظامی و دیپلماتیک ضروری شد. چنین مسئله‌ای، به کشورهایی که توانستند امنیت الکترومغناطیس خود را تضمین کنند، اجازه داد تا در مذاکرات بین‌المللی بیشتر به‌اعتماد شوند و در مقابل دشمنان ممکن، دسترسی به اطلاعات حساس را محدود کنند (لیندا دوو، ۱، ۲۰۰۹: ۲۸). فناوری‌های ناشی از غلبه بر باندهای فرکانسی بلندتر، مخصوصاً ماهواره‌های ارتباطی و نظامی، به یک تحول اساسی در توزیع قدرت منجر شد. با پرتاب ماهواره‌های مخابراتی، به‌دست آوردن پوشش جهانی برای تماس صوتی، تصویری و داده‌ای امکان‌پذیر شد. به‌طوری که هر کشوری می‌توانست به‌سرعت اطلاعات حیاتی را به نقاط دوردست منتقل کند. دسترسی بی‌درنگ به اطلاعات نه صرفاً به ارتقاء کارایی زنجیره‌های تأمین و اقتصادهای جهانی کمک کرد، بلکه ارتش‌ها را قادر ساخت تا از طریق شبکه‌های مخابراتی ماهواره‌ای، دستورهای رده‌بالا را به واحدهای میدانی خود منتقل کرده و هماهنگی عملیات‌ها را بهبود بخشند. توانایی ارسال و دریافت تصاویر زنده از فضا، بخصوص از طریق ماهواره‌های تصویربرداری رزولوشن بالا، مرزهای جغرافیایی را شفاف کرد. در صورتی که یک دولت توانست این داده‌های نظارتی را سریعاً در دست بگیرد، می‌توانست به‌سرعت تحولات سیاسی، نظامی یا اقتصادی در نقاط حساس جهان را زیر نظر گیرد و پاسخ متناسبی نشان دهد. نقش الکترومغناطیس در حوزه انرژی نیز در توازن قدرت دولتها مشهود است. از طریق فناوری‌های مرتبط با تبدیل انرژی الکترومغناطیس به الکتریسیته (مانند توربین‌های بادی، خورشیدی و حتی فناوری‌های نوین مثل فیوزهای الکترومغناطیس) دولت‌ها می‌توانند به‌صورت مستقل و پایدار از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده کنند. استقلال انرژی، به‌ویژه برای کشورهای کوچک‌تر یا آنهایی که به‌خطر اضطراب‌های ژئوپولیتیک در رابطه با تأمین سوخت‌های فسیلی مواجه‌اند، می‌تواند به‌عنوان یک عامل مهم در کاهش وابستگی به منابع خارجی تبدیل شود و به‌طور مستقیم بر قدرت

1 Linda Douw

استراتژیک آن‌ها تاثیر بگذارد. به علاوه، پیشبرد فناوری‌های انتقال انرژی الکترومغناطیس بی‌سیم، می‌تواند برای ارتش‌ها و زیرساخت‌های حیاتی به منظور ارتقاء قابلیت عملیات در میدان‌های دوردست نقش کلیدی داشته باشد. یکی دیگر از جنبه‌های مهم که به تازگی به خوبی توجه جهانیان را به خود جلب کرده است، اسلحه‌های مبتنی بر انرژی الکترومغناطیس یا همان اسلحه‌های انرژی متمرکز می‌باشند. سلاح‌ها که از لیزر یا پالس‌های میکروویو برای تخریب یا خنثی‌سازی اهداف استفاده می‌کنند، مزایای استراتژیکی خاصی دارند. از جمله دقت بالای هدف‌گیری، سرعت عمل نزدیک به سرعت نور و حداقل ردپاهای فیزیکی پس از استفاده. کشورهایی که توانستند این فناوری‌ها را به صورت عملیاتی درآورند، به دست‌رسی به سلاحی دارند که می‌تواند انواع تهدیدات هوایی، دریایی و حتی زمینی را به سرعت حذف کند. چنین موضوعی می‌تواند تعادل قدرت نظامی منطقه‌ها را به سرعت تغییر دهد، چون یک سیستم دفاعی موثر در برابر موشک‌های بالستیک یا پهپادهای شناسایی‌پذیر می‌سازد و به نظام دفاعی یک کشور اطمینان بیشتری در مواجهه با تهدیدات فراهم می‌آورد. در عین حال، دانش و توانمندی‌های مرتبط با مهندسی‌های مواد پیشرفته، سرد کردن لیزر و تولید توان بالا برای این سلاح‌ها، به سختی در دسترس هستند. بنابراین، تسلط بر فناوری الکترومغناطیس می‌تواند به عنوان یک نشانه از پیشرفت علمی-تکنیکال کلان‌مقیاس یک دولت تلقی شود و به طور مستقیم بر موقعیت ژئوپولیتیک آن اثر بگذارد. باندهای فرکانسی رادیویی، که شامل امواج کوتاه‌برد و متوسط می‌شود، نیز در حوزه‌های سایبری نقش اساسی ایفا می‌کنند. سیستم‌های ارتباطی رادیویی که در زمینه‌های نظامی و اطلاعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به راحتی می‌توانند توسط دستگاه‌های الکترومغناطیس مخرب مانند گن‌های الکترومغناطیس مختل یا از بین برده شوند (تورنکوایست ۱، ۲۰۲۰: ۱۱). چنین اتفاقی می‌تواند زیرساخت‌های حیاتی یک کشور، از جمله شبکه‌های برق، مخابرات و سرویس‌های بانکی را به دست نیرومندهای دیجیتال آسیب‌پذیر سازد. در نتیجه، دولت‌ها برای حفظ حاکمیت خود بر این باندهای حساس، به توسعه تکنولوژی‌های مقاوم‌سازی در برابر پالس‌های امواج الکترومغناطیس، بهبود استانداردهای سمیت الکترومغناطیس و ایجاد حوضه‌های ایمن برای زیرساخت‌های حساس می‌پردازند. اقدامات مذکور، به عنوان بخشی از استراتژی کلی اطمینان از

تداوم بقا ملی و حفظ ثبات اقتصادی تلقی می‌شوند. توانایی مقابله با حملات الکترومغناطیس مخصوصاً در قالب پالس‌های امواج الکترومغناطیس تبدیل به یکی از مهم‌ترین معیارهای پایداری استراتژیک دولت‌ها شد. یک پالس‌های امواج الکترومغناطیس قوی می‌تواند به سرعت شبکه‌های انتقال برق، مراکز داده، ایستگاه‌های رادیویی و حتی سامانه‌های کنترل موشکی را از کار بپندازد. به‌طوری که همواره یک خطر جدی برای زیرساخت‌های حیاتی به شمار می‌آید. بنابراین، دولت‌های پیشرفته برای حفاظت از این زیرساخت‌ها به دو مسیر اصلی متوسل می‌شوند: نخست، مقاومت‌سازی سخت‌افزاری با استفاده از مواد جذب‌کننده انرژی الکترومغناطیس و طراحی مدارات با قابلیت خود-بازنشانی. دوم، ایجاد لایه‌های امنیتی دیجیتالی که بتوانند در زمان وقوع یک نوسان ناگهانی، ترافیک اطلاعات را به‌صورت خودکار به مسیرهای جایگزین هدایت کنند. اقدامات یادشده، به خودی خود به دولت‌ها امکان می‌دهد که در مواجهه با حملات الکترومغناطیس، زیرساخت‌های حیاتی خود را حفظ کرده و از اختلالات طولانی‌مدت که می‌توانست باعث ناپس-فیت سیاسی و حتی اجتماعی شود، اجتناب کنند.

نقش فناوری الکترومغناطیس در بازدارندگی دفاعی

فن‌آوری الکترومغناطیس در زمینه بازدارندگی دفاعی به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین پیشرفت‌های نظامی معاصر شناخته می‌شود و نقش آن در ایجاد تعادل قدرت، تقویت توان دفاعی و جلوگیری از بروز درگیری‌های مسلحانه به شکل چشمگیری تحول‌پذیر است. فناوری الکترومغناطیس که در بطن خود ترکیبی از اصول فیزیک الکترومغناطیس و مهندسی پیشرفته است، نه تنها به‌عنوان ابزار حمله به کار گرفته می‌شود بلکه به‌عنوان سازوکاری برای محافظت، مخفی‌سازی، اعوجاج و تقویت قابلیت‌های استراتژیک نیروهای دفاعی به کار می‌رود. به‌منظور سهولت مطالعه آسیب‌های حرارتی از نرخ جذب ویژه الکترومغناطیس استفاده می‌شود. نسبت درصد توان الکترومغناطیسی جذب شده از موج برخورد کرده که به گرما تبدیل می‌شود به جرم هر جزء بدن را نرخ جذب ویژه الکترومغناطیس یا سار می‌نامند (تورانی، ۱۳۹۸). از دلایل اصلی اهمیت فناوری الکترومغناطیس می‌توان به توانایی تولید انرژی الکترومغناطیس با شدت بالا، دقت هدف‌گیری، سرعت عمل نزدیک به نوری، قابلیت‌های پنهانی

و سازگاری با انواع سطوح، از جمله فضا، هوا و سطح زمین اشاره کرد. ویژگی‌های مذکور، باعث می‌شود که سلاح‌ها و سامانه‌های مبتنی بر فناوری الکترومغناطیس بتوانند به سرعت به تهدیدات مختلف پاسخ دهند و در عین حال حضور فیزیکی یا صدای قابل تشخیص نداشته باشند. امری که در استراتژی بازدارندگی نقش اساسی دارد، چرا که دشمنان با عدم اطمینان در مورد توان و محدوده این سلاح‌ها، هزینه احتمالی حمله را به صورت قابل توجهی افزایش می‌دهند. یکی از نمایان‌ترین کاربردهای الکترومغناطیس در حوزه بازدارندگی، سامانه‌های رادارهای پیشرفته است. توانایی هر کشوری در برخورداری کامل از مزایای طیف الکترومغناطیس قویاً بستگی به فعالیت‌های مربوط به مدیریت طیف دارد (رامه، ۱۳۹۱). رادارهای فراطیفی، رادارهای ترکیبی و رادارهای تک‌پالس توانسته‌اند به دقت بالا هدف‌های هوایی، زمینی و دریایی را شناسایی، ردیابی و حتی پیش‌بینی مسیرهای پروازی آن‌ها انجام دهند. توانایی‌ها در ترکیب با سامانه‌های دفاع موشکی، امکان شناسایی زود هنگام پرتاب‌های بالستیک یا پروازی را فراهم می‌آورد. به گونه‌ای که کشورها می‌توانند برای مقابله با تهدیدات راهبردی، زمان کافی برای واکنش یا اجرای دفاع فعال داشته باشند. وقتی یک دشمن می‌داند که پرتاب موشک‌های خود به سرعت توسط رادارهای پیشرفته شناسایی می‌شود و هدف‌گیری دفاع موشکی را به خطر می‌اندازد، تمایل کمتری به انجام حمله ناگهانی خواهد داشت. چنین مسأله‌ای، خود نمادی از بازدارندگی است. علاوه بر رادار، فناوری‌های مخابراتی و الکترونیکی نقش حیاتی در نگهداری و تقویت توانایی‌های ضد دستگاه‌ها دارند. سامانه‌های مخابره امن با استفاده از رمزنگاری نظریه پردازی پیشرفته، انتشار سیگنال‌های مخفی و استفاده از باندهای فرکانسی متغیر، امکان برقراری ارتباطات بی‌وقفه و غیرقابل رهگیری را برای واحدهای نظامی فراهم می‌آورد. قابلیت‌ها نه تنها سبب می‌شود که عملیات‌های دفاعی به صورت هماهنگ و بدون درز انجام شوند، بلکه ایجاد اطمینان در فرماندهی این امکان را می‌دهد که تصمیمات بحرانی را با سرعت و دقت اتخاذ نمایند (مارتین، ۲۰۱۶: ۳۷). یک دشمن که نمی‌تواند مطمئن باشد آیا ارتباطات ارتش در حین حمله به درستی برقرار می‌ماند یا نه، با ریسک بالاتری مواجه می‌شود و این مسأله به صورت غیرمستقیم به تأمین بازدارندگی کمک می‌کند. تکنولوژی الکترومغناطیس در حوزه جنگ

الکترونیک نیز به عنوان یک ستون اساسی از استراتژی‌های دفاعی مطرح است. در این بستر، ابزارهایی برای مخفی سازی، ستم پذیری، رأی گیری یا تخریب سیگنال‌های دشمن به کار گرفته می شود. به عنوان مثال، توانایی ایجاد سیگنال‌های تشدید که باعث می شود رادارها یا سامانه‌های رصد دشمن به درستی عمل نکنند، می تواند هدف گیری‌های دقت پذیر موشکی یا پهپادهای شناسایی را ناکارآمد سازد. در کنار این، فناوری‌های مخفی سازی الکترومغناطیس مانند پوشش‌های جذب گر یا تبدیل شکل امواج، برای کاهش رد پای راداری هواپیماها، کشتی‌ها و موشک‌ها مورد استفاده قرار می گیرد. به گونه‌ای که دشمن نتواند موجودیت‌های دفاعی را به سرعت شناسایی و هدف گیری کند. عدم اطمینان در تشخیص دقیق هدف، هراس را در میان نیروی دشمن ایجاد می کند و فشار را برای هر گونه اقدام هجومی افزایش می دهد. استفاده از سلاح‌های انرژی متمرکز یکی دیگر از پیشروندهای چشمگیر فناوری الکترومغناطیس است که به عنوان «سلاح‌های لیزری» یا «پلاسما» شناخته می شود. سلاح‌های یادشده قادرند با انتشار اشعه الکترومغناطیس با توان بالا، هدف‌های هوایی، موشکی و حتی پدیدارهای دریایی را در فاصله‌های نزدیک تا میان برد تخریب یا نابود کنند. بدون آنکه بقایای موشک یا اسلات‌های شلیک را به دست آورند. از آنجا که زمان از لحاظ تکانه نوری نیرویی بی محدود است، این چارچوب باعث می شود که موانع فیزیکی به قطعیت عملیاتی تبدیل شوند. به عبارت دیگر، وقتی یک کشتی یا پایگاه هوایی می داند که هر تهدید موشکی ممکن است در لحظه‌ای توسط لیزرهای دفاعی مورد نابودی قرار گیرد، مزاحمت یا حمله‌ای کمتر به دست می آورد. اثر آمرزنده این سلاح‌ها نه صرفاً در نابودی فیزیکی هدف بلکه در ایجاد حس «عدم قابلیت پذیری» برای دشمن است که به طور غیرمستقیم به استحکام بازدارندگی می افزاید. سیستم‌های دفاع موشکی بالستیک که بر پایه فناوری‌های الکترومغناطیس کار می کنند، یکی از مهم ترین عناصر استراتژیک برای حفظ حاکمیت هوایی و زمینی است. سامانه‌ها معمولاً از رادارهای سرعتی بالا، پردازش دیجیتال سیگنال‌های پیشرفته و نرم افزارهای تجزیه و تحلیل جهت تخمین مسیر موشک به کار می گیرند. سپس با استفاده از موشک‌های رهیاب یا پرتاب گرهای لیزری، به هدف اصلی می رسند. ترکیب این اجزاء باعث می شود که حفاظت در برابر پرتاب‌های بالستیک، از جمله موشک‌های تک بار یا میان برد، به صورت خودکار و در باثانی کمتر از یک ثانیه انجام شود. چنین عملی، برای دشمنان

به عنوان یک مانع جدی محسوب می شود. چرا که هزینه سیاسی، اقتصادی و نظامی برای یک حمله موشکی که احتمال شکست بالا دارد، بسیار زیاد می شود و این خود عامل بازدارندگی محسوب می شود. در زمینه استراتژی های دفاعی، استفاده از سطوح هوایی، فضایی و حتی زیر آب مبتنی بر فناوری الکترومغناطیس می تواند به عنوان یک شبکه تبلیغی برای برجسته سازی قدرت نظامی یک کشور عمل کند. ماهواره های شکست یار و ماهواره های ترکیبی نظارتی، با به کارگیری فرستنده های الکترومغناطیس در باندهای مختلف از رادارهای SAR تا حسگرهای فرابنفش، امکان نظارت بر حرکات نظامی در تمام نقاط جهان را فراهم می سازند. قابلیت مذکور، به صورت مستقیم به «موقعیت استراتژیک» یک کشور می افزاید. چرا که دشمن نمی تواند به راحتی برنامه های خود را بدون اینکه تحت نظارت باشد پیش ببرد. یک ابرقوهی که بتواند به صورت لحظه ای اطلاعات دقیق از وقوع هرگونه حرکت نظامی در مرزهای خود ارائه دهد، نه صرفاً توان عملیاتی کشور را در زمان واقعی تقویت می کند، بلکه پیام واضحی به رقبای احتمالی می فرستد: هر اقدامی که به نظر بی خطر می آید، زیر نظر یک شبکه گسترده الکترومغناطیس قرار دارد. حس نظارت دائم می تواند همانند یک عامل بازدارندگی روانی عمل کند، زیرا دشمنان می دانند که هر برنامه مخفیانه ای به سادگی توسط حسگرهای الکترومغناطیس کشف خواهد شد و به سرعت در معرض خطر قرار می گیرد (تورنکوایست ۱، ۲۰۲۰: ۱۴). یکی دیگر از ابعاد اساسی که فناوری الکترومغناطیس در بازدارندگی به ارمغان می آورد، توانایی تولید پالس های الکترومغناطیس قوی است. پالس ها می توانند در لحظه ای کوتاه، زیرساخت های الکترونیکی دشمن را از کار بیاندازند. از شبکه های مخابراتی و رادارهای دفاعی تا سامانه های فرماندهی و کنترل. چنین قابلیت نه صرفاً به عنوان یک تهدید جدی به شمار می آید، بلکه می تواند به عنوان یک عامل استراتژیک برای فریاد زدن به رقبای احتمالی باشد: یک حمله سرسختانه ممکن است در لحظه ای که به صورت فیزیکی نزدیک می شود، توسط یک پالس الکترومغناطیس قوی محو شده و تمام توان عملیاتی نیروهای دشمن به سرعت از دست برود. خطر مخفی، دشمنان را وادار می کند تا پیش از هرگونه اقدام دقیق تر، هزینه های احتمالی از دست رفتن تجهیزات الکترونیکی حیاتی خود را در محاسبه بازدارندگی لحاظ کنند. پولت فکوهای مایکروویو پر قدرت نیز به عنوان یکی از زیرمجموعه های

فناوری‌های الکترومغناطیس مطرح می‌شوند که می‌توانند در مسافت‌های نسبتاً کوتاه، سلاح‌های الکترونیکی دشمن را مختل یا حتی خراب کنند. سیستم‌ها با انتشار انرژی مایکروویو به سرعت و شدت بالا، می‌توانند مدارهای الکترونیکی حساس، سنسورهای شناسایی و حتی رادارهای پروازی را نابود یا از کار بیندازند. در یک سناریوی جنگی، اگر یک نیروی دریایی یا هوایی بخواهد به سرعت به یک پست ضدحمله‌ی دشمن نزدیک شود، می‌تواند از پولت فکوه‌های مایکروویو پر قدرت برای تخریب سامانه‌های دفاعی هدف استفاده کند و این بدان معناست که دشمن برای انجام هرگونه حمله‌ی پیشگیرانه ملزم به پرداخت هزینه‌های اضافی برای محافظت در برابر چنین تهدیداتی می‌شود. هزینه‌ای که نقش بازدارندگی آشکار دارد. فناوری‌های ذخیره‌سازی و توزیع انرژی الکترومغناطیس نیز به‌طور غیرمستقیم در بازدارندگی تأثیرگذارند. با توسعه باتری‌ها و سوخت‌های برقی توانمند که می‌توانند سلاح‌ها و وسایل نقلیه نظامی را برای دوره‌های طولانی مدت بدون نیاز به سوخت‌گیری مکرر تغذیه کنند، نیروهای دفاعی می‌توانند به سرعت در نقاط حساس مستقر شوند و حضور خود را به‌صورت دائمی یا شبه‌دائمی حفظ نمایند. چنین توانایی باعث می‌شود که دشمن نتواند به‌راحتی زمان حمله‌ی خود را برنامه‌ریزی کند، زیرا نیروهای دفاعی می‌توانند در هر لحظه پاسخ دهند و این عدم قطعیت برای رقیب به‌عنوان یک عامل بازدارنده عمل می‌کند. در حوزه‌ی شبکه‌های دفاعی، فناوری الکترومغناطیس نقش کلیدی در پایه‌گذاری "جنگ‌هداری مبتنی بر شبکه" ایفا می‌کند. با بهره‌گیری از ارتباطات رادیویی پیشرفته، لینک‌های فیبر نوری تحت فرکانس‌های مایکروویو و تکنیک‌های رمزنگاری کوانتومی، اطلاعات می‌تواند به‌صورت بلادرنگ و ایمن بین واحدهای زمینی، هوایی، دریایی و فضایی منتقل شود. ادغام ساعتی باعث می‌شود که تصمیم‌گیری‌های نظامی با سرعتی نزدیک به زمان واقعی انجام شوند. رفتاری که در مواجهه با تهدیدات سریع‌التحول، مانع از امکان اجرای حملات ناگهانی و پیش‌بینی‌ناپذیر توسط دشمن می‌شود. وقتی یک مهاجم می‌داند که هر نفوذ یا حمله‌ای به سادگی توسط یک شبکه به‌سرعت کشف و به‌صورت هماهنگ پاسخ داده می‌شود، به‌طور طبیعی تمایل کمتری به شروع یک عملیات با ریسک بالا خواهد داشت. یعنی یک اثر بازدارندگی مستقیم حاصل می‌شود. علاوه بر این، تکنیک‌های مخفی‌سازی الکترومغناطیس که شامل پوشش‌های جذب‌کننده، بازتاب‌دهنده‌های فازدار و متغیرهای فاز سیگنال می‌شوند، به سطوح مختلف نظامی

اجازه می‌دهند تا ردپای راداری خود را به حداقل برسانند. کاهش قابل توجه در آشکار بودن، نه صرفاً برای حفاظت از خود نیروها مفید است، بلکه به عنوان یک ابزار بازدارندگی ذهنی عمل می‌کند. زیرا دشمن نمی‌تواند به دقت محتوای تهدیدات را پیش‌بینی کند و همیشه در حالت تردید و احتیاط باقی می‌ماند. چنین وضعیتی، هزینه‌های اداری، پژوهشی و عملیاتی را برای توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های ضد استیل و حفره‌سازهای پیشرفته برای دشمن افزایش می‌دهد و در نتیجه، با تهدیدی که به نظر می‌رسد به دسترس‌پذیر نیست، مستقیماً به بازدارندگی می‌انجامد. فن‌آوری‌های مقابله با دسترسی مسیرهای مسدودساز (A2/AD) نیز از طریق استفاده از سلاح‌های الکترومغناطیس شکل می‌گیرند. سامانه‌های موشکی بالستیک کوتاه‌برد و سامانه‌های پرتاب لیزری می‌توانند فضا را در سطوح استراتژیک مانند خلیج‌ها، تنگه‌ها یا خطوط فراسوی دور پرشانه‌برداری کنند. به طوری که ورود هر واحد هواپیما، کشتی یا پهپاد غیرمجاز به سرعت شناسایی و تخریب شود (هنسلمن ۱، ۲۰۲۲: ۱۶). مورد مذکور، به خصوص در مناطق حساس جغرافیایی که به وسیله خطوط حمل و نقل حیاتی حاکم هستند، نقش بنیادی در ایجاد یک حائل دفاعی ناپذیر برای رقبای احتمالی دارد. هرگاه یک مهاجم تشخیص دهد که برای عبور از یک منطقه‌ی A2/AD باید هزینه‌های بسیار بالایی را بپردازد یا ریسک شدید نابودی را بپذیرد، تمایل به پیشروی کاهش می‌یابد. یعنی تکنولوژی الکترومغناطیس مستقیماً در استراتژی بازدارندگی به کار می‌رود. به علاوه، صفات خاصی که برای تشخیص و مقابله با سلاح‌های الکترومغناطیس ناشناخته توسعه می‌یابد، می‌تواند به عنوان یک ابزار پیش‌پیشگیری محسوب شود. برای مثال، سامانه‌های دفاعی پیشرفته‌ای که می‌توانند وقوع یک پالس الکترومغناطیس قوی یا موج میکروویو پر قدرت را پیش‌بینی و نسبت به آن واکنش نشان دهند. مانند فعال‌سازی سیستم‌های حفاظت برقی شبکه‌های نیرو، یک‌بارهای حفاظتی یا فیلترهای خودکار، می‌توانند از تخریب کامل زیرساخت‌های حیاتی جلوگیری کنند. قابلیت یادشده، در سازوکار بازدارندگی به این معناست که دولت یا نیروی دفاعی بتواند ضمن حفظ حیات و منابع خود، به دشمن نشان دهد که هر سلاح الکترومغناطیس حتی با بالاترین شدت نیز نمی‌تواند به آسانی به سختی‌های کشور دست پیدا کند.

تأثیر فناوری الکترومغناطیس بر دفاع فضایی و سلاح‌های فضایی

به کارگیری طیف الکترومغناطیس در حوزه علوم شناختی دفاعی و نظامی، دو سطح نیروهای انسانی و در سطح تجهیزات نظامی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی کشورهای توسعه یافته بوده که البته در این زمینه در کشور ما نیز قدم‌های مؤثری برداشته است. در سطح نیروهای انسانی و سلاح‌های ادراکی با هدف به کارگیری طیف الکترومغناطیس مرتبط با علوم شناختی دفاعی، تحقیقاتی به شرح ذیل انجام گردیده است (احمدی و جاویدی، ۱۳۹۹). فناوری‌های الکترومغناطیس که در دهه‌های اخیر به سرعت پیشرفت کرده‌اند، تأثیرات عمیق و متعددی بر حوزه دفاع فضایی و سلاح‌های فضایی گذاشته‌اند. تأثیرات مذکور، نه صرفاً در زمینه طراحی و ساخت سلاح‌های جدید بلکه در روش‌های استراتژیک، تاکتیکی و حتی قانونی و ژئوپولیتیکی نیز به چشم می‌خورند. ابتدا باید به این نکته توجه کرد که محیط فضایی با شرایطی از قبیل خلا، دمای بسیار پایین، پرتوهای پرانرژی و عدم حضور جو، بستر منحصر به فردی برای بهره‌گیری از اصول الکترومغناطیس ایجاد می‌کند. در چنین محیطی و در حضور فناوری‌های پیشرفته مانند ریل گن‌ها، لیزرهای قدرتمند، پرتوهای الکترونی، موتورهای یونیک، توربوجنراتورهای مغناطیسی، دستگاه‌های تولید میدان‌های مغناطیسی قوی و سامانه‌های انتقال انرژی بدون تماس پاور بیمن، می‌توان روش‌های جدیدی برای شناسایی، رهگیری، تضعیف و نابودی هدف‌های فضایی به کار گرفت. از منظر فیزیکی، الکترومغناطیس امکان ایجاد نیروهای بسیار بزرگ با وزن و حجم نسبتاً کم را فراهم می‌سازد. ویژگی مذکور، در مقایسه با پدیده‌های شیمیایی یا پیشران‌های شیمیایی که نیاز به ذخیره‌ی سوخت‌های پرحجم دارند، مزیت آشکاری برای ساخت سلاح‌های نشانه‌دار و سامانه‌های دفاعی دارد. برای مثال، ریل گن یا گن الکترومغناطیس می‌تواند قطعاتی از فولاد یا ترکیبات پیشرفته را با سرعت‌های شش تا نه هزار کیلومتر بر ثانیه شلیک کند. چنین سرعتی باعث می‌شود که انرژی کابنتیک (انرژی جنبشی) به‌سختی قابل مقابله باشد و در برخورد با هدف، تخریب ساختاری عظیمی ایجاد کند. چنین سلاح‌های شتاب‌دهنده‌ای می‌توانند به‌صورت مازولار بر بسترهای ماهواره‌ای یا ایستگاه‌های فضایی نصب شوند و در زمان نیاز، بلافاصله شلیک شوند. مزیت دیگری که به‌دست می‌آید، این است که این سلاح‌ها به‌دلیل عدم استفاده از مواد احتراق، نیازی به تأمین سوختی در فضا ندارند و این امر

به خصوص در فضاهاى بسته و محدود که وزن و فضا از مهم ترین محدودیت ها هستند، ارزشمند است. در حوزه های دیگر، لیزرهای قدرتمند که بر پایه ی فناوری های الکترومغناطیس ساخته می شوند، می توانند به طور مستقیم انرژی نورانی را به هدف های دوردست انتقال دهند. لیزرها نه صرفاً می توانند به سرعت بالایی به دقت بر روی ماهواره های دشمن متمرکز شوند و از طریق گرمایش، سیگنال های الکترونیکی را خراب کرده یا سازه های نازک را ذوب کنند، بلکه به دلیل انعکاس پذیری بیشتر مواد داخل فضا نسبت به جو، توانایی نفوذ مکانیکی فوق العاده ای دارند. هر چه قدرت لیزرها افزایش یابد، امکان مقابله با هدف های بزرگ تری همچون موشک های بالستیک بین المللی که می توانند از فضا بردارند، میسر می شود. چنین موضوعی باعث می شود که سامانه های دفاعی مبتنی بر لیزر، به گونه ای تبدیل به بلوک های کلیدی در ساختار دفاعی ملی شوند. در کنار لیزرها، پرتوهای الکترونی یا پرتوهای پالس های رادیویی با فرکانس های بالا می توانند به صورت مستقیم دستگاه های الکترونیکی دشمن را به سختی از کار بیاندازند (لوسی ۱، ۲۰۲۲: ۶۰). هر چند این نوع سلاح ها به دلیل پدیده های پراکندگی در فضا و اثرات اتمسفری برای کارایی در فضا نیاز به انرژی بسیار بالایی دارند، اما در صورت ترکیب با تکنولوژی های انرژی برتر مانند سلول های خورشیدی پیشرفته یا راکتورهای هسته ای کوچک، می توانند اثرات مخربی بر روی یک ابرمستیک ایجاد کنند. جالب است که برخی از فناوری های الکترومغناطیس نه صرفاً برای سلاح سازی بلکه برای سامانه های دفاعی فعال به کار می روند. به عنوان مثال، سیستم های مغناطیسی برای ایجاد میدان محافظی اطراف ماهواره ها می توانند به عنوان یک سپر الکترومغناطیس عمل کنند که پرتوهای انرژی و ذرات پر سرعت خطرناکی که از خورشید یا دیگر منابع فضایی می آیند را منحرف یا جذب می کند. میدان ها می توانند پایه ای برای ایجاد فضای ایمنی برای تجهیزات حساس الکترونیکی باشند. به علاوه، توربوچراتورهای سوب سکالار می توانند انرژی الکتریکی را از میدان های مغناطیسی ساکن در اطراف سیارات جمع آوری کرده و این انرژی را برای تأمین نیروی مورد نیاز سامانه های دفاعی استفاده کنند. در ادامه، بحث درباره ی توانمندی های انتقال انرژی بی سیم پاور بیمن که توسط امواج مایکروویو یا پرتوی لیزری صورت می گیرد، به دست آوردن انرژی مستمر برای سلاح ها و سامانه های دفاعی منجر می شود. بدین ترتیب، می توان به صورت

مستقیم از ایستگاه‌های زمینی یا ماهواره‌های بزرگ‌ترین منبع انرژی برای سلاح‌های فضایی استفاده کرد. از منظر مهندسی، یک نکته مهم این است که اجزای الکترومغناطیس می‌توانند به سرعت‌های بسیار بالا عمل کنند. به عبارت دیگر، زمان پاسخ سیستم می‌تواند در حد میکروثانیه‌ها یا حتی نانوثانیه‌ها باشد. سرعت واکنش، در یک محیط پرسرعت مانند فضا که کیشگیری‌های ناگهانی بین ستارگان یا موشک‌های بالستیک می‌تواند در مقیاس زمانی کوتاهی ما را تهدید کنند، به معنای این است که سامانه‌های دفاعی مبتنی بر الکترومغناطیس می‌توانند پیش‌بینی و مقابله با تهدیدات را بسیار پیش از رسیدن به هدف انجام دهند. به علاوه، به دلیل اینکه این سامانه‌ها به صورت الکترونیکی به کار می‌گیرند، می‌توانند به راحتی با سیستم‌های هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌های حسگرها، شناسایی الگوهای رفتاری هدف و تصمیم‌گیری خودکار ترکیب شوند. چنین ترکیبی باعث می‌شود که همه چیز از جمع‌آوری داده‌ها تا صدور فرمان‌های شلیک به صورت نزدیک به زمان واقعی انجام گیرد. در ضمن، تأثیرات فناوری الکترومغناطیس بر روی مواد و ساختارهای مهندسی ادامه خواهد داد. به عنوان مثال، در ساخت بدنه‌های ماهواره‌ای می‌توان از ترکیب‌های نانوکامپوزیتی مبتنی بر فیزیک میدان مغناطیسی استفاده کرد که خصیصه‌های مکانیکی و الکتریکی را در دو جهت بهبود می‌بخشند. مواد مذکور، می‌توانند در برابر دمای شدید و تابش‌های پرانرژی مقاومت بیشتری داشته باشند و در عین حال امکان جریان الکترون‌ها در ساختار خود را تسهیل نمایند. ویژگی یادشده، برای دریافت انرژی از ایستگاه‌های دیگر یا اطراف‌های فضایی به کار می‌رود. همان‌طور که پیش می‌رود، احتمال دارد که با پیشرفت فناوری کوانتومی، ژنراتورهای الکترومغناطیس مبتنی بر اثرات کوانتومی مانند لیزرهای کوی-اسپین یا لیزرهای مبتنی بر پالس‌های کوتاه مدت تخلیه نیمه‌رساناهای بازدهی بالا توان خروجی بسیار بالاتری نسبت به لیزرهای سنتی داشته باشند و توانایی تصمیم‌گیری در سطوح متوسط و کوتاه مدت را برای ایجاد منحنی‌های انرژی بسیار تیز و متمرکز فراهم سازند. لیزرهای پیشرفته می‌توانند در قالب سیستم‌های ترکیبی موج-ذره کار کنند. یعنی پس از ایجاد تابش الکترومغناطیس شدید، یک پالس الکترونی یا بوزونیک با سرعت نور مشعل سلاح را تکمیل می‌کند و به این طریق نه صرفاً سطح هدف را می‌سوزاند، بلکه به سرعت خودخواسته‌ای می‌تواند ساختارهای داخلی را تخریب یا تخریب جزئی

انجام دهد (کاستریلو ۱، ۲۰۲۲: ۹). روند موردنظر، باعث می‌شود که هدف‌های مقاوم به حرارت، مثل پوشش‌های سرامیکی پیشرفته یا لایه‌کوری‌های بازتابی که برای محافظت در برابر لیزرهای سطوحی طراحی شده‌اند، با ترکیبی از حرارت و سکه بخار در زمانی که زمان واکنش شلخته‌گرای الکترونی فعال می‌شود، تحت فشار انفجاری و ساختاری قرار گیرند. در زمینه پرتابه‌های الکترومغناطیس، ریل گن‌های تک‌مرحله‌ای که در بسترهای فضایی نصب می‌شوند، می‌توانند سرریزهای انرژی خازنی را در چند میکروثانیه به کامل‌ترین ضربه تسریع درآورند. اگر این ریل گن‌ها به صورت ماژولار در ساختارهای ماهواره‌ای یا ایستگاه‌های فضایی قابل توقف – برخلاف سلاح‌های شیمیایی که نیاز به پرهیز کامل از گرما دارند – تعبیه شوند، می‌توانند به‌منی برای انجام آسیب‌پذیرهای ناگهانی مانند تخریب سوخت‌پرتاب‌های دشمن یا حتی منعکس کردن مسیرهای پرتاب موشک‌های بین‌المللی به کار گرفته شوند. خاصیت مهم این است که چنین سلاحی پس از شلیک، نیازی به محفظه سوخت‌برداری بیشتر ندارد. انرژی الکتریکی موردنیاز می‌تواند از طریق ترکیبی از باتری‌های پیشرفته بر پایه لیتیوم-سلفن، مخزن‌های انرژی سوپرماگنیم، یا حتی سیستم‌های تبدیل انرژی تابش خورشیدی با راندمان بالا تأمین شود. از سوی دیگر، سلاح‌های مایکروویو و پالس‌های رادیویی قدرتمند که با قابلیت تولید پالس‌های الکترومغناطیس در بازه فرکانسی گیگاهرتزی می‌باشند، قابلیت تخریب سریع مدارهای الکترونیکی، نیم‌رساناها و حتی پردازش‌های کوانتومی را دارند. پالس‌ها در فضا به دلیل عدم وجود جو، به صورت مستقیم به اهداف هدف می‌رسند. دامنه اثرشان شامل ایجاد پدیده «قفل الکترونیک» است که در اثر سوزاندن لایه اکسیدی ترانزیستورهای قابل تغییر می‌سوزد و مدارهای حساس را برای مدت زمان نامحدود معیوب می‌سازد. ترکیب فناوری الکترومغناطیس با حسگرهای سئو-لایت که می‌توانند از طول موج‌های زیرنانومتری برای شناسایی پاسخ الکترواختلالات در زمان حقیقی استفاده کنند، امکان شناسایی و هدف‌گیری درست کنترل‌های دیجیتال را فراهم می‌آورد. در نتیجه می‌توان با یک سوگیری کوچکی در تقویت میدان الکترومغناطیس، چندین ماهواره در یک خوشه را به‌همین سرعت سنجی خراب کرد. با پیشرفت در زمینه ابررساناهای دما-بالا که می‌توانند میدان‌های مغناطیسی تا حدود ۱۰ تا ۲۰ تسلا را در ساختارهای نازک و سبک حفظ کنند، سیستم‌های

محافظت الکترومغناطیس به صورت حلقه‌های مغناطیسی فعال می‌توانند به عنوان سپرهای پویا برای جلوگیری از نفوذ ذرات پر انرژی و پالس‌های الکترومغناطیس عمل نمایند. به عبارتی، یک حلقه‌ای از سوپرماتریال‌های نانو-ساختارمند که به صورت فازیتی شده روی پوسته یک ماهواره اعمال می‌شود، می‌تواند میدان مغناطیسی خود را به صورت چرخه‌ای با فرکانس‌های رادیویی تنظیم کند تا ذرات پر انرژی که از توفان‌های خورشیدی یا انفجارهای هسته‌ای می‌آیند، به سرعت منحرف شوند. سامانه‌ها نه صرفاً برای محافظت از مدارهای حساس، بلکه برای حفظ تنظیمات دقیق مسیرهای ناوبری بر پایه شتاب‌سنج‌های ارتعاشی به کار می‌روند. چون یک تخریب کوچک در سامانه‌های ژيروسکوپ می‌تواند مسیر ماهواره را به صورت اساسی منحرف کند. در حوزه انتقال انرژی، سامانه‌های «پاور-بیمن» با استفاده از پرتوهای لیزری یا مایکروویو می‌توانند انرژی الکتریکی را از ایستگاه‌های زمینی یا ماهواره‌های بزرگ به سلاح‌های پرتابه‌ای یا مانورهای دفاعی در فضا انتقال دهند (مک کریگت ۱، ۲۰۱۳، ب، ۷۳). انتقال انرژی به صورت بی‌سیم، با توان‌های فراتر از مگاوات، اجازه می‌دهد که سلاح‌های الکترومغناطیس همچون ریل گن یا لیزرهای پر قدرت به صورت «پربار اند اروان» عمل کنند. به طوری که پس از دریافت انرژی از یک منبع بی‌سیم، در همان لحظه می‌توانند به سرعت به هدف شلیک کنند چرا که زمان شارژ از ساعت‌های متعدد به چند ثانیه کاهش می‌یابد و این ویژگی در یک میدان جنگ فضایی. زمانی که تهدیدات به سرعت شکل می‌گیرند، می‌تواند تفاوت بین موفقیت و شکست باشد. پیشرفت‌های مربوط به راندمان موتورهای الکترومغناطیس مانند توروژن‌ها، ایستگاه‌های رانش الکترونی، یا ایستگاه‌های رقصان در فضا نیز بر نقش دفاع‌هایی که به صورت گشت‌گری یا حذف تهدید عمل می‌کنند، تأثیر گذارند. موتورها که بر پایه ایجاد رشته‌های پلاسما با هدایت توسط میدان‌های مغناطیسی قوی کار می‌کنند، می‌توانند اختلالات حرکتی دقیق و سرعت‌های چندین هزار متر بر ثانیه تولید کنند. به طوری که یک سامانه دفاعی می‌تواند در لحظه تشخیص تهدید، به سرعت مسیر خود را از مسیر عبور یک موشک بالستیک یا یک ماهواره خصمانه منحرف کند، یا حتی با یک مانور چکمه‌ای خود را به سوی هدف شلیک کند و ترکیبی از سرعت-خطی و شتاب‌زا را برای نفوذ به مدار هدف فراهم آورد. در این زمینه، استفاده از سوپرکندترهای با دمای بحرانی بالا نه صرفاً وزن

مغناطیس‌سازها را به-حدودی صفر می‌رساند، بلکه امکان تولید میدان‌های ثابت تا چند ده تسلا را در ساختارهای پتینی و به صورت پیوسته برای ماهواره‌های کوچک فراهم می‌سازد. به همین دلیل می‌توان سامانه‌های «مغناطیس-محافظ» را به صورت حلقه‌های لوله‌ای در اطراف بدنه ماهواره به کار گرفت که در صورت برخورد ذرات میکرو-متر بازدارنده یا پرتوهای خورشیدی، انرژی جنبشی ذره را به سرعت به انرژی مغناطیسی تبدیل و سپس به صورت گرمایی یا الکتریکی به کاهش می‌رساند. فناوری الکترومغناطیس نه صرفاً به دست آوردن طول عمر مفید سیستم‌های الکترونیکی حساس کمک می‌کند، بلکه به عنوان یک حصن دفاعی در مقابل اشعه‌های پرتوان مانند EMPهای ناشی از انفجارهای هسته‌ای یا سلاح‌های الکترومغناطیس عمل می‌کند. میدان مغناطیسی قوی می‌تواند الکترون‌های آزاد پرتوان را از مسیرهای مستقیمشان منحرف کرده و اثر پخش انرژی اشعه را تا حدی کاهش دهد، به طوری که مدارهای حساس در برابر تخریب ناگهانی مقاوم می‌شوند. از سوی دیگر، پیشرفت در سامانه‌های انتقال انرژی بی سیم بخصوص با فناوری‌های لیزرهای فازی-نانو و میکروویوهای توزیع شده، امکان شارژ فوری سلاح‌های الکترومغناطیس را فراهم می‌سازد. در این مدل، ایستگاه‌های انرژی روی زمین یا بر روی پلتفرم‌های ماهواره‌ای بزرگ به صورت مداوم پرتوهای لیزری هدفمند با طول موج‌های مخصوص می‌فرستند که انرژی مکانیکی ذخیره شده در خازن‌های الکتریک یا سوپرکاپاسیتورهای روی بسط‌سلاح‌های ریل-گن و لیزرهای ارتش کوانتومی را در لحظه نیاز پر می‌کند. روش مذکور، نه صرفاً زمان تعلیق بین شلیک‌ها را به کمتر از یک ثانیه می‌کاهد، بلکه اجازه می‌دهد که سلاح‌های سنگین وزن‌بالا که قبلاً به دلیل مشکلات ذخیره انرژی محدود بوده‌اند، به صورت خارج از وزن تشخیص داده شوند. در نتیجه، یک جامعه ماهواره‌ای به صورت شبکه‌ای از ایستگاه‌های انرژی می‌تواند به سرعت انرژی به دست آمده از سطوح خورشیدی یا رآکتورهای کم‌وزن هسته‌ای را جمع‌آوری، تجمع و به صورت پالس‌های متمرکز به اجزای حیاتی دفاعی هدایت کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در دنیای امروز که با چالش‌های متنوع و پیوسته‌ای همچون تروریسم، جنگ‌های نوین و تهدیدات سایبری روبه‌رو هستیم، ضروری است که کشورها با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و

پیشرفته، زیرساخت‌های دفاعی و امنیتی خود را تقویت نمایند. فناوری‌های الکترومغناطیس با قابلیت‌های منحصر به فرد خود، می‌توانند به عنوان ابزاری کلیدی در ایجاد نظام‌های امنیتی مؤثر و پیشگیری از بحران‌ها عمل کنند. فناوری‌های الکترومغناطیس تحولات جدیدی در سیاست‌های دفاعی ایجاد کرده‌اند. در گذشته، جنگ‌ها عمدتاً متکی به نیروی انسانی و تجهیزات سنتی بودند، اما امروزه با ظهور فناوری‌های الکترومغناطیس، بخصوص فناوری‌های راداری، سیستم‌های شناسایی و تسلیحات پیشرفته، کشورها به سمت اتوماسیون بیشتر حرکت کرده‌اند. نیاز به استفاده از تجهیزات و فناوری‌های پیشرفته، نه صرفاً کارایی را افزایش می‌دهد، بلکه می‌تواند سبب کاهش تلفات انسانی شود. فناوری الکترومغناطیس همچنین چالش‌های جدیدی را به همراه دارد. یکی از نتایج دوران دیجیتال، ظهور تهدیدات سایبری است که می‌تواند زیرساخت‌های استراتژیک یک کشور را تهدید کند. در این بستر، بکارگیری فناوری‌های الکترومغناطیس به عنوان ابزاری برای تقویت امنیت شبکه‌ها و ایجاد دفاع در برابر حملات سایبری، به یک استراتژی کلیدی در سیاست‌های دفاعی تبدیل شده است. کشورها باید در تحلیل و به کارگیری این فناوری‌ها، ضمن شناسایی تهدیدات جدید، به توسعه راهکارهای دفاعی و استراتژیک پردازند. فناوری‌های الکترومغناطیس تنها به عنوان ابزارهای دفاعی عمل نمی‌کنند، بلکه فرصتی برای همکاری‌های بین‌المللی نیز فراهم می‌آورند. به اشتراک‌گذاری تجربیات، فناوری‌ها و آموخته‌های کشورهای مختلف در زمینه این فناوری‌ها می‌تواند به بهبود امنیت جهانی و کاهش تنش‌ها یاری رساند. در واقع، کشورهای مختلف می‌توانند با ایجاد ائتلاف‌ها و همکاری‌های استراتژیک در زمینه توسعه فناوری‌های الکترومغناطیس، گام‌های مؤثری در افزایش امنیت ملی و منطقه‌ای خود بردارند. از سوی دیگر، توسعه و به کارگیری فناوری‌های الکترومغناطیس به دنبال خود چالش‌های اخلاقی و حقوقی را به همراه دارد. استفاده از تسلیحات جدید مانند لیزرها و تفنگ‌های الکترومغناطیس، مباحثی در زمینه حقوق بشر و تأثیرات احتمالی بر محیط زیست را به وجود می‌آورد. این قبیل چالش‌ها می‌طلبد که سیاست‌گذاران با جدیت بیشتری به بررسی جوانب انسانی و اخلاقی استفاده از این فناوری‌ها پردازند و چارچوب‌های قانونی و اخلاقی منسجمی را برای استفاده از این تکنولوژی‌ها تدوین نمایند. با توجه به تحولات سریع فناوری و پیشرفت‌های علمی، می‌توان انتظار داشت که فنون و تکنیک‌های جدیدی در حوزه الکترومغناطیس ظهور یابند که ابعاد جدیدی به

سیاست‌های دفاعی کشورهای مختلف بیفزایند. به ویژه، انتظار می‌رود که کشورهای در حال توسعه نیز به تدریج به این فناوری‌ها دست یابند و در تلاش برای بهبود قدرت دفاعی خود برآیند. در این راستا، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه فناوری‌های الکترومغناطیس از سوی دولت‌ها و مؤسسات خصوصی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. فناوری‌های الکترومغناطیس در حال تبدیل شدن به عنصری کلیدی و جدایی ناپذیر در سیاست‌های دفاعی مدرن هستند. فناوری‌های مذکور، در پاسخ به تهدیدات متعدد و پیچیده جهانی، از جمله جنگ‌های سایبری و تغییرات محیط‌زیستی، می‌توانند به کارایی و اثر بخشی سیاست‌های دفاعی افزوده و در نهایت به افزایش امنیت ملی کشورها کمک کنند. برای تأمین امنیت پایدار و موفقیت در سیاست‌های دفاعی آینده، کشورها باید با نگاهی نوین و خلاقانه، به چنین فناوری‌هایی پرداخته و ضمن توجه به چالش‌های اخلاقی و حقوقی، به ارتقاء همکاری‌های بین‌المللی در این حوزه ادامه دهند. دست‌یابی به این اهداف، نیازمند همفکری، هماهنگی و تلاش‌های مشترک از سوی تمامی کشورها خواهد بود. بنابراین، نوآوری در فناوری‌های الکترومغناطیس، می‌تواند حرکتی نویدبخش در شکل‌گیری آینده روابط بین‌الملل و سیاست‌های دفاعی باشد و بسترهای جدیدی را برای تأمین صلح و امنیت در جهان فراهم آورد.

فهرست منابع

- رشیدی، علی، کیانی، غلامرضا و نصرتی، رحیمه (۱۴۰۰). مروری بر مکانیسم و عملکرد جاذب‌های امواج الکترومغناطیس ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۸، شماره ۴، ۱۰۷-۱۱۷.
- عبداللهی، حسن و حق‌نگهدار، افسانه (۱۳۹۴). نقش الکترومغناطیس سایبری در کنترل میدان جنگ با ایجاد زیرساخت‌های نظامی سایبری، فصلنامه علوم و فنون نظامی، دوره ۱۱، شماره ۳۱، ۱۱۳-۱۳۵.
- عبداللهی، حسن، لطفی جلال‌آبادی، مصطفی و حق‌نگهدار، افسانه (۱۴۰۰). نقش فرماندهان نیروهای مسلح در تهدید نوپدید الکترومغناطیس سایبری، فصلنامه مطالعات جنگ، دوره ۳، شماره ۸، ۵۱-۷۲.
- طالبی، مرتضی و انصاری، احمد (۱۴۰۲). امکان‌سنجی به کارگیری طیف الکترومغناطیس در علوم شناختی دفاعی از نظر قانونی در ارتش جمهوری اسلامی ایران، دوره ۵، شماره ۱۹، ۱-۲۰.

احمدی، خدابخش و جاویدی، نصیرالدین (۱۳۹۹). کاربردهای علوم شناختی در علوم نظامی، مجله طب نظامی، دوره ۲۲، شماره ۱.

تورانی، محمدعلی (۱۳۹۸). محاسبه نرخ جذب ویژه SAR انرژی امواج الکترومغناطیس در مجاورت فانتوم سر انسان در فواصل مختلف با استفاده از نرم افزار شبیه ساز، اولین کنگره بین المللی بیوالکترومغناطیس.

رامه، محمد (۱۳۹۱). آسیب شناسی مدیریت فرکانس و شبکه سراسری ظرفیت و کنترل طیف الکترومغناطیس در سطوح مختلف عملیاتی آجا (یگانی، نیرویی، چند نیرویی) و ارائه راهکار و الگوی مدیریتی متناسب با جنگ ناهم طراز و تهدیدات منطقه ای، دفتر پژوهش و مطالعات راهبردی نراجا.

Seoul, B. T. (2018, November 27). RF-EMF Exposure. Retrieved from Published online 2018 Nov 27.

Castrillo, V. (2022, Feb). A Review of Counter UAS Technologies for Cooperative Defense Teams of Drones. Italian Aerospace Research Center. Drones.

Grinter, P. (2021, Aug 25). Avenger UAS Autonomously Tracks and Follows Target Aircraft. Unmanned Systems Technology.

Haines, D. (2022). Executive Summary, Feb 2, 2022, Analysis of Pending AHI Cases – Redacted. Washington: DNI.

Henselmann, M. L. (2022, March 18). Non-Kinetic Warfare: The New Game Changer in the Battle Space. Retrieved from University of Jyväskylä, Finland.

Linda Douw, M. K. (2009). Cognitive and radiological effects of radiotherapy in patients with low-grade glioma. Lancet Neurology, Sept.

Losey, S. (2022, Feb 28). Killing drones with Thor's hammer: Air Force eyes counter-UAS Weapon. Defense News.

Malsi, B. F. (2022, February 27). Ukraine Says It Used Turkish-Made Drones to Hit Russian Targets. WSJ.

Martin, J. (2016). Drone Nation-America's New Way of War. Lexington Books.

McCreight, M. S. (2020, Sept). Quantum Conundrum: Multi-domain Threats, Convergent Technology & Hybrid Strategy, US Army Futures Command. Mad Scientist, 268.

McCreight, R. (2013a, October). Convergent Technology and Future Strategic Threat. Strategic Studies Quarterly, pp. 10-18.

McCreight, R. (2013b, March). Convergent Technology Threats. Strategic Studies Quarterly, USAF Air University.

McCreight, R. (2021). NeuroStrike Weapons and the Strategic Domain after 2020: Caution. Academia Letters, 2021.

Straussfogel, C. v. (2009). International Encyclopedia of Human Geography. Amsterdam: Elsevier.

Turnquist, C. (2020). Radiation-induced brain injury: current concepts and therapeutic strategies targeting neuroinflammation. Neuro-Oncology Advances, Volume 2, Issue 1, January-December.

