

"עליונות ספקטראלית"

הספקטרום האלקטרומגנטי כממד לחימה

יריב גפני, אל"ם א', אל"ם נ', סא"ל ל', סא"ל א'

[1]

פורסם לראשונה באוקטובר 2020

תוכן

1.....	"עליונות ספקטראלית"
2.....	תקציר המערכת
2.....	מבוא
2.....	הספקטרום האלקטרומגנטי
2.....	הספקטרום כממד לחימה
2.....	רקע
4.....	עליונות ספקטראלית
5.....	מרכיבי העליונות הספקטראלית
5.....	•ניהול הספקטרום האלקטרומגנטי
5.....	•הגנה מאיומי האויב בתווך הספקטראלי
6.....	•שלילת יכולות אויב (או "לוחמה אלקטרונית")
6.....	נדבכים להשגת עליונות ספקטראלית
7.....	האתגר הנוכחי
8.....	האתגר הטכנולוגי
8.....	האתגר בצה"ל
9.....	מרכיבי המענה -ביצור והעצמת העליונות הספקטראלית
10.....	ההשתנות הנדרשת בצה"ל
12.....	סיכום
13.....	רשימת מקורות

תקציר המערכת

הספקטרום האלקטרומגנטי הוא מימד לחימה פעיל מאז המאה ה-19, אולם המגמות הטכנולוגיות המאפיינות את העשורים האחרונים העצימו את חשיבותו. מרכיב הקישוריות והמידע ניצב בלב תפיסת ההפעלה החדשה, והופך את הספקטרום לקריטי מתמיד. הדרך להבטחת חופש הפעולה של צה"ל בספקטרום עוברת, לטענת הכותבים, בהשתנות תפיסתית, ארגונית וטכנולוגית. מימוש השינויים הוא המפתח למיצי רעיון התקשורת הניידת כולם-לכולם, להעצמת קטלניות צה"ל ולעמידה ביעדי תפיסת ההפעלה.

מבוא

מאמר זה יציג את ייחודיות **הממד הספקטראלי** ואת היותו למעשה **ממד לחימה נוסף** [2]. במאמר נציג רקע על הפעילות הצבאית בממד זה, נגדיר את המושג "עליונות ספקטראלית" ונרחיב על מרכיבי עליונות זו. בהמשך נציג את האתגר הנוכחי בביצור ובהעצמת עליונות זו, ונשרטט קווים לדמותם של מרכיבי המענה לאתגר. לבסוף נדון בהשתנות הנדרשת מצה"ל על-מנת לאפשר מענה זה.

הספקטרום האלקטרומגנטי

הספקטרום ("מקשתת") האלקטרומגנטי הוא תופעה פיזיקאלית טבעית שהתגלתה על-ידי האנושות עם המצאת הרדיו. תופעה זו מבוססת על קרינה אלקטרומגנטית והתפשטותה, וכוללת את אוסף כל הגלים האלקטרומגנטיים בכלל התדרים האפשריים [3]. הספקטרום מהווה את אחד המרכיבים המרכזיים של סביבת המידע ומתקיימת בו פעילות רבה, הולכת וגוברת, ככל שמתפתחות טכנולוגיות המידע בכלל, והצורך **בקישוריות ניידת** בפרט. ארגונים ויחידים עושים שימוש בספקטרום לתקשורת אלחוטית – לאיסוף מידע, לחישה מרחוק, לגילוי, לניווט ועוד.

Examples of general use	Frequency
Maritime navigation signals	3 kHz
Navigational aids	30 kHz
AM radio, Maritime radio	300 kHz
Shortwave radio	3 MHz
Broadcast television, FM radio	30 MHz
Broadcast television, Cellular telephone	300 MHz
Space and satellite communications, Microwave systems	3 GHz
Radio astronomy	30 GHz
	300 GHz

איור 1: תחומי התדר בתחום גלי הרדיו

הספקטרום כממד לחימה

מטבע הדברים, צבאות וכוחות לוחמים עושים שימוש רב בספקטרום משחר גילוי לשלל צרכים, בראש ובראשונה בעולם התקשורת, והדבר מזמן הזדמנויות רבות לאיסוף מודיעין על פעולת האויב ולשלילת יכולות מהאויב באמצעות פגיעה במערכות הפועלות בתווך זה. **לפיכך, הממד הספקטראלי מהווה מרחב לחימה**, שבו פועל הצד הכחול לצד אויבים, יריבים ובלתי מעורבים ובו מתבצעות פעולות הגנה, איסוף והתקפה.

רקע

הפעם המתועדת הראשונה בהיסטוריה, שבה נעשה שימוש בספקטרום האלקטרומגנטי כממד לחימה, הייתה זמן לא רב אחרי המצאת השידור האלחוטי על-ידי ניקולה טסלה וגוליילמו מרקוני בשנים האחרונות של המאה ה-19. התיעוד הוא ממהלך מלחמת רוסיה-יפן (1905-1904). התיעוד מתאר כי במהלך אחד הקרבות הראשונים של המלחמה, בהתקפה היפנית על "פורט ארתור" באפריל 1904, התבצעו הפגזות ארטילרית מספינות קרב יפניות אשר טווחו על-ידי כוח סיוור יפני ביבשה. סגן אדמירל אוטומסקי (מ"מ מפקד צי האוקיינוס השקט של רוסיה) פקד על שיבוש התשדורות היפניות בין הספינות לכוח הסיוור, ובהמשך לכך יצרו מערכות רדיו

רוסיות בספינת הקרב Pobeda ובעמדה יבשתית, הפרעות יזומות במערכות הקשר היפניות, ופגעו בתהליך הטיווח הארטילרי היפני.



תמונה 1: ספינת הקרב הרוסית Pobeda

בהמשך המלחמה נחל חיל הים הרוסי מפלה קשה בקרב צושימה במאי 1905, אחד הקרבות הידועים והמכריעים במלחמה זו שהוביל לתבוסת הרוסים במלחמה; מפלה זו גם היא קשורה לספקטרום האלקטרומגנטי – הצי הבלטי הרוסי שנשלח לסייע לצי האוקיינוס השקט המוכה, אותר במיצר צושימה על ידי ספינת יפנית – אשר דיווחה על מיקומו ותנועתו בתקשורת אלחוטית למטה הצבאי היפני. קיים תיעוד לכך שהועלתה בקשה לאישור שיבוש התקשורת של אותה ספינה אשר נשללה על ידי תת-אדמירל רו'סטבנסקי, אחד ממפקדי הצי הבלטי הבכירים (שאף נפצע קשה ונשבה בקרב זה). המודיעין שאספו היפנים הוביל ליתרון המשמעותי שלהם בקרב, והרוסים לא השכילו להשתמש בלוחמת הספקטרום על מנת לפגוע בתהליכי הקשר היפניים שאפשרו את העברת המודיעין אל מטה הפיקוד היפני. מנקודה זו בהיסטוריה הפך הספקטרום לממד לחימה, והמודיעין והלוחמה הספקטראליים הפכו לחלק מהעימות המזוין.

בשנים שלאחר מכן אורגן לראשונה באימפריה הרוסית גוף צבאי ללוחמה אלקטרונית במסגרת הצי הבלטי, ובהמשך, בתקופות מלחמות העולם, בוצעו מבצעי לוחמה אלקטרונית ושיבוש תשדורות רדיו כחלק ממשימות הצי. לאחר מכן הוקם חיל ייעודי ללוחמה אלקטרונית בצבא האדום (שבהמשך הפך לחיל הלוחמה האלקטרונית הרוסי).



תמונה 2: "קראסוחה" – מערכת לוחמה אלקטרונית מודרנית מתוצרת רוסיה

במהלך מלחמת העולם השנייה נעשה שימוש בספקטרום כממד לחימה ובלוחמה אלקטרונית (אשר תוארה על-ידי וינסטון צ'רצ'יל כ"מלחמת הקרניים", "**Battle of the Beams**") – "הן לפגיעה במערכות מכ"ם שבהן נעשה שימוש לטובת הכוונת הפצצות על יעדי אויב, והן לטובת מודיעין טקטי לדרג הנפרש.

גם לאורך שנותיה של מדינת ישראל נעשה שימוש בספקטרום האלקטרוני כממד לחימה, אשר תרם בצורה משמעותית לאפקטיביות המבצעית בזמני עימות ובמלחמות ישראל. במלחמת ששת-הימים יכלו מטוסי חיל-האוויר לפעול בלא הפרעה, זאת לאחר פיתוח טכנולוגיה שאפשרה לאתר את נתיבי הטיסה שאותם המכ"ם המצרי באל-עריש לא היה מסוגל לאתר [4]. בתקופת מלחמת ההתשה שוכללה הלוחמה האלקטרונית ופותחו אמצעים לנטרול טילי קרקע-אוויר מסוג "SA-6" חדישים שסיפקה ברית המועצות למצרים ולסוריה, ואף לחסימת הקשר בין טייסי האויב למרכז השליטה שלו ולשיבוש המכ"ם של טילי האויב ותותחיו [5].

במהלכה של מלחמת יום הכיפורים הופעלה הלוחמה האלקטרונית ברמות שונות של הצלחה, ובחלק מהמבצעים היוותה היעדרות מערך הלוחמה האלקטרונית גורם תורם לכישלון המבצע, למשל, במבצע "דוגמן 5" הכושל. הדבר הביא להפנמה שנדרש פיתוח של תורת לחימה ושל תפיסת הפעלה של מערך הלוחמה האלקטרונית כפתרון מבצעי מרכזי להתמודדות עם איום הנ"מ. מאז ועד למלחמת לבנון הראשונה הושקע מאמץ מקיף לפתח את התחום, ואת שיאו של מאמץ זה ניתן לראות ככל הנראה במבצע "ערצב 19", שבו הושמדו ללא נפגעים סוללות הטילים הסוריות בבקעת הלבנון, ובו פותחה היכולת לחשב באופן מדויק את השפעתה המבצעית של הלוחמה האלקטרונית אשר שולבה בו בהצלחה.

בתקופת מבצע 'חומת מגן' רואיין יאסר ערפאת, ובראיון תיאר משאית אשר חוננה מחוץ למשרדו במוקטעה, ובכל פעם שהיא מפעילה את הגנרטור, נחסמת היכולת להוציא או לקבל שיחות במכשירים סלולריים. ואכן, לבד מהשימוש בלוחמה האווירית, מאפשרת הלוחמה האלקטרונית גם יכולת לבודד את האויב מתקשורת קרקעית, למשל, בתווך הסלולרי.

עליונות ספקטראלית

המושג **עליונות ספקטראלית** מתאר את שילוב הפעולות והאמצעים הנדרשים ליצירת **חופש פעולה ספקטראלי** בשדה הקרב הרב-ממדי. חופש הפעולה מושג באמצעות **מיצוי המשאב**

הספקטראלי בבניין הכוח ובהפעלתו למתן **גמישות וזמינות מהקצה המבצעי ועד לרמה האסטרטגית**, יחד עם **פעולה בספקטרום כממד לחימה** להגנה ולהתקפה במטרה להשיג **יתרון יחסי מול מערכי אויב מגוונים**.

הרמטכ"ל הגדיר את המושג "עליונות בספקטרום" באופן הבא: "הבטחת רציפות הפעולה של צה"ל בספקטרום ביחס לאיומי אויב ולהפרעות הדדיות ושליטת יכולת האויב להשתמש בתווך נגדנו ולצרכיו. כמו־כן, **מימוש התווך כממד חשיפה ותקיפה כלפי האויב**[6]."

זווית נוספת ניתן למצוא בהתייחסות ר' אגף התקשוב, במסמך התפיסה התחומית ללוחמת הספקטרום: "הספקטרום האלקטרו־מגנטי הוא אבן יסוד לקיום האמל"ח הרשתי ולהפעלתו... **התווך העיקרי שעליו מתבססות היכולות הרשתיות בשדה הקרב ביבשה, באוויר ובים**... משפיע על כל הנוכחים בשדה הקרב, ומכאן שחוץ מהשפעתו על חופש פעולת כוחותינו הוא טומן בחובו יוכלת (פוטנציאל) השפעה גדולה על האויב. **שימוש נכון בתווך זה ישפר מביחינות רבות את מועילות (אפקטיביות) המעשה המבצעי** [7]."

בשפה חופשית, עליונות ספקטראלית היא היכולת לאפשר את חופש הפעלה של כוחותינו ולשלול את חופש הפעולה של האויב בממד הספקטראלי. דהיינו, להשתמש בספקטרום ללא מגבלה פיזיקלית לצורכי כוחותינו, למנוע מהאויב להגביל את יכולותינו בשימוש בו, ולהגביל את יכולת האויב באמצעות הממד הספקטראלי.

העליונות הספקטראלית מהווה מרכיב משמעותי ביותר בראיית תפיסת הניצחון ותר"ש "תנופה". הבשורות המרכזיות של **העצמת יכולת הקצה המבצעי, הגברת הקטלניות והרבי־ממדיות וקישוריות דיגיטלית "כולם עם כולם"**, יחד עם בשורות נוספות של חיזוק העליונות המודיעינית ויכולת האיסוף, חיזוק יכולות היבשה, מיצוי הממד האווירי והרחבת יכולת ההגנה, כולן קשורות קשר הדוק ומשמעותי עם הספקטרום כממד לחימה, ובהמשך מאמר זה תיסקרנה הסיבות לכך שעליונות ספקטראלית מהווה **מרכיב בסיסי ביכולת לממש את תפיסת הניצחון** ולהשיג את ההישג הנדרש בתר"ש "תנופה".

מרכיבי העליונות הספקטראלית

נפרק את מושג העליונות הספקטראלית לשלושה מרכיבים:

- **ניהול הספקטרום האלקטרו־מגנטי** – הספקטרום האלקטרו־מגנטי הוא משאב פיזיקאלי מוגבל המנוהל רגולטורית על־ידי משרד התקשורת. במצב זה נדרש צה"ל להתחשב ב"שותפים" העושים שימוש באמצעים הקורנים וקולטים קרינה אלקטרו־מגנטית, וגם השימושים השונים בתוך צה"ל נדרשים להתחשב זה בזה – האמצעים השונים פועלים בנפרד זה מזה ולכן הם עלולים להפריע אחד לשני ובכך לפגום במועילות המבצעית של צה"ל. לשם הדוגמה ניתן לחשוב על התנגשות אפשרית בין תקשורת אזרחית לבין תקשורת צה"לית הפועלות באותו תדר פעולה ספקטראלי, בין תקיפת לוחמה אלקטרונית שמתבצעת על־ידי כוחותינו לבין איסוף מודיעין אותות (סיגינט) שמתבצע על־ידי כוחות אחרים שלנו למול אותו תווך, או לחלופין בין מכ"מים המשמשים לגילוי לבין מערכות תקשורת המשמשות לתשדורות פו"ש או אמל"ח באותו תדר פעולה ספקטראלי. ניהול הספקטרום האלקטרו־מגנטי נועד לטפל בכל הקשור להיבטים של תכנון, תיאום וסנכרון השימוש בספקטרום על יישומיו השונים. האסדרה (רגולציה) של מערכות צה"ל הקורנות, **התאלמ"ג** [8], הוא התהליך המנהל את השימוש בספקטרום האלקטרו־מגנטי וכולל הקצאת תדרים למערכות אלקטרוניות, הכוונת בניין כוח לחיים בצוותא [9] והתמודדות עם הפרעות תאלמ"ג. ניהול זה מורכב מאוד ומורכבותו צפויה אף לגבור נוכח הדרישה ההולכת וגוברת למשאבים ספקטראליים בעידן המידע והטרנספורמציה הדיגיטלית.
- **הגנה מאיומי האויב בתווך הספקטראלי** – האויב מנצל את התווך הספקטראלי לשם איסוף מודיעין על כוחותינו, ואף עלול להשתמש בתווך הספקטראלי למטרות חסימה ושיבוש. הפקת המידע מהתווך הספקטראלי עלולה לחשוף את תכנון פעילות צה"ל וחשיפת מיקומי כוחותיו ואף פורסמו מקרים [10] שבהם נחשפו חדרים

האזנה של האויב בניסיון לעקוב אחרינו ולחשוף את פעילות צה"ל באמצעות האזנה למכשירי קשר. ניתן להניח שהאויב ממשיך להתפתח בתחום זה.

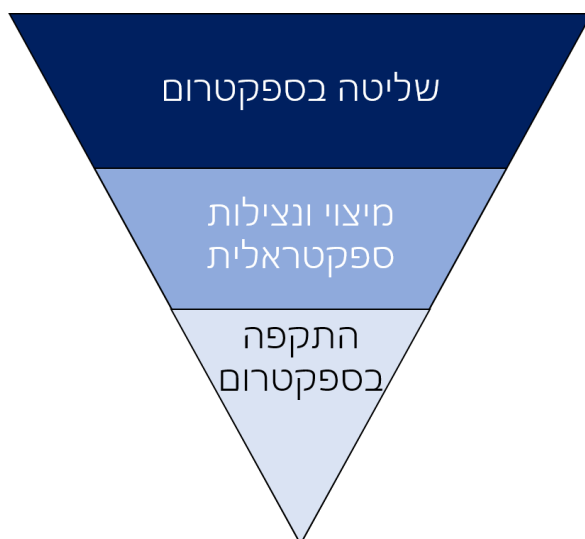
- **שלילת יכולות אויב (או "לוחמה אלקטרונית") - האויב עושה שימוש במערכות הפועלות בתווך הספקטראלי לתהליכיו המבצעיים והתומכים, במנעד רחב - החל מתקשורת שגרה (למשל, שימוש בטלפון סלולרי), ועד להעברת פקודות לדרג הטקטי לצורך הפעלת אש. במילון מונחי צה"ל מוגדרת הלוחמה האלקטרונית באופן הבא: "לוחמת מידע המנצלת את הספקטרום האלקטרומגנטי או הפועלת כלפי המשתמשים בו, וכוללת: חיפוש של מקורות קרינה אלקטרומגנטית ואיכונם, הפעלת אנרגיה אלקטרומגנטית, לרבות אנרגיה מוכוונת, כלפי תשתיות האויב ואמצעיו הפועלים בספקטרום האלקטרומגנטי, התפרצות אנרגיה אלקטרומגנטית לתוכם, תקיפתם הפיזית, וצמצום פגיעתם בחופש הפעולה של כוחותינו. לוחמה אלקטרונית נועדה לצמצם ולמנוע את שימוש האויב בספקטרום האלקטרומגנטי ואף להרוס את מערכותיו האלקטרוניות".**

בהגדרה רחבה זו, כמעט כל שימוש התקפי שנעשה בקרינה האלקטרומגנטית, וכל פעולה שנעשית כדי לשבש את השימוש בקרינה אלקטרומגנטית על-ידי היריב, מוגדרים כלוחמה אלקטרונית. ניתן למקד את השימוש בלוחמה אלקטרונית למהלכי שיבוש מערכות תקשוב ומודיעין של האויב, מערכות תקשורת, מערכות מכ"ם ואמצעי לחימה.

נדבכים להשגת עליונות ספקטראלית

בממד הספקטראלי מתקיימים תהליכי התפתחות רבים ופעילויות רבות, כאלה הנוגעים לשדה הקרב הנוכחי והעתיד (מאמצי הגנה, מאמצי התקפה, תקשורת מאפשרת וכו'), ואחרים הנוגעים להתעצמות מערכות המידע והטכנולוגיה בעולם האזרחי. מאמצים אלה מתקיימים במקביל וברציפות. תכונה ייחודית להתפשטות גלים בתווך הספקטראלי היא היעדר תיחום גאוגרפי וקושי מהותי לשלוט בהתפשטות הגאוגרפית של הקרינה, כלומר מרחב העניין מושפע משידורים שמפעילים שחקנים נוספים במרחב, שעלולים להשפיע על חופש הפעולה המבצעי - גם אם לא נועדו לפגוע בו. מכאן **שהנדבך הראשון** להשגת עליונות ספקטראלית היא **בקרה ושליטה ברזולוציה גבוהה במרחב הספקטראלי**, על-ידי **חישת המרחב** והפקת תובנות מבצעיות מתוך חישה זו. **חישה ספקטראלית** יכולה לאפשר איתור אמצעים קורנים של האויב ולהשמידם, לשתק את התקשורת הטקטית של האויב, למנוע התנגשויות ספקטראליות ולפתח מודעות לתורפות קיימות במערכות כוחותינו בממד הספקטראלי ולהשית עליהן בקרה הדוקה יותר.

נדבך זה של העליונות מושג ברישות המרחב **בכמות גדולה של סנסורים** ובעיבוד המידע הנאסף לכדי תמונת מצב ספקטראלית במרחב הלחימה. המידע שנצבר מסייע **בחשיפת האויב** ואמצעי הלחימה שלו, משפר את בקרת המפקדות על מהלכי הלחימה, מסייע **בהגנה מפני הפרעות** על מערכות צה"ל ומסייע לשפר את היכולות **לייצר מטרות תקיפה (קינטיקות ואלקטרוניות) בקצב מהיר ובהספק גבוה**. כל אלה יאפשרו בסופו של דבר למפקדים להרחיב את חופש הפעולה המבצעי שלהם בעת לחימה, להתמודד עם פגיעה פוטנציאלית בתהליכים המבצעיים ולקבל החלטות מבוססות מידע וידע.



איור 2: נדבכים להשגת עליונות ספקטראלית

הנדבך השני להשגת עליונות ספקטראלית הוא **מיצוי הממד הפיזיקאלי** כך שיתאפשר פעילות צה"ל ובניין הכוח הטכנולוגי של צה"ל באופן מיטבי, ואלו יאפשרו מענה מיטבי לדרישה ההולכת וגוברת לשימוש בספקטרום האלקטרומגנטי. מיצוי הממד יתאפשר באמצעות ניהול ושליטה בממד הספקטרום באופן מפותח ומתקדם, וכן באמצעות מימוש דרכים נוספות לשיפור מיצוי הקיים ואף להרחבה משמעותית של יכולת השימוש בספקטרום, בשילוב יכולות חסינות [11] וקוגניציה [12].

הנדבך השלישי והאחרון להשגת עליונות ספקטראלית הוא **תקיפה**. קיימת תועלת פוטנציאלית רבה בממד הספקטראלי להשגת תכליות התקפיות, ובהן הפוטנציאל ל**שיתוק תקשורת פו"ש ניידת** של האויב המהווה מכפיל כוח בלחימה; פגיעה בתהליכים המבצעיים של האויב **בנוק אגבי נמוך** תוך הימנעות מפגיעה בבלתי מעורבים בלחימה במרחב אזרחי; **פגיעה ביכולות איסוף** של האויב תוך הימנעות מפגיעה קינטית בהם; **הפעלת אמצעים בעלות נמוכה** ביחס לאמצעי תקיפה קינטיים; **פגיעה באפקטיביות המבצעית של חימוש מדויק**; וכן פעילות **לוחמה פסיכולוגית** כמרכיב **במאמצי תודעה** ובמימוש **פעילויות הונאה**. בעידן המידע המושתת על רשתות מחשבים ועל תקשורת נתונים, עשוי הממד הספקטראלי אף לאפשר השגת נגישות רשתית לרשתות אויב ומימוש מבצעי איסוף והתקפה על גביה, לפגיעה בסודיות, באמינות ו/או בזמינות נתונים. בכך עשוי לשמש הממד הספקטראלי כתווך למימוש מבצעים בממד הסב"ר (המכונים גם "מבצעי"). [13] CRF

האתגר הנוכחי

העליונות הספקטראלית נמדדת בהיקף חופש הפעולה הקיים לצה"ל לפעול בממד הספקטראלי, ומנגד במידת שלילת יכולותיו של האויב באמצעות ממד זה.

על-מנת להשיג את העליונות הספקטראלית נדרש **להגן על המערכות ועל התהליכים המבצעיים** של צה"ל המבוססים על הממד הספקטראלי ולאפשר להם לפעול ללא יכולת אפקטיבית להפריעם.

במבט קדימה, התפתחות הטכנולוגיה בכלל וטכנולוגיית המידע בפרט, מביאה לפשטות בקניית מוצרי מדף וטכנולוגיות ללוחמה אלקטרונית. בד בבד מתעצם השימוש בממד הספקטראלי, והתלות של גופים לוחמים העושים שימוש במערכות ובאמצעי לחימה מודרניים בטכנולוגיה – הולכת וגוברת.

שימוש הולך וגובר של צה"ל בטכנולוגיות מידע ותקשורת בשדה הקרב מהווה **אתגר לשימור העליונות הספקטראלית**, שכן ככל שגוף הוא טכנולוגי יותר כך צפויה לגדול המוטיבציה

לבנות מולו יכולות לוחמה אלקטרונית. בניין כוח טכנולוגי חסר בקרה, אסדרה וארכיטקטורה עלול לפגוע בעליונות הספקטראלית ובחופש הפעולה הספקטראלי, ובכך הוא עלול להגביר את הישגי האויב מהפעלת לוחמה אלקטרונית.

יחד עם זאת, מטבע הדברים, גם האויב מתבסס יותר ויותר על טכנולוגיית מידע ותקשורת, וגם הוא משתמש יותר בממד הספקטראלי – ומכאן שגם **נדבך התקיפה בממד הספקטראלי הופך לערכי יותר** במרוצת הזמן.

לאור זאת, מהווה העליונות הספקטראלית מרכיב **חינוי** לשם הבטחת ההכרעה בשדה הקרב המודרני. בהקשר זה, **המרוץ להשגת העליונות** דורש התבוננות על האתגר משתי נקודות מבט: האחת היא האתגר הטכנולוגי, והשנייה היא האתגר לצה"ל.

האתגר הטכנולוגי

בשל האילוצים הפיזיקליים הקשורים לתחומי התדר ולמאפייניהם, **אסדרת השימוש בספקטרום בהיבט הטכנולוגי-פיזיקלי מהווה אתגר מורכב ביותר**. הצורך בספקטרום האלקטרומגנטי לטובת מערכות תקשורת מתגבר בקצב גבוה, והתחומים המתאימים בספקטרום האלקטרומגנטי בעבור ערוצי תקשורת – צפופים מאוד. קיימות התנגשויות רבות בין מערכות שונות שנדרש להכניס לאותו תחום תדר (לדוגמה, דור 5 ברשתות סלולר ו-WiFi דור 6). בעיה זו מטרידה גופים רבים בעולם, ובכללן מעצמות טכנולוגיות, ומתקיים מרוץ טכנולוגי למציאת פתרונות – הן ברדיו הקוגנטיבי שהוזכר קודם והן בטכנולוגיות אחרות, למיזוי טוב יותר של משאב התדרים הקיים.

אתגר טכנולוגי נוסף הוא **אחסון ועיבוד מידע ספקטראלי**. בשונה ממידע מבוסס אותות חוץ ואותות שמע, שאותם ניתן לעבד בעזרת מגוון גדול מאוד של מערכות טכנולוגיות אשר מתייעלות כל העת הודות לתעשייה רחבה וגלובלית העוסקת בכך [14], העניין התעשייתי הגלובלי בייצור יכולות מקבילות בעבור אותות ספקטראליים שנאספים – מצומצם יותר, ולא מתקיים פיתוח משמעותי של טכנולוגיות ושל מוצרים מסוג זה בעולם האזרחי. הרצון לפתח יכולות דומות בעבור המסגרת הצבאית הוא אתגר טכנולוגי בעל היבטים חלוציים, הדורש מחקר ופיתוח משמעותי בהכוונה ובהובלה של המסגרת הצבאית.

ההתפתחות הטכנולוגית וניצול הטכנולוגיה לצרכים צבאיים מביאים להתפתחות ביכולות הצבאיות, למשל, המעבר מצידו הפועל בטכנולוגיה אנלוגית לצידו ספרתי שמספק ביצועים גבוהים יותר, רמת אבטחה גבוהה יותר וחסיונות גבוהה יותר מפני שיבוש וחסיומה. מנגד, הדבר מביא **לתלות הולכת וגוברת** בספקטרום האלקטרומגנטי ולשימוש מוגבר בו. הדבר עלול כמובן לפתח תורפה שהאויב ינסה לנצל, אך ריבוי "צרכני ספקטרום" והשימוש הרחב במשאב התדרים על-ידי גורמים שונים בצד הכחול מייצר אתגר נוסף, והוא הרצון לשבש את מערכות האויב בתווך הספקטראלי תוך **הימנעות מפגיעה ב"צרכני ספקטרום" תמימים**. בעת תקיפה בספקטרום עלול להיגרם נזק אגבי למערכות ישראליות, ונדרש **למקד את התקיפה ולשלוט בנזק האגבי הספקטראלי** על-מנת לאפשר המשך פעולה תקינה ללא הפרעה מהתקיפה האלקטרומגנטית של צה"ל. כדי להמחיש מהו נזק אגבי ניתן להיעזר כדוגמה **בהפרעות היווט הממושכות שחוו טיסות אזרחיות בעת הנחיתה בנמל התעופה בן-גוריון במהלך – 2019** אחת הסברות שהועלו לגבי מקור השיבוש הייתה פעילות צבא זר, אשר מפעיל מערכות שיבוש לתקשורת ניווט לווייני (GNSS [15]) לשם הגנה עצמית על כוחותיו ועל מתקניו בסוריה, בדיווחים שאף עלו לכתורות [16] בתקשורת הישראלית. מחקרים ידועים נוספים [17] מתארים יכולות הטעיה (ולא רק חסימה) בשימוש רוסי שמסבות נזק משמעותי עוד יותר למערכות ניווט לווייני. כפי שצוין קודם, שידורי לוחמה אלקטרונית עשויים להשפיע גם הרחק מהאזור הגאוגרפי המתוחם שבו הם נדרשים, מצב המוביל לכך שגם נוכחות של שחקן פעיל משמעותי במרחב ספקטראלי רחוק, מאתגרת את חופש הפעולה במרחב הספקטראלי הישראלי. מצבים כגון זה עשויים כמובן לאתגר את העליונות הספקטראלית.

האתגר בצה"ל

הפעלת הלוחמה האלקטרונית מתבצעת זה מכבר בממדי האוויר, הים והיבשה גם יחד. חילות האוויר והים מפעילים לוחמה אלקטרונית לשם השגת עליונות ימית ואווירית נגד מערכות מכ"ם

ואמל"ח אשר מסכנות את הפלטפורמות העיקריות (מטוסים, ספינות) ואמצעי חימוש. בתוך חילות אלו קיימת הכרה בחשיבותה של הלוחמה האלקטרונית שהפכה לכלי משמעותי בארגז היכולות המבצעיות במרוצת השנים. הישענות הולכת וגוברת של האויב על מערכים טכנולוגיים המתבססים על פיקוד ושליטה (פוי"ש ושו"ב), על מודיעין אלקטרוני ועל אמל"ח איכותי, מביאים לעלייה בהכרת החשיבות של תחום הלוחמה האלקטרונית באופן דומה גם בממד היבשה, אך בהקשר זה **קיים חשש מסורתי שנהוג לייחס ללוחמה אלקטרונית – הפרעה לכוחותינו**. יש לחדד כי הפרעה זו לתקשורת כוחותינו **איננה מחויבת המציאות**, ובתכנון נכון ניתן למנוע אותה **כמעט לחלוטין**.

בהקשר זה ניתן להצביע על **המתח הקיים בין יכולות האיסוף לבין יכולות התקיפה** – קיים אתגר משמעותי בתהליכי התכנון ו**תיאום האיסוף עם התקיפה**, אתגר שמוביל לדילמה מוכרת בדרג המפקדים הבכיר. הדבר מצריך מקצועיות וסינרגיה על-מנת למקסם את הפוטנציאל הקיים בלחימה הרב-ממדית בשילוב הממד הספקטראלי.

אתגר נוסף הוא בכך **שתוצאות פעולתם של אמצעי לוחמת הספקטרום אינן פשוטות למדידה** שכן לא תמיד מתקבלים מהפעלתם נתוני תוצאה חד-משמעיים, זאת בשונה מתקיפה קינטית שבה פשוט יותר לתאר ולמדוד את תוצאות הפגיעה. כדי לדעת מה היא יעילותם של אמצעים ושל פעולות אלו, יש לבצע **איסוף ייעודי של נתונים** שיאפשרו הערכה, שעשויה להיות סטטיסטית באופייה, ואשר נבחנת לאורך זמן וניתנת לתחקור מקיף לעיתים רק בסיום המבצע הצבאי.

אתגר מרכזי אחר הוא הקושי להעלות **למודעות המפקדים** את האתגרים הצפויים להם בממד הספקטראלי, ולתרגל אותם נוכח איומים בממד הספקטראלי. האימונים כיום אינם ממחישים את מלוא האיום הצפוי בעת עימות רחב, וקיים אתגר להטמיע את משמעות האיום שאותו אנו עלולים לפגוש בשדה הקרב.

אתגר משמעותי נוסף הוא אתגר **השליטה הספקטראלית** מתוך הסתכלות על **שלם מבצעי אחד**. האתגר נובע מכך שהשלם המבצעי מכיל בתוכו את כלל ההיבטים של הלוחמה האלקטרונית – לוחמה הגנתית, לוחמה התקפית, לוחמה אלקטרונית אווירית, לוחמה אלקטרונית ימית, לוחמה אלקטרונית בתחום המכ"ם היבשתי, מודיעין האותות, לוחמת הניווט, תקיפת הסב"ר האלחוטית, ניסויים טכנולוגיים, שותפים שפועלים במרחב – תחומים רבים הפזורים בין כמה זרועות וגופים מבלי שקיים **מרכז כובד אחד המרכז את השליטה בממד הספקטראלי מתוך ראייה על-זרועית ורב-זרועית**. אתגר זה מתעצם **בשעת חירום**, שבה הופכים הצרכים למידיים יותר, לרחבים יותר ולמשמעותיים יותר, וכל זאת **בה בעת ותוך זמן קצר**, מה שמביא לפוטנציאל להפרעה משמעותית הרבה יותר לחופש הפעולה המבצעי. על-מנת להימנע מהפרעה זו נדרשת העצמה של שיתוף הפעולה הרב-זרועי בתוך צה"ל ומול גורמי ביטחון נוספים מחוץ לצה"ל, בהסתכלות שלמה ומבעוד מועד.

אתגר אחרון בצה"ל הוא אתגר **תהליכי בניין כוח מהירים בממד הספקטראלי** – בעידן שבו הדרישה לספק צורך מבצעי עולה לעיתים באופן בהול, פעמים רבות פונה צה"ל לחברות אזרחיות ומצטייד באמצעים באופן שלעיתים לא מותאם להתמודדות מול כלל היבטי האיום הספקטראלי והעליונות הספקטראלית. האיום מתפתח בקצב מהיר ומחייב תהליך בניין כוח מותאם להגברת רמת החסינות של המערכות אל מול הצורך המבצעי.

מרכיבי המענה – ביצור והעצמת העליונות הספקטראלית

כאמור, עליונות ספקטראלית היא מושג המבטא את היכולת הצבאית לפעול בספקטרום האלקטרומגנטי ללא הגבלה, בעוד האויב מוגבל מלעשות כך עד כדי נטרול מלא של יכולתו לפעול בו. עליונות ספקטראלית תושג על-ידי שילוב שלוש התכליות הבסיסיות בספקטרום כממד לחימה (מיצוי, הגנה ותקיפה) והעצמתן להשגת התכלית המבצעית:

- **מיצוי ספקטראלי** – יש למרב (למקסם) את המועילות (האפקטיביות) של הפעלת אמצעי תקשורת ושל איסוף באמצעות סנכרום ותיאום אלקטרומגנטי ביניהם.

- **הגנה ספקטראלית** –

- יש לאפשר בקרה על המתרחש בספקטרום האלקטרומגנטי ושליטה במהלכים המבצעיים המתבצעים בו מתוך ראייה שלמה.
- במידת הצורך יש לממש **התערבות יזומה** נגד אמצעים צורכי ספקטרום אלקטרומגנטי:
 - **כלפי אמצעי כוחותינו** – מתן סמכות רחבה לגוף הרגולטורי בתהליכי בניין הכוח ולגוף השולט בתהליכי הפעלת הכוח.
 - **כלפי אמצעים שאינם אמצעי כוחותינו** – מאמצים להסרת ההפרעה מצד האמצעים עד כדי שלילת האמצעים (כולל בתקיפה קינטית משמידה).
- **התקפה ספקטראלית** – מזעור מועילות האויב בהפעלת כלל אמצעיו (תקשורת, איסוף, אמל"ח וכו').

ההשתנות הנדרשת בצה"ל

- **מודעות, הכשרה והטמעה** – כפי שצוין קודם, אחד האתגרים המרכזיים הוא מודעות ותרגול המפקדים, הנובע מהיעדר ניסיון מבצעי של התמודדות עם אתגרים ספקטראליים. הדבר עלול להוביל לפער בידע ובתובנות המפקדים לגבי המשמעויות הקיימות בלחימה בספקטרום, על הזדמנויותיה וסיכוניה. אם כך, הדבר הבסיסי הנדרש הוא שיפור התודעה וההבנה בקרב מפקדים, בדגש על הדרג הנפרש, לפוטנציאל הקיים בהשגת העליונות הספקטראלית, וכן לימוד המפקדים כיצד להשתמש בתווך באופן מושכל על-מנת לאגבר את ההישג המבצעי ולהימנע מפגיעה בו. יחד עם זאת נדרש הן להקנות ידע בסיסי על-ידי לימוד יכולות צה"ל והאויב, והן להעניק למפקדים חוויה משמעותית של לחימה באווירת האתגרים הספקטראליים הצפויים בשדה הקרב במסגרת ההכשרות הבסיסיות, האימונים והתרגילים, ובפלטפורמות לשיתוף חוויות מבצעיות.
- **חיכוך מבצעי** – קיימת תפיסה לפיה לוחמת ספקטרום רלבנטית בעיקר בהקשרי חירום ועימות רחב, בשל הרצון להימנע משחיקת יתרון יחסי. בדומה לממדים נוספים, גם בממד הספקטראלי, לצד ההזדמנויות הקיימות בהרחבת השימוש בלוחמת הספקטרום כמאמץ מסייע, קיים גם סיכון בשיפור האויב במסגרת תחרות הלמידה. אך בהקשר הלחימה בתווך הספקטראלי לא נכון שצה"ל יעמוד מנגד – הוא נדרש להשתמש ביכולות הספקטראליות כחלק מהמעשה המבצעי הרב-ממדי, מהיותו חלק מהתמרון הרב-ממדי ועד הסיוע למאמץ התודעה, על-מנת להגביר את חופש הפעולה המבצעי של צה"ל. הדבר יאפשר למידה תוך כדי חיכוך ופיתוח של שיטות מבצעיות חדשות, בדגש על **הכרעה טובה יותר של האויב הנעלם**.
- **שילוב זרועות** – הגידול בתלותה של הפעילות הצבאית בטכנולוגיות מידע הופך את הספקטרום האלקטרומגנטי לזירת פעולה המחייבת חיזוק תהליכי התיאום והסנכרון המבצעי והפרויקטלי. האתגרים שצוינו מחדדים את הצורך בחיבור ובסנכרון רב-זרועי בממד הספקטרום. קיימת חשיבות לחיבור זה הן בראי השלם המבצעי והן בראי השלם הספקטראלי (ההגנה, המיצוי והתקיפה בספקטרום). על-מנת לממש זאת נדרש להקים **גוף ריכוזי רב-זרועי** שיאחז בתמונת המצב השלמה ויאפשר שיקוף שלה מתוך ראייה מטכ"לית. כמו-כן, בצה"ל מפותחות מערכות אחדות למטרות ספקטראליות בעלות יכולות דומות המשמשות זרועות ופיקודים שונים – הסתכלות על בניין הכוח לטובת לוחמת הספקטרום (הגנה והתקפה בספקטרום) מתוך ראייה רב-זרועית מטכ"לית, יאפשר הגעה לקפיצה הטכנולוגית הנדרשת מהר יותר, לשם מיצוי המרחב הספקטראלי, להתייעלות במשאבים ולהגברת ההישג המבצעי.
- **ההגנה**
 - **בניית תמונת מצב ספקטראלית מלאה** – נדרש לבנות (מבחינה ארגונית ומבחינה טכנולוגית) יכולת ריכוזית להחזקת תמונת המצב הספקטראלית

המתמשכת. הדבר מחייב את כלל הגופים לשבור את החומות הארגוניות, לשותף מידע ולתת אמון במהלך כזה וביכולתו לאפשר תועלת רבה בהרחבת חופש הפעולה המבצעי.

- **שילוב לוחמת הספקטרום כחלק מההגנה הרב־ממדית** –הממד הספקטראלי מהווה רכיב משמעותי בהגנה הרב־ממדית, בשל יכולתו לאפשר חשיפת אויב במהירות בשיטות מתקדמות יותר. נוסף על כך, שילוב מרכיבי הגנה בממד יאפשר הגנה טובה יותר על מערכות ועל אמל"ח צה"ל אל מול האתגרים הצפויים במרחב הספקטראלי. ניצנים ראשונים של שילוב זה כבר קיימים במסגרת פרויקט "גבול חכם וקטלני" ובחיבורים נוספים של הממד הספקטראלי לשיטות הלחימה החדשות המתפתחות בצה"ל.

• ההתקפה

- **שילוב לוחמת הספקטרום במהלומה הרב־ממדית ובתמרון הרב־ממדי** –לתקיפה בספקטרום פוטנציאל לערך מוסף משמעותי במגוון שלבים בלחימה, הן בחשיפת אויב והן בשלילת יכולותיו. בדומה לשילוב לוחמת הספקטרום בהגנה הרב־ממדית, גם בהקשר לשילוב בתחום התמרון והמהלומה הרב־ממדיים ניתן לראות כיום ניצנים ראשונים של שיטות לחימה חדשות שמתפתחות במסגרת החיבור ליחידת "רפאים" (ובהזדמנויות נוספות).

- **מיצוי יכולות התקפה** –על־מנת למצות את היכולת ההתקפית ובד בבד למנוע פגיעה ביכולות צה"ל, נדרשת פעולתו ההתקפית של צה"ל בספקטרום להיות מתואמת ומסונכרנת על־מנת להביא לסגירת מעגלי תקיפה קצרים, מהירים ואיכותיים יותר ולהימנע מסיכונים. לטובת זאת נדרשת הגדרת מדיניות מבצעית המאפשרת סגירת מעגלי תקיפה בדרג הטקטי (חטיבה ואוגדה) ואף ביזור של אמצעים להפעלת לוחמה אלקטרונית מתקדמת לדרג הטקטי, מבלי לוותר על ריכוזיות בשליטה ובניהול תהליכי התקיפה. אל מול כל תרחיש איום ואל מול כל צורך מבצעי התקפי נדרש לבחון באופן פרטני את תהליך הפו"ש ולהגדירו – לבחון את זהות הכוח שיחזיק ברשותו את האמצעים לתקיפה, ולצד זאת לבחון באיזו רמה תתקיים השליטה והבקרה להפעלת האמצעים.

- **תורה, תפיסות, פו"ש ומערכות פו"ש לממד הספקטראלי** –שיטות הלחימה החדשות המתפתחות בצה"ל מדגישות את הצורך בביזור יכולות פיקוד, שליטה והפעלת אמצעים בדרג הטקטי, וכנגזרת מכך קיים צורך לבצע התאמה לתפיסת ההפעלה של לוחמת הספקטרום. ראשית נדרש ליצור ידע תורתי ותפיסתי שיסדיר למפקדים את התהליכים המבצעיים בתחום לוחמת הספקטרום, ולהטמיעו בצורה טובה יותר כבר משלב ההכשרות וההשתלמויות של המפקדים, ועד לתרגול מעשי בשגרת האימונים והתרגילים. שנית, שינוי זה מצריך מיסוד תהליכי פו"ש במפקדות. תקיפה ספקטראלית בדרג הטקטי מהווה סיוע לכוח אך מאפיינה שונים מאוד מתהליכי תקיפה קינטיים, ואלה אינם מתאימים למיצוי יכולות התקיפה הספקטראלית כפי שניתן להיווכח בטבלה הכללית הבאה:

תקיפה ספקטראלית	תקיפה קינטית	
אזימוט וטווח כלליים	נ"צ מדויק	איכון נדרש למטרה לתקיפה
לרוב שיבוש של מערכת טכנולוגית	נזק לתשתיות ונפש	מהות הפגיעה
לרוב הפיך בהפסקת התקיפה	נזק בלתי הפיך	הפיכות הפגיעה

הקמת פיקוד ההכשרות והאימונים בזרוע היבשה במסגרת תר"ש "תנופה" מהווה **זרז משמעותי** למיסוד תהליכים אלה. כחלק מייעודו של פיקוד ההכשרות והאימונים לשאת באחריות כוללת לרצף ההכשרה והאימון של כוחות היבשה, ניתן יהיה לעצב את תפיסת ההפעלה ותהליכי הפו"ש לשם פיתוח הספקטרום כממד לחימה [18]. יחד עם זאת, מיצוי יכולות לוחמת הספקטרום בדרג הטקטי מצריך שילובם במערכות הפו"ש על-פי התפיסה המכוונית למערכת עזר אחודה ממוכנת לפו"ש, המשלבת: ניטור, שו"ב, בסיס נתונים ומאגר מידע אחודים, ויכולת תכנון ושליטה.

- **ארגון ותקינה** – נדרשת התאמה של הארגון ושל התקינה ללוחמת הספקטרום בשגרה ובחירום כמערך צה"לי, בדגש על הדרג הטקטי.
- **בניין כוח טכנולוגי** – להלן כמה נושאים שאותם נדרש לפתח:
 - **הגברת רישות המרחב** בסנסורים ספקטראליים.
 - **תכנון והדמיה** (סימולציה) של פעולת המערכות האלקטרוניות לשם זיהוי וחיזוי של קונפליקטים ספקטראליים בצורה אוטומטית.
 - **השקעה בחסינות מערכות** – קצב התפתחות הטכנולוגיה מחייב פיתוח של אמצעי הגנה מבעוד מועד, לפני שאיום התקיפה הופך לממשי. נדרשת השקעה משמעותית במו"פ חסינות ובהטמעת יכולות חסינות במערכות על-מנת לאפשר את השלמת הפער במענה לאיום הייחוס הנוכחי, תוך התבוננות עתידית גם על התפתחות האיום בטווח הארוך יותר.
 - יצירת **כלים טכנולוגיים למיצוי מיטבי של ממד הספקטרום** ולצמצום הקונפליקטים – השיטות הבסיסיות בהקשר זה מתבססות על שילוב של הפרדת תשדורות במרחב הזמן (הקצאת זמן לחסימה וזמן לאיסוף), הפרדת תשדורות במרחב הפיזי (הרחקה בין משדר החסימה למקלט האיסוף), כיוונית (שימוש באלומות שידור כיוונית על-מנת לצמצם את ההפרעה ההדדית), הפרדה במרחב התדר (בין תדרי התקיפה לתדרי האיסוף, על-ידי הקצאת תדרים שונים).
 - קפיצת מדרגה ביכולות בתחום **המידע הספקטראלי** (איסוף, ניתוח, עיבוד ומיכון תהליכים).
 - פיתוח יכולות מותאמות לתקיפת **SI (Stand In)**.
 - פיתוח טכנולוגיות חדשניות בעבור אמצעים להשבתת ציוד אלקטרוני.
 - פיתוח יכולות סייבר-ספקטרום. (**CRF**)

סיכום

העליונות בספקטרום נועדה לאפשר לכוחותינו להשיג יתרון על פני האויב באמצעות התווך האלקטרומגנטי. היא מרחיבה את סל היכולות המבצעיות ומאפשרת השגת תכליות התקפיות,

תכליות הגנתיות, תכליות מודיעיניות, תכליות טקטיות ותכליות אסטרטגיות. ניהול נכון של השימוש בתווך האלקטרומגנטי ובלוחמת הספקטרום מהווה מכפיל כוח צבאי משמעותי.

הלוחמה בתווך הספקטראלי מתבססת בעיקר על איסוף ועל שיבוש של פעילות אמל"ח טכנולוגי וערכיותה גוברת ככל שעולה מידת ההתבססות על טכנולוגיה במערכי היריב. תר"ש "תנופה" מגלמת **הזדמנות אסטרטגית** לקפיצת מדרגה בשילוב הלוחמה הספקטראלית בקרב הרב-ממדי. מנגד, היא מגלמת **אתגר** בשל כך שצה"ל עלול להפוך לתלוי יותר במערכות טכנולוגיות אשר פגיעות מאיומים ספקטראליים.

העליונות הספקטראלית קריטית להרתעה, לגילוי, למניעה ולסיכול קשת רחבה של איומים בתחום האש והדיוק, התמרון, האוויר, הים, החלל והרשת, והיא מאפשרת שליטה, גילוי, הטעיה, הונאה, שיבוש, פגיעה והרס להגברת הקטלניות של צה"ל. התעצמות השימוש בתווך זה על-ידי צה"ל והיריב תחייב את צה"ל לפעול ביתר שאת לביצור ולהעצמת העליונות בממד זה, ולשם כך נדרש להשכיל לבצע את **ההשתנות הנדרשת בצה"ל בראי העליונות הספקטראלית**.

רשימת מקורות

- בלומנטל איתי. "לאחר חודשיים: פסקו שיבושי ה-GPS בנתב"ג". YNET, 05.08.2019.
- בניין הכוח בצה"ל, סיכום ניתוח המערכת ושלב העיצוב – תיעוד תהליך הלמידה בשנים 2017-2018 בנושא בניין הכוח בצה"ל, בראשות סגן הרמטכ"ל.
- גרינווד חנן. "תקיפה רב ממדית ושדרוג אופן הלחימה: כך תיראה מהפכת האימונים בצה"ל". **ישראל היום**, 05.03.2020.
- חומר למחשבה מס' 9/2017 – פוטנציאל הלוחמה האלקטרונית כחלק מהמערכה השלמה.
- טבנסקי ל'. "לחימה במרחב הקיברנטי: מושגי יסוד". **צבא ואסטרטגיה**, 1 (3). (עמ' 65-80).
- **מסמך אסטרטגיית צה"ל**. אוגוסט עמ' 30.
- פדן נדב. **מסמך "תפיסת הלוחמה בספקטרום האלקטרו-מגנטי תפיסה תחומית להפעלת הכוח של המפקדה הכללית**. 2017.
- פינקל מאיר. "בנין הכח למבצע 'ערצב 19". **אתר צה"ל**.
- רביב ארז. "עולם ללא וויז", **דבר**, 26.11.2018.
- C4ADS, "Above Us Only Stars", Exposing GPS Spoofing in Russia and Syria

[1] אל"ם א' הוא מפקד מרכז לוחמת הספקטרום; אל"ם נ' הוא מפקד מרכז המודיעין בחטיבת ההגנה; סא"ל ל' הוא רע"ן המבצעים של מרכז לוחמת הספקטרום; סא"ל א' הוא רע"ן תאלמ"ג במרכז לוחמת הספקטרום; אל"ם (מיל") י' הוא יועץ טכנו-מבצעי במרכז לוחמת הספקטרום ותפקידו האחרון במילואים היה מלא"פ צפון (מפקד הלוחמה האלקטרונית בפיקוד צפון) במהלך מלחמת לבנון השנייה.

[2] ממדי הלחימה: יבשה, ים, אוויר, סב"ר, חלל.

[3] קרינה אלקטרומגנטית מאופיינת בצורה חד-חד ערכית באמצעות תדר הפעולה הספקטראלי שלה. תחום גלי הרדיו (Radio Frequency) הוא חלקו של הספקטרום בתחום התדרים 3 קילורצרץ עד 300 ג'יגה-רצרץ, והוא משמש בעיקר ליישומי תקשורת אלחוטית. מתדר הקרינה נגזרים מאפייניה – טווח, אופן התפשטות במרחב, אילוצי קליטה וכד'. תחום גלי הרדיו מחולק לתחומי תדרים המיועדים ליישומים שונים על-פי המאפיינים הללו.

- [4] ד"ר אורי מילשטיין, "כוח עליון: הסיפור המלא על היום ששינה לחלוטין את פני המזרח התיכון", **מעריב**, (29.4.2017).
- [5] שיר אהרון ברם, "טלטלה", **בטאון חיל האוויר**, (2013) 213 ,
- [6] מתוך מסמך הרמטכ"ל.
- [7] מתוך דברי ר' אגף התקשוב, אלוף נדב פדן, מסמך "תפיסת הלוחמה בספקטרום האלקטרו-מגנטי – תפיסה תחומית להפעלת הכוח של המפקדה הכללית", 2017.
- [8] תאימות אלקטרו-מגנטית.
- [9] פעולה תקינה של כמה מערכות תלויות ספקטרום באופן תקין באותו הזמן.
- [10] שהם וקסלר, "ובינתיים בצפון: חיזבאללה מחכה לעיתוי מתאים", **מידה** (11.8.2014)
- [11] בניין כוח טכנולוגי המאפשר הפחתה עד כדי מניעה של יכולת ההפרעה לתקשורת האלחוטית.
- [12] טכנולוגיית רדיו קוגניטיבי (CR) היא טכנולוגיה המבוססת על תהליך של ניהול ספקטרום דינמי, המאפשר להגדיר באופן דינמי שימוש בערוצים האלחוטיים הטובים ביותר פיזיקאלית בכדי למנוע הפרעות וגודש בספקטרום.
- [13] לפעילות סייבר בממד הספקטראלי מיוחס המונח RF – Cyber RF. RF – קיצור של Radio Frequency, משמש כמונח כללי לתקשורת אלחוטית.
- [14] לדוגמה יכולות זיהוי פנים, זיהוי דובר, המרת קול לטקסט, דחיסת אותות שמע וכד.
- [15] Global Navigation Satellite System.
- [16] איתי בלומנטל, "לאחר חודשיים: פסקו שיבושי ה-GPS בנתב"ג", **אתר** YNET (05.08.2019) <https://m.ynet.co.il/Articles/5563847>
- [17] למשל C4ADS, "Above Us Only Stars", Exposing GPS Spoofing in Russia and Syria
- [18] חנן גרינווד, "תקיפה רב ממדית ושדרוג אופן הלחימה: כך תיראה מהפכת האימונים בצה"ל", **ישראל היום** (05.03.2020)