

נשק מבוסס על גלי מיקרו (מיקרוגל)

יהושע קליסקי, אייקי חזן¹ | 6 ביולי, 2025

גלי מיקרו בעוצמה גבוהה ([HPM](#) - [High Power Microwave](#)) הם סוג של קרינה בצורת גלים אלקטרומגנטיים בטווח תדרים של 1-300 מיליארד הרץ, או בקיצור ג'יגה-הרץ, ובעוצמה שבין 100 מיליון וואט (מגה-וואט) ל-100 מיליארד וואט (ג'יגה-וואט), עם אורך גל (המרחק בין שני שיאים סמוכים) בטווח התחומים שבין 1 מ"מ ל-1 מטר.

היישומים השונים של גלי המיקרו תלויים בעוצמת הקרינה, בתדר הפעולה ובאורך הגל של הקרינה. כללית, בתכנון אופטימלי גלי המיקרו עוברים מרחקים גדולים עם הנחתה מינימלית בסוגי תווך שונים. בעוצמות גבוהות משמשים גלי המיקרו בעיקר ליישומים צבאיים וטכנולוגיים. השימוש העיקרי בגלי מיקרו בעוצמה גבוהה הוא לצורך שיבוש והשמדה של מערכות אלקטרוניות. הגלים האלקטרומגנטיים נספגים בחומרים מתכתיים וגורמים לחימום ואף להתכת מוליכים מתכתיים, ואילו בעוצמה נמוכה גלי מיקרו יכולים לשבש באופן זמני (מבלי לגרום נזק קבוע) את המערכות הללו.

יתרונות וחסרונות של נשק מבוסס גלי מיקרו

היתרון בשימוש בנשק מבוסס גלי מיקרו הוא יכולתו לפגוע מיידיית במטרה באופן מדויק, עקב העובדה שהקרן האלקטרומגנטית נעה במהירות האור. נוסף על כך, הנזק שנגרם עקב שימוש בו הוא ברוב המקרים אלקטרומגנטי ולא קינטי, כך שקיימת אפשרות לא להשאיר עקבות פיזיות ולפגוע במטרה ללא נזק אנבי.

ניתן להשתמש בנשק אלקטרומגנטי בתחום המיקרו בכל מזג אוויר, גם כאשר יש עננים, גשם, ערפל ואבק (כתלות באורך הגל המשודר ובתדר), ופעולתו אינה מושפעת מכוח הכבידה. אך – וזה אחד מחסרונות הטכנולוגיה – עוצמת הקרינה מושפעת כמובן מתנאי האטמוספירה ומתנאים סביבתיים שגורמים להנחתה בעוצמת הקרן הפוגעת, והדבר מגביל את טווח הפעולה האפקטיבי ומצריך שימוש בהספקי קרינת מיקרו גבוהים על מנת להתגבר על חסרון ההנחתה.

¹ אייקי חזן – מומחה בנושאי אסטרטגיה וקבלת החלטות, אוניברסיטת רייכמן, הרצליה.

אך אליה וקוץ בה, שכן השימוש בהספקים גבוהים מחייב מקור אנרגיה רב עוצמה, מכיוון שלקרינת מיקרוגל יעילות חשמלית נמוכה, בטווח של 20-50 אחוזים, כתלות במקור היוצר את גלי המיקרו ובתדר העבודה. חיסרון נוסף נובע מכך שקרן אלקטרומגנטית מתפשטת במרחב, דבר המחייב גזרות נקיות להפעלה כדי למנוע פגיעה בכוחותינו או במפעילי הנשק. מנגד, המפתח המרחבי הגדול מקנה לגלי המיקרו יכולת התמודדות בו-זמנית עם מספר רב של איומים.

השימוש בטכנולוגיה זו ויישומה בתחומים שונים הנוגעים לביטחון הלאומי הם ורסטיליים. יש לה יכולת הגנתית מפני איומים אוויריים מגוונים ויכולת נטרול איומים אנושיים באמצעות השפעה על בני אדם. לקרן האלקטרומגנטית בתחומי המיקרו יש גם יכולת התקפית להשמדה או להשבתת מערכות חשמל, אלקטרוניקה ומחשבים, תוך פגיעה בתשתיות קריטיות של המדינה המותקפת באמצעות יצירת פולסים אלקטרומגנטיים – להלן Electromagnetic EMP (Pulse), ועל כך נדון במאמר נפרד הנמצא בהכנה.

הגלים האלקטרומגנטיים פוגעים במערכות האלקטרוניות דרך חיבור חיצוני כמו אנטנות שמחוברות למערכת, או דרך חיבור פנימי כמו כבלים, חוטים, קווי טלפון, פתחי אורור וחלקי מיגון פגומים שמאפשרים גישה לחלקים הפנימיים של המערכות, ודרכם חודרת אנרגיית הגל למערכות פנימיות קריטיות. הם מסוגלים להשבית מגוון רחב של מערכות, כולל מערכות טלפוניה, תקשורת, חשמל ואבטחה, וכן לפגוע במכשירים אלקטרוניים כמו מחשבים, טלפונים ניידים ושעונים חכמים. יש להם גם יכולת [להשבית](#) כלי רכב וכן כלים צבאיים כמו מטוסי קרב, כטב"מים, רחפנים, טנקים, ספינות ומערכות טילים. יתרה מכך, גלי המיקרו יכולים לחדור ולהשבית גם מתקנים צבאיים תת-קרקעיים דרך מערכות התקשורת, הכבלים והאנטנות המחוברים אליהן, ובכך להשבית מערכות פיקוד ושליטה ואף מתקני גרעין.

רקע היסטורי

גל אלקטרומגנטי (א"מ) מוגדר כסוג של הפרעה חשמלית ומגנטית המתקדמת במרחב, או בריק בצורה גלית (מחזורית) במהירות קבועה, קרי מהירות האור, שהיא 300 אלף ק"מ בשנייה. גלי המיקרו נוצרים בעת האצת זרם אלקטרוניים בשדה מגנטי או שדה חשמלי. ההאצה גורמת לשינויים בשדה החשמלי והמגנטי סביב האלקטרון המואץ, דבר הגורם להפרעה מרחבית בצורת גל אלקטרומגנטי, והספק הקרינה הנפלטת מגל זה תלוי בתאוצת האלקטרון המואץ.

ההתפתחות הטכנולוגית בתחום החלה בשנות ה-80 של המאה ה-19, כאשר היינריך הרץ הצליח לראשונה להפיק גלי מיקרו באופן מלאכותי. בשנות ה-30 של המאה ה-20 נרשמה פריצת דרך עם המצאת המכשור להפקת גלי מיקרו באמצעות האצת אלקטרוניים במסלול מעגלי בשדה מגנטי (מגנטרון), ובשנים שלאחר מכן – הגברת הקרינה האלקטרומגנטית הנוצרת באמצעות מערך נוסף של מגברים המבוססים על האצת אלקטרוניים בשדה חשמלי

שמשנתנה עם הזמן בקצב מהיר – קלייסטרון – באמצעות TWT (Traveling Wave Tube). פיתוחים אלה היו מרכיב מרכזי בהמצאת המכ"ם בעת מלחמת העולם השנייה, וסייעו רבות לניצחון בעלות הברית על גרמניה הנאצית.

בשנות ה-60 של המאה ה-20 הובילו פיתוחים טכנולוגיים בתחום ההספק התלוי בזמן קרי, ההספק הפולסי (Pulsed Power) ליכולת לייצר קרן אלקטרונים מואצת לפרקי זמן קצרים, מה שהוביל לפריצת הדרך שאפשרה שימוש בגלי מיקרו בעוצמה גבוהה; באמצעות פיתוח זה הצליחה ברית המועצות בתחילת שנות ה-70 לפתח נשק מעשי ראשון. לאורך המלחמה הקרה הובילו ארצות הברית וברית המועצות את תוכניות המחקר והפיתוח, ובין שנות ה-70 לשנות ה-90 היה ביניהן מרוץ בניסיון להגיע לעוצמות ולתדרים גבוהים ככל האפשר, תוך שיפור אמינות ועלות. רק לפני כעשור הוכנסו לשימוש התקני מצב מוצק מסוג GaN, אשר בשילוב עם מעגל חשמלי מתאים משמשים מקור ליצירה או להגברת גלי מיקרו ביעילות חשמלית² נמוכה בתחומים של 20-30 אחוזים.

ארצות הברית הובילה את המחקר והפיתוח בשנות ה-90, אך בעשור האחרון סין הופכת למובילה עולמית. שלוש המעצמות הטכנולוגיות המובילות במחקר ופיתוח של נשקים מבוססי גלי מיקרו בעוצמה גבוהה הן כיום ארצות הברית, סין ורוסיה. נוסף על כך נערכים מחקרים הקשורים לכך במדינות מערב אירופה, ביניהן בריטניה, צרפת, גרמניה ושוודיה, וכן במדינות מפותחות באסיה כמו יפן, הודו, סינגפור, טאיוואן, קוריאה הדרומית וישראל.

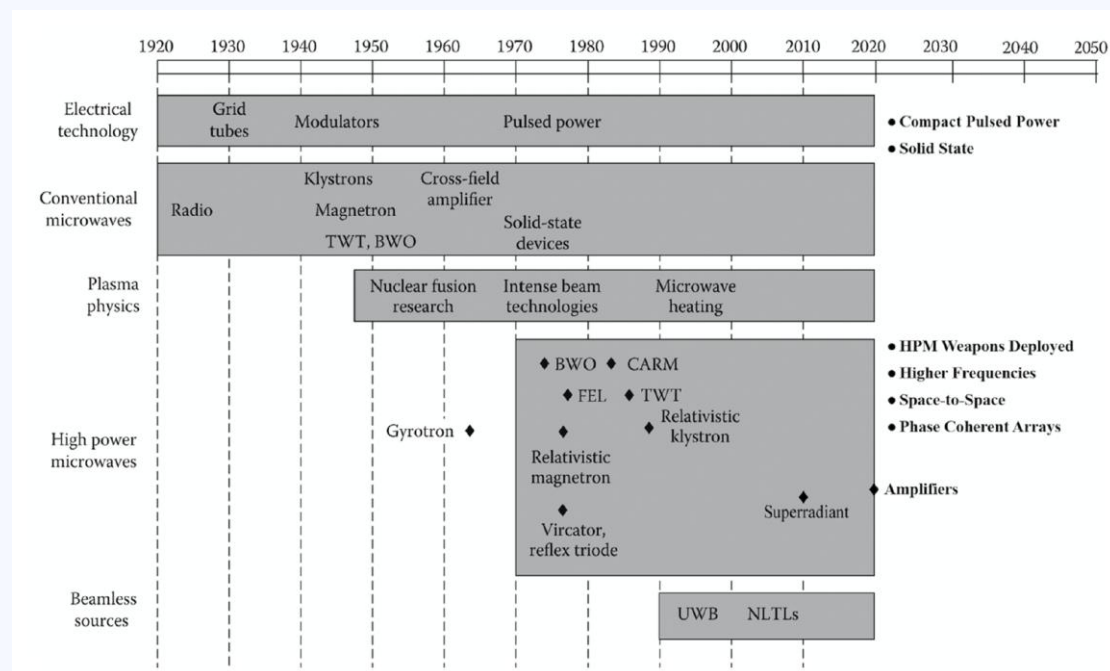
כיום יש לסין את [תוכנית המחקר](#) הגדולה בעולם לגלי מיקרו בעוצמה גבוהה, והיא חוקרת את רוב סוגי מקורות השידור, לרבות תצורות חדשניות שמשלבות בין סוגי מקורות שונים. גם לרוסיה יש כיום תוכנית מחקר מתקדמת, הנשענת ברובה על התשתית והידע שנצברו במסגרת תוכנית המחקר המפותחת של ברית המועצות. לאחר קריסת ברית המועצות, חלק מהתוכניות שפותחו על ידה [הוצעו למכירה](#) ותרמו לקידום המחקר והפיתוח של מדענים ברחבי העולם, כולל בארצות הברית. כיום [ארצות הברית](#) מתמקדת בפיתוח מערכות צבאיות מבוססות גלי מיקרו בעוצמה גבוהה ומובילה בתחום, תוך התבססות על שיתוף פעולה הדוק בין הצבא לתעשיות הביטחוניות. מערכות הנשק האמריקאיות מתמקדות ביכולות התקפיות, בהגנה אווירית ובהשפעה על בני אדם. רבות ממערכות אלה הן מבצעיות וצפויות להיכנס לשימוש בשנים הקרובות.

המחקר בנושא [בישראל](#) החל בשנות ה-60 בחברת רפאל, ולאחר מכן התרחב לחברות ביטחוניות נוספות כמו אלתא, אלישרא ומיקרוקים, שמתמחה בתחום זה. בהמשך התרחב המחקר גם למוסדות אקדמיים שונים. הפעילות שהתמקדה בהתחלה ביישומים צבאיים

² יעילות חשמלית מוגדרת כיחס שבין ההספק המופק לבין ההספק החשמלי הנדרש להפקת הספק זה.

התרחבה בשלב מאוחר יותר גם ליישומים אזרחיים במרחב הספקטראלי, שכוללים בין היתר אמצעים לתקשורת אלחוטית בהתקנים ופרוטוקולים מבוססי Wi-Fi לתקשורת ביתית ויישומי אינטרנט והתקני bluetooth לתקשורת קצרת טווח בין רכיבים שונים במרחב האישי. שימוש נוסף בגלי מיקרו הוא בתקשורת סלולרית ולוויינית ובטכנולוגיית GPS. הדבר נעשה בהובלה של חברות הזנק, חברות היי-טק ישראליות מבוססות ומרכזי מחקר ופיתוח של חברות בינלאומיות בישראל. המחקר בישראל מתמקד כיום בתקשורת לוויינית, בטכנולוגיית אנטנות ובשבבים למערכות מכ"ם.

סיכום הפיתוחים הטכנולוגיים לאורך השנים:



טכנולוגיות עיקריות

ניתן [לסווג](#) את השימוש בנשק מבוסס גלי מיקרו בעוצמה גבוהה לשני סוגים: נשק בתחום תדרים רחב (פס רחב) ונשק בתחום תדרים צר (פס צר). מרבית הפיתוחים הטכנולוגיים מתמקדים כיום ביישומים של כלי נשק בעלי פס צר. אלה פולטים קרן ממוקדת בעוצמה גבוהה (מאות ועד אלפי קילוג'ול לפולס), אשר פוגעת באופן מדויק במטרות. הם בעלי פוטנציאל שימוש רחב יותר ויש להם יכולת לירות מאות פולסים בשנייה ולייצר קרן כמעט רציפה, המאפשרת לפגוע במטרות רבות בזמן קצר. מערכות אלו מורכבות ממקור כוח (לרוב סוללה), קבלים שממירים את האנרגיה לקרן אלקטרונים, מקור מיקרוגל שממיר את קרן האלקטרונים לגלי מיקרו ואנטנה שמכוונת ויורה את הגלים לעבר המטרה. ניתן להתקין את המערכות על גבי פלטפורמות מגוונות כמו כלי רכב, ספינות, מטוסים, כטב"מים, טילי שיוט ומערכות קרקעיות

שונות. בעת התכנון יש להביא בחשבון את תחום התדרים ואורכי הגל שבו קיימת הנחתה מינימלית, 1-10 ג'יגה-הרץ ו-30-3 ס"מ, בהתאמה.

שימוש ב-HPM לצורך הגנה אווירית

השימוש בגלי מיקרו בעוצמה גבוהה בעלי פס צר לצורך פיתוח מערכות יירוט אוויריות טומן בחובו יתרונות רבים. ניתן להפעיל את המערכות בכל תנאי מזג אוויר ובתנאי ראות קשים, הן זולות לשימוש ובעלות יכולת יירוט רציפה. בשונה ממערכות הלייזר ששולחות קרן ממוקדת, גלי המיקרו אינם ממוקדים אלא מתבדרים תוך כדי התקדמותם ועל כן הם בעלי מפתח מרחבי גדול – דבר המקנה לגלי המיקרו את היכולת להתמודד עם מספר רב של איומים בו-זמנית, ובמהירות גבוהה.

פיתוחים אלו נועדו להתמודד, בין היתר, עם השימוש ההולך וגובר בכלי טיס קטנים ובלתי מאוישים בשדה הקרב, אשר הפך בעשור האחרון לנפוץ במיוחד בקרב ארגוני טרור וצבאות שונים ברחבי העולם.

יתרונות אלו הביאו את צבא ארצות הברית, בשיתוף עם חברות פרטיות מהתעשייה הביטחונית האמריקאית, לפתח מספר מערכות נשק המבוססות על גלי מיקרו רבי עוצמה, שמטרתן ליירט איומים אוויריים. על פי [דיווח](#) של הוול סטריט ג'ורנל גם ישראל בוחנת, בשיתוף פעולה עם ארצות הברית, את האפשרות לשלב מערכות אלו במערך ההגנה האווירית שלה. במסגרת מאמצים אלו יזם צבא ארצות הברית את תוכנית [DEFEND](#) (Directed Energy Front-line) שמטרתה (Electromagnetic Neutralization and Defeat), שמטרתה מאמץ משותף לעיצוב, בנייה ובחינה של מערכות המבוססות על גלי מיקרו רבי עוצמה, שיכולות להשתלב בשדה הקרב תוך נטרול מערכות אלקטרוניות של איומים אוויריים. התוכנית היא מאמץ משותף של חטיבת ריית'און, השייכת לתאגיד RTX, עם מספר גופים ממשלתיים כגון מעבדת המחקר של חיל האוויר האמריקאי (AFRL), המרכז ללוחמה ימית – יחידת דאלגן (NSWCDD) וגורמי מחקר והנדסה ממשד ההגנה. זאת ועוד, הצבא האמריקאי משלב את השימוש בנשק מבוסס גלי מיקרו בעוצמה גבוהה בתוכנית [IFPC](#) (Indirect Fire Protection Capability), שמטרתה לפתח מערכות שיספקו לארצות הברית הגנה רב-שכבתית מפני איומים אוויריים.

נדגיש כי לפיתוחים החדשים המשתמשים בגלי מיקרו בעוצמה גבוהה יש גם יכולת ליירט [נחילי רחפנים](#), שהשימוש בהם – בייחוד לאור תקיפת שדות תעופה אסטרטגיים של רוסיה בידי אוקראינה – צפוי להפוך למבצעי בשנים הקרובות. חשוב מאוד לפגוע בנחילי רחפנים וליירט אותם, שכן נחילים אוטונומיים אלו מתפקדים באופן עצמאי בתיאום מלא ומצוידיים באמצעי לחימה. הם משתפים מידע ביניהם ומתאימים את פעילותם לשינויים בזמן אמת, כך שגם במקרה של פגיעה בחלק מהרחפנים, הם עלולים לתפקד ביעילות כנחיל מאוחד.

מערכות מבצעיות: גלי מיקרו נגד אמל"ח

מערכות ליירוט כטב"מים ורחפנים

מערכת שנבחרה להשתתף בתוכנית ה-IFPC ויכולה לשמש פתרון ליירוט כלי טיס קטנים בטווח הקצר היא ה**לאונידס**, שפותחה בידי החברה האמריקאית אפירוס (Epirus). מערכת הלאונידס מוצגת סכמתית בתרשים הבא:



מדובר במערכת ניידת יבשתית, ימית או אווירית. הלאונידס משתמשת בגלי מיקרו פולסיים בעוצמה גבוהה, הנוצרים מהאצת אלקטרונים בתדר גבוה בהתקן חשמלי משולב עם התקן מצב מוצק מסוג גליום ניטריד (GaN). מטרת המערכת היא ליירט נחילי רחפנים ומערכות אוויריות בלתי מאוישות קטנות שונות, ולספק הגנה למערכות צבאיות ואזרחיות ולכוחות מתמרנים. המערכת יורה גלי מיקרו ממוקדים בעוצמה גבוהה בעלות כספית אפסית, ויש לה יכולת של כוונון אורך הגל. בהדגמה שנערכה עבור לקוח מהממשל האמריקאי בפברואר 2021 הצליחה המערכת להפיל 66 מתוך 66 רחפנים, בחלק מהמקרים בירי בודד. בינואר 2023 דווח כי הצבא האמריקאי חתם עם חברת אפירוס על חוזה בשווי 66.1 מיליון דולר לאספקת ארבעה אבות טיפוס של המערכת לצורך ניסויים, ובאפריל 2025 התקבל האב טיפוס הראשון. במהלך עדותו של הרמטכ"ל האמריקאי רנדי ג'ורג' בפני ועדת ההקצבות של הסנאט במאי 2024 הוא מסר כי המערכות צפויות להגיע בטווח הזמן המידי למזרח התיכון. חברת אפירוס מפתחת גם מערכת שנקראת לאונידס H20, המשתמשת בגלי מיקרו בעוצמה גבוהה לצורך השבתת מנועים של סירות וכלי שיט בלי מאוישים. המערכת מורכבת ממכלה שניתן להתקין על גבי כלי שיט, ויש לה טווח של עד 100 מטרים. בתרגיל של הצי האמריקאי שנערך באוגוסט

2024 הצליחה המערכת לשתק ארבעה מנועים שונים של כלי שיט, בהספקים בין 40 ל-90 כוחות סוס ובטווחים שונים.

מערכת נוספת שצפויה לתת מענה לנחילי רחפנים היא ה**מורפיוס**, שפותחה על ידי התאגיד האמריקאי לוקהיד מרטין ומוגדרת מבצעית משנת 2018. המורפיוס הוא כטב"ם קטן עם יכולת לירות גלי מיקרו בעוצמה גבוהה, שיכולים ליירט רחפנים. היתרון שלו הוא יכולתו ליירט נחילי רחפנים בטווחים רחוקים יותר, בניגוד למערכות קרקעיות שמסוגלות ליירט רחפנים רק בקרבתן. הוא גם קל לנשיאה, משקלו 14 קילוגרם בלבד וניתן לשגר אותו מפלטפורמות קבועות או ניידות, כולל כלי רכב, כלי שיט ומערכות אוויריות.

תיאור סכמתי של מערכת **מורפיוס**:



כחלק מתוכנית DEFEND פיתחה חטיבת ריית'יאון, השייכת לתאגיד RTX, את מערכת ה-**CHIMERA** (Counter-Electronic High-Power Microwave Extended-Range Air) שצפויה לתת מענה לאיומים אוויריים גדולים יותר בטווח הבינוני-רחוק. המערכת נייחת ועוצמת הקרן גבוהה בצורה משמעותית מזו של מערכות אחרות.

תיאור סכמתי של מערכת CHIMERA:



בינואר 2024 הושלמה [סדרת ניסויים](#) מוצלחים במערכת במטווח הטילים וייט סנדס שבניו מקסיקו, ובשנים 2024-2025 ריית'יאון צפויה [למסור](#) לצבא ארצות הברית את שני אבות הטיפוס הראשונים. מערכת HPM נוספת שפותחה על ידי ריית'יאון כחלק מפרויקט DEFENCE היא ה-[METEOR](#), אשר צפויה להיות מותקנת על גבי פלטפורמות יומיות. מערכת זו מיועדת להתמודד עם איומים על כלי שיט כמו טילים נגד ספינות, טילי שיוט או כטב"מים. השימוש העיקרי שלה מיועד להיות בים סין הדרומי ובאזור האינדו-פסיפי לצורכי הגנה מפני חיל הים סיני, וכן לשם שמירה על נתיבי השיט מפני האיום החות"י בים האדום. הניסוי המבצעי הראשון במערכת צפוי בשנת 2026.

מערכת נוספת המשתתפת בתוכנית ה-IFPC היא ה-THOR –

Tactical High Power Operational Responder. היא פותחה כחלק משיתוף פעולה של מעבדת המחקר של חיל האוויר האמריקאי (AFRL) עם מספר חברות ביטחוניות, והייחוד שלה מהמערכות האחרות הוא יכולתה לפגוע במספר מרובה של רחפנים בתקיפה יחידה, באמצעות קרן רוחבית שמתפזרת במרחב לרדיוס רחב. המערכת כולה מאוחסנת במכולה שעל גביה מותקנת אנטנה, והיא ניתנת לשינוע על ידי גרר או מטוס הרקולס. במהלך הדגמה מבצעית מוצלחת של המערכת באפריל 2023 היא הצליחה להפיל מספר רב של רחפנים בפעולה אחת.

המקבילה הבריטית למערכת ה-THOR לצורך יירוט נחילי רחפנים היא מערכת Rapid Destroyer. היא פותחה על ידי משרד ההגנה הבריטי וקבוצת Thales הצרפתית, יש לה טווח של קילומטר אחד בעלות של 10 פני ליירוט. המערכת כוללת גם מערך חיישנים לאיתור ומעקב, וניתן להתקין אותה על משאיות צבאיות כבדות. במסגרת ניסוי מוצלח באפריל

2025 במערב ויילס היא הפילה שני נחילים שונים של שמונה רחפנים במתקפה אחת, ובכלל הניסויים הופלו יותר מ-100 רחפנים.

תיאור סכמתי של מערכת [RapidDestroyer](#):



גם רוסיה וסין מפתחות מערכות הגנה שונות המשתמשות בגלי מיקרו בעוצמה גבוהה. בנובמבר 2024 חשפה [סין](#) מספר מערכות המבוססות על גלי מיקרו בעוצמה גבוהה, עם יכולת לייט נחילי רחפנים. בין המערכות ניתן למנות את ה-Hurricane 2000 המותקנת על גבי רכב משוריין ואת Hurricane 3000 המותקנת על משאית, הטווח שלהן הוא שני ק"מ ושלושה ק"מ, בהתאמה. רוסיה מפתחת "[תותח מיקרוגל](#)" שיורכב על שלדת משגר טילי נ"מ מדגם 'בוק', בעל יכולת יירוט איומים אוויריים שונים בטווח של עד 10 ק"מ, ובהם רחפנים, טילי שיוט ומטוסים. המידע על הפעילות ברוסיה ובסין מועט, ככל הנראה עקב חוסר רצון לחשוף פרטים על מערכות אלו.

מערכות מבצעיות: גלי מיקרו להגנה מפני בני אדם

אנשים שנחשפים לגלי מיקרו עשויים [לא להיפגע](#) מהם, ואפילו לא להבחין שנחשפו אליהם. עם זאת, בתדרים מסוימים יכולה להיות להם השפעה שלילית על בני אדם. גלים [בעוצמה נמוכה](#) יכולים לגרום נזק בריאותי רב למערכת העצבים ומערכת כלי הדם ולתופעות פסיכולוגיות חמורות. גלי מיקרו [בעוצמה גבוהה](#) בתדרים ובאורכי גל מסוימים יכולים לייצר חום באופן שיכול לפגוע ברקמות אנושיות ולגרום לתחושת כאב ולשיתוק זמני של המערכות הגופניות. רמת

הנזק – כוונות קשות או מוות – תלויה בעוצמת הגל המשודר. מנגד, גלים בעוצמות גבוהות יכולים לחדור דרך מיגונים קשיחים ולגרום נזק גם לאנשים שמסתתרים במבנים ממוגנים או לאנשים שנמצאים בתוך כלי רכב משוריינים.

מערכת ה-MEDUSA

מערכת ה-MEDUSA ([Mob Excess Deterrent Using Silent Audio](#)) פותחה על ידי תאגיד WaveBand במימון חיל הים האמריקאי, ומבוססת על שימוש בגלי מיקרו בעוצמה נמוכה במטרה לייצר תחושת קול במוח. תחושה זו עלולה לגרום אי-נוחות חמורה ואף שיתוק זמני, וניתן להגביר את האפקטים שלה או למקד על אדם יחיד או קהל על ידי שליטה בפרמטרי השידור. מטרתה המרכזית של המערכת היא למנוע חדירה של אנשים לאזורים מוגנים ואסורים, ואף לנטרל זמנית גורמים עוינים במקרה הצורך. המערכת ניידת, חסכונית באנרגיה ואינה גורמת נזקים ארוכי טווח. [אב טיפוס](#) ראשון של ה-MEDUSA פותח בשנת 2004, ולא קיים מידע פומבי על המשך פיתוח או יישום מבצעי שלה.

מערכת ה-ADS

חוקרי מעבדת המחקר של חיל האוויר האמריקאי (AFRL) פיתחו את [מערכת ה-ADS](#) (Active Denial System) – מערכת מיקרוגל פס צר לא-קטלנית – כאמצעי שליטה על קהל במקרים של התפרעויות ואירועים לא רצויים, כדי לאלץ את הקהל המתפרע לסגת. גלי המיקרו בהספק של עד 100 קילוואט חוזרים במקצת דרך העור ומחממים את אזור הפגיעה לטווח טמפרטורות של 50 עד 54.5 מעלות צלזיוס בהקרנה למשך שתי שניות. הדבר גורם לתחושה של חום, הרגשת "שריפה" ותחושת כאב. טווח התדרים במערכת ניתן לכוונון, ומתוכנן לבחור להשתמש בטווח של 94-95 ג'יגה-הרץ, שגורם לתגובה מיידית של בריחת קהל בגלל החום ומאפשר הפסקה מיידית של הכאב עם תום השימוש, מבלי לגרום נזק זמני או קבוע. המערכת ניידת, בעלת טווח פעולה של כמה מאות מטרים עם יכולת חדירה דרך זכוכית או אמצעי הגנה כמו בגדים, אך לא דרך מבנים וחומרים כמו עץ ומתכות.



ראו: [סרטון](#) המדגים את ההשפעה הרגעית והבלתי מסוכנת, לטענת המפתחים, של מערכת ה-ADS על אנשים.

[WB-1](#) המערכת הסינית

מערכת זו, שפותחה בידי התאגיד Poly שנמצא בבעלות ממשלת סין, מעוררת חשש רב בגלל יכולותיה. היא הוצגה בנובמבר 2014 בתערוכת התעופה והחלל הסינית ב-Zhuhai, ובדומה למערכת האמריקאית היא גורמת לתחושת שריפה בעור, כאשר טווח הפעולה שלה מגיע לקילומטר אחד. על פי [הדיווח](#), סין השתמשה בנובמבר 2020 במערכת לא ידועה המבוססת על גלי מיקרו בטריטוריית האיחוד ההודית לדאק, סמוך לגבול עם סין על רכס ההימלאיה. בתקרית המערכת הסינית שיתקה לכאורה חיילים הודים למשך 15 דקות וגרמה להם להקיא, כל זאת מבלי להפר את ההסכם עם הודו האוסר הדדית על ירי בתחמושת חיה.

ניצול לרעה של טכנולוגיית מיקרוגל

בארצות הברית קיים חשש מפני המערכת הרוסית לשידור גלי מיקרו, שלכאורה גרמה למאות דיפלומטים ואנשי צבא אמריקאים ברחבי העולם לחוות סדרת תסמינים שיוחסו למה שנקרא "תסמונת הוואנה". התסמינים דווחו לראשונה בשנת 2016 על ידי דיפלומטים אמריקאים בשגרירות ארצות הברית בהוואנה, ששמעו רעש צורם ולאחר מכן חשו בחילה, כאבי ראש, סחרחורת, נדודי שינה ואובדן שיווי משקל. מקרים אלו דומים לתקרית [Moscow Signa](#) שהתרחשה במהלך המלחמה הקרה בין השנים 1953-1976, ובה נחשפה שגרירות ארצות הברית במוסקבה לקרינת מיקרוגל בעוצמה נמוכה בתדרים של 2.5-4 ג'יגה-הרץ במשך 18

שעות ביום. החשיפה לגלים, שככל הנראה נגרמה מהקרנה מכוונת מצד ברית המועצות, לוותה בתסמינים דומים.

[בתחקיר](#) המשותף שערכו השבועון הגרמני דר שפיגל, רשת הטלוויזיה CBS וכלי התקשורת הרוסי Insider נטען כי האחראית לכך היא יחידת מודיעין סודית של צבא רוסיה, שהשתמשה בנשק אקוסטי לא-קטלני או בנשק המבוסס על גלי מיקרו. מנגד, רוב סוכנויות הביון האמריקאיות סבורות כי התרחיש שלפיו תסמונת הוואנה נגרמה בידי גורם זר הוא "[מאוד לא סביר](#)".

נציין גם כי קיימים [דיווחים](#) על תסמינים שחשו דיפלומטים אמריקאים בעיר גואנגג'ואו בסין, שמזכירים את התסמינים בתסמונת הוואנה. אף שמהימנות הדיווחים על האירועים שבהם בוצע שימוש בכלי נשק אלו מוטלת בספק, השיח התקשורתי הנרחב בנושא מדגיש את החשש ההולך וגובר מפני ניצול לרעה של טכנולוגיה המבוססת על גלי מיקרו עם יכולת השפעה על אנשים.

שימוש בידי גורמי טרור

זמינות של מידע על טכנולוגיות ברשתות החברתיות והיעדרה של אמנה ספציפית האוסרת שימוש בנשק זה מלווה בחשש מנפילת הנשק מבוסס על גלי מיקרו לידי שחקנים לא-מדינתיים אלימים וארגוני טרור, שישתמשו בו לצרכים מגוונים תוך הפרת זכויות אדם. היותן של המערכות בלתי קטלנית ובלתי נראות מהווה יתרון עבור שחקנים מפירי זכויות אדם, שכן מאפיינים אלו מקשים על הוכחת השימוש במערכת ומאפשרים מרחב הכחשה. החשש גובר בייחוד לנוכח השוני בנורמות האתיות והפוליטיות בין מדינות מערביות לבין משטרים לא-דמוקרטיים וארגוני טרור. לפי ד"ר ג'ורדנו (Giordano), שהוא גם חוקר בכיר במכללת המלחמה של הצי האמריקאי, [הנורמות השונות](#) ברוסיה ובסין יוצרות הזדמנויות ייחודיות לקידום מחקר ביולוגי וטכנולוגי בדרכים שלא היו מתקבלות בארצות הברית ובקרב מדינות נאט"ו, ולזליגת טכנולוגיות אלו, בעיקר דרך רשתות חברתיות, אל ארגוני הטרור השונים.

מערכת מתחרה: גלים אקוסטיים

חשוב לציין כי טכנולוגיות המבוססות על גלים אקוסטיים מיושמות אף הן על בני אדם, אך קיים חשש סביר שמערכות המבוססות על גלי קול (אך גם על גלי מיקרו) בתדרים שיכולים לפגוע בבני אדם ייפלו לידיים הלא-נכונות וישמשו משטרים סמכותניים כדוגמת רוסיה, סין, איראן, טורקיה וקוריאה הצפונית לפגיעה בגורמים אזרחיים במדינות אלו ולהפרת זכויות אדם. כך למשל נעשה [שימוש בתותח קול](#) במארס 2024 כנגד מפגינים בבלגרד, בעת שהפגינו נגד הממשלה הסרבית. לפי עדויות של מפגינים, בעת הפעלת הנשק נשמע צליל חזק ולאחר מכן הם סבלו מתסמינים של כאבי ראש מתמשכים, בחילות וצלצולים באוזניים, [וההערכה](#) היא כי

נעשה שימוש בנשק אקוסטי (לא נשק אלקטרומגנטי) לפיזור קהל, בדומה למערכת האמריקאית LRAD שעקרון פעולתה מבוסס אף הוא על גלי קול.

המלצות למערכת הביטחון בישראל

על ישראל לאמץ את השימוש בנשק המבוסס על גלי מיקרו כחלק מתפיסת הביטחון הלאומי שנועדה לשדרג את ממד הספקטרום האלקטרומגנטי בשני היבטים עיקריים: האחד, **אמצעי הגנה מפני איומים אוויריים, כולל נטרול מערכות אלקטרוניות של איומים אוויריים** כפי שיפורט בהמשך; והשני, **שימוש במערכות לא-קטלניות** כנגד גורמי טרור וגורמים עוינים, תוך מניעת מגע עם כוחותינו במינימום נפגעים. מדובר באימוץ טקטיקות חדשניות ויצירתיות המבוססות על טכנולוגיה של RF DEW (Radiofrequency Directed Energy Weapon).

הפיתוחים הטכנולוגיים הקיימים, בעיקר האמריקאיים, בשלים לשימוש מבצעי ולהטמעה מיידית בטווח הזמן הקרוב. מאחר שרוב מערכות הנשק המבצעיות פותחו בארצות הברית, השימוש בהן מחייב את אישור הממשל האמריקאי ועל כן מומלץ שישראל תפעל לרכישתן בתקופת ממשל ידידותי, שיש לו גישה גמישה יותר כלפי מכירת נשק לישראל. השימוש וההטמעה של טכנולוגיית גלי המיקרו לצרכים ביטחוניים הם ללא ספק שינוי מהפכני ואולי אף שובר שוויון (game changer), אך כדי שהטכנולוגיה תחולל שינוי אמיתי יש לפתח דוקטרינה סדורה ותפיסת הפעלה חדשה ליישומה בשדה הקרב. חשוב להדגיש כאן כי מיעוט המידע על מערכות מיקרוגל בידי סין ורוסיה אינו מצביע על פער טכנולוגי, אלא על חשאיות הנושא ואפשרות זליגת הטכנולוגיה לידי גורמים עוינים באזורנו.

אמצעי הגנה מפני איומים אוויריים

מבחינה הגנתית, המערכות האמריקאיות הרבות שפותחו לצורך הגנה אווירית, ובהן לאונידס, מורפיוס, THOR ו-CHIMERA, יכולות להשתלב כחלק ממערך הגנה אווירית רב-שכבתי. שילוב זה יאפשר לישראל להתמודד ביעילות ולספק מענה לאיומים אוויריים בטווח הקצר כמו רחפני הנפץ הזולים של חמאס וחזבאללה, וכן לאיומים בטווח הבינוני והארוך כמו הכטב"מים (בדגש על כטב"מי הנפץ) של איראן וחזבאללה, שביניהם ניתן למנות את השאהד 136, השאהד 110 והשאהד 129. כמו כן, מערכות אלו יוכלו לסייע ולתת מענה לאיום העתידי המתגבש של נחילי רחפנים אוטונומיים. אינטגרציה עתידית של המערכות עם מערכות נוספות שיעודן הוא יירוט לטווח הבינוני-קצר, כמו "מגן אור" וכיפת ברזל, תשפר בצורה ניכרת את יכולת היירוט, בייחוד בתנאי מזג אוויר שבהם יש מגבלות למערכת "מגן אור". כאמור, גלי המיקרו אינם ממוקדים אלא מתבדרים תוך כדי התקדמותם, ועל כן הם בעלי מפתח מרחבי גדול – דבר המקנה להם את היכולת להתמודד עם מספר רב של איומים בו-זמנית ובמהירות גבוהה.

אמצעי הגנה מפני איומים ימיים

ישראל יכולה להשתמש במערכות המבוססות על גלי מיקרו בעוצמה גבוהה גם בזירה הימית. מערכות ה-METEOR והלאונידס יכולות להיות מותקנות על [הנחתות החדשות](#) שהגיעו בשנה שעברה לזרוע הים, ולהגן עליהן מפני איומים אוויריים. גם מערכת הלאונידס H2O יכולה לסייע בהשבתת כלי שיט עוינים מבלי להסתכן בלחימה או בהסלמה, כמו במקרים של משט המרמרה, היאכטה מדלין או משטי מחאה נוספים שעתידיים להגיע לחופי עזה על רקע המלחמה.

שימוש כאמצעי הגנה על שטחים חיוניים

ניתן לעשות שימוש במערכות מבוססות גלי מיקרו כאמצעי הרתעה למניעת התקרבות לגדר הגבול או לאזור הפרימטר, כך שכל אדם שיתקרב לגדר בטווח מוגדר מראש או יבצע פעילות חשודה בסמוך לה ייחשף לקרן המיקרוגל המחממת של מערכת ה-ADS, או לקולות הצורמים של מערכת ה-MEDUSA שיאלצו אותו לסגת. בדיעבד, השימוש במערכות יכול היה להיות יעיל מול [ההתפרעויות](#) הרבות בגדר בגבול עזה והתפרעויות שונות שהתרחשו לאורך השנים בגבולות עם [סוריה](#) ו**לבנון**.

שימושים אפשריים נוספים של מערכת ה-MEDUSA הם סיוע לפשיטות ממוקדות, כאמצעי תומך לכוחות המתמרנים וכן ככלי מסייע להתמודדות עם התבצרות של מחבלים בתוך בתים. כל זאת באמצעות שידור קולות צורמים בעוצמה גבוהה לעבר מחבלים, שיפגע ביכולתם לתפקד.

שימוש כנשק אל-הרג

צה"ל יכול להשתמש במערכות ה-ADS וה-MEDUSA ככלי יעיל לפיזור התפרעויות אלימות, או באירועים ביטחוניים חריגים אחרים שיצאו מכלל שליטה. הפעלה של המערכות מטווח בטוח של כמה מאות מטרים יכולה למנוע חיכוך לא רצוי של חיילים עם מתפרעים אלימים, וכתוצאה מכך להפחית את מספר הפצועים וההרוגים.

חשוב להדגיש כי היותן של המערכות בלתי קטלניות ובלתי נראות מהווה יתרון משמעותי, שכן הפעלתן אינה גורמת לנזק קבוע או לפגיעות פיזיות נראות לעין. תכונות אלו מפחיתות את החיכוך עם האוכלוסייה ומצמצמות את הסבירות להסלמה. ואולם השימוש בטכנולוגיה חדשנית שטרם שולבה עד כה בשדה הקרב יכול לעורר חשש מנזקי קרינה, ועל כן גם ביקורת בינלאומית וסיקור תקשורתי שלילי. לכן, שימוש צבאי ישראלי במערכות יהיה חייב לשלב הפעלה זהירה ומושכלת, לצד מיתוג נכון והסברה שמדגישה את היותן בלתי מסוכנות וללא השפעות לטווח ארוך. על כן יש לגבש תפיסת הפעלה ותורת לחימה סדורה להפעלתן, תוך

הגבלת השימוש במערכות לצה"ל בלבד, ורק במקרים של אירועים ביטחוניים מובהקים, כדי לספק מענה לחשש מפני זליגה של השימוש בהן למרחב האזרחי.

סיכום

נשק אלקטרומגנטי המבוסס על גלי מיקרו הוא אמצעי הגנתי והתקפי בעל יתרונות משמעותיים עקב יכולתו לכסות מטרות במפתח זוויתי גדול, ובכך לפגוע מיידית ולנטרל מספר מטרות נעות או נייחות, תוך גרימת נזק למערכות אלקטרוניות ללא נזק אגבי. למערכת חסרונות – טווח פעולה קצר יחסית וצריכה אנרגטית גדולה שנובעת מיעילות חשמלית נמוכה, אך בתכנון נכון של המערכות האלקטרוניות ניתן להגיע למערכת אופטימלית מבחינת הביצועים והדרישה המבצעית.

מומלץ למערכת הביטחון לאמץ את השימוש בנשק המבוסס על גלי מיקרו כחלק מתפיסת הביטחון הלאומי שנועדה לשדרג את ממד הספקטרום האלקטרומגנטי, תוך יישום טכנולוגיות מבוססות על גלי מיקרו, הן בהיבט האקטיבי נגד איומים אוויריים, כולל נטרול מערכות אלקטרוניות של איומים אוויריים (כגון נחילים תוקפים) ואיומי אמל"ח לסוגיהם השונים, והן בהיבט של שימוש במערכות נשק לא-קטלניות כנגד גורמי טרור וגורמים עוינים בחזיתות הלחימה והחיכוך השונות, תוך מניעת מגע עם כוחותינו במינימום נפגעים.