

הפקת חשמל או נשק רב עוצמה – יישום כפול ומשמעותו

יהושע קליסקי

המכון למחקרי ביטחון לאומי – אוניברסיטת תל אביב

מאמר זה דן ביכולתה של מדינה לפתח מערכות נשק המבוססות על תהליכי היתוך גרעיני. מדובר בפעילות דואלית בעלת פוטנציאל הרס רב, הנעשית במסווה של פיתוח מדעי טהור או פיתוחים יישומיים לצרכים שונים כגון כלכלה, אנרגיה ירוקה או שימור איכות הסביבה. חיזוק לחשש מפני פעילות "כפולה" נובע מהעובדה שחומרי הגלם המשמשים לייצור מערכות אלו אינם אסורים על פי אמנות בינלאומיות. נדון במאפיינים המיוחדים של נשק זה במשמעויות השונות, באתגרים הטכנולוגיים הכרוכים בפיתוח מערכות אלו, בהיבטים מבצעיים ובהערכת אפקטיביות הנזק של נשק זה. כמו כן נצביע על מגוון האפשרויות השונות העומדות בפני מי שמבקש לפתח יכולת לא-קונוונציונלית תוך "גירוד" של מעטפות הפיקוח וההגבלות השונות, על הסכנות הפוטנציאליות הכרוכות בנשק מבוסס תהליכי היתוך גרעיני למדינות שונות, כולל ישראל, ועל האמצעים שיש לנקוט בהתמודדות עם סכנה זו. בסופו של המאמר מובא מילון מונחים קצר המסביר מונחים מדעיים או טכנולוגיים.

מילות מפתח: היתוך גרעיני, איזוטופים, דאוטריום, טריטיום, פלזמה, כליאה אינרציאלית, כליאה מגנטית, נשק דור 4, טכנולוגיה, צבא

מבוא

הידיעה על הצלחת ניסוי ההיתוך הגרעיני באמצעות לייזרים רבי עוצמה במסגרת פרויקט [National Ignition Facility – NIF](#) במעבדות הלאומיות בליברמור, קליפורניה, עוררה התרגשות רבה בקהילה המדעית ובציבור ועוררה תקוות לאפשרות של ניצול אנרגיה תרמוגרעינית לייצור אנרגיה חשמלית ירוקה ונקייה מזיהומים. בצד ההצלחה הזו יש לזכור כי בדומה לאנרגיה גרעינית, קיימות אפשרויות ליישם את תהליכי ההיתוך המבוקר לשם ייצור מערכות נשק יעילות ובעלות יכולות הרס העולות לאין שיעור על כל מערכת נשק קונוונציונלית, כדוגמת פצצת מימן, שעקרון פעולתה מבוסס על תהליך היתוך לא-מבוקר.

האפשרויות הקיימות כיום בתחום פיתוח נשק בעל יכולות הרס רבות, המבוסס על חומרי ביקוע או היתוך גרעיני, בשילוב עם עלייה ברמת ההשכלה הטכנולוגית וזמינות מידע חופשי, משדרגות את יכולת המחקר והפיתוח של **מדינות סוררות** ומציבות דילמה לאומות שוחרות שלום. מעבר לכך, הפוטנציאל ההרסני של נשק זה עלול לגרום למרוץ חימוש בלתי מבוקר בין

מדינות שחשות מאוימות, למטרות הגנה. הסיבה לכך היא שהידע והיכולות הטכנולוגיות, בשילוב עם היעדר חסמים מוסריים, פוליטיים או משפטיים, עלולים להוות תמריץ לפיתוח מערכות נשק הרסניות בסתר או במסווה של פעילות לגיטימית, כשלמעשה מדובר בפעילות דואלית. משמעות הדבר היא כי במסווה של פיתוח מדעי טהור או פיתוח יישומי לצרכים שונים כגון כלכלה, אנרגיה ירוקה או שימור איכות הסביבה, ניתן לפתח נשק הרסני על בסיס טכנולוגיה "אזרחית" כביכול. מטרתנו במאמר זה היא להצביע על מגוון האפשרויות השונות העומדות בפני מי שמבקש לפתח יכולת לא-קונוונציונלית תוך "גירוד" של מעטפות הפיקוח והמגבלות השונות, על הסכנות הפוטנציאליות הכרוכות בנשק מבוסס תהליכי היתוך גרעיני למדינות שונות, כולל ישראל, ועל האמצעים שיש לנקוט בהתמודדות עם סכנה זו.

רקע טכנולוגי

כפי שצוין במבוא, הנושא של פיתוח טכנולוגיות גרעין למטרות צבאיות הוא סבוך ומצריך הבנה של התהליכים השונים הכרוכים בפיתוח מערכות אלו.

• נשק גרעיני טקטי לפיצוץ בונקרים על ידי פצצה חודרת. לנשק דור שלישי יש מספר מגבלות אינהרנטיות, בעיקר בהיבטים הטכנולוגיים (מערכות מסובכות), טקטיים (עוצמה חזקה שלא תמיד מתאימה לשדה הקרב) ושיקולי זיהום סביבתי בחומרים רדיואקטיביים.

נשק גרעיני דור רביעי מוגדר כ"נשק המבוסס התקן גרעיני ובו מתרחשים תהליכים אטומיים או גרעיניים, שאינם אסורים על פי האמנה למניעת ניסויים גרעיניים, (CTBT)". הגדרה אחרת, מפורשת יותר, מדברת על "חומר נפץ גרעיני המבוסס על ייזום תהליך תרמו-גרעיני ביעילות נמוכה, בעזרת חומרים או תהליכים ללא צורך בביקוע גרעיני". לנשק דור רביעי מספר מאפיינים ייחודיים, המבדילים אותו מדגמי נשק מדורות קודמים ומקנים לו ייחודיות ומאפיינים בהיבטים שונים, שיפורטו להלן.

מאפיינים ייחודיים שינוי פרדיגמה

מדובר במערכת אשר עצם השימוש בה מהווה שינוי בפרדיגמה הקיימת, הגורסת כי כל שימוש בתהליך הקשור איכשהו בגרעין מהווה קריאת תיגר על העולם בנושא זה. המערכת מבוססת על **היתוך גרעיני** – מיזוג של אטומים קלים כגון **דאוטריום (D)** ו**טריטיום (T)** ליצירת תרכובות חדשות, בדומה לתהליך התרמו-גרעיני שמתרחש בשמש תוך שחרור אנרגיה רבה. לנשק זה יש כאמור כוח הרס שניתן לשליטה, ומכאן נובעים מספר יתרונות מובנים של נשק מסוג זה, אשר עלולים להוות פיתוי למדינות סוררות:

- **הרחקת חשד לפיתוח נשק גרעיני:** הטריגר להפעלת המערכת מתוכנן תוך שימוש בחומרים בלתי בקיעים (non-fission), ועל כן לא משתמשים בחומרים גרעיניים אופייניים.
- **שימושים אזרחיים:** הטריגר לתהליך נעשה בטכנולוגיות דואליות – טכנולוגיות שניתן לייחס להן יישומים אזרחיים, בעיקר בתחום אנרגיה ירוקה ופיתוח תהליכים של תגובות תרמו-גרעיניות **מבוקרות**.
- **מערכת נשק טקטית, קומפקטית:** נשק שכביכול אינו גרעיני, אך יש לו יכולות הרס ניכרות ברמות השקולות להפעלת נשק בתחום עוצמה של 1 עד 100 טונות TNT. חישובים פשוטים מראים כי שילוב **אלפית גרם** של חומר גלם הנדרש לתהליך ההיתוך יוצר אנרגיה השקולה לפיצוץ של 50 ק"ג TNT.
- **הרתעה טכנית** (technical deterrence, deterrence by competence): עצם הידיעה כי מדינה מסוימת השיגה שליטה בטכנולוגיות של היתוך ליישומים אזרחיים (peaceful nuclear energy)

יש לזכור כי בחלק מהתהליכים הקשורים בטכנולוגיות גרעין הטכנולוגיות הן דואליות, כלומר ניתנות לשימוש צבאי או אזרחי, ועל כן ניתוח מערכות אלו מחייב הבנה נרחבת במגוון דיסציפלינות **מדעיות-טכנולוגיות**. ניתוח מפורט של הנושא נמצא במספר מאמרים על אודות נשק **דור רביעי** ובמקורות המוזכרים במאמר זה. כאשר מדברים על נשק גרעיני יש להבחין בין מספר דורות של פיתוח התקנים גרעיניים, לפי דרגת היעילות, כוח ההרס והטכנולוגיה שבבסיס ההתקן. מדובר על וקטורי פעולה ידועים בתחומי מדע וטכנולוגיה וקשים להסתרה, ועל כן פעילות במסלולים אלו מעידה באופן ברור על כוונות המבצע.

כאשר מדברים על נשק גרעיני יש להבחין בין מספר דורות של פיתוח התקנים גרעיניים, לפי דרגת היעילות, כוח ההרס והטכנולוגיה שבבסיס ההתקן.

נשק גרעיני **מדור ראשון** הוא פצצת גרעין המבוססת על תהליכי ביקוע, בהתקן בסיסי בעל כוח הרס רב (בסדר גודל של הפצצות שהוטלו על הירושימה ונגסקי) אך ביעילות נמוכה, כלומר כמות האנרגיה המופקת היא בסדר גודל של עשרה אחוזים לעומת האנרגיה שהייתה צפויה להתקבל בתהליך זה. להפעלת התקן זה נדרשת כמות ניטרונים התחלתית לייזום התהליך.

הדור השני של נשק גרעיני הוא מתקן משודרג המכיל מקור ניטרונים יעיל להגדלת כמות הניטרונים ההתחלתית הנדרשת לייזום התהליך, על מנת להגביר את התהליך הביקוע הגרעיני ועל ידי כך להאיץ את יעילותו בתוספת משקל מזערית.

התקן אחר השייך אף הוא לדור השני של נשק גרעיני הוא **נשק תרמו-גרעיני**, קרי פצצת מימן, אשר פועלת על עיקרון של הפקת אנרגיה בתהליך **היתוך גרעיני**, בדומה לתהליך הפקת האנרגיה המתרחש בשמש, למשל.

נשק גרעיני **דור שלישי** כולל מערכות מסוגים שונים למטרות טקטיות או אסטרטגיות מוגדרות מראש. נשק מסוג זה כולל מספר סוגים על פי יכולת ההרס או היכולת להפקת קרינה מסוגים שונים. כך למשל, אנו מבחינים בין מספר מערכות דור שלישי:

- מערכת עם יכולת הרס מוגבלת אך בעלת יכולת להפיק קרינה מוגברת של ניטרונים או **קרני רנטגן – קרני X**.
- מערכת להפקת פולסים של קרינה אלקטרומגנטית חזקה, לשם שיבוש מערכות המבוססות על קרינה אלקטרומגנטית.
- מערכות בעלות יכולת פיצוץ והרס מוגברים.

יישומים אזרחיים וצבאיים – כך שכל תהליך שכרוך בקידומה ניתן להסוואה כפעילות מדעית טהורה עם יישומים אזרחיים.

נוסף על כך, הטכנולוגיה הזו משיקה לתחומים מדעיים מאתגרים כגון טכנולוגיות לייצור אנטי־חומר (כאשר חומר מתחבר עם אנטי־חומר משתחררת אנרגיה רבה), או לשם ייצור טריטיום. הדבר נעשה במאיצים רבי עוצמה, המפיקים חלקיקים אנרגטיים הנדרשים הן ליצירת אנטי־חומר כגון אנטי־פרוטון והן ליצירת טריטיום. אומנם הנושא של אנטי־חומר נמצא כרגע בשלבי מעבדה, אך חישובים מראים כי ניתן להפיק מחיבור כמות של מיליגרמים אחדים של חומר ואנטי־חומר אנרגיה שוות ערך ל־21 טונות TNT, וזה ממחיש את פוטנציאל הטכנולוגיה. לבסוף יש לזכור כי טכנולוגיית מאיצים רבי עוצמה עשויה לשמש ליישום דואלי, הן בהיבט מחקרי והן בהיבט של מקור אנרגיה שעשוי לשמש בסיס לייצור רכיבים עבור נשק רב עוצמה, כמו ייצור טריטיום או אנטי־פרוטון.

אחת הטענות של המתנגדים לפיתוח טכנולוגיות ההיתוך היא הזמן הרב הנדרש לפיתוחן. מבחינת המתכנן הצבאי הזמן הרב הוא דווקא יתרון, שכן הוא מאפשר מחקר ופיתוח ממושך ולימוד מיטבי של כל מרכיבי המערכת המבצעית. מצד אחר, הזמן הממושך יוצר תחושה של חוסר אמון ביכולות המערכת, מה שמעורר חוסר עניין כללי ועשוי להרדים את גורמי האכיפה, ובכך לאפשר למדינות סוררות להמשיך במאמצי הפיתוח שלהן.

מאפיין טכנולוגי נוסף קשור למדידת תופעות ותהליכים גרעיניים ותרמו־גרעיניים. על מנת למדוד את התהליכים הדינמיים המתרחשים בעת ביצוע ניסיונות המדמים היתוך או ביקוע בתנאי לחץ וטמפרטורה קיצוניים, יש צורך בפיתוח מכשור דיאגנוסטי מדויק ומהיר. יכולת פיתוח וייצור של ציוד זה, במסווה של פיתוח יכולות היתוך למטרות אזרחיות כביכול, תאפשר פיתוח ציוד דיאגנוסטי החיוני למדידה והערכה של פרמטרים קריטיים הקשורים לפיתוח נשק גרעיני, וכן פיתוח ולימוד תהליכים גרעיניים. נושא זה יידון בהמשך.

מאפיינים אסטרטגיים

לנשק דור רביעי יש מאפיינים שהופכים אותו לאטרקטיבי עבור מדינות מפותחות מבחינה תעשייתית, שכן שליטה בטכנולוגיה של היתוך גרעיני היא מכפיל כוח טכנולוגי ומשמשת מאיץ מדיני־טכנולוגי עבור מדינה מתקדמת השואפת להיות בחזית הטכנולוגית־צבאית. צפוי על כן כי יתפתח מרוץ חימוש בין מדיניות בעלות יכולת תעשייתית כלכלית על מנת לא להימצא בפיגור, בעיקר

מניחה אפשרות סבירה שהדבר מאפשר לה שליטה פוטנציאלית גם ביישומים צבאיים.

מדינה כזאת, הגם שאין בידה מערכת מבצעית, יכולה להיחשב **מדינת גרעין וירטואלית** (Virtual Nuclear Weapon State), עם כל ההשלכות האסטרטגיות והמדיניות של מצב זה.

נשק מסוג זה, בניגוד לפצצת ביקוע, אינו מצריך מסה קריטית להפעלתו; נדרשת כמות קטנה של חומר, בסדרי גודל של אלפיות גרם (מיליגרם), כדי לעבור תהליך היתוך ביעילות כלשהי בתנאי דחיסה מתאימים. חשוב לזכור כי תהליך היתוך, גם ביעילות נמוכה, הוא אנרגטי ביותר. כדי להמחיש את כמות האנרגיה המופקת מהיתוך נציין כי האנרגיה המופקת מקילוגרם אחד של פחם מספיקה להדלקת נורה ביתית בהספק של 100 ואט למשך שמונה שעות, ואילו האנרגיה המופקת מהיתוך מלא של קילוגרם אחד של דאוטריום תאפשר לאותה נורה לדלוך במשך 30 אלף שנים.

מאפיינים צבאיים

נשק דור רביעי כפי שתואר לעיל הוא מערכת נשק בעלת מאפיינים צבאיים ייחודיים, ההופכים אותה למערכת מסוכנת ביותר:

- מערכת נשק בעלת יכולת פגיעה נקודתית וישירה במטרות מוגדרות היטב עם נזק סביבתי מצומצם – דבר המשתלב באתגרי הלחימה המודרנית, הגורסת פגיעה נקודתית במטרות איכות על פני "הפצצת שטח". הפגיעה נעשית על ידי העברת אנרגיה למטרה באמצעות התנגשות אי־אלסטית וחדירה לעומק המטרה, בדומה לנשק קינטי רב עוצמה.
- כפועל יוצא מכך, לנשק זה יכולת השמדה ממוקדת של מטרות איכות, כולל יכולות השמדת נשק להשמדה המונית.
- נשק מסוג זה ניתן לשימוש על ידי מדינות שאינן מדינות גרעין, אך בעלות יכולת טכנולוגית גבוהה. העובדה שהדלק המשמש בסיס לנשק זה לא נכלל באמנה למניעת ניסויים גרעיניים (CTBT) מקילה מאוד על העיסוק בו, בייחוד כשמדובר במדינות סוררות המחפשות כל סדק חוקי על מנת לפתח נשק להשמדה המונית.

מאפיינים טכנולוגיים

הטכנולוגיה הכרוכה בפיתוח תהליכי היתוך היא טכנולוגיה מאתגרת בתחומים רבים, כגון אופטיקה, לייזרים, הנדסת חומרים, הנדסת גרעין, ננוטכנולוגיה, טכנולוגיה של רכיבים מכניים זעירים (MEMS), פיתוח יכולות חישוב ייחודיות וסימולציה, ועוד. לטכנולוגיה זו יש אופי דואלי –

אחד האתגרים הגדולים בלימוד תהליכי היתוך ליישומים אזרחיים או צבאיים הוא מדידת פרמטרים פיזיקליים שונים כגון לחץ, טמפרטורה וצפיפות, וזאת כתחליף לניסוי גרעיני או תרמו-גרעיני. ידיעת מדויקת של פרמטרים אלו חשובה מבחינת ההבנה הפיזיקלית של תנאי התהליכים הגרעיניים והגברת יעילותם. טכניקות ניסיוניות כמו ICF או **כליאה מגנטית** הן מנוף לפיתוחים טכנולוגיים רבי משמעות, כפי שנראה בהמשך.

היבטים מבצעיים: הערכת אפקטיביות הנזק של נשק דור רביעי נזק כללי

על מנת לבצע הערכת נזק של נשק דור רביעי ננסה להעריך את מידת הצימוד של הנשק למטרה. הגדרת צימוד (coupling) של נשק למטרה היא מידת היעילות של העברת אנרגיית הפיצוץ למטרה. התוצר העיקרי של נשק דור רביעי המבוסס על היתוך הוא קרינה רבת עוצמה המכילה קרינת קרני X (20 אחוזים מסך הקרינה) וקרינת ניטרונים אנרגטיים (80 אחוזים מסך הקרינה). ידוע כי לניטרונים אנרגטיים יש יכולת חדירה גבוהה, ועל כן הם יחדרו לעומק המטרה תוך גרימת נזק פנימי רב, שנובע מחימום המטרה עקב חדירת הניטרונים דרכה. השילוב של יכולת החדירה של הניטרונים למטרה והיעדר החזרות של קרינה או גלי הלם מפני השטח של אותה מטרה גורמים לערך גבוה של צימוד נשק-מטרה. הערכת המומחים היא כי יעילות הצימוד של נשק דור רביעי היא בסביבות 50 אחוזים, לעומת חמישה עד עשרה אחוזים של נשק קונוונציונלי רגיל, תלוי כמובן בסוג המטרה ובמרחק הפיצוץ מהמטרה. להמחשת הנזק, פצצה קונוונציונלית בעוצמה של טונה אחת של TNT המתפוצצת במרחק מטר אחד מפלטת פלדה בעובי 10 ס"מ לא תגרום נזק משמעותי, ואילו פיצוץ של נשק דור רביעי באותם תנאים יגרום נזק (שריפה ויצירת חור במשטח הפלדה) בשטח של מ"ר אחד.

אפקט נוסף של נשק דור רביעי הוא היכולת של תוצרי קרינת התהליך להעביר אנרגיה למטרה על ידי ניצול התנע או הדחף של קרני X או ניטרונים אנרגטיים הפוגעים במטרות מסוימות (rocket effect). בעקבות הפגיעה והפיזור של חלק מקרני X והניטרונים נוצר גם סילון פלזמה אנרגטי שעשוי בתנאים מסוימים להאיץ מטרות או חלקי מטרות בכיוון הפוך לכיוון הפגיעה, והדבר עלול לגרום הרס ופגיעות משניות. לעיתים סילון זה מלווה **בקרינה אלקטרומגנטית** חזקה שעלולה לשבש התקנים אלקטרוניים קריטיים, כגון ערוצי תקשורת אלחוטית או פעילות GPS.

מבחינה צבאית. מעבר לכך צפוי להיפתח מרוץ חימוש בין מדינות מפותחות פחות החוששות לגורלן, והדבר יגרום להתמקדות בנשק גרעיני "קל יותר להשגה" מהדורות הקודמים.

אתגרים טכנולוגיים

על מנת לפתח דור רביעי של התקן המבוסס על היתוך של חומרי מוצא ייחודיים, בתהליך שדומה לתהליך תרמו-גרעיני כפי שמתרחש בשמש, יש לעמוד במספר אתגרים טכנולוגיים כבדי משקל. פרויקט של היתוך הוא פרויקט טכנולוגי מאתגר המצריך התמחויות מדעיות וטכנולוגיות רבות, וכן הכשרת כוח אדם מדעי וטכנולוגי והקמת תשתיות מדעיות נרחבות. פעילות מסוג זה עשויה לשדרג את הרמה המדעית-טכנולוגית של כל מי שעוסק בנושא מולטי-דיסציפלינרי זה, עם כל המשמעות הישירות או העקיפות שנובעות מכך.

הערכת המומחים היא כי יעילות הצימוד של נשק דור רביעי היא בסביבות 50 אחוזים, לעומת חמישה עד עשרה אחוזים של נשק קונוונציונלי רגיל, תלוי כמובן בסוג המטרה ובמרחק הפיצוץ מהמטרה.

האתגר העיקרי בהיתוך הוא לקבל צפיפות חומר וטמפרטורות גבוהות ביותר (מאות מיליוני מעלות) לשם ביצוע תהליך ההיתוך. בתנאים אלו חומרי המוצא הדרושים לתהליך נמצאים במצב צבירה מיוחד הנקרא **פלזמה**.

מבחינת זמן התהליך, יש צורך בזמן מיטבי כדי לאפשר לכמות מספקת של חומר לעבור את תהליך ההיתוך. במילים אחרות, יש צורך בכליאת הגזים שעוברים את תהליך ההיתוך למשך זמן מסוים, וזאת כדי לייצר את תנאי ההיתוך מבחינת הלחץ והטמפרטורה הנדרשים לתהליך.

תנאי כליאת הפלזמה: מכיוון שמדובר בגז בלחצים גבוהים ובטמפרטורות גבוהות, יש צורך בכליאת הפלזמה בהתקן מתוחכם שיעמוד בתנאים אלו. כיום נבדקות שתי שיטות בעלות פוטנציאל מימוש מבחינה מעבדתית (יפורטו בהמשך): כליאה מגנטית וכליאה אינרציאלית – **Inertial Confinement Fusion – ICF**.

אתגר משני כרוך בייצור איזוטופ המימן טריטיום (T), שכן תפוצתו של איזוטופ זה היא מזערית – 0.015 אחוזים – ולשם קבלתו בכמויות משמעותיות נדרשות טכנולוגיות מסוימות שעלותן גבוהה והן לא תמיד זמינות, ועצם השליטה בהן מהווה מכפיל כוח טכנולוגי.

היתוך המבוסס למשל על דאטריום וטריטיום, לעומת נזק ממשק המבוסס על תהליך גרעיני.

נזקים מכניים

כאמור, התוצר העיקרי של נשק דור רביעי הוא קרינה רבת עוצמה הנבלעת על ידי המטרה וגורמת בעיקר לחימום מקומי שלה. חימום זה, בניגוד לפצצת ביקוע, אינו יוצר גלי הלם, גלי פיצוץ וגלי חום. מכאן ניתן להעריך כי הנזקים התרמיים והמכניים הם נזקים מקומיים עם נזק סביבתי מצומצם. זאת ועוד, האנרגיה הקינטית הכוללת של סך תוצרי הפיצוץ אינה גבוהה, שכן מרבית האנרגיה הפוגעת הופכת לחום, ולכן סכנת הדף של תוצרי פיצוץ ורסיסים היא מצומצמת. מהאמור לעיל נובע כי היתרון הגדול של נשק דור רביעי הוא נזק ממוקד במטרה עם פגיעה סביבתית מצומצמת, וזה מאפשר לפגוע ולהשמיד בעילות מטרות עוינות, נשק ביולוגי ונשק המבוסס על טכנולוגיות מתקדמות כגון ננוטכנולוגיה, תקשורת ואלקטרוניקה.

לסיכום, לנשק דור רביעי יש כוח הרס רב יותר עקב היעילות הרבה של העברת אנרגיית הפיצוץ למטרה. ההרס והנזק שנשק זה גורם למטרה הוא ממוקד, עם נזקים סביבתיים מינימליים. מדובר בנזקים תרמיים ומכניים, ובמקרים מסוימים נזקים אלקטרומגנטיים לרכיבים אלקטרוניים ולמתקני תקשורת. מספר אלפיות הגרם של חומרי הגלם הנדרשים להיתוך יגרמו נזק רציני בפיצוץ מעל מטרה מסוימת כגון פלטת פלדה, לעומת נזק מזערי של פצצת טונה אחת של TNT באותם תנאים. בגלל פוטנציאל המזעור של התקן מסוג זה יש חשש להפעלתו כ"פצצה מלוכלכת", על כל המשמעות הכרוכות בכך, עם ההתקדמות הטכנולוגית בפיתוח ובייצור נשק דור רביעי.

מבחינה טכנולוגית ניתן לקבל היתוך מקומי לפרקי זמן קצרים ללא הצתה (המביאה לתהליך אנרגטי רב עוצמה), על ידי שימוש בשיטות שונות לדחיסת דאטריום וטריטיום. במקרה זה תהליך ההיתוך המלא אינו מתקיים והוא דועך עקב אי-יציבות של הפלזמה, אך עדיין נוצרים ניטרונים אנרגטיים לפרקי זמן קצרים, שיכולים לגרום נזקים מסוימים.

פיתוח שיטות מעבדתיות לייזום תהליכי היתוך

על מנת ללמוד פרמטרים חיוניים הנדרשים לתהליכים גרעיניים או תרמוגרעיניים יש צורך בביצוע ניסיונות במעבדה. הבעיה העיקרית בביצוע ניסיונות אלו היא תנאי העבודה הקיצוניים הנדרשים לביצוע היתוך. מדובר

ניתן ליישם שימוש כפול בניטרונים הנפלטים בתהליך התרמוגרעיני: מצד אחד, ניתן להשתמש בכוח הדחף של הניטרונים וקרני ה-X שנפלטים לאחר כדי להאיץ את טיל המטרה. מצד שני, קיימת אפשרות של שימוש בניטרונים האנרגטיים הרבים הנפלטים לשם חימום המטרה ופיצוצה, במקום חומר הנפץ הסטנדרטי הנמצא בראש הקרבי. נושא זה עדיין לא הגיע לבשלות מחקרית ובוודאי לא לבשלות טכנולוגית.

יש צורך בסימולציות נומריות וניסיוניות (כפי שיוסבר בהמשך) על מנת לבדוק את יעילות התהליכים ואפשרויות ההטמעה של תהליכים אלו ככלי נשק אפקטיבי.

נזק אלקטרומגנטי

חשוב לציין כי מטרת הדור הנוכחי של התחמושת בסכסוכים הנוכחיים והעתידיים, כמו למשל טילים מונחים (מונחי GPS או לייזר), היא הגדלת הפגיעה והרס המטרה, תוך צמצום נזקים סביבתיים מחוץ למטרה המותקפת. בגלל האופי הממוקד של נשק דור רביעי, הנזק האלקטרומגנטי שנגרם מהפעלתו מצומצם יחסית. גורמים נוספים לנזק האלקטרומגנטי המצומצם נובעים מעוצמת הפיצוץ הנמוכה יחסית, ממיקוד הפיצוץ במטרה ומאופי הקרינה הנפלטה. כל פיצוץ, כימי או גרעיני (ביקוע), מלווה ביצירת גלים אלקטרומגנטיים רבי עוצמה. אפקט ידוע של פיצוץ גרעיני הוא יצירת פולס אלקטרומגנטי רב עוצמה באטמוספירה – EMP. הוא גורם לשיבושים במערכות אלקטרוניות חיוניות, בעיקר כתוצאה מתגובה בין תוצרי קרינה גרעינית עם מרכיבי האטמוספירה, תוך יצירת הפרעות חשמליות שמשמעותן קריסת מערכות תקשורת וחשמל.

נזקי קרינה

נזקי קרינה נחלקים לנזקים מידיים ולנזקים מאוחרים. נזק ביולוגי מידי נגרם בשל חשיפה לקרינה עוצמתית עקב פיצוץ שנגרם מפגיעה ישירה, או פיצוץ במרחקים שונים בטווח של 100-300 מטרים. השפעת שטף הניטרונים הנפלטים היא כפולה: חימום הגוף לטמפרטורה גבוהה תוך גרימת מוות מידי ונזקי קרינה ביולוגיים עקב פגיעה באיברי גוף שונים. נזקים מאוחרים הם בעיקר נזקי קרינה הנגרמים עקב זיהום של תוצרים רדיואקטיביים, למשל שאריות של טריטיום, או תוצרים רדיואקטיביים שנוצרו מפגיעת שטף של ניטרונים רבי עוצמה. המחקר על אודות נזקי הקרינה אינו מבוסס דיו, אך ניתן להעריך מתוך זמן מחצית החיים הקצר יחסית של טריטיום לעומת אורניום, כי הנזק והמגבלות הסביבתיות הנובעות מהימצאות חומר רדיואקטיבי מצומצמים יחסית במקרה של נשק

כליאה מגנטית – בשיטה זו נוצרת מעין "דופן מגנטית" עקב הפעלת שדה מגנטי חיצוני רב עוצמה, ולאחריו דחיסת חומר הדלק הגרעיני לטמפרטורות ולחצים גבוהים, ובהמשך לתהליך היתוך מבוקר.

משמעויות

העיסוק בנושא של היתוך גרעיני מתעתע, שכן מדובר בנושא בעל משמעויות ביטחוניות ומדעיות. היבט זה של דו־משמעות הוא סוגיה שמלווה פיתוחים טכנולוגיים שונים, ויש בנמצא כלים מסוימים להתמודד עימה. למרות זאת טמונה במשמעות הכפולה סכנה רבה, שכן הפעילות בנושא ניתנת לפרשנות מקילה, שבחסותה מדינות סוררות יכולות לפתח יכולות הרס עוצמתיות.

היבטים ביטחוניים: למידת תהליכי היתוך ברמה מעבדתית מאפשרת להבין תהליכים גרעיניים ותרמו־גרעיניים, ללמוד ולמדוד במדויק פרמטרים ספציפיים הנדרשים למשוואות מצב המתארות את התהליך, ובכך מאפשרות לשפר את יעילות התהליך ואת יעילות הצימוד נשק־מטרה, וזאת מבלי לבצע ניסוי גרעיני גלוי. נוסף על כך, מחקר בתהליכי היתוך במסווה של מחקר מדעי מאפשר לייצר טריטיום, שהוא רכיב חיוני בפיתוח נשק תרמו־גרעיני, וזאת על ידי הקרנת מעטפת ליתיום בניטרונים הנפלטים בתהליך ההיתוך. זאת ועוד, מחקר של תהליכי ההיתוך מאפשר לבצע סימולציות של הנזקים של הקרינתיות של שטפי הניטרונים, של השפעתם הביולוגית ושל יכולות ההרס הממוקדות שלהם עקב חימום רגעי רב עוצמה של המטרה הנפגעת מחדירת ניטרונים אנרגטיים למטרה.

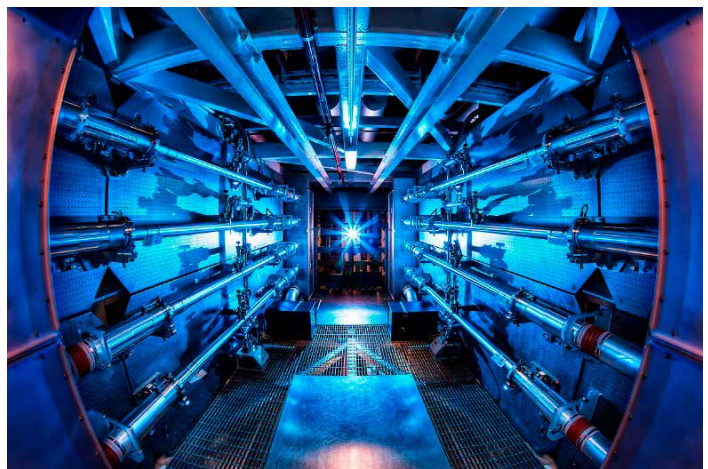
היבטים מדעיים וטכנולוגיים: מטרת־העל של הפרויקטים העיקריים בנושא היא ייצור חשמל נקי באמצעות פיתוח תחליפים לדלק שמקורו במאובנים, וזאת על מנת לצמצם זיהומים שנגרמים עקב שריפת דלק או פחם בתהליך ייצור חשמל. למחקר תהליכי היתוך יש חשיבות בלמידת התנהגות פלזמה בטמפרטורות של מיליוני מעלות, וכן בבניית מתקנים יעילים וזולים יחסית לשיפור יעילות תהליך ההיתוך, במטרה ליישם את הידע בבניה עתידית של **כור תרמו־גרעיני** לייצור חשמל ירוק.

פוטנציאל נגישות: המשמעויות הגאו־אסטרטגיות של מדינה סוררת בעלת נגישות לחומרי גלם לשם ביצוע תהליכים מורכבים של היתוך גרעיני (כולל תהליך בלתי יעיל ובעל תפוקת אנרגיה נמוכה) הן חמורות מבחינה מדינית ואסטרטגית. כיום המדינות העוסקות בחקר תהליכי היתוך הן מעצמות כלכליות כגון ארצות הברית, בריטניה, צרפת, גרמניה ויפן, ובמידה מסוימת גם רוסיה (בשיתוף פעולה עם מדינות האיחוד האירופי). מדובר ב"מועדון" יוקרתי המעיד על רמה מדעית, טכנולוגית

ובכליאת פלזמה בתנאים קיצוניים של טמפרטורות ולחצים גבוהים ביותר, בסדר גודל של עשרות או מאות מיליוני מעלות צלזיוס ולחצים של מיליוני אטמוספרות. יש גם צורך בכליאה לזמן ארוך מספיק כדי שתהליך ההיתוך יתבצע באופן יעיל. בפועל אין שום מכל שיכול להכיל חומר בתנאי קיצון אלו, ועל כן משתמשים בשיטות כליאה מתוחכמות.

כליאה אינרציאלית – עקרון השיטה הוא יצירת אנרגיה עקב היתוך, באמצעות חימום מהיר לטמפרטורות של עשרות מיליוני מעלות ודחיסה של הדלק הגרעיני ללחצים עצומים, כל זאת בעזרת לייזר רב עוצמה. המערכת הידועה בביצועיה המרשימים היא כאמור Laser Ignition Facility של NIF, הממוקמת במעבדות לורנס ליברמור, קליפורניה. תמונה מס' 1 מדגימה את אזור ריכוז הקרניים על המטרה במערכת שמפותחת ומופעלת ב־NIF.

תמונה 1: חלק ממערכת לייזר רב עוצמה של National Ignition Facility – NIF בקליפורניה.



מקור: <https://tinyurl.com/2atvrytc>

2. ניסיונות התפשטות נוסח איראן למשל, מתוך הנחה כי מדינות מסוימות ירצו לקבל חסות צבאית ואולי כלכלית של מדינה בעלת יכולות תרמוגרעיניות.
3. פעולות התגרות במדינות שכנות דוגמת קוריאה הצפונית, תוך ביטחון שההרתעה התרמוגרעינית מעניקה לה חסינות.
4. פיתוח נשק דור רביעי, על כל המשמעויות הנגזרות מכך.
5. זליגה לשחקנים לא-מדינתיים: למרות שלגורם לא-מדינתי אין את היכולות המדעיות והטכנולוגיות לפיתוח נשק כזה, קיימת אפשרות להעברת ידע, יכולות או התקן שלם מסוג זה לשחקנים לא-מדינתיים על ידי מדינת סוררות. לארגוני טרור ולארגונים לא-מדינתיים יש מוטיבציה לפיגועים מסוג זה. מוטיבציה זו בשילוב יכולות עלולה להוות תמריץ בעל השלכות הרסניות.
6. מרוץ חימוש: מעבר לכך, הפוטנציאל ההרסני של נשק זה עלול לגרום למרוץ חימוש גלובלי ובלתי מבוקר בין מדינות שחשות מאוימות, למטרות הגנה ותוך שיבוש הסדר העולמי. הסיבה לכך היא שהידע והיכולות הטכנולוגיות בשילוב היעדר חסמים מוסריים, פוליטיים או משפטיים עלולים להוות תמריץ לפיתוח מערכות נשק הרסניות בסתר או במסווה של פעילות לגיטימית, כשלמעשה מדובר בפעילות דואלית. משמעות הדבר היא כי במסווה של פיתוח מדעי טהור או פיתוחים יישומיים לצרכים שונים כגון כלכלה, אנרגיה ירוקה או שימור איכות הסביבה, ניתן לפתח נשק הרסני על בסיס טכנולוגיה אזרחית כביכול.

התמודדותה של ישראל עם האיום - משמעויות והמלצות

הופעת נשק דור רביעי באזורנו מציבה בפני מדינת ישראל דילמות. ההתמודדות של מדינת ישראל עם איום נשק דור רביעי צריכה להיות בשני מישורים, וזאת לאחר שגורמים מוסמכים יגדירו את האיום כמשימה לאומית שיש להתמודד עימה ברמת עדיפות גבוהה. ראשית, יש צורך בהגדרת מטרות ויעדים לביצוע מאמץ מודיעיני ומחקרי לשם מעקב אחר פעילות גלויה וסמויה בתחום, כולל קביעת יעדים חשודים וניטור פעילות מדעית או טכנולוגית לרבות פעילות הכרוכה ברכש של ציוד מיוחד.

במישור הסיכולי-התקפי: נדרשת פעילות לפגיעה, לסיכול ולהשמדה של מתקני הייצור וההרכבה, מרכזי מחקר ופיתוח, כולל פגיעה במוקדי ידע, בתשתיות ובמעבדות לאומיות המשמשות לחקר תהליכים רלוונטיים. כמו כן נדרשת פעילות יזומה והפעלת

וכלכלית גבוהה ביותר. הדבר נובע הן מהעלויות העצומות הכרוכות בבניית מתקן היתוך גרעיני בשיטת הכליאה האינרציאלית (3.5 מיליארד דולר בתקופה 2013-2023) או בשיטת הכליאה המגנטית (22 מיליארד אירו), והן מהעובדה שמדובר בנושא טכנולוגי רב-תחומי המצריך ידע ותשתיות מדעיות וטכנולוגיות ברמה הגבוהה ביותר. ידע זה ניתן לניתוב למסלולים אחרים, כגון פיתוח מערכות נשק מתקדמות לרבות מערכות גרעיניות ותרמו-גרעיניות, וכל זאת במסווה של פיתוח מקורות אנרגיה ירוקים או מחקר מדעי טהור כמו מחקר על תהליכים של תגובות תרמוגרעיניות מבוקרות. הפעילות בנושא זה אינה מעוררת חשד ואף קשה למעקב, שכן היא נעשית על ידי שימוש בחומרים בלתי בקיעים וכן בחומרים או בתהליכים אטומיים או גרעיניים שאינם אסורים על פי האמנה למניעת ניסויים גרעיניים (CTBT).

טכנולוגיית ההיתוך הגרעיני עוברת תהליך דומה לזה שעברה טכנולוגיית הגרעין. בתחילה היא הייתה נחלתן של מעצמות עתירות ידע ומשאבים, אך במשך עשורים אחדים היא זלגה גם למדינות שגילו נחישות וידע בהשגת טכנולוגיית הגרעין ויישומיה. המעבר מן התאוריה לביצוע מעשי ובר-השגה היה מהיר יחסית. דבר דומה מתרחש בתחום טכנולוגיית ההיתוך הגרעיני, אשר עוברת מידי גופים ממשלתיים עתירי ידע וממון לידי לגופים אזרחיים. כך למשל, משרד האנרגיה האמריקאי (DOE) הקציב לאחרונה 46 מיליון דולר לשמונה חברות פרטיות העוסקות בנושא. גם הממשל הגרמני תומך בגופים פרטיים העוסקים בנושא בסכומים ניכרים, והדבר בא לידי ביטוי **במצעור המערכות תוך שיפור משמעויות בביצועים וביעילות**. המגמה של העברת הפיתוח לגופים אזרחיים בולטת בשנים האחרונות, והדבר גורם להרחבת הנגישות הטכנולוגית לכל מיני גורמים, על כל הסיכונים הכרוכים בכך.

הקשרים הענפים בין מעצמות כמו רוסיה או סין לבין מדינות סוררות כמו קוריאה הצפונית או איראן מחייבים תשומת לב ומעקב רציף אחר זליגת טכנולוגיות מסוג זה אליהן. העובדה כי מדינות מסוימות (לרבות מדינות אויב במעגל הקרוב או הרחוק) מחזיקות בידע שקשור לטכנולוגיות של היתוך גרעיני ליישומים אזרחיים מניחה אפשרות סבירה שהדבר מאפשר להן שליטה פוטנציאלית גם ביישומים צבאיים, מה שיוצר סוג של "הרתעה טכנית" מתוך אי-הוודאות לאן ידע זה יוביל. אומנם מדינה סוררת שמקרינה הרתעה טכנית אינה מדינת סף גרעין במובן המקובל, אך היא יכולה להיחשב "מדינת גרעין וירטואלית", ויש לכך השלכות מדיניות כמו: 1. שימוש בטרור כלפי מדינות שונות, מתוך ידיעה כי לא תהיה תגובה עקב הרתעה טכנית.

עיקר הנזק נגרם מקרינת ניטרונים רבת עוצמה, הגורמת לחימום מקומי ולנזקים תרמיים ומכניים. למרות האמור לעיל, חשוב להדגיש כי בהפעלת נשק המבוסס על היתוך, הנזק והמגבלות הסביבתיות הנובעות מהימצאות חומר רדיואקטיבי ומנזקי הקרינה לבלתי מעורבים הם מינימליים לעומת נזקי פצצת ביקוע.

נשק דור רביעי הפוגע במטרה יוצר בתנאים מסוימים קרינה אלקטרומגנטית חזקה, שעלולה לשבש התקנים אלקטרוניים חיוניים כגון ערוצי תקשורת אלחוטית או פעילות GPS. לפיכך, ההמלצה המתחייבת עבור ישראל להתמודדות עם איום של נשק דור רביעי צריכה להיות בשני מישורים: במישור הסיכולי-התקפי: פגיעה והשמדה של מתקני הייצור וההרכבה; במישור ההגנתי: פיתוח אמצעי יירוט משוכללים לפגיעה בפלטפורמות הנושאות ראשי קרב כלשהם (קונוונציונליים, גרעיניים או של נשק דור רביעי), וכמובן פעילות "הסברתית" לשם הרתעת האויב ממימוש האיום הגלום בנשק דור רביעי.

ד"ר יהושע קליסקי הוא חוקר בכיר במכון למחקרי ביטחון לאומי. כיום הוא יועץ במערכת הביטחון ומנהל טכנולוגי של מאגד VCSEL לפיתוח לייזרי סיב מהירים ורבי עוצמה. לפני כן היה חוקר ALTIA לפיתוח לייזרי סיב מהירים ורבי עוצמה. לפני כן היה חוקר בכיר במערכת הביטחון. ד"ר קליסקי הוא בעל תואר דוקטור מהמחלקה לכימיה פיסיקלית באוניברסיטה העברית בירושלים, ופוסט-דוקטורט ממרכז המחקר של חברת Xerox ברוצ'סטר, ניו יורק. yehoshuak@inss.org.il

מילון מונחים

איזוטופים – אטומים בעלי אותו מספר של פרוטונים, אך מספר שונה של ניטרונים.
אנטי-חומר – חלקיקים בעלי מטען חשמלי הפוך למטען החלקיק הידוע. חיבור של חלקיק עם אנטי-חלקיק יוצר אנרגיה רבה.
אנרגיה – יכולת לבצע עבודה מסוימת.
ביקוע – תהליך ביקוע גרעין של אטום כבד לגרעיני אטומים קלים יותר, תוך שחרור הפרש האנרגיה האגורה באטום הכבד.
דאוטריום – איזוטופ של מימן, מכיל פרוטון אחד וניטרון אחד.
היתוך – מיזוג של שני גרעיני אטומים לגרעין של אטום חדש בעל מסה קטנה מסכום המסות של שני הגרעינים, הפרש המסות הופך לאנרגיה.
הספק – יכולת לבצע עבודה מסוימת ביחידת זמן.
טרטיום – איזוטופ נוסף של מימן, מכיל פרוטון אחד ושני ניטרונים.
כליאה אינרציאלית – כליאת חומר דלק המשמש להיתוך במצב מוצק בקפסולה, והקרנתה באופן סימטרי בלייזרים רבי עוצמה.
כליאה מגנטית – כליאת חומר ההיתוך בתוך שדה מגנטי חזק.
לייזר – התקן אלקטרו-אופטי המבוסס על הגברת אור באמצעות פליטה מאולצת של קרינה.
פלזמה – מצב צבירה רביעי המכיל גז מיון ואלקטרונים חופשיים.

מנגנוני מעקב שנדרשים להתמודד עם השימוש הכפול (dual use). הדבר מחייב יישום מנגנוני מעקב אחר התפתחויות טכנולוגיות, כגון מעקב אחר פעילויות מדעיות במכוני מחקר ובאקדמיה, מעקב אחר מדענים מובילים או מוקדי ידע, מעקב צמוד אחר שרשרת רכש ושיתופי פעולה מדעיים.

נשק דור רביעי הפוגע במטרה יוצר בתנאים מסוימים קרינה אלקטרומגנטית חזקה, שעלולה לשבש התקנים אלקטרוניים חיוניים כגון ערוצי תקשורת אלחוטית או פעילות GPS.

במישור ההגנתי: נדרשת פעילות אינטנסיבית לשם

פיתוח אמצעי יירוט משוכללים לפגיעה בפלטפורמות הנושאות ראשי קרב של נשק מדור רביעי, כפי שהוגדר במאמר זה, כולל יישום מערכות הגנה מתוחכמות לנטרול פלטפורמות נושאות נשק דור רביעי הרחק משטח מדינת ישראל.

במישור ההרתעתי: מומלץ להתחיל בפעילות

"הסברתית", לשם הרתעת האויב מביצוע פעולות הכרוכות בשימוש בנשק דור רביעי. פעילות זו תכלול בין היתר פרסומים והדגמות של מערכות שונות, הגנתיות או התקפיות, לשם המחשת יכולות והרתעה.

במישור המדיני: מכיוון שהפעילות בנושא זה היא

בעלת אופי של שימוש כפול, היא אינה מעוררת חשד וקשה למעקב ולהפלה, שכן היא נעשית על ידי שימוש בחומרים בלתי בקיעים ובחומרים או בתהליכים אטומיים או גרעיניים שאינם אסורים על פי האמנה למניעת ניסויים גרעיניים (CTBT). יש צורך לקבוע את השימוש והיישום של חומרי הגלם המשמשים לתהליכים אלו באמנות בינלאומיות בדבר איסור שימוש.

סיכום

במאמר זה הוצגו המאפיינים של נשק חדש מדור רביעי, שהוא בעל יכולות הרס רבות עם יעילות צימוד נשק-מטרה, קרי יעילות העברה של אנרגיית הפיצוץ למטרה בשיעור של כ-50 אחוזים, לעומת יעילות צימוד של נשק קונוונציונלי באותו סדר גודל, שהוא בשיעור של חמישה עד עשרה אחוזים בלבד.

מדובר בנשק בעל יתרון ייחודי על פני נשק קונוונציונלי המופעל בתנאים דומים: לנשק המופעל על פי עקרונות של נשק דור רביעי יש יכולות פגיעה ממוקדת עם נזק סביבתי מינימלי ואפשרות לפגיעה במטרות איכות, כגון מאגרי נשק כימי וביולוגי, מרכזי שליטה ובקרה, מתקני תקשורת ואלקטרוניקה וכוח אדם לוחם או תומך לחימה. הדבר נובע מאופי התהליך, שבו

לקריאה נוספת ולהרחבה

דותן, פ' (1992). **אל הכוכבים – מאטומים עד חורים שחורים**. הוצאת ספרים ע"ש י"ל מאגנס.

הלידי, ד', רזניק, ר' ווקר, ג' (2012). **מבינים פיזיקה מודרנית** [תרגום: ש' גלעם]. הוצאת ספרים ע"ש י"ל מאגנס.

Emilio Segre, E. (1980). *From X-rays to quarks: Modern physicists and their discoveries*. W.H. Freeman and Company.

Shmatov, M.L. (2005). The typical number of antiprotons necessary to heat the hot spot in D-T fuel doped with U. *Journal of British. Interplanetary. Society*, 58, 74-81.
<https://tinyurl.com/2chr8ecx>