

פיתוח טכנולוגיות דלק אוויר ברפא"ל ובעולם

דן חן וראובן אשל

כתבה 34 בסדרת כתבות על תולדות רפא"ל בעריכת ד"ר ראובן אשל

האמנם דלק המיועד לבערה יכול להתפוצץ?

בשנות הששים נסעה מכלית דלק ברחובה של עיר בספרד, תוך כדי שהיא משאירה מאחוריה שובל של דלק שדלף ממנה. בשלב מסוים אחד מעוברי האורח זרק בדל סיגריה שהציתה את אדי הדלק וגרמה לפיצוץ עז שהסב נזק ניכר לבתים משני צדי הרחוב, כולל ריסוק כל השמשות בבתים. הדבר בא בהפתעה רבה שכן עד אז חשבו שלכל היותר תיווצר שרפה, אבל לא פיצוץ! התאונה נחקרה מיד משני היבטים: בטיחותית, כיצד למנוע אסונות כאלה בעתיד, וביטחונית, מהם התנאים שבהם ניתן לייצר אפקט פיצוץ כזה כאמצעי לחימה?

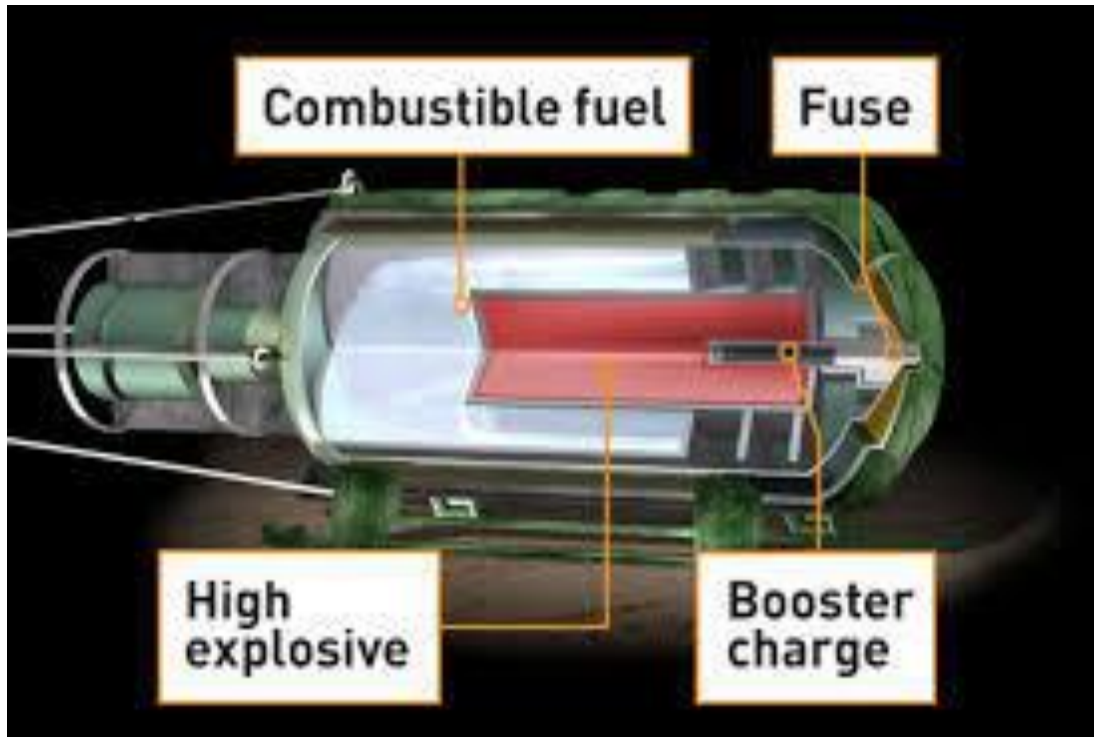
תוצאות המחקר הביטחוני בארה"ב ויישומו¹

הייחוד של פיצוץ דלק-אוויר (Fuel Air Explosives or FAE) הוא בכך שהפצצה משתמשת ליצירת הפיצוץ בחמצן שבאוויר הסביבה (שמכיל כ 21% ממנו) ולא לוקחת אותו עמה. זאת בשונה מפיצוץ חומרי נפץ קונבנציונאליים שכוללים בתוכם את החמצן הדרוש לניפוץ (לדוגמה: אבקת שריפה כוללת רק 25% ממשקלה את הדלק הנפיץ ו 75% ממשקלה את החומר המחמצן, בעוד שפצצה המבוססת על טכנולוגיית ניפוץ דלק-אוויר כוללת, באותו משקל פצצה, קרוב ל 100% דלק). לכן האנרגיה המשוחררת ממנה עולה כמעט בסדר גודל על זו של חומר נפץ (חנ"ם) לאותו משקל של פצצה.

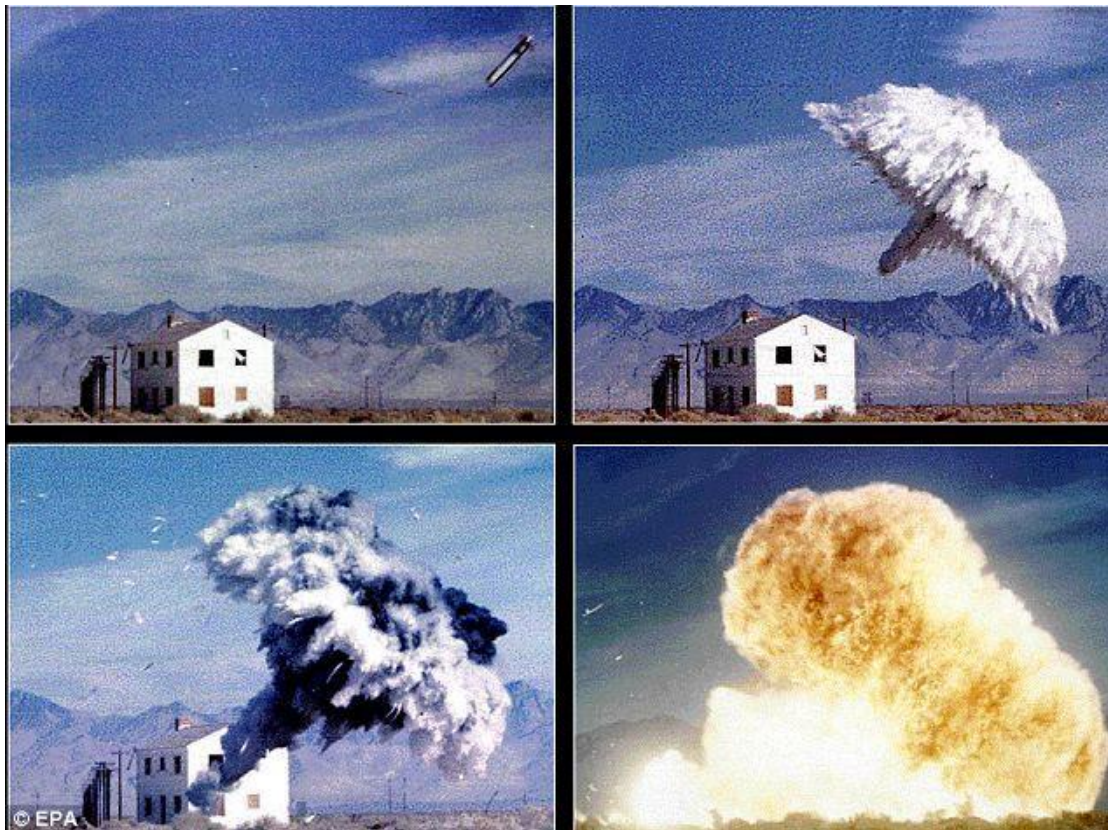
הסתבר במחקר שהאפקט המתלווה לניפוץ דלק-אוויר הוא התפשטות לחץ וזאת בניגוד ללחץ ורסיסים המאפיינים פצצות חנ"ם. הסתבר עוד שהלחץ המיוצר על ידי ניפוץ דלק-אוויר נמוך משמעותית מזה של חנ"ם, אולם משכו ארוך בהרבה, דבר המאפשר לו לחדור לבונקרים ותעלות במרחקים הגדולים מאלו של לחץ מפיצוץ חנ"ם, ולכן מסוגל להתמודד ביעילות רבה יותר עם מנגנונים המופעלים בלחץ מתמשך ולא גבוה כגון חלק ממנגנוני ההפעלה של מוקשים.

המימוש של התערובת הנפיצה עם החמצן באוויר איננו פשוט. נדרש לפזר את הדלק בצורת טיפות בגודל מסוים כך שיתערבבו עם אוויר הסביבה ויצרו מעין ענן בצורת "פיתה" עצומה. התהליך צריך להיות מהיר מאד (כ 0.1 שניות), כדי שלא יהיה רגיש לתנאי הסביבה (רוחות וכדומה) ולתנאי ההגעה של הפצצה למטרה. כמו כן, הוא אמור להתבצע בגובה מוגדר מעל פני הקרקע שיבטיח יצירת ענן תערובת מלא בקרבה למטרה. תהליך הפיזור המהיר מתבצע באמצעות מטען חנ"ם קטן (מאית ממשקל הדלק אותו הוא מיועד לפזר) שנמצא לאורך מרכז מיכל הדלק - ראה איור 1. שמירה על הזמן והממדים של התערובת עם האוויר חיונית ליצירת תערובת בתחום הנפיץ שלה. חריגה מפרמטרים אלה תגרום לתופעת שרפה מהירה (דפלגרציה) במקום ניפוץ (דטונציה) וזה לא האפקט הנדרש מתהליך זה. בניסויי הפיתוח הדגימו האמריקאים כושר להרס בתים – ראה איור 2. באופן מבצעי הם השתמשו לראשונה בפצצות דלק-אוויר בשלהי שנות הששים במלחמת וייטנאם, כדי להשיר עלים בג'ונגלים בהם הסתתרו חיילי הוויאטקונג וכן כדי לנטרל שטחי נחיתה עבור מסוקים ממיקוש ולוחמי אויב. המערכות האמריקאיות התבססו על טכנולוגיית דלק אוויר דור ראשון (FAE I) של פצצות המוטלות מהאוויר מתוך מצררי CBU-55/B. כל מצרר הכיל 3 פצצות דלק-אוויר BLU-73/B שכל אחת מהן הכילה כ 30 ק"ג דלק. הביטוי העיקרי של היותן מבוססות על דור ראשון של דלק-אוויר הייתה שחובה היה להאט את מהירות כל אחת מהפצצות, לפני התקרבותן לקרקע, באמצעות מצנח, למהירות נמוכה שתבטיח יצירת ענן דלק-אוויר בגובה ובתצורה הנכונה בקרבת המטרה. בהמשך פיתחו האמריקאים מודלים מוגדלים ומשוכללים יותר שבהן 900 ק"ג דלק ואף 5000 ק"ג ובשנות התשעים והאלפיים השתמשו בהם כדי לפגוע בחיילי אל-קאידה והטאליבן שהסתתרו במערות באפגניסטאן. הרוסים התרשמו מאד מהמטען הגדול וכינו אותו 'פצצת האטום הקטנה'. יש להניח שגם הם השתלטו על הטכנולוגיה.

¹ ויקיפדיה – עיין ערך Thermobaric_weapon



איור 1 - מבנה אופייני של פצצת דלק-אוויר (מתוך פרסומים ברשת האינטרנט)



איור 2 - תהליך פיזור וניפוץ דלק-אוויר (מתוך פרסומים ברשת האינטרנט)

ההשתלטות על הטכנולוגיה ברפא"ל:

בתחילת 1974, לאחר מלחמת יום כיפור, הוחלט ברפא"ל לפתח גם אצלנו את טכנולוגיית דלק-אוויר. באותה תקופה כבר היה ידוע על מערכות אמריקאיות בהן נעשה שימוש רחב במלחמת וייטנאם. הוחלט שרפא"ל תבנה בשלב זה יכולת דלק אוויר דור ראשון. לצורך כך, הוקמה קבוצת עבודה בשטח מערכות נפיצות. גופים נוספים שסייעו לפיתוח הטכנולוגי היו מחלקת האלקטרוניקה של חטיבת אווירומכניקה, שטח חומרים ותהליכים (שמחו"ת) ושטח טכנולוגיות מתכת (שט"ם).

לפרויקט הטכנולוגי שהוקם, בתמיכת מטה המו"פ של משרד הביטחון (לימים חלק ממפא"ת), ניתן הכינוי "שועלי שמשון". קבוצת הפיתוח בראשות דן חן כללה מהנדסים, טכנאים, עובדי יצור ואנשי ניסויים. הפעילות כללה לימוד תכונות חומרי הדלק, תוך דגש על תחומי הנפיצות שלהם ובטיחות השימוש בהם. הנושא העיקרי והקשה ביותר עמו התמודדו אנשי הפיתוח היה פיתוח שיטת פיזור הדלק לתערובת נפיצה. היה צורך בתכן ייחודי של מיכל, עם החלשות מדויקות במעטפת החיצונית שלו, שתהליך פירוקו ופיזור הדלק שבתוכו יהיה מבוקר ולא אקראי. מצד שני חובה היה לשמור על כללים קשיחים כך שמיכל זה יהיה בטיחותי, כל עוד לא מבוצע עמו תהליך הפיזור.

תהליך הפיזור עצמו בוצע באמצעות מטען חנ"ם קטן (שכינויו "פורצן") שריסק את מעטפת המיכל, פירק את הדלק לטיפות בגודל מבוקר והקנה להן מהירות התחלתית גבוהה שמבטיחה את התזמון והממדים הדרושים.

הקושי הגדול היה מניעת הדלקת הדלק תוך כדי תהליך הפיזור וזאת כאשר מעורב כאן תהליך של פיזור בטמפרטורה ראשונית של פיצוץ חנ"ם (מעל אלף מעלות). מניעת ההדלקה המוקדמת התבססה על העיקרון שלצורך הדלקה נדרשים להתקיים, בו-זמנית, שלושה תנאים: דלק, חמצן וטמפרטורת סף. מניעת אחד מהתנאים בכל מקטע של התהליך היה האתגר הגדול של ההתמודדות עם תהליך זה. בשניית פיצוץ הפורצן מתקיימים תנאי טמפרטורת סף ודלק, אך חסר עדיין החמצן. בהמשך, מתקיימים החמצן והדלק, אך הטמפרטורה פוחתת במהירות. התזמון הנכון הוא הבעיה שהקבוצה התמודדה עמו במשך מספר שנות עבודה ומאות רבות של ניסויי שדה. כדי להקל על ביצוע הניסויים, הוקם על חוף הים של מכון דוד שדה ניסויים, על כל הנדרש בו. כל ניסוי לווה בצילום מהיר של 1000 מסגרות לשנייה (שהייתה שיא הטכנולוגיה באותה תקופה), אותו ביצע צלם הניסויים פוגל ז"ל משטח הנעה רקטית. מר פוגל היה דמות "צבעונית" (לטענתו, כאשר ועד המחקר שובת, היה נחסף נזק שעובדיו גורמים לרפא"ל), אך תרומתו הייתה אדירה כי בלעדיו לא היה ניתן לפענח את הניסויים שכאמור תזמונם הרלבנטי היה צריך להתרחש תוך כעשירית שניה בלבד.

במקביל, פותחו מנגנונים ומרעומים שאפשרו את ביצוע תהליך הפיזור והניפוץ במיקום ובתזמון הנכון. בשלב ראשון בוצעו ניסויים סטטיים בהם היו שמים את המטענים ליזום הניפוץ מראש במיקום הנכון ומתזמנים את פיצוץם באמצעות שעון זמן (טיימר). בהמשך, היה צורך "לירות" מרעומי ניפוץ מראש הקרב אל תוך ענן התערובת כך שיפעלו בזמן ובמיקום הנכונים.

השלב הבא של ההשתלטות על הטכנולוגיה הייתה הבנת האפקט של סוג פיצוץ זה על מטרות שונות. חלק מההבנה נבע מהספרות הגלויה, אך הרוב התבסס על ניסויים. קבוצת הפיתוח עברה, פחות או יותר, את כל האתרים האפשריים בארץ, בצעה עשרות רבות של ניסויים סטטיים על מטרות שונות, עם מטענים במשקלים שונים, כאשר את האפקט מדדו באמצעות מדידי לחץ פשוטים שכוננו Bikini Gages אשר כוילו קודם לכן מולי מדידי לחץ-זמן תקינים. על הקמת מוקד ידע 'דלק-אוויר' זכה דן חן בפרס ברגמן² לשנת 1987.

² הפרס על שם פרופסור דוד-ארנסט ברגמן, המדען הראשי הראשון של משרד הביטחון ושל רפא"ל שעל שמו נקרא גם מכון דוד, הונהג לזכרו ע"י אלמנתו - חנה ברגמן וחולק מדי שנה למדען צעיר באחד ממוסדות המחקר הביטחוני בישראל, וזאת משנת 1976 ועד למותה היא בסוף שנות השמונים של המאה הקודמת.

מעבר לפיתוח פצצה אווירית המבוססת על טכנולוגיית דלק-אוויר:

בשלבם המתקדמים של הפיתוח הטכנולוגי, לקראת סוף שנות ה-70, החלה התעניינות של חיל האוויר במימוש פרויקט עבורם המבוסס על טכנולוגיית פיצוץ זו. הכוונה הייתה לממש פצצה במידות התואמות פצצה תקנית של 250 ק"ג, המכילה מטען של 100 ק"ג דלק.

בפיתוח יושמה טכנולוגיית הדור הראשון שפותחה במסגרת "שועלי שמשון". הפצצה הוטלה ממטוס קרב כפצצה אחודה רגילה ורק לקראת סוף מסלולה הופעלו פתילי חיתוך פירוטכניים (טכנולוגיה שפותחה על ידי ארווין רייטר ז"ל) שבצעו חיתוך של זנב הפצצה ואפשרו למצנח להיפרס ולשלוף החוצה את מיכל הדלק. המיכל המוצנח הואט ומסלולו שונה למצב בו בגובה הרצוי להפעלה הוא יהיה ככל האפשר קרוב למצב אנכי ביחס לקרקע. במהלך השלב המוצנח נשלף מקדמת המיכל כבל שכונה "חתן חוט" שבקצהו חיישן מגע חשמלי. הכבל והחיישן השתלשלו קדימה ושמרו על מתיחות הכבל כתוצאה מהאטת המצנח. עם נגיעת החיישן בקרקע הפעיל המרעום הראשי (שהיה מחובר לצד האחורי של המיכל, הרחוק מהקרקע) את הפורצן ובו זמנית שיגר מרעומי ניפוץ במסלול שיביא אותם בתזמון הנכון לאזור הנפיץ. עם הפעלתם הם יזמו את הדטונציה של דלק האוויר.

הפיתוח נמשך כמה שנים והגיע לשלבים מתקדמים ביותר. לצער כולנו, הוחלט בסופו של דבר לא להצטייד באמצעי לחימה זה משיקולים של דיוק פגיעה ועלות-יעילות.

הסבת הפיתוח לצורך פינוי מוקשים ע"י חילות היבשה³

מי שהסתכל מהצד על הפיתוח והטכנולוגיה קסמה לו, היו חילות היבשה. מטרתם הייתה לממש על בסיסו מערכת מתקדמת לפינוי יעיל של מעברים לכוחות שריון בשדות מוקשים. בתחילת שנות ה-80 בוצעו ניסויים רבים על שדות עם מרבית סוגי המוקשים שהיו ידועים בזירה ונצבר מידע מדויק על היעילות של נטרול המוקשים. עבודות חקר ביצועים הראו שניתן ליצור מעברים בטוחים לטנקים ורכב קרבי משוריין (רק"ם) ברוחב העולה על כל פתרון שהיה קיים עד מועד זה.

לאחר התלבטויות רבות של מפקדת חילות השדה (מפח"ש) הותנע הפרויקט שכונה "ריצוף". הפרויקט כלל משגר שהותאם לחיבור לצד האחורי של טנקי מערכה מתוך כוונה שהם יהיו חלק מהכוח הלוחם שגם צריך לעבור במעברים שנוטרלו ממוקשים. לא נשכחה גם העובדה שלאפקט הפיצוץ הזה יש יתרונות בנטרול איומים המסתתרים בשוחות באזורים אלה.

המשגר הותאם לאפשרות שיגור אוטומטי של עשרות רקטות עם ראשי קרב דלק אוויר במשקל 20 ק"ג כל אחד – ראה איור 3. כל ראש קרב כלל את כל יכולות הדלק אוויר שתוארו לעיל במגבלות משקל החומר. המשגר אפשר שיגור אוטומטי של כל הרקטות בזוויות שיגור משתנות ובצורה זו "תפר" את שדה המוקשים לכל עומקו ויצר בו את הפרצה הדרושה. השיגור לטווח הנדרש בוצע באמצעות רקטות שפותחו במיוחד לכך בשטח הנעה רקטית. המהירות הנמוכה של מעוף הרקטות נבחרה כך שהשימוש במצנחים התייתר.

פרויקט 'ריצוף' סיים את הפיתוח בהצלחה, כולל ניסויי אישור תיכון ותהליכי העברה ליצור מסודרים. בין השאר בוצע ב'שדה ניסויים' "שדמה" ניסוי מסכם חי על שדה מוקשים מול צמרת המטכ"ל שהסתיים בהצלחה של 100%. על הצלחת ניסוי ההדגמה לצמרת צה"ל זכה הצוות בפרס רפא"ל על ביצוע משימה למופת לשנת תשמ"ו - ראה איור 4. שמות הזוכים מפורטים באיור. ראוי להזכיר אירוע במסגרת ניסוי ההכנה האחרון לניסוי ההדגמה למטכ"ל: ניסוי ההכנה בוצע בשדה הניסויים הדרום-מערבי של מכון דוד על שפת הים. במהלכו נורו מספר רקטות עם ראשי קרב חיים. רעשי פיצוץם בהפרשים של שניות בודדות זו מזו גרמה לבהלה אדירה בקריית ים מאחר והתושבים חשבו שמדובר בירי קטיושות עליהם ורצו למקלטים. אמנם רפא"ל ננזפה על אירוע זה, אך הלקחים הופקו למניעת תקרית דומה בעתיד.

³ https://www.mineactionstandards.org/.../TN_09.30_04_2001_FAE_V.10_A...

בסופו של דבר, צה"ל החליט לצייד ברקטות 'ריצוף' רק"מים שהיו בשימוש חיל ההנדסה. הוזמנו ויוצרו מערכות והפרויקט הפך למבצעי בצה"ל בתחילת שנות ה-90. במהלך מלחמת לבנון השנייה (2006) פורסם בעיתונות ובטלוויזיה הישראלית שנעשה שימוש מוצלח באמצעי זה בדרום לבנון. מוצר זה הינו מבצעי גם בימים אלה ואף נמכר למדינה זרה. דגם אינרטי של המוצר והמשגר ניתן לראות במוזיאון רפא"ל.

לסיכום: פיתוח טכנולוגיית דלק האוויר ברפא"ל היווה תהליך מוצלח בו הנושא נלמד מאפס ובסופו של דבר הביא למימוש מוצר מבצעי בצה"ל, שעבר טבילת אש ראשונה במלחמת לבנון השנייה וגם זכה לעסקת יצוא.



איור 3 - משגר 'ריצוף' בטעינה



איור 4 – פרס על ביצוע משימה למופת לצוות הניסוי המסכם של הפרויקט