

# הדרך אל הנשק הגרעיני



טיל גרעיני של צבא פקיסטן | תהליך ההעשרה של אורניום - הגדלת הריכוז של ה-U235 - הוא התהליך המורכב ביותר בתחום של פיתוח נשק גרעיני



עזריאל לורכר  
מהנדס תעופה וחלל. מרצה לטכנולוגיה צבאית



# בפני מדינות העולם השלישי פתוחות שתי אופציות לפיתוח נשק גרעיני: מאורניים מועשר ומפלוטוניום. נתיב הפלוטוניום הוא מסוכן יותר למערב, שכן את הפלוטוניום קל יותר להפיק מאשר את האורניים המועשר, וגם קל יותר להסתירו

## הקדמה עם מעט פיזיקה בסיסית

כדי להבין את כל הנאמר בנוגע לפיתוח של נשק גרעיני צריך להקדים כמה מילים על הבסיס הכימי והפיזיקלי של הנושא: הבנת הפרטים האלה תבהיר לנו מהן האופציות הפתוחות בפני מי שרוצים לפתח נשק גרעיני.

כל יסוד בטבע מורכב מגרעין וממעטפת אלקטרונים שחגה סביבו. הגרעין מורכב מפרוטונים (בעלי מטען חשמלי חיובי) ומכמה נויטרונים חסרי מטען. מספר הפרוטונים זהה למספר האלקטרונים, והמספר הזה קובע מהו היסוד: לחמצן, למשל, יש שמונה אלקטרונים ושמונה פרוטונים; לברזל יש 26 אלקטרונים ו-26 פרוטונים, ובגרעין האורניום יש 92 פרוטונים, וסביבו חגים 92 אלקטרונים. זהו המספר האטומי.

כאמור, לכל היסודות יש גם מספר מסוים של נויטרונים. (מימן "רגיל" הוא היסוד היחיד שאינו מכיל נויטרונים. מימן "כבד" מסוג דאוטריום מכיל נויטרון אחד; מימן "כבד" מסוג טריטיום - מכיל שני נויטרונים.

כמו המימן - גם יסודות כימיים אחרים עשויים להכיל מספר שונה של נויטרונים. היסודות האלה בעלי המספרים השונים של הנויטרונים נקראים איזוטופים של היסוד. מספרם הכולל של הפרוטונים ושל הנויטרונים הוא משקלו האטומי של היסוד. יש לציין שתכונותיו הכימיות של היסוד נקבעות אך ורק לפי מספרו האטומי, ואילו משקלו האטומי קובע אחדות מתכונותיו הפיזיקליות.

## הספרות העוסקת ב"התגרענות" של מדינות העולם השלישי כמעט שאינה מזכירה את העובדה שביכולתן להשיג חומרים בקיעים במסלול הפלוטוניום



אורניום טבעי מורכב משלושה איזוטופים בעלי המשקלים 235, 238 ו-234, (וכן יוצרו במשך הזמן 11 איזוטופים מלאכותיים) אך לכולם יש 92 פרוטונים ו-92 אלקטרונים. במילים אחרות, מספר הנויטרונים באיזוטופים אלה הוא 146, 143 ו-142 בהתאמה. אורניום טבעי מורכב בערך מ-99.3% אורניום 238 ו-0.7% אורניום 235 (האיזוטופ השלישי, U234, מצוי בכמויות מזעריות, ונתעלם ממנו). האיזוטופ הפעיל מבחינה גרעינית הוא רק אורניום 235. הפעילות הזאת מתבטאת בשחרור נויטרונים שלפעמים פוגעים באטום אחר ומבקעים אותו וגורמים לשחרור אנרגיה ונויטרונים נוספים, שייתכן שיפגעו באטומים נוספים.

## העשרת אורניים

כדי להשיג רמה מינימלית מתמשכת של התהליך הזה (ביקוע אטומים ושחרור נויטרונים נוספים), הקרוי "תגובת שרשרת", יש להגדיל את ריכוזו של ה-U235 בתוך גוש האורניום.

כדי לעשות בו שימוש בכור לייצור חשמל, למשל, יש להגדיל את ריכוזו לפחות עד לרמה של כ-4%. זוהי ה"העשרה", והיא דומה במידה מסוימת לתהליך ההעשרה של שומן בחלב טבעי והפיכתו לשמנת בריכוזים שונים. לצרכים מחקרניים שונים צריך להעשיר את האורניום הטבעי כך שיכיל לפחות כ-20% U235, ומקובל שלפצצה נדרשת העשרה לרמה של 90% לפחות.

נובע מכך שתוצר הלוואי של ההעשרה הוא אורניום 238, שיש לו כמה שימושים, כמו, למשל, למיגון ולייצור חומר בסיס לפגזים חודרי שריון. (למרות האמור לעיל, אורניום טבעי משמש לעיתים בפצצות מימן, שבהן האנרגיה הגבוהה של הנויטרונים שמשחררים יכולה לגרום לביקוע של ה-U238 ולשחרור אנרגיה רבה).

תהליך ההעשרה - הגדלת הריכוז של ה-U235 - הוא התהליך המורכב ביותר בתחום של פיתוח נשק גרעיני. כאמור, נשק גרעיני דורש U235 בריכוז גבוה, והשגת הריכוז הזה היא אבן נגף ממדרגה ראשונה. הסיבה: היות שכל האיזוטופים השונים של האורניום הם בעלי תכונות כימיות זהות, לא ניתן כמעט להשתמש בתהליכים כימיים להפרדתם. (בצרפת נבנה מתקן העשרה ניסיוני המבוסס על תכונה כימית מסוימת, אך הוא לא הוכנס לשימוש). לכן משתמשים רק בתהליכים המבוססים בצורה כזו או אחרת על התכונות הפיזיקליות של אטומי האורניום - בעיקר הבדלי המשקל בין האיזוטופים השונים. אלה הם הבדלים מזעריים: ההבדל במשקל האטום בין U235 ל-U238 הוא בערך 1.2%, ולכן תהליכי ההעשרה הם איטיים מאוד.

קיימות כמה שיטות להעשרה, ושיטת הצנטריפוגות היא אחת המודרניות שבהן.

הוא נאגר בצורה מתאימה. היות שכורי כוח גרעיניים קיימים כבר עשרות שנים, הרי מדינות שונות אגרו כמויות ניכרות של פלוטוניום. הפלוטוניום יכול לשמש אף הוא בכורי כוח גרעיניים, אך שימושו העיקרי הוא בפצצות גרעיניות. יש לציין שפצצת הניסוי הראשונה (שהופעלה בניו־מקסיקו ביולי 1945) והפצצה שהוטלה על נגסקי היו פצצות פלוטוניום.

## האופציות לנשק גרעיני

הפצצה שהוטלה על הירושימה הייתה פצצת אורניום, והיא הופעלה בהצלחה בלי שנוסתה ממש וללא אמצעי הסימולציה המודרניים שקיימים היום. הסיבה לכך היא שהמבנה של הפצצה כזאת הוא פשוט, יחסית (אף כי יעילותו במושגים של ניצול החומר הבקיע היא נמוכה מאוד), ואפשר לדמיין תרחיש שבו פצצות כאלה נאגרות לשימוש ללא ניסוי שיסגיר את הפעילות הזאת. אך זה אינו המסלול היחיד שפתוח בפני מי שרוצים לפתח נשק גרעיני.

רוסיה מספקת מוטות דלק לכורים גרעיניים הפועלים במדינות עולם שלישי. ההסכם ביניהן קובע שמוטות הדלק המשומשים יוחזרו לרוסיה, וזו תעמיד לרשות המדינות האלה מוטות דלק חדשים. כאמור, תהליך הפרדת הפלוטוניום מהדלק המשומש הוא פשוט יותר מתהליך ההעשרה, ופנקסנות יצירתית מעט יכולה להשאיר את הפלוטוניום, או חלק ממנו באותן המדינות. יתרה מזאת: כאשר אותן המדינות מתחילות להפעיל כורי כוח גרעיניים כשרים למהדרין משלהן באמצעות אורניום מועשר משלהן ומפתחות יכולת להפרדת הפלוטוניום מהדלק המשומש, אין כל אפשרות לבדוק כמה פלוטוניום הן מייצרות ומה נעשה בו. יש לציין - לסיכום - שהספרות העוסקת ב"התגרעות" של מדינות העולם השלישי כמעט שאינה מזכירה את העובדה שביכולתן להשיג חומרים בקיעים במסלול הזה.



**חורבות הירושימה | על הירושימה הוטלה פצצת אורניום, והיא הופעלה בהצלחה בלי שנוסתה ממש וללא אמצעי הסימולציה המודרניים שקיימים היום. על נגסקי הוטלה פצצת פלוטוניום**

היא גם צורכת הכי מעט אנרגיה, אף כי - כפי שאנו רואים - הקשיים הטכנולוגיים בפיתוח מערך יעיל של צנטריפוגות אינם מבוטלים.

## ייצור פלוטוניום

כאמור, מוט הדלק הרווח ביתר לשימוש בכור גרעיני מורכב מ־96% U238 ומ־4% U235. פגיעת נויטרונים באטומים שכנים של אורניום 235 מבקעת אותם, משחררת אנרגיית חום (המייצר קיטור להנעת טורבינות) וגורמת לפליטת נויטרונים נוספים להמשך התהליך. אבל חלק מהנויטרונים האלה פוגע גם באטומי ה־U238, שכזכור ריכוזו גדול בהרבה. כתוצאה מכך (ובלי להיכנס לשלבי התהליך) חלק מאותם אטומי U238 הופך לפלוטוניום שמספרו האטומי הוא 94, ומשקלו האטומי של האיזוטופ הנפוץ ביותר שלו הוא 239 (אף כי גם לו יש מספר רב של איזוטופים).

פלוטוניום הוא אחד מקבוצה גדולה של יסודות מלאכותיים הקרויים טראנס־אורניים, וכאמור הוא מוצר מלאכותי, אף כי כמויות מזעריות שלו נמצאות במרבצי אורניום טבעי. אלה נוצרו כתוצאה מפגיעה אקראית של נויטרונים באטומים של U238. (ניתן לייצר חומרים בקיעים אחרים באמצעות שימוש בקומבינציות שונות של דלק לכור).

באמצעות תכנון מתאים של הכור ניתן לייעל את התהליך הזה של יצירת פלוטוניום (או של חומרים בקיעים אחרים) כך שייוצר יותר חומר בקיע מכפי ששימש לתהליך. כור כזה קרוי "כור דוגר".

כאשר רמת האורניום 235 במוטות הדלק (המפעילים את הכור הגרעיני) יורדת לרמה מסוימת, הם מוחלפים באחרים, ומוטות הדלק המשומשים, שבשלב הזה מכילים תערובת של אורניום (שני האיזוטופים) ושל פלוטוניום, נשלחים לעיבוד. את ה־U235 ניתן לנצל מחדש, אך מה שחשוב הוא שהמוטות המשומשים מכילים גם פלוטוניום. מבחינה מעשית הפרדת הפלוטוניום פשוטה יותר (היות שמבחינה כימית זהו חומר שונה מהאורניום), ולאחר הפרדתו

