

המאמץ לגילוי פעילות גרעינית חשאית

אפרים אסכולאי*

פרויקטים חשאיים לפיתוח נשק גרעיני הם מן הסודות הכמוסים ביותר של מדינות. בזמן הם אתגרים גדולים לשירותי מודיעין, העושים כל שביכולתם כדי לחשוף את הפרויקטים האלה מוקדם ככל האפשר – לפני שייגיעו המדיעות המפתחות להישגים משמעותיים. השיטות שבהן משתמשים שירותי המודיעין לגילוי פרויקטים גרעיניים וללימוד מאפייניהם רבות ומגוונות. על השיטות הקלאסיות – מודיעין אנושי, תצלומים והאזנות – נוספות שיטות ייחודיות לתחום הגרעיני. אחד האמצעים החשובים שבהם משתמשים שירותי מודיעין לחשיפת פיתוחי נשק גרעיני הוא חלק ממודיעין מדידות וחתימות (MASINT) המכונה מודיעין גרעיני (NUCINT).¹

במאמר הזה יסקרו הבעיות העומדות בפני שירותי המודיעין בהתמודדותם עם הסוגיה הגרעינית, ויוצגו חלק מן השיטות שפורסמו, המשמשות את המודיעין בתחום הגרעיני. לשם כך ייבחו כמה מקרים מתועדים שבהם חשפו שירותי מודיעין פעילויות חשאיות בתחום הגרעיני ועמדו על מהותן.

נושא שונה לחלוטין הצובר תאוצה בשנים האחרונות הוא גילוי ומניעה של הברחת חומרים גרעיניים המשמשים לפיתוח נשק גרעיני, או של הברחת חומרים רדיואקטיביים היכולים לשמש ליצירת פצצה "מלוכלכת", או לזיהום אזורים, מזון ומים (או כמו השימוש בחומרים כאלה להרעלת אנשים). מטבע הדברים, לא כל הנעשה בתחום הזה גלוי לעין. קיימים שני ארגונים בין-לאומיים הקשורים באופן הדוק לנושא: הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה אטומית (סבא"א), שאחד מתפקידיה הוא פיקוח על הפעילות הגרעינית במדינות השונות, וארגון האמנה לאיסור כולל של ניסויים גרעיניים (אמנ"ס) שתפקידו לגלות פיצוצים גרעיניים. המאמר יעסוק, בין היתר, בפעילותם של שני הגופים האלה. פיתוח האמצעים הטכניים המסייעים לפעולות הפיקוח ולמודיעין של הארגונים האלה (וכן לפעילות החסויה

* ד"ר אפרים אסכולאי הינו חבר בצוות המחקר של המכון למחקרי ביטחון לאומי

של שירותי המודיעין של מדינות) הוא תחום טכנולוגי מוכר; פרסומים רבים של חוקרים ושל איגודים מקצועיים וכנסים עוסקים במגוון הרחב של הנושאים הטכניים בתחום הזה.

מה רוצים להסתיר?

ניתן לחלק את המדינות המפתחות נשק גרעיני בחשאי לשני סוגים: מדינות שבהן הפיתוח הצבאי הוא שלוחה של פרויקט גרעיני גלוי ומוצהר; ומדינות שלא קיים בהן פרויקט גרעיני גלוי, המתחילות את הפיתוח הגרעיני ללא תשתית קודמת.² אין ספק כי קשה יותר לגלות את הפעילות מהסוג הראשון, שכן המדינה המפתחת משתמשת בתשתית הקיימת כדי להסוות את הפעילות החשאית. למרות זאת, היו הצלחות לא מעטות גם בחשיפת הסוג הזה של פרויקטים – משום שהמדינה המפתחת לא הייתה ערה לשיטות המתקדמות של המודיעין הגרעיני או משום שלא הצליחה לנטרל או להסתיר את החתימות שגרמו לגילוי. גם לעיתוי הגילוי יש חשיבות לא מעטה, ולא תמיד נעשה הגילוי בזמן שבו ניתן עדיין להשפיע על מהלך העניינים. הפעילויות שאותן מנסים המפתחים להסתיר הן: ייצור החומר הבקיע – חומר המהווה את ליבת הנשק הגרעיני; פיתוח הנשק ומאפייניו; וניסויים/פיצוצים גרעיניים. יש לציין כי לא רק עצם גילוי הפעילות חשוב למודיעין. גם לאפיון הפעילות במאפיינים איכותיים וכמותיים – יש חשיבות רבה בהערכת המודיעין.

שני חומרים בקיעים עיקריים משמשים לפיתוח נשק גרעיני: פלוטוניום 239 ואורניום מועשר לרמה גבוהה. הראשון מופק מאורניום שהוקרן בכורים גרעיניים, והשני מופק מאורניום טבעי שעבר העשרה במתקנים מיוחדים. הפקת הפלוטוניום היא תהליך ארוך הכולל הכנת הדלק הגרעיני והקרנתו בכור, ולאחר מכן טיפול בנוזלים ברמות גבוהות של רדיואקטיביות ובמתכת הפלוטוניום שהינן מסוכנות לאדם ולסביבה. גם בהעשרת האורניום יש שלבים של טיפול כימי, אך ברמות רדיואקטיביות נמוכות בהרבה מאלה של התהליכים להפקת פלוטוניום, והסכנות הנובעות מהן לאדם ולסביבה מעטות במידה ניכרת. על סמך המאפיינים האלה ניתן לומר כי קל יותר לחשוף את התהליך של הפקת פלוטוניום מאשר את התהליך של הפקת האורניום המועשר.

לפיתוח מנגנון הנפץ הגרעיני יש חתימות מיוחדות מעטות בהשוואה לכל פיתוח של כלי נשק המלווה בפיצוץ. לעומת זאת, לניסוי גרעיני יש חתימה ברורה מאוד, שכן לרוב הניסויים המתועדים יש עוצמה רבה הנמדדת בדרך-כלל בקילוטונים (קילוטון – אלף טונות) של טי-אן-טי. יש לציין שאף כי הדבר אינו כלול במטרות המודיעין הגרעיני, שימשו מערכי מדידה, שהוקמו לצורכי פיקוח או לצרכים בטיחותיים, גם לגילוי תקלות גרעיניות.

הנושאים שהמודיעין הגרעיני מנסה לגלות הם כמובן אלה שאותם המפתחים מנסים להסתיר: מהות הפעילות ומיקומה, מאפייני הפעילות והיקפיה ולוח-הזמנים של הפעילות הזאת.

המודיעין הקלסי והחיפוש אחר פעילות גרעינית

הרמזים הראשונים בדבר פעילות גרעינית חשאית מגיעים ממקורות שונים, ולא תמיד ניתן לעמוד על מקור המידע שהתניע את מנגנוני המודיעין לניסיון לאשר את קיומה של הפעילות הזאת או להפריכה, ולאחר האישור – לניסיון לאפיין אותה. מובן כי המאמץ המודיעיני שכוון לאתר את הפעילות הגרעינית בברית-המועצות הותנע לאחר שהתקבל מידע ממקורות אנושיים – מרגלים שמסרו למערב מידע מסווג. גילוי המרכזים הגרעיניים בעין אוסירה שבאלג'יריה וביונגביון שבקוריאה הצפונית נעשה ככל הנראה באמצעות תצלומי לוויינים. המידע הראשוני הוא כללי, והפרטים הכמותיים מעטים. המידע יוצר אמנם את ההתנעה למאמץ המודיעיני, אך אינו הנדבך העיקרי בניתוח הכולל ובפריסת היריעה של הפיתוח הגרעיני החשאי. זו נעשית בעקבות פעילות ענפה הכוללת שימוש בשיטות איסוף, בין היתר, אלה הייחודיות לגרעין. הדוגמאות להלן מובאות כדי להמחיש את חשיבות המודיעין החזותי.

באוגוסט 2002 הודיע ארגון אופוזיציה איראני כי איראן מקימה שני מתקנים גדולים הקשורים לפרויקט גרעין חשאי – מתקן העשרה גדול בנתאנו ומתקן להפקת מים כבדים באראק. תצלומי לוויינים שהתקבלו והופצו לאחר מכן בתקשורת היו הנדבך המשמעותי הראשון בחשיפת פעילותה של איראן בפיתוח נשק גרעיני.³ בתצלום 1 מוצג מתקן ההעשרה בנתאנו ובתצלום 2 מוצג המתקן להפקת מים כבדים באראק בעת תהליך הקמתו.

האמריקנים גילו אתר המיועד לניסוי גרעיני תת-קרקעי בדרום-אפריקה באמצעות תצלום לוויין. לעומת זאת, האתר שבו נערך הניסוי הגרעיני של הודו ב-1998 לא נחשף לפני הניסוי. הדבר מצביע על חולשה אינהרנטית של תצלומי הלוויין. אף כי לוויינים סובבים את כדור הארץ כל הזמן ומשרדים תצלומים, הפעילות הגרעינית נחשפת במקרים שבהם מתמקדים המפענחים בתצלומים מסוימים על סמך מידע קודם או במקרים שהייתה בהם יד המזל. הסיכוי לכישלון אינו מבוטל. הסוואה והסחה תורמות אף הן לכישלונות כאלה.

החתימות הגרעיניות והמחקר המודיעיני

המודיעין הטכני בתחום הגרעיני מתבסס בעיקר על העובדה שרוב החתימות של הפעילות הגרעינית קשורות לאיזוטופים שונים של היסודות מהטבלה המחזורית.⁴ הרוב הגדול של האיזוטופים הרלוונטיים הם רדיואקטיביים, כלומר, פולטי קרינה רדיואקטיבית.⁵ לכן, אם

מצליחים לגלות איזוטופים הקשורים לתהליכים גרעיניים ולנתח את מאפייניהם בשום-שכל, ניתן לקבל את כל המידע הנחוץ. ניתן לחלק את החתימות של הפעילויות הגרעיניות לשלוש קטגוריות: מסלול ייצור הפלוטוניום, מסלול ייצור האורניום המועשר ופיצוצים גרעיניים. בנוסף מתגלות חתימות בעת ההברחות הגרעיניות וכאשר מתרחשות תקלות גרעיניות

מסלול ייצור הפלוטוניום

בתהליך ייצור הפלוטוניום מקרינים אורניום בכור גרעיני. הפלוטוניום נוצר באורניום בעת הקרנתו בכור. לאחר מכן מעבירים אותו למפעל הפרדה שבו מפרידים את הפלוטוניום מהאורניום ומתפוסלת הנוצרת כמוצר לוואי בעת ההקרנה. בשלב הבא מטפלים בפלוטוניום ומביאים אותו לתצורה הנדרשת להכללה במתקן נפץ גרעיני. את הפסולת מאחסנים. הבעיה העיקרית בתהליך הזה היא הכמות העצומה של איזוטופים רדיואקטיביים הנמצאת בפסולת. חלק מהם ממשיכים להתקיים במשך עשרות, מאות ואלפי שנים, ואף יותר, לאחר הפסקת תהליך ההקרנה בכור. חלק מן האיזוטופים הם גזים (למשל, האיזוטופ 85 של הגז קריפטון), חלקם נדיפים (למשל, האיזוטופ 131 של היוד) וחלקם מוצקים (למשל, האיזוטופ 90 של הסטרונציום).

מטבע הדברים, לא ניתן לכלוא באופן הרמטי כמות גדולה כזאת של איזוטופים. חלק מהם נפלטים לסביבה בתהליכי ההפרדה, וחלקים קטנים מאוד משתחררים לסביבה גם לאחר מכן. גילוי הזיהום הסביבתי הזה ומאפייניו הוא לפיכך אחד האמצעים החשובים שבידי המודיעין הגרעיני.

מסלול ייצור האורניום המועשר

חומר הגלם המשמש בתהליכי העשרת האורניום הוא האורניום הטבעי שאותו מעשירים באיזוטופ 235 הנמצא בטבע בכמות קטנה ביותר. שיטות ההעשרה רבות ומגוונות.⁶ אף כי כל האיזוטופים של האורניום הם רדיואקטיביים, הרדיואקטיביות שלהם חלשה וקשה לגלות אותה. נוסף על כך, הפליטה שלהם לסביבה בתהליך ההעשרה קטנה מאוד.

פיצוצים גרעיניים

לפיצוצים גרעיניים יש כמה חתימות לא גרעיניות. אם הפיצוץ נערך על פני הקרקע, בים ובאטמוספירה, הוא מלווה בכמה אפקטים פיזיקליים, בהם: הבזק אור, גל חום, גל הדף, או אות תת-אקוסטי (מתחת לסף השמע).⁷ פיצוץ תת-קרקעי מלווה באפקט סיסמי. פיצוץ תת-מימי מלווה בגלים אקוסטיים המתפשטים במים.

נוסף על אלה קיים האפקט של זיהום רדיואקטיבי של הסביבה. פיצוץ בקרבת הקרקע גורם לזיהום קרקעי נרחב בקרבת המקור. פיצוץ בגובה מעל פני הקרקע גורם להתפשטות הזיהום במרחב, אם כי לא בקרבת מקום הפיצוץ (בדומה למה שקרה בהפצצות על הירושימה ונגסקי). פיצוץ תת־ימי מזהם את מי הים. אם הפיצוץ תת־קרקעי בעומק מספיק, קיים סיכוי שהוא יהיה "כלוא" ושלא ייפלטו חומרים רדיואקטיביים לסביבה, לפחות לא באופן מיידי.

הברחות ותקלות

קיים מגוון עצום של חומרים רדיואקטיביים שניתן להברוח, או שיכולים להיפלט כתוצאה מתקלות. נושא ההברחות מדאיג יותר מבחינת המודיעין הגרעיני משום שאת החומרים הרדיואקטיביים הנפלטים בעת תקלות ניתן לאתר, ואילו בעת הברחה החומרים ארוזים היטב, כדי למנוע דליפה מן המארג, ולכן קשה לגלותם. בהגדרה, כל חומר רדיואקטיבי פולט קרינה, אך לא תמיד ניתן לגלות את הקרינה הזאת מחוץ למארג. סוג הקרינה וכמות החומר המועבר הם שקובעים אם ניתן לגלותו. במקרים כאלה עושות המדינות שימוש נרחב במודיעין.

מחקר המודיעין הגרעיני

אין די באיסוף טכני ובזיהוי חתימות. יש צורך לנתח את הממצאים כדי להבין את משמעותם. זהו העיסוק העיקרי של מחקר המודיעין הטכנולוגי הגרעיני. ואולם לשם כך, לדוגמה במחקר של מסלול ייצור הפלוטוניום דרוש מידע על סוג הכור, סוג הדלק הגרעיני והרכבו, הספק הכור, משך ההקרנה בכור, משך הזמן שחלף מאז תום ההקרנה בכור ומשך הזמן שעבר מאז הופרד הדלק המוקרן במתקן הקרנה והופק הפלוטוניום ממנו⁸. אם אין בידי המודיעין את הנתונים האלה, ניתוח תוצאות הדיגום והאנליזה יהיה מבוסס על חישובי כל האפשרויות ומובן שלא יהיה חד משמעי. ככל שיושגו יותר נתונים יצטמצם מספר האפשרויות, והתוצאות יהיו מדויקות יותר.

ברור כי במקרה הזה, שהוא רק דוגמה, תוצאת החישובים שאותם מבצע פיזיקאי כורים, אינה יכולה להביא לתוצאה חד־משמעית, ויש להסתייע בכל פיסת מידע נוספת כדי לצמצם את מגוון האפשרויות, או להגיע לתוצאה חד־משמעית.

פעילות סבא"א באיראן תתואר בהמשך, אך כבר בשלב הזה יש לציין את המקרה הבודד שבו פירסמה הסוכנות נתונים טכניים ברבים, כדי להדגים את המחקר המודיעיני הגרעיני בנושא של העשרת אורניום⁹. הנתונים של תוצאות אנליזות של חלקיקים שהתגלו בדגימת "מריחה" (ניגוב משטחים) ממתקן, הקשור ככל הנראה לייצור צנטריפוגות, פורסמו בצורה גרפית. אחד הצירים בגרף מראה את שיעור השכיחות של אורניום 235, והציר השני

מראה את השכיחות של האיזוטופ אורניום 236. בגרף יש שני צברים של תוצאות: האחד של העשרה עד 10% והשני של העשרה נמוכה מ-40%. הנתונים האלה הם כבר מדאיגים מאוד, ויכולים להעיד על האפשרות כי איראן העשירה אורניום לרמות גבוהות למדי, כך שתוספת המאמץ על מנת להגיע להעשרה "צבאית" (בסביבות 90%) הוא לא גדול. מהגרף עולה עובדה שנייה, חשובה לא פחות מהראשונה: החלקיקים שנדגמו הכילו את האיזוטופ אורניום 236. האיזוטופ הזה כמעט שאינו נמצא בטבע, אך נוצר בכמויות משמעותיות בעת הקרנת אורניום בכורים. המשמעות של הממצא הזה היא שלאיראן יש כור שעליו לא הצהירה ומתקן להפרדת אורניום מוקרן, או שהאורניום שבו השתמשו להעשרה הגיע ממדינה אחרת, באופן לא מוצהר, בניגוד למחויבותיה של איראן לפי הסכם הפיקוח עם סבא"א. אם כך – מאיזו מדינה הגיע החומר? כמעט כל נתון טכני, המגיע אל מנתחי המידע ממקורות האיסוף והאנליזה של הנתונים שנאספו, דורש עבודות עיבוד ופיענוח נוספות, והדבר הזה מוכיח את חשיבות המחקר המודיעיני כמשלים של עבודת האיסוף. בהמשך יובהר כי חייב להתקיים קשר טוב בין המודיעין הגרעיני ובין המודיעין הקלסי, המשלימים זה את זה.

מי עושה מה?

ארצות-הברית

חרף העיסוק הנרחב בנושא מודיעין הגרעיני ולמרות ההשפעה הרבה שיש לדעת הקהל העולמית בנושא הגרעיני, עדיין רב הנסתר על הנגלה. בסוף שנות ה-40 של המאה ה-20 החלה ארצות-הברית בפעילות לגילוי פעילויות גרעיניות בכלל, ובברית-המועצות בפרט. הפעילות הזאת התמקדה בגילוי ניסויים גרעיניים, באיתור מיקומם ובאפיון הפיצוצים.¹⁰ ההצלחה הראשונה הייתה בגילוי הניסוי הראשון שעשתה ברית-המועצות ב-1949. בין היתר נאספו דגימות אוויר ודגימות נשורת (בעיקר במי גשמים). מאוחר יותר כללה הפעילות מאמץ לגילוי ניסויים ופיתוח גרעיני במדינות אחרות, כמו הניסויים שערכה צרפת בסהרה ובאוקיינוס השקט, הניסויים שערכו בריטניה וסין והפיתוח הגרעיני בהודו.¹¹ נוסף על הדיגום בתחנות קרקעיות, כללה התוכנית האמריקנית דיגום באמצעות מטוסים ייעודיים ובאמצעות מערכות דיגום שהוצבו במדינות אחרות, אם אלה נתנו את הסכמתן לכך, וכן פעילות סמויה כמו הצבת דוגמים מוסוים (למשל, "מחליפי חום" בגודל של מקרר) בשגרירויות ובקונסוליות אמריקניות במדינות אחרות. ידוע גם כי האמריקנים דגמו משטחים של מטוסי נוסעים שחלפו באזורים רלוונטיים. אחד האיזוטופים העיקריים שנדגמו הוא הגז האציל קריפטון 85. בדיגום הזה היו שתי בעיות עיקריות: הפליטה של הגז ממתקנים לא מוצהרים מתערבבת עם פליטה של הגז הזה ממתקנים גרעיניים ידועים ומוצהרים במדינות שונות, כולל ארצות-הברית, צרפת ובריטניה; ה"חזוי לאחור"

בשימוש בנתונים המטאורולוגיים לצורך איתור מקור פליטת הגזים אינו מדויק. ככלל, עד לשימוש הנרחב במערכי מדידה סיסמיים לא השיגו האמריקנים דיוק רב באיכון המיקום של הפיצוצים התת-קרקעיים.

לעומת זאת, פיתחה ארצות-הברית מערכות חלל לגילוי פיצוצים אטמוספריים מדויקות הרבה יותר מגלאי הפיצוצים התת-קרקעיים. חלק מן המערכות האלה מוצבות על לוויינים ייעודיים, וחלקן על לוויינים ששוגרו למטרות אחרות, כמו הלוויינים המתפעלים את מערכת ה-GPS.¹² מערכות גילוי הפיצוצים הגרעיניים כוללות בין היתר גלאי קרינת X, גלאים אופטיים וגלאי פולס אלקטרומגנטי. המערכות האלה מוצבות באופן קבוע בחלל, וביכולתן לאכן פיצוץ בדיוק של עד 100 מטרים.

על המורכבות בניתוח המדידות מעיד מקרה שאירע ביולי 2003. ארצות-הברית הודיעה כי התגלתה עלייה ברמת הקריפטון 85 מעל הגבול שבין קוריאה הצפונית וקוריאה הדרומית.¹³ הדבר הזה העיד, לדעתה, על כך שקוריאה הצפונית הפרידה דלק מוקרן מן הכור הגרעיני שברשותה כדי להפיק ממנו פלוטוניום. בניתוח המקרה הועלתה גם השערה כי קיים מתקן הפרדה שני, לא מוכר, אך ההשערה הזאת לא הוכחה. כמו כן לא ניתן היה להסיק מהנתונים כל פרט נוסף – על מועד ההפרדה ועל הכמויות שהופרדו. העניין הזה נשאר לא מופענח.

קוריאה הצפונית עלתה שוב לכותרות באוקטובר 2006 כאשר הודיעה כי ביצעה פיצוץ גרעיני תת-קרקעי. בעולם התעוררו ספקות רבים אם זה היה ניסוי גרעיני או פיצוץ של כמות גדולה של חומר נפץ קונוונציונלי. ארצות-הברית הפעילה ככל הנראה מערך איסוף, ולאחר מכן הודיעה כי זה היה אכן פיצוץ גרעיני.¹⁴ ככל הנראה התבססה הקביעה הזאת על גילוי איזוטופ או איזוטופים של הגז קסנון שנפלטו מאתר הניסוי.

ידוע כי גם לברית-המועצות היה מערך ניטור (דגימה ומדידה) מוטס, אך אין פרטים נוספים על כך. ייתכן שגם מדינות נוספות ניהלו פעילות בתחום. הפריצה האמיתית בנושא נעשתה דווקא על-ידי ארגון בין-לאומי – סבא"א.

הפיקוח הבין-לאומי על-ידי סבא"א

ב-1961 אישרה מועצת המנהלים של סבא"א את המסגרת שבה תפעל הסוכנות כדי לוודא כי אין הסטה של חומרים, מתקנים או פעילויות מפיתוח אזרחי לפיתוח נשק גרעיני. לשם כך הוקם מערך הפיקוח של הסוכנות. בשלושים השנים שלאחר מכן עסקה הסוכנות באימות נכונות ההצהרות של המדינות על מהות המתקנים כפי שהוצגו בפני הסוכנות ובאימות ההצהרות של המדינות כי הן מקיימות מאזן חומרים נאות ואינן מסיטות חומרים לשימוש לא מוצהר. האימות הזה נעשה על-ידי פקחים שהוכשרו לכך, והם השתמשו בציוד ובשיטות שפותחו ושוכללו במשך השנים לצורך זה בלבד. הגילויים בעיראק, בעקבות

מפלתה במלחמת המפרץ הראשונה, הוכיחו לעולם ככלל, ולסבא"א בפרט, כי הגישה לפיקוח הייתה שגויה. ההתפתחויות במטרות הפיקוח ובשיטות הפיקוח מאז תחילת שנות ה-90 עד היום היו לא פחות מדרמטיות, ויתוארו באמצעות המקרים שיפורטו להלן. היתרון הגדול של פיקוח על-ידי גורמים בין-לאומיים הוא בכך שיש להם גישה לאתרים ולמתקנים במקומות שאליהם אין לשירותי מודיעין גישה פשוטה. אמנם הגישה הזאת מוגבלת גיאוגרפית – רק לאזורים ולמתקנים שעליהם הוסכם עם המדינה המארחת – והפעילות באתרים ובמתקנים מוגבלת לתצפית, לבחינת מסמכים ולמדירות שמטרתם בדרך-כלל לאמת את המצב שעליו מצהירים המארחים. עם זאת, ולמרות המגבלות, הפקחים רואים דברים רבים נוספים, היכולים לשרת את גופי מודיעין של מדינותיהם או של מדינות אחרות. הבעיה היא שהפקחים מוגבלים לנושאי הבדיקה – הן בדיווחיהם לארגון והן בדיווחים חיצוניים – על-ידי קוד אתי ועל-ידי התחייבותם בחתימה שלא להעביר מידע לגורם מחוץ לארגון.

אף כי סבא"א אמורה להיות גוף מקצועי, היא הפכה במהלך השנים לגוף יותר ויותר פוליטי. הדיווחים למדינות החברות בארגון, בעיקר ניתוח המסקנות מהדיווחים האלה, מוטים בדרך-כלל על-פי הדעות של המנכ"ל העומד בראש הארגון ועל-פי הדעות של המדינות החברות החשובות יותר.¹⁵ למרות כל האמור לעיל, סבא"א היא גוף המודיעין החשוב ביותר בתחום הגרעיני, וללא פעילותה במשך השנים היו, ככל הנראה, מדינות לא מעטות נוספות מגיעות ליכולת גרעינית צבאית.

המקרה של עיראק

אף כי היה ברור למדי שלעיראק יש שאיפות לפיתוח גרעיני צבאי, התמידה סבא"א בדיווחיה כי צוותי הפיקוח שביקרו בעיראק לעתים קרובות לא גילו כל חריגות. היו אלה דיווחי אמת, שכן המטלות שהוטלו על צוותי הפקחים היו כה מוגבלות והמגבלות שהוטלו עליהם היו כה חמורות עד כי עיראק יכלה לעשות ככל העולה על רוחה (כל עוד לא הצהירה על כך) ללא כל חשש מפני תוצאות הפיקוח. גם לאחר פלישת עיראק לכוויית, באוגוסט 1990 ולאחר שהועלו חששות בדבר יכולתה של עיראק להשתמש בחומרים שהיו ברשותה ולייצר נשק גרעיני, אישרה סבא"א כי לא נמצאו כל סימנים מחשידים בעיראק. לאחר ניצחון הקואליציה בעיראק ב-1991 כפתה מועצת הביטחון של האו"ם על עיראק מערכת פיקוח קפדנית בתחומי הנשק הלא קונוונציונלי והטילים. בתקופה הראשונה של הפיקוח נשלחו משלחות פקחים למתקנים המוכרים והמוצהרים. כבר במשלחות הראשונות למרכז המחקר הגרעיני באל-טווייתא התגלו חריגות חמורות: בבדיקת דוגמאות ממעבדות ודוגמאות סביבתיות התגלה כי עיראק הפרידה כמויות גדולות יותר של פלוטוניום מאשר הצהירה לסבא"א וכי עסקה בפרויקט להעשרת אורניום בלי להצהיר על כך.¹⁶ בשלב הזה

החלה סבא"א לעשות שימוש בשיטות דגימה ואנליזה רגישות ביותר של זיהומים ברמות נמוכות שמהן ניתן היה להקיש על הפעילויות, על היקפן, ועל לוחות-הזמנים שלהן.¹⁷ עתה החל העולם להבין את גודל התרמית, את שיטות ההסתרה ואת חוסר התועלת שהיה במשטר הפיקוח.¹⁸ לאחר מכן התגלה ההיקף העצום של הפיתוח הגרעיני הצבאי העיראקי, וכל אלה גרמו לזעזוע גדול.

המקרה של קוריאה הצפונית

קוריאה הצפונית הצטרפה לאמנת ה-NPT ב-1985, אך רק ב-1992 החלה פעילות הפיקוח של סבא"א במתקנים הגרעיניים שביונגביון.¹⁹ בתחילת 1993 הגיעה סבא"א למסקנה כי קיימות אי-התאמות חמורות בין הצהרתה של קוריאה הצפונית ובין הממצאים בשטח. המסקנה הזאת התבססה על דגימות ממקומות שונים, כולל מאגרי פסולת גרעינית, אשר הוכיחו כי קוריאה הצפונית ביצעה יותר מהפעולה הבודדת של הפרדת דלק גרעיני מוקרן שעליה הצהירה.

כאן נדרש הסבר נוסף: לפלוטוניום הנוצר בכורים יש כמה איזוטופים. השכיחים ביותר הם האיזוטופים 239 ו-240. היחס הכמותי ביניהם נקבע בין היתר על-ידי הספק הכור ומשך ההקרנה (ראו גם סעיף המחקר המודיעיני לעיל). אף כי בהצהרה דובר על פעולת הפרדה בודדת, התגלו בדגימות ממקומות שונים יחסי איזוטופים שונים, ואלה העידו על פעילויות הפרדה שונות בדלק במאפיינים שונים. זו הייתה עדות חד-משמעית לכך שההצהרה הייתה שקרית ולכך שקוריאה הצפונית הפרידה יותר דלק והפיקה יותר פלוטוניום מן המוצהר.

ככל הנראה לא הייתה סבא"א מגיעה לדגום בנקודות הרלוונטיות לולא סיפקה ארצות-הברית לסבא"א מידע מסייע רב. המידע הזה התבסס בעיקר על פיענוח תצלומי לוויינים, אך לא מן הנמנע כי היה ברשות האמריקנים מידע מודיעיני ממקורות אחרים אשר הצטרף למודיעין החזותי. עם זאת ברור כי למדענים של קוריאה הצפונית שטיפלו בנושאי הפיקוח לא היה מושג בדבר היכולות האנליטיות של סבא"א ובדבר יכולתה להסיק מסקנות על מאפייני התהליכים הגרעיניים שנחשפו. שני הגורמים האלה – הספקת המודיעין ממקורות חיצוניים ויכולות אנליטיות מתקדמות – סייעו רבות גם בפיצוח תוכנית הגרעין של איראן.

המקרה של איראן

כבר בשנות ה-90 של המאה ה-20 התפרסמו ידיעות על כך שלאיראן יש תוכנית חשאית להעשרת אורניום. איראן הכריזה כי ניתן לבקר בכל מקום בשטחה כדי לוודא כי אינה פועלת בניגוד להתחייבויותיה. סבא"א השתמשה ברשות הזאת וביקרה באתרים שונים,

ולאחר מכן הצהירה כי לא מצאה דבר המנוגד להצהרות. באותה תקופה השלימה סבא"א עבודה מקיפה על שינוי מערך הפיקוח, ובסיומה אישרה את "הפרוטוקול הנוסף" המרחיב את סמכויות הפיקוח שלה.²⁰ בין היתר כולל הפרוטוקול הזה את האפשרות לדיגום סביבתי אשר הניב תוצאות מרשימות במקרים שתוארו לעיל.²¹

באוגוסט 2002 חלה תפנית – לעולם נודע כי איראן מקימה מתקן חשאי תת-קרקעי גדול להעשרת אורניום ומתקן לייצור מים כבדים שהשימוש היחיד שלהם הוא בכור גרעיני בעל פוטנציאל לייצור פלוטוניום.²² הפרט החשוב לעניינו של המאמר הזה הוא כי לאחר מכן הרשתה איראן לסבא"א לקחת דגימות ממתקנים שונים. גם בשלב הזה לא הבינה איראן ככל הנראה את החשיבות הרבה של הדגימות האלה, שכן אף במקרה הזה הניבו אלה תוצאות חשובות ביותר שהשפיעו על כל מהלך העניינים להבא.

המידע העיקרי שהתגלה בניתוח תוצאות האנליזה של הדגימות היה כי נמצאו במתקנים שונים חלקיקי אורניום מועשר לרמות שונות, כולל לרמה "צבאית", וכי איראן הפרידה פלוטוניום בכמויות מעבר לאלה שעליהן הצהירה. אף כי איראן ניסתה להסביר את הממצאים באופנים שונים, שחלקם חשפו שותפות בין-לאומית ענפה, היא לא הצליחה להסביר את כל הממצאים בצורה שהניחה את דעתה של סבא"א.²³ העובדה הזאת הייתה אחת הסיבות (אם כי לא החשובה שבהן) שגרמו למשבר בסוגית הגרעין האיראני ב-2006.

המידע שהתקבל מניתוח תוצאות האנליזות לא היה המידע היחיד הנוגע לתוכנית הגרעין האיראנית שהתגלה באוגוסט 2002. התקבל מידע גם מתצלומי לוויין של שני האתרים שהוזכרו לעיל. באתר בנתאנו, שבו הקימו האיראנים את מפעל ההעשרה הגדול שלהם, נצפו שלושה מבנים תת-קרקעיים, לקראת השלמת הבנייה ולפני כיסוי בשכבות עפר, בטון ואבן לשם הגנה על המבנים מפני תקיפה אווירית. שניים מן המבנים שהתגלו היו גדולים מאוד, והשלישי הממוקם ביניהם היה קטן יותר. מתוך לימוד האתר וחשוב שטחי המבנים הגיעו החוקרים למסקנה כי האתר, במבנה הנוכחי, יוכל להכיל כ-50 אלף צנטריפוגות – היחידה הבסיסית להעשרה בשיטת צנטריפוגות הגז.²⁴ למספר הזה ניתן אישור בינואר 2006 על-ידי בכיר איראני.²⁵ זהו היקף מרשים, ואם ירצו האיראנים בכך, יוכלו להעשיר, לאחר השלמת המתקן, כמות ניכרת של אורניום לדרגת העשרה צבאית מדי שנה. תצלום 3, שצולם שנתיים לאחר תצלום 1, מעיד בבירור כי אם המתקן באתר נתאנו לא היה נחשף בעוד מועד, הסיכוי לגלותו מאוחר יותר היה נמוך הרבה יותר, ואולי בלתי אפשרי.

חשוב להזכיר גם את סיפור האתר בלוויזאן.²⁶ לפי הדיווחים, האתר הזה היה קשור לתוכנית הגרעין החשאית של איראן. כמו במקרה של נתאנו, הופנתה תשומת הלב לאתר הזה על-ידי ארגון אופוזיציה איראני. המעניין במקרה הזה הוא כי מייד לאחר גילוי הוחרב

האתר לחלוטין, ושכבת האדמה הקרובה לפני הקרקע "גולחה" והועברה למקום אחר. ככל הנראה, הדבר נעשה לנוכח הניסיון העגום של איראן באתרים אחרים שמהם נלקחו דגימות סביבתיות שלא היו נוחות לאיראן ושלחלקן לא ניתן הסבר עד היום. בתצלומים 4 ו-5 נראה האתר בלוויזאן לפני הפעילות של איראן ואחריה.

מערך הפיקוח של סבא"א הפך אפוא במשך הזמן ממערך אימות בלבד למערך אימות וגילוי. לשם כך הקימה סבא"א מערך מודיעיני המתבסס הן על מידע גלוי, כולל שימוש בתצלומי לוויינים, והן על מידע חסוי המסופק לה על-ידי מדינות המעוניינות לספק לה את המידע הזה.²⁷ ניתן להניח כי המידע מסופק לה בראש ובראשונה על-ידי ארצות-הברית.

המערך הבין-לאומי לגילוי פיצוצים גרעיניים

האמנה לאיסור ניסויים גרעיניים (אמנ"ס) אושרה על-ידי האו"ם ב-1996. אף כי האמנה עדיין לא נכנסה לתוקף, הוקם האמנ"ס שתפקידו להפעיל את מערכת הפיקוח על ביצוע האמנה. המערכת הזאת כוללת מערך ניטור והתראה, מערך לריכוז המידע ולעיבודו ומערך הפיקוח בשטח. להלן אסקור בקצרה את המערכים האלה. באמנה נכללות ארבע שיטות מדידה: מדידות סיסמיות, מדידות תת-אקוסטיות, ניטור של האיזוטופים הרדיואקטיביים ומדידות הידרו-אקוסטיות תת-מימיות. המדידות נעשות בעשרות רבות של תחנות מדידה הפזורות ברחבי העולם והמודדות את הנתונים השונים ברציפות.

כל הנתונים מועברים בזמן אמת – למעט ממערכות ניטור האיזוטופים הרדיואקטיביים, המחייבות זמן ממושך יותר לדיגום ולאנליזה – למרכז עיבוד הנתונים המרכזי שבנינה. במרכז הזה מעובדים הנתונים, מפוענחים ומופקים דוחות. הדוחות האלה מופצים למדינות החברות במערך. הבעיות העיקריות בניתוח המקרים הן מיון האותות וההבחנה בין פיצוצים ובין אירועים שאינם פיצוצים או שאינם פיצוצים גרעיניים, האיכון הנכון של האירועים ואפיונם. עדיין אין זה מדע מדויק ונדרשת עבודת מחקר רבה לשיפור הביצועים.

המערך השלישי – הפיקוח בשטח – אינו מופעל מכיוון שהאמנה, כאמור, עדיין לא נכנסה לתוקף.²⁸ תפקיד המערך הזה הוא להגיע למקום המשוער של האירוע הנחקר ולקבוע באמצעות מדידות בשטח בשיטות שונות האם האירוע היה אכן פיצוץ גרעיני. אף כי לא ניתן להפעיל עדיין את המערך, מתבצעות עבודות שונות להקמתו, כמו רכש ציוד, כתיבת נהלים ואימון צוותים, כך שיהיה מוכן אם וכאשר תיכנס האמנה לתוקף.

באמנה קיים חידוש מעניין: מותר למדינות החברות להשתמש במידע מודיעיני שהושג בדרכים "לגיטימיות", כגון תצלומי לוויינים, והאזנות שלא משטחה של המדינה שלה מאזינים, אך אסור לעשות שימוש במידע שהושג על-ידי סוכנים, למשל.²⁹ זהו אם כן מערך נוסף לגילוי פיצוצים גרעיניים. בהתחשב בהיקף הגדול של ההשקעה הלאומית של

ארצות-הברית בנושא, אין ספק כי המערך הזה יכול להרים תרומה מכרעת למידע אם זה יסופק על-ידי ארצות-הברית לארגון.

גילוי הברחות

עם קריסת ברית-המועצות גברו מאוד הדאגות בנושא ההברחות של חומרים גרעיניים וחומרים רדיואקטיביים. באותה תקופה נפוצו שמועות בדבר הברחות של נשק גרעיני, בעיקר מן המאגרים שנשארו ברשותן של הרפובליקות שפרשו מברית-המועצות. מובן כי הפיקוח, הן על החומרים הגרעיניים והן על נשק גרעיני (בעיקר זה קטן המידות), בתקופה שלפני קריסתה לקה בחסר. במשך השנים היו גם מקרים של ניסיונות הברחה שהתגלו. המקרים האלה כללו הברחות של חומרים רדיואקטיביים שונים ושל כמויות קטנות של חומרים היכולים לשמש כנשק גרעיני. עם זאת, לא ברור איזה חלק היה החומר שנתפס מכלל החומר שהוברח.

האחריות למניעת הברחות מוטלת על המדינות, וכן קיים שיתוף פעולה ביניהן בעניין זה. בנוסף, נעשית פעילות למניעת הברחות במסגרת ארגונים כמו האינטרפול. סבא"א מקיימת מרכז דיווח ורישום של ההברחות שנתפסו ומפיצה את הודחות האלה למדינות החברות.

קיימים אמצעים רבים בעולם המיועדים לגילוי חומר רדיואקטיבי סמוי – על אנשים, בכבודה או במטענים, כולל במכולות להובלה ימית. עם זאת, ברור כי עדיין קיימות פרצות רבות ברכישת ציוד כזה ובהתקנתו. בנוסף, ניתן להסתיר באופן מוצלח למדי חלק מן החומרים המוברחים.³⁰ מניעת הברחות גרעיניות מוטלת אפוא על שירותי הביטחון בכלל, ועל שירותי המודיעין בפרט.

גילוי תקלות

תקלות מתגלות על-ידי מערכי מדידה אף כי רובם לא הוקמו לשם כך, אלא במטרה לשמור על בריאות הציבור או כחלק ממערכי מודיעין למניעת הברחות. התקלה הידועה ביותר היא התאונה בתחנת הכוח הגרעינית בצ'רנוביל שבאוקראינה ב-1986. לאחר התאונה שמרה ממשלת ברית-המועצות כהרגלה על חשאיות, ולא הודיעה לציבור הרחב כי אירעה פריצה בהיקף גדול של חומרים רדיואקטיביים לסביבה. כל עוד התפשטו החומרים האלה בתחום ברית-המועצות הצליחה הממשלה למנוע את פרסום המידע. רק לאחר כמה ימים, כאשר הזיהום הגיע לשוודיה ולאחר שהנתונים נותחו והראו כי מקור הזיהום הוא בברית-המועצות, הודתה הממשלה באירוע והחל שיתוף פעולה בין-לאומי לצמצום הנזק לאוכלוסייה.

סיכום

סקירה זו התמקדה בתחום טכנולוגי צר למדי, אך זה שהניב את התמורה הגדולה ביותר במאמץ לגילוי פעילות גרעינית לא מוצהרת – מדידות של איזוטופים רדיואקטיביים שנדגמו – הן בתוך מתקנים גרעיניים והן מחוץ להם. בתחום הזה ובתחומים רבים אחרים, כמו מדידות של שדות קרינה לאיתור חומרים מוסתרים, קיימות שיטות שונות שביכולתן להוסיף מידע מודיעיני חשוב. התחום הזה מתפתח עם הזמן, ויחד עם אמצעי המודיעין האחרים שברשות מדינות, הוא משמש בסיס טוב להבנת הפעילות וההתפתחות של פרויקטים גרעיניים במדינות השונות.

עם זאת, קיים נושא אחד שהמודיעין הטכנולוגי הטהור, ככל מודיעין אחר, מתקשה ותמיד יתקשה בפיצוחו – מודיעין הכוונות. במקרה של עיראק הגיעו הפקחים למסמכי "האקדח המעשן" כבר בקיץ 1991, ומהם למדו בכירור על פיתוח הנשק הגרעיני בה. קשה להניח שהמצב הזה יישנה במקרה של איראן או במקרים אחרים ללא מודיעין אנושי מעמיק ביותר. ניתן להניח כי המידע יהיה נסיבתי ויתבסס על פוטנציאל, על מגמות פיתוח, על התנהגות בין-לאומית ועל נטיית הלב של המעריכים. שכן, אפילו אם המידע הטכנולוגי נראה חד-משמעי לחוקר אחד, יכול חוקר אחר להגיע למסקנות שונות ואף הפוכות. זו דרכו של עולם.

נספח: תצלומי אוויר של אתרי הגרעין באיראן

תצלום 1: האתר להעשרת האורניום בנתאנו, ספטמבר 2002³¹



שני הריבועים הגדולים הם אולמות היצור התת-קרקעיים העיקריים של האורניום המועשר, המכוסים בחלקם. ניתן לראות בבירור את המבנה הקטן יותר ביניהם, שעדיין לא הושלם ולא כוסה, ואת מנהרת הכניסה לרכב לאתר הייצור, בצורת U.

תצלום 3: תמונת האתר בנתאנו,

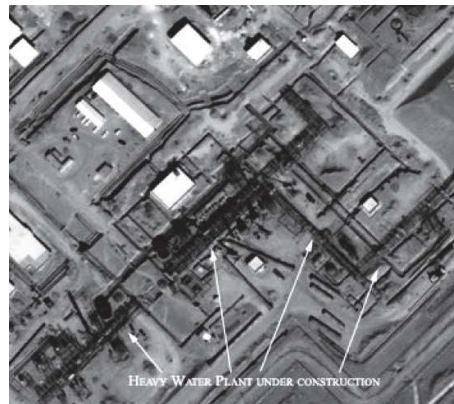
2004³³



בשלב הזה לא ניתן להבחין (אם אין בסיס להשוואה קודמת) באתר התת-קרקעי ובכניסה אליו.

תצלום 2: מתקן הפקת המים הכבדים

בארק, ספטמבר 2002³²



תצלום 4: האתר בלוויזאן, אוגוסט 2003³⁴



תצלום 5: האתר בלוויזאן, מרס 2004³⁵



ניתן להבחין בבירור בהעלמם של מבנים ובאדמת פארק באתר.

הערות

1. http://www.sec.army.mil/arat/ARAT/ARAT_information/arat_terms/masint.htm
2. MASINT-Measurement and Signature Intelligence; NUCINT-Nuclear Intelligence. למעט חמש המדינות בעלות הנשק הגרעיני וכן הודו, פקיסטן וישראל (שאינן חתומות על ה-NPT – האמנה לאי-הפצתו של נשק גרעיני), על כל המדינות האחרות להצהיר בפני הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה אטומית על מתקניהן, פעילויותיהן ומלאי החומרים הגרעיניים שברשותן, בהתאם למחויבותן לאמנה הזאת.
3. כל תצלומי הלוויין המובאים במאמר הזה בוצעו על-ידי לוויינים אורחיים, וניתן לרכוש אותם באופן מסחרי.
4. למעט במקרה של גילוי פיצוצים גרעיניים, שלהם חתימות רבות נוספות.
5. בלי להיכנס לפירוט יתר, יש לציין כי לכל איזוטופ רדיואקטיבי יש מאפייני קרינה ייחודיים. אם מצליחים למדוד את הקרינה ולאפיין אותה ניתן לזהות את האיזוטופ ולמדוד את ריכוזו. עם זאת, יש איזוטופים רבים, כגון איזוטופי האורניום שלגביהם אין זו שיטת הזיהוי הטובה ביותר במקרים שמדובר בריכוזי חומר ובכמויות זעירות, ושיטת הזיהוי והמדידה תהיה שונה.
6. למשל, באיראן מעשירים אורניום בשיטת צנטריפוגות הגז; בעיראק פעלו בעיקר בשיטת ההפרדה האלקטרו-מגנטית. קיימות שיטות נוספות של תהליכי העשרה.
7. גודל האפקט תלוי כמובן בעוצמת הפיצוץ. במאמר הזה נידונים פיצוצים בסדר גודל של קילוטון ומעלה, שרמת האותות מהם אינה זניחה.
8. דוגמה להמחשת הבעייתיות הרבה הכרוכה במחקר המודיעין הגרעיני היא הרכב הדלק המוקרן: הדלק יכול להכיל אורניום טבעי (זהו סוג הדלק השכיח בכורים המיועדים לייצור פלוטוניום), אורניום מועשר במקרים של דלק לכורי כוח מהטיפוס המתאים, או אורניום מדולל (שבו אין כמעט אורניום 235) היעיל לייצור הזה כאשר הוא מוקרן בכור, אך אינו מהווה את הדלק בו.
9. <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Board/2004/gov2004-34.pdf>. הדוח הזה הופץ בתחילה אך ורק לנציגויות הרשמיות של המדינות החברות בארגון. מאוחר יותר הודלף לתקשורת, ואז הסירה סבא"א את ההגבלות על ההפצה.
10. <http://www.gwu.edu/~nsarchiv/NSAEBB/NSAEBB7/nsaebb7.htm>.
11. תיאור מפורט של פעילותה של ארצות-הברית באיתור ובזיהוי פיתוחים גרעיניים במדינות אחרות ראה אצל:
Jeffrey T. Richelson, *Spying on the Bomb*, W.W. Norton & Company, Inc., New York, 2006.
12. Jeffrey T. Richardson, "MASINT: The New Kid in Town", *International Journal of Intelligence and Counterintelligence*, 14, pp. 149-192, 2001.
13. <http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn3960>.
14. http://www.odni.gov/announcements/20061016_release.pdf.
15. ניתוח הבעייתיות של הפיקוח הבין-לאומי על הסכמים בתחום אי-הפצתו של הנשק הגרעיני ראו:
E. Asculai, "Verification Revisited: The Nuclear Case", ISIS Press, Washington D.C., 2002.
16. יש לציין כי מדובר בכמויות של גרמים בודדים של פלוטוניום שלא הייתה בהן סכנה ממשית. עם זאת, העיקרון היה חשוב, ובכך עיראק נתפסה בבירור בקלקלתה.
17. למעשה, סבא"א רק ביצעה את פעולות הרגימה. מכיוון שלסבא"א לא היו באותה עת מעבדות

- המסוגלות לבצע אנליזות של הריכוזים הנמוכים מאוד הקיימים בדגימות סביבתיות, הועברו הדגימות למעבדות במדינות חברות בארגון, כמו ארצות-הברית וגרמניה, ואלה ביצעו את העבודה והעבירו הערכות בנוגע למשמעות של התוצאות.
18. את העדויות המרשיעות ביותר חשפה משלחת הפקחים השישית אשר מצאה מסמכים עיראקיים רבים על תכנון מנגנון הנשק הגרעיני. זה היה "האקרה המעשן" שאותו חיפשו הפקחים.
19. סיפור המעשה המלא, היכול להיקרא כסיפור מתה, ראו: David Albright and Kevin O'Neill, *Solving the North Korean Puzzle*, Institute for Science and International Security, Washington D.C. 2000.
20. International Atomic Energy Agency: Model Protocol Additional to the Agreement(s) – Between State(s) and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards, IAEA, INFCIRC/540, 1997.
21. תיאור של היכולות המתקדמות באנליזות של דגימות סביבתיות מופיע במספר רב של פרסומים מדעיים. לדוגמה, ראו: S. Usuda et al., Development of Analytical Techniques for Safeguards Environmental Samples and Their Applications, Proceedings of the Institute of Nuclear Materials Management, 2003. (CD-ROM).
22. אף כי המידע הופץ בארצות-הברית על-ידי ארגון איראני המתנגד למשטר יש רגליים לסברה כי המידע הועבר אל הארגון הזה על-ידי שירותי המודיעין של ארצות-הברית.
23. פקיסטאן סייעה רבות לפרויקט של איראן בהספקת ידע וציוד באמצעות הרשת של עבד אל-קאדר חאן, "אבי הפצצה הפקיסטאנית". מדינות אחרות היו חוליות ברשתות הרכש של איראן.
24. http://isis-online.org/publications/iran/natanz03_02.html.
25. <http://www.rferl.org/featuresarticle/2006/2/7645E760-5898-4AE4-ABD8-F3C7729AAE14.html>.
26. <http://isis-online.org/publications/iran/lavizanshian.html>.
27. סבא"א החלה להסתייע במידע שמספקות המדינות החברות בארגון כאחת מדרכי הפעולה השגרתיות שלה בעת הפיקוח על עיראק (למשל, <http://www.iraqwatch.org/un/IAEA/iaea-gc39-10.htm>).
28. נכון לתחילת 2007. קיימים תנאים מחמירים לכניסת האמנה לתוקף. 44 מדינות חייבות לאשרר את האמנה לשם כך. ארצות-הברית עדיין לא אישרה אותה וכן מדינות "בעייתיות", כמו איראן, הודו, פקיסטאן וקוריאה הצפונית. לא ניתן אף לשער את מועד כניסת האמנה לתוקף.
29. http://www.ctbto.org/treaty/treaty_text.pdf, p. 35.
30. מידת ההצלחה בהסתרה תלויה במידה רבה בתכונות הגרעיניות של החומר המוסתר. קשה להסתיר חומרים הפולטים קרינת גאמא, הדומה לקרינת רנטגן, וקל יותר להסתיר חומרים הפולטים קרינת אלפא (כגון אורניום), הנעצרת בקלות על-ידי חומרי אריזה.
31. http://isis-online.org/images/iran/natanz_closeup.jpg. Digital Globe.
32. http://isis-online.org/images/iran/arak_closeup.jpg. Digital Globe.
33. http://www.rogerlsimon.com/mt-archives/2004/07/ill_take_manhat.php.
34. <http://www.isis-online.org/images/iran/11aug03lavshi.html>.
35. <http://isis-online.org/images/iran/22mar04lavshi.html>.