

# מיתוסים על אורגניקה גרעינית כיצד שדולת האורגניקה זורה חול בעינינו

מאת ד"ר ג'וד חוֹזְקוֹרְנִיץ, ברלין, אפריל 2010 • עריכת, הקדמה וסוף דבר מאת ד"ר שמואל זולב



# מיתוסים על אנרגיה גרעינית

## כיצד שדולת האנרגיה זורה חול בעינינו

מאת ד"ר גֵרַד רוֹזֶנְקֶרְנֶץ  
ברלין, אפריל 2010

הקדמה ואחרית דבר למהדורה העברית  
מאת ד"ר שחר דולב  
תל אביב, מרץ 2011

מיתוסים על אנרגיה גרעינית  
כיצד שדולת האנרגיה זורה חול בעינינו  
Myths About Nuclear Energy  
How the Energy Lobby is Pulling the Wool Over our Eyes

מאת: ד"ר גרד רוזנקרנץ  
הקדמה ואחרית דבר למהדורה העברית: ד"ר שחר דולב

תרגום מאנגלית: שירלי ערן, אופיר פוירשטיין  
עריכת לשון: ענבר קמחי-אנגרט  
עריכה גרפית: עדי רמות  
בית דפוס: אקופרינט

© כל הזכויות שמורות לקרן היינריך בל  
נחלת בנימין 24, תל אביב 65162  
טלפון: 03-5167734/5  
פקס: 03-5167689  
ll-info@il.boell.org  
www.il.boell.org

נדפס בישראל, 2011

## תוכן העניינים

5	<b>מילות פתיחה למהדורה העברית</b>
7	<b>הגרעין וישראל – הקדמה למהדורה העברית</b>
15	<b>פתח דבר: אנרגיה גרעינית – מבוי סתום</b>
17	<b>מבוא: פורסמארק – 22 דקות של פחד ואימה</b>
18	<b>מיתוס ראשון: אנרגיה גרעינית היא בטוחה</b>
18	הסכנה הנלווית לשכחה
20	השגרה המשכרת
	<b>מיתוס שני: ניתן למנוע את הסכנות הנשקפות מניצולה של האנרגיה</b>
24	<b>הגרעינית לרעה ומהשימוש בה לפעולות טרור</b>
25	פיגועי התאבדות יאפילו על אירועי ה־11 בספטמבר
26	תאומים סיאמיים קטלניים: השימוש האזרחי והשימוש הצבאי באנרגיה גרעינית
29	<b>מיתוס שלישי: פסולת גרעינית? אין בעיה!</b>
30	לא קיים שום מקום שבו ניתן להיפטר מפסולת באופן קבוע
33	<b>מיתוס רביעי: יש מספיק דלק אורניום</b>
35	<b>מיתוס חמישי: אנרגיה גרעינית תורמת להגנה מפני שינויי האקלים</b>
36	כיצד פוגעת האנרגיה הגרעינית בהגנה בת־קיימא על האקלים
37	התחרות בין האנרגיה הגרעינית לבין האנרגיה המתחדשת מתגברת והולכת
39	הגנה על האקלים באמצעים גרעיניים אינה מציאותית
40	<b>מיתוס שישי: יש להאריך את תוחלת חייהם של הכורים</b>
	הקדמה לפרק מאת ד"ר שחר דולב:
40	רקע לפוליטיקה הגרמנית וליחסה לשימוש באנרגיה גרעינית
42	חברות אנרגיה גרעינית מפרות את הבטחותיהן
42	מדוע לחלט רווחים עודפים?
43	זניחה מושכלת של השימוש באנרגיה הגרעינית

44	<b>מיתוס שביעי: האנרגיה הגרעינית זוכה לעדנה מחודשת</b>
45	אנרגיה מתחדשת היא המגמה העולמית החדשה
46	סובסידיות למניעת שפל גרעיני
49	קצו של מיתוס האנרגיה הגרעינית
51	בפני החלטה: עתידה של אספקת האנרגיה
	<b>אחרית דבר: גרעין בישראל -</b>
55	<b>האם הגרעין יוכל לפתור את בעיות משק האנרגיה בישראל?</b>
59	<b>מקורות</b>
61	<b>הערות שוליים</b>

## מילות פתיחה למהדורה העברית

קרן היינריך בל פרסמה את המהדורה הראשונה של "מיתוסים על אנרגיה גרעינית" בשפה הגרמנית בשנת 2006, סביב יום השנה העשרים לתאונת הגרעין בצ'רנוביל. חוברת זו נועדה לשמש תזכורת ולעדכן בנוגע לסכנות ולאתגרים הכרוכים בשימוש באנרגיה הגרעינית למטרות אזרחיות, נוכח התעצמות הוויכוח הבין-לאומי על השימוש באנרגיה זו כפתרון למיתון שינויי האקלים. קרן היינריך בל היא חלק מקואליצייה של ארגוני סביבה רבים ושל מפלגת הירוקים הגרמנית המתנגדת באופן נחרץ לאנרגיה הגרעינית.

בשנת 2010 הרגשנו צורך לעדכן את החוברת, וזאת מכמה טעמים: הוויכוח הבין-לאומי על שינויי האקלים ועל האנרגיה הגרעינית אכן הוביל במדינות רבות להכנת תכניות להקמת תחנות כוח חדשות. ממשלת מרקל/וסטרוולה, שנבחרה בגרמניה בשנת 2009, החליטה להשהות את מדיניות ההפסקה בשלבים של השימוש בטכנולוגיית הגרעין במדינה, חרף התנגדות ציבורית נרחבת. הקהילה הבין-לאומית התגייסה להצלתה של האמנה למניעת הפצת נשק גרעיני, ובעת האחרונה היא נאבקה למציאת פתרון דיפלומטי למשברים הגרעיניים עם צפון קוריאה ועם איראן. בנקודה זו, אנו שותפים לדעה שלא ניתן לשאוף לעולם נקי מנשק גרעיני ובה בעת להרחיב את השימוש האזרחי באנרגיה הגרעינית ברמה העולמית.

אם נתמקד באזור המזרח התיכון, הרי שאיראן גרעינית עלולה להפוך ליריית הפתיחה במרוץ לגרעין בהשתתפות מדינות כמו תורכיה, ערב הסעודית ומצרים. העניין ההולך והגובר בקרב מדינות האזור בפיתוח תכניות גרעין אזרחיות הוא סימן למגמה זו. לכן, חברנו לגורמים הבין-לאומיים ששמו להם למטרה לקיים דיון ביקורתי בצורך באנרגיה הגרעינית ובסכנה הכרוכה בה ברמה הבין-לאומית.

חוברת זו תורגמה לשפות רבות, החל באנגלית ובספרדית, עבור בערבית, ברוסית ובתורכית, וכלה בתאית ובמנדרינית. אנו שמחים אפוא לפרסם כעת מהדורה עברית שתשמש משאב לכל המעוניינים לבחון במבט ביקורתי את תפקידה של האנרגיה הגרעינית בתוך מערכת היחסים הסבוכה שבין המאבק בשינויי האקלים, הבטחתה של אספקת האנרגיה ומניעתה של אנרגיה גרעינית צבאית. היות שהמחבר, ד"ר גרד רוזנקרנץ, ראש המחלקה לפוליטיקה וליחסי ציבור בארגון דויטשה אומנוולט־הילפה, כתב את המסמך מנקודת מבט גרמנית ובין-לאומית, פנינו לד"ר שחר דולב מהפורום הישראלי לאנרגיה כדי שישפק לנו תובנות על השיח בישראל בעניין האנרגיה הגרעינית.

לא העלינו כלל על דעתנו כי בעת שנכין את המהדורה הזו לדפוס יתחולל אסון גרעיני רחב היקף ביפן. כולנו הוכינו תדהמה נוכח הטרגדיה ההמונית שגרמו אחת מרעידות האדמה החזקות בהיסטוריה והצונאמי הרה האסון שבא בעקבותיה, שהחריבו יישובים שלמים וגרמו למותם של אלפי אנשים. האירועים בתחנת הכוח פוקושימה מציבים אתגר לא רק בפני יפן ותושביה, אלא בפני הקהילה הבין-לאומית כולה. כשם שעל העולם להיחלץ לעזרתה של יפן, כך עלינו לבחון כיצד נתמודד עם המציאות הסבוכה של גידול בביקוש לאנרגיה ברחבי הגלובוס, מיעוט המקורות לדלק מאובנים, שינויים מתמשכים באקלים וסכנת הפצתו של הנשק הגרעיני. זהו ההקשר שבתוכו תידרש ההכרעה בסוגיית המדיניות הנוגעת לשימוש האזרחי באנרגיה הגרעינית.

אני מבקש להודות לד"ר גרד רוזנקרנץ על שיתוף הפעולה שלו בתהליך תרגומה של החוברת. תודות מיוחדות שלוחות לד"ר שחר דולב על הפרק הנוסף פרי עטו, העוסק בהקשר הישראלי, ולעמי אטינגר על תרומתו החשובה. אנו מכירים טובה לשירלי ערן ולאופיר פוירשטיין על תרגום המסמך, לענבר קמחי-אנגרט על עריכתו ולעדי רמות על עבודת העיצוב הגרפי. כמו כן, אני מבקש להודות לדורותי לאנדגרבה ממטה קרן היינריך בל בברלין ולאנט ולטרסדורף ממשדנו בבריסל על סיוען בהפקתה של מהדורה זו. ולבסוף, תודה מקרב לב לאלישבע גלעד, רכזת תכניות במשרדנו בישראל, על ניהול הפרויקט במסגרת הקרן.

מארק ברטהולד, מנהל קרן היינריך בל ישראל

אפריל 2011

## הגרעין וישראל

### הקדמה למהדורה העברית

המסמך שלהלן בוחן באופן ביקורתי את רעיון הרנסנס הגרעיני שמטרתו לספק אנרגיה 'נקייה' לעולם מתחמם. הסקירה מעמיקה וממצה, אך יש לזכור כי היא נכתבה במקור עבור קהל גרמני ולכן מתמקדת בסוגיות שרלוונטיות לקוראים הגרמנים. הסוגיות הרלוונטיות לישראל יידונו באחרית הדבר.

מאז שנות ה־50 נשלט השיח על אודות האנרגיה הגרעינית בישראל על־ידי הגישה הביטחונית. התחושה בישראל היא שהנשק הגרעיני הוא ערובה לקיומה של המדינה, וכל דיון בנושא הגרעין, בין אם צבאי או אזרחי, יכול להביא לערעור מדיניות העמימות הגרעינית ולפגוע באינטרסים האסטרטגיים של המדינה. כתוצאה מכך, למעט אפיזודות קצרות ושוליות, לא התקיים בישראל דיון ציבורי של ממש על האפשרות להקים בישראל כורים גרעיניים לייצור חשמל. גם כאשר היו דיונים מסחריים על האפשרות לרכוש כורים כאלו, הם נעשו מאחורי הקלעים, על דעת קובעי המדיניות, וללא דיון פתוח. גם כיום, מקדמים משרד התשתיות הלאומיות וחברת החשמל את הרעיון להקים כור גרעיני אזרחי בישראל, אך התהליך נעשה בחדרים סגורים, הרחק מעיני הציבור, באופן הגורר חשש שלא יובאו בחשבון ההשלכות הרחבות של מהלך משמעותי זה.

מטרת מסמך זה היא להביא מידע רחב ככל האפשר בנוגע לסוגיות המורכבות הכרוכות בשימוש בגרעין לייצור חשמל, ולהעלות לדיון ציבורי. כתוצאה מהיעדר שיח ציבורי בנושא בארץ, מידע המוכר לכל אזרח אירופי על אודות הכורים הגרעיניים, אינו מוכר כלל בישראל. בהקדמה זו יפורטו מספר סוגיות הנוגעות לתחום הגרעין כדי לתת בסיס למאמר על אודות המיתוסים על האנרגיה הגרעינית.

### מהי אנרגיה גרעינית

אנרגיה גרעינית היא אנרגיה המופקת מתהליכים המתרחשים בגרעיני האטומים, ונבדלת בכך מהאנרגיה המופקת מדלקים מאובנים - פחם, נפט וגז - שמקורה בתהליכים כימיים, החלשים עשרות מונים מהתהליכים הגרעיניים. אי לכך, מאפשרים תהליכים גרעיניים להפיק את האנרגיה הדרושה לקיומנו מכמות מזערית של חומר. לדוגמה, כור חשמל בן 1,000 מגה־וואט יכלה במשך שנה רק ק"ג בודד של אורניום־235<sup>1</sup>, שהוא היסוד הדרוש לתהליך הביקוע הגרעיני. בהשוואה לכך, תדרוש תחנת כוח פחמית בהספק דומה 3,000,000 טון פחם. אולם יש לזכור כי השכיחות היחסית של אורניום־235 בטבע היא נמוכה ביותר. רק כ־0.7% מתוך האורניום בכדור הארץ הוא האיזוטופ אורניום־235, בעוד האיזוטופ אורניום־238 שאינו משתתף בתהליך הביקוע תורם מעל 99% למסת האורניום על פני כדור הארץ. כדי לאפשר את התמשכות התהליכים הגרעיניים בליבת הכור, יש להעלות את הריכוז של האורניום־235 ביחס לאורניום־238 בתהליך הנקרא "העשרה". לצורך העשרת האורניום משתמשים בתהליכים פיזיקליים (כאמור, לכל האיזוטופים של האורניום תכונות כימיות זהות), כגון סחרור בצנטריפוגות מהירות, כדי להפריד בין היסודות על סמך משקלם השונה במעט. כך, כדי להזין את הכור בק"ג בודד של אורניום־235 יש צורך לעבד כ־165 טון של אורניום טבעי, הדורשים כרייה של כ־80,000 טון עפרת אורניום - עדיין כ־2.5% בלבד מכמות הפחם המקבילה.



## בטיחות הגרעין

אחת הבעיות המקשות על השימוש באנרגיה גרעינית היא סוגיית הבטיחות. עד שנת 2011 מיקדו שתי תאונות חמורות בכורים אזרחיים את תשומת הלב הציבורית: התאונה בכור ב"אי שלושת המיילים" שליד העיר הריסבורג בפנסילבניה בשנת 1979, שהסתיימה בהתכה חלקית של הליבה ובפליטה קלה של גזים רדיואקטיביים, והתאונה הגדולה ביותר עד שנה זו, בכור בצ'רנוביל שבאוקראינה בשנת 1986, שהסתיימה בפיצוץ הליבה ובשֶׁפָּה. התאונה גרמה לפליטת כמויות גדולות של חומרים בעלי רדיואקטיביות גבוהה לסביבה, ענת החלקיקים התפזרה על פני מאות קילומטרים רבועים, וקרינה עודפת נמדדה במדינות שונות באירופה ומחוצה לה. בימים אלו (מרץ 2011) נמצאים בראש מהדורות החדשות האירועים הקשים בכורים בפוקושימה שביפן, שהחלו לאחר שרעידת אדמה גרמה להפסקת החשמל לכור, וגלי צונאמי פגעו בצנרת הקירור. ללא מערכות קירור עלתה הטמפרטורה בליבות הכורים ובבִּכּוּת הצינור של הדלק המשומש עד כדי כך שנגרמה התכה חלקית של הליבות. אולם מעבר לשלוש תאונות מתקשרות אלו התחוללו בעבר בכורי החשמל האזרחיים ובמתקני הטיפול בפסולת הגרעינית עשרות ומאות תאונות אחרות, ברמות שונות של נזק. שלוש תופעות מדאגות שניתן למנוע בהקשר זה הן: נטייתן של אחדות מהחברות המפעילות את הכורים להתעלם מתקנות הבטיחות, בייחוד כאשר על כף המאזניים עמדו סכומי כסף גדולים; ניסיונות רבים להסתרת בעיות בטיחות, הן מעיני הציבור הן מעיניהן של הרשויות הממונות; בעיות בתכנון הבסיסי של הכורים הממשיכות להפתיע את המהנדסים אף כיום, 70 שנה לאחר שהופעלו הכורים הראשונים.

דוגמה אופיינית לשתי התופעות הראשונות היא התאונה באתר קְרִיִּמְל בצפון גרמניה: תחנת הכוח המתופעלת על־ידי חברת Vattenfall Europe (להלן "וֶאָטְנֶפֶל") השוודית, פעילה מאז 1983 ומייצרת 1,400 מגה-וואט חשמל בכור מים רותחים הגדול מסוגו בעולם. ביוני 2007 אירע קצר שהוביל לשֶׁפָּה באחד השנאים המוציאים את החשמל מתחנת הכוח, ואילץ כיבוי חירום של הכור. הכור חזר לפעולה רק שנתיים לאחר מכן, ביוני 2009, אך למרבה המבוכה, לאחר מספר ימי פעילות אירע קצר דומה בשנאי אחר, שאילץ שוב כיבוי חירום של הכור. הפיאסקו של התקלה החוזרת היה רק ההקדמה, משום שהבעיה האמיתית התבררה רק לאחר הכיבוי - הסתבר כי עוד לפני ההפעלה מחדש נצפו גופים זרים על קרקעית ליבת הכור. גופים כאלו אסורים בתכלית, היות שהם יכולים להסתחרר עם מי הקירור ולפגוע ברכיבים קריטיים בליבה. עם גילוי הגופים החליטה וֶאָטְנֶפֶל כי עלות ניקוי הליבה גבוהה מדי (עלות היכולה להגיע עד כדי מאות מיליוני אירו), ולכן לא רק שלא ביצעה ניקוי מלא, אלא אף הסתירה את דבר הממצאים החריגים מן הציבור ומגורמי הבקרה הרשמיים. אלמלא הקצר השני בשנאי והחקירה שהחלה בעקבותיו, לא הייתה מתגלית התקלה לציבור.

דוגמה מדאיגה נוספת היא האירוע בכור בְּרוּנְסְבֵּיטל שגם הוא בצפון גרמניה. בדצמבר 2001 אירעה תקלה במערכת המשמשת לצינון הכור לפני פעולות תחזוקה. המערכת נמצאת בתוך ליבת הכור, לא הוגדרה כבעלת השפעה על בטיחות הפעלתו, ולכן לא נדרשה לעמוד בסטנדרטים גבוהים ולא עברה בקרה קפדנית. התקלה זוהתה כדליפה באחד הצינורות, טופלה בזריזות על־ידי הטכנאים, והכור חזר לפעילות מלאה. חקירה שהתבצעה בהמשך העלתה חשד להצטברות גז מימן, גז המשתחרר בתהליכים הגרעיניים בליבה. חודשיים לאחר התקרית גברו החשדות, והכור כובה לצורך בחינת אזור התקלה. בבדיקה נמצא כי לא מדובר בדליפה קלה, אלא במימן שאכן הצטבר בצינור שבתוך ליבת הכור והתפוצץ. במקרה זה לא נגרמו נזקים שפגמו בבטיחות תפעול הכור, אולם היה זה אך עניין של מזל, והאירוע יכול היה להידרדר לכדי תאונה חמורה. נמצא כי בתכנון הבסיסי של הכור ובניתוחי הבטיחות שנעשו במהלך הפיתוח, התעלמו מאפשרות זו של הצטברות מימן, והמערכת, שאינה מוגדרת כבעלת השפעה על בטיחות הכור, יכלה בעצם לגרום לתאונה חמורה בו.

דוגמאות אלו, כמו גם הדוגמה של האירוע בפורסמארק שיתואר בהמשך, מראות כי עדיין קיימות

בעיות בטיחות רבות בכורים הגרעיניים - בכל שלוש הרמות המאפיינות את חיי הכורים: רמת התכנון וניתוחי הבטיחות, רמת הבנייה והייצור, ורמת התפעול והגילוי הציבורי הנאות. המסקנה היא כי תאונה בסדר גודל של צ'רנוביל עדיין יכולה לקרות, גם בכורים מערביים מודרניים. מסתבר שרק מזל הפריד עד כה בין אירוע שקט שלעיתים אף לא דווח לממונים, לבין תאונה בעלת השלכות הרוח אסון. השטח המצומצם של מדינת ישראל הוא בעיה נוספת הנוגעת לבטיחות השימוש בגרעין. במקרה של תאונה חמורה, עלולים להתפזר עננים של חלקיקים רדיואקטיביים על פני מאות קילומטרים מרובעים, בדומה לתוצאות של אסון צ'רנוביל. אם באוקראינה משמעות הדבר הייתה פגיעה אזורית, סגירה של שטחים לפעילות ופינוי האוכלוסייה, הרי שבשטח כזה יכולה להביא לשיתוק מלא של המדינה, ללא יכולת של ממש לפנות את האוכלוסייה הנפגעת. מבחינה זו, אין הבדל בין כור ישראלי בדרום הארץ לכור במדינה שכנה בקרבת הגבול הישראלי.

## הטיפול בפסולת הגרעינית

הנעלם הגדול ביותר הקשור בייצור אנרגיה מביקוע גרעיני הוא העלות, הכספית והסביבתית, של הטיפול בפסולת הגרעינית, הנקראת לפעמים גם "דלק משומש" (spent fuel). האורניום הטבעי אינו רעיל, ופולט קרינה מועטה ביותר, אך בתהליכי הביקוע בליבת הכור, עובר חלק מהאורניום התמרה גרעינית ליסודות אחרים, שהרעילות הכימית והרדיוולוגית שלהם גבוהה ביותר. גם לאחר הוצאת הדלק המשומש מליבת הכור, נמשכים תהליכי ההתמרה הגרעיניים עוד עשרות ומאות אלפי שנים, תוך כדי פליטת קרינה, חום וגזים שונים. הפעילות הגרעינית במוטות הדלק המשומשים כה גדולה, עד כי יש לשמור אותם באמבט מים בתוך מבנה הכור למשך כעשר שנים, עד שיתפרקו היסודות הפעילים ביותר, ותפוקת החום של הפסולת תרד. או אז היא נארזת במכל פלדה יצוק בבטון ונשלחת לאחסון ארוך טווח. היות שחלק מתוצרי הביקוע מסיסים במים, יש להרחיק את הפסולת הגרעינית מאפשרות למגע עם מי תהום במשך תקופת הפעילות הגרעינית שלה. כפי שיתואר בפרק השלישי, על אודות מיתוס הפסולת, אין כיום פיתרון יעיל לבעיית האחסון ארוך הטווח של הפסולת הגרעינית, כך שבניסיון לייצר אנרגיה 'נקייה' כיום, אנו מורישים לבנינו ולבני-בנינו "תפוח אדמה לזהט", תרתי משמע, שייאלצו להתמודד עם השפעותיו במשך מאות דורות.

נבחן לדוגמה את המקרה של אתר האחסון בִּזְלֶצְבֶּרְגְ אָסֶה II שלייד זְלֶצְבֶּרְגְ בִּגְרַמְנִיָה. האתר נפתח ב־1967 במכרה מלח נטוש, היות שבאותה תקופה רווחה התפיסה שהאתר המועדף לאחסון פסולת גרעינית הוא מכרה מלח (בגרמניה עוד שלושה אתרי אחסון במכרות מלח). אף על פי שהאתר הוגדר כ'ניסיוני', אוכסנו בו כ־120,000 חביות שהכילו פסולת רדיואקטיבית, וכל זאת תחת חוק המכרות, שלהבדיל מחוקי הגרעין, לא מחייב שקיפות ומאפשר הסתרת התהליך מעיני הציבור. הערכות המומחים היו כי האתר יגן על הפסולת לכ־100,000 שנים, וזאת אף על פי שכבר אז סבלו מכרות מלח אחרים באזור מהצפות. כיום ידוע שעם הזמן נוצרים סדקים במסת המלח של המכרה, ומים מתחילים לזלוג פנימה. התמלחת הנוצרת מהמסת המלח במים היא בעלת כושר איכול גבוה, היכול לפגוע הן במבני התמיכה במכרה הן במכלי הפסולת האטומיים. כבר בשנת 1988 התגלו ממצאים לפיהם זולגים מִי תמלחת בכמויות גדולות אל המכרה. קרינה רדיואקטיבית שנפלטה מהתמלחת הצביעה על כך שמכלי האחסון נפרצו והם דולפים. גם כאן, הוסתרו הממצאים מהציבור עד לשנת 2008 בטענה כי "לא נראה שהציבור יתעניין בעובדה שתמלחת רדיואקטיבית דולפת במכרה". ב־2008 נשאבו כ־80,000 ליטרים של תמלחת רדיואקטיבית לשכבה נמוכה יותר במכרה כדי להרחיק אותה ממכלי הפסולת. מומחים טוענים כי החום הנפלט מהתמלחת עקב התהליכים הרדיואקטיביים יכול לגרום לסדיקת מצע המלח ולחלחול התמלחת עד למי התהום. נוסף על כך, ישנם דיווחים על מצבו הרעוע של המכרה, כגון עמודי תמיכה סדוקים, עד כדי סכנת קריסה של חלקים מהאתר.

## מחזור הפסולת הגרעינית

אחד הפתרונות המוצעים לבעיית אכסון הפסולת הגרעינית הוא מחזור הפסולת, או יצירת "מעגל דלק סגור". תוצרי הביקוע הם רק כ־5% מהדלק הגרעיני המשומש המוצא מן הכור. שאר החומר הוא ברובו אורניום-238, כזה שאינו משתתף בתהליכי הביקוע בליבה. אי לכך ניתן לטפל בדלק המשומש באמצעים כימיים פשוטים יחסית, לסלק את חומרי הפסולת בעלי הרדיואקטיביות הגבוהה, ולעבד כ־90% מהחומר הנותר חזרה כחומר דלק. באופן תאורטי מקטין תהליך זה את כמות הדלק הנשלחת להטמנה ב־90%, מקטין באותו היחס את הצורך בכריית אורניום 'טרי', וכך גם מקטין את ההשלכות הסביבתיות והכלכליות של השימוש בדלק הגרעיני. אולם כפי שיוסבר בפרק השלישי על אודות מיתוס הפסולת הגרעינית, ישנם קשיים ביישום טכנולוגיה זו - הן טכניים והן כלכליים - ובפועל רק 15% מהדלק המשומש ממוחזר כיום בעולם.

אחד המכשולים הקשים עבור טכנולוגיית המחזור היא העובדה שבשיטות הקיימות מופרד הפלוטוניום מהאורניום בתהליך המחזור. הפלוטוניום הוא יסוד בקיע המאפשר ייצור נשק גרעיני תוך שימוש בכעשירית החומר הבקיע בלבד ביחס לפצצות אורניום. לא זו בלבד, אלא שהפלוטוניום אינו דורש את תהליך ההעשרה המפרך הנדרש כדי להעלות את חלקו של האורניום-235 ביחס לאורניום-238. אם בהעשרת אורניום למטרות שימוש בכורי חשמל יש להעלות את ריכוז האורניום-235 מ־0.7% המצוי בטבע עד לכ־5%, הרי שכדי לייצר נשק גרעיני יש להעשיר את האורניום עד לרמה של 80% אורניום-235. בשל כך, מדינות המנסות לייצר נשק גרעיני מעוניינות בהשגת פלוטוניום, והפיכתו לזמין במהלך תהליך המחזור מעלה את הסיכון להפצת נשק גרעיני. בחלק מכורי הדור הרביעי (ראו להלן) הצליחו לפתור בעיה זו בכך שניתן לתדלק אותם בפסולת הגרעינית ללא הפרדה של הפלוטוניום מהאורניום (כורי "IFR"). אך אין בכך כדי לבטל את בעיית ההפצה, משום שעדיין ניתן להפריד בין האורניום לפלוטוניום שבמוטות הדלק בתהליכים כימיים פשוטים למדי.

הדלק הממוחזר נקרא MOX (Mixed OXide) – היות שמעורבים בו שני היסודות במצב תחמוצות: תחמוצת אורניום ותחמוצת פלוטוניום) וניתן להשתמש בו בכורי חשמל לאחר התאמות מסוימות. אולם אין בכך מחזור אמיתי של הדלק הגרעיני, הואיל וה־MOX המשומש לא יכול לעבור תהליך נוסף של מחזור, והוא נשלח להטמנה.

## טכנולוגיות הגרעין השונות

כמעט כל הכורים הפעילים כיום מתבססים על ביקוע האורניום בליבת הכור, ועל הוצאת החום באמצעות מים - אלו מקררים את הליבה מחד גיסא, ומאידיך גיסא מאפשרים חימום מים, המשמשים להנעת טורבינות לייצור חשמל (בדומה לכל תחנת כוח קונבנציונלית), מחוץ לליבה<sup>2</sup>. ברוב הכורים משתמשים לקירור במים רגילים, בניגוד למים כבדים, ולכן הם נקראים "כורי מים קלים" (Light Water Reactors). לכורים אלו שתי משפחות עיקריות: "כורי המים-בלחץ" (Pressurized Water Reactors), שבהם המים בליבה נשמרים בלחץ גבוה למניעת רתיחתם, ו"כורי מים רותחים" (Boiled Water Reactors), שבהם המים רותחים בליבה והאדים המשתחררים מעבירים את החום החוצה ישירות להנעת הטורבינה. הכורים משתי המשפחות האלו אינם יציבים לגמרי, ותהליכים בליבת הכור יכולים לגרום לריאקציות הגרעיניות להתגבר או להיחלש, כך שיש צורך בבקרה מתמדת על פעילות הכור לנטרול תנודות אלו ולשמירה על תפוקה אחידה של הכור. תהליך זה מתבצע באמצעות הכנסה והוצאה של מוטות בקרה אל בין מוטות הדלק הפעילים בליבת הכור. מוטות הבקרה עשויים מחומרים בולעי ניטרונים שמאטים את הפעילות הגרעינית בכור.

נהוג לסווג את הכורים על פי 'דורות'. דור הכורים הראשון הכיל את הכורים הניסיוניים בשנים 1950-1970. הדור השני כולל את הכורים המסחריים הראשונים בשנים 1970-1990, עמם נמנים גם הכורים בהריסבורג (אי שלושת המיילים), בצ'רנוביל ובפוקושימה, ובעצם גם רוב רובם של הכורים הפעילים כיום. הכורים המתוכננים והנבנים כיום נקראים דור שלישי, והם מתהדרים בתכנון פשוט יותר (המקטין את ההסתברות לתקלות ואת העלות הכספית), בנצילות גבוהה יותר ובבטיחות מוגברת. עד כה הופעל כור דור שלישי בודד ביפן בשנת 1996, וכורים נוספים מדור זה נמצאים כיום בבנייה.

בניסיון להקטין את הסיכון הכרוך בתפעול כורים גרעיניים, כורי הדור השלישי כוללים מערכות 'פסיביות'. אם בכורי הדור השני היה צורך באמצעים פעילים לתפעול השוטף של הכור ולטיפול במקרי חירום, כגון מערכות אלקטרו-מכניות, שסתומים, ומשאבות מים להתזת מי קירור, הרי שבכורי הדור השלישי מובנות מערכות בטיחות שאינן דורשות מגע יד אדם, הפעלה מכנית או חשמלית. המערכות מתבססות על עקרונות פיזיקליים להפעלתן גם בשגרה, ובעיקר במקרי חירום. כך למשל, כור המים-בלחץ האירופי נעזר באמבט מים הנמצא מעל לליבה, והמותקן כך שבמקרה חירום ישחרר את המים שיישפכו על הליבה לקירורה, וזאת מבלי להזדקק למשאבות, לשסתומים, למערכות בקרה, או להתערבות אנושית כלשהי.

### כור המים-בלחץ האירופי - EPR

כור זה, כור המים-בלחץ האירופי (EPR – European Pressurized water Reactor), ראוי לבחינה מעמיקה יותר עקב חשיבותו לפיתוח מגזר הגרעין האזרחי בעולם. הכור אמור היה להיות היהלום שבכתר היכולת הגרעינית האירופית. הכור תוכנן על-ידי החברות אָרֶבָה (Areva) ו-EDF הצרפתיות וסימנס הגרמנית, ומוגדר ככור דור שלישי +, בהספק גבוה של 1,600 מגה-וואט. יעדי התכנון היו פיתוח כור זול להקמה ולתפעול, בטוח ואמין, פשוט להקמה ולפירוק בסוף חייו, שיוצא לארה"ב, לסין, ולמדינות אחרות. למספר החלטות תכנוניות שנעשו בתחילת הפרויקט היו בהמשך השלכות קשות על האפשרות להשיג יעדים אלו, בין השאר הבחירה בהספק של 1,600 מגה-וואט, הגבוה ביותר מסוגו, וזאת כדי לשפר את הכלכליות של תפעולו; התקנת ארבע מערכות קירור מקבילות לצורך גיבוי; התקנת אזור מיוחד לאיסוף הנוזלים הלוהטים במקרה של התכת הליבה. נושאים אלו הביאו לעלייה משמעותית במורכבות הפיתוח וההקמה של הכור, ובעקבות זאת להתארכות לוחות הזמנים ולעלייה מתמדת בעלויות ההקמה. בניית הכור הראשון מסוג זה החלה באתר אולקילואוטו בפינלנד ב-2005 עבור חברת החשמל המקומית, ואמורה הייתה להסתיים ב-2009. רצף של תקלות וכשלים בתהליך ההקמה הוביל לאיחור בלוח הזמנים, וכעת מיועדת הבנייה להסתיים בסוף 2012. עלויות ההקמה שהוערכו בתחילה בכ-3.7 מיליארד אירו עומדות כעת על 6.4 מיליארד אירו, ומאיימות למוטט את חברת החשמל הפינית. כור שני מסוג זה נבנה בצרפת באתר פְּלֶמֶנְוִיל. גם כאן הערכות הזמנים הראשונות לסיום הבנייה בשנת 2012 נדחו בשנתיים לפחות. הערכות העלות בסך 3.3 מיליארד אירו גלשו עד כדי 5 מיליארד אירו כיום, ומומחים מזהירים כי אין זה סוף פסוק וכי העלות עלולה לגדול עוד.

הבעיות בהקמת הכורים הן מקיפות ורציניות. חלקן נוגעות לפן התכנוני, כמו בעיות בתכנון מערכת הבקרה הדיגיטלית שנתגלו ב-2008 אך עדיין לא נפתרו, וייתכן שידרשו תכנון מחדש של המערכת כולה. אחרות קשורות לפן הבנייה והייצור, כמו בדיקה שהעלתה כי רבע מהריתוכים בכיפת המגן של הכור הצרפתי אינם עומדים בתקן, או בעיות שנמצאו ביציקות הבטון גם בפינלנד וגם בצרפת. הבעיות הן כה קשות, עד שישנם כיום קולות<sup>3</sup> הקוראים לזניחת הפרויקט כולו, לפני שיגרור עימו את אָרֶבָה ו-EDF לאבדון (סימנס עזבה את הפרויקט עוד בשנת 2009).

## כורי הדור הרביעי

עם זאת, חוקרי הגרעין עמלים כיום על הדור הרביעי של הכורים, דור המתבסס על טכנולוגיות השונות מאלה של כורי המים של הדורות הקודמים. השאיפה היא לפתח טכנולוגיות שהן בטוחות יותר, פשוטות יותר ובעיקר זולות יותר, תוך ניסיון לפנייה לייצור המוני שיוזיל באופן משמעותי את עלויות הייצור. הדור הרביעי אינו סוג מסוים של כורים, אלא אוסף של טכנולוגיות שונות הנמצאות כיום בשלבי בחינה והוכחה שונים, שישנה תקווה כי יביאו לשיפורים שצוינו לעיל.

אחת הטכנולוגיות הנבחנות במסגרת זו היא כור מצע הכדוריות (pebble bed reactor) שהוזכר מספר פעמים כמועמד ליישום בישראל. בכור מסוג זה מונחות בליבה אלפי כדוריות גרפיט בגודל כדור טניס שמשוקעים בהן חלקיקי אורניום זעירים המצופים בקליפה קֶמֶית למניעת דליפת תוצרי הביקוע לסביבה. כורים מסוג זה פועלים בטמפרטורות גבוהות הרבה יותר מאשר כורי המים המקובלים. החום הרב מסולק מהליבה באמצעות גז אדיש (אינרטי) כגון הליום או חנקן. בגלל החום הרב יש להקפיד ולמנוע כניסת חמצן לליבת הכור, מאחר שאירוע כזה יגרום לשֶרְפָה של כדוריות הגרפיט. לטכנולוגיה זו יתרון בכך שהיא יציבה מיסודה - אם הריאקציות הגרעיניות מתגברות, עולה הטמפרטורה בליבה והפיזיקה של התהליכי הביקוע מביאה להיחלשות הריאקציות ולחזרה למצב נורמלי. כך מושג יתרון בטיחותי פסיבי משמעותי. כורים מטכנולוגיה זו אמורים להיות פשוטים יותר לתפעול, עם פחות חלקים נעים, בטוחים יותר ויעילים יותר מהכורים הנוכחיים. במעבדות הפיתוח אף קיים תכנון ליחידה אטומה שתוכל לספק חשמל כמה עשרות שנים ללא צורך בתחזוקה. יחידה שכזו תישלח אל אתר היעד ותספק חשמל במשך עשרות שנים, ולאחר סיום הפעולה תיאסף על-ידי היצרנית, תפורק ותנוטרל. אולם יש לזכור שהפגיעה הקטנה ביותר באטימת הכור, פגיעה שבכור רגיל מביאה לדליפה קלה, יכולה לאפשר כניסת חמצן לליבה ולגרום לשֶרְפָה בעלת השלכות נרחבות.

טכנולוגיה נוספת הנכללת במסגרת כורי הדור הרביעי היא כורי דגירה 'מהירים'. בטכנולוגיה זו נעשה שימוש בניטרונים מהירים יותר מאשר בכורי הדור השלישי, ולכן נקראים הכורים 'מהירים'. השימוש בניטרונים מהירים מאפשר להתמיר חומר בלתי בקיע כגון אורניום-238, לחומר בקיע, כך שהכור יוצר יותר חומר 'דלק' בקיע בתהליך מאשר זה שהוא מכלה בו. מסיבה זו נקראים כורים אלו "כורי דגירה" (באנגלית breeder משמעו לגדל, או להתרבות). זכור, האורניום הבקיע - אורניום-235 - הוא רק 0.7% מהאורניום המופק במכרה, כך שלכור המסוגל להתמיר את 99.3% הנותרים לחומר דלק בקיע יש יתרון בעולם שמאגרי האורניום הזול בו הולכים ואוזלים. יתרון נוסף של כורי הדגירה הוא יכולתם להשתמש גם בפסולת (הדלק המשומש) של הכורים הנוכחיים כחומר דלק. לפחות בתאוריה, כור כזה יכול לפתור את הצורך באכסון ארוך טווח לפסולת הגרעינית. אולם במציאות כורי דגירה אלו עדיין רחוקים מיישום כלכלי. דוגמה קיצונית לכך הוא הכור הגרמני הניסיוני SNR-300, שליד העיר קלקר במערב גרמניה. לאחר 19 שנות פיתוח והקמה, והשקעה של 3.6 מיליארד אירו, הוא נזנח ופורק עוד לפני שהספיק לפעול ולו יום אחד.

כיום ישנם מספר כורים ניסיוניים פעילים מהדור הרביעי, אך טכנולוגיות אלו נמצאות עדין בתהליכי פיתוח. במסגרת הדור הרביעי נכללות טכנולוגיות רבות ומבטיחות, אך אלו מלוות בבעיות חדשות שיהיה עלינו ללמוד ולפתור. בכל מקרה, גם אם כורים אלו יוכלו לספק פתרון אמתי לבעיות האנרגיה בעולם, טווח הזמן המוערך עד ליישום מסחרי של כורים מהדור הרביעי נע בין 20 ל-50 שנים, ולכן הם אינם יכולים לבוא בחשבון כחלק מפתרון הבעיות העכשוויות במשק האנרגיה הגלובלי.

## היתוך גרעיני

עד כה נדונו הטכנולוגיות המשתמשות באנרגיית הביקוע של אטומים כבדים (כדוגמת אורניום) לאטומים קלים יותר. אך ישנה אפשרות נוספת להשגת אנרגיה גרעינית, והיא באמצעות היתוך של מספר אטומים קלים (כמו מימן) לאטום כבד יותר (כמו הליום). כורים אלו נקראים כורי היתוך, ולמעשה הם מיישמים על פני כדור הארץ, ובאופן מבוקר, את התהליכים הקורים בליבת השמש ומספקים את האור והחום המאפשרים את החיים על פני כדור הארץ. היתרונות הגדולים של כורי היתוך הם העובדה שמימן והליום אינם רדיואקטיביים, שהסכנה בתאונות בכורים אלו נמוכה יחסית, וכן שקיים שפע מימן על פני כדור הארץ (לא כגז חופשי, אלא כחלק ממולקולת המים) - ומכאן ההבטחה לשפע אין־סופי כמעט של אנרגיה נקייה.

טכנולוגיית ההיתוך נמצאת בשימוש מאז שנות ה־40, עת פותחו פצצות המימן. אך הניסיון לייצר תגובת היתוך מתמשכת ונשלטת לאורך זמן, באופן שיאפשר את איסוף החום הנפלט לצורך ייצור חשמל, לא צלח עד היום. ישנן כיום שתי טכנולוגיות עיקריות ליישום היתוך גרעיני: האחת, משתמשת בשדות מגנטיים אדירים כדי ללכוד מימן בטמפרטורות של עשרות מיליוני מעלות בתוך כור בצורת כעך (טורואיד) הנקרא "טוקמק" (Tokamak), ראשי תיבות ברוסית של "תא טורואידלי בעל סלילים מגנטיים". השנייה משתמשת במתקני לייזר אדירים המרכזים פולס קצר של לייזר בעוצמה רבה אל בועת מימן זעירה. כיום ישנם שני מרכזי פיתוח בין־לאומיים המתחרים על היישום המוצלח של שתי טכנולוגיות אלו – ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), בטכנולוגיית טוקמק המוקם בצרפת ואמור להתחיל לפעול ב־2018, וה־National Ignition Facility בארה"ב המשתמש בטכנולוגיית הלייזרים, וניסויים ראשונים בו בוצעו כבר ב־2010. אולם שתי טכנולוגיות אלו הן עדיין ניסיוניות וכיום עדיין לא ברור כלל כיצד תיאסף האנרגיה הנוצרת בתהליכי ההיתוך לצורך ייצור חשמל. ההערכות האופטימיות הן שכורי הדגמה ראשונים לייצור חשמל יפעלו באמצע שנות ה־30 של המאה הנוכחית. עם זאת, טכנולוגיה זו התאפיינה עד היום באין־ספור תקלות, עיכובים וכשלים טכניים, כך שישנו סיכוי גדול שהייצור יתאחר בעשור או שניים מעבר לתחזית.

ראוי לציין שתי נקודות חשובות בדיון על היתוך גרעיני. ראשית, זו אינה טכנולוגיה נקייה. אמנם ריאקציית ההיתוך הגרעיני עצמה אינה מפיקה חומרים רדיואקטיביים, אך בתהליך איסוף האנרגיה סופגים חלקי המבנה של הכור קרינה ונעשים רדיואקטיביים. נוסף על כך, הקרינה פוגעת בחוזקם המבני ויש צורך להחליפם כל כמה שנים. מכאן שתפעול כור שכזה ייצור זרם מתמיד של חומרים רדיואקטיביים שידרשו טיפול ואכסון ארוכי טווח. בעיה שנייה היא שכמות האנרגיה, בטכנולוגיה המפותחת כיום, אינה בלתי מוגבלת. הטכנולוגיה הנוכחית משתמשת באיזוטופ של מימן הנקרא טריטיום, והוא נדיר ביותר על פני כדור הארץ. ניתן לייצר טריטיום מליתיום, אך גם זה אינו מצוי בשפע. לסיכום, טכנולוגיית ההיתוך עדיין רחוקה עשרות שנים מיישום כלכלי, וגם לכשיופיעו כורים מסחריים - האנרגיה שהם יספקו לא תהיה נקייה, ולא תהיה בלתי מוגבלת.

## אנרגיה גרעינית ובריאות הציבור

בהקמת כורים גרעיניים נבחנות בכלים המקובלים ההשפעות הבריאותיות, הרדיולוגיות והלא־רדיולוגיות של הפעילות השוטפת על הציבור. הכורים מתוכננים כך שהקרינה הנפלטת מהם תהיה ברמות נמוכות ביותר, שלא יגרמו שינוי של ממש לבריאות הציבור. כך למשל, תקן הקרינה המקובל עלול להעלות את ההסתברות לסרטן בקרב אוכלוסייה שכנה בלא יותר מאשר 0.005% בשנה, רמה הנמוכה בהרבה מסיכונים רבים אחרים שאנו חשופים אליהם, כגון עשן מכוניות או חומרים כימיים הנפלטים ממוצרים הנמצאים בשימוש יום־יומי בבית ובמשרד.

אולם לאחרונה עלו ממצאים מטרידים, המצביעים על כך שישנו פער בידע על אודות ההשפעות הבריאותיות של פעילות הכורים הגרעיניים. שני מחקרים אפידמיולוגיים<sup>4</sup> שפורסמו בשנים 2007-2008, האחד בחן את סביבותיהם של 16 הכורים הגדולים בגרמניה, והשני בחן נתונים על אודות פעילותם של 136 כורים במדינות שונות בעולם, מצאו עלייה בסיכון ללוקמיה, בעיקר בקרב ילדים החיים בסביבת כורים גרעיניים.

מעבר לבעייתיות של השפעות בריאותיות אלו, מדאיגה ביותר העובדה כי לא ברור מנגנון ההשפעה של הכורים על בריאות הילדים. במסגרת הידע הקיים כיום לא מוכרים מנגנונים המאפשרים השפעה שכזו בכורים תקינים. מכאן שישנן השפעות נוספות, אולי של קרינה, אולי של חומרים אחרים המשמשים בפעילות הכורים הגרעיניים, שאינן מוכרות כיום ברפואה. המשך הפיתוח של כורים חדשים ללא הבנת המנגנונים הללו, מעלה חשש לפגיעה גוברת באוכלוסיות שכנות בעתיד.

## הגרעין כאנרגיה נקייה

האטרקטיביות המחודשת של נושא הגרעין האזרחי בעולם ובישראל נובעת מכך שהביקוע הגרעיני אינו כרוך בתהליך שרפה, ולכן אינו פולט לאטמוספירה גזים רעילים וחלקיקים מסוכנים. במיוחד מושכת העובדה שבתהליך הביקוע לא נפלט פחמן דו-חמצני, שהוא גז חממה הגורם לשינויי האקלים הגלובליים שאנו חווים. מכאן, הגרעין האזרחי נתפס כמקור אנרגיה 'נקי' שיאפשר לאנושות להקטין את פליטת גזי החממה, ללא צורך בשינוי מהותי באורח החיים, ותוך המשך מגמת הגידול בביקוש לאנרגיה. אולם בבחינת תהליך הפקת האנרגיה המלא, הכולל את כריית האורניום, עיבודו, העשרתו, הובלתו ברחבי הגלובוס, והטיפול בו לאחר השימוש, ובהכללת תהליכי הנטרול של הכורים הגרעיניים לאחר תום חייהם, מתגלה כי לחשמל המיוצר מאנרגיה גרעינית יש השפעות סביבתיות רבות. אלה כוללות חומרים רעילים ואבק ובוצה רדיואקטיביים הנפלטות ממכרות וממפעלי העיבוד של האורניום, דרך דליפות קלות עד חמורות של חומרים רדיואקטיביים במהלך פעילות הכור, וכלה בדליפות נוספות המתגלות באתרי אכסון הפסולת הרדיואקטיבית. נוסף על כך, התהליך הכולל של ייצור החשמל מאנרגיה גרעינית גורר פליטות גזי חממה בכמות מסוימת, העולה על רוב מקורות האנרגיה המתחדשת<sup>5</sup>. ישנן אף טענות<sup>6</sup> על כך שתוך שנים ספורות יאזלו מרבצי האורניום העשירים בעולם, ומיצוי האורניום מהעפרות הדלילות שיוותרו ידרוש אנרגיה רבה ויגדיל בכך את פליטת גזי החממה הקשורה בייצור חשמל בכורים גרעיניים, עד כדי כך שתשתווה לפליטה הנגרמת בייצור חשמל בטורבינות גז טבעי.

בעיה סביבתית נוספת הרלוונטית לישראל היא צריכת המים של כורים גרעיניים. עקב מגבלות טכניות, טמפרטורת העבודה של הטורבינה המייצרת חשמל בכור גרעיני היא נמוכה יחסית (כ-300°C), לעומת כ-500°C-700°C בתחנות פחם, וכ-1,200°C בתחנות גז). חוקי התרמודינמיקה קובעים כי ככל שטמפרטורת העבודה נמוכה יותר, כך יורדת נצילות הטורבינה. משמעות הדבר היא שכדי לייצר את אותה כמות חשמל, כור גרעיני דורש יותר חום. עובדה זו אינה מטרידה את מהנדסי הגרעין מאחר שהדלק הגרעיני מייצר כמויות אדירות של חום. אולם כתוצאה מכך נדרשת כמות משמעותית של מים לקירור הכור ולסילוק החום העודף, כמות הגדולה בכ-25% מהנדרש לתחנה בהספק דומה שמופעלת על ידי פחם.

בסופו של דבר, בהתייחס לעקרונות הקיימות (sustainability) הקוראים לתהליכים מעגליים שאינם דורשים כריית משאבים מתמדת ולא פולטים גזים רעילים או פסולת, הרי שהחלפת השימוש בדלקים מאובנים לייצור חשמל באנרגיה גרעינית, משמעה החלפת בעיית פסולת אחת (גזי החממה המצטברים באטמוספירה) בבעיית פסולת אחרת (פסולת גרעינית שתמשיך להטריד את בנינו ומאות דורות אחריהם), ואין בה כדי לפתור את הבעיות הסביבתיות הכרוכות בייצור החשמל.

## פתח דבר: אנרגיה גרעינית – מבוית סתום

נוסף על כך, לא נפתרו בעיות סילוק הפסולת ורגישותה הגבוהה של טכנולוגיה זו לתקלות. כיום, אף תאגיד אנרגיה פרטי אינו מסתכן בהקמת תחנת אנרגיה גרעינית חדשה ללא סבסוד וערבויות ממשלתיים. ניכר כי תחנות אנרגיה גרעיניות חדשות מוקמות בייחוד במקומות שנכרתה בהם "ברית לא קדושה" בין הממשלה לבין תעשיית האנרגיה.

עד כה מומנו תחנות הכוח הגרעיניות בסבסוד ציבורי נרחב. לגבי גרמניה, התחשיב מסתכם בלמעלה מ־100 מיליארד אירו, ויחס מועדף זה המוענק לתעשיית הגרעין נמשך גם כיום. למעשה, בשל סובסידיות אלה, המיליארדים שהופרשו לטובת סילוק פסולת גרעינית ופירוק תחנות כוח גרעיניות משמשים את החברות כתמרון לקבלת פטור ממס. נוסף על כך, אחריותן המשפטית של החברות המפעילות מוגבלת ל־2.5 מיליארד אירו, שהם חלק מזערי מהעלויות שיווצרו במקרה של תקלה גרעינית בסדר גודל בינוני. מכל אלה עולה שאנרגיה גרעינית היא גם יקרה וגם מסוכנת.

מעבר לטיעונים השגורים בנוגע לאנרגיה גרעינית, ישנם כמה טיעונים חדשים: ראשית, סכנת הפצתם של כלי נשק גרעיניים עומדת ביחס ישיר למספרן של תחנות האנרגיה הגרעיניות ברחבי העולם. חרף מאמציה של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית לפקח על עניין זה, לא ניתן להפריד באופן מוחלט ובצורה שלא ניתן להתגבר עליה בין שימושים אזרחיים בגרעין לבין שימושים צבאיים בו. הדוגמה העדכנית ביותר לכך היא איראן. בסופו של דבר, לא ניתן לכפות פיקוח על גורמים שאינם מעוניינים בו. עם התרחבות השימוש באנרגיה גרעינית גדל הצורך בבניית מתקנים למחזור פסולת מכורים גרעיניים ומכורי דגירה מהירים להפקת דלק גרעיני, וכך נפתח פתח להפצת פלוטוניום. מצב זה יוביל לייצור כמויות אדירות של חומר בקיע העלול לשמש להכנה

כל אדם העוקב אחר ההצהרות הנשמעות מפעם לפעם על תחיייתה של האנרגיה הגרעינית עלול לקבל את הרושם שמספרן של תחנות הכוח הגרעיניות החדשות גדל במהירות עצומה ובקביעות. לאמתו של דבר, נתונים סטטיסטיים עדכניים יותר מראים כי ישנם 60 כורים הנמצאים בבנייה – רובם בסין ואחרים ברוסיה, בהודו, בדרום קוריאה וביפן – וכי בארה"ב קיים רק פרויקט עכשווי אחד להקמת כור גרעיני. אלא שגם רשימה זו (VGB Power Tech) כוללת פרויקטים רבים שהושקו לפני זמן רב ומעולם לא הושלמו, ומשום כך הם למעשה לא יותר מאשר עיי חורבות.

יתר על כן, נכון להיום ישנן הצעות להקמתם של כ־160 תחנות כוח גרעיניות חדשות עד לשנת 2020, בהן 53 בסין לבדה ו־35 בארה"ב. אחרי מדינות אלה נמצאות ברשימה דרום קוריאה ורוסיה. ביבשת אירופה פותחת את הרשימה בריטניה עם הצעות ל־8 פרויקטים חדשים, ואחריה מופיעות איטליה, שווייץ, פינלנד, רומניה וליטא. צרפת, המעוניינת להביא לעולם תחנות כוח גרעיניות, מתכננת כעת כור חדש אחד בלבד. למרבית מדינות אירופה אין שום תכניות קונקרטיות בתחום הגרעין.

למעשה, מספרן של תחנות הכוח הגרעיניות בעולם יורד בהתמדה. כיום ישנם עדיין 436 כורים פעילים. אולם ב־15 או 20 השנים הבאות יהיה מספרן של תחנות הכוח שיצאו מכלל שימוש בגלל התיישנות גדול מזה של התחנות החדשות שיתחילו לפעול. אין ספק כי לא כל הצהרות הכוונות ייושמו. ככל שמשק האנרגיה ייפתח לתחרות חופשית, כך יקטן חלקה של האנרגיה הגרעינית.

עלות הקמתן של תחנות כוח חדשות גבוהה משהייתה אי פעם. כך למשל, עלות בנייתה של תחנת הכוח הגרעינית החדשה באולקילואטו שבפינלנד כבר תפחה מ־3 לכ־5.4 מיליארד אירו, אף על פי שאפילו מעטפת המבנה טרם הוקמה.



יש לייצא את האנרגיה העודפת למדינות אחרות במחירים נמוכים במיוחד. בתוך האיזולת יש אפוא שיטתיות.

בכל דרך שנבחר כדי לבחון את העניין נגלה כי לאנרגיה הגרעינית אין פוטנציאל לתרום תרומה מכרעת להגנה מפני שינויי האקלים, וכי היא אינה נחוצה כדי להבטיח את אספקת החשמל. ההפך הוא הנכון. הגורמים המעוניינים לקדם את פיתוח האנרגיה המתחדשת כדי להפיק באמצעותה 100% מביקוש החשמל צריכים להתנגד להקמתן של תחנות כוח גרעיניות חדשות כמו גם להארכת תוחלת חייהן של התחנות הישנות. בניגוד לטענות הנשמעות על האנרגיה הגרעינית, לא מדובר כלל ועיקר באסטרטגיית ביניים הולמת המובילה לעידן אנרגיית השמש.

ברלין, ינואר 2010  
ראלף פוקס (יו"ר קרן היינריך בל)

של פצצות - תסריט אימים של ממש! שנית, הארכת תוחלת החיים של תחנות כוח גרעיניות קיימות תתקע מקלות בגלגלי המאמצים לפתח אנרגיות מתחדשות, שלא לדבר על הקמת תחנות חדשות. הטענה כי האנרגיה הגרעינית והאנרגיה המתחדשת משלימות זו את זו, אינה אלא מיתוס. לא רק משום שטכנולוגיות אלה מתחרות זו בזו על כמות זעומה של השקעות הון ושל קווי מתח, אלא גם כיוון שתחנות הכוח הגרעיניות, שהפעלתן מתמשכת ולא גמישה, מגבילות את פוטנציאל הגידול בייצורה של אנרגיה מתחדשת, ובייחוד את זה של אנרגיית הרוח. בגרמניה, כאשר נושבת רוח חזקה וצריכת החשמל נמוכה, הביקוש לחשמל מקבל מענה כמעט מלא מחשמל המופק באמצעות אנרגיית הרוח. מסיבות כלכליות, כמות החשמל המופקת בתחנות האנרגיה הגרעיניות (בדומה לתחנות הפחם) אינה מצטמצמת בהתראה קצרה, ולכן

## מבוא: פורסמארק – 22 דקות של פחד ואימה

רגעים לא היה מידע זמין לגבי המנח של מוטות הבקרה המסדירים את תגובת השרשרת בליבת הכור, ואף חסר מידע על גובה מי הצינור במכל הכור. בסופו של דבר הצליח אחד הטכנאים להתניע את מנועי הדיזל שלא פעלו קודם לכן. הוא עשה זאת באמצעות לחיצה ידנית על כפתור שחידש את אספקת החשמל למערכת המדידה המרכזית ולמערכת הבטיחות. רק אז באה אל קצה הפעלתו העיוורת של הכור.

עד מהרה איתרה רשות הפיקוח על הגרעין של שוודיה את הסיבה המרכזית להחרפת התקלה בכור המים הרותחים "פורסמארק 1": תקלה בשני ממירי זרם חילופין. התקלה גרמה לכך ששניים מתוך ארבעה גנרטורים שיועדו לגיבוי בשעת חירום לא נדלקו כפי שהיו אמורים. עם זאת יש לציין כי בשל קריסתם של חלקים חשובים במערכת הבקרה של הכור, היה קשה ביותר לשחזר בדיעבד את מהלך העניינים המדויק. ההיבט המדאיג ביותר היה שמומחים לא יכלו להסביר מדוע מתוך ארבעה ממירי זרם חילופין זהים, הצליחו שניים להפעיל את שני הגנרטורים הנותרים בדרך הרגילה, ולא הגיבו לקפיצת המתח החריגה באספקת החשמל לכור באותו האופן שבו הגיבו שני הממירים שכשלו. הדבר היחיד שהוברר בוודאות הוא שאלמלא עשו זאת, סביר להניח שהכור היה יוצא לגמרי מכלל שליטה. במקרה כזה, כל ארבעת הכבלים של מערכת הבטיחות של הכור היו נפגעים, ומצב כזה – כפי שהודתה רשות הפיקוח על הגרעין של שוודיה – היה מוביל ל"ניתוקה של אספקת החשמל במערכת החירום כולה, ולתרחיש שאינו נמצא בהוראות הבטיחות של הכור" (Society for Plant and Reactor Security, 2006). בספרי ההדרכה אין כל מענה לתקלות כאלה, לא נקבעו שום תקנות להתמודדות איתן, וממילא לא הייתה כל אפשרות לעשות זאת.

ב-25 ביולי 2006, בשעה 13:19, גרמו חשמלאים שביצעו עבודת אחזקה מחוץ לתחנת הכוח הגרעינית המרכזית של שוודיה בכפר פורסמארק לקצר חשמלי בתחנת משנה. תקלות כאלה מתרחשות חדשות לבקרים בכל מקום שבו טורבינות ענק סובבות על צירן וכמויות גדולות של חשמל מועברות מתוך תחנות כוח גדולות המורכבות מכמה יחידות. מנגנוני הבטיחות המותקנים בכורים גרעיניים מתוכננים להתמודד עם תקלות כאלה ברשתות חשמל סמוכות, ולכן בימים כתיקונם אין הן גורמות לבעיות קשות בכורים. בדרך כלל, הכור ניתק מרשת החשמל הפגומה לפני שהקצר שאירע מחוץ לכור חודר אל מערכת החשמל שבתוכו. במקרה הגרוע ביותר הכור מכבה את עצמו אוטומטית, והיות שדעיכתו של תהליך ייצור החום על-ידי החומר הרדיואקטיבי שבליבת הכור נמשכת כמה ימים, הכור מועבר בהדרגה למצב לא קריטי באמצעות מערכות קירור למצבי חירום.

אך יום שלישי ההוא בפורסמארק לא היה אחד מאותם "ימים כתיקונם" כלל ועיקר. היות שהניתוק מרשת החשמל התבצע לאט מדי וכיוון שהתקלה – שלא הייתה יוצאת דופן בפני עצמה – הציתה סדרה של סיבוכים על גבי סיבוכים, קרסה מרביתה של מערכת החשמל ביחידה 1 של כור המים הרותחים. שניים מתוך ארבעת הגנרטורים הפועלים על דיזל, שאמורים לספק חשמל למערכת הבקרה של הכור ולמשאבות הקירור לשעת חירום במקרה מסוג זה, לא נדלקו. במשך 22 דקות מורטות עצבים, במהלך השלבים הקריטיים ביותר של מצב החירום, נותרו הצגים בחדר הבקרה כבויים. חיישני המדידה לא שלחו אותות כלשהם על תגובת השרשרת הגרעינית בליבת הכור. אפילו חלקים ממערכת הכריזה שנועדה להשמיע אזעקה ולהורות על פינוי נותרו דוממים. באותם

## מיתוס ראשון: אנרגיה גרעינית היא בטוחה

הגיעו למסקנה המזעזעת הבאה: התוצאות היו עלולות להיות גרועות בהרבה, ובכל רגע עלולים להתממש תרחישים חמורים עוד יותר.

### הסכנה הנלווית לשכחה

חסידיה של האנרגיה הגרעינית בארצות מתועשות רבות מתענגים בבירור על מה שהם מכנים "הדה־אידאולוגיזציה" של הוויכוח הניטש על השימוש באנרגיה זו. נוכח שינויי האקלים ובהינתן מחסור גובר והולך במקורות של דלק מאובנים לצורך הפקת אנרגיה, נטען כי הטונים נעשו "רגועים יותר והיגיוניים יותר". תומכי הפקת החשמל מאנרגיה גרעינית הם הראשונים לצהול על הנמכת הלהבות, אלא אם במקרה יש בחירות באופק. בעשורים האחרונים התרחק הדיון הפוליטי־חברתי מסוגיות הבטיחות היסודיות של האנרגיה הגרעינית וכעת הוא מתמקד בשאלות הנוגעות לכלכלה, להגנה על האקלים, לשימור המשאבים ולשמירה על אספקת האנרגיה. מסיבות אלה, תחושת הציבור היא שאנרגיה גרעינית תוכל להפוך לטכנולוגיה אחת מני רבות, ששאלת השימוש בה לא תהיה כרוכה אלא בבחינה של כל השיקולים, באותו אופן שבו בוחרים בין תחנות כוח שיפעלו על פחם לבין תחנות שיפעלו על גז טבעי.

ביקוע גרעיני מתמזג אפוא יותר ויותר במה שכלכלנים הגדירו כ"משולש הדיון הפוליטי על אנרגיה", המורכב מהיתכנות כלכלית, משימור אספקת האנרגיה ומההשפעה על הסביבה. אמנם ההגנה מפני אסונות אינה אחת ממטרותיה של האנרגיה הגרעינית, אך הדבר אינו מעניין במיוחד את חסידיה של טכנולוגיה זו. נהפוך הוא, הם מרוצים מאוד. תומכי האנרגיה הגרעינית מצליחים יותר ויותר להעלים את הפוטנציאל הייחודי שיש לטכנולוגיה זו לגרום לאסון. הם מסתירים אותו מאחורי מסך של טיעונים, שלכולם מטרה עיקרית אחת: להסיח

מה שאירע בחופה המזרחי של שוודיה באמצעו של אותו יום בקיץ 2006 היה תזכורת גורלית לשני אירועים המטילים כמה עשורים צל מאיים על השימוש באנרגיה גרעינית למטרות אזרחיות: אסון תחנת הכוח הגרעינית ליד הריסבורג שבארה"ב (במאי 1979) והאסון בכור בצ'רנוביל שבאוקראינה (באפריל 1986). היעדר כמעט בלתי נתפס של תכנון, התקנה שגויה של רכיבים חשובים, תחזוקה רשלנית שאין עליה מחילה וחשוב לא פחות: אמון נאיבי בטכנולוגיה רגישה ביותר – דבר מכל אלה לא היה חדש לנו; לא רק בגלל הריסבורג וצ'רנוביל אלא גם בגלל המתקן למחזור פסולת גרעינית בסלֶפֶלְד שבאנגליה, בגלל כור הדגירה המהיר היפני מוֹנְג'וּ, בגלל המתקן למחזור פסולת גרעינית בטוקאימוֹרָה שביפן, בגלל אחת הברכות לאגירת דלק משומש בתחנת הכוח הגרעינית של הונגריה בעיירה פאקס, וגם בגלל הכורים הגרעיניים הגרמניים בֶּרוֹוֶנסְטֶיטֶל ובֶקְרִימְל שעל גדות נהר האלבה. טעויות נעשות בכל מקום שבני אדם עובדים בו. התמזל מזלנו ולא כל שרשרת טעויות שהוגדרה לאחר מעשה כ"בלתי ניתנת להסבר" הובילה לתוצאות כה רעות אסון כפי שאירע באוקראינה ובמדינות השכנות לה בשנת 1986. האירוע ב"יחידה 1" של תחנת הכוח הגרעינית בפורסמארק, שנמצאת במרחק בטוח של 100 ק"מ מסטוקהולם, בירת שוודיה, הסתיים בסך הכול ב־22 דקות של פחד ואימה לצוות הכור ששהה באתר, והעלה כמה ספקות רציניים לגבי מהימנותה של חברת וֶאָטֶנְפֶל שהפעילה את הכור. מאז אותו זמן התעוררו סימני שאלה נוספים בנוגע לתאגיד הצפוני שבעלות המדינה, במיוחד בכל הנוגע למתקנים הגרמניים שבֶּרוֹוֶנסְטֶיטֶל ובֶקְרִימְל. לאחר האירוע הפך "פורסמארק" לשם נרדף למה שנתפס כתאונה הגורלית ביותר בכור גרעיני אירופי מאז אסון צ'רנוביל. מומחים מבית ומחוץ שניסו לשחזר את אירועי אותו יום

בינתיים, קהילת האנרגיה האטומית האירופית (Euratom) ועשר מדינות המייצרות אנרגיה גרעינית נוקטות גישה ניטרלית כלפי כורים מהדור הרביעי, האמורים להחליף בעתיד הרחוק את הכורים הקיימים או כורים מתוכננים. אפילו לגבי כורים מדור הבנייה שאחרי הדור הבא, שיצוידו במערכות בטיחות חדשניות, כבר לא נטען שהם חסינים מפני תקלות אנוש, בעוד הכורים מדורות שקודמים להם עדיין מוגדרים כך. אך כורים אלה יהיו חסכוניים יותר, ופחות מתאימים לניצול לצרכים צבאיים, ובשל כך הם יתקבלו ביתר קלות בקרב הציבור הרחב. באופן רשמי, הכורים הראשונים מסוג זה עתידים לספק חשמל בסביבות שנת 2030. באופן לא רשמי, אפילו כמה מחסידיה הבולטים ביותר של האנרגיה הגרעינית, כמו נשיאה לשעבר של חברת החשמל הצרפתית "אלקטריסיטה דה פראנס" (להלן EDF), פרנסואה רוסלי, אינם מעריכים שההפעלה המסחרית של כורים אלה תחל לפני שנת 2040 או 2045 (ר' Schneider, 2004).

בהיעדר הבטחה שהדור הרביעי של כורים יהיה בטוח לחלוטין, קברה תעשיית האנרגיה הגרעינית בשקט את הערובות שניתנו בעבר. ובינתיים, אפילו בשימוש יום-יומי אנו נאלצים להסתפק בבטיחות יחסית. באופן קונקרטי יותר, עניין זה מסתכם בלא יותר מאשר בטענה הגורפת שהדיוטות בתחום הפוליטי-עיתונאי ששים להפיצה, שלפיה "הכורים שלנו הם הבטוחים ביותר בעולם". טענה זו זכתה לאהדה מיוחדת בגרמניה, אך מעולם לא הוצגה כל ראייה בתקיימא המבססת את תוקפה. אין זה מתקבל על הדעת שתחנות הכוח הגרעיניות, שהקמתן החלה בשנות ה-60 וה-70 ושמתבע הדברים תוכננו בשנות ה-50 וה-60 באמצעות הידע והטכנולוגיות של תקופות אלה, יוכלו לספק כיום רמת בטיחות משביעת רצון. בכל מקרה, כל עוד איש אינו מונע מתומכי האנרגיה הגרעינית בצרפת, בשוודיה, בארה"ב, ביפן או בדרום קוריאה להשמיע אותה טענה לגבי הכורים במדינותיהם שלהם, הם יחיו בשלום עם הסיסמאות שלהם. למעשה, אין בנמצא ולו קהילה גרעינית אחת, בכל מדינה שהיא, שאינה גורסת כי תחנות הכוח הגרעיניות במדינתה עומדות באמות המידה הבינלאומיות – או למצער טוענת כך בפומבי. בשל מגמת צבירת

את הדעת מסוגיות בטיחות יסודיות. התפתחות זו אינה מקרית, אלא תוצאה של אסטרטגיה המיושמת זה שנים רבות, בעיקשות ובכוונה תחילה, על-ידי המפעילות והיצרניות במדינות המובילות בתחום האנרגיה הגרעינית.

קמפיין מוצלח של הסחת הדעת יכול בהחלט לדכא את השיח הציבורי בנושא לזמן מה, אך הסבירות הנמוכה לכך שיתרחש אסון ענק אינה מפחיתה את הצורך בשיח כזה. סכנת האסון האולטימטיבי, דהיינו תאונה שתהיה חמורה יותר מ"האסון הגדול ביותר שניתן לדמיין" ושיש לה מענה במערכות הבטיחות, לצד העובדה שלעולם לא ניתן לשלול את האפשרות שתתרחש תאונה כזאת, היו ונתרו הסיבה המרכזית לזיכרון העקרוני הניטש על סוגיית האנרגיה הגרעינית. כל הטיעונים נגד אמצעי זה להמרת אנרגיה מבוססים על סכנה ממשית זו, ועל יסודה תתקבל או תידחה האנרגיה הגרעינית – ברמה האזורית, ברמה הלאומית וברמה הבינלאומית. מאז הריסבורג, ובמיוחד מאז צ'רנוביל, תלתה תעשיית האנרגיה הגרעינית את תקוותה כי בשלב כלשהו תזכה מחדש בתמיכתו של הציבור בטכנולוגיה זו בזכות הטענה המבטיחה שהכורים הגרעיניים חסינים מפני אסונות. כבר לפני 30 שנה הבטיחו יצרניות כורים כי המתקנים החדשים שהן מקימות יהיו "תחנות כוח גרעיניות בטוחות מעצם טבען". האמריקאים כינו כורים חדשניים אלה בשם "כורי נטישה" וקבעו כי בכורים אלה התכה של הכור או תאונה בדרגת חומרה דומה אינן אפשריות מבחינה פיזית הודות למה שכונה "מערכות בטיחות פסיביות". בזמנו אמר בהתלהבות מנהלה של חברה אמריקאית העוסקת בייצור כורים גרעיניים: "גם אם תתרחש התאונה הגרועה ביותר שניתן להעלות על הדעת, עדיין תוכל ללכת הביתה, לאכול צהריים, לתפוס תנומה, ואז לחזור בלי טיפת דאגה או בהלה" (ר' Miller, 1991). הודעה זחוחה זו נותרה עד היום כפי שהייתה גם כשהושמעה: צ'ק ללא כיסוי. כבר בשנת 1986 העלה היסטוריון הטכנולוגיה יואכים רֶדְקָאוּ את החשד שהדיבורים הללו, על כור "חסין מפני אסונות", הם "חלומות באספמיה שלעולם לא יתממשו ושמופצים בעתות משבר מתוך יומרות שווא" (Radkau, 1986). זהו המצב גם כיום.

נוספת תוריד את אופציית האנרגיה הגרעינית מסדר היום אחת ולתמיד. דבר אחד בטוח: איש באירופה או בארה"ב לא היה מדבר על "תחייתה של האנרגיה הגרעינית" או דן בהארכת תוחלת חייהם של כורים מתיישנים לו ב־25 ביולי 2006 לא שני ממירי זרם החליפין בכור בפורסמארק שבשוודיה היו נכשלים, אלא ארבעה, ואילו היה האסון הזה מתרחש דווקא בשוודיה, שקנתה לה יוקרה של מדינת טכנולוגיה עילית. במקרה כזה, לא זו בלבד שהיה צורך להתמודד עם סבלם של מיליוני בני אדם בצפון אירופה ובמערב, אלא שיבשת אירופה, שיש בה 130 כורים גרעיניים, הייתה מבלה שנים בשיקום פיזי ונפשי. נוסף על כך הייתה אירופה נאלצת להתמודד עם המפולת הכלכלית שתרחיש נורא כזה היה ממיט, ושהייתה מפילה על המשבר הפיננסי והבנקאי הנוכחי ומגמדת אותו. כל מדינה שנתח משמעותי מאספקת החשמל שלה תלוי באנרגיה הגרעינית הייתה נאלצת להתמודד עם הפסקות חשמל בהיקף שלא נראה כדוגמתו במרבית מדינות האיחוד האירופי במשך עשרות שנים. בתרחיש כזה הייתה נגרמת במקביל גם פגיעה מוגברת בסביבה, משום שרבות מתחנות הכוח שעדיין מופעלות בדלק מאובנים היו נאלצות לפעול 24 שעות ביממה, בניגוד לאופן שבו תוכננו לפעול. זאת כדי לפצות על המחסור בחשמל שהיה נגרם מהשבתת הכורים הגרעיניים בלחץ הציבור המוטרד. למרבה המזל לא הגיעו הדברים לידי כך בפורסמארק.

### השגרה המשכרת

ברי כי גם האנרגיה הגרעינית הרוויחה מההתפתחויות הטכנולוגיות בעשורים האחרונים, ואיש לא יכחיש זאת ברצינות. מאז שנבנו מרבית הכורים המסחריים הפועלים כיום בעולם חלה מהפכה בטכנולוגיית המידע והתקשורת. התפתחות זו הפכה את הבקרה ואת הפיקוח על כל תחנת כוח גרעינית, שהם חלק מהתפעול היום-יומי שלה, לשקופים ולמהימנים יותר. כשהכורים הישנים יותר הפועלים כיום היו בשלבי תכנון, המחשבים עדיין הופעלו באמצעות כרטיסים מנוקבים. מערכות הפעלה מודרניות הותקנו, ועדיין מותקנות, אפילו ברבים מהכורים המתיישנים. כיום ניתן גם להגיע באמצעות הדמיה וניסוי ממוחשבים להבנה טובה יותר של פעולתו

הנשק ב־15 או 20 השנים האחרונות, אפילו במזרח אירופה נשמעות יותר ויותר טענות על כך שהכורים שהקים המשטר הסובייטי עומדים בתקני הבטיחות המערביים או אפילו עולים עליהם במובנים רבים. למעשה, כיוון שאין כל הגדרה רשמית למשמעותן של המילים הללו, נראה כי המטר הכללי הנשמע ברחבי העולם הוא: "אין סיבה לדאגה".

למעשה, מפלס הדאגה במדינות רבות יורד, במיוחד לאחר שצמח דור של פוליטיקאים שעבורם תאונות כמו אלה שאירעו בצ'רנוביל או בהריסבורג לא היו אירוע משמעותי. על כן, ראוי לשאול מהו המחיר שיידרש המין האנושי לשלם עבור שלוות נפש מלאה בחזית הגרעין. השיח הציבורי בעקבות אסונות שנמנעו אך בקושי, כמו במקרה של פורסמארק שבשוודיה, נמשך לא יותר מכמה שבועות. לאחריהם עובר הדיון לוועדות מומחים ומתנהל רק מאחורי דלתיים סגורות. אילו השלכות יש לדבר על בטיחות האנרגיה הגרעינית ברמה הבינלאומית?

בעבר, אפילו תומכיה של האנרגיה הגרעינית ייחסו את רמת הבטיחות הגבוהה יחסית של הכורים הגרעיניים לעוצמתה של תנועת ההתנגדות לאנרגיה הגרעינית שפעלה במערב גרמניה לשעבר. תנועה זו פיקחה בספקנות רבה ולאורך זמן על תחנות הכוח הגרעיניות ונסמכה על מודעותה הגבוהה של האוכלוסייה במערב גרמניה לנושא זה. אם נקבל פרשנות זו, הרי שהשאלות הנוקבות שנשאלו והיווצרותן של "ציבור ביקורתי בעל מומחיות" הן שהבטיחו את הפיכתן של תחנות הכוח הגרעיניות לאתרי התעשייה בעלי אמצעי הבטיחות הנרחבים ביותר נגד קריסות ותאונות בהיסטוריה של הכלכלה. וגם כיום, הן כאלה בזכותן. לדאבון הלב, יש מקום לחשש שההפך גם הוא נכון: במקרים שבהם תשומת הלב הציבורית דועכת או שאין מאפשרים לה כלל להתקיים, כמו במשטרים רודניים, רמת הבטיחות יורדת.

המעוניינים להמשיך להשתמש באנרגיה גרעינית גם לאחר צ'רנוביל והריסבורג – כמו למשל ממשלת הקואליציה של הנוצרים-דמוקרטים (המפלגה הנוצרית-דמוקרטית) והליברלים (המפלגה הדמוקרטית החופשית) בגרמניה, שנבחרה בסתיו 2009<sup>7</sup> – צריכים בסופו של דבר לשאול את עצמם ברצינות אם הם אכן מעוניינים לעשות זאת עד שתאונה הרת אסון

אותה כ"מוצדקת ללא סייג מנקודת המבט הבטיחותית" (Frankfurter Rundschau, 12 באוגוסט 2005). וְלִטְר הוֹלְפֶלְדֶר, נשיא שדולת פורום האנרגיה הגרעינית של גרמניה ויושב הראש לשעבר של מפעילת האנרגיה הגרעינית E.ON, הצהיר בכל הרצינות כי הארכת תוחלת החיים של כורים "הפכה את אספקת החשמל לבטוחה יותר" (Berliner Zeitung, 9 באוגוסט 2005). הדבר המדהים ביותר בטענות כאלה הוא שמגזרים שונים באוכלוסייה, ובייחוד פוליטיקאים התומכים באנרגיה הגרעינית, כבר אינם מערערים עליהן. שהרי דרושה עזות מצח אמיתית כדי לטעון שכורים גרעיניים - בניגוד למכוניות ולמטוסים - נעשים בטוחים יותר ויותר ככל שהם מתיישנים. למרבה הצער, טענות אלה נוגדות לא רק את ההיגיון הבריא, אלא גם את חוקי הפיזיקה.

ארסנל הכורים העולמי "מזדקן". מאחורי מינוח הדיוטות זה מסתתר גוף ידע שלם - הנדסת חומרים ותורת המתכות - הכולל לא רק "סימני בלאי" פשוטים אלא גם שינויים מורכבים ביותר על פני השטח ובתוך רכיבי המתכת. מערכות הבקרה מתקשות לחזות ולזהות בזמן ובמהימנות תהליכים כאלה בתחום המיקרו של מבנים גרעיניים, ולצפות את השלכותיהם. זאת, בייחוד כאשר טמפרטורות גבוהות, לחץ מכני כביר, סביבה אגרסיבית מבחינה כימית וההפצצה המתמשכת של ניטרונים מביקוע הגרעין משפיעים כולם בעת ובעונה אחת על רכיבי המבנה שהגישה אליהם קשה ושנוגעים לסוגיית הבטיחות. בעשורים האחרונים התרחשו שוב ושוב מקרים של שיתוך (קורוזיה), של נזק מקרינה ושל היווצרות סדקים על פני השטח ובחיבורים המרותכים של רכיבים מרכזיים - אפילו מבפנים. לעתים קרובות נמנעו ברגע האחרון תאונות קשות הודות לגילוי הפגמים על-ידי מערכות הבקרה או בבדיקות שגרתיות שנערכו ברגעים של השבתת הפעילות ועריכת ביקורת. אולם נראה כי באופן חוזר ונשנה, חשיפתו של נזק חמור בזמן לא הייתה אלא עניין של מזל.

במדינות רבות הובילו תהליכי ליברליזציה והסרת הפיקוח ממשקי האנרגיה להחמרת המצב. בשל תהליכי הליברליזציה נדרשים הגופים המפעילים בכל אחת מתחנות הכוח להיות מודעים יותר לעלויות הכרוכות בכל

הפיזית של הכור ושל תהליכים מורכבים אחרים בהפעלתו היום-יומית הרגילה, ובפרט במקרים של תקלה. הבנה זו תורמת גם לדרגת בטיחות גבוהה יותר. מפעילי הכורים בוחנים כיום באמצעות הדמיה ממוחשבת תרחישי תקלה מורכבים שלפני 20 או 30 שנה אפילו לא ניתן היה להתוותם ולכן היו בלתי מוכרים לחלוטין. טכנאי בטיחות גם נהנים כיום מניתוחי הסתברות מתקדמים וממערכות ניסוי ובקרה מדויקות יותר, ואפילו הכורים הישנים יותר מצויידים בהדרגה באמצעים אלה. הגורמים המפעילים את הכורים גם טוענים שהם הפיקו לקחים מהריסבורג, מצ'רנוביל ומהתקלות השונות שאירעו ביפן. כדי לבסס טענה זו הם נוהגים להזכיר את איגוד מפעילות הגרעין העולמי, המרכז כיום תהליכי שיתוף מידע ומבטיח כי נתונים על תקלות יועברו במהירות לחברות בו. בשנת 2010 תהיה למפעילות כורים ברחבי העולם גישה לידע שנצבר בכ-13,000 שנות הפעלת כורים.

אף על פי כן ובניגוד למה שנטען, אין בכך בשום אופן כדי להבטיח שרמת הבטיחות של תחנות הכוח הגרעיניות תהיה גבוהה יותר. אמנם מאז שנת 1986 לא התרחשו תקלות שכללו התכה של ליבת הכור הגרעיני, אך תקריות כאלה יכולות בהחלט להישנות. התקלה בפורטמארק לא הייתה אלא יריית האזהרה הרועמת ביותר בתקופה האחרונה; יריות אזהרה נוספות נשמעו מאז בכורים הגרמניים בברונסבייטל ובקרמל, באירועים שבעקבותיהם כורים אלה לא סיפקו חשמל במשך כמה שנים. כשלושה רבעים מן הכורים בעולם זהים לאלה שהיו בשימוש בימי אסון צ'רנוביל. לפיכך, סביר בהחלט שתקלה רצינית תתרחש היום או בעוד 100 שנים ובידע המצטבר על 13,000 שנות הפעלת כורים אין כל ראייה שתסתור זאת. בשנת 1978 בהריסבורג, כאשר תעשיית האנרגיה הגרעינית התמודדה עם התקלה הראשונה של התכת ליבה בכור מסחרי, לגלגו מפגינים שָמְחו על השימוש בגרעין בגרמניה במנשרים שהפיצו על הבטחותיהם היהירות של טכנאי הגרעין בעניין בטיחותם של הכורים: "תקלה כל 100,000 שנים - איך שהזמן עובר!"

ברחבי העולם מתכננים להאריך את תוחלת חייהם של הכורים, והחברות המפעילות אותם, המעוניינות לקדם הארכה זו, מתארות

30 מ"ק מי קירור בשעה עד לבידוד הדליפה ולייצוב המצב (1998);

טיפול לקוי במידע הנוגע לבטיחות במתקן האנגלי למחזור פסולת גרעינית בסלפילד ובתחנת הכוח הגרעינית היפנית "טפקו" (2002/1999);

נזק חסר תקדים לרכיבי דלק גרעיני ב"יחידה 3" של הכור הצרפתי "קאטנום" (2001);

פיצוץ חמור של מימן בצינור בתוך כור המים הרוותחים בברונסביטל שבגרמניה, בצמידות למכל הלחץ של הכור;

שיתוף (קורוזיה) מסיבי במכל הכור "דייזיסֶבֶס" שלא נתגלה במשך שנים עד למצב שבו רק ציפוי הפלדה הדק שבתוך מכל הכור מנע דליפה הרת אסון בעת שהכור פעל בעוצמה מלאה (2002);

חימום יתר דרמטי של 30 רכיבי דלק גרעיני רדיואקטיביים ביותר בבִּרְכַת הנטרול של תחנת הכוח הגרעינית ההונגרית "פאקס", שלבסוף התנפצה לרסיסים ככלי חרסניה במהלך הניסיון לקרר באמצעות שטף מים קרים את רכיבי הדלק שהגיעו לדרגת חום של 1,200 מעלות צלזיוס ובכך למנוע פיצוץ אטומי באזור הבלתי מוגן של מתחם הכור (2003) (Heinrich-Böll-Stiftung, 2006);

נזק רציני שגרמה רעידת אדמה במתחם הכור היפני "קשינֶוֹזָאקִי", שהביאה להתלקחות שנאים, לדליפה של נוזלים רדיואקטיביים ולהשבתת הכור למשך שנים (2007);

התלקחות אש בשנאי בתחנת הכוח הגרמנית "קרֶימל", שגרמה תחילה להיתמרות עשן בחדר המתגים ולאחר מכן לתקלות קשות במערכת הכיבוי המהיר. כמעט שנתיים לאחר מכן, ימים ספורים לאחר שהתחנה הופעלה מחדש, אירע קצר חשמלי נוסף באחד השנאים, שמן דלף החוצה, והכור הושבת במהרה. עם זאת, במקרה זה לא עלה השנאי באש (2009/2007).

תאונות כאלה, שברור כי לא ניתן למנוע את התרחשותן, עוררו בינתיים דאגה ומודעות רבה יותר בקרב מפעילות הכורים מאשר בקרב חסידי התחייה הגרעינית, ולא רק בשל הנזק, שמתכם במיליארדים, שתקלות ותאונות גורמות למפעילות הכורים.

עניין ועניין, ויש לכך השלכות ישירות: למשל קיצוצים בכוח האדם, קיצוצים בבדיקות הבטיחות התקופתיות וקביעת תאריכי יעד קרובים יותר באופן הגורם גם להגברת לחץ הזמן בכל הנוגע לעריכת ביקורות ולהחלפת הדלק. ברור כי דבר מכל אלה אינו מגביר את רמת הבטיחות.

מסקנת ביניים: אם יצליחו מפעילות הכורים לממש את חזונו ולהאריך את תוחלת החיים של תחנות כוח גרעיניות ל־40, ל־60 או אפילו ל־80 שנה, הרי שבעתיד יעלה באופן משמעותי גילם הממוצע של כורים גרעיניים בעולם, שבשנת 2007 עמד על 24 שנים. הדבר יעצים באופן משמעותי את הסכנה להתרחשותה של תאונה קשה. אפילו להקמתם של כורים חדשים ממה שמכונה הדור השלישי תהיה השפעה מועטה בלבד על עניין זה. במשך עשרות שנים הם יהיו רק חלק קטן מארסנל הכורים העולמי. יתר על כן, לא ניתן לשלול את האפשרות שתאונה קשה תתרחש אפילו בכורים אלה. כך למשל, כור המים־בלחץ האירופי, שהיה בהליכי תכנון מאז שלהי שנות ה־80, ושהאב־טיפוס שלו נמצא בתהליכי בנייה בפינלנד משנת 2005, הוא לדברי מבקרים לא יותר מאשר פיתוח נוסף ושטחי של כורי לחץ הפועלים כיום בצרפת ובגרמניה. הרעיון הוא להכיל את השלכותיה של התכת הליבה באמצעות מערכת מורכבת, המכונה "לוכד־ליבה", שתפקידה ללכוד את ליבת הכור המותכת. שיטה זה מייקרת מאוד את הקמת הכור, ולכן היא מחייבת, בין היתר, לתכנן כורים יעילים יותר ויותר, כדי שאלה יוכלו להמשיך להתחרות מבחינה כלכלית הן בתחום טכנולוגיית הגרעין הן מחוץ לו.

ברור שאפילו בין מפעילות הכורים לא שוררת הסכמה כללית על כך שהסבירות להתרחשותה של תאונה קשה ירדה במונחים רֶאליים עקב רכישת ניסיון תפעולי נוסף והארכת תוחלת החיים של כורים מסוימים. למעשה, נוכח ריבוי הכשלים החמורים המעוררים שוב ושוב בהלה במקומות שונים ברחבי העולם, טענה כזאת כמוה כהכחשת המציאות.

עם מצבי אסון פוטנציאליים שאירעו לאחרונה נמנים בין השאר מקרים אלה:

פיצוץ בצינור במערכת סילוק החום השיוירי בכור הלחץ הצרפתי "סיבו 1", שבעקבותיו איבד מעגל הקירור הראשוני

6 באוגוסט 2003). יושב ראש האיגוד לשעבר, היפני הֶגִ'ימו מְאִידָה, אבחן "מחלה נוראית" שאימה על התעשייה מבית. לדבריו, היא התחילה באבדן מוטיבציה, בזיחות דעת וב"רשלנות בשמירה על תקני הבטיחות בשל לחץ העלויות שהתעצם עם הסרת הפיקוח מעל משקי האנרגיה". הֶגִ'ימו קרא לזהות מחלה זו ולהתמודד אֶתָהּ, פן בשלב כזה או אחר "תאונה קשה [...] תחריב את התעשייה כולה" (Nucleonics Week, 6 באוגוסט 2003). שלוש שנים לאחר מכן, במהלך האסון בפורסמארק, נחשפו עוד ועוד מקרים של רשלנות בניהול הכורים של החברה השוודית נְאָטְנְפֶל שהולאמה, והוכח כי החששות שהועלו היו בגדר נבואה לעתיד לבוא.

הגורמים האחראיים במתקני הגרעין מודאגים יותר ויותר מהשלכותיה של רגישות העובדים לשגרה המשכרת – תופעה המושרשת היטב בבני האדם כולם. מדובר בכך שלא ניתן כמעט לבצע במשך שנים על גבי שנים פעולות מונוטוניות החוזרות על עצמן תוך שמירה על דרגת הריכוז הגבוהה ביותר בכל רגע נתון. במהלך כנס שקיים איגוד מפעילות הגרעין העולמי בברלין בשנת 2003 העלו המשתתפים בדיון ללא כחל ושרק את הסוגיה שהוגדרה בפיהם כרשלנות משתוללת וכזיחות דעת של מפעילות הכורים. מתוך כל המומחים באי הכנס היה זה דווקא משתתף שוודי שהזהיר כי שתי תופעות אלה הן "סכנה להישרדותה של התעשייה שלנו" (Nucleonics Week).



## מיתוס שני: ניתן למונע את הסכנות הנשקפות מניצולה של האנרגיה הגרעינית לרעה ומהשימוש בה לפעולות טרור

כן, ברור מעל ומעבר לכל ספק שבהערכות הסיכון הנשקף מהפעלת תחנות כוח גרעיניות נודעת כיום חשיבות רבה הרבה יותר מאשר בעבר לתרחישים של התקפות טרור. הסבירות שיבוצעו התקפות כאלה עלתה מאז ה־11 בספטמבר 2001 באורח דרמטי.

בו בזמן, אין ככלל עוררין על כך שאף לא אחד מ־436 הכורים הפעילים ברחבי העולם בראשית שנת 2010 היה שורד פגיעה מכוונת של מטוס גדול מלא בדלק. אפילו מפעילות הכורים בגרמניה הסכימו להערכה זו פה אחד בטרם התאוששו מהטלטלה שאחזה בעולם לאחר ההתקפה בניו יורק ובושינגטון. יש להודות כי בשיקולי הבטיחות שליוו את בנייתן של תחנות כוח גרעיניות רבות במדינות המערב המתועשות, כן הובאה בחשבון האפשרות שמטוס קטן או מטוס קרב ירוסקו על התחנה. אולם התרחיש של ריסקו של מטוס נוסעים מלא בדלק על תחנת כוח נחשב כל כך בלתי סביר עד שבשום מדינה לא ננקטו צעדים מעשיים כדי להתמודד עמו. הרעיון של התקפה מכוונת באמצעות הפיכתו של מטוס נוסעים לטיל, פשוט לא עלה על דעתם של בוני הכורים.

מיד לאחר ההתקפה המשולבת בארה"ב קיימה החברה הגרמנית לבטיחות מתקנים וכורים, שמושבה בעיר קלן, תסקיר נרחב מטעם ממשלת גרמניה בעניין פגיעותן של תחנות הכוח הגרעיניות במדינה להתקפות מן האוויר. התסקיר לא הסתכם בבדיקת יציבותן של תחנות כוח גרעיניות טיפוסיות. במסגרת התסקיר הפעילו חצי תריסר טייסים באוניברסיטה הטכנית של ברלין מדמה טיסה (סימולטור), וביצעו באמצעותו אלפי התקפות במהירויות משתנות, באתרים שונים ומזוויות מגוונות על תחנות כוח גרעיניות הפועלות בגרמניה. סרטי הנפשה שתיעדו את תחנות הכוח באורח ריאליסטי שודרו לתוך תא הטייס של מדמה הטיסה. כמה מטייסי הניסוי – בדומה

התקפת הטרור שבוצעה ב־11 בספטמבר 2001 בעיר ניו יורק ובושינגטון הבירה חשפה ממד חדש לגמרי של האיום הגרעיני. ההצהרות שהשמיעו מאוחר יותר מתכנני ההתקפה בעת שהוחזקו במעצר רק הגבירו את האיום. אתגר הטרור החדש, שהתגלגל לפתחן של מעצמות המערב המובילות בעקבות ההתקפה על ארה"ב, לא נשקל מעולם קודם לכן בעת בחינתן של סוגיות ביטחוניות. אך דווקא התפתחות זו היא שמחייבת להעריך מחדש ומן היסוד את השימוש באנרגיה גרעינית ואת הסיכונים הכבירים הכרוכים בו.

אם נתבסס על הודאתם של שני מנהיגים מארגון אליקעידה שנכלאו, אין ספק שהכוונה לפגוע בתחנות כוח גרעיניות אמנם נכללת בתכניותיהם של טרוריסטים אסלאמיים, וזאת לפי הצהרותיהם, כפי שצוטטו בדו"ח הרשמי של הסנאט בארה"ב על ההתקפות (National Commission on Terrorist Attacks Upon the United States, 2004). מוחמד עטא, שריסק מטוס בואינג 767 לתוך המגדל הצפוני של מרכז הסחר העולמי, כבר סימן קודם לכן כמטרה אפשרית את שתי יחידות הכור של תחנת הכוח אינדיאן פוינט ליד נהר ההדסון. התקפה המתוכננת על תחנת הכוח הגרעינית, המרוחקת לא יותר מ־65 ק"מ ממנהטן, כבר זכתה אפילו לשם קוד: "הנדסת חשמל". אלא שהתכנית נדחתה לבסוף משום שהטייסים הטרוריסטים חששו כי אם יתקרבו לתחנת הכוח יורטו באמצעות טילים נגד מטוסים או באמצעות מטוסי יירוט. למען האמת, אמצעי ביטחון כאלה כלל לא ננקטו להגנת הכור, והחלטתם של הטרוריסטים לזנוח את התכנית נסמכה על שיפוט שגוי. למעשה, מנהיג אל־קאעידה ח'אלד שיח' מוחמד ציין כי תכניותיו המקוריות, שהיו מפלצתיות עוד יותר, כללו פגיעה בוזמנית בכמה תחנות כוח גרעיניות באמצעות עשרה מטוסים חטופים. אשר על

בספטמבר רק העניקו לחששות אלה יסוד מוחשי ומציאותי יותר. תקופה ארוכה לפני אותו מועד נחקרה באינטנסיביות האפשרות שתבוצע התקפת טרור על מתקני גרעין מן הקרקע באמצעות טילים חדשניים נגד טנקים, טילים חודרי בונקרים או חומרי נפץ, וכן נדונה האפשרות שמבצעי פיגועים יצליחו לחדור באמצעים אלימים או בחשאי לאזורי ביטחון. אולם התרחיש שבו התוקפים מוכנים למות לא הובא בחשבון. האפשרות המזעזעת שאנשים יבצעו פיגועי התאבדות בתחנת כוח גרעינית, כשהם יודעים היטב כי הם יהיו הראשונים להיהרג, העלתה תרחישים שמעולם לא נבחנו קודם לכן.

מנקודת מבטם של קיצוניים המתכננים לבצע פיגוע התאבדות, התקפה על מתקן גרעין אינה נטולת היגיון כלל ועיקר. נהפוך הוא, קיצוניים יודעים אל־נכון כי התקפה "מוצלחת" לא רק תצית תופת באופן מְיָדִי ותגרום סבל למיליוני בני אדם. התקפה כזו גם תוביל ככל הנראה להשבתתם של מתקני גרעין רבים אחרים כאמצעי זהירות, וההשבתה תוליד בתורה זעזוע כלכלי שיהיה גרוע עשרות מונים מגלי ההלם הכלכליים שנחוו לאחר ה־11 בספטמבר 2001. ההתקפה על מרכז הסחר העולמי ועל הפנטגון הייתה מפלצתית, אך מטרתה העיקרית הייתה הפגנתית וסמלית: להשפיל את מעצמת־העל ארה"ב באמצעות הנחתת מהלומה על לבה הכלכלי, הפוליטי והצבאי. בניגוד לכך, התקפה על מתקן גרעיני במדינה מתועשת כלשהי לא תהיה סמלית במובן זה, אלא תפגע באספקת החשמל שהיא מערכת העצבים של המדינה, ובכך תגרום נזק לכל תשתיתה של המדינה. התקפה כזאת עלולה לגרום לזיהום רדיואקטיבי של אזור שלם, ואולי אף להביא לפינוי ארוך טווח של מאות אלפי נפגעים, אם לא של מיליונים. אם כך יקרה, הרי שהקו המפריד בין מלחמה לבין טרור יימחק אחת ולתמיד. אף התקפה אפשרית אחרת על תשתית התעשייה, אפילו לא על מצבורי הנפט ברוטרדם, לא תגרום לפגיעה פסיכולוגית דומה במדינות המערב המתועשות. גם אם לא יעלה בידי התוקפים להמיט אסון־על, התוצאה תהיה בכל מקרה הרס נרחב. פיגוע מסוג זה יעורר שיח ציבורי שיעצים למתמידים חסרי תקדים את הוויכוח על הסכנה להתרחשותו של אסון

לטייסים הטוריסטים בניו יורק ובוושינגטון – הטיסו קודם לכן רק מטוסי מדחף קטנים. ואף על פי כן, כך נטען, כמחצית מהתקפות הקמיקזה המדומות הללו פגעו ביעדן.

ממצאי המחקר היו כה מדאיגים עד שמעולם לא פורסמו בפומבי. רק תקציר של האירועים שסווג כ"סודי ביותר" הגיע לידיעת הציבור (Society for Plant and Reactor Safety, 2002). על פי התקציר, כל פגיעה של מטוס נוסעים – מכל סוג, בכל היקף ובכל מהירות התרסקות – טומנת בחובה סכנה של תופת גרעינית, והדבר נכון במיוחד ביחס לתחנות הכוח הישנות יותר. בכל מקרה, או שהמטוס יחדור את "המעטפת" במישרין, או שהתנודות הכבירות שייגרמו מהפגיעה ומן הנפט שיתלקח בעקבותיה יהרסו את הצנרת של המתקן המותקף.

מהתסקיר עולה כי סביר שהתקפה מוצלחת תגרום בכל מצב להתכה של ליבת הכור ולשחרור של קרינה רדיואקטיבית על פני שטח גדול. על פי ההערכה, נשקפת סכנה קיצונית אפילו למתקני אחסון ביניים בתוך תחנת הכוח, שבהם דועכים רכיבי דלק משומשים בתוך מכלי מים. בגרמניה, כמעט עשור לאחר ההתקפה הנוראית על ארה"ב, עדיין אין כל תפיסה מגובשת לגבי ההגנה על תחנות כוח מפני התקפות ממין זה. ממשלת הקואליציה של הסוציאלי־דמוקרטים ושל הירוקים ("Bündnis 90/Die Grünen") הגתה תכנית שלפיה יופעל במקרה של התקפה אווירית מערך של מכונות שימסכו את תחנות הכוח הגרעיניות באמצעות הפצת עשן מלאכותי ויסתירו אותן מן העין למשך זמן קצר. זאת, עד שיוזנקו לאוויר מטוסי קרב של הכוחות המזוינים, שיהדפו את המטוס החטוף ויירטו אותו אם יהיה בכך צורך. בחודש פברואר 2006 פסק בית המשפט הפדרלי לחוקה בגרמניה באופן חד־משמעי כי אין ליירט מטוסים אזרחיים שעליהם נוסעים חפים מפשע, ובעקבות זאת נגנזה התכנית.

## פיגועי התאבדות יאפילו על אירועי ה־11 בספטמבר

האפשרות שעלתה ב־11 בספטמבר 2001 לביצוע התקפות מכוונות מן האוויר, לא הפיגה ולו במעט חששות אחרים שנודונו ממילא ברמה הבינ־לאומית עוד לפני כן. אירועי ה־11

מכפי שהיה.

במאמר מוסגר יצוין כי הסכנה הטמונה בהפעלת תחנות כוח בשל עימותים דמויי מלחמה אינה שיקול תאורטי בלבד. בעימות שהתחולל באזור הבלקן בתחילת שנות ה-90, נחשף לעתים קרובות מתקן הגרעין הסלובני בקרשקו לאיום של התקפות מן האוויר. מפציצים יוגוסלביים טסו מעל המתקן כדי להמחיש את האפשרות של הסלמה מסוג זה. כמו כן, אין לדעת אם בשנת 1981 הייתה ישראל נמנעת מהפצצת כור המחקר העיראקי "תמוז 1", כור של 40 מגה-וואט, לו היה כבר פעיל. התקיפה, שבוצעה אז מן האוויר, נראתה כמכת מנע נגד ניסיונו של סדאם חוסיין להיות הראשון שיבנה את "הפצצה האטלמית". מפציצים אמריקאיים חידשו את התקפותיהם על אתר הכור במהלך מלחמת המפרץ בשנת 1991. בתגובה, כיוון סדאם חוסיין את טילי הסקאד שלו על המרכז הגרעיני הישראלי בדימונה. לאחרונה נשמעים יותר ויותר דיווחים על תקיפה אווירית מתוכננת של ישראל על אתרים באיראן שמינחים כי הם מתקני גרעין סודיים, במסגרת הסכסוך עם משטר האייתולות.

### **תאומים סיאמיים קטלניים: השימוש האזרחי והשימוש הצבאי באנרגיה גרעינית**

מיום שעלה הרעיון להפיק חשמל באופן מבוקר באמצעות אנרגיה גרעינית, עמדה על הפרק האפשרות שייעשה שימוש לרעה בטכנולוגיה זו לצרכים צבאיים. עניין זה לא הפתיע איש. אחרי ככלות הכול, הפצצת הערים הירושימה ונגסאקי בידי ארה"ב באוגוסט 1945 המחשה לעולם בבירור את פוטנציאל התופת הטמון באנרגיה הגרעינית. בשנת 1953 הכריז נשיא ארה"ב דווייט אייזנהאואר על תכנית שכונתה "אטומים למען השלום". התכנית נועדה להיות יריית פתיחה ל"שימוש באנרגיה גרעינית למטרות שלום". גישה זו נולדה הן מתוך צורך הן מתוך חשש, כיוון שכאשר ארה"ב חשפה בנדיבות את הידע שעמד לרשותה על ביקוע הגרעין, שהיה באותם ימים סודי ואקסקלוסיבי במידה רבה, היא למעשה ביקשה למנוע מיותר ויותר מדינות לצאת בתכניות משלהן לייצר נשק גרעיני. פצצת האטום העלתה את ארה"ב באופן סופי למעמד של מעצמת-על, והעסקה

גרעיני. פיגוע כזה אף יוביל, ככל הנראה, לידי כך שכמה מדינות מתועשות ישביתו רבות מתחנות הכוח הגרעיניות שלהן, אם לא את כולן.

נוכח צורה חדשה זו של טרור, השיח הציבורי על "השימוש באנרגיה הגרעינית לצורכי שלום" והאיום הנובע מעימות דמוי מלחמה נעשים רלוונטיים יותר מבעבר. אולם עד כה נמנעה קהילת הגרעין במידה רבה מדיון זה. כורים באזורי סכסוך – כמו בחצי האי הקוריאני, בטיוואן, באיראן, בהודו ובפקיסטן – מעוררים בעיה, שהיא אמנם "תופעת לוואי" בלתי מכוונת, אך השלכותיה עלולות להתברר כקטלניות: מרגע שכורים אלה נכנסים לפעולה, תוקף פוטנציאלי כבר אינו זקוק לפצצות אטום כדי להחריב בקרינה רדיואקטיבית את המדינה שהוא מעוניין לתקוף. לשם כך יספיקו חיל אוויר או מערך ארטילריה. היות שכך, ברור כי כל מי שמשתמש במונח "הבטחת האספקה" בנוגע לחשמל המופק באמצעות אנרגיה גרעינית אינו מרחיק ראות די הצורך. אין בנמצא עוד טכנולוגיה שבאמצעותה אירוע יחיד יכול לגרום להתמוטטות אחד מעמודי התווך של אספקת האנרגיה. אספקת החשמל בכלכלה לאומית הנסמכת על טכנולוגיה כזאת אינה אספקה בטוחה אלא אספקה פגיעה. במקרה של מלחמה, כלכלה כזאת תיחשף להתקפות קונבנציונליות יותר מאשר כלכלה לאומית שאינה תלויה בטכנולוגיה זו.

הפיזיקאי והוגה הדעות קארל פרידריך פון וייצקר הסביר את המהפך שעבר עליו, מתומך באנרגיה הגרעינית למתנגד שלה, במילים אלה: "השימוש באנרגיה הגרעינית בעולם קורא במשתמע לשינוי קיצוני במבנים הפוליטיים של כל התרבויות בנות זמננו. הוא מחייב למוטט את המלחמה כמוסד פוליטי שהתקיים לפחות מאז תחילת הציביליזציה בעולם" (ר' Meyer-Abich/Schefold, 1986). אך בסכמו את מחשבותיו ציין פון וייצקר כי בטווח הנראה לעין לא יגיע שלום עולמי בטוח מבחינה פוליטית ותרבותית. את דבריו השמיע פון וייצקר בשנת 1985 בטרם הסתיימה המלחמה הקרה. בתקופה הנוכחית של "אלימות איסימטרית", שבה קיצונים חדורי אידיאולוגיה מתכוננים למלחמה נגד מדינות מתועשות רבות-עוצמה או אפילו ל"התנגשות ציביליזציות" חובקת-כול, חזון השלום בריהקיימא רחוק הרבה יותר

חשאית לייצור נשק גרעיני בעיראק שנשלטה בידי סדאם חוסיין, והסתבר כי תכנית זו הגיעה לשלבים מתקדמים חרף פיקוחה הקפדני של הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה אטומית. בשנת 1998 זעזעו הודו ובקיסטן את העולם כשביצעו ניסויים בנשק גרעיני. שתי מדינות אלה סירבו מאז ומתמיד לחתום על האמנה למניעת הפצתו של נשק גרעיני, בדומה לישראל. חמש שנים לאחר מכן הפנתה צפון קוריאה את גבה לאמנה והכריזה כי גם ברשותה יש נשק אטומי.

שורשיהן של כל ההתפתחויות המאיימות הללו נעוצים בבעיית יסוד של האנרגיה הגרעינית: אפילו עם הכוונות הטובות ביותר וחרף השימוש בטכנולוגיית הפיקוח המתקדמת ביותר, לא תיתכן הפרדה מוחלטת בין השימוש האזרחי לבין השימוש הצבאי באנרגיה זו. מעגל הדלק הגרעיני ומעגל החומר הבקיע כרוכים בתהליך זהה, בין אם הם משמשים לצורכי שלום ובין אם לאו. הטכנולוגיה והידע פתוחים לעתים מזומנות לשימוש אזרחי כמו גם לשימוש צבאי – "שימוש כפול" כפי שהדבר מכונה – ויש לכך השלכות קטלניות. כל מדינה המחזיקה ביכולות מלאות בטכנולוגיה הגרעינית האזרחית, שאותה מקדמות הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה אטומית וקהילת האנרגיה האטומית האירופית (Euratom), תוכל במקדם או במאוחר גם לייצר פצצת אטום. מאז תחילתו של עידן הגרעין פנו מדינות חזקות, שאפתניות וחסרות מצפון שוב ושוב לתוך הסמטה האפלה של השימוש הצבאי בטכנולוגיה זו, וקידמו אותו במקביל ליישומה של תכנית הגרעין האזרחית שלהם. איראן למשל נחשדת כיום בכך שעשתה זאת במשך שנים. המרתם של מרכיבים אזרחיים של מעגל הדלק הגרעיני למרכיבים צבאיים יכולה להתבצע במסגרת תכניות חשאיות מקבילות הזוכות למימון של הממשלות הנוגעות בדבר. אפשר גם שעניין זה יתבצע באמצעות שימוש חשאי לצורכי צבא בחומרים בקיעים שנועדו במוצהר לשימוש אזרחי, וכך ניתן לחמוק ממנגנוני הפיקוח הלאומיים והבין-לאומיים. כמו כן, יש לחשוש גם מגנבתם של חומרים כאלה, של טכנולוגיה היכולה לשמש לצורכי צבא או של ידע רלוונטי.

בראשיתה של שנת 2010 ידוע על 15 תחנות כוח גרעיניות חדשות המתוכננות במזרח הקרוב ובמזרח התיכון: באיראן, בתורכיה,

שנשיאה הציע לעולם הייתה פשוטה: כל מדינה שתהיה מעוניינת בכך תוכל להרוויח מהשימוש באנרגיה הגרעינית לצורכי שלום, ובלבד שתוותר בתמורה על שאיפותיה שלה להצטייד בנשק גרעיני. כך, קיווה הנשיא, יקיץ הקץ על מאמצי הפיתוח של מדינות שונות בתחום זה. זאת, לאחר שמאמצים אלה כבר נשאו פרי במקרים מסוימים, וכמה שנים לאחר מלחמת העולם השנייה כבר החזיקו ברית המועצות, בריטניה, צרפת וסין בנשק גרעיני לצד ארה"ב. מדינות אחרות, וביניהן כאלה שנתפסו מאז ומתמיד כמדינות שוחרות שלום, כמו שוודיה או שווייץ, פעלו גם הן לפתח את נשק יום הדין באינטנסיביות כזו או אחרת, ובכל מקרה תחת מעטה חשאיות סמיך ככל האפשר. אפילו הרפובליקה הפדרלית של גרמניה, שלא הייתה מדינה ריבונית בתקופה שבין תום מלחמת העולם השנייה לבין שנת 1955, הראתה בזמנו של "שר האטום" פרנץ יוזף שטראוס סימנים לכך שיש לה שאיפות בתחום זה.

יוזמת אייזנהאואר הובילה כבר בשנת 1957 להקמתה של הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה אטומית בעיר וינה ולאחר מכן לניסוחה של האמנה למניעת הפצתו של נשק גרעיני, שנכנסה לתוקפה בשנת 1970. משימתה של הסוכנות בווינה הייתה כפולה: מצד אחד, לעודד הפקעה של אנרגיה גרעינית ולקדם את השימוש בה ברחבי העולם, ומצד שני למנוע את פיתוח של פצצות אטום במספר גדל והולך של מדינות. למעלה מיוכל שנים לאחר שהוקמה ניתן לומר כי הישגיה של הסוכנות דו-ערכיים, ממש כפי שהיו מטרותיה מלכתחילה. באמצעות פיקוח על מתקני גרעין אזרחיים ועל שימושם בחומרים בקיעים, נחלה הסוכנות הצלחה דרמטית בהאטת הפצתה של הפצצה. הודות להישג זה זכתה הסוכנות בשנת 2005 בפרס נובל לשלום, יחד עם מנהלה דאז מוחמד אל-בראדעי. עם זאת, אף כי הסוכנות האטה את הפצת הפצצה, היא לבטח לא מנעה אותה. עד סוף המלחמה הקרה כבר הצטרפו שלוש מדינות נוספות – ישראל, הודו ודרום אפריקה – למועדון מדינות הגרעין שמנה עד אז באופן "רשמי" חמש מדינות. בתחילת שנות ה-90, כשדרום אפריקה ביטלה את משטר האפרטהייד, היא השמידה את מצבורי הנשק הגרעיני שלה. לאחר מלחמת המפרץ בשנת 1991 חשפו פקחים תכנית

לטכנולוגיית ביקוע הגרעין. במצב כזה, ירבצו לפתחה של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית בעיות שאינן ניתנות לפתרון. זאת, בשעה שסוכנות זו סובלת כבר ממילא ממימון חסר כרוני ומעומסי עבודה שהם למעלה מכפי יכולתה. יתר על כן, ישנה סכנה חדשה בדמותם של טרוריסטים שלא יהססו לפוצץ "פצצה מלוכלכת". פיצוצו של מטען נפץ קונבנציונלי שיכיל חומר רדיואקטיבי ממקור אזרחי לא רק יגבה קרבנות רבים ויעלה באופן דרמטי את מפלס הפחד וחוסר הוודאות במדינות שהן יעד פוטנציאלי לטרוריסטים, אלא גם יהפוך את זירת הפיצוץ למקום שאינו ראוי למגורים.

במצרים, בערב הסעודית, בירדן, בלוב, באלג'יר, בתוניסיה, במרוקו ובאיחוד האמירויות הערביות. אין צורך להיות נביא כדי לחזות כי לא כל הפרויקטים הללו ייושמו. אך בעולם בטוח יותר, האם היו אפילו מחציתן נבנות? אין עוררין על כך שככל שתופץ טכנולוגיית הגרעין האזרחית בקרב 30 המדינות העושות בה נכון להיום שימוש מסחרי, כך יידרש מאמץ גדול יותר כדי לרסן את הפצתה של הטכנולוגיה לשימושים צבאיים. פריחה מחודשת של תחום האנרגיה הגרעינית – בדומה לזו של שנות ה־70 – עשויה להוביל לכך של־50 או 60 מדינות, או אפילו למספר גדול יותר, תהיה גישה

## מיתוס שלישי: פסולת גרעינית? אין בעיה!

למטרות צבאיות. ולראיה, היא לא התבססה באף מקום בעולם. רוסיה היא המדינה היחידה שעדיין מפעילה כור דגירה, שהוקם כבר בשלבים הראשונים של תהליכי פיתוחה של טכנולוגיה זו. מלבדה, עדיין צועדות בנתיב זה הודו ויפן (שכור הדגירה להדגמה שלה במוֹנְגוֹ' מושבת מאז שאירעה בו דִלְקָת נתרן בשנת 1995).

ללא ההנחה כי קיימת אופציה של הפעלת כורי דגירה, נעלם למעשה כלא היה המניע העיקרי המקורי להפרדת פלוטוניום לצורך שימוש אזרחי במתקני מחזור פסולת גרעינית. ואף על פי כן, לצד צרפת, בריטניה ורוסיה, מפעילות גם יפן והודו מתקנים קטנים יותר למחזור פסולת גרעינית למטרה שנזכרה לעיל, דהיינו כדי לעשות שימוש חוזר בפלוטוניום המיוצר שם בצורה של מרכיבי דלק של מה שמכונה תחמוצת מעורבת של אורניום ופלוטוניום ("דלק MOX") בכורי המים הקלים הקונבנציונליים שלהם. הפעלתם של מתקני מחזור פסולת הגרעינית, כל עוד אינם מושבתים בשל בעיות טכניות, כרוכה בעלויות עצומות, ומלבד פלוטוניום ואורניום הם יוצרים גם פסולת גרעינית רדיואקטיבית ביותר, שיש להיבט ממנה. סביבתם של המתקנים נחשפת גם היא לקרינה חזקה, החורגת רבבות מונים מזו של כור מים קלים. נוסף על כך, תהליך המחזור מחייב שינוע תדיר ומסוכן של חומרים רדיואקטיביים ביותר, העלולים גם הם במידה מסוימת להיות חשופים לניצול לרעה בידי גורמי צבא או טרור.

היות שממחזרים רק חלק קטן יחסית מהפסולת הרדיואקטיבית ביותר המופקת בתחנות כוח מסחריות ברחבי העולם, וכיוון שרכיבים משומשים של "דלק MOX" אינם ממוחזרים שוב, "מעגל הדלק הגרעיני" אינו קיים למעשה ואין הוא אלא כותרת יפה. במציאות, זהו מעגל פתוח. חוץ מחשמל,

המושג "מעגל הדלק הגרעיני", המגלם רעיון מנחם, הוא רק אחד מני חידושי לשון רבים ומדהימים של תעשיית הגרעין, שקנו להם אחיזה נרחבת אף על פי שהמציאות מפריכה אותם לחלוטין חדשות לבקרים. מקורו של מיתוס המעגל הגרעיני בחזונו של מדעני הגרעין הראשונים. אלה קיוו כי לאחר שיתחילו להפעיל כורי אורניום מסחריים, תהיה אפשרות להפריד מהפסולת גרעינית את הפלוטוניום ( $^{239}\text{Pu}$ ), שהוא יסוד בקיע המופק בליבת הכור. כך תתאפשר הפקת פלוטוניום שיווצר באופן מתמשך בכורי דגירה מהירים מאורניום לא בקיע ( $^{238}\text{U}$ ). פלוטוניום זה ישמש לכורי דגירה מהירים נוספים – ממש כמו ברעיון מכונת התנועה הנצחית. באופן זה צפוי היה להיווצר מעגל תעשייה כביר שבו למעלה מ-1,000 כורי דגירה מהירים ועשרות מתקני מחזור פסולת בכל רחבי העולם, בקנה מידה שעד כה הושג ברמה האזרחית והתעשייתית רק בלה האג שבצרפת ובסֶלְפִילְד שבאנגליה. בגרמניה לבדה הסתמכו אסטרטגים של טכנולוגיית הגרעין באמצע שנות ה-60 על הרעיון להקים ארסנל של כורי דגירה, שבסוף המאה יוכלו כבר להפיק תוצר מצטבר של 80,000 מגה-וואט. לשם השוואה: כורי מים בלחץ וכורי המים הרותחים הפועלים בגרמניה כיום מפקים כ-20,000 מגה-וואט. מנגד, מדען האנרגיה קְלָאוּס טְרָאוּבֶה, שמלכתחילה עמד בעצמו בראש פרויקט הדגירה הגרמני בעיירה קלקר שבאזור הריין התחתון, כינה את נתיב הפלוטוניום של טכנולוגיית הגרעין "אוטופיית הגאולה של שנות ה-50" (Traube, 1984). ואכן התברר כי נתיב זה היה הפיאסקו הגדול ביותר בהיסטוריה של הכלכלה. טכנולוגיית הדגירה יקרה מדי, היא נשענת על תכנון טכנולוגי לקוי, ובטיחותה מפוקפקת אפילו יותר מאשר זו של תחנות הכוח הגרעיניות הקונבנציונליות. יתר על כן, טכנולוגיה זו פגיעה במיוחד לשימוש לרעה

מחשבה מעמיקה יותר הובעו כבר מן ההתחלה, אם כי רק לעתים רחוקות הן נשמעו בפומבי. בעקבות פגישת שרים בעניין טיוטת הצעת חוק הגרעין, ציין בצלילות דעת גורם מיניסטריאלי רשמי בבון כי "ההטמנה הבלתי מזיקה של פסולת רדיואקטיבית היא בעיה שיש לפתור לפני שנוכל להשתעשע ברעיון להקים כור בגרמניה המאוכלסת בצפיפות" (ר' Möller, 2009). הדברים נאמרו בחודש פברואר 1955. מאז כבר הושבתו בגרמניה 19 תחנות כוח וכורי אבי-טיפוס מבלי שסוגיית "ההטמנה הבלתי מזיקה של פסולת רדיואקטיבית" עלתה באופן. בסופו של דבר, השאלה אם ניתן למנוע לחלוטין מפסולת רדיואקטיבית לחזור לביוספרה למשך מאות אלפי שנים או אפילו מיליוני שנים היא שאלה פילוסופית יותר, כיוון שהיא חורגת מגבולות הדמיון האנושי. עידן הפירמידות היה רק לפני 5,000 שנה. אך הפסולת הרדיואקטיבית ביותר המופקת בתחנות הכוח הגרעיניות בגרמניה בשנת 2010 תצטרך להישאר מאוחסנת באופן בטוח גם בשנת 10,010 ואפילו בשנת 100,010. יחד עם זאת, אין מנוס מעיסוק בכך: הפסולת הגרעינית כבר קיימת כיום, והיות שלא נוכל להגיע לכלל ודאות בעניין זה, עלינו לחפש ולמצוא את הפתרון הטכני הטוב ביותר על יסוד הידע העומד לרשותנו כיום.

המדינות הגדולות ביותר המפיקות אנרגיה גרעינית מבינות רק בהדרגה ובאירצון כי בחירה באתר סילוק פסולת קבוע איננה בחירה טכנית פשוטה או בעיה מדעית. אך אחד מההליכים הלאומיים לבחירת אתר כזה – הליכים שהחלו לרוב בשנות ה-70 – לא הוביל עד כה לאישור רשמי של אתר קבע להטמנת פסולת. זאת, כיוון שבמשך זמן רב מדי התעלמו, או אף שללו לחלוטין את ההתנגדות הציבורית, את ההשתתפות הדמוקרטית ואת השקיפות בבחירת האתר. בדרך כלל, כאשר נעשה ניסיון לבחור אתר סילוק פסולת מתאים, נודע תפקיד מכריע לשיקולים לא רלוונטיים ולשיקולים של אסטרטגיה פוליטית. בגרמניה פותח ועוצב הליך בחירה שהורכב מכמה שלבים בהשתתפותו המתמשכת של הציבור בניסיון ללמוד מטעויות אלה. כעת, לאחר שנים של יכוח נמרץ, נראה פחות סביר מאי פעם שהרעיון שהסכימו עליו לבסוף בשנת 2002 הן

תחנות הכוח הגרעיניות מייצרות גם ובעיקר פסולת גרעינית ברמה גבוהה, ברמה בינונית וברמה נמוכה, שהיא כמובן גם רעילה ביותר. יש להיפטר מפסולת זו באופן בטוח ומוחלט למשך תקופות זמן ארוכות ביותר. משך הזמן הזה תלוי בזמני מחצית החיים של היסודות הרדיואקטיביים, הנבדלים זה מזה במנעד רחב: איזוטופ הפלוטוניום  $^{239}\text{Pu}$  מאבד את הרדיואקטיביות שלו רק לאחר 24,110 שנים, ואילו איזוטופ הקובלט  $^{60}\text{Co}$  מאבד אותה כבר בחלוף 5.3 ימים.

### לא קיים שום מקום שבו ניתן להיפטר מפסולת באופן קבוע

למעלה מיובל שנים לאחר ראשית ימי הפקתה של האנרגיה הגרעינית, לא פועל בעולם כולו ולו אתר מאושר אחד לסילוק פסולת בעלת רמה גבוהה של רדיואקטיביות. על רקע זה נפוץ בציבור דימוי המטוס הגרעיני שהמריא בלי כל מחשבה על המקום שבו ינחת. במדינות מסוימות – למשל בצרפת, בארה"ב, ביפן ובדרום אפריקה – מוטמנת פסולת בעלת אורך חיים קצר יחסית שדרגת הרדיואקטיביות שלה נמוכה או בינונית במכלים מיוחדים בסמוך לפני השטח. גרמניה בחרה להשתמש למטרה זו באתר "קונראד", השוכן בִּזְאָלְגֵיטְרֶשְבֶּסְקֶסוֹנִיָה התחתונה, ואשר היה לפני פיר של מכרה עִפְרָת ברזל. באתר זה תוטמן במעמקים פסולת שאינה מתחממת, המופקת במתקני גרעין וכן בכורי מחקר ומשימושים רפואיים. המכרה לשעבר הוא מתקן הפסולת הגרעינית הקבוע הראשון והיחיד שאושר בגרמניה. האתר נמצא כעת בתהליכי הכשרה לקליטת הפסולת, והוא עתיד להתחיל לפעול בשנת 2014.

התבטאות של קארל פון וייצקר שהוזכר לעיל, משנת 1969, ממחישה את הגישה האגבית שבה טופלה בתחילה סוגיית הפסולת הגרעינית. בשנה זו דיבר הפיזיקאי והפילוסוף על הטיפול בפסולת גרעינית באלו המילים: "זאת בכלל לא בעיה. אמרו לי שמצאי הפסולת הגרעינית בגרמניה בשנת 2000 יוכל להיכנס לתוך קופסה, קובייה שאורך כל אחת מפאותיה 20 מטר. אם נאטום וננעל אותה כנדרש ונוריד אותה אל פיר של מכרה, נוכל לקוות שפתרנו את הבעיה" (ר' Fischer et al., 1989). יחד עם זאת, דעות אחרות המשקפות

הפדרלי להגנה מפני קרינה, ייווצר הצורך לחלץ בהדרגה במשך תקופה של עשר שנים או יותר, כמעט 126,000 מכלי פסולת רדיואקטיבית מתוך המכרה בשל סכנה שיוצף, לארוז אותם מחדש, לאחסן אותם במחסן זמני ובשלב מסוים לקבור אותם באדמה במקום מתאים יותר, הרי שהעברה זו תסמל את כישלונה של מדיניות אנרגיה העולה מיליארדים. במקרה כזה, סביר שבפעם הראשונה מאז ומעולם ישודרו לכל בית בעולם במשך עשר שנים צילומי טלוויזיה המראים את תוצאות השימוש באנרגיה גרעינית ואת הנטל שהוריש דור ההורים לילדיו ולנכדיו, שאינם נושאים באחריות כלשהי לגביו. ב-16 באוקטובר 2009, לאחר ההחלטה לחפור ולהוציא את המכלים, נאלץ היומון הגרמני "פֶרְנַקְפּוּרְטֶר אֶלְגֵמַיְנֶה צֵיטונג" להעיר: "זהו ללא ספק מסמר נוסף בארון הקבורה של האנרגיה הגרעינית בגרמניה". לפי סעיף 9a לחוק הגרעין, מפעילי תחנות כוח גרעיניות "נושאים באחריות להטמנה מסודרת של הפסולת הרדיואקטיבית שהם מפיקים". החוק בנושא זה היה ברור ונהיר במשך למעלה מיובל שנים. אך השאלות כיצד, היכן, ומעל לכול מתי צפויות דרישות החוק להתמלא – נותרו בשנת 2010 ללא מענה ממש כפי שהיו בשנת 1960. ואף על פי כן, לא ניתן לראות בגרמניה סתם מקרה יוצא דופן ומריז בהקשר זה. ההפך הוא הנכון: המצב הזה כמעט בכל המדינות שנעשה בהן שימוש מסחרי באנרגיה הגרעינית. נכון להיום, המדינה היחידה שיש בה תכניות מתקדמות ביותר להטמנת קבע של פסולת היא פינלנד, אך במדינה זו נמצאות רק 4 מתוך 436 תחנות הכוח הגרעיניות הפועלות ברחבי העולם. אתר הטמנת הפסולת בסלע גרניט ליד אולקילואוטו שבחופה המערבי של פינלנד נמצא בשלבים אחרונים של בנייה והוא מקובל במידה רבה על האוכלוסייה המקומית והאזורית. תחנת כוח גרעינית הפועלת במקום כבר שנים רבות ללא כל תקלה גדולה, ביחד עם אתר הטמנה המיועד לפסולת ברמות רדיואקטיביות נמוכה ובינונית הפיגו במשך שנים את חששותיהם של מרבית התושבים. אתר הטמנה הקבוע לפסולת ברמת רדיואקטיביות גבוהה עתיד להתחיל לפעול בשנת 2020.

אולם באף אחת ממדינות העולם שיש בהן נתח גדול הרבה יותר מתחנות הכוח הגרעיניות

מדענים שתמכו באנרגיה הגרעינית הן מדענים שהתנגדו לה – יגיע באמת ובתמים לידי מימוש. לממשלת הקואליציה של הנוצרים-דמוקרטים והליברלים, שנבחרה כאמור בסתיו 2009, אין כל כוונה להסתבך שוב בחיפוש אחר אתרי סילוק פסולת. היא דבקה באתר בְּאֶלְצֶשְטוֹק פּוֹן גוֹרְלֶבֶן שבו מתבצעות עבודות הכנה מאז שנות ה־70, חרף ספקות רציניים בדבר מידת ההתאמה הגאולוגית של אתר זה, ובייחוד של הסלע המכסה אותו. דבקות הממשלה באתר זה אף נוגדת ראיות העולות מדיווחי עדים בתקופתנו ומתיעוד שנחשף בשנים האחרונות. אלה מחזקים את החשד שבבחירתו של האתר בשנות ה־70 מילאו תפקיד משמעותי ואף מכריע שיקולים פוליטיים ולא ממצאים מדעיים. כל גורם השואף למצוא את "הפתרון הטכני הטוב ביותר על יסוד הידע העומד לרשותנו כיום" לצורך הטמנת קבע של פסולת גרעינית צריך מן הסתם לשקול את החלופות. אלא שדבר זה מעולם לא נעשה, ובדיקה כזאת עלולה להביא לידי כך שבתי המשפט יפסקו נגד גוֹרְלֶבֶן, אם הפוליטיקאים ידבקו באתר השנוי במחלוקת. במקרה כזה, ירדו עשרות שנים לטמיון, ויהיה צורך להתחיל את החיפוש מחדש. לכן, ספק הוא אם אסטרטגיית "עצימת העיניים בתקווה לטוב" שנוקטת קואליציית הנוצרים-דמוקרטים והליברלים בגרמניה מאז שנת 2009 אכן תוביל לאישור האתר. בניגוד לכך, אין ספק לגבי השלכות הניסיון האגרסיבי לבסס את גוֹרְלֶבֶן כאתר קבע להטמנת פסולת ולהאריך בה בעת את תוחלת החיים של הכורים – הדבר יוביל לחידוש הוויכוח העקרוני סביב האנרגיה הגרעינית בגרמניה. בראשית שנת 2010 פרסם איגוד הסיוע הסביבתי של גרמניה דו"ח משפטי, שקבע כי הארכת תוחלת חייהן של תחנות כוח גרעיניות, כפי שמתכננת הרפובליקה הפדרלית של גרמניה, תפר את החוקה משום שסוגיית הטמנת הפסולת טרם נפתרה (Ziehm, 2010). הסבירות שהוויכוח יתחדש גדולה במיוחד בהתחשב בכך שניסיון המשותף של גרמניה ושל תעשיית האנרגיה הגרעינית במדינה להיפטר מפסולת גרעינית בדרגות רדיואקטיביות נמוכה ובינונית במכרה המלח הנטוש בְּאֶלְצֶבֶרְג אָסֶה II, שליד זֶלְצְגֵיטֶר, עלול להסתיים באסון אדיר לאחר 30 שנים בלבד. אם אכן, כפי שהעריך בתחילת שנת 2010 המשרד



ספקות מתמשכים הנוגעים לבטיחות ארוכת הטווח, ומשום שגודל אתר האחסון ככל הנראה אינו מספיק להטמנתה של הפסולת ברמת הרדיואקטיביות הגבוהה ביותר שהצטברה בארה"ב במהלך יובל שנים ושתמשיך להצטבר בעתיד הנראה לעין.

הפעילות לא נראה באופק כל אתר קבע להטמנת פסולת. הדבר נכון גם לגבי ארה"ב, שבה 104 כורים מספקים כ-19% מביקוש החשמל. לאחר כמה עשרות שנים של עימות חריף, התכניות להקמתו של אתר הטמנת פסולת קבוע בהר היוקה שבמדינת נואדה הוקפאו בידי ממשל אובמה בתחילת שנת 2009 בשל

## מיתוס רביעי: יש מספיק דלק אורניום

בו כמויות גדולות של שפוכת נגועה בזיהום רדיואקטיבי. זיהום זה הסב נזקי קרינה קשים וקבועים לא רק לכורים עצמם, אלא גם לאזורים הסובבים את המכרה ולתושביהם של אזורים אלה.

המצב השתפר לזמן מה עם תחילת הפקתה של אנרגיה גרעינית בשנות ה־70. מאז עשור זה ואילך, ממשלות לא היו הצרכניות היחידות של חומרים בקיעים. עם התבססותו של שוק פרטי של אורניום לא יכול עוד מעמדו האסטרטגי הצבאי הייחודי של החומר להצדיק את תנאי הכרייה, שהיו קשים במיוחד. פני הדברים השתנו שוב מן הקצה אל הקצה בסוף תקופת המלחמה הקרה. הביקוש הצבאי לאורניום צנח במידה עצומה. המלאי העודף בארה"ב ובברית המועצות לשעבר תועל לשוק האזרחי של חומר בקיע. יתר על כן, בשל ההתקדמות שחלה בפירוק הנשק הגרעיני, הפך עד מהרה לזמין גם אורניום בעל שיעור גבוה של חומר בקיע, בדרגת העשרה המספיקה לשימוש צבאי ובכמויות גדולות, שמקורו בכלי הנשק הגרעיניים הסובייטיים והאמריקאיים שהוצאו מכלל שימוש. תוצאת הדבר הייתה התכנית המקיפה ביותר אי פעם להכשרת תחמושת לשימוש במעגל הכלכלה האזרחי. החומר הנפיץ המשמש בייצור פצצות נמהל במידה רבה באורניום טבעי או באורניום מדולל (אורניום-238 שהוצא ממנו האיזוטופ הבקיע אורניום-235), ויכול לאחר מכן לשמש כדלק בתחנות כוח גרעיניות רגילות. מצב יוצא דופן זה בשוק האורניום הוביל לצניחה רבתי במחירו של האורניום לכורים בשוק העולמי. אתרי האחסון היחידים ששרדו הם אלה שיש בהם ריכוזים גבוהים יחסית של אורניום. נכון לשנת 2010, כמעט מחצית מהאורניום המשמש בתחנות כוח גרעיניות ברחבי העולם כבר אינו מגיע מאורניום מועשר "טרי", אלא מן המורשת הצבאית של מעצמות העל.

מה שקרוי "מעגל הדלק הגרעיני" לא נשבר רק בנקודה אחת. מלכתחילה, אפילו בנקודת הפתיחה, ניכר היה שמדובר ברעיון בעייתי. כריית האורניום, המשמש כחומר בקיע הן לפצצת האטום והן בתחנות הכוח הגרעיניות שנועדו לשימוש אזרחי, גבתה מספר עצום של קרבנות, במיוחד בשנים הראשונות של עידן הגרעין. יסודות רדיואקטיביים מטבעם, שקודם לכן שכנו מתחת לפני כדור הארץ מבלי לסכן איש, שוחררו אל הביוספירה בכמויות גדולות. ככל שיימשך או יתרחב השימוש באנרגיה הגרעינית, כך סביר שיגדל באופן משמעותי גם מחירה הבריאותי והסביבתי של כריית האורניום.

הבהלה לאורניום כמתכת כבדה החלה זמן קצר לאחר מלחמת העולם השנייה. חומר זה אינו נדיר במיוחד, אך משתלם לכרותו רק במקומות ספורים שבהם ריכוזו גדול די הצורך. תוצאותיה הרות האסון של הפצצת יפן בידי ארה"ב לא תרמו למעשה כלל לריסון מאמצי בעלות הברית להבטיח לעצמן גישה למשאב אסטרטגי זה. נהפוך הוא: הן רק החישו אותם, ומדינות אלה עשו מאמצים כבירים כדי להרחיב את גישתן למשאבי אורניום וכדי להבטיח אותה. ההשלכות הבריאותיות של עניין זה על הפועלים מילאו תפקיד משני בלבד. ארה"ב ניצלה מכרות בשטחה שלה ובשטחה של שכנתה קנדה; ברית המועצות מצדה הגבירה את כריית האורניום במזרח גרמניה, בצ'כוסלובקיה, בהונגריה ובבולגריה. אלפי כורים חלו בסרטן הריאות ומתו בייסורים לאחר שנים של עבודת פרך בתוך מנהרות שלא אווררו כנדרש, ושהיו מזוהמות באבק וברדון, שהוא גז רדיואקטיבי. פועלים במכרה המזרח גרמני ויסקמוט, שבתקופות מסוימות הועסקו בו למעלה מ־100,000 בני אדם, נפגעו פגיעה קשה במיוחד. היות שריכוז האורניום במכרות עמד בדרך כלל על לא יותר מ־10%, יצרה הכרייה

בקרוּב עם משבר חמור באספקת האורניום שלה. משבר זה עלול להשפיע גם על מפעילות מתקני הגרעין באיחוד האירופי, המייבאות כשליש מהדלק שלהן מרוסיה. בדומה לרוסיה, אפשר שגם סין והודו יעמדו בפני מחסור, אם אכן יישמו את כוונתן המוצהרת להרחיב את ארסנל הכורים שלהן.

מכל האמור לעיל, עולה דבר אחד בבירור: בכל הנוגע ל-436 תחנות הכוח הגרעיניות הפועלות בעולם נכון לשנת 2010 אין בנמצא פתרון ארוך טווח, לא לסוגיית האספקה ולא לבעיית הטמנת הפסולת. הקמתם של כורים חדשים, שמקודמת עליידי ממשלות מסיימות, היא נושא לוויכוח בארצות רבות. אך כורים חדשים רק יחמירו את הבעיה. נוכח המחסור באספקת אורניום ובעיקר לאור המחיר המוגזם של הפקתו, אסטרטגיה עולמית החלטית של הרחבת השימוש באנרגיה גרעינית תוביל תוך זמן קצר לייסודה של כלכלת פלוטוניום אחת ולתמיד. עניין זה יהיה כרוך במחזור נרחב של דלק משומש, וכורי דגירה מהירים יהפכו לנורמה. מגמה כזאת תגדיל בטור הנדסי את סכנות הגרעין של היום, ולבסוף תכפיל את כמות הפסולת הרדיואקטיבית שיש להיפטר ממנה, ותחייב את הרחבת החיפוש אחר אתרי קבע להטמנת פסולת למקומות נוספים, שלכל אחד מהם תצטרך להיות קיבולת גדולה יותר מאשר לאלה שקדמו לו.

מאגרי האורניום הצבאיים מתקופת המלחמה הקרה אוזלים והולכים. לכן חלה כבר כיום עלייה משמעותית במחיר האורניום, וסביר כי מגמה זו תימשך. אם תחנות הכוח הקיימות ימשיכו לפעול ואם יתרחב הארסנל הגרעיני בעולם, יהיה צורך לפתוח מחדש מכרות שהושבתו באופן זמני ולפתח חדשים, שיהיו פחות ופחות פוריים – או במילים אחרות: מרבצים הנוטים להפיק פחות ופחות אורניום ויותר ויותר שפוכת מסוכנת המכילה איזוטופים רדיואקטיביים בשיעור גבוה מהממוצע. הדבר יגרוּר פגיעה עצומה בסביבה ובבריאותם של אנשים השוכנים באזורים שיושפעו מכך.

המחסור הצפוי באספקת האורניום מתעצם נוכח חוסר האיזון הגדול בין המדינות המפיקות אותו לבין המדינות הצורכות אותו. קנדה ודרום אפריקה הן שתי המדינות היחידות בעולם המשתמשות באנרגיה גרעינית לייצור חשמל, שאינן תלויות ביבוא אורניום. המדינות החשובות ביותר המייצרות חשמל באמצעות אנרגיה הגרעינית כמעט שאינן מפיקות כלל אורניום בעצמן (צרפת, יפן, גרמניה, דרום קוריאנה, בריטניה, שוודיה וספרד) או שלא די בכושר ההפקה שלהן להפעלה ארוכת טווח של כוריהן (ארה"ב ורוסיה). אין כמעט שום מקום בעולם שכוח הגרעין בו הוא מקור אנרגיה מקומי, ככל שהדבר נוגע לאספקת הדלק. הדבר נכון במיוחד בכל הנוגע לרוסיה, העלולה להתמודד

## מיתוס חמישי: אנרגיה גרעינית תורמת להגנה מפני שינויי האקלים

E.ON, שהיא חברת האנרגיה הפרטית הגדולה בעולם, אמר לפני שנים רבות: "אם רוצים סדר יום בתחום האנרגיה שיחזיק מעמד במשך למעלה מיום אחד, צריך להתמודד עם שקלול הרווח וההפסד של נטישת האנרגיה הגרעינית אל מול הפחתה חדה של פליטת פחמן דר. חמצני. לא ניתן להשיג את שני הדברים גם יחד. זוהי רק תקוות שווא" (Berliner Zeitung, 3 בדצמבר 2005). דברים ברוח זו נשמעו גם מפי חסידים אחרים של תעשיית האנרגיה המסורתית. ברנוטאט משתמש בדבריו בטיעון החשוב ביותר למען המשך ייצורה של האנרגיה הגרעינית, שעל פיו ללא שימוש באנרגיה זו נדונה ההגנה על האקלים לכישלון. בקמפיין הפרסומי הנרחב ביותר שניהלה שדולת הגרעין בגרמניה אי פעם, היא השתמשה בסיסמה "פעילי אקלים בזויים". עדיין זכורות לנו היטב התמונות המלבבות מן הקמפיין ההוא. ברקע: תחנת הכוח הגרעינית של בְּרוֹנְסְבֵּיטֶל רוחצת באור השמש, ובחזית: כבשים רועות בשלווה על גדות נהר האלבה. בכיתוב שליווה את התמונה נאמר: "פעילי האקלים נאבקים 24 שעות ביממה למען יישומו של פרוטוקול קיוטו". במציאות, הכור הוא זה שנאבק מזה שנתיים, מאז קיץ 2007, בבעיות טכנולוגיות ובספקות שהתעוררו לגבי בטיחותו, ובתקופה זו לא ייצר חשמל ולו בהיקף של קילוואט־שעה בודד לרפואה.

מודעות הציבור לפגמים היסודיים שבתעמולה זו, המציגה את האנרגיה הגרעינית כמושיעת האקלים, מתעוררת רק בהדרגה. למעשה, אין בידי האנרגיה הגרעינית לתרום תרומה משמעותית כלשהי לפתרון הבעיה בהיקף עולמי. נוסף על כך, על אף הדיבורים על "תחייה", תרומתה של האנרגיה הגרעינית לאספקת החשמל בעולם עתידה להצטמצם במהלך עשרות השנים הבאות. על כך הצביעה לאחרונה, בסתיו 2009, חברת Prognos AG

הממצאים המדעיים המקובלים כיום והראיות שנאספו ברחבי העולם אינם מותירים עוד כל מקום לספק באשר לכך שהאקלים עובר תהליך של שינוי. הקהילה הבין־לאומית שואפת להגביל את ההתחממות הגלובלית ל־2 מעלות צלזיוס מעל לטמפרטורה ששררה בתקופה הקדם־תעשייתית, וכדי להשיג מטרה זו אין מנוס מהפחתה ניכרת של פליטת גזי החממה. מומחי האקלים במדינות מתועשות מקדמים הפחתה בפליטת פחמן דו־חמצני ( $CO_2$ ) בשיעור של בין 80% ל־95% עד לאמצע המאה הנוכחית. במדינות "מתעוררות" צפופות־אוכלוסין המתפתחות במהירות יש אפוא למתן את הגידול העצום בפליטות הגזים, לשאוף לבלום אותו לחלוטין, ובסופו של דבר גם לחתור לצמצום הפליטות הללו. המין האנושי יוכל לשרוד רק אם מדינות כמו סין, הודו, אינדונזיה וברזיל יפסיקו לחקות את מודל השפע של מדינות הצפון המתועשות, שצריכת האנרגיה בהן היא גבוהה ביותר ומבוססת בעיקר על שרפת דלקים מאובנים, ורק אם מדינות השפע עצמן ישנו את התנהלותן.

אין כל הפתעה בכך שחסידי האנרגיה הגרעינית מציגים את הטכנולוגיה הגרעינית כחלק מהפתרון למצב מסוכן זה. הגורם להתעוררותה המחודשת של המחלוקת בנושא במדינות מתועשות רבות, כמו גם במדינות "מתעוררות" ומתפתחות, הוא הפוטנציאל הטמון כביכול באנרגיה זו לצמצום פליטת גזי החממה ברחבי העולם. ציפייה זו היא המעודדת את חסידי האנרגיה הגרעינית להפעיל לחץ למען "תחייה" של טכנולוגיה זו לאחר עשרות שנים של קיפאון ושל צמצום השימוש בה. הפעלתן של תחנות כוח גרעיניות אינה כרוכה כמעט כלל בפליטת פחמן דו־חמצני. לפיכך, חסידי האנרגיה הגרעינית רואים בהן אבן פינה חיונית בהחלט במאמץ לעצירת ההתחממות הגלובלית. וולף בְּרוֹנְטָאט, מנכ"ל חברת האנרגיה של דיסלדורף

חברת E.ON מצדם הציעו בהצהרתם בפני ממשלת בריטניה להגביל את חלקו של החשמל הירוק לשליש מהייצור הכללי לכל היותר – יעד שעל פי תכניתיה של ממשלת הקואליציה של הנוצרים דמוקרטים ושל הליברלים בגרמניה אמור להיות מושג בגרמניה כבר בשנת 2020. חברת EDF הצהירה במפורש כי אם יעלה חלקו של החשמל הירוק על 25% מהייצור הכללי, הרי שהדבר יעמיד בספק את שאיפותיה שלה להקים תחנות כוח גרעיניות חדשות בממלכה המאוחדת.

בגרמניה לעומת זאת, חברת E.ON ושכמותה חולקות באופן חדי־משמעי על כך שקיים "ניגוד בין־מערכת" בין האספקה הבלתי סדירה של חשמל המיוצר באמצעות רוח ואנרגיה סולרית מצד אחד, לבין האנרגיה הגרעינית מצד שני. אך עמדתם של חברות אלה היא דו־פרצופית, והמניע מאחוריה ברור: הרי כבר בשנת 2009 יוצרו בגרמניה 16% מאספקת החשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות, ולכן מה שיוכל למנוע את הקמתם של כורים חדשים בבריטניה אינו מעמיד בסיון את הארכת תוחלת חייהם של כורים מתיישנים בגרמניה, הארכה שחברות אלה מעוניינות בה. אולם אין חולק על כך שבעתיד, מסיבות כלכליות וביטחוניות, תחנות הכוח הגרעיניות לא יוכלו להתאים את עצמן לאספקת החשמל הירוקה הגדלה בהתמדה, שאינה אספקה יציבה, ואף לא לצריכת החשמל, שגם בה קיימת מידה רבה של תנודתיות. תחנות החשמל הגרעיניות מספקות חשמל בתפוקה מרבית, חודש אחר חודש. לשם כך הן נבנו, ולכן הן כה רווחיות עבור מפעילותיהן.

כיום, ניתן אמנם ללא ספק לזוּסֵת את תפוקתם של כורים מסוימים, לצמצמה או להגבירה, כאשר הם פועלים בטווח התפקוד הגבוה שלהם. אולם הליך חריג כזה משפיע על יכולתן של תחנות הכוח להתקיים מבחינה כלכלית, שכן כאשר אופן פעולתן תלוי בהספק, הן מפיקות פחות אנרגיה ולפיכך מוכרות פחות. הליך זה אף טומן בחובו סיכונים בטיחותיים, שכן כל שינוי בתפוקתו של הכור כרוך בתוספת של לחצים מכניים, תרמיים וכימיים על רכיבים חשובים בכור. טענות אלה זכו לאישור בהצהרה שהוזכרה לעיל, שמסרה חברת EDF הצרפתית, בנוגע לאסטרטגיית האנרגיה המתחדשת של

Basler השווייצית (להלן "פרוגנוס"). במסמך ניתוח שהכירה עבור המשרד הפדרלי להגנה מפני קרינה החזירו עתידני החברה את תעשיית הגרעין אל קרקע המציאות. לפי תחזיתם, התרומה הגרעינית לאספקת החשמל ברחבי העולם עתידה להצטמצם מ־14.8% בשנת 2006 ל־9.1% עד לשנת 2020 ול־7.1% בלבד עד לשנת 2030 (פרוגנוס, 2009). נשוב לעסוק בכך בהמשך.

## כיצד פוגעת האנרגיה הגרעינית בהגנה בת־קיימא על האקלים

די בממצאים מעטים אלה כדי לקבוע בבירור רב למדי שמנקודת מבט עולמית ייצור האנרגיה הגרעינית אינו מגיע לממדים שיאפשרו לו לתרום לפתרון בעיית האקלים. יתר על כן, ייצורה של אנרגיה זו אף הופך לחלק מהבעיה, כיוון שצפוי שמערכת האנרגיה העולמית תעבור ארגון מחדש: מדינות רבות יותר ויותר עתידות לעבור למערכות אנרגיה שיופעלו בעזרת מקורות מתחדשים, כלומר אנרגיית רוח, מים ושמש ואנרגיה ביולוגית וגאותרמית. בעולם כזה לא יוכלו תחנות הכוח הגרעיניות להיות תחרותיות. אבל מעל לכול, תחנות אלה הן מכשול בדרך לפתרון כולל לבעיית האקלים. באופן אירוני, הייתה זו דווקא חברת E.ON בניהולו של וולף בְּרוֹנוֹטֵאט שסיפקה רמז מפתח להבהרת המצב, גם אם הדבר לא נעשה בכוונה. בתחילת שנת 2009 קיימה ממשלת בריטניה דיון לבחינת האסטרטגיה הבריטית בנושא אנרגיות מתחדשות, שיישומה כבר החל. כדי לעמוד ביעדי האנרגיה המתחדשת של האיחוד האירופי, כוונת התכנית לעת עתה היא להגדיל את חלקו של החשמל הירוק עד לכמעט שליש מאספקת החשמל בבריטניה. בעתיד צפוי חלקו של החשמל הירוק להוסיף ולגדול. מתייעוד הדיון עולה כי הושמעו בו דברים הן מטעם E.ON הן מטעם חברת החשמל הצרפתית הממשלתית EDF שנזכרה לעיל, הפועלת לקידום האנרגיה הגרעינית (UK Department for Business, Innovation and Skills, 2008). שתי החברות התריעו בפני חברי הוועדה על סכנות שונות: חברת E.ON התריעה מפני קידום "בלתי פוסק" של אנרגיה מתחדשת, שימנע מהחברה ליישם את תכניתיה להקמת תחנות כוח גרעיניות באיים הבריטיים. שתדלני

באמת במחירי הפסד מתחנות עומס־בסיס, מאשר לצמצם את התפוקה של תחנות הכוח הענקיות שלהן ולהגביר אותה בחזרה זמן קצר לאחר מכן.

## התחרות בין האנרגיה הגרעינית לבין האנרגיה המתחדשת מתגברת והולכת

אין חולק על כך שאנו עומדים בפני עימות נפיץ. ייצור החשמל בתחנות כוח המופעלות באנרגיה מתחדשת גובר משנה לשנה. בתנאי מזג אוויר מיטביים, תחנות אלה יכולות לעתים מזומנות יותר ויותר לתת מענה לנתח גדל והולך של הביקוש הכולל לחשמל. במקביל, לעתים מזומנות יותר ויותר יש צורך בצמצום תפוקתן של תחנות כוח גדולות למשך כמה שעות או ימים – לפחות כל זמן שברשת החשמל ניתנת עדיפות לחשמל ירוק. מה שהחל בסוף שנת 2009 כמתנת חג מולד לא נעימה לחברות היפוך בהדרגה לתופעה יום־יומית שתאיים על עליונותן. בשנת 2009 עמד חלקו של החשמל המסופק באמצעות אנרגיה ירוקה על 16%, ועד לשנת 2020 צפוי נתח זה להיות מוכפל פי שניים. האיגוד הגרמני הפדרלי לאנרגיה מתחדשת אף שוקל את האפשרות שחלקו של החשמל הירוק יעמוד על פי שלושה מכן. הדמיה של אספקת החשמל בגרמניה שביצע על בסיס תחזית זו מכון פְּרָאנְהוֹפֶר לאנרגיית רוח ולטכנולוגיית מערכות אנרגיה בעיר קאסל הובילה למסקנה שבמערכת העתידית שלנו יהיה פחות ופחות מקום לתחנות כוח גדולות שנועדו לפעולה רציפה. תחזיות כאלה כמעט מחייבות את חברות האנרגיה הגרעינית להפעיל את השדולה שלהן בכל עוצמתה נגד הרחבה נוספת של ייצור האנרגיה המתחדשת. מנקודת מבטן, ככל שיגדל מספרן של תחנות הכוח הגרעיניות המספקות חשמל לרשת, כך תגבר דחיפותו של עניין זה. אם יוחלט להאריך את תוחלת חייהם של כורים, הרי שהעימות הגדול הבא בין קואליציית הנוצרים־הדמוקרטים והליברלים בגרמניה לבין החברות שקואליציה זו קידמה הוא למעשה בלתי נמנע.

הארכת תוחלת החיים של הכורים היא בעייתית לא רק נוכח הסכנה הנשקפת מהפעלת תחנות כוח גרעיניות, אלא גם בשל החשש שמא המשך הפעלתן יעכב את תהליך ארגונה מחדש

ממשלת בריטניה. דובר מטעם חברת EDF הסביר בפירוט מדוע חלקה של האנרגיה הירוקה אינו צריך לעלות על 25% מכלל החשמל שייוצר בעתיד בבריטניה, והביא כדוגמה לכך את כור המים־בלחץ האירופי, כאשר הנימוק לכך נסמך על מגבלותיה של מערכת ויסות התפוקה בתחנות הכוח הגרעיניות. אפילו כורים חדישים כמו כור המים־בלחץ האירופי יכולים לעמוד בקצב התנוודות הטבעיות באנרגיה ממקורות מתחדשים רק כל עוד תרומתם לאספקת החשמל אינה רבה מאוד. לפיכך, במערכת אספקה שנועדה לתפקד לאורך זמן ולשמור על האקלים, טכנולוגיות אנרגיה ירוקות וגרעיניות מכריעות זו לזו.

אולם בריטניה של שנת 2010 רחוקה מאוד ממצב זה, והאנרגיה הירוקה ממלאת בה רק חלק קטן מצורכי האנרגיה. בגרמניה המצב שונה: תוצאותיו של עימות בין־מערכת זה ניכרות בה כבר עכשיו, והן מתגברות והולכות. בבוא היום, לא יהיה די ביכולתן המוגבלת של תחנות הכוח הגרעיניות לווסת את תפוקתן ולהתאימה בכל רגע נתון לכמויות האנרגיה הגדולות והולכות שזורמות לרשת החשמל ממתקנים להפקת חשמל מאנרגיית הרוח ומאור השמש. את השפעתה של תופעה זו ניתן כבר להרגיש היטב, למשל בבורסת האנרגיה של לייפציג, המכונה EEX, שבמקרים רבים יותר ויותר מחירי החשמל בה שליליים. פירושו של דבר, שחברות לאספקת אנרגיה מפסידות כסף על החשמל שהן מייצרות ומספקות לרשת החשמל. מצב זה, שבמבט ראשון נשמע בלתי מתקבל על הדעת, נוצר בדרך כלל בסופי שבוע או בחגים, כאשר נושבת בגרמניה רוח חזקה ובה בעת קיימת דרישה נמוכה לחשמל. כך אירע למשל בחג המולד של שנת 2009. במשך 11 שעות עמדו מחירי השוק המידי על מתחת לאפס, ולפרקים הגיעו עד למינוס 120 אירו למגה־וואט־שעה. ב־26 בדצמבר, במהלך היום כולו, עמד המחיר הממוצע על פחות ממינוס 35 אירו למגה־וואט־שעה. עבור החברות הגדולות המפעילות תחנות כוח, שלמרות מצב זה המשיכו לספק חשמל לרשת החשמל ולסחור בו בשווקים, הגיע ההפסד עד מהרה לסכומים של שש ואפילו שבע ספרות. עם זאת, לעת עתה נראה כי לחברות החשמל משתלם יותר לספק במשך כמה שעות חשמל שאינו נחוץ

הממשלה הפדרלית בגרמניה מנסה לעשות את הבלתי אפשרי.

קרן הטבע העולמית בחנה במחקר שכותרתו "גרמניה כמודל להגנה על האקלים עד שנת 2050" כיצד תוכל גרמניה להשיג את מטרותיה הפוליטיות ארוכות הטווח ביחס לאנרגיה ולהגנה על האקלים (WWF Deutschland, 2009). מתוצאות המחקר עולה כי הדבר יתאפשר רק אם משק האנרגיה יעבור ארגון יסודי מחדש, ואם ענפים מסוימים – ובהם ענף החשמל – יפסיקו כמעט לחלוטין את פליטת הפחמן הדו-חמצני תוך 40 שנה. לשם כך דרושה קודם כול נכונות פוליטית לבצע שינוי מבני זה על אף התנגדותם של ענפי הכלכלה המסורתיים. כמו בגרמניה, גם בשאר העולם זהו ביסודו של דבר עניין של ייעול אספקת האנרגיה וניצולה. הצורך בייעול נוגע בין השאר לענף הבנייה, למשקי הבית וכמובן לתהליכים התעשייתיים ולמגזר התחבורה. מדובר במעבר מפחם לגז טבעי ובאספקה גדלה והולכת של אנרגיה סולרית, אנרגיית רוח, אנרגיית מים, אנרגיית ביומסה ואנרגיה גאותרמית. בסופו של דבר, רק אנרגיות אלה הן שיוותרו ברובן. עדיין לא ברור אם, מתי והיכן עשויה טכנולוגיה של "פחם נקי" לתרום תרומה משמעותית בעולם. טכנולוגיה זו משמעה הפרדה של גז החממה פחמן דו-חמצני, הנוצר בשרפת הפחם והגז הטבעי, ולאחר מכן אחסונו במבנים גאולוגיים עמוקים.

דבר אחד ניתן לומר בוודאות: האנרגיה הגרעינית היא "טכנולוגיה מעכבת" בתהליך אדיר זה של שינוי, וזאת ממגוון של סיבות, כפי שהעירה המועצה המייעצת לאיכות הסביבה בגרמניה. הדבר נכון לא רק משום שתחנות כוח לעומס־בסיס מחבלות במידה הרבה ביותר בתהליך של המרת מערכת ייצור החשמל לאנרגיות מתחדשות, אלא גם בשל הסיכונים הקיימים להתרחשות אסונות ובשל ההקצאה הנדרשת של יכולות הנדסה ושל כסף לנושא זה, על חשבון ארגונה מחדש של מערכת האנרגיה. נוסף על כך, אין שום טכנולוגיה אחרת שמרחף מעליה איום דומה: תאונה קשה יחידה בתחנת כוח גרעינית או התקפת טרור אחת על תחנה כזו, די בהן כדי שהציבור ידחה טכנולוגיה זו אחת ולתמיד. אשר על כן, לפחות במדינות דמוקרטיות, סביר להניח כי יהיה במקרה כזה צורך להשבית חלק גדול

של מערכת האנרגיה לטובת אנרגיה מתחדשת, ובסופו של דבר יבלום אותו כליל.

אף שבגרמניה "מאבק המקורות" בין אנרגיית השמש לבין האורניום הוא נושא בוועד בהרבה מאשר בבריטניה או בארה"ב, נראה כי במידה רבה הפוליטיקאים אינם ערים לכך. כלכלנים דווקא כן מודעים לסוגיה זו. חברת פרוגנוס מעריכה כי סביר שאם יחול גידול ניכר נוסף בייצור האנרגיה המתחדשת, ייווצר צורך לצמצם את תפוקת תחנות הכוח הגרעיניות לעתים קרובות יותר ויותר (פרוגנוס, 2009). המועצה המייעצת לאיכות הסביבה בגרמניה קבעה במסמך שהגישה כי המשך הפעלתן של תחנות כוח פחמיות או גרעיניות גדולות וכן הרחבה של תחנות כאלה אינם עולים בקנה אחד עם היכולת ההולכת וגוברת לייצר במקביל חשמל ממקורות מתחדשים. מומחי הסביבה קבעו כי "חייבת להתקבל החלטה מערכתית. אין שום היגיון טכני או כלכלי בהליכה בשתי הדרכים בעת ובעונה אחת". המומחים הוסיפו וטענו בהחלטיות כי יש "לקבל החלטה לטובת מערכת אנרגיות מתחדשות". החברות עצמן בחרו שלא להגיב על פרסומים אלה מחשש שמא ייחשף במלואו חוסר ההיגיון שבדיון על הארכת תוחלת החיים של הכורים. מיד לאחר שתוכרע הסוגיה של הארכת תוחלת החיים, צפוי שהחברות יחדשו את מאבקן נגד עיגונה בחוק של ההעדפה לאנרגיות מתחדשות ברשת החשמל הגרמנית.

הדבר ממחיש בבירור כי התחרות מתקיימת על מערכת האנרגיה של העתיד. במילים אחרות, חרף ניסיונם של תועמלני האנרגיה הגרעינית לשכנע אותנו אחרת, היחס בין אנרגיה זו לבין האנרגיה המתחדשת חדל מזמן להיות סוגיה של "גם זה וגם זה". מדובר למעשה בסוגיה של "או זה או זה". במילים אחרות: "השילוב הרחב של מערכות האנרגיה" שחברות האנרגיה מקדמות במילים יפות אינו עובד במציאות. שילוב כזה אינו יכול לעבוד במערכת שבה אנרגיות מתחדשות אמורות לענות על צורכי "האספקה של רוב האנרגיה שלנו". עם זאת, לפי ההסכם הקואליציוני מחודש אוקטובר 2009, זוהי אחת ממטרותיה של הממשלה הנוכחית בגרמניה, ובמקביל מבטיחה הקואליציה לחברות האנרגיה להאריך את תוחלת החיים של תחנות הכוח הגרעיניות שלהן. דבר זה פשוט לא יעבוד.

מהכורים בטרם הגיעה שעתם.

## הגנה על האקלים באמצעים גרעיניים אינה מציאותית

לצורך השגת המטרות הבינלאומיות ארוכות הטווח בנושא האקלים, אין מנוס ממעבר ממערכת האנרגיה הנוכחית, המבוססת על מקורות אנרגיה מאובנים וגרעיניים, למערכת המבוססת באורח בלעדי על אספקת אנרגיה מתחדשת. האמצעים הטכנולוגיים הדרושים לביצועו של מעבר זה זמינים במידה רבה כבר עכשיו. ככל שנתחיל בכך מוקדם יותר כך יפחתו העלויות. בסופו של דבר, תתקיים מערכת אנרגיה בת־קיימא שתמזער באורח שווה את שתי הסכנות הגדולות: זו של שינוי באקלים העולמי וזו של תאונות הרוח אסון. החזרה המתמדת על הטענה כי קיים ניגוד מטרות בין הגנה יעילה על האקלים לבין דחייה של טכנולוגיית האנרגיה הגרעינית היא המצאה של חסידי האנרגיה הגרעינית, שאינה מבוססת אלא על האינטרסים שלהם. לא מדובר בשתי חלופות שיש לבחור ביניהן, אלא בשני עניינים העולים בקנה אחד זה עם זה.

קואליציית הנוצרים־דמוקרטים והליברלים בגרמניה שמה לעצמה למטרה להפחית את פליטות הפחמן הדו־חמצני בענף החשמל במדינה ב־40% עד שנת 2020 (בהשוואה לשנת 1990) באמצעות הרחבת השימוש באנרגיה גרעינית. כדי להשיג יעד זה יהיה צורך לבנות 10 תחנות כוח גרעיניות חדשות. נוסף על כך, הדבר יחייב גם בנייה של תחנות כוח גרעיניות חדשות להחלפת כורים שיושבתו בשל גילם. ועדת חקירה של הבית התחתון של הפרלמנט הגרמני קבעה כבר בשנת 2002 מה יקרה אם

צמצום פליטות הפחמן הדו־חמצני עד לשנת 2050 יבוצע בעיקר באמצעות שימוש בתחנות כוח גרעיניות. מדענים חישובו אז כי תרחיש זה יחייב להפעיל בין 60 ל־80 תחנות כוח גרעיניות חדשות. לשם השוואה, בשנת 2010 פועלות בגרמניה 17 תחנות כוח גרעיניות.

נוכח נתונים אלה, הנוגעים לגרמניה בלבד, קל לדמיין מה יהיו ההשלכות העולמיות הבלתי רצויות של אסטרטגיה לצמצום הפגיעה באקלים שתסתמך על אנרגיה גרעינית. הפחתה של פליטות פחמן דו־חמצני בממדים הנדרשים על פי הפאנל הבינ־ממשלתי לסוגיית שינויי האקלים תחייב הקמה של אלפי כורים חדשים, שבלעדיהם לא תורגש שום השפעה משמעותית. אם כך ייעשה, הרי שהסיכונים לאספקת החשמל וסכנת האסונות לא יוגבלו עוד ל־30 מדינות בלבד, אלא יתקיימו ב־50 או ב־60 מדינות, ואולי אף יותר מכך. אלפי מוקדי סיכון אפשריים יהיו פזורים ברחבי העולם, וייווצרו מטרות חדשות להתקפות צבאיות ולפיגועים באזורי עימות. הבעיות הכרוכות בסילוק קבוע של הפסולת והסכנה שבהפצה של נשק גרעיני ללא פיקוח ברחבי העולם יגיעו לממדים חדשים. וחשוב לא פחות מכך: המחסור באורניום שיווצר עקב ריבוי הכורים הגרעיניים יחייב עד מהרה להחליף בכל מקום שהוא את כורי המים הקלים הנפוצים כיום, בתעשיית פלוטוניום עם מחזור פסולת גרעינית וכורי דגירה מהירים, ותעשייה זו מסוכנת ופגיעה אף יותר. ולבסוף, יהיה צורך להשקיע משאבים כספיים עצומים בהרחבת התשתית הגרעינית, בעוד הון זה יכול לשמש למאבק בעוני ברחבי העולם.



## מיתוס שישי: יש להאריך את תוחלת חייהם של הנורים

הקדמה לפרק מאת ד"ר שחר דולב:

### רקע לפוליטיקה הגרמנית וליחסה לשימוש באנרגיה גרעינית

פרק זה עוסק באחד הנושאים הטעונים ביותר בפוליטיקה הגרמנית - ההחלטה על הוצאתם של הנורים הגרעיניים הפעילים בגרמניה משירות, וביטולה של החלטה זו. התהליך החל בשנת 2000, כאשר ממשלת השמאל של קואליציית המפלגה הסוציאל-דמוקרטית והירוקים הובילה חקיקה המחייבת את כיבויים וסגירתם ההדרגתיים של 19 הנורים הגרעיניים הפעילים בגרמניה וזאת עד שנת 2020, לצד איסור על בניית כורים חדשים. בד בבד נחקק חוק האנרגיה המתחדשת, שקבע כי על גרמניה לצמצם את פליטת גזי החממה משטחה עד שנת 2005 לכדי 25% מתחת לפליטות שנמדדו בשנת 1990. חקיקה זו תאמה את המטרות העיקריות של מפלגת הירוקים, שמקורותיה ממעמקי תנועת השלום והמחאה כנגד כורים גרעיניים ונשק גרעיני. היא גם שיקפה שינוי ביחס של המפלגה הסוציאל-דמוקרטית כלפי הנושא. תהליך דומה עבר על החברה הגרמנית כולה - עם השנים התחזקו בה הקולות הספקניים לגבי השימוש בכורים גרעיניים, עד שהפכו לרוב.

החקיקה המשותפת יצרה קשר בתודעה הציבורית בין אנרגיות מתחדשות לכיבוי הנורים הגרעיניים. אבל העובדה שכורים גרעיניים מסוגלים לייצר חשמל ללא פליטת גזי חממה הובילה ללחצים פוליטיים הולכים וגוברים, עד לעצירת תהליך הכיבוי בזכות האנרגיה ה"נקייה" שהם מייצרים. עליית מחיר הנפט והצורך לעמוד ביעדי הפחתת הפליטות נתנו הצדקה לקריאות מן הצד הימני של המפה הפוליטית לקראת הבחירות ב-2002 להארכת חייהם של הנורים הפעילים, אולם ניצחון קואליציית הסוציאל-דמוקרטים והירוקים אפשר את המשך התהליך. אחרי הניצחון הדחוק של הנוצרים-הדמוקרטים בבחירות 2005 ויכוח ציבורי נוקב, עלתה שוב האפשרות להאריך את פעילותם של הנורים. אך הקואליציה שהרכיבה אנגלה מרקל עם המפלגה הסוציאל-דמוקרטית אילצה אותה לכבד את החלטת הממשלה היוצאת ולהמשיך את התהליך הכיבוי.

שני כורים הספיקו להיסגר על פי התכנית, אך בעקבות הניצחון של קואליציית הנוצרים-הדמוקרטים והליברלים בבחירות 2009, הודיעה הממשלה על הארכת החיים של הנורים שנותרו, כל עוד הם עומדים בתקני הבטיחות. במקביל התחזקו בפוליטיקה הגרמנית הקולות שקראו לעצור את תהליך הכיבוי, ובכך הביעו תמיכה בעמדת חברי המפלגה הנוצרית-דמוקרטית שתקפו את החלטת הכיבוי. הדיון הנוכחי בפוליטיקה הגרמנית מציב שני מחנות תקיפים זה מול זה. בעוד שבראשית המאבק כנגד האנרגיה הגרעינית השתתפו בעיקר מפלגות השמאל, הרי שמספר שערוריות הרחיבו את בסיס התנועה וכעת היא כוללת גם גרמנים בני המעמד הבינוני מזרמי המרכז של הפוליטיקה הגרמנית. בין הגורמים לנטיות אלו היה הטיפול הכושל של חברת נאט"פ בתקלות בכור שלייד קרימל, והשערוריה באתר אכסון הפסולת הגרעינית בזלצברג אסה II, שערוריות ששחקו את אמון הציבור במערכות הממשל והפיקוח.

זול עבור הצרכנים באמצעות אנרגיה גרעינית. למעשה, מדובר רק בהון עתק וברצון להבטיח את מעמדם של ענקיות האנרגיה במשק.

העברתו של חוק הנסיגה מהגרעין בשנת 2002 צריכה הייתה למעשה לשים קץ לדיון על הארכת תוחלת החיים של הכורים. מאז החל הדיון, חושבו סכומי הכסף שבהם מדובר שוב ושוב בידי מדענים ונדונו באורח יום-יומי בזירה הפוליטית. לאחרונה, גם אנליסטים בבנקים מחשבים עבור המשקיעים הפוטנציאליים שלהם כמה נמוך יצנחו התגמולים השמנים של מפעילות תחנות הכוח הגרעיניות אם אמנם תיסוג הממשלה הפדרלית מעמדתה כפי שנקבעה בהסכם הקואליציוני. בקיץ 2009 העריך בנק באַדן־וירטמברג הגרמני (Landesbank Baden-Württemberg) את הרווח הגולמי העודף של חברות אלה כנע בין 38 ללמעלה מ־233 מיליארד אירו. הערך הנמוך מבין השניים בהערכה זו נוגע לאפשרות שתוחלת החיים של הכורים תוארך בעשר שנים נוספות מעבר ל־32 השנים שנקבעו בהסכם ההפסקה בשלבים, ובה בעת ייוותר מחיר השוק של החשמל בתקופה זו מתון. הערך הגבוה יותר נוגע לאפשרות שתוחלת החיים של הכורים תוארך ב־25 שנה ולמצב שבו מחיר השוק לחשמל יהיה גבוה. הציפייה לרווחים נוספים תוביל לעלייה עצומה בערך של ארבע החברות. בנק באַדן־וירטמברג מעריך כי ערכה של חברת EnBW אף יוכפל, ועל יסוד הערכה זו הוא גורס כי יש טעם בהמשך הפעלתן של תחנות הכוח הגרעיניות.

סכומי עתק אלה מסבירים מדוע נראה כי מנהלי החברות מוכנים לספוג בשמחה את הפגיעה התדמיתית שגורר אחריו הקמפיין שלהם להארכת תוחלת חייהם של כורים מתיישנים ומועדים לתאונות. ביטולו של ההסכם להפסקת השימוש באנרגיה הגרעינית באופן מדורג כרוך אם כן במחיר. במשך שנים פנו מתנגדי האנרגיה הגרעינית וארגוני הסביבה בקמפיין שלהם לצרכנים בקריאה: "הפסקה בשלבים של השימוש באנרגיה גרעינית – עשו זאת בעצמכם". הקמפיין קרא לצרכנים לעבור לספקיות חשמל המתבססות על אנרגיה ירוקה. בדרך זו, ובשל סדרת כשלים בתחנות הכוח הגרעיניות הגרמניות בפרוֹנסֶבֶיטל ובקְרִימל, איבדה חברת נאָטנְפֶל כמה מאות אלפי לקוחות.

מאז ראשית המילניום החדש היו אלה בעיקר גורמים זרים ששבו והעלו בגרמניה את אפשרות הקמתן של תחנות כוח גרעיניות חדשות. אל אלה הצטרפו מדי פעם אנשים כדוגמת רונלד קוך או גינטר אטינגר (שניהם חברי המפלגה הנוצרית־דמוקרטית הגרמנית), עד אשר מונה זה האחרון לנציב האנרגיה של האיחוד האירופי. עם זאת, אפילו בכירי המפלגה הנוצרית־דמוקרטית נקראו שוב ושוב לסדר על־ידי עמיתיהם למפלגה, ובחודש דצמבר 2008 אפילו על־ידי הוועידה הפדרלית של המפלגה. בוועידה הצביעו רוב הנציגים נגד הקמתם של כורים חדשים בגרמניה, וזאת בניגוד לרצונה של ועדת העתירות. אך החלטה זו הייתה חסרת משמעות וללא כל השלכות. חברות אנרגיה בגרמניה אינן יכולות להגיש בקשות להיתרי בנייה להקמת תחנות כוח גרעיניות חדשות, גם אם הן רוצות בכך. חלקו הראשון של סעיף 7 בחוק הנסיגה מהגרעין, המסדיר את ההפסקה ההדרגתית של השימוש בטכנולוגיה זו, קובע כי "לא יוענקו שום רישיונות [...] להקמה או להפעלה של תחנות כוח לייצור מסחרי של חשמל". חוק זה הועבר בשנת 2002 על־ידי קואליציית הסוציאלי־דמוקרטים והירוקים. אפילו קואליציית הנוצרים־דמוקרטים והליברלים, שנבחרה כאמור לאחרונה בשנת 2009, מכבדת לעת עתה את האיסור שהוטל על הקמת תחנות כוח גרעיניות חדשות. אך עובדה זו אינה מטרידה במיוחד את החברות המפעילות את תחנות הכוח הגרעיניות – E.ON, RWE, – EnBW (Energie Baden-Württemberg) ונאָטנְפֶל – משום שגם ללא האיסור החוקי, שום מנכ"ל לא יבחר בדעה צלולה לצאת להרפתקה כזו בעתיד הנראה לעין. במקום רווחים שמנים, לא יוביל הדבר אלא להפסדים אין־סופיים.

שונה לחלוטין מצבם של כורים שתוחלת חייהם חורגת ממגבלות הזמן שהוסכם עליהן עם ממשלת הקואליציה הקודמת, של הסוציאלי־דמוקרטים והירוקים. החברות המפעילות תחנות כוח גרעיניות טוענות פה אחד בעניין זה שונקפה סכנה להישרדותן. אולם זה אינו העניין כלל וכלל, וגם המניעים האחרים שמנהלי החברות מציגים דרך קבע כדי לתמוך בטיעוניהם אינם נכונים: אין מדובר בהגנה על האקלים, בהבטחת אספקת החשמל, באי־תלות ביבוא אנרגיה ובייחוד לא בייצורו של חשמל

## חברות אנרגיה גרעינית מפרות את הבטחותיהן

"שני הצדדים ימלאו את חלקם ביישום תוכנו של הסכם זה" – אלה היו מילות הטקסט של נציגי החברות הגדולות ביותר לאנרגיה גרעינית ב־14 ביוני 2000, בעת שחתמו על ההסכם שלהן עם קואליציית הסוציאלי-דמוקרטים והירוקים בנושא "הנסיגה מהגרעין". עם החותמים נמנה גם עו"ד ג'רלד הַנְּהִיפֶר, שהשתתף במשא ומתן על ההסכם כנציג הבכיר לענייני מדיניות כלכלית מטעם קודמתה של E.ON, חברת Viag. אך הַנְּהִיפֶר מכהן כעת כראש המחלקה לבטיחות כורים במשרד הפדרלי לאיכות הסביבה, ומאז סתיו 2009 הוא נאבק דווקא למען ביטולו של ההסכם. יתר על כן, הַנְּהִיפֶר היה מופקד על מחלקת הכורים של המשרד גם בתקופתה של אנגלה מרקל כשרה לאיכות הסביבה, עד שנת 1998. נשאלת אפוא השאלה אם חציית קווים כפולה זו מצדו קבילה מבחינה משפטית, ועל שאלה זו ניטש ויכוח פוליטי. כאשר נחתם ההסכם סופית, כשנה לאחר החתימה עליו בראשי תיבות, אמר אולריך הרטמן, יושב ראש חברת E.ON כי "פשרות פוליטיות הן גם עניין של אמון [...] ההסכם הוא רק הצעד הראשון. העניין המכריע הוא ששני הצדדים ירגישו מחויבים לתוכנו ולרוחו אפילו בעתיד. אנחנו מוכנים לעשות זאת". שלוש שנים לאחר החתימה על ההסכם התחייב מנכ"ל EnBW דאז, אוֹץ קְּלֶאָסֶן, ללא הסתייגות, כי בשום נסיבות שהן לא יחול שינוי בעמדת החברה בשאלת הפסקת השימוש באנרגיה הגרעינית: "איני מעלה השערות לגבי שינוי בקואליציה – הכבוד שלי כלפי הקאנצלר אינו מתיר לי לעשות זאת". בשנת 2005, לפני הבחירות הכלליות, התבטא קְּלֶאָסֶן בעניין האפשרות שההסכמה הכללית בעניין הגרעין תתהפך. לדבריו, "התעשייה אינה יכולה לדרוש ביטחון תכנוני ואז להטיל ספק במה שהיא עצמה נשאה ונתנה עליו, הסכימה לו וחתמה עליו". אולם מאז שסקרי דעת הקהל הראו כי יש רוב לממשלה ידידותית לנושא הגרעין, התמעט העיסוק בשאלת מחויבותן המוחלטת של חברות האנרגיה הגרעינית להסכם. החברות E.ON, RWE, EnBW וְאֶטְנֶפֶל הפנו עורף בו־זמנית ל"תוכנו ולרוחו" של ההסכם שמנהליהן חתמו עליו ברוב טקסט יחד עם נציגי הממשלה הבכירים ביותר. שנים לפני המשבר הכלכלי

כבר ידעה גרמניה כי במשרדי ההנהלה של כמה מהחברות החזקות ביותר במדינה יושבים אנשי עסקים שאינם בהכרח אנשי כבוד. לו היו כאלה, היו מצייתים להסכם ששיקף ללא ספק גם את שאיפות רוב האוכלוסייה, גם אם נחתם רק בלחיצת יד.

בעקבות הבחירות הכלליות שנערכו בשנת 2009 הכריז יזם הפלדה לשעבר יֶרְנֶן גְרוֹסמַן, שעמד מאז שנת 2007 בראש חברת RWE כי "תחנות כוח גרמניות הן בטוחות", והעיר כי נוכח העובדה שהן פועלות כבר 32 שנה, משך זמן שלאחריו תחנות כוח גרעיניות גרמניות אמורות להיות מושבתות, אלה הן "שנותיהן היפות ביותר". גרוסמן הוסיף כבדרך אגב ובקוצר רוח כי בזירה הבינ־לאומית נפוצה יותר "תוחלת חיים של 50 עד 60 שנה". אך לא כך במציאות. 130 תחנות הכוח הגרעיניות שהושבתו ברחבי העולם עד סוף שנת 2009 הגיעו לתוחלת חיים ממוצעת של כ־23 שנים בעת שנסגרו, ואילו בשנת 2010 עומד גילן הממוצע של התחנות הפועלות בעולם על 25 שנה. תחנות ספורות בלבד הושבתו סופית רק אחרי 40 שנה, ושום כור לא המשיך לפעול למעלה מ־50 שנה וודאי שלא הגיע ל־60 (פרוגנוס, 2009). זוהי אפוא רמת הדיוק שירגן גרוסמן מחויב לה בעת שהוא נאבק למען הכורים המתיישנים שלו בעיר ביבליס.

### מדוע לחלט רווחים עודפים?

נציגי הנוצרים הדמוקרטים והליברלים בגרמניה טענו מאז ומתמיד כי אין בכוונתם לאפשר לגורמים שריווחו מהיעד הממשלתי להאריך את תוחלת החיים של תחנות כוח גרעיניות, לקבל הטבה זו "בחנים". לדבריהם, הם מעוניינים שהרווחים העודפים ישמשו באורח סלקטיבי למחקר בנושא אנרגיה מתחדשת, לפיתוח טכנולוגיות בתחום זה, להורדת תעריפי החשמל או לדברים אחרים הזוכים לתמיכה ציבורית נרחבת. לאחר שנבחרה "ממשלת החלומות" שלהן בסתיו 2009 אותתו החברות המפעילות את הכורים על נכונות להתפשר בנושא זה. אך לא תמיד היו פני הדברים כך. מוטב שהקאנצלרית והשר לאיכות הסביבה יזכרו היטב כי החברות הוכיחו את עצמן בעבר, תחת קואליציית הסוציאלי-דמוקרטים והירוקים, כמי שאינן מסוגלות לכבד

אם כן שום סיבה נראית לעין לשנות דבר, אפילו לא הפער המדומה באספקת החשמל שיווצר כביכול כפי שגורמים שונים "בודים מלבם" מפעם לפעם. פער כזה לא ייווצר, כיוון שתחנות כוח המופעלות על-ידי פחם וגז ימשיכו לפעול ויספקו די חשמל למשך תקופה ארוכה בהרבה מפרק הזמן שנקבע, ואף ייבנו תחנות חדשות מסוגן.

## זניחה מושכלת של השימוש באנרגיה הגרעינית

מתברר כי האתגר האמתי הוא לדאוג לכך שהחשמל הירוק, שהוא בלתי סדיר מעצם טבעו, יהיה זמין במקום הנכון ובזמן הנכון לכל אורך השנה. הדבר יתאפשר אם רשתות החשמל יורחבו ויאורגנו מחדש בהדרגה, וכן אם יחוזקו צמתי החיבור של הרשת לרשתות בחו"ל. כמו כן, יהיה צורך להשתמש במערכות לאגירת חשמל, כדוגמת מתקנים הידרואלקטריים לאגירה שאובה, לשם השלמת החשמל המיוצר באמצעות הרוח ולהשתמש בהן במקום באנרגיה גרעינית עודפת. נדרשת גם התקדמות בפיתוח מערכות חדשות לאגירת חשמל (Solar Institute, Jülich, FH Aachen, 2009). אולם כל זמן ש־20,000 המגה-וואט המיוצרים בתחנות כוח גרעיניות עדיין מסופקים לרשת, ואינם מבוטלים בהדרגה כפי שתוכנן, לא תיתכן, לפחות בשלב זה, תמיכה כלשהי במהפך, ואספקת החשמל הגרעינית תמשיך לחסום את הרשת במשך עשרות שנים.

שום מתכנן כבישים לא היה מעלה על דעתו להקים גשר שיאריך את הדרך מנקודה א' לנקודה ב'. אך זהו בדיוק המצב בכל הנוגע לסוגיית הארכת תוחלת החיים של תחנות הכוח הגרעיניות. הדרך לעידן האנרגיה המתחדשת תתארך, ותוך שנים אחדות, במקום שגרמניה תהיה חיל החלוץ של השינוי באנרגיה, היא תפגר מאחור.

את הסכם ימים ספורים לפני יום הבחירות בשנת 2005, כשהסתמן שקואליציית הנוצרים־דמוקרטים והליברלים עומדת לזכות, דיבר בכנות וְלֵטֶר הוֹלְפֶלְדֶר, שהוזכר לעיל, ושכיהן אז בה בעת כיושב ראש חברת E.ON וכנשיא פורום האטום בגרמניה, על סוגיית החילוט החלקי של הרווחים העודפים שיופקו מהארכת תוחלת החיים: "כמדיניות רגולציה, חילוט רווחים הוא בלתי קביל לחלוטין". הוֹלְפֶלְדֶר הוסיף ותמה "איזה אינטרס אפשר לצפות שיהיה לחברות, העוסקות בפעילות מסחרית, להאריך את תוחלת החיים של תחנות כוח אם הן לא יפיקו מכך שום רווח?"

הקואליציה שעלתה לשלטון בבחירות של שנת 2009 מבטיחה לנו שבכוונתה להשתמש בתחנות כוח גרעיניות רק כ"גשר" במעבר לעידן האנרגיה המתחדשת, כלומר לתקופה מוגבלת. בכך אין קואליציית הנוצרים־דמוקרטים והליברלים נבדלת מקודמותיה, עד כמה שהדבר מפתיע. גם הממשלות הקודמות לא נשאו ונתנו על הפסקה מִיִּדית של השימוש בטכנולוגיית הגרעין, אלא על פרידה הדרגתית ממנה. אפשר להשוות בין ה"פרישה" מתחנות הכוח הגרעיניות שהייתה צפויה בעקבות "חוק הנסיגה" לבין התחזית שמשרד איכות הסביבה הפדרלי מתווה דרך קבע ביחס להרחבת האנרגיה המתחדשת. ההשוואה ממחישה כי כמות החשמל המיוצרת באמצעות תחנות כוח חדשות המופעלות על-ידי רוח, אנרגיה סולרית ואנרגיה ביולוגית, תוכל למלא תמיד את החלל שיותיר אחריו החשמל הגרעיני, ממש עד להשבתתה של תחנת הכוח הגרעינית האחרונה ואף מעבר לכך (BMU, 2009). לפיכך, לפי חוק הנסיגה מהגרעין משנת 2002, אמור היה "תפקיד הגישור" של האנרגיה הגרעינית בגרמניה להסתיים בין שנת 2020 לשנת 2025. מלבד האינטרס של החברות לזכות ברווחים, אין

## מיתוס שביעי: האנרגיה הגרעינית זוכה לעדנה מחודשת

436 כורים גרעיניים פעילים, שתפוקת החשמל הכוללת שלהם עמדה על כ־370,000 מגה-וואט. השיא נשבר בשנת 2002, שבה פעלו 444 כורים, ומאז החל מספרם להצטמצם בהדרגה ובהתמדה. בארה"ב לבדה פועלים 104 כורים, ומאז 1973 לא התקבלה בה שום הזמנה לבניית כור חדש שלא בוטלה מאוחר יותר. עם זאת, מאז שנת 2007 הפכה ארה"ב למשכנו של אתר הבנייה הגרעיני הוותיק ביותר. בתקופה זו התחדשו העבודות על יחידה 2 של תחנות הכוח "וֶאָטְס בָּאָר". צבוי שבניית הכור תסתיים עד שנת 2012, כלומר 40 שנה לאחר שהונחו לו היסודות. במערב אירופה (למעט צרפת) המתינו החברות האמונות על בניית הכורים במשך 25 שנה - עד שנת 2005 - לחוזה בנייה חדש, ואפילו כעת נמצאים רק שני כורים בבנייה: אחד באולקילואוטו שבפינלנד והשני בפּלֶמְנוּוִיל שבצרפת, מול חופי בריטניה.

כור המים־בלחץ האירופי של מֶאָגְד (קונסורציום) אָרְבֶּה־סִימֶנְס, ששימש את שדולת הגרעין המערבית ככור לדוגמה, הפך במהרה לסיטוט עבור כל המעורבים. העלויות תפחו מ־3 מיליארד אירו, כפי שנקבע בתחילה, ל־5.4 מיליארד אירו (2009), והתחלת הפעלתו מתעכבת כבר שלוש שנים וחצי (2012). בעיות אלה גררו פנייה לבית הדין האירופי ליישוב מחלוקת על מיליארדי אירו בין הזכינית לבין קבלן הבנייה. גם במקרה של כור המים־בלחץ האירופי השני ניכרים סימנים לתפיחת העלויות ולעיכובים.

קיצורו של דבר: לבד מאתרי בנייה הנמצאים בבעלות ממשלתית אסיינית - וליתר דיוק סינית - הדרישה לבני כורים נותרה, למרבה האכזבה, נמוכה. עליפי הסוכנות הבין־לאומית לאנרגיה אטומית, שני שלישים מ־56 הכורים הנתונים בבנייה ברחבי העולם בתחילת שנת 2010 נמצאים באסיה. סין, שבה נבנו 20 תחנות כוח גרעיניות בתחילת שנת 2010, השיקה 15

תחנות הכוח הגרעיניות ממלאות כיום תפקיד מרכזי, במידה כזו או אחרת, באספקת החשמל ב־30 מדינות שבהן הן פועלות באורח מסחרי. תעשיית אנרגיה זו היא חלק מהבסיס הכלכלי במדינות אלה, ולכן היא מכתיבה את העתיד יותר מכל גורם אחר. התמונה שונה במקרים שקיימים בהם אינטרסים אסטרטגיים חיצוניים או אינטרסים של אסטרטגיה צבאית הממלאים תפקיד בנושא זה. בתנאים רגילים, תעשייה זו מביאה בחשבון גורמים כלכליים מפוכחים. האם ייצור חשמל באמצעות אנרגיה גרעינית משמעו רישיון להדפיס כסף או שמא הדבר דומה יותר לבור ללא תחתית? התשובה לכך תלויה בנסיבות: אם הכור מייצר אנרגיה באורח מהימן מזה עשרים שנה, ואין שום סיבה להניח כי לא ימשיך לעשות כן, אזי האפשרות הראשונה היא הסבירה יותר, כל עוד לא מתרחשת תאונה הרת אסון מסוגן של אלה העולות להתרחש בכל תחנת כוח מעצם טבעה. לעומת זאת, אם יש לבנות תחילה את תחנת הכוח, ובייחוד אם מדובר בתחנה ראשונה בסדרה חדשה, מומלץ מאוד למשקיעים להימנע מפרויקט מסוג זה, אלא אם כן עולה בידם לגלגל את העלויות, שאינן ניתנות לחיזוי, על צד שלישי. צד זה יהיה ציבור משלמי המסים או כלל צרכני החשמל. עיקרון זה תקף בכל מקום בעולם, אפילו כאשר המשלה עצמה היא זו שבונה את הכור, מפעילה אותו ומאוחר יותר גם אחראית אולי לסילוקו. גם במקרה כזה, הציבור הוא שיידרש במוקדם או במאוחר לשלם את החשבון.

כיום, בחירתם הראשונה של משקיעים פרטיים, שעומדים להשקיע או שמעוניינים להשקיע בתעשיית תחנות הכוח, מן הסתם לא תהיה בתחנות כוח גרעיניות. על כך מלמדות אפילו הראיות האמפיריות. על פי נתוני הסוכנות הבין־לאומית לאנרגיה אטומית בווינה, בתחילת שנת 2010 היו ברחבי העולם

שצפו מקימיהם מלכתחילה. בתרחישים האופטימיים ביותר שתיארה הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית נצפתה תוחלת חיים ממוצעת של 45 שנים לדור הכורים הנוכחי. בשנים האחרונות קצבו הרשויות בארה"ב תוחלת חיים של 60 שנה ללמעלה ממחצית מ-104 הכורים הגרעיניים הפועלים בתחומה. צפוי שתקצב תוחלת חיים דומה לרוב הכורים הנוטרים. ובינתיים דנה התעשייה באפשרות לקצוב לכורים תוחלת חיים של 80 שנה. בשנת 2010 עומד גילם הממוצע של הכורים בארה"ב על 30 שנה.

כורים מתיישנים שתפוקתם 1,000 מגה וואט ושאמורים להיסגר, יכולים למעשה להמשיך לייצר חשמל בעלות נמוכה שאין לה שום תחרות. זאת, בתנאי שלא יתרחשו תאונות רציניות שיפרו את המאזן, בתנאי שלא יהיה צורך לבצע תיקונים יקרים או להשבתם לפרקי זמן ארוכים, ובתנאי שלא יתעורר הצורך להחליף בהם רכיבים מרכזיים (כדוגמת מחולל הקיטור). הארכת תוחלת החיים דוחה את "הקץ המר" של תעשיית האנרגיה הגרעינית, כלומר את הוצאתם של הכורים הגדולים מכלל שימוש, את פירוקם ואת העלויות הבלתי נמנעות הכרוכות בכך, העלויות להגיע למיליארדים. כיוון שעלות הדלק היא רק חלק קטן מהעלות הכוללת של הפעלת תחנות כוח גרעיניות, מסתמכות החברות על הכנסות מהמשך הפקת חשמל, שערכן מיליארדים.

אולם התמקחות זו על תוחלת החיים של הכורים, אין לה דבר וחצי דבר עם תחייה אפשרית של האנרגיה הגרעינית. נהפוך הוא: הקריאות ל"תוספת זמן" מלמדות בבירור כי ספקיות החשמל נזהרות מהשקעות בתחנות כוח גרעיניות חדשות בגלל שיקולים כלכליים, ומעדיפות להפיק רווחים קלים מתחנות כוח ישנות. הן עושות זאת מבלי להביא בחשבון את העובדה שכורים אלה חשופים יותר ויותר לתקלות עקב גילם המופלג.

עיסוק זה בתוחלת החיים של הכורים אף לא בלם את הירידה המתמשכת בייצור האנרגיה הגרעינית המתרחשת מזה עשרות שנים. 8 שנים של תמיכה פוליטית תקיפה של ממשל בוש בארה"ב באנרגיה גרעינית לא הובילו ולו להקמתו של פרויקט אחד, וכפי שראינו, במערב אירופה ישנם שני אתרי בנייה בלבד. למרות

פרויקטים חדשים תוך שנתיים. 8 מהכורים הנמצאים בשלבי בנייה, בעיקר ברוסיה ובמזרח אירופה, נמצאים במצב זה כבר 20 שנה או יותר. בכל נסיבות אחרות היו אתרי בנייה כאלה מוגדרים כפילים לבנים.

## אנרגיה מתחדשת היא המגמה העולמית החדשה

כפי שהוזכר לעיל, חברת פרוגנוס מבאזל הכינה ניתוח להגנה מפני קרינה עבור המשרד הפדרלי. ביחס לשאלת "תחיית האנרגיה הגרעינית" בדקו המומחים לאיזו ההתפתחות ניתן למעשה לצפות על סמך התכנון ברחבי העולם ולאור הניסיון שנצבר בתחום הקמת תחנות כוח גרעיניות. התוצאה ברורה ומזעזעת כאחת עבור שדולת האנרגיה הגרעינית: לא תהיה שום תחייה גרעינית עד לשנת 2030. ההפך הוא הנכון: אנליסטים של חברת פרוגנוס צופים כי מספר תחנות הכוח הגרעיניות שיפעלו ברחבי העולם יצטמצם כמעט ברבע עד לשנת 2020 ול-30% בקירוב עד לשנת 2030 (פרוגנוס, 2009). הדבר יוביל להפחתת נפח החשמל המיוצר בעולם באמצעות אנרגיה גרעינית, וצפוי שנפח זה יהיה בשנת 2030 פחות ממחצית מנפח הייצור בשנת 2006. האנרגיה הגרעינית ככלי במאבק נגד שינויי האקלים תתברר אם כן כאשליה, במיוחד נוכח קצב התפתחותה המסחרר של היכולת הכוללת לייצר חשמל מאז ראשית המילניום ועד למשבר הכלכלי. תפוקתן הזמינה של תחנות הכוח גדלה במהירות, בקצב של כ-150,000 מגה-וואט בשנה. האנרגיה הגרעינית סיפקה רק כ-2% מנפח זה, ובשנים 2008 ו-2009 אף פחות מכך. במהלך תקופה זו הוכנסו לפעולה שתי תחנות כוח גרעיניות שתפוקתן אינה נופלת מ-1,000 מגה-וואט, אך ארבע יחידות כורים שתפוקתם עמדה על מעט מתחת ל-3,000 מגה-וואט הושבתו. בשנתיים אלה סיפקה התעשייה המתפתחת של חוות הרוח הספק נוסף של כמעט 60,000 מגה-וואט על אף המשבר הכלכלי והפיננסי בעולם.

חרף הראיות לכך שהאנרגיה הגרעינית ממלאת תפקיד שולי בלבד נוכח הגידול העולמי העצום בתפוקת תחנות הכוח, מפעילות הכורים ממשיכות להיאבק בנחישות למען הארכת תוחלת חייהם של הכורים הקיימים לתקופה שארוכה בהרבה מ-25 עד 30 שנות הפעילות

מסוגים חדשים, המבוססים על טכנולוגיה שטרם נוסתה ברובה. ניתוח שפרסמה בקיץ 2009 חברת הדירוג Moody's, שבסיסה בניו יורק, צופה ירידה מתמשכת בדירוגן של חברות לאספקת חשמל התומכות בתכניות להקמת תחנות כוח גרעיניות חדשות, בשל הסיכונים שאינם ניתנים להערכה הכרוכים בדבר. טכנולוגיות חדשות – גם כאלה שאינן קשורות להקמת תחנות כוח – מתנהלות על פי רוב באופן צפוי ולאורך זמן לפי "עקומת למידה" שבהתאם לה יורדים המחירים בהתמדה. אולם גם כיום, יובל שנים לאחר ראשית ביקוע הגרעין לצרכים מסחריים, יצרני הכורים נאלצים להתחיל שוב ושוב מחדש. מסיבה זו בנו יצרני כורים בשנות ה-70 וה-80 כורים גדולים יותר, ויותר, בתקווה שאלה יפיקו ככלל חשמל זול יותר מאשר יחידות קטנות. אלא שההסתמכות על יתרון הגודל לא פתרה את הבעיה. יצרני הכורים מביטחים מזה שנים לייצר כורים זולים יותר, אך הבטחות אלה לא מומשו מעולם. האנרגיה הגרעינית עודנה טכנולוגיה מסוכנת ביותר, בהיבט הבטיחותי והכספי כאחד.

### סובסידיות למניעת שפל גרעיני

נושא זה נוגע בעיקר לארה"ב. במשך 8 שנים ניסה ממשל בוש כל דרך אפשרית להעניק ליצרניות החשמל במדינה תמריצים לבניית כורים חדשים. דובר אז על הקמתן של למעלה מ-300 תחנות כוח גרעיניות חדשות עד לשנת 2050. אולם נכון להיום עודנו ממתניין להולדתה המחודשת של תעשיית הגרעין (Squassoni, 2009). הנשיא ג'ורג' וו' בוש הותיר ליורשו ברק אובמה שלל הבטחות למתן סובסידיות לספקיות החשמל המהססות. לחשובה שבהן נחשבת ההבטחה להעניק ערובות ממשלתיות בהיקף של למעלה מ-80% מעלותה הכוללת של תחנת הכוח החדשה הראשונה שתיבנה. בדרך זו מוסט הסיכון העצום, הנובע בין היתר מן העיכובים השכיחים בהקמת תחנות כוח חדשות, מכיסיהם של ספקיות החשמל ובוני הכורים – אל כיסו של משלם המסים. יתר על כן, הנחות מסוימות במסים נועדו להוריד באורח מלאכותי את מחירי החשמל המיוצר באמצעות תחנות הכוח הגרעיניות החדשות; הליכי האישור צומצמו; הממשלה קיבלה על עצמה לשלם חלק ניכר מהעלות הכרוכה

זאת, מזה עשרות שנים נערכים מחקרים שכל מטרתם להוכיח כי תחנות הכוח הגרעיניות החדשות דווקא כן מסוגלות להתחרות בטכנולוגיות אחרות לייצור חשמל. אולם גם אם מחברי מחקרים אלה ומממניהם מאמינים לתחזיות המוצגות בהם, הרי שהמשקיעים הפוטנציאליים אינם שותפים לאמונה זו. זוהי הסיבה הראשונה לחוסר הוודאות הרב הסובב את נושא העלות האמיתית של דור הכורים החדש. שום נתונים מהימנים אינם זמינים בנוגע לעלויות הכוללות, ובייחוד בנוגע לעלויות הבנייה, המימון, סילוק הפסולת והפירוק. הדבר נובע מכך שהאנליסטים מתייחסים בספקנות רבה כמעט לכל הערכה שפורסמה בנושא. ספקנות זו נובעת מכך שהנתונים מגיעים מקבלני בנייה המעוניינים למכור את הכורים, או ממשלות, מאגודות או מארגוני שדולה. אלה חותרים לגייס תמיכה ציבורית ברעיון הלא-פופולרי של אנרגיה גרעינית, וזאת באמצעות יצירת ציפייה ציבורית למחירי חשמל נמוכים, בהנחה שטענות אחרות לא יועילו.

אולם מלבד העניינים הנוגעים לאינטרסים פרטיים, קיימות גם בעיות מנקודת מבט אובייקטיבית. עד כה כל סדרת כורים חדשה שהוקמה הייתה כרוכה בעיכובים עצומים, בפיצויים יקרים על "מחלות ילדות" ובתקופות השבתה ממושכות. תחזיותיהם של בוני הכורים החדשים, האופטימיות תמיד, מעוררות אי-נחת בקרב משקיעים אפשריים. אלה למדו מניסיון של יובל שנים שתעשיית האנרגיה הגרעינית טובה יותר בהבטחות מאשר בקיומן. בארה"ב הוזמנו למעלה מ-250 כורים אך כמעט מחציתם בוטלו לאחר מכן, בעיקר כיוון שעלויות תחנות הכוח שהופעלו בסופו של דבר היו גבוהות פי שניים מהמצופה ואף יותר מכך. באמצע שנות ה-80 כינה מגזין "פורבס" את התמוטטות תעשיית הגרעין בארה"ב "האסון הניהולי הגדול ביותר בתולדות הכלכלה". בשנות ה-70 צפתה המועצה האמריקאית לאנרגיה אטומית את הקמתן של 1,000 תחנות כוח גרעיניות, אך עד לשלהי המאה הוקמו רק 13% מהן. גם במערב אירופה ובמדינות מזרח אירופה, שכלכלתן נשלטה בידי הממשלה, התמודדו חברות לבניית כורים עם מצבים דומים.

לא ניתן לנבא מה תהיה איכות תפקודה של תחנת כוח חדשה. דבר זה נכון במיוחד לכורים

בוש הבן. כפי שהזכר לעיל, אובמה ביטל את כל המשאבים שהוקצו בשנת 2010 להקמת הפרויקט השנוי במחלוקת לסילוק קבוע של פסולת בהר היוקה. סוגיית הבטיחות לטווח הארוך לא תבוא על פתרונה גם אם יחול שינוי במדיניות. נוסף על כך, תחזיות משנת 2009 הראו כי נפחי הסילוק שנהגו בעבר אינם מספיקים אפילו להתמודדות עם הפסולת הגרעינית האזרחית שתיווצר עד לשנת 2020, שלא לדבר על הפסולת הרדיואקטיבית משימוש צבאי באנרגיה גרעינית ועל הפסולת הנוצרת בהפעלת תחנות כוח גרעיניות, שימשיכו להיווצר גם לאחר שנת 2020.

בתחילת שנת 2009 פרסמה הוועדה האמריקאית להסדרת הגרעין רשימה של 17 בקשות לרישיונות עבור 26 יחידות כורים. איש אינו מאמין, אף לא בתעשיית הגרעין האמריקאית עצמה, כי יותר מקומץ מהן ייבנו בפועל, וייתכן שלא תיבנה ולו אחת. חוסר הביטחון של משקיעים פוטנציאליים הוא עצום, ולכן אחראים גם הניתוחים והתחזיות המגיעים מוול סטריט וממומחים עצמאיים אחרים. הערכות המומחים לגבי העלויות הן דרמטיות אפילו יותר מכפי שהוערך בעבר. מחישובים שנעשו לאחרונה עולה כי עלויות הבנייה הממוצעות יהיו גבוהות פי ארבעה מן הסכומים שנוקבו בראשיתו של הדיון בתחייבת הגרעין. בקיץ 2009 פרסם מארק קופר מבית הספר למשפטים של רומנוט ניתוח עלות-יתועלת שלפיו אנרגיה גרעינית היא "האמצעי הגרוע ביותר", בהפרש ניכר מחלופותיה, להתמודדות עם אתגרי אספקת האנרגיה בארה"ב (Cooper, 2009). על פי הניתוח של קופר, החשמל בהפקת כורים גרעיניים יוביל למחירים של בין 12 ל-20 סנט לקילוואט-שעה, בעוד השקעה בהתייעלות במשק האנרגיה ובאנרגיות מתחדשות תוביל לירידה במחיר החשמל עד למוצע של 6 סנט. מוערך כי אם עד לשנת 2050 ייבנו רק 100 תחנות כוח גרעיניות חדשות – מספר שיספיק בקושי להחלפת הכורים הקיימים כיום – יעלה הדבר לציבור האמריקאי, לאורך תוחלת החיים של הכורים, סכום עצום של 1.9 עד 4.4 טריליון דולרים יותר מאשר מדיניות אנרגיה המתמקדת בהתייעלות ונסמכת על טכנולוגיה של אנרגיה מתחדשת.

בקבלת מענקים; חבותן של החברות במקרה של תאונות צומצמה עוד יותר; ממשלותיהן של יפן וצרפת הבטיחו להעניק סבסוד מסים לכורים אמריקאיים אם משקיעים משתי המדינות יהיו שותפים לבנייה, כלומר הוכרז גם כי ממשלות זרות יעניקו סיוע לחברות.

ועל אף כל זאת, תעשיית הגרעין בארה"ב אינה רואה בהכרח בחבילת הטבות זו מענה מלא לכל הסיכונים. ההפך הוא הנכון: התעשייה הזדרזה להכריז כי אין די בסיוע הממשלתי המגוון ובסיוע שניתן להתנעת פרויקטים. כדי להביא באמת לתחייבה בתחום זה, חיוני לשיטתה של תעשייה זו גם לחייב את תחנות הכוח המופעלות בפחם ובגז לשלם מס על פליטת פחמן דו-חמצני. מכון מסצ'וסטס לטכנולוגיה קבע כבר בראשית שנת 2003 כי תחנות כוח גרעיניות חדשות יוכלו להתחרות בתחנות כוח הפועלות על דלק מאובנים רק אם ייגבו 100 דולר לכל טון של פחמן דו-חמצני שנפלט. בשנת 2008 העריכה ועדת הקונגרס למדע וטכנולוגיה בארה"ב כי מחירי החשמל מתחנות כוח גרעיניות חדשות יהיו גבוהים ממחירי החשמל המיוצר באמצעות כל הטכנולוגיות המתחרות האחרות המבוססות על אנרגיה דל-פחמן, להוציא האנרגיה הסולרית, שגם מחירה צונח במהירות (Kaplan, 2008). או אז הוברר כי שום סובסידיות לא יעזרו מבלי שתתבצע במקביל העלאה חדה של מחירי האנרגיה המתחרה המבוססת על דלק מאובנים באמצעות מיסוי פליטת הפחמן הדו-חמצני או באמצעות מערכת של סחר בפליטות. על פי הניתוח של ועדת הקונגרס, גם לאחר מכן, עדיין יספקו תחנות הכוח המודרניות המבוססות על גז, חשמל זול יותר. למעשה, טכנולוגיה מבוססת הנזקקת לסבסוד ממשלתי כה נרחב כדי להיות תחרותית היא בבחינת גווייה כלכלית.

עם זאת, אפילו הנשיא ברק אובמה ושר האנרגיה שלו סטיבן צ'ו לא פסלו על הסף את האפשרות להשתמש באנרגיה הגרעינית. תקציב הממשל לשנת 2011 מאפשר הענקת ערבויות אשראי לבנייתם של כורים חדשים עד לסך של 54 מיליארד דולר, וזו בעצם מחווה לקואליציה החזקה הפועלת בארה"ב נגד ההגנה על האקלים. עם זאת, איש אינו צופה שהממשל הנוכחי ימשיך במדיניות הפרו-גרעינית בתקיפות שבה פעל בנושא זה ממשל



החלה חפירת היסודות כבר היה ברור כי בוני הכור קבעו מסגרת תמחור נועזת במיוחד כדי להבטיח את נצחונו של האבטיפוס של הכור על פני תחנות כוח שמופעלות בדלק מאובנים ועל פני מתחרות אחרות מתחום הגרעין.

ראשית, הוגברו תפוקות הכורים בהתמדה, אפילו במהלך פיתוח כור המים בלחץ האירופי בשנות ה־90. ההנחה הייתה כי די במקדם הגדול לבדו כדי להבטיח יעילות ואפקטיביות. כיום, כור המים בלחץ האירופי, שתחזית תפוקת החשמל שלו עומדת על 1,600 מגהוואט, הוא ללא ספק תחנת הכוח הגרעינית בעלת התפוקה הגדולה ביותר בעולם, בהפרש גדול מהתחנות האחרות. אך התחזיות שניתנו במסגרת הליכי המכרז ושהפכו את הכור לתחרותי ביחס למתחרים, כולל חלופות לא גרעיניות, התבררו בינתיים כדמיוניות אפילו יותר מכפי שחזו מתנגדי האנרגיה הגרעינית עצמם. נוסף על עיכוב של 3 שנים לפחות, שהוזכר לעיל, ולעלייה חדה של כ־80% בעלויות, סביר כעת להניח כי גם היעדים האחרים לא יושגו. תחשיבי הרווחיות של הכור התבססו על זמינות של 90% לאורך חיי הכור – מצב שלא הושג בשום תכנית הרצה של כור, ממש כשם שתוחלת החיים המוערכת של 60 שנה לא הושגה אף היא. לפיכך, ברור כבר כעת, הרבה לפני השלמת הפרויקט, כי נוכח השינויים שחלו בינתיים במשתנים השונים, אולקילואוטו 3 לעולם לא יצליח להתחרות בחלופות לא גרעיניות. בענפים כלכליים אחרים נהוג להגדיר תצורת אספקה כזו כהיצף.

תמונה דומה עולה מבחינת ההסדרים הכספיים של פרויקט כור זה, שהושפעו מאוד מהאינטרסים של המדינות של החברות הבונות אותו, אָרְבֵּה וסימֶנס. אחד השותפים במאָגְד הבין־לאומי שתמך בהקמת כור המים בלחץ האירופי בפינלנד היה הבנק הגרמני הבווארי (Bayerische Landesbank), שמשרדו הרשום שוכן במינכן ושי 50% מהבעלות עליו נתונה בידי המדינה החופשית של בוואריה, שבה שוכן גם משרדה הראשי של חברת סימֶנס. בנק זה תמך בפרויקט בסכום של 1.95 מיליארד אירו באמצעות הלואה בריבית נמוכה (דובר על ריבית של 2.6%). ממשלת צרפת נחלצה לעזרתה של חברת אָרְבֵּה, והעניקה לה ערבויות אשראי ליצוא שהגיעו ל־610 מיליון אירו באמצעות סוכנות Coface. מוטל אפוא בספק אם לולא

האמריקאים יכולים ללמוד מהמצב בפינלנד ובצרפת, שבשטחיהן מוקמים כעת שני הכורים היחידים במערב אירופה, בפינלנד מאז 2005 ובצרפת מאז 2007. התחזיות הכלכליות המפוכחות הנשמעות מצדו השני של האוקיינוס האטלנטי אינן סתם נבואה קודרת פרי מוחם הקודח של מבקרי גרעין ידועים לשמצה. אפילו הקמת האבטיפוס של כור המים בלחץ האירופי, הנמצא בפיתוח כיחידה שלישית בתחנת הכוח הגרעינית אולקילואוטו, אינה פרי יוזמתה של תעשיית החשמל הפינית אלא תוצאה של לחץ פוליטי. הכוח המניע להקמתו היה הצורך בחשמל, שעלה בהתמדה ב־20 השנה האחרונות, והוביל לכך שצריכת החשמל לנפש בפינלנד גבוהה יותר מפי שניים מהממוצע באירופה. במקביל גברו חששותיהם של הפוליטיקאים מכך שאספקת החשמל שלהם תלויה יותר ויותר בגז הרוסי, וכן מכך שלא תגבור האנרגיה הגרעינית לא יהיה לאל ידם לעמוד בחובות הלאומית להגנה על האקלים כפי שפורטה בהסכם קיוטו. בסופו של דבר העניקה ספקית החשמל Teollisuuden Voima Oy (להלן "TVO") את החוזה להקמת הכור למאָגְד הבנייה הצרפתי־גרמני אָרְבֵּה־סימֶנס. חברת TVO נמצאת ברובה בבעלות ציבורית.

בפרויקט אולקילואוטו שאפה קהילת הגרעין הבין־לאומית להוכיח שני דברים: ראשית, כי תכניתם בת 20 השנים של שני גורמים אירופיים רבי־עוצמה להקים תחנת כוח גרעינית אכן תצא אל הפועל בסופו של דבר. ושנית, כי בשוק חשמל פתוח יכולה האנרגיה הגרעינית לשוב ולהיות השקעה משתלמת. אולם הספקות התבררו כמוצדקים כבר מראשיתו של הפרויקט, שכן מימונו התאפשר רק באמצעות שותפות של כ־60 משקיעים, שרובם חברות לאספקת חשמל. בתמורה למעורבותן זכו החברות המשקיעות בערבויות למכירה במחירים גבוהים יחסית של החשמל שהכור יפיק בעתיד. נוסף על כך, סיכמו TVO ומאָגְד הייצור על מחיר קבוע מראש לכור המוכן לשימוש, שאמור היה לעמוד על 3 מיליארד יורו. תנאיו של חוזה זה אטרקטיביים מנקודת מבטו של הרוכש בצורה יוצאת מגדר הרגיל, והוא התאפשר כיוון שמאָגְד אָרְבֵּה־סימֶנס היה זקוק נואשות לאישור להתחיל בבנייה. עוד בטרם

כוח אלה עבור כל קילוואט מותקן הוכחו כנמוכות בהרבה; פרק הזמן שבין הזמנת תחנת הכוח לבין התחלת הפעלתה הוא קצר, ומרכיבי התחנה מיוצרים ברובם בייצור סדרתי בבתי חרושת; נוסף על כל אלה, כיוון שעלויות הדלק של הגז הטבעי היו נמוכות יחסית במשך זמן רב, לתחנות הכוח הגרעיניות לא היה כמעט שום סיכוי להתחרות בהן. בינתיים חלה אולי עלייה במחירי הגז הטבעי, אך במקביל ניתן לצפות להתקדמות רבה בתחום טכנולוגיית האנרגיה המתחדשת. במקומות רבים כבר הגיע שלב שבו נראה כי ככלל – רווחי יותר לחברת השקעות להשקיע בטכנולוגיות בולטות אלה של המאה ה-21, במקום בסדרות חדשות של כורים. עובדה זו תקשה ביותר על בוני כורים פוטנציאליים לגייס את ההון הדרוש.

### קצו של מיתוס האנרגיה הגרעינית

ראינו כי שורה ארוכה של גורמים שאין לאמוד אותם הופכים את תחנות הכוח הגרעיניות להימור של "הכול או לאי-כול" עבור משקיעים. לדוגמה, פרק הזמן שעובר בין ההחלטה על ההשקעה לבין תחילת הפעלתה המסחרית של התחנה ארוך בהרבה מזה הנדרש עבור תחנות שמופעלות בכל טכנולוגיה אחרת. לפי חישוביה של חברת פרוגנוס, תקופת הבנייה הממוצעת לבדה עומדת על 8 שנים. השגת האישורים עלולה להיות כרוכה בבעיות חמורות ולהתעכב זמן רב, כיוון שהרשויות האחראיות לכך חשופות לביקורת ציבורית ופועלות בדקדקנות רבה. נוסף על כך, ממצאים רלוונטיים חדשים בתחום הבטיחות מחייבים בדיקה מחודשת של הליכי האישור. כמו כן, בתי המשפט עשויים לקבל טיעונים שיעלו מתנגדים ולפסוק לטובת גורמים הנאבקים נגד השימוש באנרגיה גרעינית. בבריטניה לדוגמה ניתן האישור להקמת הכור הבריטי האחרון עד כה, "סייזול ביי", כבר בשנת 1979, אך הפעלתו המסחרית החלה רק 16 שנה מאוחר יותר. בניגוד לרוב הסוגים האחרים של תחנות הכוח, תחנות הכוח הגרעיניות ממשיכות להיות כרוכות בעלויות גבוהות גם עשרות שנים לאחר שהוכנסו לפעולה. עלויות אלה כוללות את סילוק הפסולת הרדיואקטיבית, את הפיקוח על הכורים שהושבתו ולבסוף את פירוק הכורים

התמיכה הכספית הממשלתית שהוענקה לכור הייתה מתקבלת אי פעם החלטה להשקיע בו. בעיה זו לא התעוררה כלל כאשר נבנה כור המים בלחץ האירופי השני בפלמנוויל, בחוף נורמנדי שבצרפת. חברת ארבה הממשלתית היא הבונה את הכור עבור ספקית החשמל EDF, שגם היא בבעלות המדינה. גם במקרה זה, בדומה לפיילנד, הגיעו העלויות לסחרור בלתי נשלט. על פי דיווחים בעיתונות, פרויקט הבנייה מפגר בשנתיים אחרי לוח הזמנים, נכון לתחילת שנת 2010. הכור השלישי והכור הרביעי בסדרת כורי המים בלחץ האירופיים אמורים להיבנות בסין – כלומר בתנאים כלכליים הנמצאים בשליטת הממשלה.

עקב אי-הוודאות העצומה השוררת בכל הנוגע לבניית תחנות כוח גרעיניות, ספקיות חשמל ובוני כורים נאלצים לגייס כסף בעלויות גבוהות מקרנות הון סיכון כאשר אין ביכולתם לספק את המימון בעצמם או כאשר אינם מעוניינים בכך. ההוצאה על ההון הופכת אפוא להוצאה השנייה בגודלה במימון תחנת כוח גרעינית, לאחר עלויות הבנייה עצמן. בעיה זו החמירה והלכה לאחר שהוסר הפיקוח על משקי האנרגיה במדינות מתועשות בולטות. המשבר הכספי ומשבר הבנקאות החמירו את המצב עוד יותר, בין היתר משום שהדרישה לחשמל פחתה באורח ניכר עקב הקריסה הכלכלית.

בעבר היה הכול טוב יותר, לפחות עבור גורמים שביקשו לבנות, לקנות או לממן תחנות כוח גרעיניות. בתקופתן של ספקיות החשמל המונופוליסטיות שזכו לערבויות מהממשלה יכלו משקיעים להניח כי תמיד יקבלו החזר על ההון שלהם מידי צרכני החשמל, גם כאשר תפקודו של הכור נמוך. אולם במשק אנרגיה שאינו נתון לפיקוח המצב שוב אינו ודאי כלל ועיקר. האנרגיה הגרעינית מצריכה השקעה ראשונית מופרזת ולוח הזמנים להחזרת ההשקעה בה מתפרס על פני עשרות שנים. אשר על כך, זוהי אינה אנרגיה תחרותית בשווקים שאינם נתונים לפיקוח. עלויות ההון מאמירות, אלא אם כן המממנים הפוטנציאליים בוחרים שלא להשקיע בטכנולוגיות מתחרות שאינן לוקות בבעיות אלה. כך היה המצב בעשורים אחרונים במדינות רבות שתחנות הכוח היעילות הפועלות על גז זכו בהן לעדנה מתמשכת. זאת, מהסיבות שלהלן: עלויות בנייתן של תחנות

המציאות, כיוון שכלל ההפוליטיקאים והציבור דוחפים יותר להחייאת הטכנולוגיה הגרעינית, כך נעשים המשקיעים שלוחי רסן יותר ויותר בדרישתם לסיוע ממשלתי.

ברור אם כן כי תחנות כוח גרעיניות חדשות הן תחרותיות רק כאשר מוענקות סובסידיות נרחבות ביותר או כאשר הן מוקמות במדינות שבהן הטכנולוגיה הגרעינית היא חלק מהדוקטרינה של המדינה, והעלויות הן לפיכך שיקול משני בלבד. לעומת זאת, כאשר חוזים את הקמתו של כור חדש במסגרת כלכלת שוק מתפקדת, ניתן לצפות כי המשקיעים ידרשו תמיכה ממשלתית - בדומה למודל הסובסידיות האמריקאי שהוזכר לעיל - כאמצעי ביטחון נגד התנפחות עלויות הבנייה, נגד תקופות ממושכות ובלתי צפויות של השבתה במהלך פעולת הכור, נגד תנודות במחירי הדלק ונגד העלויות הכרוכות בהוצאתו של הכור מכלל שימוש, בפירוקו ובסילוק הפסולת. כל העלויות האלה קשות לחישוב. ולבסוף, מדינות יאלצו להתמודד, במידה רבה בכוחות עצמן, עם השלכותיה של כל תאונה רצינית הכרוכה בדליפה נרחבת של קרינה רדיואקטיבית. שום חברה מסחרית בעולם לא תוכל לעשות זאת לבדה. חברות הביטוח נושאות באחריות משפטית רק לחלק קטן מהנזק, השונה ממדינה למדינה, ונוכח העלויות הכוללות הצפויות תהיה תרומתן נלעגת בין כה וכה.

ראינו כי לטכנולוגיה הגרעינית נודע תפקיד ייחודי גם מנקודת מבט כלכלית. השתלבותה הראשונית בעולם המסחרי התאפשרה באמצעות סובסידיות בשווי של מיליארדי דולרים. למעלה מיובל שנים לאחר מכן ממשיכים תומכיה להזדקק לסובסידיות ממשלתיות נוספות, המגיעות גם הן לכדי מיליארדים, לשם החייאתה. הם מוסיפים לדרוש סובסידיות וגם לקבלן, ממש כאילו מדובר היה בהון התחלתי עבור השקתה המסחרית של הטכנולוגיה. מדהימה במיוחד היא העובדה שהפוליטיקאים הקוראים בתוקף בכל מקרה אחר לקיומה של "כלכלת שוק" נרחבת יותר, הם הם הדורשים יחס חריג זה ותומכים בו. מדובר באותם אנשים שבמשך שנים רבות ובמדינות רבות נאבקו נגד הענקת תמיכה כלכלית להשקתן של טכנולוגיות אנרגיה מתחדשת - אנרגיית שמש, רוח ומים, וכן אנרגיה ביולוגית וגאותרמית - והתנגדותם

לאחר פרק זמן העשוי להשתנות ממקרה למקרה. את האמצעים הכספיים הנחוצים כדי לבצע כל זאת יש להרוויח בתקופת הפעלתו של הכור ולהניח בצד לשימוש מאוחר יותר. העלויות הכוללות, בתוספת עלויות הביטוח למקרה של תאונה, משתנות ממדינה למדינה. הערכת העלויות קשה במיוחד כיוון שהפחתה רגילה של ריבית מצטברת במהלך התקופה הצפויה לא תיתן את התשובה. כאשר מקבלים שער היוון בגובה של 15%, ניתן להתעלם מעלויות שיש לשלם כדי לכסותן רק בחלוף 15 שנים או יותר. היות שוודאי כי עלויות אלה ייווצרו במוקדם או במאוחר, הן מייצגות מקור נוסף לחוסר ודאות בנוגע למימון הכורים ולחישוב עלויות ייצור החשמל.

למרות כל הקשיים הללו חל כאמור בשנים האחרונות גידול קל במספר הפרויקטים להקמת כורים חדשים ברחבי העולם. כפי שהוזכר לעיל, ניתן לייחס זאת למדינות אסיה לבדן, ובעיקר לסין, שבתחילת שנת 2010 היו בה 20 אתרי בנייה כאלה. למעשה, משך בניית הכורים בסין, העומד על 6 שנים, קצר בהרבה מהמוצע העולמי. אולם, גם אם תצליח סין לממש את תכניתה ולהביא את 50 עד 60 יחידות הכורים המתוכננות למצב פעיל עד לשנת 2030, הרי שתחנות כוח אלה, לאחר שיושלמו, יספקו מענה רק למעט יותר מ-4% מצריכת החשמל בסין.

בניגוד למצב בסין, ספרי ההזמנות של יצרניות הכורים הספורות שנותרו במערב ריקים למדי לעת עתה. עניין זה קשור בין השאר בכך שסין נותנת יותר ויותר עדיפות לטכנולוגיה שלה עצמה. מלבד הדיון בהארכת תוחלת חייהם של כורים, לא מתרחש הרבה בתחום זה מחוץ לאסיה. על אף כל המהומה התקשורתית, ברוב המדינות הנוגעות בדבר אין שום ראיות לקיומם של פרויקטים כלשהם לבניית כורים. הלחץ להמשיך ולדון בתחיית האנרגיה הגרעינית באם כן בעיקר מפוליטיקאים ומיחצ"נים, העומדים על כך אפילו יותר מיצרני הכורים ומספקיות החשמל. אלה מאמינים כי באמצעות השימוש באנרגיה הגרעינית ושימור המבנים המסורתיים של כלכלת האנרגיה יוכלו לעמוד טוב יותר בחובותיהם בתחום ההגנה על הסביבה או להימנע ממחסור בחשמל בטווח הקצר. למערך כוחות זה יש השלכות על

מן האינטרס של כלל הציבור – הארכת תוחלת החיים של הכורים מגבירה את הסכנה לאסונות באורח בלתי מידתי. אם תוארך תקופת פעילותן של כל תחנות הכוח הגרעיניות, או של חלקן, יגבר במידה רבה הסיכון להתרחשותה של תאונה הרת אסון.

עולמנו מתאפיין כיום בשינויי אקלים, בגידול אוכלוסין, בעוני רב ובמשאבים מתכלים, ובקרב נידרש להחליט כיצד לעצב בו מערכת עולמית בתיקיימא של אספקת אנרגיה. אך ההחלטות הכרוכות בכך חורגות במידה רבה מסוגיית ההתמודדות עם האנרגיה הגרעינית בעתיד. האחריות לכך רובצת לפתחן של כל המדינות המפותחות והמתועשות ושל רבות מקרב "המדינות המתעוררות" (אך כי אלה האחרונות אינן משתמשות כלל באנרגיה גרעינית או לפחות משתמשות בה בהיקף זניח בלבד). דבר אחד ברור כבר כעת: מערכת האנרגיה החדשה לא תתבסס עוד באורח בלעדי על תחנות כוח גדולות הפועלות באמצעות דלק מאובנים או אנרגיה גרעינית. ברור גם כי העתיד אינו טמון בהקמתה לתחייה של טכנולוגיה מסוכנת ביותר שנולדה מתוך אינטרסים של תעשיית האנרגיה המסורתית, ושראשיתה עוד באמצע המאה שעברה.

נכון לעכשיו, אין שום תחייה של אנרגיה גרעינית. מה שיש הוא תחייה של ההצהרות בנוגע לאנרגיה גרעינית, והדבר לא התרחש בן לילה. ב־21 בספטמבר 1990 פרסם השבועון הגרמני "וִיִרְטֶאָפֶטְוֶזֶה" גיליון שכותרתו "תחיית הגרעין" ובו בישר בשמחה: "נערכים שינויים בתכניות לזניחה בשלבים [של השימוש באנרגיה גרעינית], מקודמות תכניות בנייה חדשות, ורק בגרמניה לבדה מנהלים מתנגדי הגרעין קרב מאסף". מדיניות הנסיגה מביטול הדרגתי של השימוש באנרגיה הגרעינית, שאחראיות לה תעשיית הגרעין הגרמנית ו"קואליציית החלומות" שלה, הלא היא קואליציית הנוצרים-דמוקרטים והליברלים, עוררה מחדש, במיוחד בגרמניה, את העימות סביב האנרגיה הגרעינית. עבור אנשים מסוימים הייתה זו תחייתה של תקווה. במדינות מסוימות, שחשיבותן לעתיד תעשיית הגרעין רבה, התעורר מחדש הדיון החברתי-פוליטי בנושא, אם כי תוצאותיו לוטות בערפל. החשמל שייצור בפריקטים החדשים לבניית

התבססה על תאוריית השוק. אולם ההבדל המכריע היה ועודנו זה: לאנרגיה הגרעינית אין עתיד, ואילו עתידן של האנרגיות המתחדשות עוד פרוש לפנייהן.

## בפני החלטה: עתידה של אספקת האנרגיה

הדיון באנרגיה הגרעינית התחדש בכמה מדינות חשובות נוכח משבר האקלים, המחסור במשאבים והמשבר הכלכלי. ביסוד דבריהן הנלהבים של יצרניות הכורים ודובריהן מקרב הפוליטיקאים ואנשי התקשורת על "עדנה מחודשת לאנרגיה הגרעינית" מונחת גם החלטה שהשלכותיה יהיו ארוכות טווח. תחנות הכוח הגרעיניות שנבנו ברחבי העולם במהלך הפריחה הראשונית של האנרגיה הגרעינית ועד לימינו מתקרבות ברובן לגבולות גילן הטכנולוגי. במהלך העשור הקרוב – ויותר מכך בעשור שלאחריו – ייווצר הצורך למצוא תחליף לתפוקתן של תחנות אלה, המצטמצמת במהירות בהתאם ללוח הזמנים. נבחנות אפוא שתי חלופות: החלופה הראשונה היא הרחבה מהירה של השימוש באנרגיה מתחדשת (אנרגיית רוח, שמש, מים, ואנרגיה ביולוגית וגאותרמית) וגיבוש מערכת אנרגיה יעילה יותר שבמסגרתה יצטמצם וילך חלקן היחסי של האנרגיות המבוססות על דלק מאובנים; החלופה השנייה היא הרחבת ייצורו של החשמל באמצעות האנרגיה הגרעינית. כיום שאלות את עצמן כמה מהמדינות הבולטות שבשטחן מיוצרת אנרגיה גרעינית אם להמשיך ולהפעיל את הכורים המתיישנים שלהן מעבר לתאריך התפוגה שנקבע להם במקור. עבור חברות החשמל מדובר באפשרות מושכת, כיוון שהיא תאפשר להן לבטל השקעות מתוכננות המגיעות לכדי מיליארדים, ולהפיק רווחים מעלותו הנמוכה של ייצור החשמל בתחנות כוח מתיישנות שלא אמורות היו להמשיך ולפעול. כל אחד ממנהלי החברות יכול לחשב בעצמו ועבור עצמו את הסיכונים המוגברים הכרוכים בכך באופן בלתי נמנע ושונוגעים לו אישית. אולם איש מהם אינו מביא בחשבון את סכנת התרחשותה של תאונה רצינית, בייחוד לא בתחנות הכוח הגרעיניות של החברה שלו עצמו ובתקופת כהונתו, שהיא מוגבלת בדרך כלל. בכך נבדלים האינטרסים של אנשים אלה

נעשה הדבר בפינלנד, וכך ייעשה בארה"ב, אלא אם כן שינוי המדיניות, שמומחים רבים צופים שיגיע תחת ממשל אובמה, אכן יביא לביטול האישורים המיוחלים מזה זמן רב להקמת כורים חדשים. כמו כן, לא ניתן יהיה להרחיב את השימוש בשיטת הסובסידיות הנדיבות, שכן בשוק פעיל של בניית תחנות כוח, המתחרים ממגזרים אחרים – ובעיקר, וחשוב יותר ויותר, ממקשק האנרגיה המתחדשת – לא ישבו לעד חסרי מעש ויצפו בממשלה מסבסדת באורח חד-צדדי טכנולוגיה בת 50 שנה. ביקורת ברוח זו נשמעת בארה"ב כבר כיום. למשל, נציגים של המועצה להגנה על המשאבים הלאומיים דרשו בשנת 2009 מהסנאט האמריקאי כי הקמתה של סדרת כורים שכבר נוסו ונבחנו בחו"ל לא תזכה שוב לתמיכה כספית בארה"ב. לטענתם, לא זו בלבד שהשיטה הגרעינית מסמלת התערבות בשוק באופן הפוגע בטכנולוגיות אחרות, אלא גם שהדבר יוביל לבחירה בדרך לא יעילה מבחינה כלכלית במסגרת המעבר לתעשיית אנרגיה דלת-פחמן (Cochran/Paine, 2009).

הערכה מחודשת ונטולת משוא פנים של כל ההיבטים של סוגיית האנרגיה הגרעינית בראשית המאה ה-21 מובילה למסקנה החד-משמעית: המצב כיום הוא כפי שהיה לפני 30 שנה:

— **טרם הוסר הסיכון להתרחשות אסון**, שבגינו הייתה האנרגיה הגרעינית דרך שנויה במחלוקת לייצור חשמל.

— **סכנת הטרור החדשה פוסלת באופן חד-משמעי את התפשטות הטכנולוגיה לאזורים לא בטוחים בעולם.**

— **התרחבות ייצורו של החשמל באנרגיה גרעינית ברחבי העולם תוביל למחסור בדלק אורניום** אפילו מהר יותר מאשר לו נשמר הסטטוס קוו – או לחילופין תכפה מעבר לטכנולוגיית דגירה. מגמה טכנולוגית כזו משולה להעברת הטכנולוגיה הגרעינית אחת ולתמיד למה שמכונה "דרך הפלוטוניום". בעקבות זאת תגבר מאוד הסכנה לתאונות הרוח אסון, להתקפות טרור ולהפצת הנשק הגרעיני, ותגיע לממדים קריטיים אפילו יותר.

— **בעיית הסילוק הקבוע נותרה ללא מענה**, עם טכנולוגיית דגירה או בלעדיה. כיוון שכבר קיימת פסולת, ממילא הכרחי למצוא פתרון לעניין זה. אך לנצח לא תהיה זו אלא

תחנות כוח גרעיניות שאושרו עד כה לא יספיק כדי לקיים את תרומת האנרגיה הגרעינית לייצור העולמי של חשמל, לא במונחים אבסולוטיים וודאי שלא במונחים יחסיים.

עד כה בוצעו פרויקטים להקמת תחנות כוח גרעיניות במקומות שבהם שיטה זו לייצור חשמל היא חלק מהדוקטרינה של המדינה, או במקומות שהשלטונות בהם מוכנים להקצות מיליארדים לאמצעי ביטחון נגד הסיכונים הבטיחותיים והכספיים הכרוכים בכך. כל מי שמעוניין להקים תחנות כוח גרעיניות חדשות, או שזוכה לעידוד פוליטי לעשות כן – כמו בארה"ב או בבריטניה – זקוק לממשלה כמעט כפי שזקוק לה חלוצי האנרגיה הגרעינית בשנות ה-60.

הדבר נשמע פרדוקסלי, אך השקתה המסחרית של האנרגיה הגרעינית באותה תקופה התאפשרה רק בשל היעדרו של שוק חופשי לחשמל, שהיה בידו להציג את חוסר הטעם של המהלך. אספקת החשמל נחשבה אז ככלל ל"מונופול טבעי" בשל המונופול על רשת החשמל. נוסף על כך, אספקת החשמל היא שירות הניתן לכלל הציבור. משום כך סופק החשמל בידי חברות ממשלתיות או כמורממשלתיות, ובכל מקרה בידי מעין מונופולים. לכן, ברוב המדינות המתועשות הייתה זו הממשלה שהובילה בתחילה את הדרך להשקת האנרגיה הגרעינית, ראשית מסיבות צבאיות גלויות או חשאיות, ומאחר יותר מסיבות תעשייתיות-פוליטיות. הממשלה נשאה בעלויות העצומות של המחקר, הפיתוח וההשקעה המסחרית של הטכנולוגיה החדשה. הדבר נעשה בין במישרין ובין בכך שניצלה את השפעתה על הרכב מחירי החשמל של ספקיות החשמל כדי לוודא כי הנטל יוגלגל לצרכן.

כיום, בשוק חשמל מתפקד שהפיקוח הוסר ממנו, הקמתן של תחנות כוח גרעיניות לייצור חשמל אינה הצעה מושכת עבור חברות. קיימות חלופות מושכות בהרבה, שאינן כרוכות כלל בסיכונים כלכליים כה גדולים, ולא רק בארה"ב. מסיבות אלה לא נבנות שום תחנות כוח גרעיניות במסגרת כלכלה של שוק חופשי, אפילו כאשר הדרישה לחשמל ולתפוקת תחנות הכוח גוברת – אלא אם כן שב הציבור ונושא בחלק גדול מהסיכונים הכספיים, כפי שעשה בעת שהאנרגיה הגרעינית הושקה לראשונה. כך

בעיקר להמשיך לנצל את ההשקעות הישנות שהיו אמורות להפסיק לשאת פרי. הגורמים הפוליטיים המעלים אופציה זו עושים זאת נוכח דלדול המשאבים המאובנים, בשל האמרת מחירי האנרגיה ולאור הצפי לפיו יהיה צורך למלא דרישות מחמירות במסגרת מאמצי ההגנה על האקלים. שלושת ההיבטים הללו הם הכוח המניע מאחורי הדיון בנושא בארה"ב, אפילו לאחר חילופי השלטון בין ג'ורג' וו' בוש, תומך נלהב של האנרגיה הגרעינית, לבין ברק אובמה המתון והספקן. והיבטים אלה הם שהובילו להקמת הכור החדש בפינלנד, הם המניעים את הקמפיין לנסיגה מביטול הגרעין בשלבים בגרמניה והם שהציתו את הדיון סביב הקמתם של כורים חדשים במדינות רבות אחרות.

פוליטיקאים ברחבי העולם נוטים לתכנן ולהמשיך לפעול בתוך המבנים הקיימים ויחד עם גורמים כלכליים המוכרים להם. לפיכך, חלקם לא יססו לשוב ולהעניק תמיכה כלכלית ל"השקה" של האנרגיה הגרעינית יותר מיובל שנים לאחר תחילת ייצורו המסחרי של חשמל בתחנות כוח גרעיניות – כאילו מדובר בדבר הטבעי ביותר בעולם. בגרמניה, בנייתו של כור חדש אינה עומדת על הפרק פשוט משום שאף בונה כורים אינו מוכן לקבל על עצמו סיכון כלכלי בלתי ניתן לחישוב מסוג זה, ומכיוון שלא מסתמן כי בעתיד הנראה לעין יהיה רוב בציבור הרחב בעד טכנולוגיית קרינה. תחת זאת, החברות RWE, E.ON, EnBW ו־אֶנְטֶפֶל מתכוונות להמשיך להתקיים על עתודותיהן במשך כמה עשרות שנים נוספות – על חשבון בטיחותו של כלל הציבור. הפוליטיקאים מממשלת הקואליציה של הנוצרים-דמוקרטים והליברלים עומדים לשירותן. הם נכונים להאריך את תוחלת החיים של הכורים המתיישנים, ובדרך זו בדיוק הם מסייעים לחברות לזכות ברווחים עודפים המגיעים למיליארדים – זאת לאחר שהרבו להוקיע את שליטתן במשק של חברות אלה ממש.

מכל מקום, עקרונות ההיגיון אינם ממלאים שום תפקיד משמעותי בעימות העקרוני סביב עתידה של האנרגיה הגרעינית. כבר בחודש אוקטובר 2007 העיר על ההתפתחויות בנושא השבועון Nature, אולי כתב העת המדעי המפורסם ביותר, באלו המילים: "תעשיית

מראית עין של פתרון. די בכך כדי להימנע מהחמרתה של בעיה זו ומגרירת סבל לאנושות באמצעות הגדלת נפח הפסולת.

**האנרגיה הגרעינית לא תוכל לפתור את בעיית האקלים.** גם אם נשקיע את כל האמצעים העומדים לרשותנו בטכנולוגיה זו, דבר שיהיה הרסני עבור הקדמה בכללותה, תושג לכל היותר תרומה מאוחרת וצנועה להגנה על האקלים. בהיעדר יכולת תעשייתית להרחבה, בשל העלויות העצומות והכפלת הסיכונים הנלווים הכרוכים בדבר, הבחירה באנרגיה גרעינית תהיה לא מציאותית ולא אחראית. נהפוך הוא: צפוי וסביר כי נוכח פירמידת הגילים של תחנות הכוח הקיימות, תחול בעשרות השנים הקרובות ירידה ניכרת בתפוקת הכורים בעולם. בו בזמן קיימות תחזיות מוצקות שלפיהן אסטרטגיית האנרגיה העולמית, המתמקדת כיום מעל לכול בהתמדה בפיתוח אנרגיות מתחדשות, בייעול משקי האנרגיה, התעשייה והשינוע, וכן בייעול מערכות חימום, תוכל להגיע להפחתה החיונית בפליטות הפחמן הדר־חמצני אף מבלי להיזקק לאנרגיה גרעינית. האתגרים הכרוכים בכך עצומים, אך כמוהם גם האפשרויות. ההתגברות על אתגרים אלה מחייבת מדיניות אנרגיה עולמית שבה במוקדם או במאוחר כל המדינות האחראיות לפליטות גזי החממה ברחבי העולם יפעלו בשיתוף פעולה. הטענה כאילו ההגנה על האקלים והפסקת השימוש באנרגיה גרעינית סותרות זו את זו היא מחשבה דמיונית שנולדה מתוך האינטרסים של תעשיית האנרגיה הגרעינית.

נוכח האמור לעיל, ברור כי בעתיד הנראה לעין לא תהיה תחייה של טכנולוגיית הגרעין ללא התערבות כספית ממשלתית עצומה. כמוכן שאין זה אומר שהדבר לא בא בחשבון. בסין יופעלו עשרות כורים, אלא אם כן תתרחש תאונה איומה שתעצור את ההתרחבות שחלה שם – ויש לקוות שגורל מר כזה אכן ייחסך מתושביה של מדינה זו. מצב זה ימשך עד שיאזל הכסף או עד שתחנות הכוח הגדולות, אפילו בסין, יעצרו את ההתרחבות של האנרגיות המתחדשות, שיהיו אז יקרות פחות. את אופציית האנרגיה הגרעינית מעלים מחדש ברחבי העולם בעיקר גורמים פוליטיים, וכחות גורמים מתעשיית החשמל. זו האחרונה שואפת

ביותר? בשנת 1957 היה זה נכון לנסות את האנרגיה הגרעינית. כיום האנרגיה הגרעינית אינה אלא מכשול במעבר לאספקת חשמל בת־קיימא".  
ועל כך אין עוד דבר להוסיף.

האנרגיה הגרעינית זקוקה לשינוי באקלים יותר משהשינויים באקלים זקוקים לתעשיית האנרגיה הגרעינית. אם ברצוננו להימנע מהתחממות גלובלית הרסנית, מדוע עלינו לבחור באפשרות האטית ביותר, היקרה ביותר, הכי פחות יעילה, הכי פחות גמישה והמסוכנת

## אחרית דבר: גרעין בישראל -

### האם הגרעין יוכל לפתור את בעיות משק האנרגיה בישראל?

בישראל יש כיום שני כורים גרעיניים: האחד, כור בן 5 מגה־וואט בטכנולוגיה אמריקאית הפועל מאז 1960 במרכז למחקר גרעיני (ממ"ג) ליד נחל שורק והמפוקח על־ידי הסוכנות הבין־לאומית לאנרגיה אטומית. הממ"ג עוסק במחקר גרעיני, בייצור חומרים לאבחון ולריפוי בתחום הרפואה הגרעינית, ובבטיחות קרינה. במרכז התרחשה בשנת 1990 תאונה שבה נחשף אחד העובדים לכמות גדולה של קרינה שהביאה למותו כעבור מספר ימים.

הכור השני נבנה בהספק של 26 מגה־וואט בטכנולוגיה צרפתית ופועל מאז שנת 1963, נמצא בקריה למחקר גרעיני (קמ"ג) שליד דימונה, ועוסק במחקר גרעיני. יש בו אתר ארצי להטמנת פסולת רדיואקטיבית מבתי חולים, ממוסדות מחקר והשכלה גבוהה, ממכונים פרטיים וממפעלים. יש לזכור כי ישנן בדיקות רבות - רפואיות והנדסיות - הכוללות שימוש בחומרים רדיואקטיביים. על פי פרסומים זרים, מטרתו העיקרית של הכור היא ייצור נשק גרעיני והוא אינו מפוקח על־ידי הסוכנות הבין־לאומית לאנרגיה אטומית. ישנן כיום כ־45 תביעות של עובדים לשעבר בכור כנגד הוועדה לאנרגיה אטומית, ובהן טענות על מיגון לא מספק בעת העבודה עם חומרים רדיואקטיביים, וכן על אודות שתי תאונות שהתרחשו בכור, אחת בשנות ה־60 והשנייה בשנות ה־70<sup>9</sup>. מבחינה בטיחותית ישנם פרסומים כי הספק הכור הועלה ל־70 מגה־וואט ואולי אף ל־150 מגה־וואט. פרסומים אלה בצירוף העובדה שאורך החיים המקורי של הכור עמד על 40 שנה (דהיינו עד שנת 2003), מעלים תהיות בנוגע לרמת הבטיחות הכרוכה בהמשך הפעלתו.

שני הכורים הללו אינם מייצרים חשמל, וכשהוקמו לא נערך דיון ציבורי ראוי על הצורך בהם אל מול הסכנות הכרוכות בהפעלתם. התפיסה בציבור הישראלי הייתה כי על ישראל להשיג יכולת גרעינית וכי זהו עניין של ביטחון המדינה שהשתיקה יפה לו. מאז, נמצא הדיון בנושא הגרעין האזרחי תחת צֶלה של תפיסה ביטחונית זו, וכל פעילות שנועשתה בתחום עד היום, נעשתה במסתרים. גם כעת, כאשר נשמעים קולות הקוראים להקמת כורים גרעיניים לייצור חשמל בישראל, לא נערכים דיון ובחינה ציבוריים של הנושא. להלן יוצגו המאפיינים העיקריים של משק החשמל בישראל ותישאל השאלה אם כורים גרעיניים אזרחיים יתנו פיתרון הולם לכשלים המאפיינים את השוק המקומי.

משק האנרגיה בישראל נמצא במשבר מתמשך, והגידול בביקוש לחשמל מאיים לעלות על קצב הפיתוח של רשת החשמל. הפיתוח הכלכלי בארץ, ובייחוד השימוש הגובר במזגנים במגזר הביתי ופיתוח מרכזי הקניות הגדולים במגזר המסחרי, יחד עם גידול מתמיד באוכלוסייה, גורמים לעלייה מתמשכת בביקוש לחשמל. הגורמים השונים במשק האנרגיה משתתפים במרוץ מתמיד לאספקת הביקוש, ומוצאים עצמם תדיר בעימותים מול הציבור בבואם להרחיב את רשת החשמל. דוגמאות ניתן למצוא בהליך התכנוני להקמת יחידות ייצור נוספות מבוססות פחם בתחנת הכוח באשקלון ("פרויקט־D") והמאבק הציבורי הרחב כנגדו, מאבק המושך את ההליך מאז התקבלה החלטת הממשלה בעניין בשנת 2002. עד לרגע כתיבת מסמך זה לא הסתיים ההליך במתן "אור ירוק" לחברת החשמל להתחיל בהקמת התחנה. דוגמאות נוספות הן ניסיונה של חברת החשמל למתוח קו מתח גבוה במכתש רמון, מאבק של חברת נתיבי הגז להאריך את מערכת הולכת הגז אל מפרץ חיפה, המאבק על נקודת הכניסה הצפונית של צינור



הגז הטבעי מן הים, והמאבק כנגד חברת שיכון ובינוי המתכוונת להקים תחנת כוח מוסקת גז ליד קריית מלאכי.

לישראל מספר מאפיינים ייחודיים המקשים על פיתוח משק החשמל: מבחינת משק האנרגיה ישראל היא מעין אי - עקב המצב הפוליטי והטכני, אין אפשרות להתחבר לרשתות החשמל במדינות השכנות לשם גיבוי הרשת הישראלית בשעת תקלה. מכאן, שעל חברת החשמל לתחזק רשת מקומית שתעמוד בכל כשל אפשרי וללא יכולת לייבא חשמל, ולו רק לתקופה קצרה, במקרה של תקלה. ישראל חסרה מקורות אנרגיה מתחדשים המשמשים במדינות מערביות כגון מפלי מים המאפשרים ייצור חשמל (מקורות הידרואלקטריים) או מקורות חום תת־קרקעיים המאפשרים חימום מים לייצור חשמל (מקורות גאותרמיים). צפיפות האוכלוסייה הגבוהה ומיעוט השטחים הפתוחים מקשים על ניצול נרחב של אנרגיית השמש והרוח, ויעידו על כך המאבקים בין חברות האנרגיה המתחדשת לבין ארגוני הסביבה וגופי התכנון במועצה הארצית לתכנון ולבנייה, עת נדונה שם תכנית המתאר הארצית למתקנים פוטו־וולטאים (תמ"א 10/10ד).

כתוצאה מכך, עומדים הדלקים המאובנים - פחם, נפט וגז - כמקורות חשמל עיקריים בפני ישראל, וכל אחד מהם נושא בחובו מגרעות שונות: השימוש בתזקיני נפט נמצא בירידה מתמדת מאז הפסיקו לשמש כדלק עיקרי לייצור חשמל בישראל בשנות ה־80. ישנה מגמה כללית להסיר את השימוש בתזקינים - מזוט וסולר - עקב הזיהום הרב שהם גורמים ולאור מחירם הגבוה. השימוש בפחם גורר פליטת מזהמים רבים וכן פליטה של כמות גדולה של גזי החממה. המודעות האזרחית לסכנות הנגרמות מזיהום האוויר עולה, האזרחים עומדים על זכותם לנשום אוויר נקי, ובמקביל תהליכים גלובליים מאלצים הפחתה בפליטות גזי החממה. בהינתן כל אלה, יקשה על ישראל להמשיך ולהתבסס על פחם כמקור עיקרי לחשמל. לגז הטבעי, שהוא הנקי מבין הדלקים המאובנים, יש בעיות מבחינת אמינות האספקה (הסיכוי לתקלה במערכת ההולכה) וכן מבחינת ביטחון האספקה (הסיכוי שאחד הספקים יפסיק את הזרמת הגז). ישנו קושי להוביל כמויות גדולות של גז במכלים, ולכן אופן ההובלה המקובל לגז טבעי הוא בצינורות, ישירות מהבאר אל הצרכן, אופן המגביל באופן משמעותי את הגמישות התפעולית ואת יכולת המיקוח הכלכלית של הצרכנים. היות שאי אפשר לאגור כמויות גדולות של גז באתרי תחנות הכוח, כל תקלה ברשת ההולכה הארצית תגרום למחסור מידתי בגז ולשיתוק תחנות הכוח הגזיות תוך דקות ספורות.

מניתוח ראשוני זה, נראה כי ישנה אטרקטיביות רבה לאפשרות לייצר חשמל בכורים גרעיניים בישראל:

- כורים גרעיניים אינם פולטים גזי חממה או גזים רעילים אחרים, והם יאפשרו הורדה משמעותית של פליטת גזי החממה בישראל ממגזר ייצור החשמל.
- יש צורך בכמות מועטה של חומרי דלק (ביחס לדלקים המאובנים), וניתן לאגור כמות משמעותית של דלק באתר הכור למקרה של קשיים באספקה.
- ישנן מספר מדינות, כגון קנדה, אוסטרליה וארה"ב, המספקות דלק גרעיני ואנו ביחסי ידידות איתן, כך שאנו חופשיים מלחצים פוליטיים וכלכליים מצד הספקים.
- בניגוד לטכנולוגיות לייצור חשמל ממקורות מתחדשים (שמש ורוח בעיקר), שתפוקת החשמל מהם אינה יציבה ותלויה בגחמות איתני הטבע כדוגמת משבי רוח או עננות, הכורים הגרעיניים יכולים לייצר הספקים גדולים של חשמל באופן יציב ומתמשך, ואינם דורשים פגיעה בשטחים פתוחים נרחבים. להפך, הם דורשים מרחב ריק גדול סביבם, שיאפשר מרחב טבעי ללא התערבות אנושית לחי ולצומח.
- לכור גרעיני יש אף יתרונות נוספים כגון חום עודף שיאפשר התפלת מים, ייצור מימן שיוכל לשמש כדלק לכלי רכב נקיים, ועוד.

ואכן, כבר משנות ה־60 קיימת תכנית להקמת כור גרעיני לייצור חשמל בישראל, ואף נבחר עבורו אתר המתאים מבחינה גאולוגית וסביבתית באזור שבטה, שנשמר פנוי עד היום לצורך זה. מאוחר יותר היו מספר ניסיונות להקים כורי חשמל אזרחיים בישראל, ניסיונות שעירבו פוליטיקה בין־לאומית עם אינטרסים מסחריים, אך כולם נעצרו בשלב כלשהו עקב מגבלות פוליטיות. בשנות ה־70 נעשה תהליך נוסף לאיתור מתחם מתאים מבחינה ססמית וגאוגרפית, וסומן אתר באזור חלוצה ובו מקום שמספיק אף ל־4 כורים בהספק של 1,000 מגה־וואט כל אחד. בשנת 1976 נחתם הסכם ראשוני עם חברת ווסטינגהאוז האמריקאית לרכישת כור בן 900 מגה־וואט, אולם עם בחירתו של ג'ימי קרטנר לנשיאות ארה"ב התקבל בה חוק המאפשר סיוע גרעיני אך ורק למדינות החתומות על האמנה הבין־לאומית לאי־הפצת נשק גרעיני (NPT). עקב סירובה של ישראל לחתום על האמנה, המחייבת את פתיחת הכורים הקיימים לביקורת של הסוכנות הבין־לאומית לאנרגיה אטומית, הוקפאה העסקה.

ב־1983 החלו מגעים לרכישת כור צרפתי מתוצרת חברת פרמאטום ובו שתי יחידות בנות 950 מגה־וואט כל אחת, אך לאחר בחירת ז'אק שיראק לנשיא הוקפא גם ערוץ זה. ניסיון נוסף היה בין השנים 1991-1998, עת התקיים שיתוף פעולה בין ישראל לחברה הגרמנית ABB במטרה לפתח במשותף כור מצע כדוריות מהדור הרביעי, בן 500 מגה־וואט. אך עליית הירוקים לשלטון בגרמניה עצרה את התהליך. בהמשך היו מספר מפגשים עם בכירים בברה"מ לרכישת כור מתוצרת רוסית, אך אלו לא הבשילו לכדי עסקה מגובשת.

לאחרונה עלה שוב רעיון הכור האזרחי בישראל. עם התחייבות הנשיא פרס בוועידת האקלים בקופנהגן בשנת 2009 כי ישראל תצמצם את פליטת גזי החממה משטחה ב־20% עד שנת 2020, החלו מאמצים לאיתור אמצעים שיאפשרו את הפחתת הפליטות. כבר בתהליך ההכנה לקראת הוועידה הציגו מומחי חברת החשמל את ייצור החשמל מגרעין כאפשרות מועדפת להפחתת הפליטות בישראל. במקביל, אישרה ארה"ב סיוע גרעיני־אזרחי להודו לאחר מהלך פוליטי מפותל שהכיר בהודו כמדינה "אחראית". נעשתה הפרדה בין הכורים הצבאיים שנותרו סודיים, לבין הכורים האזרחיים שנפתחו לפיקוח בין־לאומי, וכל זאת למרות סירובה של הודו לחתום על האמנה לאי־הפצת נשק גרעיני. הראייה הישראלית היא כי "המתווה ההודי" יוצר תקדים שיוכל להיות מיושם גם על מדינת ישראל ויאפשר בכך קבלת סיוע גרעיני־אזרחי מארה"ב. בשנת 2010 אף פורסם כי ישנה הבנה עם ממשל אובמה, ואולי אף הסכם, כי ישראל תיהנה ממעמד דומה להודו, ותוכל לרכוש כורים אזרחיים אמריקאיים לייצור חשמל.

### **נשאלת השאלה, אם כן, בהינתן כי המגבלה הפוליטית המחייבת חתימה על האמנה לאי־הפצת של נשק גרעיני תוסר, האם על ישראל לפעול להקמת כור גרעיני אזרחי?**

בבחינה מעמיקה, ובהתייחס למידע שהובא במסמך זה, ניתן לראות שלפחות בטכנולוגיה הנוכחית, נזקו של כור גרעיני אזרחי יעלה על תועלתו:

■ להסדר שיעקוף את הצורך של ישראל לחתום על האמנה לאי־הפצת נשק גרעיני יהיה מחיר פוליטי כבד בעל השלכות נרחבות - מזירוז כניסתה של אנרגיה גרעינית למדינות שכנות ועד כדי מתן לגיטימיות בין־לאומית לכור גרעיני אזרחי באיראן. יש לציין, עם זאת, כי ירדן, מצרים ואף סוריה כבר הכריזו כי הן מתחילות בפעילות להקמת כורי חשמל גרעיניים בשטחן.

■ כפי שראינו, כורים מודרניים מהדור השלישי סובלים מהאמרה מתמדת בעלויות ההקמה ובהתמתחות לוחות הזמנים. במדינה כמו ישראל, שמדובר בה על כור אזרחי ראשון לייצור חשמל, יש לצפות למסלול טכנוני ארוך ומפותל. התארכות משך ההקמה של כורים גרעיניים היא אחד הגורמים המשמעותיים ביותר בגידול עלויות ההקמה.

כל עוד ישראל נמצאת במצב של סכסוך אלים עם הפלסטינים ובמצב לוחמה עם מדינות שכנות, כור גרעיני אזרחי יכול לשמש כמטרה אטרקטיבית לגורמים עוינים. כתוצאה מכך, יהיה צורך בהשקעה גדולה מאוד כדי לספק את דרישות הביטחון וההגנה על הכור בכל מצב התקפה אפשרי, מעל ומעבר לעלויות הגבוהות של הכורים מלכתחילה.

אמינותם של כורים מהדור הנוכחי אינה גבוהה מספיק, ובמדינת ישראל הקטנה והצפופה תאונה או חבלה חמורה הכוללת פגיעה בליבה ושחרור משמעותי של חומר רדיואקטיבי לסביבה יכולה להביא לסגירת חלקים נרחבים משטח הארץ. האזורים שנסגרו מיד לאחר התאונה בצ'רנוביל משתרעים על פני כ־300 ק"מ. שבטה וחלוצה מרוחקות מגוש דן כ־150 ק"מ בלבד.

ישראל אין יכולת לטיפול בפסולת הגרעינית, ולכן יהיה צורך לשנע את הפסולת חזרה אל המדינה שתספק את הכורים או את הדלק – תהליך מסוכן, הגורר פליטת קרינה בתוך אזורי אוכלוסייה בעת הובלת הפסולת, ועלויות משמעותיות עבור אבטחת השיירות. בראייה רחבה, עצם העובדה שהטיפול בפסולת יתבצע במדינה אחרת לא פוטר אותנו מהאחריות לנזקים ארוכי הטווח של פסולת זו.

ישראל נמצאת בקרבת השבר הסורי־אפריקני, ועל פי הסטטיסטיקה רעידת אדמה גדולה צפויה באזור בשנים הקרובות. מעבר לסכנה הברורה בפגיעה בליבת הכור ובזליגת חומרים רדיואקטיביים לסביבה, ישנה בעיה הנובעת מהדלק הגרעיני המשומש. כפי שהוזכר לעיל, הדלק המשומש נשמר בבכרות באתר הכור במשך כעשור, עד שיאזלו החומרים הפעילים ביותר ותפוקת החום תרד. רעידת אדמה יכולה לפגוע בשלמות הבכרה ולגרום לזליגת מים עשירים בחומרים רדיואקטיביים לסביבה.

כאמור, כורים גרעיניים דורשים כמויות מים גדולות לקירור, מעל ומעבר לנדרש בתחנות דומות של דלקים מאובנים. מיקום התחנה באזור מרוחק ומדברי מעלה שאלות בנוגע למקור המים לקירור ולעוצמת ההשלכות הסביבתיות והחברתיות של הפניית כמויות מים גדולות אל הכור.

אל מול סוגיות אלה ואחרות, עמדתה הרשמית של ממשלת ישראל היא כי אם תיפתר הסוגיה הבין־לאומית הקשורה באמנה לאי־הפצת נשק גרעיני, תימצא מדינה שתרכזה למכור לישראל כור אזרחי העונה על דרישותיה, ויינתנו הסדרי מימון טובים – ישראל לא תסרב לאפשרות, ולו רק כדי לגוון את סל הדלקים, לצמצם את פליטות גזי החממה, ולהצטרף למועדון האקסקלוסיבי של מדינות בעלות כורים גרעיניים לייצור חשמל. אולם בכירים במשק האנרגיה בישראל אמרו בהזדמנויות שונות, כי אין כיום צורך אמתי בישראל בתחנות כוח גרעיניות, וכי אנו נמצאים כעת בחלון הזדמנויות בן 20–30 שנים להתמקדות בפיתוח מקורות אנרגיה מתחדשים. נוסף על כך, העובדה שישראל נמצאת בסכסוך אלים עם חלק משכנותיה תחייב השקעה גבוהה במיגון הכור האזרחי ובהגנה בפני מתקפות אפשריות. במצב זה, עדיף להשקיע את הכספים העודפים בפיתוח אנרגיות מתחדשות, ולהמתין לפיתוח הכורים מדור רביעי, שיהיו גם זולים יותר וגם בטוחים יותר, הן בהפעלה שוטפת הן במקרה של תקלה או חבלה.

נסכם אפוא באמירה כי בטכנולוגיה הנוכחית, של כורי הדור השלישי, אין מקום לכור אזרחי לייצור חשמל בישראל. בד בבד, ישנן טכנולוגיות מבטיחות בקרב כורי הדור הרביעי, ולכשיבשילו טכנולוגיות אלו לכדי מוצרים מוכרים ובדוקים כדאי יהיה לפתוח שוב את הדיון ולבחון את היתרונות מול החסרונות של כורים חדישים אלו. אולם כפי שנראה המצב בשטח, יעברו עוד 20–50 שנים עד שהטכנולוגיה תבשיל, ועד זמן זה המלצתנו היא להימנע מלהכניס כורים גרעיניים לשימוש אזרחי בישראל.

## מקורות

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Ed.): "Die Energiestudie" – Vergleich wegfallender Atomstromproduktion mit zusätzlicher EE-Stromproduktion jeweils seit 2000. Präsentation Nestle, Uwe. Berlin 2009.

Cochran, Thomas B./Paine, Christopher E.: Statement on Nuclear Energy Developments Before the Committee on Energy and Natural Resources. Washington DC 2009.

Cooper, Mark: The Economics of Nuclear Reactors: Renaissance or Relapse? South Royalton (Vermont) 2009.

Fischer, Bernhard/Hahn, Lothar/Küppers, Christian: Der Atommüll-Report. Hamburg 1989.

Fraunhofer IWES: Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche. Abschlussbericht. Kassel 2009.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (Ed.): Schutz der deutschen Kernkraftwerke vor dem Hintergrund der terroristischen Anschläge in den USA vom 11. September 2001. Zusammenfassung. Köln 2002. [www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/atomkraft/20021127\\_atomkraft\\_grs\\_gutachten\\_zusammenfassung.pdf](http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/atomkraft/20021127_atomkraft_grs_gutachten_zusammenfassung.pdf)

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (Ed.): 3. Ergänzung der Kurzinformation zu einem Ereignis im schwedischen Kernkraftwerk Forsmark, Block 1, am 26.07.2006: "Nichtstarten von zwei Notstromdieseln beim Ausfall der Netzbindung". Köln 2006.

Heinrich-Böll-Stiftung (Ed.): Mythos Atomkraft – Ein Wegweiser. Berlin 2006.

Kaplan, Stan: Power Plants: Characteristics and Costs, CRS Report for Congress, RL34746. Washington DC 2008.

Massachusetts Institute of Technology (MIT): The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study. Cambridge 2003.

Meyer-Abich, Klaus Michael/Schefold, Bertram: Die Grenzen der Atomwirtschaft. München 1986.

Mez, Lutz/Schneider, Mycle/Thomas, Steve (Hrsg.): International Perspective on Energy Policy and the Role of Nuclear Power. Multi Science Publishing. Brentwood 2009.

Miller, Peter: Our Electric Future – A Comeback for Nuclear Power. In: National Geographic, August 1991.

Möller, Detlev: Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland. Frankfurt a.M. 2009.

National Commission on Terrorist Attacks Upon the United States (Ed.): The 9/11 Commission Report. Official Government Edition. [www.911-commission.gov/](http://www.911-commission.gov/).

Prognos AG (Ed.): Renaissance der Kernenergie? Analyse der Bedingungen für den weltweiten Ausbau der Kernenergie gemäß den Plänen der Nuklearindustrie und den verschiedenen Szenarien der Nuklearenergieagentur der OECD. Berlin/Basel 2009.

Radkau, Joachim: Tschernobyl in Deutschland? In: Der Spiegel 20/1986.

Sachverständigenrat für Umweltfragen (Ed.): Weichenstellungen für eine nachhaltige Stromversorgung. Thesenpapier. Berlin 2009.

Schneider, Mycle: Der EPR aus französischer Sicht. Memo im Auftrag des BMU. Berlin 2004.

Solar-Institut Jülich/FH Aachen (Ed.): Zwischenbericht: Struktur und Dynamik einer Stromversorgung mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energieerzeuger. Energiestudie. Berlin 2009.

Squassoni, Sharon: The US Nuclear Industry: Current Status and Prospects under the Obama Administration. Nuclear Energy Future Paper, November 2009. Waterloo (Canada) 2009.

Traube, Klaus: Plutonium-Wirtschaft? Hamburg 1984.

UK Department for Business, Innovation and Skills (Ed.): UK Renewable Energy Strategy Consultation 2008. Log Number 00407e, Organisation: E.ON. [www.google.com/search?q=%22Renewable+Energy+Strategy+Consultation%22+E.ON+00407e&sourceid=ie7&rls=com.microsoft:en-US&ie=utf8&oe=utf8](http://www.google.com/search?q=%22Renewable+Energy+Strategy+Consultation%22+E.ON+00407e&sourceid=ie7&rls=com.microsoft:en-US&ie=utf8&oe=utf8).

WWF Deutschland: Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050; erstellt von Prognos AG/ Wko-Institut/Dr. Hans-Joachim Ziesing. Berlin 2009.

Ziehm, Cornelia: Ohne Endlager keine Laufzeitverlängerung – zur Rechts- und Verfassungswidrigkeit einer Laufzeitverlängerung. Berlin 2010.

## הערות שוליים

- 1 המספר הצמוד לאורניום מבטא את משקלו האטומי. בטבע ניתן למצוא את האורניום במספר משקלים שונים: 235, 236, 238, ועוד. סוגים שונים אלו נקראים 'איזוטופים'. לאיזוטופים השונים של אורניום תכונות כימיות זהות, אך הם מגיבים באופן שונה לריאקציות גרעיניות.
- 2 המים העוברים בליבת הכור נעשים רדיואקטיביים, ולכן מפרידים בין מעגל המים הראשוני, העובר בליבת הכור ומתופעל ברמת בטיחות גבוהה מאוד, למעגל משני, המניע את הטורבינות, ושהמים בו אינם רדיואקטיביים.
- 3 Thomas, S. (2010), The EPR in Crisis, <http://216.250.243.12/The EPR in crisis 3-11-10.pdf>
- 4 Ramana, M. V. (2009), Nuclear Power: Economic, Safety, Health, and Environmental Issues of Near-Term Technologies, *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2009 34:127–152.
- 5 ניתן לחשב את פליטת גזי החממה בתהליך הייצור המלא, מהכרייה והעיבוד, דרך ההובלה, תפעול הכור, והטיפול בפסולת הרדיואקטיבית בגמר השימוש. כאשר מחלקים את כמות גזי החממה שנפלטו בכמות החשמל שייצר הכור, נמצא כי מדובר בפליטה הנמוכה ממקורות הדלק המאובנים, אך גבוהה מרוב מקורות הדלק המתחדשים.
- 6 van Leeuwen, J.W.S. and Smith, P. (2005), Nuclear Power — The Energy Balance [http://www.stormsmith.nl/report20050803/Chap\\_1.pdf](http://www.stormsmith.nl/report20050803/Chap_1.pdf).
- 7 קואליציה של המפלגה הנוצרית-דמוקרטית השמרנית ושל המפלגה הדמוקרטית החופשית, התומכת בעסקים.
- 8 פורסם באתר וואלה, "תאונה גרעינית חמורה בכור בדימונה בשנות ה-60", 5/11/2010.

**Dr. Gerd Rosenkranz** holds a doctorate in material science and an MA in engineering in the field of metallurgy. He completed his postgraduate studies in communication science and worked as a journalist for national daily and weekly newspapers for 20 years. Until 2004 he worked as editor for five years for the Berlin office of the news magazine *Der Spiegel* and specialised in environmental and energy policy. Since 2004 he is head of the Department of Politics and Public Relations of *Deutsche Umwelthilfe e.V.* (German Environmental Aid) in Berlin.

**לגרד רוזנקרנץ** תואר דוקטור להנדסת חומרים ותואר מוסמך בהנדסה בתחום תורת המתכות. לאחר שהשלים את לימודיו לתואר בוגר במדעי התקשורת, עבד במשך עשרים שנה כעיתונאי ביומונים ובשבועונים. עד שנת 2004 שימש ד"ר רוזנקרנץ במשך חמש שנים כעורך במשרד של כתב העת החדשותי דר שפיגל בברלין, והתמחה במדיניות סביבתית ובמדיניות אנרגיה. מאז שנת 2004 הוא עומד בראש המחלקה לפוליטיקה וליחסי חוץ בדויטשה אומוולף־הילפה (ארגון סיוע סביבתי גרמני) בברלין.

**קת היתירונג** – סניף ישראל, רח' נחלת בנימין 24, תל אביב 65162  
טלפון: 03-5167734/5 פקס: 03-5167689 דוא"ל: [info@il.boell.org](mailto:info@il.boell.org) [www.il.boell.org](http://www.il.boell.org)



חברת זו הודפסה ע"ג נייר ממוחזר אקולוגי  
מיצר ע"י אקופרינט – שרתוי דפוס אקולוגיים 03-5596028

