

האם אנרגיה גרעינית יכולה לעצור את ההתחממות הגלובלית?

מאת גיל רונן | עורך: יואב הלר

דלקי מאובנים נכשלים בשני הקריטריונים. קודם כול, הם משאב מתכלה! מאמצים לחיפוש מצבורי פחם, נפט או גז עדיין נמשכים, ולעתים גם נוחלים הצלחות. לדוגמה, המאגרים "לוויטן" ו"תמר" התגלו ליד חופי ישראל לפני כ-15 שנים וכיום הם מספקים יחדיו את רוב החשמל של ישראל.⁴ עם זאת, החיפוש אחר מאגרים נוספים של דלקי מאובנים נהיה קשה יותר עם השנים. זה לא שיום בהיר אחד תישאב טיפת הנפט האחרונה מבטן האדמה ואחריה לא יהיו עוד דלקי מאובנים, אלא תהיה דעיכה איטית של כמה עשרות שנים, שבמהלכה הדלק והחשמל ילכו ויתייקרו, עד שבסופו של דבר לא ישתלם לאף אחד להפיק מהם אנרגיה. בקצב הצריכה הנוכחי, גז ונפט ייגמרו תוך כ-35 שנה, ופחם יחזיק בערך כפול מזה. כנראה שיימצאו עוד מאגרים, אבל גם הביקוש צפוי לעלות עם הזמן. בכל מקרה, קיים תרחיש סביר שכבר בימי חיינו נחוה את עידן "סוף דלקי המאובנים".

דלקי מאובנים נכשלים גם בראי הקריטריון השני שלנו. תוצרי הלוואי של הפקת האנרגיה מדלקי מאובנים ידועים לשמצה כמזיקים גם בטווח הארוך וגם בטווח הקצר. הם גם פולטים גזי חממה התורמים להתחממות הגלובלית ומזהמים את האוויר.

גם מקורות אנרגיה מתחדשים מסתמכים על משאבים מתכלים, דורשים תחזוקה ויוצרים פסולת. השאלה שנכון לשאול פה היא כמה? כמה שטח, כמה אנרגיה, כמה כסף, כמה פסולת וכו'. לצערי, אני נמנע מדיון כמותי בסוגיות המאוד חשובות האלה מפאת קוצר היריעה. דוגמה לחשבון הכמותי בנושאים האלה אפשר למצוא בספרו של מקיי.⁵ בכל מקרה, המסקנה היא שקשה להשוות בין כושר ייצור החשמל של דלקי מאובנים לכושר ייצור בעזרת פאנלים סולריים בעזרת טורבינות רוח או סכרים. בעיה נוספת במקורות מתחדשים היא, שקשה לחזות בדיוק כמה אנרגיה הם יספקו בכל רגע ביום. כדי שבכל דקה ייצור החשמל יהיה שווה לצריכה, צריך למצוא פתרונות טכנולוגיים לאגירה ושחרור של האנרגיה ממקורות מתחדשים. אני לא בא לחרוץ את דינם של מקורות האנרגיה המתחדשים, רק מדגיש שגם הם לא בני-קיימה "היישר מהאריזה". זה לא רק עניין של כסף, דרושים כאן הרבה מחקר ומחשבה.

משק האנרגיה העולמי

לפני שנדבר על אנרגיה גרעינית, נחזור לשיעור מדעים. אנרגיה היא היכולת לבצע עבודה כלשהי. עבודה יכולה להיות חימום מים למקלחת, הטענת הטלפון או אפילו לתת בוקס למישהו. היחידה הבסיסית של אנרגיה נקראת ג'אול.⁶

פלאשבק מהיסודי. הפעמון מצלצל ואתם עצובים. אתם עצובים כי בדיוק הפסדתם במשחק את הפוג הנדיר שקיבלתם בתפוצ'פס!¹ טרגדיה איומה. אתם אוספים את מה שנשאר מהכבוד העצמי שלכם ומסתכלים על הרצפה כל הדרך לשיעור מדעים. בשיעור מדעים המורה מציגה מצגת פאנורפוינט עם תמונות של נורות ושל איש רץ ומרק חם,² ואומרת שיש הרבה צורות של אנרגיה ושאנרגיה היא חשובה. בעיקרון אתם עסוקים בהפקת לקחים מכל עניין הפוג, אבל משהו מפריע לכם. חוש הצדק הפנימי שלכם, שהיה מפותח כבר אז, פשוט לא יכול לעמוד מנגד כשיש תת-ייצוג כה מחפיר בדבריה של המורה. אתם נעמדים על הכיסא ומטיחים בה בתסכול: "אבל המורה! למה את לא מדברת על אנרגיה גרעינית?!"

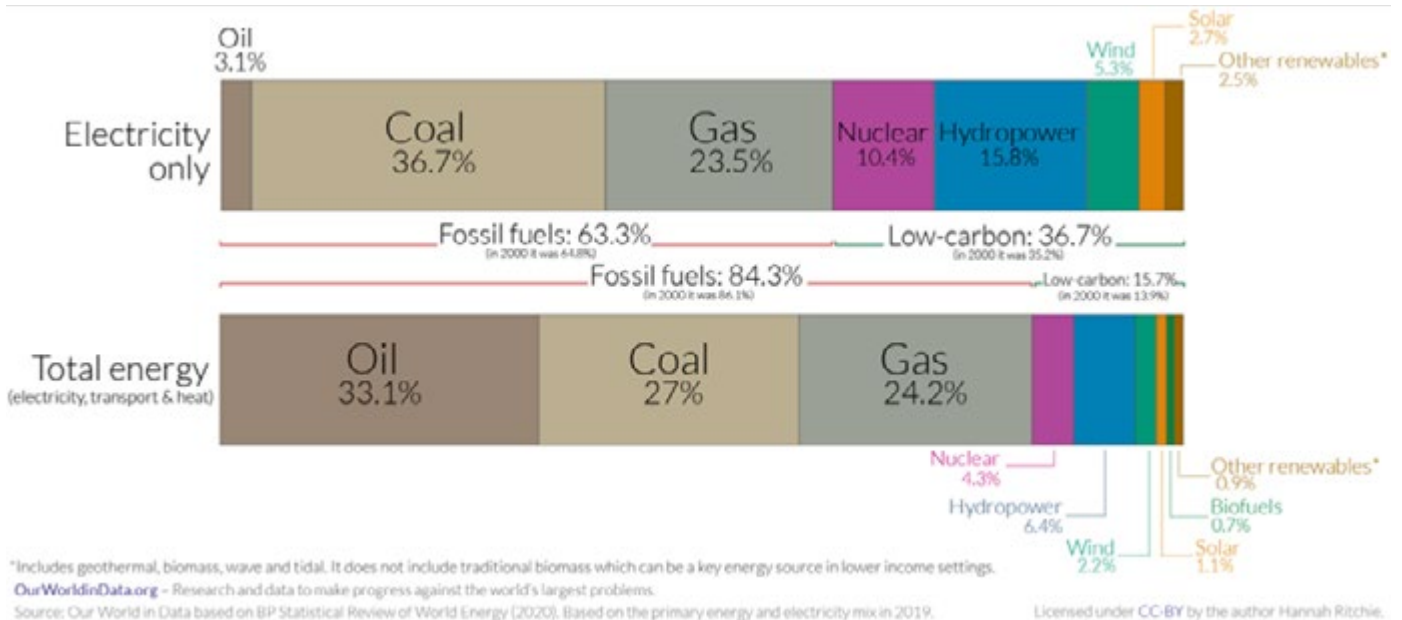
בדיונים על הדרכים השונות להפקת אנרגיה מזכרים בדרך כלל שני שחקנים עיקריים: דלקי מאובנים (פחם, נפט וגז) ומוקורות מתחדשים (הידרו, רוח ושמש). במאמר הזה אני הולך להפיג חלק מהערפל האופף את השחקן השלישי במשק האנרגיה העולמי - אנרגיה גרעינית. דלקי מאובנים נחשבים למזהמים, מאיצים את ההתחממות הגלובלית וכמותם מוגבלת. מקורות מתחדשים, לעומת זאת, נחשבים לנקיים ובלתי מוגבלים.

לצורך הדיון, נגיד שכדי שמקור אנרגיה כלשהו ייחשב בר-קיימה, הוא צריך לעמוד בשני קריטריונים:

1. שיהיה מספיק ממנו כדי לספק את צורכי האנרגיה של האנושות למשך 1000 שנים.³
2. שתוצרי הלוואי של תהליך הפקת האנרגיה לא יהיה מסוכנים או מזהמים.

המטרה של המאמר היא לדון בצורה כמותית בשאלה:

האם אנרגיה גרעינית היא מקור אנרגיה בר-קיימה?



תרשים 1: התפלגות מקורות האנרגיה לפי סוג צריכה: אנרגיה חשמלית (למעלה) ואנרגיה ראשונית (למטה).

בחלקים הבאים אתמקד באנרגיה גרעינית על צורותיה, ועל היכולת שלה לשנות את כללי המשחק ולהציל את העולם מהתחממות גלובלית.

כדי לדבר על משק האנרגיה העולמי חשוב להיות מודעים לכמה ניואנסים:

1. יש שתי דרכים לכמת את האנרגיה ממקורות שונים.¹⁰ הראשונה היא בהסתכלות על הפוטנציאל האנרגטי של חומר הדלק, כלומר, כמה אנרגיה תשתחרר כשנפיק אותו. מדד זה נקרא אנרגיה ראשונית. השנייה היא בהסתכלות על כמות האנרגיה שתהיה זמינה לצרכן בסוף התהליך. מדד זה נקרא אנרגיה סופית. לדוגמה, בשריפה של דלקי מאובנים משתחררת אנרגיית חום, אבל אם אנחנו רוצים להפיק חשמל מהחום הזה, רק כשליש מאנרגיית החום יתפזר בסופו של דבר לחשמל בר שימוש, והשאר ילך לאיבוד בתהליך ייצור החשמל.

2. לא כל צריכת האנרגיה בעולם הולכת לייצור חשמל. למעשה, רובה לא. השימושים הנפוצים הם דלק למכוניות ומטוסים, חימום וצרכים תעשייתיים.

3. כשדנים במקורות אנרגיה מתחדשים, הדיון מעט מסתבך, כי קשה לכמת באופן חד משמעי את האנרגיה הראשונית של משאבים כמו אור שמש, רוח ומים. מה שכן קל לנו לכמת באופן חד משמעי, הוא את האנרגיה החשמלית שהצלחנו להפיק בעזרת כל אחד מהם. אם היינו מחשבים את התרומה לאנרגיה הראשונית של משאבים מתחדשים לפי האנרגיה החשמלית שהם מייצרים, היינו חוטאים ב"תת ייצוג" של המשאבים המתחדשים, כי, כאמור, כשני שלישים מהאנרגיה שאצורה בדלקי מאובנים הולכת לאיבוד בהמרה שלהם לחשמל. מה שנהוג לעשות הוא לפצות את המשאבים המתחדשים באותו אחוז.¹¹

אחרי שיש לנו הגדרה לצריכת אנרגיה, אפשר לסכם בגאווה שבשנת 2021, צריכת האנרגיה הראשונית של כל האנושות הייתה בקירוב:

$$600e18J = 600,000,000,000,000,000J^{12}$$

שזה מספיק כדי להכין 11 כוסות קפה על כל מטר רבוע בכדור הארץ, או את פצצת האטום של הירושימה כל שלוש שניות במשך שנה.¹³

לעומת המספר הזה, כמות האנרגיה החשמלית שהופקה בשנת 2021 ברחבי העולם היא $95e18J$, שזה רק כשישית מהאנרגיה הראשונית.

ספל התה שאני שותה עכשיו, ששוקל חצי קילו ונמצא על שולחן בגובה מטר, הוא בעל אנרגיה פוטנציאלית כבידתית שוות ערך לכ-5J. לשם השוואה, פצצת האטום שהוטלה על הירושימה שחררה כ-60 טריליון ג'אול.⁷ תכונה שימושית של אנרגיה היא שאפשר להמיר אותה מצורה אחת לאחרת, כמו המרה של מטבעות. אם הספל שלי ייפול מהשולחן, האנרגיה הפוטנציאלית של הספל עם התה, כ-5J, תתפזר לאנרגיה קינטית. כמו בהמרות של כסף, גם בהמרות אנרגיה יש עמלה וחלק מהערך הולך לאיבוד בתהליך ההמרה. במקרה של הספל שלי, התנגדות האוויר תגבה מאתנו עמלה קטנה ותגרום לכך שהספל יגיע לרצפה עם קצת פחות מ-5J אנרגיה קינטית.

עכשיו אנחנו כבר בדרך לגעת במשק האנרגיה העולמי, שהוא הנושא שבו נעסוק בהמשך המאמר. חיממתי את המים לתה בעזרת הקומקום בדירה שלי שמחובר לשקע בקיר, שמקבל את האנרגיה שלו מחברת החשמל. נשאלת השאלה: בתהליך החימום של המים, כמה אנרגיה "קניתי" מחברת החשמל? כדי לחמם גרם של מים נוזליים במעלה אחת, דרושים כ-4.2J (זאת ההגדרה של קלוריה). נניח שבספל שלי יש 300 גרם מים ושחיממתי אותם מ-20 מעלות ל-100.

זה אומר שהשתמשתי ב:

$$K \cdot 300g \cdot 4.2J/(K \cdot g) = 100,800J \quad (20 - 100)$$

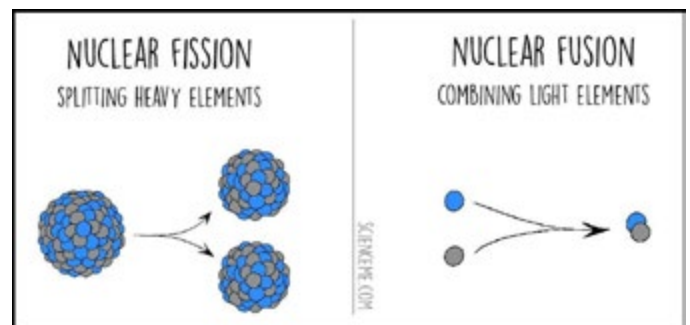
המסקנה היא שאני קניתי כ-100,000J מחברת החשמל כדי להכין כוס תה.⁸ 'פאן פאקט' - התערוך הביתי של חברת החשמל נכון לינואר 2023 הוא בערך $1.7e-7$ שקל ל'גאול'.⁹ זה אומר שכל התענוג הוסיף לחשבון החשמל שלי 1.7 אגורות. אכן מכה קשה בשביל כוס תה צנועה, שבסוף בכלל הפלתי ושברתי.

אז חייל בן 23 בדירה בתל אביב משתמש ב-100,000J בשביל להכין כוס תה. בכמה ג'אול משתמשים בשנה כל תושבי ישראל? כל תושבי העולם? מאיפה מגיע החשמל שאנחנו צורכים? מה המרכיב של אנרגיה לא חשמלית (למשל דלק למכוניות ומטוסים) בתוך משק האנרגיה העולמי? על כל אלו אנסה לענות בקצרה בחלק הזה של המאמר.

למה יש כזה הבדל גדול? משתי סיבות:

הראשונה היא שכחצי מהאנרגיה הראשונית מופנית לשימושים שאינם ייצור חשמל, כמו תעבורה וחימום. הסיבה השנייה היא, שגם המשאבים שכן מופנים לייצור חשמל מאבדים כשני שלישים מהאנרגיה הראשונית שלהם בתהליך.

בואו נתמקד בחלק החשמלי של משק האנרגיה העולמי; נכון להיום מופקים ברחבי העולם $95e18J$ של אנרגיה חשמלית כל שנה, מתוכם כ- $0.26e18J$ בישראל. הנתון המעניין, כפי שניתן לראות בתרשים 1, היא שנכון להיום כ-63% מייצור החשמל מגיע מדלקי מאובנים ורק 37% מהייצור הוא ממקורות שלא פולטים גזי חממה, כמו אנרגיה מתחדשת ואנרגיה גרעינית (בישראל המצב גרוע יותר, נכון ל-2020 רק 6% הם ממקורות שאינם פולטים גזי חממה).¹⁴



תרשים 2: שני הסוגים העיקריים של אנרגיה גרעינית: היתוך גרעיני, שבו מתקבלת אנרגיה על ידי מיזוג שני אטומים קלים לאטום כבד יותר (מימן), וביקוע גרעיני, שבו מתקבלת אנרגיה על ידי פיצול של אטום כבד לשני אטומים קלים יותר (שמאל).

מתוך ה- $95e18J$ שמוצרים בכל שנה בכדור הארץ, כ- $9.7e18J$ מגיעים מאנרגיה גרעינית. עכשיו זה הזמן לדבר על איך אנרגיה גרעינית עובדת. מתברר שבגרעינים של אטומים (מכאן השם) יש הרבה אנרגיה פוטנציאלית, רק צריך לדעת איך לקחת אותה. בעולם האנרגיה הגרעינית יש שני סוגי תגובות שאפשר לנצל כדי להפיק אנרגיה:

1. ביקוע (fission) - תהליך שבו גרעינים של אטומים כבדים, כמו אורניום (U) ותוריום (Th) ופלוטוניום (Pu) מתפצלים לאטומים קלים יותר.

2. היתוך (fusion) - תהליך שבו גרעינים של אטומים קלים, כמו מימן (H), ליתיום (Li) והליום (He) מתמזגים ליצירת אטומים כבדים יותר.

לשני התהליכים האלה תכונה חשובה משותפת והיא שבמהלכם נפלטת הרבה אנרגיה.

הפקת אנרגיה מביקוע היא טכנולוגיה בשלה הרבה יותר מהיתוך. הפקת חשמל באמצעות היתוך רחוקה, ככל הנראה, כמה עשרות שנים מיישום בקנה מידה גדול. בדצמבר 2022, הנושא עלה לכותרות כש"לראשונה בהיסטוריה תגובת היתוך הפיקה יותר אנרגיה ממה שהושקע בה". קל היה לחשוב שאוטוטו יש לנו פה מכונה שמייצרת אנרגיה מהאוויר, אבל יש קאץ'. המדענים דיווחו שהם קיבלו פי 1.5 יותר אנרגיה מהכמות שהם השקיעו. המציאות היא, שאם מביאים בחשבון את כל האנרגיה שהיה צריך להשקיע במעטפת של הניסוי ולא רק את החלק הקטן שהגיע בסוף למטרה, הם בעצם קיבלו רק 1% מהכמות שהשקיעו.¹⁵ השורה התחתונה היא שאנרגיית היתוך היא לא מעבר לפינה, ולכן על אף שהיא נושא מעניין וחשוב, לא ארחיב עליה את הדיון.

ובכן, ביקוע. שרשרת תגליות מדעיות בשנות ה-30 וה-40 של המאה הקודמת הוכיחו שהרעיון של ביקוע גרעיני אפשרי. כשפרצה מלחמת העולם השנייה, שני הצדדים שנלחמו ריכזו את טובי הפיזיקאים¹⁶ משני צדי המתרס, כדי לרתום את הפוטנציאל של האפקט הפיזיקלי החדש לטובת ייצור נשק. ב-6 באוגוסט 1945 הוטלה פצצת האטום הראשונה בעולם על הירושימה, וכעבור שלושה ימים נוספים הוטלה פצצת האטום השנייה על נגסאקי.¹⁷

במקביל לפיתוח של נשק מבוסס ביקוע גרעיני, נתגלו שיטות להפקת חשמל מבוססות ביקוע. אורניום טבעי (אורניום כפי שהוא נמצא בטבע) לא מתאים לייצור אנרגיה בגלל הריכוז הנמוך של האיזוטופ $U235$ שבו. אז קודם כול כורים אורניום, אחר כך הופכים אותו לגז (!), מעשירים אותו, כלומר "מזקקים" ומעלים את הריכוז של $U235$, ולבסוף הופכים אותו חזרה מגז למוצק ומקבלים אורניום מועשר. אורניום מועשר יכול כבר לשמש כדלק גרעיני. כשמשררים את כל האנרגיה שבדלק הגרעיני בבת אחת, מקבלים פצצת אטום, אבל אם מצליחים לשחרר אותה לאט ובצורה מבוקרת אפשר להפיק ממנה חשמל. כור גרעיני בניגוד לפצצת אטום, מתוכנן במיוחד כך שהדלק הגרעיני יעבור ביקוע מבוקר. עם החום שנפלט בתהליך הביקוע מחממים מים, המים הופכים לקיטור, והקיטור מניע טורבינות שמייצרות חשמל. זה תהליך הפקת החשמל בכורים גרעיניים.¹⁹

כמו כל סוג דלק אחר, גם דלק גרעיני לא מחזיק לעד, וגם לו יש תוצרי לוואי. כדי להכריע בשאלה אם אנרגיית ביקוע גרעינית היא בת-קיימה, אנחנו צריכים לבחון שלוש סוגיות:

1. כמה אנרגיה מפיקים מכל טון של אורניום טבעי?

2. כמה פסולת נוצרת בתהליך הזה, ואיך מטפלים בה?

3. האם יש בכלל מספיק אורניום זמין בכדור הארץ כדי לספק את כל צורכי האנרגיה של האנושות דורות קדימה?

לגבי הסוגיה הראשונה, כור גרעיני בגודל ממוצע יכול לייצר כ- $30e15J$ בשנה²⁰ וצורך לשם כך כ-30 טון של דלק גרעיני מועשר. אותם 30 טון של דלק גרעיני מועשר מקורם בכ-200 טון של אורניום טבעי. המסקנה היא שמטון אחד של אורניום טבעי ניתן להפיק כ- $150e12J$ של אנרגיה חשמלית. ישראלי ממוצע צורך כ- $20e9J$ של חשמל כל שנה.²¹ כלומר, אם ב-1 בינואר כל שנה נחלק לכל ישראלי 33 גרמים של אורניום טבעי, שניתן להפוך לחמישה גרמים של אורניום מועשר, זה יספיק בשביל כל הצריכה השנתית של חשמל בישראל.

נעבור לסוגיה השנייה. קודם כול, בתהליך ייצור החשמל, הכור הגרעיני לא פולט גזי חממה או מזהמים אחרים. בתהליך הכרייה וההעשרה של האורניום ובתהליך הבנייה של הכור נפלטים גזי חממה, אבל בהיקפים קטנים ביחס לתחנת כוח "קונבנציונלית" שמייצרת אותה כמות של אנרגיה.²²

לגבי הנושא הבוער של טיפול בפסולת גרעינית: במשך כל תהליך ההפקה של אנרגיה גרעינית, החל בכרייה של האורניום, דרך העשרתו וכלה בטיפול במוטות הדלק "משומשים", נוצרת כמות משמעותית של פסולת רדיואקטיבית. חלקה תישאר רדיואקטיבית ומסוכנת מאוד למשך מאות שנים. עם זאת, יש חדשות טובות: נכון ל-2022, כ-80 שנה מאז שהחל ייצור אנרגיה גרעיני, הצטברו בעולם כ-38 מיליון מטרים מעוקבים של פסולת רדיואקטיבית.²³ אם נרצה, זה ייכנס בבור עם שטח של קילומטר רבוע בעומק של 38 מטרים. מעל 90% מהכמות מסוגת ברמת קרינה "נמוכה" או "נמוכה מאוד", כלומר לא דורשים טיפול ייעודי, קירור או מיגון קרינה, אלא רק איטום ומקום אחסון.

עכשיו, בואו נלך על הגישה של "לחלוב" עד תום כל ג'אול אפשרי מהאורניום על פני כדור הארץ. כורים סטנדרטיים, מהסוגים שנמצאים בשימוש רחב כיום, ממצים רק כ-1% מהפוטנציאל האנרגטי שיש באורניום. בשנות ה-60 של המאה ה-20 הודגמה טכנולוגיה חדשה בשם כורי תרבית (Breeder Reactors) שמאפשרת לנצל כמעט את כל הפוטנציאל האנרגטי שיש באורניום. מדובר בשיפור אפשרי של שני סדרי גודל! כלומר, הגדלת משך הזמן שאנרגיה גרעינית תחזיק מ-13 שנים ל-1,300 שנים. ישנה טכנולוגיה נוספת שכבר הודגמה ועשויה להיות שימושית, והיא שימוש בייסוד ת'וריום (Th), השכיח כפי שלושה מאורניום, כדלק.

עד כאן בשורות טובות. כלומר, על פניו, כורי תרבית וכורים מבוססי ת'וריום יכולים להטות את כף המאזניים ולהפוך את האנרגיה הגרעינית מכזאת שאינה בת-קיימה לבת-קיימה. אז איפה הקאץ, ולמה לא משתמשים בהם כיום אם הם קיימים כבר שישה עשורים? התשובה הבסיסית היא שאותם כורים "מיוחדים" מסובכים ויקרים יותר לבנייה ולתפעול. הם גם אינם מראים הספק גבוה יותר מאשר כורים רגילים, הם פשוט חסכוניים יותר בדלק. באופן כללי, רוב העלות הכספית של אנרגיה גרעינית כיום אינה קשורה במשאב המתכלה - אורניום, אלא בבנייה, בתפעול ובפירוק של הכורים עצמם. לכן, בהינתן שאין מחסור באורניום (נכון לרגע זה אין), אין תמריץ כלכלי להשקיע בפיתוח ובבנייה של כורים "מיוחדים". ישנם כמה כורי תרבית וכורי ת'וריום פעילים בעולם, אך הם אינם חלק משמעותי מכוח הייצור הגרעיני בעולם.³⁰

אם כל המשאבים והידע פה, ורק צריך לבנות כמה כורי תרבית והופ! אין יותר משבר אנרגיה ומשבר אקלים, למה זה לא קורה? אנרגיה גרעינית מציבה שני מכשולים. המכשול הראשון הוא שאנרגיה גרעינית היא מפחידה. האסוציאציות של האדם הממוצע (ושל מקבלי ההחלטות) כשהוא שומע "גרעין" הן "הירושמה", "פוקושימה" ו"צ'רנוביל", ולא "אנרגיה ירוקה". המכשול השני הוא שאנרגיה גרעינית היא יקרה. זה פשוט יקר לבנות ולתפעל כורים.

אז השורה התחתונה היא שאנרגיה גרעינית כמו שהיא נראית כיום איננה מקור אנרגיה בר-קיימה, אם כי הטכנולוגיה שתהפוך אותה לכזאת כבר קיימת ונמצאת בפיתוח. אבל בעיניי יש עוד מסר מעניין, והוא שיש הרבה מה לעשות עם מחקר ראשוני, ויש הרבה רעיונות מעניינים שאפשר לחשוב עליהם עם המוח הגדול שלכם. אבל כדי שהם יוכלו לשנות את העולם, הם צריכים להיות אטרקטיביים ופרקטיים, גם כלכלית וגם פסיכולוגית. להציל את העולם צריך להיות עסק משתלם.



גיל רונן, בוגר מחזור א' של אוניברסיטת בר-אילן שבבעברת ישראל בפיסיקה. בועל תואר ראשון במתמטיקה ותואר שני בפיסיקה מהאוניברסיטה העברית. כתב את התזה שלו על חקר חומר אפל בעזרת חיישנים קוונטיים. אוהב לטייל ולעשות ג'אגלינג.
מייל: gilron31@gmail.com

עשרת האחוזים הנותרים של הפסולת דורשים מתקנים ייעודיים לטיפול בפסולת, ומתוכם רק הדלק הגרעיני ה"משומש" הוא המסוכן ביותר. אבל נניד שכל אזרחי העולם היו צורכים חשמל כמו ישראלים (זאת הנחה מחמירה, ישראלים צורכים פי שניים מהממוצע העולמי, ואמריקאים פי ארבעה²⁴), וכל החשמל היה מגיע מכורים גרעיניים בטכנולוגיה שנמצאת בשימוש כבר היום. במקרה כזה, בכל שנה היו מצטברים כ-40,000 טונות של דלק גרעיני משומש. זה עשוי להישמע הרבה, אבל מדובר בנפח של כ-2,000 מטרים מעוקבים, שהם בערך עשירית מבריכה אולימפית²⁵. גם אם נסיף לזה את העלויות והמורכבויות של הטיפול בפסולת המסוכנת, מדינות בעולם כבר מתמודדות עם פרויקטים לוגיסטיים בסדר הגודל הזה. לשם השוואה, נכון להיום האנושות מייצרת כ-2,000,000,000 טונות של פסולת מוצקה מדי שנה.²⁶

כעת, אפשר להתפנות לסוגיה השלישית והמעניינת ביותר - האם יש מספיק אורניום על פני כדור הארץ?

נניד שהיינו רוצים לייצר את כל החשמל בעולם מאנרגיה גרעינית. זה אומר שהיינו צריכים כ-600,000 טונות של אורניום טבעי בשנה. כמה אורניום יש בכלל בכדור הארץ? סך כל האורניום בכל המצבורים הידועים כיום עומד על 8,000,000 טונות²⁷. כלומר מספיק בשביל 13 שנים. לא ממש בר-קיימה, וזה עוד בלי להביא בחשבון את הגדילה הצפויה בביקוש לחשמל.

אז אכלנו אותה?

האם מוותרים? האם נשלים עם העובדה שאין לנו מספיק מקורות אנרגיה על פני כדור הארץ? נוליד פחות ילדים? נתחיל לנסוע בתחב"צ רחמנא ליצלן? אפשר, אבל לשמחתנו יש כמה פתרונות שאולי ידחו את השאלות הקשות האלה בעוד כמה מאות שנים. בהקשר של אנרגיה גרעינית, אפשרות אחת היא להגדיל את כמות האורניום, ואפשרות שנייה היא להגדיל את כמות האנרגיה המופקת מכל טון אורניום שאנחנו חוצבים.

נתחיל מנסיונות להגדיל את כמות האורניום. מתברר שכמעט בכל פיסת אדמה על פני כדור הארץ יש אורניום, אבל בריכוז נמוך מאוד (0.00028%), ולכן לא משתלם לנסות להפיק אותו, אלא במצבורים שבהם יש ריכוז גבוה יותר. סביר להניח שאם תהיה עלייה בביקוש לאורניום, יגברו המאמצים לחיפוש מצבורים נוספים וההיצע יעלה, אבל בדומה לדלקי מאובנים, בלי עוד "טריקים" זה לא יחזיק לטווח הארוך. הינה "טריק" לדוגמה: מתברר שבאוקיינוסים של כדור הארץ יש כ-4,500,000,000 טונות של אורניום²⁸. שמספיקים עקרונית כדי להחזיק את האנושות למשך 7,500 שנים. הטכנולוגיה שיכולה למצות אורניום ממי ים טרם הודגמה בקנה מידה תעשייתי, והניסיון למצות את כל האורניום בכל האוקיינוסים בכדור הארץ (אוקיינוס הוא דבר גדול!) ניתקל במגבלות פרקטיות לא פשוטות, אבל הרעיון קיים ויש מחקר פעיל בנושא.²⁹

ספרים מומלצים:

www.withouthotair.com - מנתח בצורה כמותית מגוון רחב של סוגיות הנוגעות למשק האנרגיה העולמי (ספר חינמי!).

זוויות אחרות על הסוגיה של אנרגיה גרעינית:

www.youtube.com/watch?v=EhAemz1v7dQ

www.youtube.com/watch?v=UK8ccWSZkic

www.youtube.com/watch?v=ciStnd9Y2ak

הערות

1. [מאמר על פוגים ביסודי.](#)

2. [מצגת גנרית של שיעור מדעים בנושא אנרגיה. מכילה תמונות של נורות ושל איש רץ ומרק חם.](#)

3. מאמץ את הקריטריון של דיוויד מקיי מספרו החינמי: [Sustainable Energy Without Hot Air](#).

4. [מתוך דוח של רשות החשמל לשנת 2020.](#)

5. הפרק הראשון [בספר](#), שכותרתו היא Numbers, not adjectives (מספרים, לא שמות תואר) עוסק בדיוק בסוגיה הזאת. הספר יצא לאור ב-2008 ולכן חלק מהניתוחים שבו מתבססים על טכנולוגיות שהיום כבר נחשבות מיושנות, מה שלרוב הופך את הניתוחים שלו לפסימיים יותר.

6. בשיח סביב משק החשמל נהוג לדבר ביחידות של קילוואט-שעה (3,600,000J). בהתחשב בעובדה שוואט זה ג'אול לשנייה, זה כמו שבמקום לומר "הלכתי עשרה מטרים" נגיד "הלכתי 36 שניות-קמ"ש".

7. [דו"ח של המעבדה הלאומית האמריקאית - לוס אלמוס, על הפצצות שהוטלו על הירושימה ונגסאקי.](#)

8. אני מניח פה שהקומקום שלי אידיאלי, והוא לא, אז כנראה שצרכתי יותר מ-100,000J בשביל חימום המים.

9. 62 אגורות לקילוואט-שעה.

10. האמת היא שיש ארבע, אני מציג רק שתיים לשם פשטות הדיון. [המדריך המלא.](#)

11. [פירוט על הסוגיה של חישוב אנרגיה ראשונית למקורות מתחדשים.](#)

12. [המקור שלי לנתון הזה.](#) יש שם גם דרך נוחה לראות איך המספר הזה מתפלג בין מקורות האנרגיה השונים (מתחדשים ולא מתחדשים). EJ = ExaJoule = 1e18J.

13. שטח הפנים של כדור הארץ הוא כ-5.1e14 מטרים רבועים. נחלק את 6e20J בשטח ונקבל 1.1 מיליון ג'אול, שזה בערך 11 כוסות קפה. פצצה אחת שוות ערך ל-6e13J, כלומר ב-6e20J נכנסות 1e7 פצצות. מספר השניות בשנה הוא בערך 3e7 ולכן קיבלנו פצצה כל שלוש שניות.

14. [דו"ח של מרכז המחקר והמידע של הכנסת.](#)

15. [כתבה ב-Nature על הסוגיה.](#)

16. רשימה חלקית של זוכי פרס נובל מכלל צד: גרמניה: ורנר הייזנברג (ממייסדי תורת הקוונטים!), ולתר בותה ואוטו האן. בעלות הברית: גיימס צ'דוויק (גילה את הניוטרוני!), הנס בתה, אנריקו פרמי, ריצ'רד פיינמן, ארתור קומפטון ויוג'ין ויגנר.

17. הפצצות על הערים היפניות הירושימה ונגסאקי הוטלו ב-6 וב-9 באוגוסט 1945 (בהתאמה), וביחד גבו את חייהם של כ-200,000 בני אדם. שישה ימים בלבד לאחר הטלת הפצצה השנייה על נגסאקי הודיעה יפן על כניעתה ללא תנאי לבעלות הברית.

18. אורניום נמצא בטבע כתערובת של שני איזוטופים עיקריים, U238 בריכוז של 99.3% ו-U235 בריכוז 0.7%. לצערנו האיזוטופ שמתאים לייצור אנרגיה הוא ה-U235. העשרה היא התהליך שבו מעלים את ריכוז האיזוטופ U235. לייצור אנרגיה מספיקה רמת העשרה של כ-4%, ובשביל נשק גרעיני יש להגיע ל-90%.

19. [סקירה מקיפה של מעגל הדלק הגרעיני.](#)

20. כור גרעיני ממוצע הוא בעל הספק של כ-1GW. יכולת הייצור של ישראל נכון ל-2020 היא כ-19GW - [מקור](#).

21. [מקור](#).

22. [דיוויד מקיי עושה את החשבון.](#)

23. [דו"ח של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית בנושא פסולת גרעינית.](#)

24. [מקור](#).

25. דלק גרעיני משומש אי אפשר פשוט לשפוך לבריכת שחייה אולימפית ולשכוח ממנו. תהליך הטיפול והאחסון הרבה יותר מורכב, אבל לא ברמה שמשנה את השורה התחתונה - בקנה מידה של מדינה גדולה, וכמובן שבקנה מידה כלל-עולמי, מדובר במאמץ סביר.

26. [מקור](#).

27. [מקור](#).

28. [מקור](#).

29. שם.

30. [מקור - דו"ח של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית על סוגי הכורים הפעילים בעולם כיום.](#)