

מקורות האנרגיה של כדור הארץ

מ. קינג הברט - M. King Hubbert*

תרגום - חזי פיסטול, אילות.

קשה לאנשים החיים היום, ואשר הורגלו לגידול המעריכי המתמיד בצריכת אנרגיה מדלקים פוסיליים, להבין עד כמה בן חלוף הוא עידן הדלקים הפוסיליים כאשר אנו משקיפים על תקופה ממושכת של ההיסטוריה האנושית. אפשר להבחין בכך בצורה טובה יותר בפרספקטיבה של 10000 שנה - מחציתם עד היום ומחציתם האחרת מהיום והלאה. בקנה מידה זה, עידן ניצול הדלקים הפוסיליים בעולם משתרע על תקופה של כ-1300 שנה, כאשר חלק הארי של עידן זה (המוגדר כתקופה שבה מנוצלים ונשרפים כל הדלקים מלבד 10% הראשונים ו-10% האחרונים) נמשך בקושי 300 שנה.

מנין, אם כן תבוא האנרגיה בעתיד? התשובה טמונה ביכולת הגדלה של האדם לנצל מקורות אנרגיה חלופיים. כיום המדובר בעיקר בניצול דלק גרעיני, אולם בעתיד בודאי ינוצל מקור האנרגיה הגדול הרבה יותר - קרינת השמש. בעזרת יכולת אנושית זו, מאגרי האנרגיה המצויים כיום בהישג יד, מספיקים להנעת גלגל התעשייה בהיקף הנוכחי למשך 1000 שנה נוספים ואולי אף יותר. יתר על כן, עם מאגרי אנרגיה שכאלה, מגבלות הגידול התעשייתי אינן נקבעות יותר לפי המחסור באנרגיה אלא יותר על ידי מגבלות המקום והחומרים של כדור הארץ שהוא בעל גודל סופי, ביחד עם מגבלות אקולוגיות שהגידול התעשייתי גורם. בהתאם למגבלות והאפשרויות, נוסות הפעילויות התעשייתיות והביולוגיות לגדול בצורה מעריכית עם הזמן, אולם המאגרים של כדור הארץ אינם מספיקים כדי לשמור על קצב גידול כזה אלא לתקופה של מספר עשרות הכפלות עוקבות בגידול.

לזרימה הנכנסת יש שלושה מקורות עיקריים:

1. אנרגיית השמש הנקלטת.
2. חום המוסע אל פני כדור הארץ מהמעמקים החמים יותר על ידי הולכת חום והסעתו במעינות חמים והרי געש.

מקורות האנרגיה של כדור הארץ הם אנרגיה סולרית (ישירה ואגורה), גאות ושפל, חום הנפלט מכדור הארץ, דלקי ביקוע וכנראה דלקי מיזוג. מנקודת המבט של ההיסטוריה האנושית, עידן הדלקים הפוסיליים יהיה קצר למדי.

קיימת זרימת אנרגיה קבועה אל הסביבה של פני כדור הארץ וממנה החוצה. כתוצאה מכך, המרכיבים החומריים של פני כדור הארץ נמצאים במצב של תנועה מתמדת, רצופה או בהפסקות. מקור האנרגיה הוא ברובו הגדול קרינת השמש, ובנוסף לה כמויות קטנות של חום מפנים כדור הארץ וכן אנרגיית גאות ושפל הנובעת מהמערכת הגרביטציונית של כדור הארץ, הירח והשמש.

החומרים המרכיבים את פני כדור הארץ מורכבים מ-92 יסודות כימיים טבעיים שכמעט כולם מתנהגים בהתאם לעקרונות שימור החומר כפי שנוסחו בכימיה הקלאסית. חלק קטן מהיסודות או האיזוטופים שלהם, המצויים רק בכמויות של מספר חלקים למיליון (ppm), חורגים מעקרונות אלה בהיותם רדיואקטיביים. "חריגה" זו הינה רבת משמעות בכך שהיא המפתח לכמויות גדולות נוספות של אנרגיה.

חלק קטן מהחומר בקליפת כדור הארץ מצוי באורגניזמים חיים: צמחים ובעלי חיים. עלי הצמחים קולטים חלק קטן של קרינת השמש ואוגרים אותה בצורה כימית בעזרת מנגנון ההטמעה (פוטוסינתזה). מאגר זה הופך ל"ספק" האנרגיה החיונית לקיומה של ממלכת החי והצומח. האנרגיה האצורה באופן ביולוגי משוחררת על ידי תהליכי חימצון בקצב השווה בערך לקצב האגירה. מכל מקום, במשך מיליוני שנים, חלק מזערי של החומר החי והצומח נקבר בתנאים של חימצון בלתי מושלם ורקבון; בעקבות כך נוצרו הדלקים הפוסיליים (מחצביים) אשר מספקים את רוב האנרגיה לחברות המתועשות.

* Translated by permission of W.H. Freeman and Company, from The Energy Resources of the Earth by M. King Hubbert, Scientific American, September 1971, p. 61. Copyright © 1971 by Scientific American Inc. All rights reserved.

לקוח מהמדריך למורה לתכנית "אנרגיה, הבעיה מקורות והפקה" בהוצאת המחלקה להוראת המדעים, 1991.

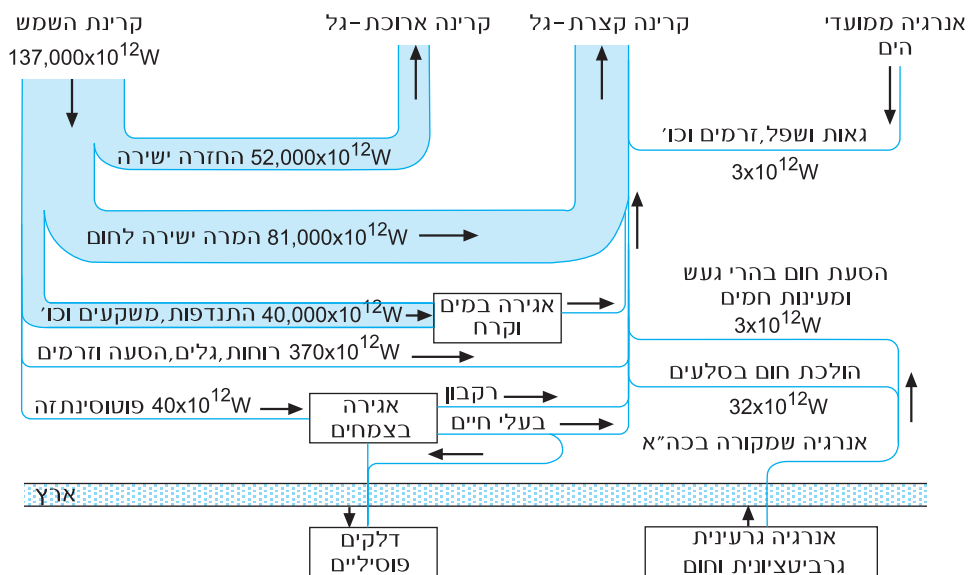
הוא בערך $0.063W/m^2$. עבור שטח פני כדור הארץ, שהוא $510 \times 10^{12} m^2$, סך כמות החום הזורמת היא כ- $32 \times 10^{12} W$. קצב הסעת החום על ידי מעינות חמים והרי געש מוערך ב-1% מקצב ההולכה והוא על כן בערך $0.3 \times 10^{12} W$.

האנרגיה שמקורה בגיאותרם ושפלה מוערכת ב- $3 \times 10^{12} W$ בקירוב. כאשר אנו מבטאים את כל שלושת מקורות האנרגיה ביחידה משותפת של $10^{12} W$ סך הכל של שטף האנרגיה הנכנס לפני כדור הארץ הוא $173035 \times 10^{12} W$. 99.98% קרינת השמש תורמת 99.98% מכלל שטף זה, או במילים אחרות, תרומת השמש לסך כל זרימת ההספק אל הארץ גדולה פי 5000 בערך מסך כל ההספק המגיע לפני כדור הארץ מכל המקורות האחרים גם יחד.

כ-30% מקרינת השמש הישירה ($52000 \times 10^{12} W$) מוחזרים ישירות ומפוזרים לחלל כקרינה קצרת גלים. חלק אחר, כ-47% ($81000 \times 10^{12} W$) נבלע על ידי האטמוספירה, היבשות והימים, והופך ישירות לחום המתבטא בטמפרטורת הסביבה. 23% נוספים ($40000 \times 10^{12} W$) נצרכים לקיום המחזור ההידרולוגי (אידי, הסעה, משקעים זרימת מים עילית - מפלי מים). חלק קטן, כ- $370 \times 10^{12} W$ יוצר זרמים אטמוספיריים וימיים (גלים ורוחות) וסופות שהופכים לחום כתוצאה מחיכוך. ולבסוף, חלק קטן עוד יותר, כ- $40 \times 10^{12} W$, נקלט על ידי הכלורופיל בעלי הצמחים, שבהם, בעזרת תהליך ההטמעה, הוא הופך למקור האנרגיה העיקרי של ממלכת הצומח והחי.

תהליך הפוטוסינתזה קושר את הפחמן בעלה ואוגר את אנרגיית השמש בצורת פחמימות. התהליך משחרר חמצן ועם הרקבות העלה נפלט חום. לאורך זמן נתון - כשנה או יותר - שיווי המשקל בין תהליכים אלה הינו כמעט מושלם. למרות זאת חלק מזערי של החומר האורגני הנוצר נקבר במרבצי כבול או בסביבות אנאירוביות אחרות, בתנאים המונעים רקבון מוחלט ואובדן אנרגיה.

הבה נבחן ביתר פירוט את זרימת האנרגיה דרך הסביבה של פני כדור הארץ.



תרשים 1:

זרימת האנרגיה אל כדור הארץ וממנו מתוארת על ידי פסים וקווים אשר רוחבם מרמז על תרומתו של כל פריט ל"תקציב - האנרגיה" של כדור הארץ. ה"הכנסות" העיקריות הן קרינת השמש, אנרגיה של גאות ושפל, והאנרגיה ממקורות גרעיניים, תרמליים וגרביטציוניים. למעלה מ-99 אחוז של ההכנסה הוא קרינה מן השמש. התפלגות קרינת השמש המגיעה אלינו מתוארת על ידי פסים אופקיים החל ב-"החזרה ישירה" בפס העליון ומשם בכיוון אנכי כלפי מטה. החלק הקטן ביותר נקלט על ידי פוטוסינתזה. דלקים פוסיליים נוצרו מצמחים וחיות שמתו ונקברו באדמה; הם מכילים אנרגיה מן השמש שנאגרה במשך מיליוני שנים בעבר.

3. אנרגיה של גאות ושפל שמוצאה משילוב האנרגיה הקינטית והפוטנציאלית של המערכת ארץ-ירח-שמש. ניתן להעריך בדרכים שונות מהו היקף תרומת האנרגיה של כל מקור.

עבור קרינת השמש מבטאים את שטף האנרגיה הנכנס באמצעות "קבוע השמש" המוגדר כקצב הזרימה הממוצע של אנרגיית השמש דרך יחידת שטח הניצבת לכיוון הקרינה, והמצויה במרומי האטמוספירה במרחק הממוצע שבין כדור הארץ והשמש. ממדידות שנעשו על פני כדור הארץ ובחלליות נתקבל עבור קבוע השמש ערך ממוצע שהוא $1395kW/m^2$ (תחום השגיאה $\pm 2\%$). סך כל ההספק הקרינתי של השמש הנקלט על ידי חתך מעגלי שקוטרו כקוטר כדור הארץ (ששטחו הוא כ- $1.28 \times 10^{14} m^2$) הוא על כן $1.73 \times 10^{17} W$.

שטף החום המגיע על ידי הולכה מפנים כדור הארץ, נקבע על ידי מדידות של הגרדיאנט הגיאותרמי (עליית הטמפרטורה עם העומק) ושל מוליכות החום של הסלעים. כתוצאה מאלפי מדידות כאלה על פני כדור הארץ ובקרקעיות האוקיינוסים נמצא כי השיעור הממוצע של זרימת חום מפנים כדור הארץ

ניצול דלקים אלה הוא בעצם משיכה מקרן ראשונית קבועה אשר הולכת ומדלדלת. המחזור השלם של ניצול דלקים פוסיליים הוא בעל המאפיינים הבאים: קצב ההפקה מתחיל מאפס, והולך וגדל בצורה אקספוננציאלית. אחר כך, כאשר גדלים הקשיים הכרוכים בגילוי ותפוקה, קצב גידול התפוקה מועט והולך, ומגיע לנקודת מקסימום אחת או יותר, ואז, עם ההדלדלות המתמדת של המאגר תחיל ירידה בתפוקה שתגיע לבסוף לאפס.

חישוב של שיעורי התפוקה בעבר והערכה לגבי העתיד יחד עם הערכה המתקבלת על הדעת לגבי הכמות ההתחלתית של הדלקים הפוסיליים מאפשרים לחשב את משך התקופה בה ניתן לנצל את הדלקים. בהתייחסו לפחם ניתן לקבל הערכות טובות למדי על המרבצים הקיימים בעזרת מיפוי גיאולוגי וקידוחי בוחן הנעשים בכל האיזורים בהם משערים שיש מרבצי פחם.

התסקיר המעודכן ביותר הנותן תמונה על מאגרי הפחם התחיליים בעולם נערך על ידי פאול אברית (Paul Averitt) מהשרות הגיאולוגי האמריקאי. תרשימיו (ראה תרשימים 2 ו-3 בעמוד הבא) מתארים את כמות הפחם הניתנת לכריה - כמות המוגדרת כ-50% מהפחם הנמצא למעשה. נכללים בזה מרבצי פחם בעובי מ-36 ס"מ ועד עוביים של 1.2 ק"מ ו-1.8 ק"מ. אם נסתמך על הערכת אברית של מאגר תחילי של 7.6×10^{12} טון, ונניח שקצב הייצור הנוכחי, שהוא 3×10^9 טון לשנה, אינו מוכפל יותר משלוש פעמים, נוכל לצפות כי השיא בקצב התפוקה יושג בין שנת 2100 לשנת 2150. אם נזניח את הזמן הארוך שנדרש להפיק את 10% הראשונים ו-10% האחרונים, נמצא שמשך הזמן הנדרש להפקת 80% מהמאגר הראשוני הוא בקירוב פרק הזמן של 300 השנים שבין 2000-2300.

לגבי כמויות הנפט והגז העשויות להתגלות ולהיות מופקות בתחום נתון, ההערכה אינה יכולה להיות כה טובה כמו לגבי הפחם. הסיבה היא שנוזלים אלה מצויים בנפחים מוגבלים ובשטחים מוגבלים בתוך סלעי משקע בעומקים שונים החל מכמה מאות מטרים ועד למעלה מ-8 ק"מ. למרות הקשיים ההערכות לגבי איזור נתון משתפרות עם הזמן ככל שההפקה מתקדמת, בנוסף לכך ניתן לעשות הערכות לגבי איזורים שטרם נחקרו על סמך השוואות גיאולוגיות עם איזורים שבהם נמצאו מאגרי נפט וגז.

האיזור המפותח ביותר מבחינת הפקת נפט הוא שטח היבשת של ארה"ב למעט אלסקה והוואי. שטח זה הוא עד היום הראשון בעולם בכל הנוגע להתפתחויות בתחום חיפושי נפט,

רק מעט מן החומר האורגני שנוצר לפני תקופת הקמבריום - שהחלה לפני כ-600 מיליון שנה - נשתמר. אולם במשך 600 מיליון השנים האחרונות, חלק מהחומרים האורגניים שלא עברו ריקבון מידי, נקברו תחת שכבות עבות של חול, בוץ ואבני גיר. חומרים אורגניים אלה הם הדלקים הפוסיליים: פחם, פצלי שמן, נפט גולמי וגז טבעי, שהינם עשירים באנרגיה שנאגרה מן השמש בצורה כימית במשך 600 מיליון השנים האחרונות. התהליך עדיין נמשך בהווה, אך כנראה באותו קצב כמו בעבר; ההצטברות במשך מיליון השנים הבאות תהיה אם כן בשיעור של כ-1/600 מהכמות שהצטברה עד היום.

התיעוש מדלדל כמובן את יתרות בנק האנרגיה הזה במהירות הולכת וגדלה. במקרה של פחם לדוגמא, הצריכה העולמית במשך 110 השנים האחרונות היתה גדולה פי 19 בערך מהצריכה במשך שבע מאות השנים שקדמו להן. בדרך אחרת ניתן לומר כי הפחם שנצרך מאז 1940 ועד היום, שווה בערך לסך הצריכה עד אותה שנה. כמות הפחם המצטברת שהופקה בין השנים 1860-1970 היתה בערך 133×10^9 טון. הכמות שהופקה עד 1860 היתה בערך 7×10^6 טון.

הנפט הגולמי והמוצרים הקשורים אליו לא הופקו בכמויות משמעותיות עד שנת 1880. מאז ועד היום קצב הפקתם גדל בצורה אקספוננציאלית קבועה פחות או יותר. במשך 80 השנים בין 1890-1970 קצב הגידול הממוצע היה 6.94% לשנה, כלומר בעל זמן הכפלה של 10 שנים. הייצור המצטבר עד סוף 1969 הגיע ל- 227×10^9 חביות (כ- 36×10^{12} ליטר). 102 השנים שבין 1857-1959 נדרשו להפקת המחצית הראשונה של הכמות המצטברת, בעוד המחצית השנייה הופקה בתקופה של 10 שנים בלבד: 1959-1969.

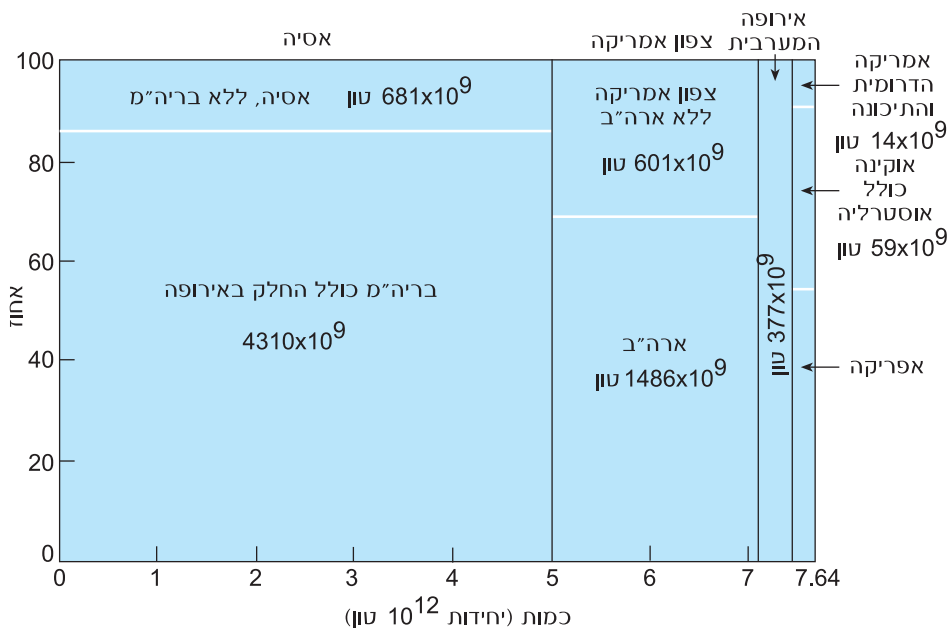
בבדקנו את תרומות האנרגיה היחסיות של פחם ונפט גולמי על ידי השוואת חום השריפה שלהם (ביחידות של 10^{12} קוט"ש), אנו מוצאים כי עד שנת 1900 תרומת הנפט היתה כמעט חסרת משמעות יחסית לתרומת הפחם. מאז 1900 תרומת הנפט גדלה בקצב מהיר יותר מזו של הפחם. בשנת 1963 היה חלקו של הנפט כ-60% מסך כל חום השריפה. אם כוללים בסך זה גם את תרומת הגז הטבעי, הרי שתרומת הנפט הגולמי מגיעה לכ-70%. בארה"ב בלבד, בשנת 1968, היה המקור של 73% מכלל האנרגיה שהופקה מדלקים פוסיליים נפט גולמי, ורק 27% פחם.

באופן כללי ניתן לומר כי צריכת האנרגיה של העולם למטרות תעשייתיות מוכפלת כיום בערך כל עשר שנים. מתעוררת השאלה עד מתי אפשר לשמור על קצב הגידול הנוכחי. לגבי הדלקים הפוסיליים ניתן לענות תשובה מדויקת למדי.

וארה"ב הינה עדיין המפיק מס' 1 של נפט בעולם. בשטח זה נעשו מחקרים ואנליזות בשיטות שונות, ונאספו נתונים קונסיסטנטיים רבים הנותנים תמונה טובה למדי על כמויות הנפט והגז העשויות להימצא במקום.

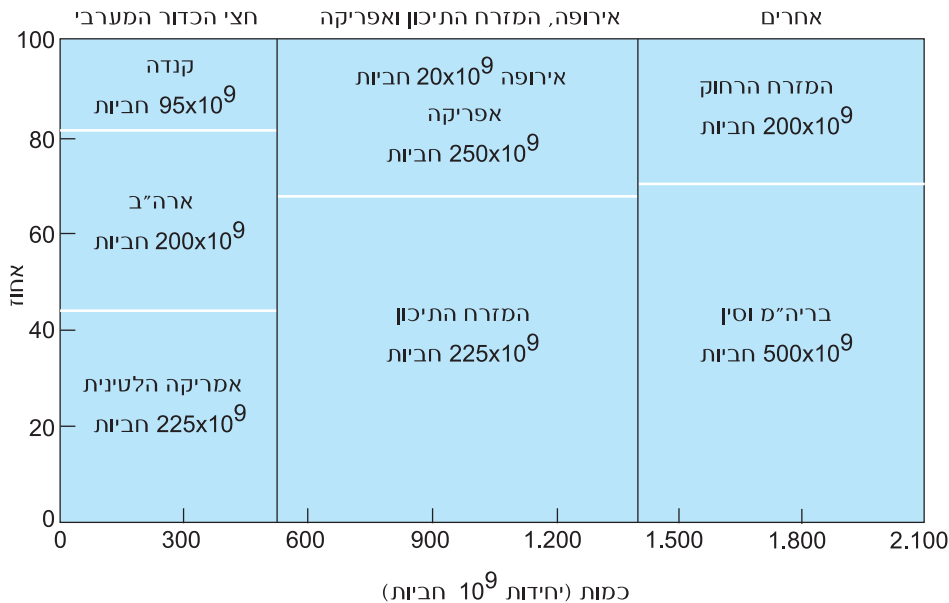
אחת השיטות האלה מבוססת על העיקרון שבאיזור נתון קיים מלכתחילה מספר סופי של שדות נפט וגז. ככל שמתקדמים הסקרים והחיפושים, מתגלים לראשונה אותם השדות הנמצאים סמוך לפני הקרקע והבולטים יותר. מאוחר יותר מתגלים השדות הנמצאים בעומק רב וסמויים יותר. עם כל גילוי קטן מספר השדות שטרם נתגלו ביחידה. סביר להניח כי השדות שטרם נתגלו הם בעומק רב יותר, בצפיפות קטנה יותר, וחבויים יותר. לפיכך העבודה המושקעת בחיפוש כמות מסוימת של נפט או גז הולכת ומתעצמת, בלשון אחרת, הכמות הממוצעת של גז ונפט המתגלה עבור קצב נתון של חיפושים, הולכת וקטנה.

רוב השדות החדשים מתגלים בדרך של "קידוחי סרק באיזורים חדשים", כלומר קידוחים באיזורים שאינם מצויים בקירבה לשדות נפט ידועים. בארה"ב נעשתה סטטיסטיקה שנתית החל מ-1945 על מספר קידוחי הסרק הדרושים לשם גילוי משמעותי אחד של נפט או גז (גילוי משמעותי מוגדר כגילוי באר המפיקה כמיליון חביות נפט או כמות שקולה של גז). הגילויים לגבי שנה מסוימת מחושבים רק לאחר שש שנים של פיתוח מתמיד. ב-1945 נדרשו 26 קידוחי סרק עד לגילוי משמעותי אחד. בשנת 1963 גדל מספר זה ל-65 קידוחי סרק.



תרשים 2:

משאבי הפחם של העולם מתוארים כאן על סמך נתונים שנאספו על ידי Paul Averitt מצוות התסקיר הגיאולוגי של ארצות הברית. התרשים מייצג את סך כל המשאבים התחילתיים של פחם הניתן לכרייה, המוגדר כ-50% מכמות הפחם הנמצאת במחצבים למעשה. הציר האופקי מייצג את הכמות הכוללת. כל מלבן אנכי מראה את התפלגות המשאבים ביבשת נתונה. מן המלבן הראשון לדוגמה, אפשר לראות שבאסיה מצויות כ-5% $\times 10^{12}$ טונות פחם הניתן לכרייה, אשר 86% מהן מצויות בברית-המועצות.



תרשים 3:

משאבי הנפט הגולמי שבעולם מתוארים באופן דומה למשאבי הפחם בעמוד זה. המספרים לנפט גולמי נלקחו מהערכות שנעשו ב-1967 על ידי W.P. Ryman מחברת "סטנדרד אויל" שבניו-ג'רסי. הם מייצגים את הכמות המירבית של הפקת נפט גולמי, כולל נפט מקידוחים בים. הם כוללים את כמויות הנפט שכבר הופקו או הוכח שנמצאות, וכן עתודות אפשריות ותגליות בעתיד. קיימות גם הערכות נמוכות יותר, כ- 1350×10^9 חביות.

יושג השיא בתפוקת הנפט בעולם בשנת 2000. תקופת הצריכה של 80% האמצעיים תימשך כנראה בין 58 ל-64 שנים בהתאם לאיזו משתי התחזיות אנו מאמצים. כמות משמעותית של נפט סופית אף היא, ניתן להפיק מחולות זפת ומפצלי שמן שאך זה עתה החלו בניצולם. מרבצי חולות הזפת הגדולים ביותר בעולם מצויים באלברטה הצפונית שבקנדה שבהם טמונה כמות השווה ל- 300×10^9 חביות. הערכה מסכמת של כמויות פצלי השמן בעולם שנעשתה על ידי דונלד קי דנקן וורנון פ. סוואנסון מהשרות הגיאולוגי של ארה"ב מצביעה על סך כולל של 3100×10^9 חביות מפצלי שמן המכילים בין 10 ל-100 גלון נפט לכל טון, אשר מהם ניתן להפיק 190×10^9 חביות בתנאים של 1965.

היות שהדלקים הפוסיליים, באופן בלתי נמנע, ינוצלו עד תומם תוך מאות ספורות של שנים, מתעוררת השאלה אלו מקורות אנרגיה חלופיים יכולים להיות מנוצלים כדי לספק את דרישות ההספק של העולם המתועש לאחר העלמות הדלקים הפוסיליים. מצויים חמישה מקורות אנרגיה העשויים למלא דרישה זו: קרינת השמש (ניצול ישיר), קרינת השמש (ניצול עקיף), גיאותרמל, מעיינות גיאותרמיים ודלק גרעיני.

עד עתה ניצול ההספק הקרינתי של השמש בצורה ישירה נעשה בקנה מידה קטן למטרות חימום מים והפקת חשמל לחלליות על ידי שימוש בתאים פוטו-וולטאיים. אם רוצים לנצל את ההספק השמש כך שיחליף את הדלקים הפוסיליים בקנה מידה תעשייתי יש צורך במתקנים גדולים הרבה יותר מאשר תאים פוטו-וולטאיים. הדרישה היא לתחנות המפיקות מן ההספק הקרינתי הספק חשמלי של כ-1000MW כל אחת. יתר על כן, היות שקרינת השמש מגיעה לנקודה מסוימת על פני הארץ בהפסקות, יש צורך לתכנן אגירה בקנה מידה גדול על מנת להתגבר על השינויים היומיומיים.

האתרים המועדפים לשם פיתוח הניצול של ההספק הקרינתי הם מדבריות המשתרעות בתחום של מ-35 מעלות צפונה ועד 35 מעלות דרומה מקו המשווה. שטחים כאלו ניתן למצוא בדרום מערב ארצות הברית, באיזור המשתרע ממדבר סהרה דרך חצי האי ערב עד המפרץ הפרסי (כולל ישראל), במדבר אֶטְקֶמָה בצפון צ'ילה, ובמרכז אוסטרליה. איזורים אלה מקבלים כ-4000-3000 שעות שמש בשנה וכמות אנרגיית השמש הישירה הפוגעת בשטח אופקי נעה בין 300 ל-650 קלוריות/סמ"ר ליום. (הערך של 300 קלוריות שהוא המינימום בחורף, מתקבל מצפיפות הספק ממוצעת של 145 W/m^2 במשך 24 שעות).

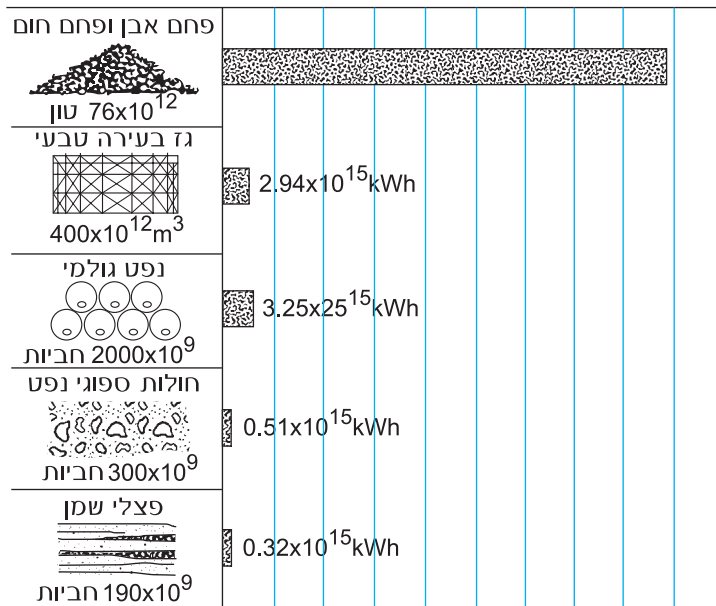
דרך אחרת להבהרת הבעיה היא לבחון את כמות הנפט המתגלה בקידוח-חיפוש לעומק כל 30 ס"מ (מספר חביות/30 ס"מ). בתקופה בין 1920-1860, כאשר נפט נתגלה בלא קשיים מיוחדים, היה היחס 194 חביות/30 ס"מ קידוח. בין 1920 ל-1928 קטן היחס ל-167 חביות/30 ס"מ. בין 1928-1938 גדל היחס לערכו המירבי 276 חביות/30 ס"מ, הן בשל פיתוח טכניקות חיפוש חדשות והן בשל מציאת שדה גדול במזרח טקסס. מאז ועד היום חלה ירידה חדה עד לערך קבוע פחות או יותר - 35 חביות/30 ס"מ. תקופת הירידה תואמת את התקופה של מחקר ופיתוח מואץ של חיפושי נפט-תקופה שלא ידעו כמותו בהיסטוריה של תעשיית הנפט.

הגילויים המצטברים של נפט ב-48 מדינות ארה"ב הגיעו עד שנת 1965 לכמות של 136×10^9 חביות. ניתן להעריך כי סך גילויי הנפט בארה"ב ובמדינות הסמוכות לה יגיעו לערך של 165×10^9 חביות. הגילויים עד שנת 1965 מהווים לכן כ-82% מהכמות הכוללת הצפויה. גם אם ניקח בחשבון תחום טעות בהערכות לגבי העתיד, עדיין רואים כי לפחות 75% מכלל תפוקת הנפט מקורה יהיה בשדות שנתגלו עד שנת 1965.

שיעור הגילוי הנוכחי של גז טבעי ב-48 מדינות ארה"ב הוא בממוצע כ-250 מ"ק גז לחבית של נפט. בהנחה שיחס זה יישמר עבור כמות הנפט הכוללת המוערכת של 165×10^9 חביות נפט גולמי יהיה הנפח הכולל של גז טבעי שיתגלה כ- 40×10^9 מ"ק. ניתן עתה להעריך כמה זמן נוכל לנצל מאגרי נפט וגז אלו. במקרה של נפט, תקופת שיא ההפקה הינה כנראה ההווה. פרק הזמן הנדרש להפקת 80% של סך התפוקה האפשרית הוא בערך 65 השנים שבין 1934-1999 פחות ממשך חיי אדם. שיא התפוקה של גז טבעי יהיה כנראה בשנים שבין 1975-1980.

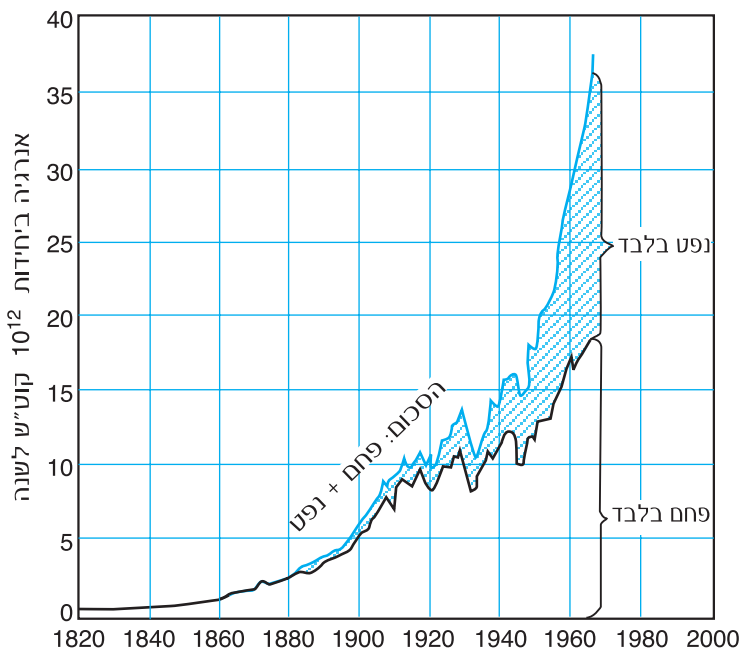
שינוי מהותי בתמונה חל עם גילויי שדות הנפט באלסקה. השדה במפרץ פרודוהו (Prudhoe) אמור להכיל כ- 1010 חביות נפט-כמות הגדולה כפליים מתפוקת שדה מזרח טקסס, שהיה עד כה הגדול בתחום ארה"ב. אפשר לתת הערכות גסות לגבי גילויים אפשריים בעתיד באלסקה. הערכה ספקולטיבית אחת אומרת כי סך הכמות היא בין 30×10^9 ל- 50×10^9 חביות. כדאי לזכור כי כמות כזו אינה מספיקה אפילו ל-10 שנות אספקת נפט לארה"ב בקצב הצריכה הנוכחי. מכאן נראה שגילויי שדות אלסקה לא ידחה את תקופת שיא ההפקה אלא רק יאט את שיעור הירידה בתפוקה.

ההערכות לגבי סך תפוקת הנפט בעולם נעות מ- 1350×10^9 חביות עד 2100×10^9 חביות. לפי ההערכה הגבוהה יותר,



תרשים 4:

תכולת האנרגיה של המשאבים התחילתיים הניתנים להפקה של דלקים פוסיליים נתונה ביחידות של 10^{15} קוט"ש חום. פחם אבן ופחם חום, לדוגמה, מכילים 55.9×10^{15} קוט"ש חום ומייצגים 88.8% של משאבי אנרגיה הניתנים לכרייה.



תרשים 5:

התרומה לאנרגיה של פחם (קו שחור) ושל פחם ונפט גולמי ביחד (קו כחול) בתקופה 1790-1880 מתוארת על ידי הכמויות של חום השריפה של כל אחד מהם. לפני 1900 התרומה לאנרגיה הנצרכת מנפט היתה זניחה. מאז גדלה התרומה של הנפט (השטח המקווקו) הרבה יותר מהר מתרומת הפחם. ב-1968 היווה הנפט כ-60% מסך מקורות אנרגיה הנצרכת. לו כללנו בה גם את האנרגיה המופקת מגז בעירה טבעי, הנפט היה מהווה כ-70% מסך הכל.

אפשר לקחת בחשבון שלוש תכניות לקליטה והמרה של אנרגיה זו בתחנת הספק של 1000MW. האפשרות הראשונה כרוכה בשימוש בקולטים שטוחים העשויים תאים פוטו-וולטאיים שנצילותם כ-10%. אפשרות שניה הוצעה לאחרונה על ידי אדן ב. מיינל ומרג'ורי פ. מיינל מאוניברסיטת אריזונה. בהצעתם מדובר על ניצול אפקט החממה וזאת באמצעות ציפויים סלקטיביים על צינורות שבהם זורמת תערובת מותכת של נתרן ואשלגן אשר חוממה לטמפרטורה של 540°C על ידי ההספק הקרינתי של השמש. על ידי שימוש במחליף חום נאגר חום זה בטמפרטורה קבועה בתא מבודד המלא בתערובת של כלורידים של נתרן ואשלגן שלהם קיבול חום המספיק כדי לאגור כמות חום המצטברת ביום אחד לפחות. החום המוצא מתא זה מסוגל להפעיל תחנת הספק קונבנציונלית הפועלת באמצעות קיטור. הנצילות המחושבת עבור הצעה זאת אמורה להיות כ-30%.

מערכת שלישית הוצעה על ידי אליון פ. הילברנדט וגרגורי מ. האאס מאוניברסיטת יוסטון. מערכת זו מחייבת את החזרת הקרינה המגיעה לשטח של מייל מרובע אל תוך תנור וודד הרתחה סולרי בראש מגדל שגובהו כ-500 מ'. החום מדוד ההרתחה בטמפרטורה של כ-2000K יומר להספק חשמלי בהמרה מגנטו-הידרודינמית. בתוספת למערכת זו הוצעה גם מערכת אגירת אנרגיה המבוססת על הידרוליזה של מים. הנצילות הכוללת מוערכת ב-20%.

בטווח של נצילות בין 10 ל-30 אחוז, כמות הספק חום שיש לאגור על מנת לייצר 1000MW היא בין 10000 ל-3300 מגה-וואט חום. לפיכך, שטחי האיסוף עבור שלוש התוכניות המוצעות יהיו 70, 35 ו-23 קמ"ר בהתאמה. אם נתבונן בתכנית בעלת היעילות הנמוכה ביותר נמצא שהשטח הדרוש להפקת הספק חשמלי של 350000MW (ההספק החשמלי המותקן של ארה"ב ב-1970), יהיה 24500 קמ"ר (קצת פחות מעשירית השטח של אריזונה).

הידע הפיסיקלי והמאגרים הטכנולוגיים הדרושים לניצול אנרגיית שמש בקנה מידה כזה מצויים כיום בהישג יד. עם זאת אין לזלזל בקשיים הטכנולוגיים העומדים בדרך לביצוע התוכנית.

בדברנו על אנרגיה גרעינית עלינו להבחין בין שני נושאים: ביקוע ומיזוג. בתהליך הביקוע מתרחש פיצול של הגרעין של יסודות כבדים כגון אורניום. בתהליך המיזוג מתרחש מיזוג של שני גרעינים קלים כגון דייטריום. אורניום 235 שהינו איזוטופ נדיר הוא האיזוטופ הטבעי היחיד היכול לעבור ביקוע בתנאים סיבבתיים נוחים יחסית. (כל 100000 אטומי אורניום טבעי מכילים שישה אטומי אורניום 711,234 אטומי אורניום 235 ו-283 99 אטומי אורניום 238). לו האנרגיה הגרעינית היתה תלויה רק באורניום 235 עידן הדלק הגרעיני היה קצר מאוד, אולם בכור דוגר, על ידי בליעת נייטרונים, הופך אורניום 238 לפלוטוניום 239, או תוריום 232 הופך לאורניום 233. גם פלוטוניום 239 וגם אורניום 233 הם בקיעים. בכור כזה אפשר ליצור יותר דלק גרעיני מזה הנצרך להפעלתו. בדרך זו של דגירה, הופכים אורניום ותוריום טבעיים לדלקים עבור כורי ביקוע.

רוב הכורים הפועלים היום או המתוכננים בארה"ב תלויים בעיקר באורניום 235. הועדה לאנרגיה אטומית של ארה"ב העריכה כי כמות האורניום הדרושה לספק את הגידול המתוכנן בין 1970-1980 הינה כ-187000 טון של אורניום אוקסיד (U_3O_8). דו"ח שפורסם לאחרונה על ידי הסוכנות האירופית לאנרגיה אטומית והסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית חוזה כי דרושה כמות של כ-390000 טון של U_3O_8 כדי לספק את דרישת המדינות המערביות למשך השנים 1980-1970. הועדה לאנרגיה אטומית בארה"ב מעריכה כי הכמות של אורניום אוקסיד שניתן להפיק במחיר של 8 דולר לפאונד (1 פאונד = 0.45 ק"ג) מהעתודות הנוכחיות בארה"ב הינה 243000 טון, ועתודות העולם - במחיר הפקה של פחות מ-10 דולר לפאונד - מוערכות בכ-840000 טון. כמו כן מעריכים כי כדי לספק את הדרישה בעתיד יש לגלות ולפתח עתודות נוספות בסדר גודל של עד מליון טון עד שנת 1985.

למרות שאין ספק שיתגלו מרבצי אורניום נוספים (מרבץ גדול נתגלה לאחרונה במזרח אוסטרליה), כל העדויות הנוכחיות מצביעות על כך שללא מעבר לכורים דוגרים ייווצר מחסור חריף במחצבים בעלי עלות נמוכה עוד לפני סוף המאה הנוכחית. לכן נעשה מאמץ מרוכז לשם פיתוח כורים דוגרים בקנה מידה נרחב לשם יצירת הספק גרעיני. אם פיתוח מואץ זה יצליח, יביא הדבר לשינוי דרסטי בהתייחסות להספקת דלק.

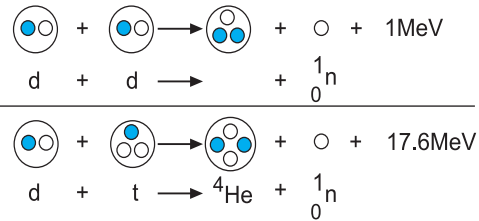
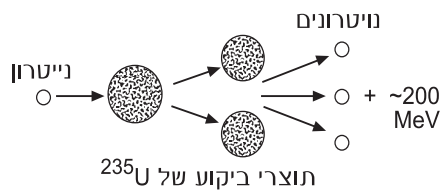
תחזית זו נובעת מהעובדה שבעזרת כור דוגר כמות האנרגיה המתקבלת מ-1 גרם של אורניום 238 מגיעה לכדי 8.1×10^{10} ג'ול של חום. כמות זו שווה לחום השריפה של 2.7×10^7 טון פחם או 13.7 חביות (כ-1.9 טון) נפט גולמי.

שימוש באנרגיית השמש בדרכים עקיפות פרושו להיות תלויים ברוח, שימוש שאינו מעשי בקנה מידה גדול, או בזרימה העילית - מפל מים (שהיא חלק מהמחזור ההידרולוגי). במבט ראשון, השימוש של זרימה עילית נראה מביטח משום שסך כל ההספק שניתן להפיק ממפלי מים ומאגרי מים במקומות מתאימים הינו בערך $3 \times 10^{12} W$ שהוא כמות ההספק הנוכחי הדרוש להפעיל את התעשייה. רק 8.5% מההספק המים מנוצלים כיום, והאיזורים בעלי הפוטנציאל הגבוה ביותר - אפריקה, דרום אמריקה ודרום מזרח אסיה הם היום האיזורים המפגרים ביותר מבחינה תעשייתית. אנו רואים כי בעיות כלכליות הן המעכבות פיתוח נרחב של הספק-מים נוסף.

הספק גאות ושפל מושג ממילוי וריקון מפרצים או שפכי נהרות באמצעות סכרים. האגן הסגור ממולא ומרוקן רק בפרקי זמן קצרים בעת גאות ושפל במטרה להשיג את מירב ההספק. קיימים מספר אתרים מביטחים לצורך ניצול אנרגיה זו. יכולתם הפוטנציאלית נעה בין 2MW ל-200000MW כל אחד. סך כל ההספק הפוטנציאלי ממקור אנרגיה זה מוערך בכ- $64 \times 10^9 W$ שהוא רק כ-2% מכלל פוטנציאל הספק המים בעולם. עד עתה נבנתה רק תחנת הספק אחת המופעלת על ידי גאות ושפל. תחנה זו נמצאת בשפך הנהר רנס בחוף איי התעלה בצפון צרפת. בתחילת פעולתה של התחנה היה ההספק 240MW, כאשר ההספק המירבי המתוכנן הוא 320MW.

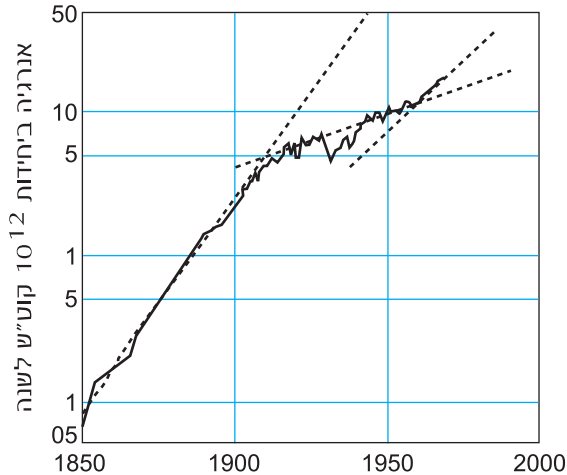
אנרגיה גיאותרמית מנוצלת על ידי מיצוי חום האגור באופן זמני במעבה האדמה וזאת דרך מקורות כמו הרי געש ומאגרי מים חמים תת-קרקעיים. כיום מנוצלים בצורה משמעותית רק מקורות וולקניים (הרי געש). תחנת הספק גיאותרמית מופעלת בל'ד'ר'לו באיטליה מאז שנת 1904, והספקה כיום 370MW. שני מקורות נוספים לניצול ההספק הגיאותרמי הינם הגייזרים בצפון קליפורניה ו-וירקי (Wairakei) בניו זילנד. הייצור בגייזרים החל בשנת 1960 עם הפעלת יחידה בהספק של 12.5MW; בשנת 1969 הגיע ההספק המופק ל-82MW ומתכננים להגיע עד 400MW בשנת 1973. תחנת וירקי החלה לפעול בשנת 1958 ויש לה כיום הספק של 290MW שהוא כנראה ההספק המקסימלי עבור אתר זה.

דונלד א. וייט מהשרות הגיאולוגי האמריקאי העריך כי האנרגיה התרמית האגורה באיזורים הגיאומטרמיים הגדולים בעולם מגיעה לכ- $4 \times 10^{20} J$. אם נניח נצילות של 25% בהמרת האנרגיה הגיאותרמית לאנרגיה חשמלית, הרי ייצור האנרגיה החשמלית יהיה בערך $10^{20} J$ או 3×10^6 מגה-וואט-שנה. אם אנרגיה זו תנוצל עד תומה במשך תקופה של 50 שנה יהיה ייצור ההספק השנתי הממוצע 600000MW, כמות הדומה בסדר הגודל לאנרגיה האצורה בגאות ובשפל.



תרשים 6:

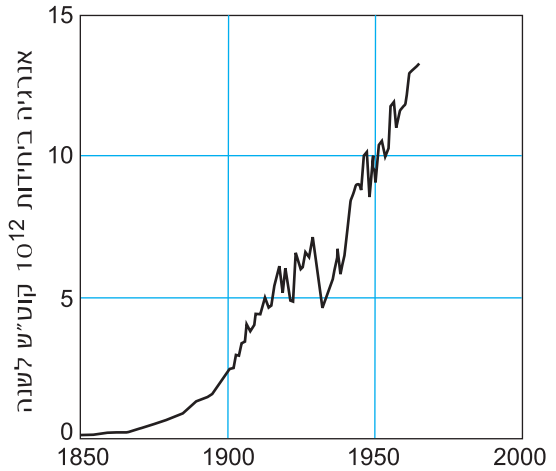
בתגובות ביקוע ומיזוג טמונה הבטחה כמקורות אנרגיה חלופיים, כאשר המקורות המחצביים ידלדלו. תחנות כח גרעיניות הפועלות כיום צורכות אורניום 235 כדלק. כורים דוגרים הנמצאים בשלבי פיתוח ינצלו ניטרונים עודפים מביקוע אורניום 235 ליצירת דלקים גרעיניים אחרים: פלוטוניום 239 ואורניום 233 (צד שמאל). בצד ימין מתוארות שתי תגובות מיזוג מבטיחות: דיטריום-דיטריום ודיטריום-טריטיום. האנרגיה המשתחררת בתגובות השונות נתונה ביחידות של מליון אלקטרון-וולט.



תרשים 8:

שיעור הגידול של הפקת האנרגיה בארצות הברית מתואר במערכת צירים כאשר על ציר ה-y הסקלה היא לוגריתמית. הנתונים הם אותם הנתונים כמו בתרשים הקודם. הקווים המרוסקים מראים שאפשר להבחין בשלוש תקופות גידול שונות. בתקופה הראשונה שיעור הגידול היה 6.91 אחוז בשנה וזמן ההכפלה היה עשר שנים. בתקופה השנייה שיעור הגידול היה 1.77 אחוז לשנה וזמן ההכפלה שלושים ותשע שנים, ובתקופה השלישית הגידול היה בשיעור 4.25 אחוז לשנה וזמן ההכפלה 16.3 שנים.

של 50% בכרייה ובמיצוי של האורניום, עדיין הכמות תהיה שוות ערך ל-1000 טון פחם או 5000 חביות נפט למ"ר. אם נחזור להערכתו של אברית המדברת על תכולה תחילית של 1.5×10^{12} טון פחם הניתן לכרייה ואומדן של 250×10^9 חביות נפט גלמי, אנו מוצאים כי האנרגיה הגרעינית האצורה בשטח של 1500 קמ"ר של הפצלים של צ'טנוגה תשתווה לכמות הפחם התחילית הניתן לכרייה. 50 קמ"ר יספקו אנרגיה שוות ערך לזו של הנפט הגלמי. אם נוסיף לחשבון גם את הגז הטבעי, נמצא ששטח של 2000 קמ"ר של פצלי צ'טנוגה יספק אנרגיה השווה לכל הכמות התחילית של הדלקים הפוסיליים בארה"ב.

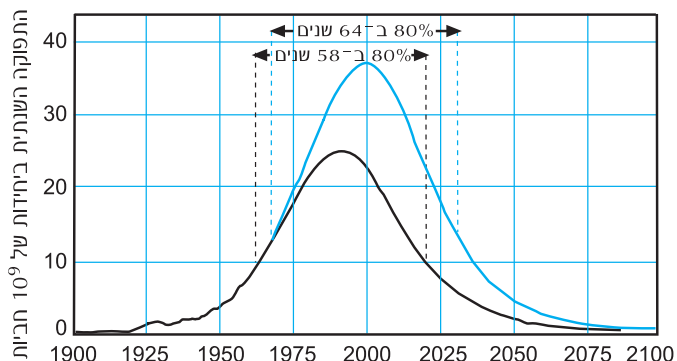


תרשים 7:

הגרף מתאר את הפקת האנרגיה בארצות-הברית מפחם, נפט גולמי ומקורות דומים, ממפלי מים וכורים גרעיניים במשך 120 שנה. נפט גולמי כולל גז בעירה טבעי ונוזלים. הירידה החדה במרכז משקפת את השפעת המיתון הגדול בארה"ב בתקופה זו.

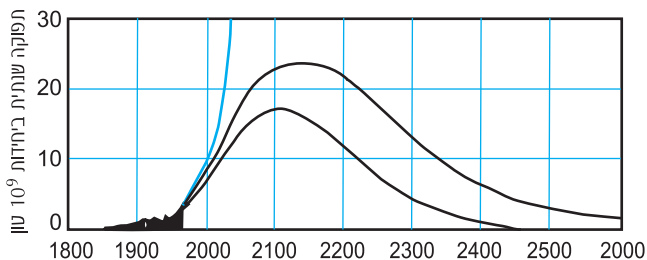
נתעלם מן האספקה המוגבלת של עפרות אורניום עשירות, ונתייחס רק לעפרות מאיכות נמוכה יותר המצויות בשפע רב יותר. דוגמא אחת תצביע על האפשרויות.

פצלי צ'טנוגה (Chattanooga) השחורים (מהעידן הדבוניאני) המשתרעים לאורך השפה המערבית של הרי האפלצ'יים במזרח טנסי מצויים בעומקים הניתנים לכרייה ברובה של טנסי, קנזס, אוהיו, אילינוי ואינדיאנה. במזרח טנסי מצויים פצלים בשכבה שעוביה כ־5 מטר ותכולת האורניום שבה היא בערך 60 גרם/טון. כמות זו של אורניום שוות ערך לכמות של בערך 162 טון פחם ביטומן או 822 חביות נפט גולמי. צפיפות הסלע היא כ־2.5 טון/מ"ק; עמוד אנכי שאורכו 5 מ' ושטח החתך שלו 1 מ"ר, יכיל 12.5 טון של סלע ו־750 גרם אורניום. תכולת האנרגיה של הפצלים למ"ר של שטח פנים תהיה לכן שוות ערך לכ־2000 טון פחם או 10000 חביות נפט. גם אם נניח הפסדים



תרשים 10:

מחזור ההפקה של נפט גולמי בעולם מתואר על סמך שתי הערכות של כמות הנפט המירבית הניתנת לתפוקה. העקומה העליונה משקפת את הערכתו של Ryman של 2100×10^9 חביות, והעקומה התחתונה משקפת הערכה של 1350×10^9 חביות.

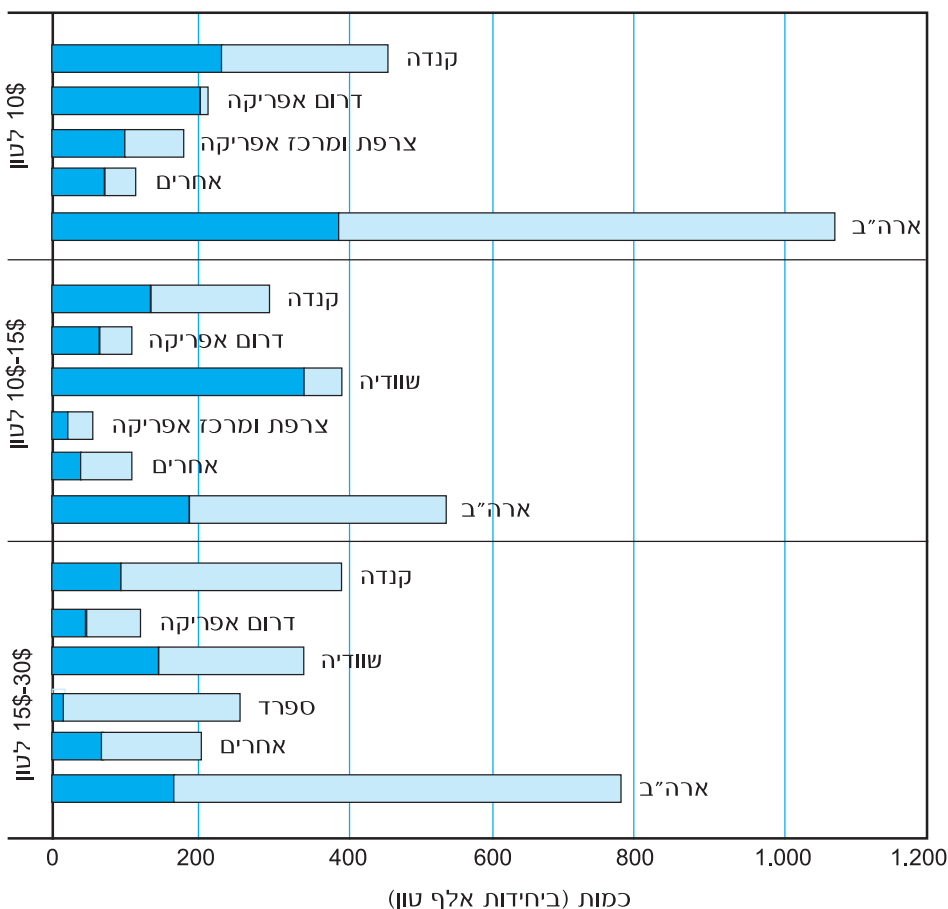


תרשים 9:

המחזור של הפקת הפחם בעולם מתואר כאן על סמך הערכה של משאבים ושיעורי הפקה. העקומה העליונה היא על סמך הערכתו של Averitt של 7.6×10^{12} טונות בכמות התחילתית של פחם הניתן לכרייה, ואילו העקומה התחתונה משקפת הערכה של 4.3×10^{12} טונות. העקומה העולה מעלה מראה את הנטייה אם התפוקה תמשיך לגדול בשיעור הנוכחי של 3.56% לשנה. כמות הפחם שנכרתה ונשרפה במאה השנים החל מ-1870 מיוצגת על ידי השטח המושחר משמאל.

שטח זה מהווה בערך 2% משטחה של טנסי. קיימים מרבצים רבים אחרים באיכות דומה למרבץ זה ומכאן, שכמות האנרגיה שאפשר להפיק מביקוע אורניום ותוריום באמצעות כורים דוגרים גדולה בכמה סדרי גודל לפחות מזו שניתן להפיק מכל הדלקים הפוסיליים גם יחד.

דיייד ו. רוז מהוועדה לאנרגיה אטומית אשר בחן את התחזיות למיזוג מבוקר, מצא שתגובת דאוטריום-טריטיום היא התגובה המבטיחה ביותר. דאוטריום מצוי בשפע (אטום אחד לכל 6700 אטומי מימן) ועלות האנרגיה הכרוכה בהפרדתו, הינה אפסית בהשוואה לכמות האנרגיה המתקבלת בתהליך המיזוג. מצד שני, טריטיום קיים רק בכמויות זעירות בטבע. ניתן להפיק כמויות גודלות יותר על ידי הפצצת ליתיום 6 וליתיום 7 בנייטרונים. האיזוטופ המגביל הוא ליתיום 6 אשר נמצא בשיעור של 7.4% בלבד מכלל הליתיום הטבעי.

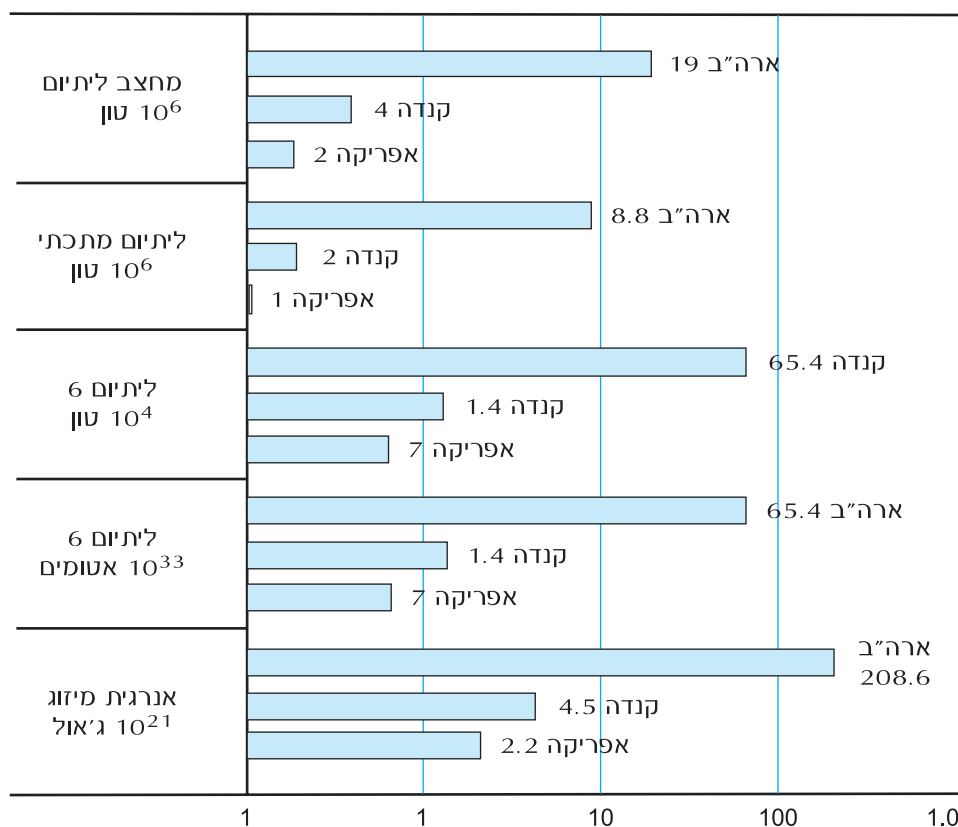


תרשים 11:

משאבי אורניום בעולם, אשר יהוו את מקור האנרגיה הגרעינית שתופק מביקוע גרעיני, נתונים ביחידות של טונות של U308. החלק המקוקו של כל פס מייצג את המשאבים הידועים בוודאות, החלק המושחר מייצג הערכה של משאבים נוספים.

בתגובה זו, האנרגיה המשתחררת עבור כל אטום דאוטריום שנצרך הינה 7.94×10^{-13} ג'ול. 1 מ"ק של מים מכיל כ- 10^{25} אטומי דאוטריום שמסתם 34.4 גרם, ואנרגיית מיזוג פוטנציאלית של 7.94×10^{12} ג'ול. כמות זו שוות ערך לחום שריפה של 300 טון פחם או 1500 חביות נפט גלמי. היות ש-1 ק"מ מעוקב מכיל 10^9 מ"ק, הרי האנרגיה שנוכל לקבל מ-1 ק"מ מעוקב תהיה אקווילנטית ל- 300×10^9 טון פחם או 1500×10^9 חביות נפט גלמי. הנפח הכולל של האוקינוסים הוא בערך 1.5×10^9 km³. אם נקטין, על ידי ניצולו, את ריכוז הדאוטריום באוקינוסים באחוז אחד, כמות האנרגיה שתשתחרר תהיה גדולה פי 500000 מסך כל מאגרי האנרגיה הפוסילית בעולם כולו. מאגרים בלתי מוגבלים של אנרגיה אינם גוררים בהכרח קיום מספר בלתי מוגבל של תחנות הספק. כדור הארץ אינו יכול להמשיך ולאפשר גידול מעריכי של אוכלוסיות ביולוגיות, מכונות ותחנות כוח יותר מאשר עוד כמה עשרות הכפלות.

אם נתיחס לכמות המימן באוקינוסים, ניתן לראות את הדאוטריום כמצוי בלא הגבלה, והפקתו קלה ביותר. הליתיום נפוץ פחות. הוא מיוצר מסלעים וולקניים נדירים - פגמטיטים וממלחים המצויים באגמים מלוחים. הכמות הנמדדת והחזויה של מאגרי הליתיום בארה"ב, קנדה ואפריקה מגיעה לכדי 9.1×10^6 טון של היסוד ליתיום שממנו 7.42% הם ליתיום 6, כלומר כ-675000 טון. מכמות ליתיום זו ניתן להפיק אנרגיה בשיעור של 3.19×10^{-12} ג'ול/אטום - כלומר אנרגיית המיזוג הכוללת שנקבל תהיה 215×10^{21} ג'ול, כמות השווה בערך לתכולת האנרגיה בדלקים הפוסיליים בעולם כולו. כל עוד ההספק המופק ממיזוג תלוי בתגובה דאוטריום-טריטיום, תגובה אשר כיום נראית הקלה ביותר משום התרחשותה בטמפרטורות נמוכות יחסית, האנרגיה שאנו עשויים להפיק תהיה באותו סדר גודל של האנרגיה מדלקים פוסיליים. אם המיזוג יוכל לצאת אל הפועל מתגובת דאוטריום-דאוטריום מקצה לקצה.



תרשים 12:

משאבי ליתיום בעולם אשר יהוו גורם מגביל בניצול תגובות המיזוג דוטריום-טריטיום. הם נתונים באמצעות ליתיום 6 משום שהוא האיזוטופ הנדיר ביותר. אולם אפילו עם הגבלה זאת, האנרגיה שניתן להפיק ממיזוג באמצעות התגובה דוטריום-טריטיום תשווה כמעט לתכולת האנרגיה הכוללת של משאבי הדלקים הפוסיליים בעולם.

בשל כך ייעצר בקרוב קצב הגידול המעריכי של התעשייה והאוכלוסיה כפי שזה היה ב־150 השנים האחרונות. למרות תקופת היציבות המתקרבת שאין צופים בה קשיים פיסיקליים וביולוגיים שאי אפשר להתגבר עליהם, נהיה נאלצים

לשנות באופן יסודי את אורח המחשבה החברתית והכלכלית שלנו, שהיתה מבוססת על ההנחה שקצבי הגידול שאיפיינו עידן ארעי זה יכולים להימשך, בדרך זו או אחרת, לתמיד.

על המחבר:

מ. קינג הברט נולד בטקסס בשנת 1903. הוא למד באוניברסיטת שיקגו, שם קיבל תואר ראשון, שני ושלישי. אחר כך עבד זמן רב בחברת הנפט "של", ובו זמנית שימוש כפרופסור אורח באוניברסיטת סטנפורד. הוא פרש מחברת "של" ב-1963, אבל המשיך לעבוד במחקר גיאופיסי כחבר צוות הסקר הגיאולוגי של ארצות הברית. כבר ב-1956 הדגים את תעשיית הנפט האמריקאית ואת עמיתיו הגיאופיסיקאים על ידי נבואתו שתפוקת הנפט בארצות הברית תגיע לשיאה בשנות השבעים, ולאחר מכן תלך ותרד. נבואתו זו היתה למעשה מסקנה מניתוח חדשני מעמיק של המימצאים הקיימים. ד"ר הברט החזיק בדעתו למרות שהושמץ רבות והוכרז כנביא שקר על ידי רבים מעמיתיו. אולם לבסוף נאלצו הכל להכיר בצדקתו וב-1977 הוענק לו פרס רוקפלר לשרות הציבור. הוא הלך לעולמו ב-11 באוקטובר 1989. לעיון נוסף: <http://www.hubbartpeak.com/hubbart>.