



משבר הסביבה והאקלים

הזווית המדעית

תקציר

משבר האקלים, הנמצא כיום בראש הכותרות בישראל ובעולם, הוא חלק ממשבר עמוק ורחב יותר. טיפול במשבר האקלים מחייב התמודדות במקביל עם משברים נוספים כגון הידלדלות משאבי טבע, הכחדת מינים, הרס קרקעות ובתי גידול, זיהום הסביבה, זיהום והידלדלות מקורות מים וזיהום האוויר והאוקיינוסים. הפתרונות למשבר הסביבה והאקלים אינם מבוססים אך ורק על טכנולוגיה (אם כי לטכנולוגיה יש תפקיד חשוב), והם תלויים בראש ובראשונה בשינוי מספר פרדיגמות חברתיות, כלכליות ומוסריות. ללא שינויים אלה, משבר הסביבה והאקלים עלול להחריף ולהוביל לסדרה בלתי פוסקת של משברים חברתיים, כלכליים ופוליטיים.

יגאל אראל – המכון
האוניברסיטה העברית



למדעי כדור הארץ,

Yigal.erel@huji.ac.il

- מבוא - עקרונות, היסטוריה והגורמים למשבר הסביבה 1.
- פעילויות בני האדם הפוגעות בסביבה הטבעית
- חקלאות וסביבה 2.
- משק האנרגיה 3.
- תעשייה וחומרי גלם 4.
- סביבות ותהליכים גלובליים המושפעים מפעילות בני האדם
- מחזורים ביו-גאוכימיים 5.
- התחממות גלובלית ושיבוש האקלים 6.
- פגיעה בביוספרה, שטחים פתוחים וקרקעות 7.
- פגיעה במקורות ובאיכות מים מתוקים 8.
- פגיעה בסביבה הימית 9.
- פגיעה באטמוספרה וזיהום אוויר 10.
- הסביבה העירונית 11.
- סיכום גלובלי וישראלי
- סיכום - הבעיות הניצבות לפתחנו ודרכי התמודדות 12.
- סיכום מצב הסביבה בישראל 13.
- נספחים 14.

תודות

הספר הזה לא היה נכתב ללא סיוע מצד אנשים רבים. ראשית, אני מבקש להודות לקלייר פטרסון וג'ים ואלן מטיוס מהאוניברסיטה העברית, שהדריכו אותי בצעדי הראשונים בחקר הסביבה. CALTECH-מורגן מ אני מודה מקרב לב לעמיתי המדענים שקראו בעיון ובתבונה פרקים מהספר ותרמו רבות לחידוד מסריו. תודתי נתונה לשמשון בלקין, קרין הספל, אלון אנגרט, יהודה אנזל, אבי פרבולוצקי, אלון עמרני, יצחק הדר, ינון רודיק, ערן פייטלסון, וולרי ברכיה, בני חפץ, עינת אהרונוב, יוסי יחיאלי, אהוד גרינשפן, רון שרצר ז"ל, עדי טורפשטיין, אורית סיוון, יוני גולדשמידט, דרור הבלנה, חיים גבירצמן, בעז לוז, יונתן ארז, מוטי שטיין, יעל דובובסקי, גיא דגן, אריאל היימן, עודד נבון, טלי חתוקה, רענן רז, ואבנר דה-שליט.

אני מודה מקרב לב לאיילה ארליך, עידן בן מוחה, ועפר קליפלד על העריכה המדעית והלשונית המוקפדת. תודה גם לחברי אמיר אזרחי, ירום אריאב, אמיתי קורן ודובי טל על קריאת טקסט שאינו בתחום התמחותם וסיוע בהתאמתו לקהל הרחב. תודה מיוחדת לניצן בר על העיצוב הגרפי של האיוורים. לבסוף, תודה עמוקה לבני משפחתי, תמר, אלון, מתן, יובל, דור, שקד ואסנת שתמכו בי לאורך התקופה המשמעותית והמאתגרת של כתיבת הספר שחלקה חפץ את אחת השנים הקשות ביותר בתולדות מדינת ישראל. ספר זה לא היה נכתב ללא תמיכתם ואהבתם.

2024 ירושלים, אוקטובר



משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 1 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
המכון למדעי כדור הארץ

"A thing is right when it tends to preserve the integrity,
stability, and beauty of the biotic community.
It is wrong when it tends otherwise."

Aldo Leopold, A Sand County Almanac, 1949.

מבוא: עקרונות, היסטוריה והגורמים למשבר הסביבה 1.

חדשות לבקרים אנחנו קוראים, צופים או מאזינים לנבואות אפוקליפטיות על מצב כדור הארץ, על הרס הסביבה

. המושג "משבר האקלים" אינו יורד מהכותרות כבר

שנים. עוצמת התגובות משתנה, אולם קיימת מגמה של החרפת טון הדיבור, בעיקר ככל שמתגברת התחושה

ובתקשורת ² בציבור. רוב תשומת הלב החברתית והתקשורתית

(שהזמן הנדרש לתיקון אוזל (ויש הטוענים שכבר אזל

מתמקדת במשבר האקלים ³ אולם להבנתי, משבר האקלים הוא חלק ממשבר רחב יותר של זיהום הסביבה ופגיעה,

(נרחבת במכלול היצורים החיים על פני כדור הארץ (הביוטה ⁴ יתרה מזאת, התמודדות עם משבר האקלים מחייבת.

התמודדות במקביל עם סוגיות נוספות שחלקן קשורות למשבר האקלים וחלקן אינן קשורות למשבר (למשל, עליית

מפלס הים עקב המסת קרחונים ⁵. הפתרונות למשבר הסביבה והאקלים

(לעומת זיהום גופי מים עם חלקיקי פלסטיק

אינם מבוססים אך ורק על טכנולוגיה (אם כי לטכנולוגיה יש תפקיד חשוב), והם תלויים בראש ובראשונה בשינוי

. ללא שינויים אלה, משבר הסביבה והאקלים

מספר פרדיגמות ⁶ עלול להחריף ולהוביל

חברתיות, כלכליות ומוסריות

. לסדרה בלתי פוסקת של משברים חברתיים, כלכליים ופוליטיים

אבני דרך בהתפתחות המודעות הציבורית לבעיות הסביבה 1.1.

נראה שראוי להתחיל עם התובנות שמהדהדות כבר זמן רב בקהילה המדעית של חוקרי הסביבה. החל מפרסום ספרו

בשנת 1798 מתקיים ויכוח בין שתי גישות של חוקרי סביבה. בצד אחד נמצאים (Malthus) של תומאס מלתוס

ה"מלתוזיאנים" (ומאוחר יותר הנאו-מלתוזיאנים ⁷ הטוענים שאם האנושות תמשיך בנתיב ה צמיחה הכלכלית

הו מספרית במתכונת הנוכחית היא עלולה לרושש את העולם ממשאביו (או לזהם אותו בצורה קיצונית), ואז צפויה

¹ <https://www.theguardian.com/environment/2022/nov/07/why-scientists-are-using-the-word-scary-over-the-climate-crisis>
<https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global>

² https://www.nytimes.com/interactive/2023/climate/earth-hottest-years.html?campaign_id=7&emc=edit_mbae_20230111&instance_id=82367&nl=morning-briefing%3A-asia-pacific

³ <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>; (2) <https://www.haaretz.co.il/nature/2023-05-19/ty-article-magazine/.premium/00000185-2e50-d6e4-ab9d-eef1d0b90000?print=true>

⁴ (1) United Nations Environment Programme (2021) Making Peace with Nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>; (2) <https://www.haaretz.co.il/nature/2023-05-19/ty-article-magazine/.premium/00000185-2e50-d6e4-ab9d-eef1d0b90000?print=true>

⁵ (1) United Nations Environment Programme (2021) Making Peace with Nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>; (2) Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Barnard, P., Moomaw, W. R. (2020) World Scientists' Warning of a Climate Emergency, *BioScience* **70**, 8-12. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>; (3)

⁶ United Nations Environment Programme (2021) Making Peace with Nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>

⁷ (1) Malthus T. (1798) Essay on the Principle of Population; (2) Osborn F. (1948) Our Plundered Planet. Little, Brown and Company; (3) Vogt W. (1948) Road to Survival. ISBN 0548385165; (4) Paddock W. and Paddock P. (1967) Famine 1975! America's Decision: Who Will Survive? Little, Brown and Co.; (5) Ehrlich P. R. (1968) The Population Bomb, The Sierra Club-Ballantine; (6) Hardin G. (1968) The Tragedy of the commons, *Science* **162**, 1243-1248; (7) Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., and Behrens III W. W. (1972) The Limits to Growth; a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. New York: Universe Books; (8) Catton W. (1980) Overshoot: The Ecological Basis of Revolutionary Change. Urbana: University of Illinois Press; (9) Brundtland G. H. (1987) Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development, UN; (10) Ripple W. J., Wolf C., Newsome T. M., Barnard P., Moomaw W. R. (2019) World Scientists' Warning of a Climate Emergency, *BioScience*, <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>; (11) Tortell P. (2020) Earth 2020 - An Insider's Guide to a Rapidly Changing Planet. OpenBook Publishers;

תקופה של אסונות ומחסור ויתכן אף קץ האנושות. בצד השני ניצבים אנשי ⁸ הטוענים (Cornucopians "קרן השפע") שהיצרניות והידע האנושי ימצאו פתרון לכל מחסור של משאבים וימירו משאב שהתכלה במשאב אחר. ויכוח זה

נמצא במוקד ספרו של צ'ארלס מאן משנת ⁹

2018 .

בסוף שנות הארבעים ותחילת שנות החמישים של המאה העשרים, התרחשו מספר אירועים של זיהום אוויר קיצוני במרכזי ערים שהובילו לתחלואה ולתמותה מוגברת. המפורסם ביותר הוא זיהום האוויר הקשה בלונדון בדצמבר . 1952 ¹⁰ אירועים אלה עוררו בהדרגה תשומת לב ציבורית למפגעים סביבתיים, בעיקר במערב אירופה ובארצות הברית. אולם, חלפו שנים בטרם התעוררה תנועה המונית של אזרחים ומדענים מודאגים. באפריל 1970 התקיים . ביותר מ-2,000 קהילות ברחבי ארצות הברית יצאו מיליוני

(The Day Earth first (אירוע סביבתי מכונן ¹¹ אמריקאים

לרחובות הערים והעיירות והפגינו בדרכים שונות את חששם מפגיעה בלתי הפיכה בטבע ובסביבה. יא רוע זה היה שיאו של תהליך היצירה של התנועה הירוקה בארצות הברית. אנשים יצאו לרחובות בגלל סדרה של מאמרים וספרים שהתפרסמו החל ¹² , ובעיקר בעקבות ספרים ומחקרים שפורסמו במהלך שנות השישים. כל הפרסומים הללו -1948מ

הצביעו על מגוון בעיות סביבתיות חמורות. חשוב לציין שבבר במהלך המאה התשע-עשרה קמו בארצות הברית ובאירופה מספר ארגונים ששמו להם למטרה לקבוע שטחים בהם ישמר הטבע הפראי לוחיו איסור על פיתוח והתערבות של בני אדם. מבחינה מסוימת היזו יתה תחילתה של התנועה הסביבתית. הנושא ידון בפרק 7 אשר מתמקד בפגיעה בביוספרה ובשטחים פתוחים

"Spring Silent" (את ספרה) Carson בשנת 1962 פרסמה רחל קרסון ¹³ , בספרה, ממה שיק להשפיע גם היום . תיארה קרסון את הנזק רחב ההיקף הנגרם לבעלי חיים (העלמות של ציפורי שיר – דומאביב ם) ולבני אדם עקב השימוש הבלתי מבוקר במדבירי מזיקים בחקלאות בו השפעתם על ייצור מזון. בשנת 1968 פרסמו אנה ופול ארליך את ספרם מעורר המחלוקת "פצצת האוכלוסין" שהיה למעשה חלק מסדרת ספרים שהתריעו מפני (Ehrlich קצב גידול האוכלוסייה הגבוה (שאכן הגיע לשיאו בשנות השישים – כ-2.1% בשנה, כלומר הכפלת האוכלוסייה שנה) וצפו עשורים ¹⁴ 33 מאמר על הטרגדיה של המשאב (Hardin) בערך כל . באותה שנה פרסם גארט הרדין של רעב המוני

המשותף ¹⁵ קרקע, אוויר, מקורות מים, אוקיינוסים), אולם בגלל החיבור של הרדין עם התנועה האויגנית זכה מאמר זה למבקרים רבים בתנועה הסביבתית ומחוץ לה ¹⁶ בהקשר זה, ראוי לציין שב-1968 השנה בה ארליך והרדין פרסמו . את עבודותיהם, היו כחמישה ילדים לאשה בממוצע עולמי, בעוד שב -2020 היו רק כ- 2.3 ילדים לכל אשה ¹⁷ . בממוצע נושא זה ידון שוב בהמשך. מאמר מדעי נוסף וחשוב ביותר הופיע ב-1969 מאמר זה בהובלת קלייר פטרסון הראה שזיהום הסביבה על ידי בני אדם (המאמר התמקד במתכת הרעילה עופרת) מגיע אפילו לפינות (Patterson

⁸ <https://www.britannica.com/topic/cornucopian> ⁹ Mann C. C., (2018) The wizard and the prophet: two remarkable scientists and their dueling visions to shape tomorrow's world. New York, Knopf Doubleday Publishing Group. ¹⁰ <https://www.britannica.com/event/Great-Smog-of-London> ¹¹ <https://www.earthday.org/history/> ¹² (1) Osborn F. (1948) Our Plundered Planet. Little, Brown and Company; (2) Vogt W. (1948) Road to Survival. ISBN 0548385165; (3) Leopold A. (1949) Sand County Almanac: And Sketches Here and There, Oxford University Press, ISBN 0-19-500777-8. ¹³ Carson R. L. (1962) Silent Spring. Houghton-Mifflin Press. ¹⁴ (1) Paddock W. and Paddock P. (1967) Famine 1975! America's Decision: Who Will Survive? Little, Brown and Co.; (2) Ehrlich P. R.



משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 1 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

הנידחות ביותר בכדור הארץ, ושיהיום הסביבה על ידי בני אדם איננו תופעה עכשווית, אלא שניתן למצוא עקבות

זיהום עופרת גם כ-5,000 שנים לפני¹⁸

. ההווה

ב-1972 פורסם הדו"ח הראשון של מועדון¹⁹ בו דובר על גבולות הצריכה והכלכלה העולמית ; ב-1977 פרסם ,
(Overshoot) את ספרו "כלכלה של מצב עמיד" וב-1980 פרסם וויליאם קטון את ספרו (Daly) רומא הרמן דיילי
מסר דומה עם דגשים²⁰ -שהביא . ספרים אלה, יחד עם הספר של ארליך מ-1968 הגדירו את התפיסה הניאו)
אחרים תלם וזיאנית לגבי חוקי המשחק שבין החברה האנושית וכדור הארץ. המסר העיקרי של חיבורים אלה הוא
שלא ניתן לקיים לאורך זמן כלכלה - מבוססת חומרי גלם הגדלה ללא הפסק ומשמשת אוכלוסייה המתרבה בקצב
מהיר בתוך מסגרת של עולם סופי מבחינת שטח ומשאבים. את הגעתה של התנועה הסביבתית למרכז הבמה
שפרסם בשנת 1992 ספר רב תהודה (Gore) הפוליטית והציבורית ניתן לייחס לסגן נשיא ארצות הברית אל גור
הסביבה²¹ . על מצב

כל אבני הדרך שצוינו מצביעות על הדרך שעשתה התנועה הסביבתית משנות השישים של המאה שעברה ועד היום.
המסע החל בספרה פורץ הדרך של רחל קרסון, דרך גיבוש הגישה הנאו-מלתוזיאנית של מועדון רומא וההכרה בהיקף
ובעוצמת הנזקים הסביבתיים והעלייה של המודעות הציבורית והפוליטית. במקביל, חלה התפתחות גם בחקר
הסביבה, בעיקר בשיטות המחקר הסביבתי בתחומים שיפורטו בהמשך הפרק. פירוט של אבני הדרך ב"היסטוריה
1.1. הסביבתית" מופיע בטבלה

למרות שהתבהר כי אנו ניצבים מול מגוון רחב של בעיות בס יבתיות, תשומת הלב הציבורית של התנועה
הסביבתית התמקדה על פי רוב בנושא אחד בזמן נתון. למשל, בשנות השישים היא התמקדה בחומרי הדברה
ובנזק שהם גורמים, בשנות השבעים והשמונים היא התמקדה בזיהום אוויר ובמשקעים (גשם ושלג) חומציים,
בשנות התשעים היא התמקדה בחור באוזון הסטרטוספרי, וכיום היא ממוקדת בהתחממות גלובלית ובמידה פחותה
בהכחדת מינים. נושאים נוספים כמו פיזור רעלים בסביבה (כגון, עופרת, כספית, ועוד) זכו לתשומת לב מועטה
יותר או קצרת מועד.

¹⁸ Murozumi M., Chow T. J., and Patterson C. C. (1969) Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **33**, 1247-1294.

¹⁹ (1) Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., and Behrens III W. W. (1972) *The Limits to Growth; a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books; (2) <https://www.clubofrome.org/> - The Club of Rome is an organization of individuals who share a common concern for the future of humanity and strive to make a difference. Our members are notable scientists, economists, businessmen and businesswomen, high level civil servants and former heads of state from around the world.

²⁰ (1) Daly, H. E. (1991) [1977] *Steady-State Economics* (2nd ed.). Washington, DC: Island Press. ISBN 978-1559630719; (2) Catton W. (1980) *Overshoot: The Ecological Basis of Revolutionary Change*. Urbana: University of Illinois Press

²¹ Gore A. A. (1993) *Earth in the Balance: Ecology and the Human Spirit*. New York: Plume.



משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 1 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

"טבלה 1.1: אבני דרך ב"היסטוריה הסביבתית

The great smog, London (1952) CO₂ rise, the Mauna Loa record - C. Keeling (1957) Silent Spring, Bio-magnification of pesticides - R. Carson (1962) Pollution is global & ancient, polar ice cores of Pb - C. C. Patterson (1969) Earth Day – G. Nelson & D. Hayes (1970) Limits to Growth - The Club of Rome (1971) The central role of oceans in climate regulation - W. Broecker & DSDP (1970s) The stratospheric O₃ depletion – M. Molina & S. Rowland (1980s) The Gaia hypothesis – J. Lovelock & L. Margulis (1979) Ecological Footprint concept – W. Rees & M. Wackernagel (1992) Earth in the Balance – A. Gore (1992) Global warming – 1896 (S. Arrhenius), 1930's (G. Callendar), 1970's, 1990s (Rio – 1992) - present (Paris – 2015, Sharm El Sheikh 2022)

הגורמים לבעיה הסביבתית 1.2.

המחקר המדעי הסביבתי הוא למעשה המשך של מחקרים אקולוגיים, ביולוגיים, הידרולוגיים, פדולוגיים (חקר הקרקע), אטמוספיריים ואוקינוגרפיים שנערכו ונערכים במאות השנים האחרונות, כאשר המחקר הסביבתי מדגיש את השפעת האדם ומעורבותו בתהליכים המתרחשים בסביבות הנחקרות. במקביל למחקרים דיסציפלינריים נעשה ניסיון לכמת את ההשפעה הכוללת של האנושות על מרכיבים שונים של הסביבה באמצעות מספר מדדים רב-ממדיים. הראשון "

(footprint ecological) שבהם נקרא "טביעת רגל אקולוגית" ²² "מדדים נוספים שהוצעו הם "יכולת הנשיאה

(Boundaries Planetary) ⁽²³⁾ Capacity Carrying("או גבולות פלנטריים" ²⁴, המחקרים והעקרונות שפותחו בהם .

שרובם נעשו במחצית השנייה של המאה העשרים, התמקדו מצד אחד בזיהום אליו נחשפים בני אדם ובהשפעתו על

, ומצד שני

בהשפעה

תה של

הפעילות

האנושית

והזיהום

הנובע מכך

על סביבות

מרוחקות

"טבעיות. לדוגמא, מדד "הגבולות הפלנטריים"²⁶ הוא ניסיון הנמשך כבר מספר שנים לכמת את מידת חומרת השינויים שמחוללים בני אדם על פני כדור הארץ כולו (איור 1.1). איור 1.1 אציג את השפעת האנושות על כדור הארץ בתשעה הרס שכבת (2) (entities novel) תחומים בשנת: 2023 (1) פיזור חומרים מסונתזים שאינם נמצאים בטבע האוזון

²² Ecological Footprint concept – "The ecological footprint is a method that determines how dependent humans are on natural resources. It is a measure that indicates how much resources from the environment are required to support a specific way of life or business. In simpler words, the ecological footprint simply indicates the amount of pressure that humans put on the natural resources available to them in their surroundings." - <https://www.ecoonline.com/glossary/ecological-footprint>; see also: Rees, W. E., & Wackernagel, M. (1992) Ecological footprints and appropriated carrying capacity: measuring the natural capital requirements of the human economy; presented to the second Meeting of the International Society for Ecological Economics "Investing in Natural Capital", Stockholm, Sweden, 3-6 August 1992. University of British Columbia.

²³ "Carrying capacity is the maximum population that a given area can sustain. The measures commonly used include the number of individuals or the total biomass of a population, which are each highly dependent on differences in physiology and age structure among species and across large taxonomic groups." - <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123847195000204>; see also: Chapman, Eric J.; Byron, Carrie J. (2018) The flexible application of carrying capacity in ecology. *Global Ecology and Conservation* **13**: e00365. doi:10.1016/j.gecco.2017.e00365

²⁴ "The planetary boundaries concept presents a set of nine planetary boundaries within which humanity can continue to develop and thrive for generations to come" - <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>; see also: Rockström J., et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* **461**: 472-475; & [Planetary boundaries - Stockholm Resilience Centre](#)

²⁵ Dockery D.W., Pope C.A., III; Xu X., Spengler J.D., Ware J.H., Fay M.E., Ferris B.G., Speizer F.A. (1993) An Association between air pollution and mortality in Six U.S. Cities; *N. Engl. J. Med.* **329**, 1753-1759.

²⁶ Steffen, W. et al. (2015) Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science* **347**, 1259855.

4



משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 1 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

²⁷ atmospheric (זיהום האטמוספירה עם חלקיקים מרחפים) (3 depletion ozone stratospheric) שטפים ביוגאוכימיים של (5 acidification ocean) החמצת האוקיאנוסים (4 loading aerosol) בסטרטוספירה (6) שפירים מים צריכת (freshwater use), (7) (קרקע שימושי שינוי land-system זרחן) N חנקן יציבות המערכת הביולוגית, על סמך קצב יה כחדות ומדדים שעדיין (8) (biogeochemical flows) (P) change, (of number – MSY/E) לא הוגדרו

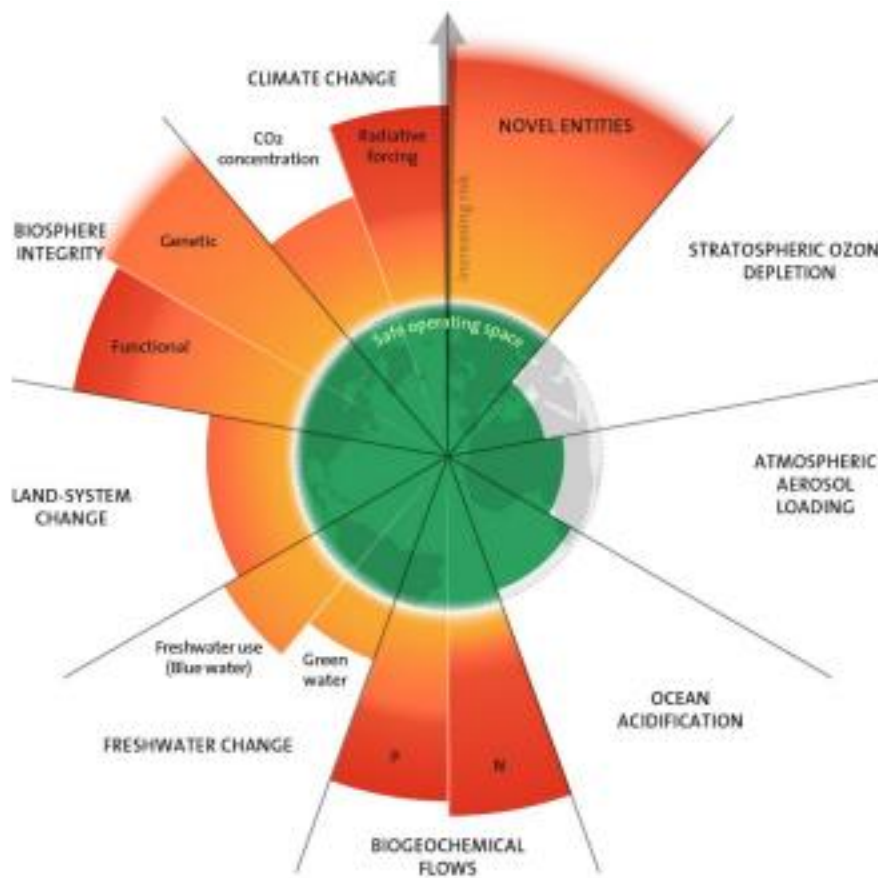
extinctions per million species per year, (9) (אקלים שינוי) climate change. הללו מהמדדים אחד בכל נעשתה הערכה האם הוא מצוי עדין בתחום הבטוח בממוצע עולמי (האזור הפנימי, הירוק של האיור, או שאין לגביו מספיק מידע – אפור), או שהוא חרג לאזור המסוכן ובאיזו מידה (ככול שהפרוסה פולשת יותר לאזור הכתום, חומרת החריגה גדולה יותר). להערכת המחברים, ב-2023 רק שלושה מתוך תשעת המדדים עדיין נמצאים באזור הבטוח: הרס שכבת האוזון בסטרטוספירה, החמצת האוקיאנוסים וצריכת מים שפירים. אין די נתונים לגבי זיהום האטמוספירה עם חלקיקים מרחפים ומדדים לא מוגדרים לגבי יציבות המערכת הביולוגית. במדדים הבאים יש חריגה לאזור המסוכן: פיזור חומרים מסונתזים שאינם נמצאים בטבע, שטפים ביוגאוכימיים של חנקן וזרחן, שינוי שימושי קרקע, קצב יה כחדות ושינוי אקלים. המחברים טוענים שהחריגות החמורות ביותר נעשו בפיזור חומרים מסונתזים שאינם נמצאים בטבע, שטפים ביוגאוכימיים של חנקן וזרחן וקצב יה כחדות. איור 1.1 אציג את המצב ב-2009-2015 וב- . אנחנו ומראה כיצד מצב הסביבה הולך ומחמיר 2023²⁸. נדרש לכל הנושאים הללו בפרקים השונים של הספר

דיון סדור והגיוני בגורמים לבעיה הסביבתית צריך להתחיל בגורמים הבסיסיים ביותר. הנחת העבודה שלי (ושל רבים לפני – הפניות בהמשך) היא ש גידול האוכלוסייה והעלייה ברמת החיים של אינדיבידואלים וחברות, הגורמים לעלייה בצריכת מוצרים הם המקור לבעיות הסביבתיות. הגידול במספר האנשים על פני כדור הארץ צבר תאוצה במאה השנים האחרונות, ובדומה לשינויים סביבתיים אחרים, כאשר עוברים מגידול לינארי לגידול מעריכי יש סיבה לדאגה. עברו מעל 100 אלף שנים עד ש אוכלוסיית האנושות הגיעה למיליארד נפש (בראשית המאה התשע עשרה). עברו כ- 128 שנים עד שאוכלוסיית בני האדם הגיעה לשני מיליארד (1928), שלוש שנים ושתיים שנה עברו כדי להגיע לשלושה מיליארד (1960), ומאז ועד היום נוספו מיליארד אנשים מידי עשור עד שני עשורים, כאשר רף שמונה מיליארד 2022 נחצה בסוף²⁹. אנשים

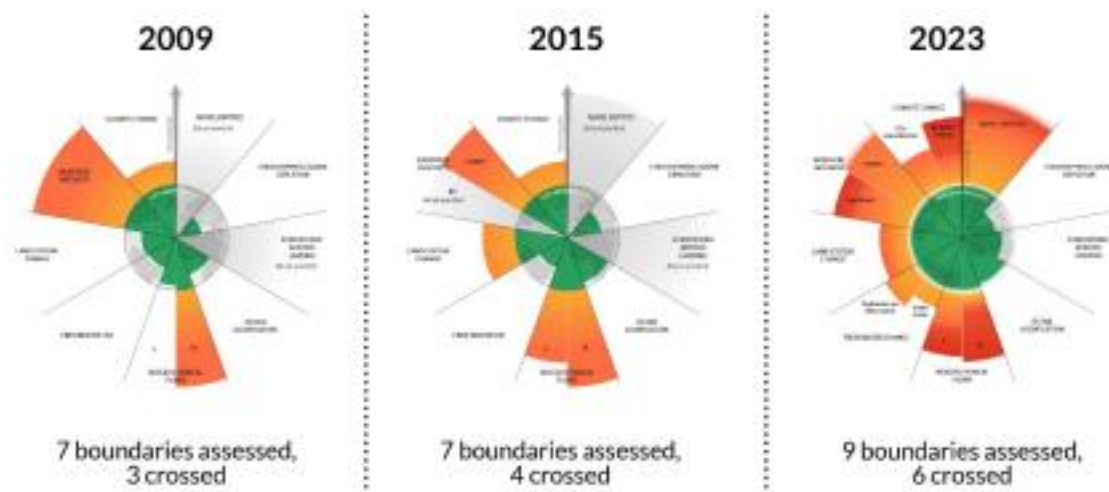
²⁷ Stratosphere: The atmosphere is made of layers based on changes in temperature with height. The lower layer is the troposphere. The stratosphere lies above the troposphere. There is no turbulence in the stratosphere to mix up the air, so cold, heavy air is at the bottom and warm, light air is at the top. The stratosphere begins at 9-17 km above the ground in polar and equatorial regions, respectively. It is 35 .thick km
²⁸ בספטמבר 2024 התפרסם דו"ח נוסף של אותם מחברים המצביע על כך שהגבול השביעי (החמצת האוקיאנוסים) עומד לִהְיוֹת צוּת, אם כי יש שיפור קל בחלק מהגבולות האחרים.

<https://d1gwxxouzo4hr10.cloudfront.net/planetaryhealthcheck2024-report.pdf>²⁹ <https://ourworldindata.org/world-population-growth>





(ב)



³⁰ Azote for Stockholm Resilience Centre, based on analysis in Richardson et al (2023). Attribution: CC BY-NC-ND 3.0 - [Planetary boundaries](https://www.stockholmresilience.org/en/our-work/publications/planetary-boundaries) - Stockholm Resilience Centre



באופן
משמעותי
תמותת
ילדים לפני
גיל הפרייון,
כאשר
הממוצע³¹
לגיל הפרייון

4% - העולמי של תמותה לפני גיל הפרייון עומד כיום על כ-³² בתנאים בהם תמותת ילדים היא נמוכה יחסית, "פרייון".
("האישה"³³ מספר הילדים שאשה יולדת במהלך חייה) הוא מדד ריבוי הממצה בצורה - Rate Fertility Total – TFR
נכונה ובהירה את גידול האוכלוסייה כיום בארצות שונות ואת המגמה הצפויה בגידול האוכלוסייה (עם פער של כ-
30 שנה – ראו את המקרה של סין בהמשך). כפי שצוין קודם, עד שנות השישים של המאה הקודמת הממוצע
היה מעל חמישה ילדים לאשה (עם קרוב ל- 40% תמותת ילדים) ומאז הוא נמצא בדעיכה TFR העולמי של ערכי
פרייון האישה" בירד "³⁴ מתמדת. ועתיד להגיע ל-2.1 לפני 2065; (2.1 ולא 2 בגלל שעדיין יש תמותת ילדים לפני
2.3-2022 ל

גיל הפרייון), כאשר לפני 2100 נתקרב להפסקת הגידול באוכלוסיית העולם

לגבי תזמון השינויים ומספר האנשים המירבי שאליו תגיע האנושות קיימת מחלוקת בין החוקרים. (איור 1.2). באיור
1.2 רואים את טווח ההערכות של האו"ם עד שנת 2100 עם רמת וודאות של עד 95% הערכות נעות בין 9- ועד מעל
12 מיליארד אנשים. בעשור האחרון התפרסמו הערכות של שני אחריגים גופים לגבי גידול האוכלוסייה העולמית, והן .
צופות גידול מתון³⁵ משנת 2014 היא שאוכלוסיית (Vienna in Analysis Systems Applied) IASA הערכה של
IHME) Health for העולם תגיע ל- 9.7 מיליארד אנשים ב-2070 ותדל ל- 9 מיליארד ב-2100. הערכה של
Metrics & Evaluation at the University of Washington's School of Medicine (היא 2020 משנת
Institute 2100-שאוכלוסיית העולם תגיע לשיא גודלה (9.7 מיליארד) בשנת 2064 ואז תדל ל- 8.8 מיליארד ב

פרייון האישה) עדיין (TFR- כיוון שהמספר המוחלט של אנשים בכדור הארץ גדל עם הזמן, גם ירידה משמעותית ב
מלווה בתוספת של עשרות מיליוני אנשים מידי שנה. השיא היה ב-1990- עם תוספת של 92.5 מיליון אנשים (מספר
הנולדים מינוס מספר המתים). גם במספר המוחלט חלה ירידה מסוימת בשנים האחרונות וב-2021 נוספו כ- 68
אנשים³⁶ ובכל הפרמטרים הדמוגרפיים הנגזרים מהם TFR-מיליון . ישנה שונות גדולה מאד בתמותת ילדים, בערכי ה
נמוכים מ- 2 (ריבוי TFR- בארצות שונות, כאשר במדינות העשירות והמתועשות (מערב אירופה ויפן במיוחד) ערכי ה
פרייון האישה) (TFR שלילי) כבר מספר שנים. בחלק מהארצות, למרות הפער של כ- 30 שנים בין הירידה בערכי
במספר האנשים, כבר מסתמן צמצום בגודל האוכלוסייה³⁷ . וירידה

³¹ Fertility age is defined as 15 years by WHO (World Health Organization) - [https://www.who.int/data/maternal-newborn-child-adolescent-ageing/indicator-explorer-new/mca/women-of-reproductive-age-\(15-49-years\)-population-\(thousands\)#:~:text=Women%20of%20reproductive%20age%20\(15,49%20years\)%20population%20\(thousands\)](https://www.who.int/data/maternal-newborn-child-adolescent-ageing/indicator-explorer-new/mca/women-of-reproductive-age-(15-49-years)-population-(thousands)#:~:text=Women%20of%20reproductive%20age%20(15,49%20years)%20population%20(thousands)20)

³² <https://ourworldindata.org/child-mortality-in-the>

³³ TFR – <https://www.ourworldindata.org/child-mortality-in-the>

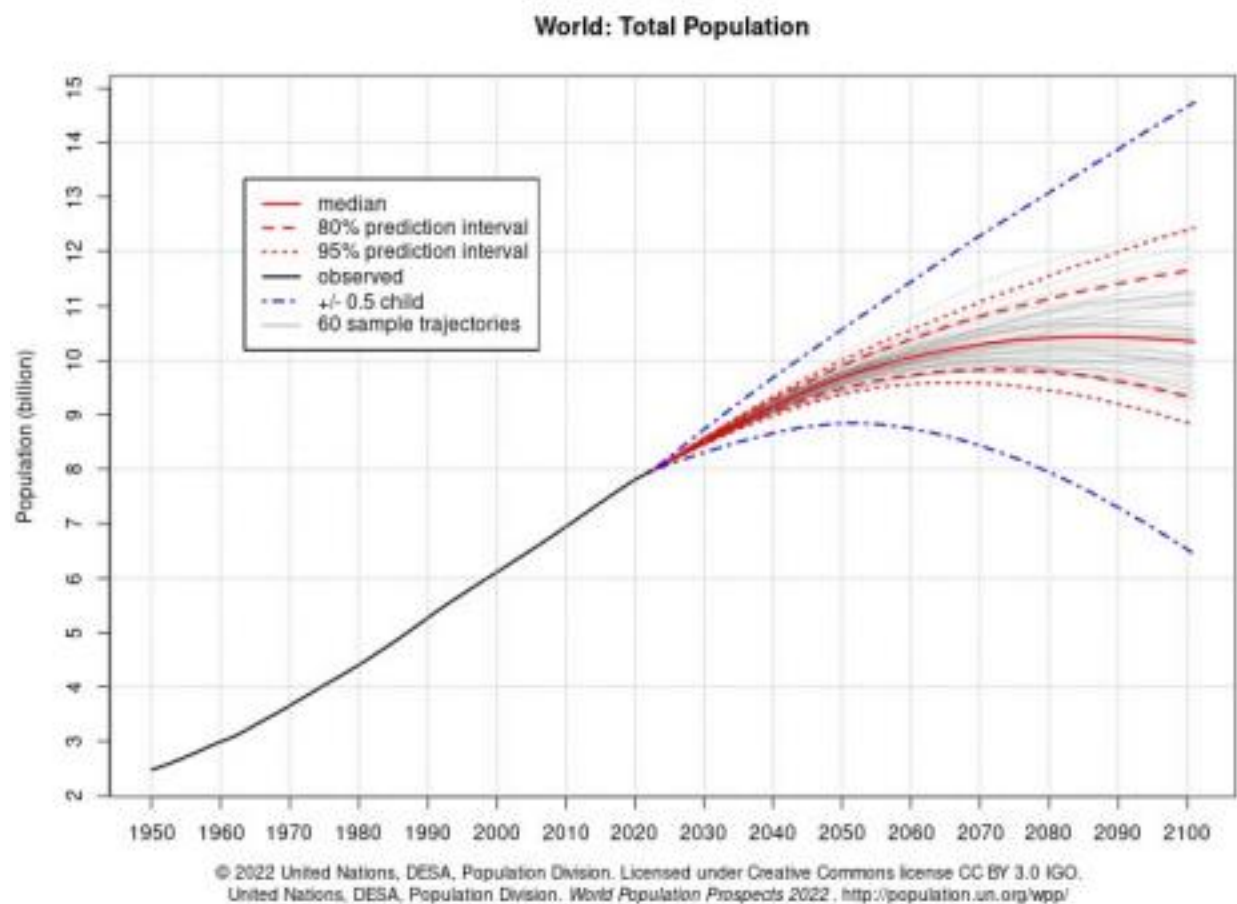
³⁴ (האישה פרייון) Total Fertility Rate = number of children a woman has during her fertile years



משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 1 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

- איור: 1.2 תחזיות שונות לגבי גודל האוכלוסייה העולמית עד שנת 2100. מקור

<https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/900>; Reprinted with permission



התהליכים שאירעו בסין בעשורים האחרונים מדגימים מספר נקודות חשובות בהקשר הדמוגרפי-כלכלי-סביבתי. החל

בסין נמוך מ-2, TFR-משנת 1991 ה³⁸. למרות זאת אוכלוסיית סין המשיכה

1.2 וב-2021- הגיע לערך נמוך במיוחד של

לגדול (אם כי בקצב הולך ופוחת) עד שנת ³⁹ במקביל, חלה בסין עלייה משמעותית ברמת החיים, המתבטאת . 2220

לנפש מ\$3,200 ב-1992 ל-\$13,100 ב-2018 (בתיקון אינפלציה). כלומר, עלייה של פי ארבע . GDP-בעלייה ב

⁴⁰ GHA כתוצאה משינוי זה עלתה בצורה משמעותית טביעת הרגל האקולוגית של סין, מערך של 1.5 מיליארד

hectares)⁴¹ -ב⁴² (מיליון קמ"ר) ב 53 (GHA ל-5.3 מיליארד 1991⁴³ בערך. 2017 סין, היא כיום המדינה עם

global = AGH

- ³⁸ <https://ourworldindata.org/fertility-rate> ³⁹ (1) <https://ourworldindata.org/world-population-growth>; (2) https://www.nytimes.com/2023/01/16/business/china-birth-rate.html?campaign_id=60&emc=edit_na_20230116&instance_id=0&nl=breaking-news&ref=cta®i_id=185025816&segment_id=122700&user_id=120f7b8cbcbdc0cbf2de99d57de9e990 ⁴⁰ Bolt J. and van Zanden J. L. (2020) Maddison style estimates of the evolution of the world economy. A new 2020 update. Maddison Project Working Paper WP-15; <https://ourworldindata.org/economic-growth> ⁴¹ GHA = global hectares, which measures the area needed to support the needs of a specific country or the entire world's population. ⁴² <https://www.zuiwangluo.org/ecological-footprint-results/> ⁴³ <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/ecological-footprint-by-country> ⁴⁴ <https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/#:~:text=There%20were%20~%2012.2%20billion%20hectares,1.6%20global%20hectares%20per%20person>.



משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 1 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

כאשר חלק ניכר מהמשאבים מופנים לצרכי ייצוא לשאר העולם. כלומר, האטה בריבוי הטבעי לבדה איננה

מספיקה על מנת להפחית את הנזק הסביבתי, וכשהיא מלווה בעלייה דרמטית ברמת החיים, סך כל הנזק

הסביבתי גדל.

לאור כל הנאמר למעלה, הערכה של הנזק הסביבתי של האנושות חייבת לקחת בחשבון הן את הריבוי הטבעי והן את

רמת החיים. מדד מעניין שמאחד את שני המשתנים הללו הוא ⁴⁵ מונח שטבע טום בורק, ⁴⁶ לפני מספר

מיליון אנשים המרוויחים בממוצע 15 אלף דולר **350** ה"אמריקום" שנים. בתרגום חופשי, "אמריקום" הוא קבוצה של במאה העשרים היו בכדור הארץ שתי יחידות "אמריקום", כל אחד (כולל ילדים וזקנים), עם תאווה גדולה לצרכנות אחת בצפון אמריקה והשני הי באירופה, ובנוסף שברי נמצאו "אמריקום" בחלקים נוספים של כדור הארץ. כיום יש למעלה מ"אמריקום" נוסף בסין, עוד אחד בהודו ובשתיהן יש עוד שתי יחידות "אמריקום" בהתהוות, וחלקים שונים של העולם מתגבשות עוד כשתי יחידות "אמריקום". כלומר, עברנו מעולם שבו יש שתי יחידות "אמריקום" לעולם שבו יהיו שמונה עד תשע יחידות "אמריקום" בעוד שנים ספורות. ברור למעלה מכל ספק שלמעבר הזה יש השלכות סביבתיות, אקלימיות וגיאופוליטיות מרחיקות לכת, כולל הגירה של אנשים מארצות עניות יחסית לארצות עם רמת שווה (I). הטוענת שהשפעת האנושות על הטבע, $I = P * A * T$, חיים גבוהה. מושג ה"אמריקום" מתכתב עם משוואת (T) (ורמת הטכנולוגיה) (A) (רמת החיים), (P) למכפלה של גודל האוכלוסייה ⁴⁷ הסיבה שלא כללתי את רמת הטכנולוגיה (

בטענה שהצגתי בתחילת פרק זה, היא שלדעתי לטכנולוגיה יש תפקיד מרכזי הן בגרימת נזק סביבתי והן במניעתו, בעוד ששני הגורמים האחרים (גודל האוכלוסייה ורמת החיים) גורמים אך ורק לנזק סביבתי (אם כי במידות שונות (בהתאם למודעות ולחינוך).

במילים אחרות, השילוב של קצב גידול האוכלוסייה והעלייה ברמת חיים עומד בבסיס של כל הנזקים שהאנושות גורמת לסביבה ובכללן ההתחממות הגלובלית. אוכלוסייה גדלה ועלייה ברמת החיים מחייבות גידול מתמיד בייצור אנרגיה, עלייה בתפוקת מזון (חקלאות ודייג), ניצול הולך וגדל של משאבי מים לשתייה ולהשקיה, בינוי למגורים, תעשייה ושירותים (כולל תיירות פנים וחוץ), ייצור מוגבר של מוצרי צריכה (ביגוד, תחבורה, מכשירים אלקטרוניים, ועוד). כל אלה גורמים לנגיסה בשטחים הפתוחים בים וביבשה, כולל בירוא יערות. כתוצאה מכך יש פגיעה באיכות האוויר, המים והקרקע (כולל סחף קרקעות), הגורמים להכחדת מינים ולפלישת מינים אופורטוניסטים, ובמקביל לפגיעה במגוון ובמרקם האקולוגי של הסביבה הימית, החופית והיבשתית (כולל גופי מים יבשתיים). כל התהליכים

הללו מביאים גם לפגיעה כרונית ולעיתים אקוטית בבריאות הציבור. אל מול תופעות אלו חשוב לבחון את 17 יעדי הפיתוח בר הקיימא⁴⁸ של האו"ם במשולב עם מושג ה"אמריקום". אנחנו נעשה זאת לאורך כל הספר, ובעיקר (SDG

בפרק הסיכום. טענתי היא שקיימת היררכיה של בעיות סביבה שבבסיסה נמצא השילוב של קצב גידול גבוה של אוכלוסיית בני האדם ועליה מתמדת ברמת חיים, הגורמות לעליה בצריכת חומרים, אנרגיה, מזון, מים ושטחים . 1.3) פתחים. זהו המקור האולטימטיבי לבעיות הסביבה בהן נדון בספר זה (איור

⁴⁵ Friedman T. (2015) Too many Americans. In Global Environmental Politics: From Person to Planet. Eds. Simon Nicholson, Paul Wapner (2015). ISBN 9781612056494.

<https://books.google.co.il/books?id=MrUYDQAAQBAJ&pg=PT132&lpg=PT132&dq=Americum+BURKE&source=bl&ots=m0EPQu1FUs&sig=ACfU3U1wFly7VnGfbH9bRkvhV6rUTpjKw&hl=en&sa=X&ved=2ahUKewjy16KuvKX5AhXT7rsIHTN8Br8Q6AF6BAGOEAM#v=onepage&q=Americum%20BURKE&f=false>

⁴⁶Tom Burke - [https://en.wikipedia.org/wiki/Tom_Burke_\(environmentalist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tom_Burke_(environmentalist))⁴⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/I_%3D_PAT

⁴⁸ <https://sdgs.un.org/goals>



משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 1 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

לאור זאת, פתרון כולל לבעיות הסביבה מחייב שינוי במספר פרדיגמות חברתיות, כלכליות ומוסריות⁴⁹ שינוי זה .

מבוסס על שלושה תהליכים: 1) (עצירת הגידול במספר בני האדם על הכדור (כ- 2 ילדים בממוצע לכל אישה

לכל היותר), 2) (מעבר מכלכלה תלוית-צמיחה המבוססת על צריכת מוצרים, לכלכלה המבוססת על צריכת

שאיננה צומחת בהיבט של⁵⁰ שירותים ובמקביל מעבר לכלכלה מעגלית (יצור – שימוש – פירוק ומחזור

חומרי הגלם⁵¹ משאבי טבע ואנרגיה ככל שניתן, (3) הגדלת השוויון הכלכלי, כלומר הקטנת הפער בין עשירים

(ווייצור מוצרים חדשים

לעניים. פרוט הדרכים להשגת יעדים אלה נמצא ברובו מחוץ למסגרת של הספר הנוכחי (המתרכז בהיבט המדעי של

חקר הסביבה) ואנחנו נחזור אליו בקצרה בפרק הסיכום. פרסומים שונים עסקו בפירוט גדול יותר בשאלות אלו, החל

בעבודות פורצות הדרך של הרמן דיילי וויליאם קטון (שצוינו קודם), וכלה בפרסומים של טים ג'קסון וג'ייסון⁵²

. היקל .

⁴⁹ (1) United Nations Environment Programme (2021) Making Peace with Nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>; (2) <https://www.haaretz.co.il/magazine/2022-12-21/ty-article-magazine/.highlight/00000185-34b2-d85b-a9ad-76f737940000> ⁵⁰ Hickel, J., Kallis, G., Jackson, T., O'Neill, D. O., Schor, J. B., Steinberger, J. K., Victor, P. A., Ürge-Vorsatz, D. (2022) Degrowth can work — here's how science can help. *Nature* **612**, 400-403. doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-022-04412-x> ⁵¹ What is a circular economy? | Ellen MacArthur Foundation

⁵² (1) Daly, H. E. (1991) [1977] Steady-State Economics (2nd ed.). Washington, DC: Island Press. ISBN 978-1559630719; (2) Daly, H. E. (1996) Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development. Boston: Beacon Press. ISBN 9780807047095; (3) Catton W. (1980) Overshoot: The Ecological Basis of Revolutionary Change. Urbana: University of Illinois Press; (4) Hawken, P., Lovins A.B., Lovins, L.H. (1999) Natural Capitalism: Creating the Next Industrial Revolution. 1st ed. Boston: Little Brown; (5) Jackson, T. (2009) [2017] Prosperity Without Growth: Economics for a Finite Planet (2nd ed.). London and New York: Earthscan/Routledge; (6) Hickel J. (2020) Less is More: How Degrowth Will Save the World, Penguin; (7) Hickel, J., Kallis, G., Jackson, T., O'Neill, D. O., Schor, J. B., Steinberger, J. K., Victor, P. A., Ürge-Vorsatz, D. (2022) Degrowth can work — here's how science can help. *Nature* **612**, 400-403. doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-022-04412-x>

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 1 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

איור: 1.3. היררכיה של בעיות סביבה

העקרונות המרכזיים בחקר הסביבה 1.3.

ישנם מספר עקרונות ומאפיינים העוברים כחוט השני בחקר ובהתמודדות עם בעיות סביבה והם יופיעו בפרקים השונים לכל אורך הספר

האנושות והטבע: האנושות והציביליזציה האנושית הן חלק אינטגרלי מהטבע, משפיעות עליו (ראו) 1

Anthropocene ערך

(ומושפעות ממנו ומהשינויים)

החלים בו. להרמוניה של

כגון, (ecology shallow) טעמים תועלתניים⁵⁴ ומניעת פגיעה באיכות החיים
הנובעים מזכות (ecology deep) הבטחת השירותים של האקוסיסטמה של בני האדם וטעמים עמוקים יותר
הקיום הבסיסית של מרכיבי האקוסיסטמה

השונים (בני אדם, חיות, צמחים, ⁵⁵

. (מיקרואורגניזמים

⁵³ 1 (Epoch-Anthropocene/science/com.britannica.www://https); 2 (z41586-023-02234-d/articles/com.nature.www://https)

המערכת האקולוגית של שטח נתון – כל ("ecosystem) אקוסיסטמה
האורגניזמים באותו שטח וכל גורמי הסביבה בו. מרכיבי האקוסיסטמה
⁵⁴ נתונים במערך

אינטראקציות מורכב, הכולל זרימת אנרגיה ⁵⁵ A. Naess (The and shallow ecology range-long, deep movement ecology summary A. Inquiry, 16, 95-100, 1973).
ומחזור חומרים" – פרבולוצקי א. ופולק ג. (2001) אקולוגיה התיאוריה והמציאות הישראלית. כרטא, ירושלים

11

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 1 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
הא בהא תליא": באופן מובנה (אינהרנטי) אין יכולת להפריד משתנים. בחקר הסביבה הדברים קשורים זה () 2
בזה, בו מקרים רבים הסביבה היא מערכת אחת המגיבה במגוון צורות, אופנים וקצבים לאילוף חיצוני, הן טבעי והן
אנתרופוגני.

גודל המערכת: ככל שהמערכת המתוארת/הנחקרת גדולה יותר, נדרשים יותר מדדים על מנת להעריך את () 3
מבחינה סביבתית וישנה אי-וודאות גדולה יותר לגבי המדדים הללו ולגבי מצבה של ⁵⁶. מצבה
המערכת

(time lag) זמן תגובה () 4⁵⁷, לעיתים קרובות יש פער בזמן בין שינוי בפרמטר ספציפי שינויילבין בסביבה. לדוגמא:
הפער בזמן בין העלייה בריכוז גזי חממה באטמוספירה בעקבות המהפכה התעשייתית במאה התשע עשרה ושינוי
הטמפרטורה על פני השטח של כדור הארץ שהחל לפני כארבעים שנה. במקרה הזה הפער נבע בעיקר מקיבול
הגדול של האוקיאנוסים ⁵⁸. החום

קצב השינוי: קצב השינוי הוא מדד חשוב מאד להערכת חומרת השינוי וקיימת לסוג חשיבות של קצב השינוי () 5
לינארי, מעריכיאו - ⁵⁹. ישר
אקספוננציאלי

אופי השינוי: שינוי יכול לייצר מנגנון של משוב שלילי, המרסן את השינוי (עליית הטמפרטורה של הגוף גורמת () 6
להזעה שמקררת את הגוף), או משוב חיובי, המחריף את השינוי. דוגמא למשוב חיובי אפשרי ממנו חוששים מדענים
רבים הוא שהתחממות כדור הארץ תגרום לאידוי מוגבר של מים, ואדי המים שהם גז חממה יגבירו את קצב
ההתחממות.

העבר הוא המפתח להבנת העתיד: על מנת לקבל הערכה על חומרת השינויים, חשוב להשוותם לעבר. כמעט () 7

כל התהליכים הסביבתיים המתרחשים בכדור הארץ כיום התרחשו כבר בעבר, אם כי לעיתים בקצב שונה או עקב גורמים אחרים. ההשוואה בין ההווה לעבר משפרת את יכולת החיזוי שלנו לגבי העתיד, במידה והיא נעשית נכון ובצורה מושכלת ובמידה והיא כוללת הערכה ריאלית של אי הוודאות של המדידות ושל רגישות המערכת לשינויים. שאנחנו מודדים.

בהערכת השפעת נזק או זיהום סביבתי על מערכת סביבתית יש לבחון את זמן (time residence) (זמן שהות (8) השהות של המזהם/הגורם המפריע בסביבה הנחקרת, כלומר את הזמן הדרוש על מנת שהוא יחזור לרמות שקדמו להפרעה. במילים אחרות ההבחנה בין נזקים או שינויים הפיכים לבלתי הפיכים, היא על פי רוב סובייקטיבית ומושפעת בעיקר מאורך המעשהזמן ניין אותנו. בפרקי זמן גיאולוגיים (מאות אלפי או מיליוני שנה) כל השינויים שגורמת האנושות לכדור הארץ הם כנראה הפיכים לחלוטין (חוץ מהכחדת מינים ויצירה של מינים חדשים בברירה מלאכותית

⁵⁶ Uncertainty of and the need to combine observational and/or experimental data with models: Massonnet, F., Bellprat, O., Guemas, V., & Doblas-Reyes, F. J. (2016). Using climate models to estimate the quality of global observational data sets. *Science* **354**(6311), 452-455. <https://doi.org/doi:10.1126/science.aaf6369>

⁵⁷ Lag time versus response time - lag time is the time lapse between the beginning of an overshoot in the input or output of matter or energy to or from the system, and the moment when there is a noticeable change in the system. Response time also includes the time it takes the system to attain a new state following the overshoot. ⁵⁸ (1) Kosaka, Y., Xie, SP. (2016) The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming. *Nature Geosci.* **9**, 669-673. <https://doi.org/10.1038/ngeo2770>; (2) Kintisch, E. (2014). Is Atlantic holding Earth's missing heat? *Science* **345**(6199), 860-861. <https://doi.org/doi:10.1126/science.345.6199.860>

⁵⁹ [Exponential growth Definition and Examples - Biology Online Dictionary](#)

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 1 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ והנדסה גנטית). הערכה ראשונית של זמן שהות מתקבלת מחישוב היחס שבין גודל המאגר (יחידות של מאסה או נפח) לבין שטף הכניסה (או היציאה) אליו (יחידות של מאסה או נפח ליחידת זמן).

התמודדות עם בעיות סביבה ומציאת פתרונות אפשריים מתבססת תמיד על סולם הערכים של הגופים (9) המעורבים. כמעט בכל המקרים בהם מנסים לפתור בעיה או מטרה סביבית מתברר שיש לכך מחיר כלכלי, לעיתים חברתי, ולעיתים נגרם נזק סביבתי אחר במקום זה שמנסים לפתור. ההחלטה האם לטפל או לא לטפל בבעיה תלויה ברוב המקרים בסולם הערכים ו בהעדפות של הגופים המעורבים (כולל הנכונות לשלם על כך מחיר כלכלי) , ובמקרים רבים ישנם חילוקי דעות. אנחנו נתקל בדוגמאות כאלה לאורך כל הספר. למשל, בפרק 7 על פגיעה בביוספרה ובשטחים פתוחים, נציג מספר דילמות המכתיבות את ההתמודדות עם נושאי שמירת טבע והגנה על מגוון המינים.

ההתחממות הגלובלית, היא הנושא פרק של 6 והיא עוברת כחוט השני בכל פרקי הספר בניסיון להדגים את . העקרונות במדעי הסביבה שפורטו למעלה. למשל, הכל קשור בהכל ("הא בהא ⁶⁰ נראה כיצד קיימת השפעה תליא") הדדית בין ריכוזי גזי חממה לבין התחממות גלובלית ; בין מקורות האנרגיה לבין פליטות גזי חממה התחממות גלובלית ו תהליכים מרכזיים רבים: (1) פעילות פוטו - ⁶¹ לאטמוספירה ; בין () 2 עוצמת וכיווני סינתטית בסקלה עולמית ואזורית

זרמים באוקיינוסים ויצירת אזורים חמים בלב ⁶² חקלאות (4) ; בריאות הציבור (3) ; ⁶³ והפצת מחלות ויראליות ⁶⁴

מפרט את מגוון ההשפעות של התחממות גלובלית על אקוסיסטמות (מבנה אקוסיסטמות, אזורי 1.4 a ועוד. איור 1.4b מחיה, תזמון פעילות) בסביבה היבשתית, בגופי מים מתוקים ובאוקיאנוסים באזורים שונים בכדור הארץ. איור סוקר את השפעת ההתחממות הגלובלית על האנושות (זמינות מים ומזון, בריאות ורווחה, ערים, ישובים ומבני תשתית). נראה שהאנושות, עם כל הטכנולוגיה העומדת לרשותה מהווה חלק אינטגרלי מהטבע ומהסביבה ומשפיעה ומושפעת מהתחממות גלובלית. בשני האזורים יש גם הערכה של מידת הוודאות של הצפי (המשקף את (העקרון השלישי - גודל המערכת

ניתן היה להשתמש בנושאים אחרים המופיעים בספר זה (למשל, מחזורים ביוגאוכימיים) על מנת להדגים את העקרונות הללו, אולם להתחממות גלובלית יש מקום מיוחד בגלל העניין הרב שהיא מעוררת בשנים האחרונות והעובדה שהמאבק בהתחממות גלובלית (משבר האקלים) מצליח להניע גייסות של אנשים ואנשי מדע שעד לאחרונה לא היו מוטרדים מבעיות הסביבה ומהנזק שהאנושות גורמת לטבע ולסביבה

⁶⁰ <https://eos.org/wp-content/uploads/2023/11/Cop28.pdf> ⁶¹ (1) Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. et al. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Clim Change* **6**, 791–795 (2016). <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>; (2) Rumpf, S. B., Gravey, M., Brönnimann, O., Luoto, M., Cianfrani, C., Mariethoz, G., & Guisan, A. (2022). From white to green: Snow cover loss and increased vegetation productivity in the European Alps. *Science* **376**(6597), 1119–1122. <https://doi.org/doi:10.1126/science.abn6697> ⁶² (1) Broecker, W. S. (2005) The Role of the Ocean in Climate Yesterday, Today, and Tomorrow, Eldigio Press; (2) Mogen, S. C., Lovenduski, N. S., Dallmann, A. R., Gregor, L., Sutton, A. J., Bograd, S. J., et al. (2022) Ocean biogeochemical signatures of the North Pacific Blob. *Geophys. Res. Lett.* **49**, e2021GL096938. <https://doi.org/10.1029/2021GL096938> ⁶³ https://nam.edu/nam-president-victor-dzau-discusses-critical-link-between-health-and-climate-at-world-economic-forum/?utm_source=NASEM+News+and+Publications&utm_campaign=d9261c0083-EMAIL_CAMPAIGN_2023_01_30_09_27&utm_medium=email&utm_term=0_d9261c0083-d9261c0083 ⁶⁴ Carlson, C.J., Albery, G.F., Merow, C. et al. (2022) Climate change increases cross-species viral transmission risk. *Nature* **607**, 555–562. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04788-w>

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 1 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
איור 1.4: ההשפעה של התחממות גלובלית על אקוסיסטמות, חקלאות, משאבי מים ובני אדם. מקור
– IPCC (2022)⁶⁵. Reprinted with permission.

⁶⁵ IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.

מבנה הספר 1.4.

הפרק הנכחי הוא פרק מבוא המציג את התשתית הרעיונית של הספר ודן בקצרה בהתפתחות המודעות הציבורית לבעיות הסביבה. בפרק מוצגות הסיבות למשבר הסביבתי-אקולוגי-אקלימי כפי שאני רואה זאת. החלק הבא של הספר (פרקים 2 - 4) דן בפעילויות האנושיות להן ההשפעה הגדולה ביותר על כדור הארץ ועל תנאי הסביבה: חקלאות ויצור מזון (פרק 2), הפקת אנרגיה (פרק 3), ופעילות תעשייתית ושימוש בחומרי גלם (פרק 4). החלק שאחריו (פרקים 5 – 11) דן בתוצאות של פעילות בני האדם על מרכיבים ותהליכים שונים בכדור הארץ. פרק 5 (מחזורים ביוגאוכימיים) דן בהשפעת הפעילות האנושית הזאת על המחזורים הביוגאוכימיים של מספר יסודות כימיים להם השפעה סביבתית ניכרת בפני השטח של כדור הארץ (סלעים – קרקעות – גופי מים יבשתיים – אוקיינוסים – אטמוספירה – עולם החי והצומח). פרק 6 סוקר את ההשפעה של הפעילות האנושית על האקלים, נושא המרתק כיום את רוב הציבור וזוכה לתשומת לב רבה של הקהילה המדעית (התחממות גלובלית). פרק 7 דן בהשפעה של הפעילות האנושית על עולם החי והצומח, קרקעות ושטחים פתוחים. פרק 8 דן בהשפעת בני האדם על גופי מים יבשתיים, פרק 9 בוחן את ההשפעה על האוקיינוסים, פרק 10 על האטמוספירה, ופרק 11 מתאר את השפעת האדם על הסביבה העירונית. פרק 12 מסכם את התובנות העיקריות של הספר ומציג גישות לפתרון המשבר, ופרק 13 מסכם את מצב הסביבה בישראל לאחר שבכל הפרקים הקודמים היתה התייחסות גם למצב בישראל. בסוף הפרק ישנם שני נספחים, האחד מפנה לאמנות הבינלאומיות העיקריות שעסקו בנושאי סביבה והשני מציג דמויות מעוררות השראה. במחקר ובתנועה הסביבתית

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 2 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
אז בבית הספר"
על הקיר תמונה
והאיכר חורש בה
את האדמה
וברקע, הברושים
שמי שרב חיוורים
האיכר יצמיח לנו לחם
שנהיה גדולים." – עלי מוהר

2. חקלאות וסביבה

החקלאות היא פעילות אנושית שמטרתה לספק מזון באיכות ובכמות מספקת לבני האדם. הפרק הנוכחי דן בהשפעות החקלאות על הסביבה ובהשפעות הסביבה על החקלאות. ההשפעות ההדדיות חקלאות – באות סביבה לביטוי במגוון דרכים: צריכת מים, פיזור תכשירי הדברה, שחרור חומרי דשן, ועוד. ישנם שלושה נתונים בסיסיים הממחישים את עוצמת ההשפעה של פעילות חקלאית על הסביבה ועל האקו-ס-יסטמה היבשתית (בחקלאות הימית נדון בפרק 9 העוסק בסביבה הימית): () 1 צריכת מים (כ-70% מצריכת האנושות, ראו פרק 8 על מחזור המים); () 2 גודל השטח המוקדש לפעילות חקלאית; () 3 משך הזמן הארוך שבני אדם עוסקים בפעילות החקלאית.

2.1. היקף הפעילות החקלאית

כשליש מהשטח הכולל של היבשות (כ-50 מיליון קמ"ר מתוך שטח כולל של כ-150 מיליון קמ"ר) מעובד ומשמש. 15 מיליון קמ"ר נוספים משטח היבשות מכוסים בקרח ועוד כ-29 מיליון לצורכי חקלאות¹ קמ"ר הם שטחים שאינם ראויים לחקלאות (מדבריות, משטחי סלע וקרקעות מלוחות). כלומר, החקלאות תופסת קרוב למחצית מהשטח צורך הפורה של היבשות (איור 2.1). ראוי להדגיש שמבין ענפי החקלאות השונים, גידול בעלי חיים ב מרעה² את חלק הארי של השטחים המוגדרים כשטחים חקלאיים (כ-77% - כולל השטח הדרוש לגידול מזון לבעלי חיים מבויתים כגון מספוא וגידולים אחרים), בעוד שגידולים עונתיים ומטעים למאכל בני אדם צורכים ביחד כ-23% (איור 1). ישנה שונות גדולה בין מדינות מבחינת אחוז הקרקע המשמש לחקלאות. נתון זה גורם לכך שקיים פער גדול בין המדינות ביחס של שטח חקלאי או שטח מעובד לאדם. למשל, בסין יש כ-0.9 דונם (900 מ"ר) של אדמה מעובדת לאדם (4.5 דונם כולל שטחי מרעה), בעוד שבאפריקה יש כ-2.5 דונם לאדם (10.3 דונם כולל מרעה) ובברזיל יש כ-4 דונם (13.6 דונם)³ לאדם. עובדה זאת מסבירה, יחד עם גורמים נוספים, (גיאופוליטיים וכלכליים, וכן העלייה בצריכת (כולל מרעה)) מן החימוז בסין והשפעת ההתחממות הגלובלית⁴ את ההשקעה המאסיבית של סין בפיתוחים לשיפור התנובה (החקלאית ובחכירת קרקעות באפריקה ובדרום אמריקה לצרכי גידולי מזון

נוסף נתון הממחיש את עוצמת ההשפעה של פעילות חקלאית על הסביבה הוא משך הזמן הארוך בו היא מתקיימת. ביותר צמחים לצרכי גידול מזון החל לפני כ-11,000 שנה במספר מוקדים במזרח התיכון ומעט מאוחר יותר ובאופן

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 2 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ בלתי תלוי בסין ובאמריקה ⁵ במקביל, החלו בני האדם לביית בעלי חיים כמו: בקר, עיזים, כבשים וחזירים (כלבים בוייתו). (הרבה לפני כן ⁶ כלומר, ישנם אזורים רבים בעולם (סין, יפן, הודו, המזרח התיכון, אירופה ועוד) שבהם הפעילות. החקלאית נמשכת כבר אלפי שנים ועל כן יש לה השפעה מצטברת על הקרקע ועל האקוסיסטמה הטבעית. לחקלאות יש בראש ובראשונה השפעה מכרעת על מגוון המינים ושכיחותם על פני היבשות, הן של צמחים והן של בעלי חיים וכמו כן השפעה על סוגי מאביקים ומינים נוספים של חרקים. יתרה מזאת, בני האדם צורכים מספר קטן יחסית של מיני צמחים. מתוך יותר מ-50,000 מיני צמחים אכילים, כמה מאות בלבד משמשים למאכל, 15 מהם תורמים 90% מהאנרגיה של מזון בני האדם, ושלושה (אורז, חיטה, תירס) תורמים כ- 60% מהאנרגיה שבני האדם צורכים. כפועל יוצא מכך שטחי הגידול של צמחי המאכל של בני האדם דוחקים את רגליהם של צמחי הבר.

– איור: 2.1 פירוט השטחים המשמשים את החקלאות על פני כדור הארץ. מקור – Our World in Data, <https://ourworldindata.org/land-use>; Reprinted with permission.

טיעון דומה ניתן לבסס בקשר לבעלי החיים שבני האדם בייתו, הן יונקים והן עופות. לדוגמא, הביו-מסה (המשקל הכולל) של המקנה (בקר, חזירים, עזים וכבשים) גדול בערך פי 14 מהביו-מסה של כל היונקים הלא מבויתים על פני ⁷. כלומר הפעילות החקלאית משפיעה באופן ניכר על מגוון המינים ובנוסף גורמת לכך שמינים ספורים יחסית

היבשה

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
של צמחים (צמחי מאכל) ובעלי חיים (מבויתים) מצילים חלק ניכר מהמשאבים הנמצאים על פני היבשות (שטח)
קרקע, מזון, מים, חומרי הזנה ⁸
(. (נוטריינטים

שיטות עיבוד חקלאי 2.2.

לאורך ההיסטוריה חלה התפתחות בשיטות העיבוד החקלאי. ניתן לדבר בהכללה על ארבעה סוגי עיבוד חקלאי (עם וללא השקיה) המיושמים כיום: (1) שיטות עיבוד מסורתיות המתבססות על עבודת אנשים ובעלי חיים מבויתים תוך שימוש בדשן שמקורו (Agriculture Traditional/Based Resource), המותאמות למאפייני השטח והאקלים בהפרשות בעלי חיים ושאירות צמחים ושימוש מועט במדברים. שיטות אלה נמצאו עד לאחרונה בנסיגה ופינו את מקומן לשיטה התעשייתית. לאחרונה, יש מגמה של חזרה אל שיטות אלה באזורים שונים, אם כי עדין בקנה מידה קטן. (2) שיטת עיבוד "תעשייתית" (שיטת העיבוד הנפוצה ביותר כיום), המתבססת על מיכון רב, גידולים חד-זנים כולל הדברה (Based Demand), ושימוש רב במדברים ובדשנים כימיים (culture-mono) על פני שטחים גדולים בקרקע עצמה (לפני הזריעה) בעיקר על ידי קוטלי עשבים. (3) חקלאות מקיימת ⁹ ועליה Based Resource שגם היא חקלאות אורגנית משתמשת בעקרונות של (Based Resource) נרחיב בהמשך. (4) חקלאות אורגנית חקלאות מקיימת, אך ללא שימוש בדשנים כימיים ובמדברים המסונתזים כימית.

לאחרונה נעשה שימוש בכלים (לוחייני, רם חפנים, חיישנים בקרקע ועוד) שמטרתם לאסוף מידע רב ככל הניתן ברזולוציה עיתית ומרחבית מרבית, המלווה בעיבוד מהיר ומדויק של הנתונים הללו באמצעות כוח מחשוב גדול יש שימוש בכלים של חקלאות מדייקת בכל סוגי העיבוד החקלאי. כל (Agriculture Precision) - (חקלאות מדייקת זה נעשה על מנת לייעל ולצמצם את השימוש במשאבים (מים, חומרי הזנה, מדברים), להגביר תפוקות, לשפר את איכות הגידולים ולהגדיל את הרווח של החקלאים, תוך כדי מזעור הנזק הסביבתי שגורמת הפעילות ¹⁰
. החקלאית

לאחרונה אף התחילו להשתמש ברחפנים לא רק לאיסוף מידע, אלא גם לפיזור חומרי הדברה בצורה מדויקת

תפקיד החקלאות בהספקת מזון לבני 2.3. ויעילה

אדם

כיוון שאוכלוסיית העולם גדלה בכמה עשרות מיליוני בני אדם מידי שנה ובמקביל רמת החיים שלה עולה, קיים לחץ בלתי פוסק להגדיל את תנובת החקלאות. בין השנים 2000 ו-2019 גדלה כמות המזון הצמחי המיוצר בעולם משישה מיליארד טון לכתשעה מיליארד טון (איור 2.2). ראוי להדגיש את העלייה בייצור שמן אשר חלק ניכר ממנו הוא שמן

דקלים המיועד לייצור אנרגיה (ביו-דלקים, ראו פרק 3 על אנרגיה וסביבה). היצור החקלאי נמצא בהתאמה עם הגידול במספר האנשים בעולם ועם העלייה ברמת חיים בארצות רבות והדבר משתקף ברמת התזונה של בני האדם. סוכנויות האו"ם וגופים אחרים עוקבים מקרוב אחר מצב התזונה של אנשים ברחבי העולם והדיווחים מתעדכנים מידי Earth (מהארגון) (Brown) שנה (איורים, 2.3) 2.4. לפני שנדון באיורים 2.3 ו 2-4 ראו לציין שבספרו של לסטר בראון

ההגדרה ש⁸, ל נוטריינטים בה נשתמש בספר הזה, היא ההגדרה הכללית ביותר המתייחסת לכל הרמות הטורפיות (רמות ההזנה). ישנן הגדרות שונות, למשל כאשר מתייחסים לתזונת בני אדם בלבד. ההגדרה שתשמש אותנו: חומרי הזנה, או נוטריינטים הם יסודות כימיים הנחוצים לתפקודם שונים בגוף החי, של כל או חלק מהיצורים. חלקם נדרשים בכמויות גדולות יחסית (מקרו-נוטריינטים – פחמן, מימן, חמצן, מימן, חנקן, זרחן, סידן, מגנזיום, גופרית), וחלקם בכמויות קטנות. ⁹ Kristin Ohlson (2014) The soil will save us: how scientists, farmers, and foodies are healing the soil to save the planet. Rodale, New York, NY. (5) ביוגאומיים ומחזוריים, 7 (אקולוגיה, 9) (הימית הסביבה על בפרק גם זה לנושא התייחסות ראו. (ועוד, נחושת, אבץ, ברזל למשל (יותר Schieffer, J. and Dillon, C. (2015) The economic and environmental impacts of precision agriculture and interactions with agro environmental policy. *Precision Agric.* 16:46. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9382-5>; (2) The Economist (2019) The future of agriculture, November/16/2019.

18

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 2 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
משנת 2009 היתה תחזית שללא שינוי במצב העניינים, בשנת 2015 יהיו יותר מ-1.2 מיליארד Institute Policiy אנשים הסובלים מתת-¹¹ -מעבר לכך ש תחזית זאת לא התממשה, הנתונים המופיעים באיור 2.3 נמוכים בכ תזונה 200 מיליון אנשים בהשוואה לספרו של בראון (כנראה בגלל קושי באיסוף נתונים בהיקף עולמי, והקושי בהגדרה של תת תזונה). עד שנת 2014 נראה היה שמצב הרעב בעולם נמצא במגמת ירידה, אולם משנת 2014 ועד 2017 המספרים התייצבו והחל מ-2017 יש עליה במספר האנשים הסובלים מתת-תזונה בעולם. איור 2.4 מציג את אחוז האנשים הרעבים ומצביע על דפוס דומה עם הבדל אחד. העלייה באחוז האנשים הרעבים מתונה יותר מכיוון שבשנים הללו מספר האנשים הכולל בעולם עלה בכ- 80 מיליון אנשים מידי שנה.
מעבר למצב התזונה יש לקחת בחשבון גם את עלות המזון. מבחינה זו המצב בשנים האחרונות הרבה פחות טוב (איור 2.5). מחיר המזון מאז שנת 2000 יותר מהכפיל את עצמו. עליית המחיר היצר בעיה עולמית חמורה שכן עבור האנשים המרוויחים מעט, מזון מהווה חלק נכבד מסל הוצאות שלהם. מצב זה הוביל לחוסר שקט חברתי במספר רב של מוקדים בעשורים ¹² ופוליטי. למרות כל זאת, לפחות מבחינת מצב התזונה של ילדים בעולם נראה האחרונים

איור - (stunting) שבעשורים האחרונים חל שיפור המתבטא בירידה במידת העיכוב בגדילה

2.6).

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
– איור: 2.2 תנובת חקלאות (צמחים ומוצריהם) בין השנים 2000 ו-2019. מקור
FAO (2021) (FIG 20)¹³; CC BY-NC-SA 3.0 IGO; Reprinted with permission.

¹³ FAO. 2021. *World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2021*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4477en> - CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
– איור: 2.3 מספר האנשים הסובלים מתת-תזונה באזורים שונים בעולם בין 2000 ל-2020. מקור
FAO (2021) (FIG 48), CC BY-NC-SA 3.0 IGO; Reprinted with permission.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

– איור: 2.4 אחוז האנשים הסובלים מתת-תזונה מתמדת באזורים שונים בעולם. מקור –
FAO (2021) (FIG 47), CC BY-NC-SA 3.0 IGO; Reprinted with permission.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
איור: 2.5 מחיר המזון בין שנת 2000 ושנת 2022 (לגבי חישוב אינדקס עלות המזון (הצמוד למדד) – ראו את הדוח של
– המצוטט בתחתית האיור). מקור: FAO
FAO (2021) (FIG 42), CC BY-NC-SA 3.0 IGO; Reprinted with permission.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 2 יגאל אראל, מדעי בדור הארץ
איור: 2.6 אחוז הילדים מתחת לגיל חמש הסובלים מעיכוב בגדילה, השוואה בין שנת 2000 ושנת 2019 . מקור
– FAO (2021) (FIG 55), CC BY-NC-SA 3.0 IGO; Reprinted with permission.

הגדלת כמות המזון שמייצרת האנושות תלויה במספר פרמטרים בהם נדון בחלק זה של הפרק. הראשון ביניהם הוא תנובת (פוריות) הקרקע – המצע עליו צומחים הצמחים שאותם אנחנו מגדלים. השני הוא הספקת מים בה נדון בפרק 8 (כולל שימוש במי קולחים להשקיה). הקרקע הינה משאב סביבתי המתחדש לאט, ונרחיב על תהליכי יצירת קרקע בפרק 7. תהליך יצירת הקרקע כתוצאה מבלית סלעי הקרום של, כדור הארץ לעיתים בתוספת איאולית (מן האטמוספירה) של אבק מדברי נמשך זמן רב. חולפות מאות עד אלפי שנים עד שמתקבל חתך של קרקע מפותחת. (Nutrients) (ופוריה) (המכילה חומרי הזנה)¹⁴ (זמינים, בעלת מבנה יציב ויכולת תאחיזת מים משמעותית¹⁵, לכן שימוש ממושך בקרקע לגידול מזון, מחייב הוספה של חומרי הזנה והוא גורם לשינוי במבנה הקרקע בגלל מגוון (סיבות¹⁶ מידע נוסף בפרק 7) אם עיבוד הקרקע נעשה בצורה לא נכונה, הוא עלול לגרום לפגיעות חמורות בקרקע שיתבטאו אחרי פרק זמן קצר, יחייבו מאמצים מרובים וזמן רב ידרש כדי לתקן אותן. בהרבה אזורים חקלאיים ברחבי העולם, הקרקעות סובלות כיום ממגוון רב של נזקים שנגרמו מפעילות חקלאית אנושית שנעשתה בצורה לא הנזקים השכיחים הם ארוזיה (סחף¹⁷ נכונה. הפוגע בעיקר בחלק העליון של הקרקע, ירידה בתכולת חומר אורגני (קרקעות) הנחוץ לשימור מבנה הקרקע ולתאחיזת מים ומשפיע על ריכוז גזי החממה), המלחה, מדבור (שם כולל לירידה)

¹⁴ Nutrients: macro-nutrients (required by all plants in large amounts) – K, S, P, N, Ca, Mg, C, O, H, and micro-nutrients (required in very small amounts by all plants or by certain plants in higher amounts) – Fe, Mn, Mo, Cu, Zn and others. ¹⁵ Yaalon D. H. (1983) Climate, time and soil development. In L.P. Wilding, N.E. Smeck and G.F. Hall (Editors). Pedogenesis and Soil

agriculture/europe/2015/soer/eu.europa.eea.www://https 233-251. pp, Interactions and Concepts. I. Taxonomy

¹⁷ דוגמה מקומית לסחף: ב אזור מנשה עומק הקרקע (רנדזינה) עמד על כ - 20 ס"מ בסוף שנות הארבעים של המאה הקודמת, וכתוצאה מעיבוד אינטנסיבי ועיבוד לא נכון ישנם אזורים בהם עומק הקרקע כיום הוא כ 5 - ס"מ בלבד. בני חפץ, דברים בעל פה

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ בפוריות הקרקע בעיקר עקב ארוזיה וירידה בתכולת חומר אורגני, זיהום (על ידי חומרי הדברה, מזהמים אורגניים, הורמונים, דלק, ועוד) ודחיסה (בעיקר עקב שימוש בצידוד מכאני כבד לעיבוד¹⁸. כמו כן, הקרקע מכילה בתוכה מגוון ענק של מיקרו-אורגניזמים¹⁹ (mold) פטריות²⁰, פרוטוזואה²¹, נמטודות²², algae) אצות²³, (הקרקע²⁴ שלהם תפקיד מכריע בתהליכים המשפיעים על פוריות הקרקע²⁵) (בקטריות. עיבוד לא נכון ושימוש לא ואקטינומיציטים מבוקר בחומרי הדברה פוגעים במרקם המיקרוביאלי בקרקע ואף יכולים לעודד התפתחות אוכלוסיות מיקרו-אורגניזמים שיגרמו לנזקים לקרקע ולצומח. בפרק 7 נדון ביותר פרוט ביצירת קרקעות, בתכונות הקרקע ובנזקים הנגרמים לקרקע עקב פעילות בני אדם. גם כאן, כמו בפרקים אחרים, חשוב לבחון את ההתאמה של השיטות

החקלאיות הנהוגות כיום ואלו הצפויות בשנים הקרובות ליעדי האו"ם לפיתוח בר²⁶

. קיימא

שיטות וחומרי הדברת מזיקים 2.5.

מאז שחר ימיה לוותה הפעילות החקלאית בהתמודדות עם מזיקים – צמחי בר המתחרים עם צמחי המאכל על משאבים, ובעלי חיים ומיקרואורגניזמים הפוגעים בצמחי המאכל ובבעלי החיים המבויתים. כיום כמעט שליש

מהתוצרת החקלאית הולכת לאיבוד בעיקר עקב פגיעה על ידי מזיקים (מכרסמים, חרקים, מחלות הנגרמות על ידי מיקרואורגניזמים שונים, ועשבים ²⁷ . כדי למנוע או לצמצם את פעילותם של מזיקים פותחו לאורך ההיסטוריה (רעים)

מגוון של שיטות התמודדות. שיטות התמודדות עם המזיקים היו מבוססות על שימוש בחומרי הדברה החל ברעלים (התמודדות עם מזיקים) (organophosphates & DDT) כמו ארסן דרך רעלים צמחיים (כמו ניקוטין) וכימיקלים התבססה בנוסף על דרכי עיבוד (חריש, שריפות יזומות, מחזור זרעים, זנים עמידים) ועל הדברה ביולוגית - הכנסה של

¹⁹ "Bacteria are microbes with a cell structure simpler than that of many other organisms. Their control centre, containing the genetic information, is contained in a single loop of DNA. Bacteria are classified into five groups according to their basic shapes: spherical (cocci), rod (bacilli), spiral (spirilla), comma (vibrios) or corkscrew (spirochaetes). They can exist as single cells, in pairs, chains or clusters. Bacteria are found in every habitat on Earth: soil, rock, oceans and even arctic snow. Some live in or on other organisms including plants and animals including humans. Some bacteria live in the soil or on dead plant matter where they play an important role in the cycling of nutrients. Some types cause food spoilage and crop damage but others are incredibly useful in the production of fermented foods such as yoghurt and soy sauce. Relatively few bacteria are parasites or pathogens that cause disease in animals and plants." - <https://microbiologysociety.org/why-microbiology-matters/what-is-microbiology/bacteria.html>

²⁰ "Molds are a natural part of the environment and can be found almost anywhere that moisture and oxygen are present. They belong to the kingdom Fungi and live in moist places such as soil, plants and dead or decaying matter. Outdoors, molds play a part in nature by breaking down dead organic matter such as fallen leaves, dead trees and other debris; however, indoors mold growth should be avoided." - <https://www.epa.gov/mold/what-are-molds>

²¹ "Protozoan, organism, usually single-celled and heterotrophic (using organic carbon as a source of energy), belonging to any of the major lineages of protists and, like most protists, typically microscopic. All protozoans are eukaryotes and therefore possess a "true," or membrane-bound, nucleus. They also are nonfilamentous (in contrast to organisms such as molds, a group of fungi, which have filaments called hyphae) and are confined to moist or aquatic habitats, being ubiquitous in such environments worldwide, from the South Pole to the North Pole. Many are symbionts of other organisms, and some species are parasites." - <https://www.britannica.com/science/protozoan>

²² "Nematode, also called roundworm, any worm of the phylum Nematoda. Nematodes are among the most abundant animals on Earth. They occur as parasites in animals and plants or as free-living forms in soil, fresh water, marine environments, and even such unusual places as vinegar, beer malts, and water-filled cracks deep within Earth's crust." - <https://www.britannica.com/animal/nematode>

²³ "Algae, singular alga, members of a group of predominantly aquatic photosynthetic organisms of the kingdom Protista. Algae have many types of life cycles, and they range in size from microscopic Micromonas species to giant kelps that reach 60 metres in length. Their photosynthetic pigments are more varied than those of plants, and their cells have features not found among plants and animals. In addition to their ecological roles as oxygen producers and as the food base for almost all aquatic life, algae are economically important as a source of crude oil and as sources of food and a number of pharmaceutical and industrial products for humans." - <https://www.britannica.com/science/algae>

²⁴ Brady N.C. (1984) The Nature and Properties of Soils MacMillan, 9th edition.

²⁵ Delgado-Baquerizo M. et al. (2018) A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science* **359**, 320-325.

²⁶ <https://sdgs.un.org/goals>

²⁷ At the moment, the world produces about **4 billion metric tons of food per year**—but about **1.3 billion tons goes to waste**, according to the UN's Food and Agriculture Organization (FAO), 14 Dec 2020.

25

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
טורף או גורם מחלה הפוגע ²⁸ הדברת מזיקים הוא נושא רחב היקף בחקלאות המודרנית. ²⁹ בגלל הנזק
בעיקר במזיקים הכלכלי הגדול שגורמים המזיקים השונים (אבדן של כמעט שליש מהיבול, כפי שצוין למעלה
(. ועקב ההשקעה הכלכלית בהדברה
מבחינה סביבתית אחת הבעיות החמורות ביותר עם הדברה היא שלעיתים תכופות המדביר (כימי או ביולוגי) מגיע ,
לסביבות ולאתרים הנמצאים מחוץ ליעד המתוכנן וכך בני אדם ³⁰ . וכן צמחי בר וחיות בר נחשפים ועלולים להיפגע
שהוזכר בפרק ההקדמה, היה ניסיון חשוב לעורר (Spring Silent, 1962) החיבור המפורסם של רחל קרסון
מודעות ציבורית לנזק העקיף בשימוש בחומרי הדברה. למעשה (ובין היתר בתגובה לספרה של קרסון), מספר
מחקרים שפורסמו לאחרונה הראו שבעשורים האחרונים חלה ירידה משמעותית בנזק שגורמים מדבירים כימיים
ליונקים ולציפורים, אולם במקביל חלה עליה בריכוזי מדבירים בצמחי בר הגדלים בסמוך לשדות. אפילו הפתרון
שבאופן יחסי אינם מזיקים (neonicotinoids and pyrethroids) שנחשב לפתרון פלא - שימוש במדבירי חרקים

ליונקים ולציפורים, התברר לאחרונה כפתרון חלקי בלבד הן בגלל שמדבירי חרקים פוגעים גם בחרקים מאביקים יכולת האבקה של דבורים ושל ³¹ (נפגעת), והן משום שחרקים רבים פיתחו נגד עמידות. כך גם לגבי מדבירי כמו כן, חלה עליה. glyphosate), חרקים אחרים עשבים, שגם ילא הם עשבים מזיקים פיתחו עמידות (למשל משמעותית במידת הפגיעה בחסרי חוליות מימיים. כתוצאה מכך, חקלאים צריכים לשלב מדבירים מסוגים שונים ³² שנוקם הסביבתי גדול. למרות כל הנזקים הסביבתיים, הצורך להגדיל את התנובה מוביל לכך שישנה מגמה של ויעילותם פוחתת עם הזמן

עלייה בשימוש במדבירים בחקלאות, כאשר צרכני המדבירים העיקריים הם החקלאים של אמריקה ואסיה (איור 2.7). גרמה (*destructans Pseudogymnoascus*) לאחרונה דווח שפלישה של פטרייה מזיקה מאירופה לארצות הברית לפגיעה קשה באוכלוסיית עטלפים אוכלי חרקים, מה שגרר שימוש מוגבר במדבירי חרקים באזורים הנפגעים, שהוביל לעלייה של כ- 8% במקרי תחלואה ומוות של ³³

. תינוקות .

על מנת לצמצם את הנזקים העקיפים של חומרי ההדברה ואת העמידות הגוברת של מזיקים, צועדת החקלאות ³⁴ הדברה משולבת "נשמכת על" IPM) Management Pest Integrated – (

("המודרנית בכיוון של "הדברה משולבת

היכרות טובה עם מחזור החיים של המזיק, שימוש מושכל במדבירים ושילוב של שיטות עיבוד כמו מחזור זרעים. כל זאת בניסיון למזער ככל שניתן את השימוש במדבירים ואת הנזק הבריאותי והסביבתי שהם גורמים. בנוסף לטיפול הקלאסי המבוסס על הכלאות, בעשורים האחרונים גויסה ההנדסה הגנטית לטובת שיפור ההתמודדות עם המזיקים מסוגים שונים והגדלת התנובה. נושא זה עורר מעורבות רחבה (stress) וכן להגדלת עמידות הגידול לעקות

²⁸ Common examples: (1) *Bacillus thuringiensis* (BT) – a bacterium that causes diseases to the larvae of insect pests; (2) Parasitic wasps that attack different types of moth at their caterpillar stage.

²⁹ <https://www.ers.usda.gov/topics/farm-practices-management/crop-livestock-practices/pest-management.aspx> Bennett, D.H. et al. (2024) Personal air sampling for pesticides in the California San Joaquin Valley. J Expo Sci Environ Epidemiol.

³¹ (1) Botias et al. (2015) Neonicotinoid residues in wildflowers, a potential route of chronic exposure for bees. *Environ. Sci. Technol.* 49, 21, 12731–12740. 10.1021/acs.est.5b03459.

(2) Basley K, Goulson D. (2018) Effects of field-relevant concentrations of clothianidin on larval development of the butterfly polyommatus icarus (Lepidoptera, Lycaenidae). *Environ. Sci. Technol.* 52, 3990–3996. doi: 10.1021/acs.est.8b00609.

(3) Schulz R., Bub S., Petschick L.L., Stehle S., Wolfram J. (2021) Applied pesticide toxicity shifts toward plants and invertebrates, even in GM crops. *Science* 372, 81–84. ³² Service R. F. (2013) What happens when weed killers stop killing? *Science* 341. DOI:

10.1126/science.341.6152.1329 ³³ Frank E. G. (2024) The economic impacts of ecosystem disruptions: Costs from substituting biological pest control. *Science* 385, eadg0344. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adg0344> ³⁴ (1)

<https://www.epa.gov/safepestcontrol/integrated-pest-management-ipm-principles>; (2)

https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/sustainable-use-pesticides/integrated-pest-management-ipm_en

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

אתיים ובריאותיים רבים, שלא זה המקום לפרטם, הן בקהילה המדעית והן בציבור ³⁵ בשנים האחרונות המאמץ .

הרחב של הנדסה גנטית עובר בהדרגה מ"שתילת גנים" ל"עריכת" גנים, משום שב"עריכת" גנים יש דמיון רב יותר ברירה טבעית והיא אינה משאירה עקבות ³⁶ לתהליכי . דוגמא מעניינת לשיטה מושכלת של התמודדות עם מזיקים

זר DNA של

(Pheromones) והנדסה גנטית היא פיזור פרומונים IPM המשלבת ³⁷ הבעיה העיקרית היא ששיטה זו יקרה מאד .

הפרומונים מסונתזים בצורה כימית בתהליך מורכב ויקר) ולכן מתאימה לגידולים שמחירם גבוה ולחקלאים בארצות (

עשירות. לאחרונה, דווח על שימוש בהנדסה גנטית על מנת לייצר פרומונים באמצעות צמחים ולהזיל משמעותית את מחירם.³⁸ .. ימים יגידו האם יש אמת בדווח הראשוני הזה

איור: 2.7 שימוש במדבירים (ק"ג של מדביר ליחידת שטח – 10 דונם) בין השנים 2000 ו-2019 באזורים שונים בעולם. מקור -

FAO (2021) (FIG 16), CC BY-NC-SA 3.0 IGO; Reprinted with permission.

³⁵ (1) Van Acker et al. (2017) Pros and cons of GMO crop farming. Oxford Encyclopedia of Environmental Science. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.217>; (2) "In the 1990s with the commercialization of transgenic crops resistant to glyphosate, marketed as Roundup by Monsanto. Glyphosate disrupts the ability of growing plants to construct new proteins. Because the transgenic crops didn't suffer this fate, their use—and glyphosate's—soared" - Service R. F. (2013) What happens when weed killers stop killing? *Science* **341**. DOI: 10.1126/science.341.6152.1329 ³⁶ (1) Pixley K.V., et al. (2022) Genome-edited crops for improved food security of small holder farmers. *Nature Genetics* **54**, 364–367. <https://doi.org/10.1038/s41588-022-01046-7>; (2) Li C., et al. (2023) Maize resistance to witchweed through changes in strigolactone biosynthesis. *Science* **379**(6627), 94-99. <https://doi.org/doi:10.1126/science.abq4775> ³⁷ Pheromones - behavior-influencing chemicals that can confuse insects and prevent them from finding mates. ³⁸ Ding B. J., Wang H. L., Al-Saleh M. A., Löfstedt C. & Antony B. (2022) Bioproduction of (Z,E)-9,12-tetradecadienyl acetate (ZETA), the major pheromone component of *Plodia*, *Ephestia*, and *Spodoptera* species in yeast. *Pest Management Science* **78**, 1048-1059.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 2 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

שימוש בחומרי דשן 2.6.

כל סוגי העיבוד שהוזכרו בתחילת הפרק נמצאים בשימוש בהווה, אולם כאמור מרבית הייצור החקלאי נעשה כיום בשיטת העיבוד ה"תעשייתית". תה רומה של החקלאות "התעשייתית" לשיפור מצב התזונה של האנושות במחצית השנייה של המאה העשרים (המהפכה הירוקה) איננה מוטלת ³⁹ - המהפכה הירוקה החלה באמצע המאה ה-20 בספק

ובמהלכה הצליחו מספר מדינות (מקסיקו, הודו, פקיסטן, ועוד) להגדיל בצורה ניכרת את יבול הדגנים על ידי 20, שימוש בזנים חדשים, הדברת מזיקים, דישון מוגבר והכנסת טכנולוגיות חקלאיות מתקדמות. אולם, עדויות לגבי המחיר הסביבתי של המהפכה הירוקה החלו להצטבר במשך הזמן. למשל, תועדו זליגות חומרי הדברה לאזורים שמחוץ לשדה ופגיעות בצמחי בר ובחיות בר, כפי שצוין קודם. כמו כן, זליגת מומסדו של ת חומרי הזנה, שפוזרו בשדה על מנת להעלות את התנוב, ה אל מחוץ לשדה המטרה. נמצא שבמקרים רבים מאד, חלק ניכר מ חומרי ההזנה לקרקע נשטף מהשדה ולא נוצל (או נעשה בו שימוש) על ידי הגידולים (במידה רבה חנקן ובמידה פחותה ⁴⁰ שהוספו זרחן ואשלגן). בנוסף, חומרי הזנה שיושמו בשדות חקלאים והגיעו למקווי מים (נחלים, אגמים, אזורי מדף היבשת eutrophication) (ובאוקיינוסים) גרמו שם לתופעה הנקראת אוטוריפיקציה ⁴¹ (בימים –) הגברת יצרנות ראשונית (productivity Primary) ⁴² לרמות לא רצויות ועקב כך להצטברות חומר אורגני, עלייה בעכירות המים וירידה דרמטית בריכוז החמצן המומס במים.

לאור כל הנאמר, יש כיום נטייה הולכת וגוברת לעבור מחקלאות "תעשייתית" לסוגי החקלאות האחרים, בעיקר (או אגרו- , agriculture Sustainable) לחקלאות מקיימת ⁴³ ובמידה פחותה לחקלאות אורגנית. המעבר הזה איננו פשוט והוא חייב להיעשות ללא פגיעה בתנובה הכוללת וברוח התפעולי ⁴⁴ אקולוגיה. חשוב להדגיש שייצור של החקלאים חומרי דשן כרוך בהשקעה ניכרת של אנרגיה הצורכת כמויות גדולות של דלקים פוסיליים (לדוגמא, עליו יפורט בפרק 4) וחומרי גלם מתכלים (ראו הדיון על זרחן בפרק 5). כמו כן, יש נה טענה Haber Bosch- תהליך כי מרכזי הזנה של בקר כמו אלה הפועלים בארצות הברית פולטים לאטמוספירה כמויות משמעותיות של אמוניה המשתתפת ביצירת

³⁹ (1) Pingali, P. L. (2012) Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *PNAS* **109** (31): 12302-12308. doi:10.1073/pnas.0912953109; (2) Gollin D., Hansen C., Worm W., Mose A. (2021) Two blades of grass: The impact of the Green Revolution. *J. Political Economy* **129** (8): 2344–2384. doi:10.1086/714444; (3) von Der Goltz J., Dar A., Fishman R., Mueller N. D., Barnwal P., McCord G. C. (2020). Health impacts of the Green Revolution: Evidence from 600,000 births across the Developing World. *J. Health Economics* **74**: 102373. doi:10.1016/j.jhealeco.2020.102373. ISSN 0167-6296. (4) Stevenson J. R., Villoria N., Byerlee D., Kelley T., Maredia M. (2013) Green Revolution research saved an estimated 18 to 27 million hectares from being brought into agricultural production. *PNAS* **110** (21): 8363–8368. doi:10.103/pnas.1208065110.

⁴⁰ Eutrophication – from Britannica ⁴¹ גאוכימיים-ביו מחזורים על 5 בפרק יידון דיסוןלצרכי בזרחן ממחסור החשש. ⁴² "The gradual increase in the concentration of phosphorus, nitrogen, and other plant nutrients in an aging aquatic ecosystem such as a lake. The productivity or fertility of such an ecosystem naturally increases as the amount of organic material that can be broken down into nutrients increases. This material enters the ecosystem primarily by runoff from land that carries debris and products of the reproduction and death of terrestrial organisms. Water blooms, or great concentrations of algae and microscopic organisms, often develop on the surface, preventing the light penetration and oxygen absorption necessary for underwater life. Eutrophic waters are often murky and may support fewer large animals, such as fish and birds, than non-eutrophic waters." ⁴³ "Primary productivity is the rate at which biomass is produced by organisms that convert inorganic substrates into complex organic substances. Primary production typically occurs through photosynthesis; when green plants convert solar energy, carbon dioxide, and water to glucose, and eventually to plant tissue. It also refers to the rate at which some organisms like bacteria that thrive in the deep sea convert chemical energy to biomass through chemosynthesis." - <https://www.biologyonline.com/dictionary/primary-productivity#:~:text=Primary%20productivity%20is%20the%20rate%20at%20which%20biomass%20is%20produced,and%20eventually%20to%20plant%20tissue.>

⁴⁴ FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO (2021) The State of Food Security and Nutrition in the World 2021. Transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb5409en>.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ ⁴⁵ וגורמת ליהום אוויר באזורים חקלאיים PM מעודד לראות כי בשנים האחרונות יש האטה בשימוש בדשנים בעולם. יש נתונים רק לגבי שלושת העיקריים – חנקן, זרחן ואשלגן – איור 2.8. אחת הסיבות האפשריות להתייצבות (זאת היא שבחקלאות מקיימת ובחקלאות "תעשייתית" נעשה שימוש הולך וגובר בחקלאות מדייקת (ראו

– איור: 2.8: דישון שדות עם חנקן, זרחן ואשלגן בין השנים 2000 ו-2019. מקור: FAO (2021) (FIG 17), CC BY-NC-SA 3.0 IGO; Reprinted with permission.

2.7. חקלאות מקיימת

נשיא מספר מוקדי מחקר בעולם⁴⁶ ובישראל⁴⁷ בהם בוחנים את שיטות העיבוד של חקלאות מקיימת וחקלאות and (FAO-אורגנית ומשווים אותן אל מול החקלאות התעשייתית. ב-2021 החלה לפעול תוכנית של ה לקידום הנושא של חקלאות פרודוקטיבית ובת קיימא (Food Nations United the of Organization Agriculture מבחינה

סביבתית

48

⁴⁵ Burns, A. M., Chandler, G., Dunham, K. J., & Carlton, A. G. (2023) Data gap: Air quality networks miss air pollution from concentrated animal feeding operations. *ES&T*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c06947> ⁴⁶ (1) <https://rodaleinstitute.org/>, (2) <https://www.gga.org.au/group/evergreen-farming/>

1 () יער נווה, המודל משק - <https://www.agaiworkshop.co.il> (2) ; <https://www.modelfarm-aro.org> ⁴⁷ [https://www.fao.org/in-action/naps/resources/detail/en/c/433888/#:~:text=Knowledge%20Tank-Save%20and%20Grow%20%2D%20A%20policy%20maker's%20guide%20to%20the,intensification%20of%20smallholder%20crop%20product%20on&text=With%20the%20publication%20of%20Save,highly%20productive%20and%20environmentally%20sustainable](https://www.fao.org/in-action/naps/resources/detail/en/c/433888/#:~:text=Knowledge%20Tank-Save%20and%20Grow%20%2D%20A%20policy%20maker's%20guide%20to%20the,intensification%20of%20smallholder%20crop%20product%20on&text=With%20the%20publication%20of%20Save,highly%20productive%20and%20environmentally%20sustainable;); (2) Gilbert, N. African agriculture: Dirt poor. *Nature* **483**, 525–527 (2012). <https://doi.org/10.1038/483525a>

והם: (1) משטר "אי פליחה" - הימנעות מחריש

כוללים שישה ⁴⁹ ובשחורשים, חורשים לעיתים רחוקות

מרכיבים עיקריים

ככל הודאגים ניתן שהפילוח יהיה רדוד על מנת להקטין את סחף הקרקע ⁵⁰ ואת חמצון החומר האורגני בקרקע. כמו כן, החריש נעשה בהתחשב בקווי הגובה ובכיוון הסחף (2). (שימוש בגידולי שירות (גידולים הנזרעים בין הגידולים העיקריים, ועל פי רוב לפניהם), במטרה להגדיל את כמות החומר האורגני בקרקע, לתרום חומרי הזנה לקרקע, ולמנוע סחיפת הקרקע על ידי שיטפונות ורוח. (3) שילוב של צמחים רב שנתיים ועצים, וצמחים חד שנתיים עם צמחים רב שנתיים באותו שדה על מנת להגדיל את המגוון הביולוגי. (4) שילוב של רעייה מבוקרת בממשק של מטעים וגידולי (5) Cropping Pasture; שדה (תרומה של חומרי הזנה, תיחוח הקרקע, סילוק עשבים מזיקים ⁵¹). שימוש בדשן אורגני קומפוסט, בעיקר זבל פרות שעובר עיקור) כמקור לדשנים ולעיתים תוך שילוב עם ⁵² למרות שלעיתים הוא (Biochar) משחרר רדיקלים חופשיים ⁵³). (6) הקפדה על מחזור זרעים ועירוב גידולים על מנת למזער את השימוש במדבירים שהוזכרו למעלה. כפי שנאמר, חקלאות אורגנית נבדלת מחקלאות IPM-ושימוש במדבירים לפי עקרונות ה מקיימת בכך שבחקלאות אורגנית אין בכלל שימוש בדשנים ובמדבירים כימיים.

במכון ⁵⁴ בארצות הברית ערכו כאמור השוואה בין חקלאות אורגנית לחקלאות "תעשייתית", (או Rodale קובננציונלית) במשך 30 שנה. מסקנות ההשוואה העלו את התובנות הבאות ⁵⁵ התנובה של חקלאות אורגנית היתה: דומה לתנובה של חקלאות קובננציונלית בשנים רגילות, אולם עלתה על התנובה של חקלאות קובננציונלית בשנות בצורת. חקלאות אורגנית העשירה את הקרקע בחומר אורגני, ואילו חקלאות קובננציונלית דיללה את כמות החומר האורגני בקרקע. חקלאות אורגנית השתמשה בפחות ממחצית האנרגיה שהושקעה בחקלאות קובננציונלית. שני הבדלים אלה אחראים לכך שה חקלאות האורגנית גרמה ל-40% פחות פליטה של גזי חממה בהשוואה לחקלאות קובננציונלית. בגלל אי שימוש במדבירים ובדשנים כימיים, העלויות של חקלאות אורגנית היו נמוכות יותר, ומאידך, ⁵⁷. המחיר בשוק של מוצרים אורגנים היה גבוה יותר ⁵⁶ כך שחקלאות אורגנית היתה רווחית יותר. מחקרים נוספים מצביעים על כך שגם לחקלאות מקיימת יש יתרון בהשוואה לחקלאות קובננציונלית מבחינת קיבוע פחמן בקרקע השוואות דומות עדן לא פורסמו לגבי "משק המודל" של משרד החקלאות הישראלי (שמקדם חקלאות מקיימת, לא אורגנית) ⁵⁸. לעומת זאת, יש מחקרים הטוענים שלעיתים קרובות היבול בגידול אורגני נמוך משמעותית מיבול

⁴⁹ (1) <https://regenerationinternational.org/why-regenerative-agriculture/>; (2)

<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/site/national/home/> ⁵⁰ Thaler E.A., Larsen I.J., Yu Q. (2021) The extent of soil loss across the US Corn Belt. *PNAS* **118**. e1922375118, <https://doi.org/10.1073/pnas.1922375118> ⁵¹ Alan Savory: How to fight desertification and reverse climate change: holistic management and grazing in large herds -

http://www.ted.com/talks/allan_savory_how_to_green_the_world's_deserts_and_reverse_climate_change ⁵² (1) Cernansky, R. (2015) Agriculture: State-of-the-art soil. *Nature* **517**, 258–260. <https://doi.org/10.1038/517258a>; (2) biochar as a source of free radical in the soil: Guan, F., Wen, J., Liu, J., Yuan, Y., & Zhou, S. (2022). Simple Colorimetric Assay for Quantification of Persistent Free Radicals in

Biochars. *Environ. Science & Technol. Lett.* <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00816> ⁵³ Free radicals – "A free radical can be defined as any molecular species capable of independent existence that contains an unpaired electron in an atomic orbital. The presence of an unpaired electron results in certain common properties that are shared by most radicals. Many radicals are unstable and highly reactive."

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3249911/#:~:text=A%20free%20radical%20can%20be,are%20unstable%20and%20highly%20reactive.> ⁵⁴ Rodale Institute has been conducting research on regenerative organic agriculture since 1947 -

<https://rodaleinstitute.org/> ⁵⁵ <https://rodaleinstitute.org/science/farming-systems-trial/> ⁵⁶ <https://www.cnet.com/home/kitchen-and-household/how-much-more-expensive-is-organic/#:~:text=In%20the%20end%2C%20organic%20groceries,exclude%20meat%20from%20the%20equation.> ⁵⁷ Johnson, D., Ellington, J., & Eaton, W. (2015). Development of soil microbial communities for promoting sustainability in agriculture and a global

carbon fix (No. e789v1). Peer J. Pre-Prints. ⁵⁸ <https://www.modelfarm-aro.org/>

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
בחקלאות קונבנציונלית. באופן כללי, יש כיום מגמה עולמית של גידול בחלקה היחסי של החקלאות האורגנית אם כי,
בין המדינות המהוות את אסם התבואה העולמי (ארה"ב, הולנד, אוקראינה, ברזיל, אוסטרליה), רק באוסטרליה
2.9. (חקלאות האורגנית מהווה חלק משמעותי (כ-10%) מכלל העיבוד החקלאי (איור

– איור: 2.9 חלקה היחסי של חקלאות אורגנית בארצות עם האחוזים הגבוהים ביותר של חקלאות אורגנית. מקור
– FAO (2021) (FIG 62), CC BY-NC-SA 3.0 IGO; Reprinted with permission.

תרומת החקלאות לפליטות גזי חממה והשפעת ההתחממות הגלובלית על החקלאות 2.8.

אחד הנושאים שעולה מידי פעם בהקשר של החקלאות הוא תרומתה למאזן גזי החממה. פעילות חקלאית למשל
($O_2 - N$ oxide) וחמצן דו חנקני (CH_4) בעיקר גידול בעלי חיים, המקור היא העיקרי של מתאן⁵⁹. לאטמוספירה (פחמן
ב-2019 נפלטו לאטמוספירה מפעילות חקלאית כמויות מתאן השוות ערך לכ-3.5 גיגה-טון של פד"ח (פחמן
באותה שנה, כלל פליטות המתאן עקב פעילות בני אדם היו שוות לכ-8.3 גיגה-טון של פד"ח. כלומר, CO_2 דו חמצני
הפעילות

החקלאית היתה אחראית לכ-4% מכלל פליטות המתאן⁶⁰

. האנושיות

מעבר לפליטות מתאן וחמצן דו חנקני, הפעילות החקלאית משחררת לאטמוספירה גם גזי חממה נוספים, בראש
ובראשונה פד"ח. מתוך כ-52 גיגה-טון של פד"ח (שווה ערך לפד"ח שהם כ-14 גיגה-טון של פחמן) שפעילות
האדם פלטה לאטמוספירה ב-2018, כ-26% נפלטו מ פעילות חקלאית, כאשר כ-31% מתוכם נבעו מגידול בעלי
חיים (כולל דגה), כ-27% מייצור חקלאי (שימוש בכלי עבודה, שריפות מבוקרות וכולי), כ-24% משימושי קרקע,
⁶¹ 18%- מהובלה. אולם ראוי לציין שבשני העשורים האחרונים התייצבה פליטת גזי החממה הנובעת מפעילות
ושינוע של מזון

חקלאית (איור 2.10), בניגוד לשריפת דלקים פוסיליים לייצור אנרגיה הנמצאת במגמת עליה

⁵⁹ Del Grosso, S. J., Wirth, T., Ogle, S. M., & Parton, W. J. (2008) Estimating agricultural nitrous oxide emissions. *EOS, Transactions AGU*

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 2 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
– איור: 2.10 פליטות גזי חממה מפעילות חקלאית, השוואה במשך שני העשורים הראשונים של המאה ה-21. מקור
FAO (2021) (FIG 65), CC BY-NC-SA 3.0 IGO; Reprinted with permission.

אמנם אי-עליה בפליטות עדיפה על עליה בפליטות, אולם הפליטות הנוכחיות של גזי חממה מפעילות חקלאית עדין גבוהות מידי ויש למצוא דרכים להוריד אותן. יתכן שכאן יש לחקלאות מקיימת ולחקלאות אורגנית תפקיד חשוב. כלומר, מעבר להפחתת השימוש בדשנים ובמדבירים, יתכן שחקלאות מקיימת תוכל לתרום גם לנושא מאזן גזי החממה בכדור הארץ. חישוב פשוט מראה שאם נעלה, בזכות עיבוד נכון של הקרקע, את כמות החומר האורגני בחלק הס"מ העליונים, בערך, מערך של כ- 4.5% בממוצע, (SOIL TOP – 20) העליון של פרופיל הקרקע ⁶² 5% לערך של 25-בממוצע עולמי, נסלק מהאטמוספירה כ ⁶³ של פחמן GT ⁶⁴ השווים לפליטה הכוללת של פחמן לאטמוספירה במשך כשנתיים בקצב הפליטות ⁶⁵ יוזמה ברוח זאת הוצעה ב-2019 על ידי משרד החקלאות הצרפתי. ⁶⁶ מצד שני. העכשווי יש מחקרים המביעים סקפטיות לגבי יכולתה של החקלאות המקיימת להיות שחקן מרכזי במאזן ולהשפיע משמעותית על פליטת או קליטת ⁶⁷ הפחמן העולמי. הביקורת מופנית גם לשינויים בדפוסי רעיה פד"ח מן האטמוספירה

(Savory) להם מטיף אלן סבורי ⁶⁸ 7. יש וזכרו גם בפרק,

מעבר לוויכוח הניטש לגבי המעבר מחקלאות "תעשייתית" לחקלאות מקיימת, חשוב לציין שישנם מחקרים רבים המדגימים כיצד מעבר לדיאטה טבעונית-בעיקרה מקטינה את השטח שצורכת החקלאות (למשל, מקורות המידע של

⁶² <https://franklin.cce.cornell.edu/resources/soil-organic-matter-fact-sheet> ⁶³ GT – giga-tonne = 10⁹ tonne, where 1 tonne = 1,000 kg.

⁶⁴ Assuming soil density of 1 g/cm³, the increase of 0.5% SOM in agricultural soils = increase of 1 kg/m² of SOM, which is 0.5 kg C/m². As agriculture affects ~ 50E6 km², this translates to 25 E12 kg C, or 25 E9 metric tons of C = 25 GT of C. GT – giga-tonne = 10⁹

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

איור 1.⁶⁹ לאחרונה אף נטען כי מעבר לדיאטה טבעונית יכול להוריד משמעותית את פליטת גזי החממה.⁷⁰

למרות ניסיונות⁷¹ 2 וכן . בהקשר זה, ראוי לשים לב שקיים פער גדול

חוזרים ונשנים של תעשיית הבשר להציג תמונה שונה

בין אזורים שונים בעולם לגבי צריכת חלבון ולגבי התרומה של חלבון ממקור צמחי לעומת מבעלי חיים (איור 2.11).

פער זה מבטא במידה רבה הבדל ברמת החיים, ומחייב שינוי בגישה התרבותית הרואה בדיאטה עתירת מזון מן החי

סמל לרמת חיים גבוהה. זאת על מנת שהעלייה ברמת חיים לא תוביל בהכרח לעליה בצריכת מוצרים מן החי, כפי

שקרה בסין בעשורים האחרונים. במחקר שפורסם ב-2020, נטען שרק שילוב של מספר גורמים (דיאטה טבעונית

(בעיקרה, ייצור מזון מספיק אך לא עודף, תפוקה חקלאית גבוהה, הפחתת הפסולת החקלאית והתייעלות בהפצת מזון

יבטיחו את תרומתו של המגזר החקלאי לעמידה בהתחממות של 1.5° לכל⁷²

. היותר .

– איור 2.11: מקור חלבון (צמחי/בעלי חיים) באזורים שונים בעולם. מקור

FAO (2021) (FIG 53), CC BY-NC-SA 3.0 IGO; Reprinted with permission.

⁶⁹ (1) Shepon, A., Eshel, G., Noor, E., & Milo, R. (2018). The opportunity cost of animal-based diets exceeds all food losses. *PNAS*, **115**(15), 3804–3809. <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.1713820115>; (2) <https://www.haaretz.co.il/science/2022-10-27/ty-article>

⁷⁰ (1) Eisen MB, Brown PO (2022) Rapid global phaseout of animal agriculture has the potential to stabilize greenhouse gas levels for 30 years and offset 68 percent of CO emissions this century. *PLOS Clim*

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ בשנים האחרונות גובר העיסוק בהשפעת שינויי אקלים על החקלאות. ברור לחוקרים שיש אזורים שייפגעו קשות מעליית הטמפרטורות עקב עלייה בקצב אידי מים מהקרקע ומצמחים שתוביל להתייבשות הקרקע (בעיקר באזורים טרופיים וסוב-טרופיים). אולם יש גם אזורים, בעיקר בצפון אמריקה, צפון אירופה וסביב שבהם הפגיעה תהיה פחותה, ויתכן שבחלק מהאזורים הללו התפוקה החקלאית תעלה. משתנה חשוב ביותר המשפיע על מידת הנזק . CO_2) הצפוי לחקלאות הוא באיזו מידה עליית ריכוז פד"ח באטמוספירה תגדיל את קצב הגידול של צמחי המאכל fertilization (73 המסקנה העיקרית של המחקר המקיף ביותר שנעשה עד כה (ופורסם ב-2008) הוא שהתחממות גלובלית תפגע במידה כזאת או אחרת בתנובה החקלאית העולמית ובעיקר בארצות המתפתחות, הן מסיבות כלכליות וחברתיות והן בגלל שרבות מהן נמצאות באזורים טרופיים וסוב-טרופיים 74 . יתרה מזאת, דיווחים מרחבי העולם מעידים שהתחממות הגלובלית כבר משפיעה על יבולים. למשל בישראל חלה בשנים האחרונות ירידה של יותר ביבול של חלק מעצי הפרי עקב מחסור ב"מנות קור" - ימים קרירים הנחוצים להבשלת 30% 75 , מ- . כמו כן הפירות לאחרונה התפרסמו מודלים המנבאים שבמקביל לשינוי בתנובה, התחממות גלובלית תאיץ את 76 מצד שני, ב-3 201 ו-2016 התפרסמו מחקרים שתעדו באמצעות ניתוח תצלומי לוויין . התפשטותם של מזיקים לאזורים ממוזגים

מגמה של גידול בכיסוי של צמחייה (כמות צמחים ליחידת שטח, לא רק של גידולים חקלאיים) על פני היבשות effect) בעשורים האחרונים 77 והיתרה התחלקה בין CO_2 fertilization, כאשר 70% מהעלייה יוחסה ל מספר גורמים כמו התחממות גלובלית, זמינות של חנקן, 78 תוצאות דומות התקבלו במחקר . (greening ושינוי בשימושי קרקע

OCS - sulfide) נוסף שפורסם ב-2017 והסתמך על מדידות של קרבונל גופרתי 79 carbonyl (.

2.9 סיכום

החקלאות היא פעילות אנושית חיונית, רחבת ממדים המתפרשת על כשליש משטח היבשות, ובמקומות רבים נמשכת כבר אלפי שנים ברציפות. לאור זאת, יש לחקלאות השפעות מרחיקות לכת על הסביבה, בעיקר פגיעה במבנה וביציבות הקרקע, הקטנת המגוון הביולוגי, שחרור חומרי הזנה וחומרי הדברה לסביבות שמחוץ לשדה המטרה ופליטה של גזי חממה. הפעילות החקלאית מהווה נדבך מרכזי במרוץ למיגור הרעב בעולם. לכן, גידול האוכלוסייה ועליה מתמדת ברמת החיים מובילים למרוץ מתמשך להגדלת התנובה החקלאית, מה שמעצים את השפעתה הסביבתית.

73 CO_2 fertilization – Increasing levels of CO_2 in the atmosphere cause an increase in plant photosynthesis rates. - De GRAAFF, M.-A., Van GROENIGEN, K.-J., SIX, J., HUNGATE, B. and Van KESSEL, C. (2006) Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO_2 : a meta-analysis. *Global Change Biology*, 12: 2077-2091. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01240.x> 74 (1) Cline W. R. (2008) Global warming and agriculture. *Finance & Development* March 2008 23-27; (2) Cline W. R., (2007) Global warming and agriculture: Impact estimates by country (Washington: Center for Global Development and Peterson Institute for International

- ⁷⁵ www.haaretz.co.il/misc/article-print-page/.premium.HIGHLIGHT-MAGAZINE-1.10532860 (1) Chaloner, T. M., Gurr, S. J., & Bebbber, D. P. (2021). Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nature Climate Change*, 11(8), 710-715; (2) Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science* 361(6405), 916-919. <https://doi.org/doi:10.1126/science.aat3466>. ⁷⁷ (1) Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. et al. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Clim Change* 6, 791-795 (2016). <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>; (2) Donohue, R. J., Roderick, M. L., McVicar, T. R., and Farquhar, G. D. (2013), Impact of CO₂ fertilization on maximum foliage cover across the globe's warm, arid environments, *Geophys. Res. Lett.* 40, 3031-3035, doi:10.1002/grl.50563.
- ⁷⁸ Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. et al. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Clim Change* 6, 791-795 (2016). <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>
- ⁷⁹ Campbell, J. E., Berry, J. A., Seibt, U., Smith, S. J., Montzka, S. A., Launois, T., ... & Laine, M. (2017). Large historical growth in global terrestrial gross primary production. *Nature* 544(7648), 84-87.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 2 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
 יחד עם זאת ולמרות הדיון בהשלכותיה השליליות של החקלאות על הסביבה, לחקלאות יש פוטנציאל גדול, בחלק
 ממומש, להוות נדבך חשוב בשינויים בהם אנו דנים בספר זה. כך למשל, החקלאות מהווה מבלע לפסולת מהעיר כמו
 קומפוסט ובוצת שפכים שהופכים לדשן בחקלאות. כמו כן, שימוש גובר בהשקיה בקולחים גורם למעבר של מים שהיו
 בשימוש בעיר לחקלאות. בנוסף, אחד מיתרונות החקלאות הוא בהקשר של תעסוקה, בייחוד במדינות מתפתחות.
 לחקלאות יש גם חשיבות גדולה כמקור לשטחים "ירוקים" בייחוד כאשר היא מתבצעת בקרבת ערים וכן חשיבות
 גדולה מאד בהקשר של ביטחון קרקע – במקרים רבים החקלאות קובעת את גבולות המדינה. כמו כן, לחקלאות יש גם
 חשיבות תרבותית - חגים ומועדים ומגוון פעילויות דתיות שקשורות לחקלאות (שנת שמיטה וכו'). ולבסוף, שדות
 חקלאיים מהווים שטחים פתוחים ומספקים מסדרונות אקולוגיים ויפוי
 לאור כל זאת, בעשורים האחרונים נעשים מאמצים הולכים וגוברים להסב את הפעילות החקלאית לחקלאות מקיימת.
 פעילות שהשפעתה הסביבתית פחותה בצורה משמעותית, פגיעתה בתכונות הקרקע פחותה בצורה ניכרת והיא
 מעודדת שימור של מגוון מינים ומסייעת בהתמודדות עם משבר האקלים.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

“Energy is the only universal currency:

one of its many forms must be transformed
to get anything done.”

Vaclav Smil, Energy and Civilization: A History

משק האנרגיה. 3.

הפקת אנרגיה עומדת בבסיס הכלכלה העולמית והפקתה בכמות מספקת מהווה תנאי הכרחי לקיום אורח החיים המודרני. משחרר ההיסטוריה ועד המהפכה התעשייתית במאה התשע עשרה, רוב האנרגיה ש צרכה האנושות הגיעה משריפת צמחים וגללים של בעלי חיים מבויתים, ובמידה פחותה מרוח ומזרימת מים. מאז סוף המאה התשע ועד ימינו הכלכלה העולמית נשענת בעיקר על אנרגיה המופקת מדלקים¹, עשרה. בהתחלה נצרכו בעיקר פחם פוסיליים

לאחר מכן גם דלק נזולי ולאחרונה גז (מתאן) בכמויות הולכות וגדלות. בעשורים האחרונים מתרחש מעבר חלקי להפקת אנרגיה ממקורות חילופיים, כגון אנרגיה גרעינית, אנרגיה הידרואלקטרית, אנרגיה סולארית ואנרגית רוח. הפרק הנוכחי ידון במקורות האנרגיה השונים ובהשלכות הסביבתיות של השימוש בהם.

דלקים פוסיליים 3.1.

בעיקר מתאן) נוצרו במשך מיליוני שנה (בעיקר מלפני כ-350 – דלקים פוסיליים (פחם, דלק נזולי גולמי וגז שנה ועד ההווה) משרידי² מיליוני בטרם הספיקו להתחמצן ולהפוך בעלי חיים וצמחים שנקברו בסדימנט, מיקרואורגניזמים לפד"ח. לאחר קבורתם הם עברו תהליך של "הבשלה", שכלל סדרה ארוכה של ריאקציות כימיות בתנאים של לחץ וטמפרטורה גבוהים (200 עד 1000 אטמוספירות, 65 עד 150 מעלות צלזיוס) ללא נוכחות חמצן ובמשך זמן ארוך מספיק. על מנת שכל התנאים הללו יתקיימו דרושים תנאים גיאולוגיים נדירים יחסית, ולכן קצב היווצרותם של דלקים פוסיליים הוא איטי ביותר ביחס לקצב השריפה שלהם כיום. כלומר, הם נחשבים למשאב מתכלה. הדינמיקה של King Marion. 1956) שימוש בדלקים פוסיליים (כמו במשאבים מתכלים אחרים) תוארה על ידי מאריון קינג הוברט -בהרצאה שנשא ב Hubbert³ בין היתר, הוא טען שעקומת הצריכה של דלק פוסילי, כמו של כל משאב טבעי מתכלה, נראית כמו עקומת פעמון, כלומר בהתחלה קצב ההפקה וקצב הצריכה עולים עם הזמן עד ששניהם מגיעים ילעוך מרבי, ואז כשמרבית מאגר הדלק מנוצל, קצב ההפקה וקצב הצריכה פוחתים עד שהמשאב מתכלה או שנמצא לו תחליף. מבחינה סביבתית מצב זה של ניצול כל המאגר של הדלקים הפוסיליים אינו רצוי, בלשון המעטה, בגלל מספר סיבות. ראשית, דלקים פוסיליים הם משאב מתכלה (קצב החידוש שלו נמוך משמעותית מקצב צריכתו) והם מהווים חומר גלם לשורה רחבה של מוצרים (נדון בכך בפרק על היבטים סביבתיים של תעשייה והפקת חומרי גלם). כמו כן, כריה והובלה של דלקים פוסיליים גורמת לנזקים סביבתיים בקנה מידה גדול (ראו למשל את המקרה⁴ -ועלולה לגרום לתאונות שנוקן הסביבתי גדול מאד (למשל, מפרץ מקסיקו ב⁵) ואקסון וולד 2015⁶ של שפך הניז'ר באפריקה

¹ Smil V. (2010) Energy Transitions: History, Requirements, Prospects. Santa Barbara, CA: Praeger.

² "Sediment is solid material that is moved and deposited in a new location. Sediment can consist of rocks and minerals, as well as the

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
FRACKING ב-1989). בהקשר זה ראוי לציין את הנושא של ⁷ שיטה להגברת התפוקה של בארות נפט וגז ש גם לה –
יש השלכות סביבתיות (וסיסמיות) מדאיות ⁸ בנוסף, שריפת דלקים פוסיליים גורמת לזיהום אוויר, אשר מהווה אחד.
מגורמי התחלואה והמוות העיקריים (נדון בכך בפרק 10). וכמובן, שריפת דלקים פוסיליים תורמת כשלושה רבעים
תרומה העולה בסדרי גודל על
קצב פליטתו ממקורות טבעיים
מפליטת ⁹ (נרחיב על הנושא
פד”ח על ידי האנושות
בפרק 5). לאור כל הסיבות הללו ברור כיום לרוב האנשים העוסקים בתחום האנרגיה שיש למצוא תחליפים לדלקים
פוסיליים ובהקדם. הבעיה העיקרית היא סדר הגודל של האתגר הזה, בייחוד לנוכח הפער המשמעותי בזמינות אנרגיה
ובצריכת אנרגיה לנפש בין אזורים שונים על פני כדור הארץ וכן בזמינות המידע על פליטות גזי חממה באזורים

פוסיליים

¹⁰ שונים

סוגי דלקים 3.1.1

גם בתוך דלקים פוסיליים ישנה היררכיה מבחינת הנזק הסביבתי שהם גורמים. כך למשל, כ-50% מהפחם
פחם מסוג זה פחות יעיל אנרגטית (bituminous-sub, lignite) המופק בעולם הוא פחם מסוג ירוד יחסית
ופולט יותר ¹¹ (מחמם פחות), ולעיתים מכיל ריכוזים גבוהים של גופרית ויסודות מזיקים אחרים הפוגעים באיכות
פד”ח ליחידת משקל
האוויר (נרחיב על כך בפרק 10). כך גם לגבי שריפת גז טבעי (בעיקר מתאן). אמנם שריפת גז טבעי מלווה בשחרור
נמוך משמעותית של מזהמים שונים בהשוואה לשריפת פחם והיא יעילה יותר מבחינה אנרגטית, אך יחד עם זאת,
כל 16 גרם של מתאן שנשרף משחררים 44 גרם של פד”ח לאטמוספירה. בנוסף, דליפות של אחוזים בודדים (תופעה
שכיחה ביותר) של מתאן (שהוא גז חממה יעיל הרבה יותר מפד”ח בריכוזים הנוכחיים ¹²) מאתרי ההפקה ומצינורות
ההובלה שלו אל תחנות הכוח יכולה להטות את הכף מבחינת הנזק שהוא גורם למאזן גזי החממה ¹³, בדומה לזה.
נוזלי דלק של שונים (e.g., gasoline, diesel, kerosene, liquefied petroleum gas (LPG) (כמויות מכילים
סוגים שונות של חומרים מזיקים הנפלטים לסביבה בעת שריפתם.

7 Hydraulic Fracturing (Fracking): <https://www.britannica.com/technology/fracking> (1) <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/04/f34/MAC%202015%20Report%20to%20Congress.pdf>; (2) Vidic R. D. et al. (2013) Impact of shale gas development on regional water quality. *Science* **340**, 1235009. <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.1235009>; (3) <https://www.usgs.gov/faqs/how-hydraulic-fracturing-related-earthquakes-and-tremors>

9 (1) United Nations Environment Programme (2021). Making Peace with Nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature> – Figure 2.8; (2) <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions> ¹⁰ (1) <https://resourcewatch.org/dashboards/energy>; (2) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2022. Greenhouse Gas Emissions Information for Decision Making: A Framework Going Forward. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26641>. ¹¹ https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index_e.php ¹² (1) <https://www.epa.gov/gmi/importance-methane#:~:text=Methane%20is%20more%20than%20205,dueto%20human%20related%20activities>. (2) <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/ContributorsAGW-NGE.pdf>; (3) <https://www.haaretz.co.il/opinions/2021-09-21/ty-article-opinion/.premium/0000017f-ed6c-d0f7-a9ff-efed402f0000> ¹³ (1) <https://eos.org/articles/the-surprising-source-of-greenhouse-gas-emissions>; (2) Lauvaux T., et al. (2022) Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters. *Science* **375**(6580), 557-561; (3) Plant G., et al. (2022) Inefficient and unlit natural gas flares both emit large quantities of methane. *Science* **377**(6614), 1566-1571.

37

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

גודל האתגר 3.1.2

דרך), אבל נוח יותר לדבר על הספק (אנרגיה ליחידת זמן, או X כוח (Joule, J) אנרגיה נמדדת ביחידות של ג'אול ג'אול/שניה = וואט). האנושות מייצרת W^{14} (20 TW כיום הספק ב שלסדר גודל 10^{12} כך שאם ממירים זאת) 10×20 ליחידות אנרגיה מתקבלים מספרים גדולים שקשה לזכור 10^{12} $175,200 \text{ TW hr} = 10 \times 20 \times 24 \times 365 = 15$ איור 3.1; טבלה 1. 3. כל מקור או שילוב של מקורות אנרגיה – $10^{18} \times 20 \times 24 \times 365 \times 3600 = J$ אחרת מדובר במקור "בוטיק", מקור TW, חילופיים צריכים לתת מענה לסדר גודל של יצירת הספק בהיקף של מספר אנרגיה שיכול להתאים ליישוב קטן או חוות בודדים, אבל לא לכלל האנושות. כמו כן, חשוב לציין שבמקביל למעבר מדלקים פוסיליים למקורות אנרגיה חלופיים, עולה חלקה היחסי של האנרגיה המופנית ליצור חשמל, זאת בשל המעבר למכונות חשמליות ולמוצרים ביתיים ותעשייתיים המבוססים על חשמל, מגמה שתלך ותתעצם בשנים הקרובות. לשם המחשה, האנרגיה המופנית ליצור חשמל בשנת 2017 היתה 17.6% ואילו ב-2023 היא היתה מכיל האנרגיה שנצרכה על ידי האנושות 20.6% ¹⁶.

טבלה 3.1: ייצור וצריכת אנרגיה בעולם מ-1909 ועד 2019 נתונים מדוחות הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה IEA, ¹⁷ הפער בין ייצור לצריכה נובע מצורת החישוב שלוקחת בחשבון אובדן אנרגיה (Agency Energy International) – (ה בעיקר חום שנפלט לסביבה משריפת דלקים פוסיליים) בזמן הייצור שלה.

energy consumption																		
TJ per year TW yr																		
	Indus try	Trans port	Residen tial	Comm ercial and public	Agricul ture	Fishin g	Non	Non	total	Indus try	Trans port	Residen tial	Comm ercial and public	Agricul ture		Non	Non	total
				services	/ forestry		specifie d	energy use					services	/ forestry	Fishin g	specified	energy use	
1990	7.51E +07	6.60E +07	6.33E +07	1.87E +07	6.88E +06	2.55E +05	1.09E +07	2.00E +07	2.61E +08	2.4	2.1	2.0	0.6	0.2	0.0	0.3	0.6	8.3
1995	7.48E +07	7.18E +07	7.14E +07	2.09E +07	7.30E +06	2.56E +05	3.67E +06	2.21E +07	2.72E +08	2.4	2.3	2.3	0.7	0.2	0.0	0.1	0.7	8.6
2000	7.83E +07	8.22E +07	7.46E +07	2.31E +07	6.21E +06	2.59E +05	3.21E +06	2.54E +07	2.93E +08	2.5	2.6	2.4	0.7	0.2	0.0	0.1	0.8	9.3
2005	9.37E +07	9.29E +07	7.84E +07	2.67E +07	7.28E +06	3.38E +05	4.12E +06	2.94E +07	3.33E +08	3.0	2.9	2.5	0.8	0.2	0.0	0.1	0.9	10.6
2010	1.11E +08	1.02E	8.17E	2.99E	7.62E	3.37E	4.55E	3.20E	3.68E	3.5	3.2	2.6	0.9	0.2	0.0	0.1	1.0	11.7

		+08	+07	+07	+06	+05	+06	+07	+08									
2015	1.17E+08	1.13E+08	8.28E+07	3.16E+07	8.17E+06	3.01E+05	5.63E+06	3.51E+07	3.94E+08	3.7	3.6	2.6	1.0	0.3	0.0	0.2	1.1	12.5
2019	1.21E+08	1.21E+08	8.78E+07	3.37E+07	8.93E+06	2.99E+05	6.65E+06	3.87E+07	4.18E+08	3.8	3.8	2.8	1.1	0.3	0.0	0.2	1.2	13.3
								energy production									consumption / production	
						TJ per year										TW yr		
	Coal	Natural	Nuclear	Hydro	Wind,	Biofuels	Oil	total	Coal	Natural	Nuclear	Hydro	Wind,	Biofuels	Oil	total		
		gas			solar, etc.	and waste				gas			solar, etc.	and waste				
1990	9.30E+07	6.96E+07	2.20E+07	7.70E+06	1.53E+06	3.67E+07	1.35E+08	3.66E+08	2.9	2.2	0.7	0.2	0.0	1.2	4.3	11.6	0.71	
1995	9.23E+07	7.55E+07	2.55E+07	8.91E+06	1.78E+06	3.94E+07	1.41E+08	3.85E+08	2.9	2.4	0.8	0.3	0.1	1.2	4.5	12.2	0.71	
2000	9.69E+07	8.66E+07	2.83E+07	9.41E+06	2.53E+06	4.15E+07	1.54E+08	4.19E+08	3.1	2.7	0.9	0.3	0.1	1.3	4.9	13.3	0.70	
2005	1.25E+08	9.86E+07	3.02E+07	1.06E+07	2.94E+06	4.47E+07	1.68E+08	4.80E+08	4.0	3.1	1.0	0.3	0.1	1.4	5.3	15.2	0.69	
2010	1.53E+08	1.14E+08	3.01E+07	1.24E+07	4.62E+06	4.91E+07	1.73E+08	5.36E+08	4.9	3.6	1.0	0.4	0.1	1.6	5.5	17.0	0.69	
2015	1.61E+08	1.22E+08	2.81E+07	1.40E+07	8.53E+06	5.28E+07	1.81E+08	5.68E+08	5.1	3.9	0.9	0.4	0.3	1.7	5.7	18.0	0.69	
2019	1.62E+08	1.41E+08	3.05E+07	1.52E+07	1.34E+07	5.68E+07	1.87E+08	6.06E+08	5.1	4.5	1.0	0.5	0.4	1.8	5.9	19.2	0.69	

Source: IEA World Energy Balances <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>
Documentation: https://iea.blob.core.windows.net/assets/20a89a1b-634c-41f1-87d1-d218f07769fb/WORLDBAL_Documentation.pdf
This data is subject to the IEA's terms and conditions: <https://www.iea.org/terms>

שיפור היעילות של שריפת דלקים פוסיליים 3.1.3

לפני שנדון בחלופות לדלקים פוסיליים ובהיבטים הסביבתיים הכרוכים בכך, חשוב לציין שאפשר לייעל משמעותית את השימוש בדלקים פוסיליים להפקת אנרגיה ולהוריד את פליטת המזהמים שלהם, כולל פד"ח. היעילות של תחנות כוח קובנציונליות השורפות דלקים פוסיליים להפקת חשמל נעה בין 30% ל-40% (כמות האנרגיה החשמלית המגיעה לצרכן, חלקי האנרגיה שהושקעה בשריפת הדלק, ועל פי רוב אינה כוללת את האנרגיה שהושקעה בכריית

2020 צריכת האנרגיה היא כ-70% מייצור האנרגיה עקב איבוד בדרך. בהפקת חשמל, האיבוד גדול עוד יותר, כפי שנראה בהמשך. מקור האינפורמציה מדוח של IEA: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>
¹⁴ IEA World Energy Balances ¹⁶ <https://yearbook.enerdata.net/electricity/share-electricity-final-consumption.html>
¹⁵ TWhr = 10¹² W*hour, 1Whr = 3,600 J. ¹⁷ IEA World Energy Balances <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
משנת 2008, מכל 50 יחידות אנרגיה שהושקעו ליצירת חשמל (רובן בתחנות IEA-והובלת הדלק). לפי חישובי ה

כוח פוסיליות ששורפות פחם, דלק נוזלי וגז ובנוסף גם תחנות כוח גרעיניות, הידרואלקטריות ואחרות), הגיעו לצרכן כ-16 יחידות אנרגיה, כלומר יעילות של 32% (איור 3.2). דרך אחת לשפר את יעילות הפקת החשמל היא באמצעות לסוגי דלק פוסיליים יעילים יותר (למשל גז במקום ¹⁸ מעבר . רוב אובדן האנרגיה הוא בשלב של המרת האנרגיה (פחם)

, התרמית לאנרגיה חשמלית בתחנת הכוח, והוא נובע מנצילות תרמודינמית נמוכה של המרת חום לחשמל. לכן בשנים האחרונות התחילו להשתמש ב"מעגל משולב" (¹⁹ power and heat combined or cycle combined) שבו היעילות עולה ל-26% (CHP), ²⁰ (בערך 85% מהחסם התרמודינמי של מעבר האנרגיה בתחנת הכוח – כלומר שאין עוד כר נרחב לשיפור הניצולת האנרגטית). ב"מעגל המשולב" נבנית תחנת כוח נוספת הפועלת באמצעות קיטור שנוצר מהמים שהתחממו מהחום שנפלט מהתחנה המקורית (השורפת דלק פוסילי) . הקיטור מניע טורבינות לייצור חשמל (גם כורי ביקוע גרעיני מתקדמים (ראו בהמשך) המגיעים לטמפרטורה גבוהה יאפשרו מעגל משולב ואמורים להגיע לנצילות של כ-80%). בנוסף ל"מעגל המשולב", המגמה בימינו היא לשפר גם את היעילות האנרגטית של משתמשי הקצה (שיפור היעילות של : מכשירים בשימוש ביתי ומשרדי, חימום מבנים (מעבר -מכוניות), ו מבוססות מנוע שריפה פנימית, בהן הניצולת העכשווית היא כ-LED) לשימוש במשאבות חום), תאורה (30%).

¹⁸ https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index_e.php ¹⁹ <https://www.ge.com/news/press-releases/ha-technology-now-available-industry-first-64-percent-efficiency> ²⁰ Pioro, I., Duffey, R. B., Kirillov, P. L., & Pioro, R. (2021). Pros and Cons of Commercial Reactor Designs: Part 2—Current Status and Future Trends in the World Nuclear-Power Industry and Technical Considerations of Nuclear-Power Reactors. In E. Greenspan (Ed.), Encyclopedia of Nuclear Energy (pp. 288-303). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819725-7.00131-8>

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

– איור: 3.1 צריכת אנרגיה לפי מקורות משנת 1800 ועד 2022. מקור
Our World in Data, <https://ourworldindata.org/energy-production>; Reprinted with permission.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

איור: 3.2 סכמה של איבוד אנרגיה בתהליך ייצור חשמל בדרך מתחנת הכוח אל הצרכנים. מקור – IEA (2008). <https://www.iea.org/reports/combined-heat-and-power>, CC BY 4.0; Reprinted with permission.

סילוק מזהמים ולכידת פד"ח 3.1.4

דרך נוספת לצמצום ההשפעה הסביבתית של שימוש בדלקים פוסיליים היא באמצעות סילוק המזהמים הנפלטים NO_x = חנקן (בעיקר, SO_2 -גופרית (בעיקר, כ, PM) בזמן שריפתם (ראו פרוט נוסף בפרק 10 - חלקיקים מרחפים ראו בהמשך). הטכנולוגיות לסילוק CO_2 (sequestration) ופד"ח, Hg מתכות רעילות, בעיקר כספית, NO_2 + NO כל המזהמים זמינות ומופעלות בתחנות כוח רבות ברחבי העולם. התקנתן מייקרת את מחיר השימוש בדלקים פוסיליים ולכן לרוב אינה נובעת מיוזמה עצמאית של הרשויות וחברות החשמל, אלא בעיקר מהפעלת לחץ של הציבור. ושל גופים ירוקים.

פיתוח הטכנולוגיה לסילוק פד"ח הוא נושא הנמצא כיום בחזית המחקר הסביבתי²¹ אולם הדרך עוד ארוכה עד, שסילוק הפד"ח יגיע לרמה הדרושה לא זין ההשפעה של הכמויות הנפלטות כיום על ידי האנושות (כ- 10 גיגה-טון²²

²¹ (1) Awolayo, A. N., Laureijs, C. T., Byng, J., Luhmann, A. J., Lauer, R., & Tutolo, B. M. (2022). Mineral surface area accessibility and sensitivity constraints on carbon mineralization in basaltic aquifers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **334**, 293-315; (2) https://eos.org/articles/device-made-for-the-moon-may-aid-in-carbon-sequestration-on-earth?utm_source=EosBuzz&mkt_tok=OTg3LUlHVCO1NzIAAAGHdO0O6xuu6RVgzi0vBm_ENQYEEY_CL4R0Glb79sInP7uT3i9uylwYp8d8An1zNUUGBrDp0VvI5YX0hHdexYc5495SI2fhVKA_23kLI; (3) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019) Gaseous Carbon Waste Streams Utilization: Status and Research Needs. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25232>; (4) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019) *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25259>; (5) Cai, J., Li, D., Jiang, L., Yuan, J., Li, Z., & Li, K. (2023). Review on CeO_2 -Based Photocatalysts for Photocatalytic Reduction of CO_2 : Progresses and Perspectives. *Energy & Fuels*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00120>²² GT – giga-tonne = 10^9 tonne, where 1 tonne = 1,000 kg.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

פחמן שהם כבשנה - 37 גיגה-טון²³ כיום בוחנים בצורה אקטיבית את החלופות השונות לסילוק פד"ח.²⁴

(פד"ח).

CCS - Carbon Capture and Storage) בצורה הכללית ביותר מחלקים את הנושא לשניים: (1) תפיסה והטמנה של פחמן הכוונה לתפיסה של פד"ח מזרם פליטה של תחנות- כוח (או של מפעלים או במהלך הפקת גז טבעי). (Storage - Dioxide Carbon) וקבורתו במאגרים גאולוגיים שונים או בים העמוק (ראו למטה). (2) סילוק פחמן אטמוספרי (CCUS - Carbon Dioxide Removal) הכוונה לתפיסת פד"ח מהאטמוספירה. יש גם המדברים על לכידת פחמן שימוש והטמנה (CDR Removal - storage and utilization, capture carbon) ומתייחסים הן ל (שחייבים לשקול, איקיימת ובכולן - וודאות לגבי הצלחת המעבר מניסויים בקנה מידה קטן ללכידת פד"ח בקנה מידה משמעותי. למשל, בשנים האחרונות התעורר ויכוח לגבי נטיעת עצים מכ פחמןסלקי מהאטמוספירה (במסגרת . CDR²⁵ בנוסף לקיבוע "ח על ידיפד צמחים, ניתן להטמין פד"ח בשלוש סביבות עיקריות: בתת- הקרקע, בפני השטח אפשרית (1) במאגרי נפט או גז טבעי מדולדלים (כפאזה) CCS או בים הפתוח. ההטמנה בתת- הקרקע (בעיקר)²⁶ סופר-, בעלת צמיגות של גז וצפיפות של נוזל) או כחלק מתגבור ההפקה של נפט או גז; (2) בשבבות נושאות מי קריטית תהום מלוחים (גם כן כפאזה סופר-קריטית); (3) במרבצי פחם בלתי מנוצלים. ההטמנה בתת- הקרקע (נעשית ביבשה או בשוליה (בתת-הקרקע של הסביבה הימית).

מתאפשרת באמצעות ריאקציות כימיות (מינרליזציה תעשייתית) של CDR והן CCS ההטמנה בפני השטח (הן

כגון פד"ח שיכולה להיעשות גם בעומק של כמה עשרות או

גזי עם חומרי גלם שונים²⁷ סלעים מאפיים ואולטרה-מאפיים

מאות מטרים (כלומר בתת הקרקע) וכן עם אפר פחם, סיגי מתכת ועוד. יש גם ספרות ענפה העוסקת בסילוק

על ידי הוספת מטחן של מינרלים סיליקטיים וגברת בליה שלהם בקרקעות חקלאיות (CDR) פחמן אטמוספרי

²⁹ על ידי פיזור פד"ח בעומק של אלפי מטר או CCS וצבירת. הטמנה בים הפתוח אמורה להיעשות (בעיקר

קרבוט בקרקעות

²⁴ (1) A wide portfolio of CDR technologies has been proposed, such as the application of biochar, enhanced weathering (EW), ocean fertilization (OF), bioenergy with carbon capture and storage (BECCS), and direct air carbon capture and storage (DACCS). In: Terlouw T., Bauer C., Rosa L., Mazzotti M. (2021) Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: a critical review. *Energy Environ. Sci.* 2021, 14, 1701–1721; (2) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2022. Carbon Dioxide Utilization Markets and Infrastructure: Status and Opportunities: A First Report. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26703>; (3) <https://www.haaretz.co.il/magazine/2022-10-06/ty-article-magazine/highlight/00000183-9eb8-d425-abef-defcc5bc0000>
²⁵ (1) Bastin et al., (2019) The global tree restoration potential. *Science* 365, 76–79. *versus* (2) Holl K.D. and Brancalion P.H.S. (2020) Tree 8232aba.science10.1126/ :DOI 580-581. (368 *Science* .solution simple a not is planting 6491)

²⁶ פאזה סופר-קריטית – פאזה שבה נוזל וגז נעשים זהים. היא מתקיימת בתנאי לחץ וטמפרטורה גבוהים יותר מ"הנקודה הקריטית" של החומר. במקרה של אטמוספירות 73.8 – צלזיוס 31° ב- נמצאת הקריטית הנקודה ח"פד.

²⁷ (1) Enhanced weathering (EW): Kelemen P. B., McQueen N., Wilcox J., Renforth P., Dipple G., Paukert Vankeuren A. (2020) Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO2 removal from air: Review and new insights. *Chemical Geol.* <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119628>; (2) Goll D. S., et al. (2021) Potential CO2 removal from enhanced weathering by ecosystem responses to 549–545, 14 *Geoscience Nature*. rock powdered

²⁸ וריכוזים גבוהים יחסית של ברזל ומגנזיום. בזלת היא דוגמא לסלע SiO₂ - (45-52%) סלעים מאפיים הם סלעים מגמתיים המכילים יחסית מעט צורן דו-חמצני מאפי נפוץ. סלעים אולטרה-מאפיים מכילים פחות מ 45% צורן דו- חמצני. הסלעים הנפוצים ביותר הם פרידוטיט – המורכב ממינרלי אוליבין ופיקרוקסן, ו דוניט – האריך כדור במעטפת נמצאים מאפיים-האולטרה הסלעים רוב. מאוליבין בעיקר המורכב

²⁹ (1) (NRC of the National Academies (2015) Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration; National Academies Press. DOI: 10.17226/18805. (2) National Academies of Sciences (2018) Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. (3) Taylor, L. L. et al. (2016) Enhanced weathering strategies for stabilizing climate and averting ocean acidification. *Nat. Clim Chang*, 6 (4), 402–406. (4) Van Straaten, P. (2006) Farming with rocks and minerals: Challenges and opportunities.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

על ידי צבירתו בקרקעית הים (לא כולל הטמנה בתת-הקרקע של הים) וכן על ידי הגברת הקליטה של פד"ח (בעיקר 9 נושאים אלה יידונו בפרק (alkalinization/fertilization ocean) על ידי האוקיאנוסים) CDR

הגברת היעילות של שריפת דלקים פוסיליים וסילוק פד"ח אמורים לתרום, ביחד עם הגברת השימוש במקורות אנרגיה חילופיים (בעיקר לייצור חשמל שהשימוש בו יגבר), את החלק הארי בהפחתת הפליטות של גזי חממה בעשורים הקרובים (איור 3.3). תמונה זו נכונה הן לגבי ייצור חשמל והן לגבי תעשיות עתירות אנרגיה כמו ייצור מלט, פלדה וכימיקלים (למשל ייצור אמוניה לדשן חקלאי). חשוב להדגיש שייצור מלט וייצור פלדה בשיטות המקובלות 4). פולטים פד"ח ללא תלות במקור האנרגיה (ראו פרק

איור 3.3: תרחיש המבוסס על הערכות מ-2020 לגבי הדרכים להפחתת פליטות פד"ח בסקטור CCUS - carbon capture, utilization and storage. האנרגיה

- מקור

IEA (2020) <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-in-the-transition-to-net-zero-emissions#abstract>. CC BY 4.0; Reprinted with permission.

עד כה התמקדנו בצרכני אנרגיה פוסילית נייחים (למשל תחנות כוח). השימוש באנרגיה בתחבורה יבשתית, ימית רוב האנרגיה הנצרכת על ידי כלי תחבורה מופקת ואווירית אחראי לכ-27% מצריכת האנרגיה ³⁰ משריפת הגלובלית

-דלקים פוסיליים (כ³¹ הן במכוניות עם מנועי שריפה פנימית והן במכוניות חשמליות המוטענות באמצעות, 75%) חשמל המופק ברובו בתחנות כוח השורפות דלק פוסילי. בנוסף, כל התחבורה האווירית ומרבית התעבורה הימית מונעות על ידי מנועים השורפים דלקים פוסיליים. מקורות נייחים מהווים בעיה סביבתית קשה יותר מבחינת סילוק

³⁰ This figure is a rough estimate based on many web-sites and reports over the years
<https://www.google.com/search?q=global%20energy%20consumption%20by%20sector&tbm=isch&hl=en&sa=X&ved=0CAEQv7IFahcKEwiAwc73zfP5AhUAAAAAHQAAAAAQEQ&biw=1920&bih=937&dpr=1>
³¹ IEA (2021) Global Energy Review p. 23.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
שיפור מבחינת פיזור מזהמי אוויר³² נרחיב את הדיון על הזיהום הסביבתי של השימוש בדלקים פוסיליים הן ממקורות.
10- נייחים והן ממקורות נייחים בפרקים 7, 8, 9 ו

מציאת תחליפים לדלקים פוסיליים – אתגרים ומחסומים 3.1.5

כיום נעשים מאמצים רבים להחליף את האנרגיה הפוסילית באנרגיות חילופיות. בהקשר זה ראוי לשים לב לאנליזות
בספרו מ-2017 הראה סמיל כי מעברים
מדומינסטיות של סוג אחד של מקור אנרגיה
(Smil) של ווסלב סמיל³³ לסוג

אחר אורכים זמן רב ("אינרציה של מקורות אנרגיה"). הוא דן בשלושה מעברים כאלה שהתרחשו בעבר: שריפת
עצים/פחם, פחם/דלק נוזלי, דלק נוזלי ופחם/גז, והראה שהשלמת מעבר נמשכת כ-50-75 שנה. לכן, הוא חושב
שהשאפה לעבור בעשורים הקרובים ממקורות פוסיליים למקורות מתחדשים היא מאד לא סבירה. בנוסף, הוא מצביע
על כך שעד כה הייתה מגמה של הגדלת ייצור אנרגיה לכל יחידת שטח (צפיפות אנרגיה גבוהה) ואילו המעבר
לאנרגיה סולארית או אנרגיית רוח צועד בכיוון ההפוך, כלומר שלמעבר זה תהיה טביעת רגל סביבתית גדולה מבחינת
שטחים פתוחים, שינוי שעלול להקשות על המעבר למקורות אנרגיה חילופיים. כמו כן, במאמר שפורסם ב- 2021
טענו חוקרים שמעבר מואץ לשימוש במקורות אנרגיה מתחדשים ייצור בעיות כלכליות ופיננסיות ויתרום לאי-יציבות .
של המשק³⁴ טוענים המחברים שלמעבר מהיר למקורות אנרגיה PNAS-מצד שני, במאמר שהתפרסם לאחרונה ב
חילופיים יש יתרון משמעותי לעומת מעבר איטי והדרגתי, ועל כך נרחיב בהמשך³⁵.

שהראו כי סיבה נוספת לקצב האיטי של (IMF) בשנים האחרונות נעשו מספר אנליזות על ידי קרן המטבע העולמית
המעבר לאנרגיות חילופיות היא הסובסידיה הגדולה שניתנת כיום לשימוש בדלקים פוסיליים³⁶, להערכת המחברים
בשנת 2017 הסתכמו הסובסידיות הישירות לכריה של דלקים פוסיליים בסכום של כ- 400 מיליארד דולר, כחצי אחוז
³⁷ air local ,warming global - externalities environmental) העולמי, ואילו ה"סובסידיות" העקיפות
היו כ- 5 טריליון דולר, השקולים ל-6.5% מהתמ"ג העולמי. המוטיבציה לסובסידיות (mortality-pollution מהתמ"ג
הללו נובעת כנראה משיקולים קצרי מועד של מתן תמריצים לכלכלה העולמית תלויה הצמיחה. סיבה נוספת לקושי
השימוש בדלקים פוסיליים הוא "פרדוקס³⁸ בהורדת , עליו נרחיב בפרק 4. בנוסף, המאבק שניהלו חברות האנרגיה
"ג'בונס

במעבר לאנרגיות חילופיות, כולל הסתרת מידע מהציבור, האט גם הוא את קצב הנטישה של דלקים³⁹

. פוסיליים

- ³² Melton N, Axsen J., Sperling D. (2016) Moving beyond alternative fuel hype to decarbonize transportation. *Nature Energy* 1, 1-10.
- Vaclav Smil (2017) *Energy and Civilization: A History*; MIT Press.
- ³⁴ Gourdel R., et al. (2021) The double materiality of climate physical and transition risks in the euro area. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3939895>
- ³⁵ Lesk C, et al. (2022) Mitigation and adaptation emissions embedded in the broader climate transition. *PNAS* 119(47):e2123486119. doi: 10.1073/pnas.2123486119. Epub 2022 Nov 21. PMID: 36399549; PMCID: PMC9704734.
- ³⁶ Coady D., Parry I., Le N-P., Shang B. (2019) Global Fossil Fuel Subsidies Remain Large: An Update Based on Country-Level Estimates. IMF .Paper Working
- ³⁷ מדד שהחליף את התל"ג לצורך השוואה בין רמת ההתפתחות הכלכלית של (PPP Capita Per GDP) תמ"ג (תוצר מקומי גולמי) לנפש מותאם כוח קנייה
- ³⁸ <https://www.oecd-forum.org/posts/the-jevons-paradox-and-rebound-effect-are-we-implementing-the-right-energy-and-climate-change-policies>
- ³⁹ Supran, G., Rahmstorf, S., & Oreskes, N. (2023) Assessing ExxonMobil's 2019 global warming projections. *Science* 379 (6628), eabk0063. <https://doi.org/doi:10.1126/science.abk0063>

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
 כבר בשנות (Hubbert) אי אפשר לסיים את הדיון על דלקים פוסיליים בלי לחזור ולדון בעבודתו של הוברט של המאה הקודמת הבין הוברט את הסכנה הטמונה בכלכלה החייבת לצמוח ⁴⁰ החמישים (גידול הנמדד באחוזים באופן מעריכי - %) (ראו הסבר מפורט בפרק ההקדמה). הוא טען שכמות דלק פוסילי המופקת מידי שנה תי ראה בסופו של דבר כמו עקומת פעמון, כאשר שיא העקומה מסמל את תחילת המחסור בדלק שיחייב חיפוש אחר משאב אחר שיניע את הכלכלה. זאת כיוון שהכלכלה העולמית מקדשת צמיחה מעריכית שמגדילה מצד אחד את הביקוש לחומרי גלם ולמקורות אנרגיה מידי שנה, ומצד שני מתבססת על דלק שהוא משאב מתכלה שכמותו סופית. מאוחר אחרים שניתן להרחיב את האנליזה של הוברט לכל משאב מתכלה, כמו מחצב של ⁴¹ יותר הראו. האנליזה של חומר מסוים הוברט זכתה לתומכים רבים אך גם לביקורת לא מעטה. אחת הביקורות נבעה מהעובדה ששיטות ההפקה של דלק (ושל מחצבים אחרים) אינן קבועות ומשתפרות כל הזמן, מה שמקשה על היכולת לבא את תזמון ההגעה לשיא

ההפקה ואת הכמות הכללית אותה ניתן ⁴²

. להפיק

תחליפי דלקים פוסיליים 3.2.

הדיון שלנו על החלופות לאנרגיה פוסילית יתמקד רק במקורות אנרגיה שיש להם יכולת לתרום משמעותית למשק TW-20 האנרגיה העולמי (כלומר, אחוז משמעותי מ ⁴³), ועל כן נתמקד במקורות המיוצרים כיום; טבלה 2.3 וכן

הבאים: שריפת גרעינית (ביקוע והיתוך), אנרגיה גאותרמית, הידרו-אלקטרית, ביו-דלקים, סולארית. סקירה מקיפה יותר של נושא האנרגיות החלופיות ואגירת אנרגיה נמצא באתר של ⁴⁴ ורוח. בסוף הפרק נדון אוניברסיטת סטנפורד בקצרה בהפקת מימן ממאגרים גיאולוגיים, תחום הנמצא אמנם בחיתוליו אולם נושא בחובו פוטנציאל גדול מאד לשנות מן היסוד את משק האנרגיה העולמי

מחיר ייצור אנרגיה על ידי החלופות השונות הוא מדד חשוב שיש לבחון כדי להעריך את הפוטנציאל הגלום בכל אחת מהן. ראוי לציין, שמחיר ייצור האנרגיה תלוי מאד בפיתוחים טכנולוגיים (ולכן יש לבחון אותו מידי זמן) אבל גם בצורת החישוב. על מנת לבצע חישוב מושכל של עלות ייצור אנרגיה (במקרה שלפנינו - חשמל) מקובל להשתמש במדד ⁴⁵ המתחשב בהוצאות הקמה, תפעול, תחזוקה ודלק ובכמות החשמל (Electricity of Cost Levelized (LCOE - ה-

של מקורות אנרגיה פוסיליים ואחרים LCOE המופקת במהלך כל שנות התפעול. אנליזה עדכנית של ערכי

מתפרסמת מידי פעם. דוגמא לחישוב כזה

⁴⁰ "Our principal constraints are cultural. During the last two centuries we have known nothing but exponential growth and in parallel we have evolved what amounts to an exponential-growth culture, a culture so heavily dependent upon the continuance of exponential growth for its stability that it is incapable of reckoning with problems of non growth"; M. King Hubbert, in Exponential Growth as a Transient Phenomenon in Human History. ⁴¹ The Hubbert peak theory is based on the observation that the amount of oil under the ground in any region is finite, therefore the rate of discovery which initially increases quickly must reach a maximum and decline. Although Hubbert peak theory receives most attention in relation to peak oil production, it has also been applied to other natural resources.

⁴² THE HUBBERT CURVE: ITS STRENGTHS AND WEAKNESSES, by J.H. Laherrère e-mail: j.h.laherrere@infonie.fr. Version proposed to Oil and Gas Journal on Feb 18 2000, <https://web.archive.org/web/20181009083419/http://www.dieoff.org/page191.htm> ⁴³

<https://www.sciencedirect.com/referencework/9780128197349/comprehensive-renewable-energy> ⁴⁴
<https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/WWSSBook/WWSSBook.html> ⁴⁵

Where, I_t = investment expenditures in the year t ; M_t = operations and maintenance expenditures in the year t ; F_t = fuel expenditures in the year t ; E_t = electrical energy generated in the year t ; r = discount rate; n = expected lifetime of system or power station.

45

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
 כפי שמוצג באיור 3.4 חלק משיטות השימוש באנרגיה סולארית ובאנרגית רוח, מתחרות עם דלקים פוסיליים בעלות ייצור חשמל, בעיקר בגלל פיתוחים טכנולוגיים בעשור האחרון. עם זאת, חשוב להדגיש שהעלות איננה כוללת עלות אגירת אנרגיה וקווי הולכה ארוכים במיוחד (אשר לרונטניים בעיקר לאנרגיות מתחדשות). כמו כן ראוי לציין שההערה באיור 3.4 לגבי העדר סובסידיות מתייחסת כנראה רק לסובסידיות ישירות. מעבר לעלות, ישנם כיום מחקרים רבים של מערכת הספקת (resilience) המצביעים על כך שאנרגיות חליפיות משפרות את העמידות ⁴⁶

. החשמל

ראשית נדון באנרגיה גרעינית (היתוך וביקוע) שאיננה מבוססת על מקורות אנרגיה מתחדשים. לאחר מכן נסקור אנרגיה גאותרמית, אנרגיה שמקורה בביו-דלקים ואנרגיה הידרו-אלקטרית הנמצאות בשימוש כבר זמן רב, אבל כפי שנראה בהמשך, הפוטנציאל שלהן קרוב למיצוי. נסיים עם אנרגית רוח ואנרגיה סולארית, שתרומתן למאזן האנרגיה כיום העולמי עדין קטן, אולם הפוטנציאל שלהן גדול.

דולר למגה-וואט שעה) כפי שחושב על ידי (LCOE) 3: 4. איור 47. LAZARD.
<https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-levelized-cost-of-storage-and-levelized-cost-of-hydrogen/>

⁴⁶ <https://www.energy.gov/eere/energy-resilience> ⁴⁷ <https://www.lazard.com/>

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

טבלה: 3.2 הערכה של נתוני הספק המופק כיום, וש ניתן להפיק באמצעים הקיימים מכל אחד ממקורות האנרגיה החילופיים. מקורות המידע בגוף הטבלה (טור רביעי מימין). ההבדלים בין ההערכות ממקורות שונים נובעת ⁴⁸ החישוב (<https://ourworldindata.org/energy-substitution-method>). מצורת

הערות		הספק אנרגיה פוטנציאלי	הספק אנרגיה 2021	
		TW	TW	
בהנחה שהפוטנציאל בארה"ב מייצג את שאר MIT מחושב על פי הדו"ח של IREN = Int. Renew. Energy Agency היבשות.	Geothermal Systems USA MIT 06; https://www.irena.org/geothermal	1.7	0.01	תרמית-גאז
יש טווח רחב מאד בהערכות, ראו פירוט בטקסט	M. Hoogwijk et al. (2003) Biomass and Bioenergy 25 119–133 & IEA Bioenergy 07 OurWorldinData 2022: https://ourworldindata.org/grapher/energy-consumption-by-source-and-region?stackMode=absolute		0.13 4.9	ביו-אנרגיה
2020. רק כשליש מהמאגרים המותקנים הפיקו חשמל ב	2022 Association Hydropower International		0.5 1.3	הידרו-חשמל
יעילות של 8% שטח זה, PV, 910 אלף קמ"ר באזורי מדבר עם פאנלים של מהווה 0.62% משטח היבשות	https://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/ ; OurWorldinData 2022; https://ourworldindata.org/grapher/energy-consumption-by-source-and-region?stackMode=absolute ; https://www.irena.org/solar	20	0.1/0.3	סולארי

רוח	0.2/0.56	3.2	global wind report GWEC 22; OurWorldinData 2022: https://ourworldindata.org/grapher/energy-consumption-by-source-and-region?stackMode=absolute ; https://www.irena.org/wind	et - הפונטציאל כנראה גדול יותר C.1.5 תחזית לשנת 2030 ע"מ לעמוד ביעד Lu al., (2009) PNAS,106, 10933–10938
גרעינית - ביקוע	0.3 ?20		Nuclear Power in the World Today https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx	עד לאחרונה היתה התנגדות חזקה בציבור, אם כי לאחרונה יש הכרה גוברת בנחיצות אנרגיה גרעינית לפתרון הבעיה. על מנת להפוך למקור אנרגיה מרכזי יש לעקוב אחר העקרונות המופיעים בטקסט
גרעינית - היתוך	0			זהו מקור האנרגיה המבטיח ביותר, אולם הוא עדין לא ישים. ראו טקסט

אנרגיה גרעינית – היתוך 3.2.1.

היתוך גרעיני מתרחש כאשר גרעינים של שני אטומים מתנגשים בעוצמה אדירה וכתוצאה מכך מתמזגים לגרעין של אטום חדש, הכבד מעט פחות מסכום משקלם של שני האטומים לפני ההתנגשות. הפרש המשקל הופך לאנרגיה, על פי המשוואה המפורסמת של אלברט איינשטיין. היתוך גרעיני הוא מקור האנרגיה של השמש ושל כוכבים אחרים ובני האדם הצליחו לרתום אותו לייצור פצצות מימן על מנת לקיים מאזני הרתעה בין מדינות. אולם היתוך גרעיני עדיין אינו מהווה מקור אנרגיה זמין להפקת חשמל. הניסיון להפיק אנרגיית היתוך גרעיני מתמקד בשתי גישות עיקריות פוטנציאל ⁴⁹ (2) (ו) ITER – המתקן המרכזי נמצא בדרום צרפת - Tokamak) שלהן : (1) הכלה מגנטית של פלסמה (Livermore) המתקן הגדול ביותר נמצא בקליפורניה, ב- ICF) מסחרי הכלה אינרציאלית.

הדלק המשמש ליצירת תהליך ההיתוך מכיל שני מרכיבים עיקריים: דאוטריום וטריטיום. דאוטריום הוא איזוטופ יציב

(deuterium) של מימן (H^2 , tritium) מימן ⁵⁰ דאוטריום מופק ממים שם .
 H^3 , טריטיום הוא איזוטופ רדיואקטיבי של ³).

מקור הטריטיום מורכב יותר, כיוון שהוא רדיואקטיבי ומתפרק באופן 0.015% - הוא נמצא בריכוז נמוך של כ ספונטני. אמנם ניתן להשתמש רק בדאוטריום לתהליך ההיתוך, אך הטמפרטורה הדרושה לאתחול היתוך גרעיני במקרה כזה היא כמיליארד מעלות, מה שמאד מקשה (או אולי אף מונע) אתחול של כורי היתוך גרעיני. על מנת לאתחל את ההיתוך הגרעיני בטמפרטורה שניתן להפיק כיום בכורי היתוך (כ-150 מיליון מעלות), יש להשתמש גם בטריטיום.

בין -אנרגיה אינו כולל ⁴⁹ <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> כמו כל איזוטופ רדיואקטיבי, טריטיום אינו יציב ומתפרק כל הזמן. לטריטיום יש זמן מחצית חיים של ⁴⁸ שימושים מסורתיים של שריפת חומרי בעירה מהצומח מכמותו – אחרי 12.5 שנה תישאר מחצית, אחרי 25 שנה יישאר רבע, אחרי 37.5 שנה תישאר שמינית ⁵⁰ 12.33 שנה (כלומר כל 12.5 שנים הוא יורד למחצית). (מכמותו הראשונית, וכן הלאה

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

אולם מסתבר שקיים מחסור בטריטיום ומכיוון שקשה לייצר אותו, המחסור רק יגבר בשנים ⁵¹, יחד עם זאת . הקרובות ברור שהמחסור בטריטיום הוא בעיה של אתחול, משום שברגע שיהיו כורי היתוך פעילים, הם ייצרו טריטיום בכמויות מספיקות להמשך הפעלתם (טריטיום הוא אחד ממוצרי ההיתוך ומשתחרר בערך במחצית מההיתוכים, ראו למטה). למעשה, ניתן לייצר טריטיום גם בחלק מכורי הביקוע (ראו למטה) שפועלים כבר כיום. איננו פתרון מושלם והוא עלול לייצר כמות ⁵² חשוב לזכור שהיתוך גרעיני . תוצר הריאקציה העיקרי של היתוך

גרעיני הוא היום שהוא גז אציל, לא רדיואקטיבי שיצטרב באטמוספירה בכמויות קטנות יחסית לכמותו המקורית. אולם, כפי שצוין קודם תהליך ההיתוך מייצר גם טריטיום (שהוא רדיואקטיבי) עקב בליעת נייטרון בגרעין של ליתיום. הנמצא במעטפת של הכור. מכיוון שקשה למנוע דליפות של טריטיום ממעטפת הכור, הוא עלול להיכנס למערכות ביולוגיות. בנוסף, הניטרונים שנפלטים מן ההיתוך הגרעיני נבלעים בחלקם בחומרי מבנה של כור ההיתוך והופכים אותם לרדיואקטיביים.

כלומר השקיעו יותר אנרגיה באתחול ההיתוך (point breakthrough), עד לאחרונה לא הגיעו לנקודת פריצת הדרך מאשר האנרגיה שהתקבלה המ תהליך עצמו. זאת למרות עשרות שנים של מחקר ופיתוח, כאשר האתגר העיקרי בהיתוך גרעיני מבוקר היה למנוע אבדן מהיר של היונים (אטומים עם מטען חשמלי) של הדלק המימני עם האנרגיה שהשקיעו בחימום. המאמץ הממושך הזה הושקע משום שברור לכל העוסקים בנושא אנרגיה, שלהיתוך גרעיני יש פוטנציאל כמעט בלתי מוגבל לספק אנרגיה נקייה לכלל האנושות לזמן בלתי מוגבל. לאחרונה התפרסמו מספר מאמרים הנוטעים תקווה שאנחנו על סיפה של פריצת דרך ושה יתוך גרעיני עומד לממש את התקוות שתלו בו, וכתוצאה מכך גם חברות מסחריות נרתמו למאמצי הפיתוח⁵³, גם המחקר הממשלתי הבסיסי ממשיך להתקדם ולאחרונה נדמה שמחקר של 60 שנה מתחיל להניב תוצאות ושיש פריצת דרך בתחום ושהגענו לנקודת

ה- . אם זאת ברור שיש עוד דרך ארוכה עד שהיתוך גרעיני יהיה שחקן מרכזי point⁵⁴ במשק האנרגיה breakthrough

העולמי⁵⁵

⁵¹ Clery D. (2022) A shortage of tritium fuel may leave fusion energy with an empty tank. Science 376, 1372-1376; "The world's only commercial sources are the 19 Canada Deuterium Uranium (CANDU) nuclear reactors, which each produce about 0.5 kilograms a year as a waste product, and half are due to retire this decade. The available tritium stockpile—thought to be about 25 kilograms today—will peak before the end of the decade and begin a steady decline as it is sold off and decays, according to projections in ITER's 2018 research plan." ITER "is one of the most ambitious energy projects in the world today. In southern France, 35 nations are collaborating to build the world's largest tokamak, a magnetic fusion device that has been designed to prove the feasibility of fusion as a large-scale and carbon-free source". stars and Sun our powers that principle same the on based energy of

- יש גם מספר קטן של חברות הזנק שעובדות על מיזוג של פרוטונים וגרעינים של בורן-11 שלא פולט נייטרונים ולא מייצר טריטיום. זה נקרא

⁵² NEUTRONLESS FUSION⁵³ Ball P. (2021) The race to fusion energy. Nature 599, 362-366. (1) https://www.science.org/content/article/historic-explosion-long-sought-fusion-breakthrough?utm_source=sfmc&utm_medium=email&utm_campaign=DailyLatestNews&utm_content=alert&et rid=644476212&et cid=4528004; (2) https://www.nytimes.com/2022/12/13/science/nuclear-fusion-energy-breakthrough.html?campaign_id=60&emc=edit_na_20221213&instance_id=0&nl=breaking-news&ref=cta®i_id=185025816&segment_id=116850&user_id=120f7b8cbcbdc0cbf2de99d57de9e990; (3) <https://www.haaretz.co.il/science/2022-12-13/ty-article-magazine/.premium/00000185-089f-d11b-a1ff-1fdf319b0000>; (4) <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.adg2854>; (5) David, K. (2022) National Ignition Facility surpasses long-awaited fusion milestone. Physics Today. <https://doi.org/10.1063/PT.6.2.20221213a> ⁵⁵ "While the Livermore team achieved what researchers call a scientific break-even or energy gain, it did not achieve an engineering break-even: The lasers used in the experiment required about 300 megajoules of energy to fire the 2 megajoules of energy into the experiment. Thus, they need to achieve a 100-fold more power generated by fusion before this is really a breakeven exp."

. אחד הנושאים הטעונים ביותר בדיון על אנרגיות חלופיות לדלקים פוסיליים, הוא השימוש באנרגיית ביקוע גרעיני סקירה מקיפה של הנושא נמצאת באתרים של משרד האנרגיה האמריקאי והאגודה הבינלאומית לאנרגיה גרעינית⁵⁶

המייצר ^{233}U או ^{239}Pu , ^{235}U - השיטה מתבססת על בליעת נויטרון בגרעין של איזוטופ בקיע כמו

תגובת .

תהליך

הביקוע

משחרר ונ

יטרונים אשר

מאפשרים

תגובת

שרשרת של

ביקועים

גרעיניים,

תגובה

⁵⁷ הגורמת

שרשרת

פל ליטת חום רב. החומר הבקיע היחיד שנמצא בטבע המייצר תגובת שרשרת הוא איזוטופ של אורניום שמשקלו

235 (. כיוון שהאורניום המצוי בטבע מכיל רק כ- 0.7% אורניום, ^{235}U

^{235}U צריך להעשיר את ריכוזו באורניום עד לריכוז של

מספר אחוזים כדי להשיג תגובת שרשרת של ביקועים הדרושה להפעלת כורים המקוררים במים – מרבית כורי-הכוח

יכולים להשתמש באורניום טבעי). כיום פועלים בעולם כ- O_2D - הפועלים כיום (כורים המש תמשים במים כבדים

440 כורים גרעיניים לייצור אנרגיה שרובם כבר בשימוש עשרות שנים. יש כ- 55 כורים נוספים בשלבי בניה והם

להיכנס לפעולה בשנים הקרובות, אם כתוספת או כתחליף לחלק מהכורים הישנים⁵⁸ אמורים . במהלך השנים היו

(- שיושבתו מספר תאונות בכורים גרעיניים שעוררו התנגדות גדולה בציבור לשימוש באנרגיה גרעינית לייצור חשמל

ב, 1979- צ'רנוביל ב- 8619 , ופוקושימה Island Mile⁵⁹ חשוב לציין בהקשר זה שרוב מקרי המוות היו (. Three

2011-

בצ'רנוביל, אבל גם בפוקושימה היו מספר נפגעים. יחד עם זאת, מספר הנפגעים ליחידת חשמל המופק משימוש

בדלקים פוסיליים גדול בהרבה מאשר ליחידת חשמל המופק ב כורי ביקוע. אנחנו נחזור לנקודה זאת בפרק

10.

מרבית הכורים הפעילים כיום מתבססים על אורניום מועשר (כלומר, הם מנצלים פחות מ- 1% מהערך האנרגטי

של האורניום במכרה, שרובו מכיל אורניום 238) ובכולם מצטברים שני סוגים של תוצרי לוואי רדיואקטיביים בעלי .

(waste -U trans & products) פוטנציאל גדול למפגעים סביבתיים⁶⁰ יחד עם זאת חשוב לציין שאין בספרות

fission (

דיווחים על נזקים בפועל מפסולת גרעינית, ורוב החשיפה של בני אדם לקרינה רדיואקטיבית מגיעה מדיאגנוסטיקה

רפואית וטיפולים בהקרנות שתועלתם עולה על נזקם. כמו כן, כרייה של אורניום יוצרת מפגעים סביבתיים עקב

Cs, ^{137}Cs , ^{135}I , ^{129}Pd , ^{107}Tc , ^{99}Zr , ^{93}Se , ^{79}I יעברו הטמנה של כמה מאות שנים שיעברו או טיפול שיהפוך

אותם למסוכנים פחות ⁶⁷ חומר גלם – הימנעות או הפחתה משמעותית של השימוש באורניום מועשר, בעיקר (3). משום שהוא נדיר וכרייתו גורמת ליותר נזק סביבתי, ויש סיכוי שזילוג לידיים לא רצויות, כגון ארגוני טרור. תחליפים , (מוצעים: אורניום רגיל בשילוב עם פלוטוניום מכורים ישנים , תוריום ²³²) ⁶⁸ ובעדיפות גבוהה – פסולת רדיואקטיבית

מבין עשרות החברות (. waste U-trans & uranium depleted של כורים מהדורות הקודמים (בעיקר Th TERRAPOWER המסחריות הפועלות כיום בפיתוח כורי ביקוע מתקדמים ובטוחים, בחרתי לציין את חברת מבטיחה במיוחד והיא נמצאת כיום בעיצומו של הקמת כור גרעיני מתקדם בארצות הברית ⁶⁹ . שבבעלותה טכנולוגיה

⁶³ כור דוגר מקיים תגובת שרשרת של ביקועים גרעיניים באופן המאפשר יצירת יותר גרעינים בקיעים חדשים מאשר אלה שנצרכו בתגובת השרשרת. תהליך זה מושג בזכות שימוש במתכת נוזלית לספיגת האנרגיה הגרעינית המשתחררת בליבת הכור. כתוצאה מהשימוש במתכת נוזלית, האנרגיה הקינטית של הניטרונים הגורמים לביקוע גדולה בערך פי מיליון מהאנרגיה הקינטית של ניטרונים בכורים מקוררי מים ומאזן הניטרונים בכור דוגר הוא כזה שמכל ביקוע נותרים כ-2.1).

U ניטרונים לבליעה בדלק (מתוכנן 1 דרוש לשמירה על תגובת השרשרת ומותרים כ-1.1 ניטרונים לצורך הפיכת ^{238}Pu ל ^{239}Pu זאת בניגוד לכורים מקוררי מים 150 שבהם נוצרים כ-1.6 ניטרונים על בליעה של כל ניטרון, וכמות החומר הבקיע שנוצרת קטנה מהחומר הבקיע שנצרך. בכורים דוגרים אפשר לייצר כמעט פי

[smrs-reactors-modular-small-are-what/news/newscenter/org.iaea.www://https](https://www.smr-reactors-modular-small-are-what/news/newscenter/org.iaea.www://https), reactors modular Small - SMR ⁶⁵ pdf1.R Res-

יותר חשמל מכל ק"ג ⁶⁴ <https://www.gov.energy/www://https> Hi Draft Sheet-Fact Types-Reactor-Advanced74/f/2020/05/files/default/sites/gov.energy.www://https ⁶⁴ אורניום טבעי שכורים – אהוד גרינשפן, דברים בעל פה. ההליום וגם מלח מותך יכולים לשמש גם כחומר קירור בכורים תרמיים שאינם דוגרים. כורים אלה ⁶⁶ צורכים אורניום מועשר והם בטוחים ביותר. חלקם משתמש

⁶⁷ Sun X. Y., et al. (2022) Transmutation of long-lived fission products in an advanced nuclear energy system. *Scientific Reports* **12**, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06344-y> ⁶⁸ <https://www.power-eng.com/2019/08/13/is-thorium-the-fuel-of-the-future-to-revitalize-nuclear/#gref> ⁶⁹ (1) <https://www.terraenergy.com/>; (2) Gilleland, J., Petroski, R., & Weaver, K. (2016) The Traveling Wave Reactor: Design and development. *Engineering*, **2**(1), 88-96. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.024> של בצורה הנארז בטוח בדלק PEBBLES.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

הכור הזה הוא דוגמא ל"כורים דוגרים" (כורים מהירים) מהדור הרביעי, המתבססים על מספר ⁷⁰ קירור (1):

פרמטרים הכור נעשה באמצעות נתון מתכתי הבולע חלק קטן יותר מהאנרגיה של הניטרונים (בהשוואה עם כורים שמשמשים בחומר מאיט ניטרונים כמו מים, מים כבדים וגרפיט) כך שהאנרגיה הקינטית הממוצעת של הניטרונים הגורמים לביקוע גדולה יותר. אנרגיית הניטרונים מאפשרת לייצר יותר חומר בקיע מכמות החומר הבקיע שהוטענה בתחילת התהליך, תוך כדי הפקת אנרגיה גרעינית ליצירת חשמל. (2) (חומר הדלק מכיל 90% אורניום מדולל

של מפעלי ההעשרה של אורניום, ^{238}Pu) ו-10% פלוטוניום (²³⁹ פסולת של כורים – waste U-trans - (הפסולת

ישנים). במילים אחרות, הדלק של הכור מגיע מפסולת של כורים ישנים. לאחר ש-10% מהדלק משתתף U כלומר בתהליכי ביקוע, מוציאים את הדלק מהליבה (כיוון שהתכונות המכניות של הדלק נפגעות בגלל ההקרנה), טוענים

דלק חדש וחוזרים לעבוד בהספק מלא. (3) הפסולת של הכור ממוחזרת. את הדלק שהוצא מהליבה מקררים

ומטפלים בהם כפי שצוין. את (products fission) בבריכות מים ולאחר שהתקרר, מפרידים את תוצרי הביקוע

האורניום והפלוטוניום מערבבים מחדש ביחס של 9/1 . התהליך מחייב הוספת אורניום מדולל או טבעי, משום

שהכור, כשמו כן הוא – "דוגר" ועל כן מייצר יותר פלוטוניום ממה שהיה בו בהתחלה. בצורה זו ניתן למחזר את הדלק

טוענת שיש כיום כמות מספקת של TERRAPOWER הרבה פעמים, כל עוד יש אורניום לא מועשר להוספה. חברת

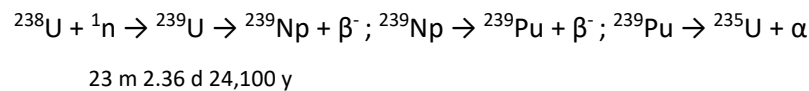
פסולת גרעינית לייצור חשמל בכוריה למשך 400 שנה ויותר לכל האנשיות ברמת החשמל שנצרכה בארצות הברית

הן: גרעין של TERRAPOWER הריאקציות הגרעיניות המתרחשות ב"כור דוגר" מהסוג של חברת ²³⁸ בולע נויטרון והופך ²³⁹ Np איזוטופ מאד לא יציב, ש פולט ספונטנית חלקיק בטא (אלקטרון) והופך לגרעין של - ²³⁹ אשר U פולט ספונטנית חלקיק בטא והופך ²³⁹ Pu-פלוטוניום (239). בנוסף, ה) ²³⁹ פולט ספונטנית חלקיק U לגרעין של אלפא (גרעין של הליום) ²³⁵ בניגוד לכל המעברים הקודמים המתרחשים תוך דקות או מספר . Pu לגרעין הבקיע U והופך לגרעין הבקיע

Pu ימים, הדעיכה של ²³⁹ U-²³⁵ איטית הרבה יותר: תוך 24,100 שנים תתפרק מחצית מכמות הפלוטוניום (זמן מחצית החיים הוא 24,100 שנים), אך במקומה נקבל חומר בקיע יעיל אחר שיוכל לשמש את הדורות הבאים .

years=y ,days=d - ובהצגה מקובלת בספרות המקצועית (זמן מחצית חיים

,minutes=m : (



3.2.3 אנרגיה גאותרמית

אנרגיה גאותרמית כמקור למים חמים נמצאת בשימוש בני אדם כבר אלפי שנה, אולם השימוש באנרגיה גאותרמית להפקת חשמל הוא ניסיון חדש יחסית. הרעיון מאחורי הפקת אנרגיה גאותרמית הוא פשוט. הטמפרטורה של כדור הארץ עולה עם העומק, וצריך רק לאתר מקומות בהן קצב עליית הטמפרטורה (גרדיאנט הטמפרטורה) עם העומק הוא גדול (או חריף), על מנת לה ימנע מסיבוכים טכניים ועלות גבוהה הכרוכים בקידוחים עמוקים. אתרים כאלה נמצאים במקומות בהם גוף חם של סלע מגמתי (מחדר ⁷¹ נמצא סמוך יחסית לפ ני השטח (למשל באזורים של מגמתי

פעילות וולקנית). באתר המתאים קודחים לעומק שבו הטמפרטורה מגיעה לכמה מאות מעלות צלזיוס ומחדירים

⁷¹ ברקלי באוניברסיטת גרעינית להנדסה במחלקה אמריטוס פרופסור, גרינשפן מאהוד שהתקבל חומר על מתבסס זה בחלק הדיון. ⁷⁰

https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%9E%D7%97%D7%93%D7%A8_%D7%A4%D7%9C%D7%95%D7%98%D7%95%D7%A0%D7%99

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

לעומק ⁷² Flash) ההופכים לקיטור שאותו שואבים ומפעילים באמצעותו טורבינות להפקת חשמל ,

⁷⁴ מיסהקידוח , אולם לא נדון בהן במסגרת זאת משום שתרומתן

(plants steam ⁷³ ישנן שיטות נוספות להפקת אנרגיה תרמית .

באמצעות אנרגיה גאותרמית 0.013- TW למשק האנרגיה העולמי עדין נמוכה יחסית. בשנת 2019 הפיקו בעולם כ העריך MIT-וצוות מ ⁷⁵ 0.1 TW-שפוטנציאל ההפקה של אנרגיה זו בארצות הברית לבדה, עומד על כ טבלה 3.2), אם כי גם הוא (1.7- TW ההפקה של ארצות הברית אפ שר להעריך שפוטנציאל ההפקה העולמי הוא כ עדיין רחוק מאד מצריכת האנרגיה של האנושות. גם מבחינה סביבתית יש מספר בעיות עם אנרגיה גאותרמית.

האנרגיה הגאותרמית היא מקור אנרגיה מתכלה ולאחר מספר שנים של פעילות באתר הפקה, מקור החום בעומק הקרקע מתקרר ויש להעמיק את הקידוח או לבחור אתר אחר. כמו כן, החדרת מים בכמות גדולה לעומק הקרקע ראו – FRACKING עלולה לעורר פעילות סיסמית ולגרום לרעידות אדמה (כך גם קורה באתרים שבהם מתבצע יותר ממי תהום רגילים ויכולים) (corrosive) דלקים (פוסיליים) ולזהם מי תהום, משום שהמים המחוממים מאכלים לשחרר יסודות רעילים הנמצאים בתת הקרקע. יתרון האנרגיה הגאותרמית בכך שאינה משחררת פד"ח עלולים להיפלט מהמים (S_2H) לאטמוספירה אם כי, יש חשש שכמויות קטנות של גזים כמו מתאן ומימן גופרתי (IRENA) שנשאבו לעומקים גדולים, כפי שעולה מסקר שביצעה הסוכנות הבינלאומית לאנרגיות מתחדשות ושהוזכר בראשית תת הפרק הזה. יתרון נוסף הוא שטביעת הרגל האקולוגית של תחנות גאותרמיות (מבחינת) שטחים הדרושים לפעילותה, כמות חומרי הגלם הנחוצים להקמתן אם לא קודחים ל וע מקים גדולים מאד) היא נמוכה יחסית.

קיים מקור נוסף לאנרגיה גאותרמית שאינו קשור להפקת חשמל, אלא מתבסס על העובדה שהקרקע בעומק של מטרים ספורים שומרת על טמפרטורה יציבה לאורך השנה ומאפשרת לחמם בחורף מבני מגורים ותעשייה ולקררם בקיץ. אמנם החימום והקירור צריכים לעיתים תגבור ממקורות נוספים, אולם הם מצמצמים משמעותית את צריכת האנרגיה של המבנים ויש להם פוטנציאל גדול ⁷⁶ heat geothermal " בספרות המקצועית נקרא המקור הזה . והוא הולך ותופש תאוצה במקומות שונים בעולם כאמצעי עזר להפחתה של צריכת האנרגיה " pump ביותר במבנים.

3.2.4 אנרגיה הידרו-חשמלית

אנרגיה הידרו-חשמלית מבוססת על שימוש במים הזורמים ממקום גבוה למקום נמוך לע מנת להפיק אנרגיה. אפשר לעשות זאת בשני אופנים: 1) (אגירת מים באמצעות סכרים ו-2) ללא אגירה כלומר, בהסתמך על זרם מים שיורד באופן טבעי. השיטה השנייה נמצאת בשימוש כבר אלפי שנים , והיא גם מתאימה להפקת חשמל בקנה מידה קטן 0.5-ליטובים קטנים או בתים בודדים . מבין האנרגיות החילופיות, הידרו-חשמל היא אחת המרכזיות והיא תרמה כ-

בשנת 2020 (טבלה TW

3.2).

⁷² – לעיתים משתמשים בנזל אורגני שמחומם ע"י הקיטור להפעלת טורבינות. מומחיות של חברת אורמט הישראלית ⁷³ <https://www.ornat.com/en/home/a/main/> ⁷⁴ <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Geothermal-energy> (1) ⁷⁵ MIT-led interdisciplinary panel (2006) The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century, Enhanced geothermal systems, (2) Binary cycle power plants, (3) Dry-steam power plants, and (4) Geothermal heat pumps. ⁷⁶ The US Environmental Protection Agency (EPA) has called ground source heat pumps the most energy-efficient, environmentally clean, and cost-effective space conditioning systems available. Heat pumps offer significant emission reductions potential, particularly where they are used for both heating and cooling. https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_source_heat_pump.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
לאנרגיה הידרו-חשמלית יש יתרונות רבים כיוון שהיא מאפשרת לווסת את הספקת האנרגיה בהתאם לצרכים ולא בהתאם למצאי והיא גורמת מעט זיהום אטמוספרי וזיהום קרקעות. אולם תחנות כוח הידרו-אלקטריות גדולות מחייבות הצפה של אזורים נרחבים עם כל הנזק החברתי (העתקת ישובים) והאקולוגי הנלווה וכן שחרור גזי חממה

משבשים את מהלכם הרגיל של הנהרות בהם הם נבנים, מפריעים לתנועת דגים ובעלי חיים מימיים אחרים ולתנועת כלי שיט, משפיעים על הדינמיקה של תנועת סחף במורד הזרם ועלולים לגרום להמלחת קרקעות ולהגברת הסחף. במורד הנהר ובחוף הים ⁷⁸ במקרים רבים מורד הנהר המושפע מאגירת המים נמצא במדינה אחרת מזאת שבה בנוי הסכר, והמדינה שבמורד הנהר היא זו שסובלת מההשלכות שצוינו לעיל (מחסור במים, מחסור בחומרי סחף, ועוד). זהו המקרה למשל באגן ההיקוות של הקולורדו העובר משטחה של ארצות הברית לשטח מקסיקו, בסמוך לנקודת השפך אל הים ⁷⁹ סוגייה זו עלתה לאחרונה במלוא חריפותה עקב תוכניותיה של אתיופיה להפעיל סכר (שבנייתו החלה ב-2011) על הנילוס הכחול, צעד בעל השלכות מרחיקות לכת לגבי מצרים ⁸⁰ נרחיב על כך בפרק 8. אמנם לסכרים יש השפעה מרסנת על מהלך המים באגן ההיקוות, דבר היכול להפחית את נזקם של שיטפונות, אולם הם גם בעלי תוחלת חיים סופית, והם עלולים להיפרץ ו לגרום להצפות הרסניות. הערה אחרונה וחשובה לגבי אנרגיה הידרו- אלקטרית היא שזו מושפעת ישירות משינויי האקלים. כך למשל בשנים האחרונות, בין היתר בגלל שינויי האקלים, מדינות שונות חוו מחסור במשקעים (גשם ושלג) ועקב כך מאגרים של חלק מהתחנות ההידרו-אלקטריות לא ⁸¹ שבשטחן. נתון המדגים את הבעייתיות התפעולית של תחנות הידרו-אלקטריות הוא שרק כשליש מפוטנציאל יכלו לפעול

(0.5 TW - ממומש כיום ליצור חשמל (כ) 1.3-TW ייצור אנרגיה הידרו-אלקטרית (כ) ⁸².

3.2.5 ביו-אנרגיה

השימוש המסורתי בחומרי בעירה מהצומח ומן החי אינו נכלל בדיוננו בפרק זה, ונתייחס אליו בפרק 10 משום שהוא מקור מרכזי של זיהום אוויר תוך-ביתי. כאן נתמקד בהפקת דלקים מצמחים (ביו-דיזל, ביו-אתנול, ועוד) ⁸³, תהליך שצבר תאוצה לפני כעשרים שנה. לאחרונה עלו ספקות לגבי השימוש בביו-דלקים לאור התחרות על משאבי קרקע, דשנים ומים עם ייצור ⁸⁴ וכן בגלל שגידול צמחים כמקור אנרגיה גורם לבירוא יערות, על כל ההשלכות האקולוגיות מזון

-2018 וסחף הקרקעות הנלווים לכך. דוגמא לכך מופיעה בכתבה מעוררת המחשבה שפורסמה בניו-יורק טיימס ב

⁷⁷ <https://www.britannica.com/topic/Three-Gorges-Dam/History-and-controversy-of-the-Three-Gorges-Dam> Abd-El Monsef H., Smith S.E., Darwish K. (2015) Impacts of the Aswan High Dam After 50 Years. *Water Resource Manage* **29**, 1873–1885. DOI 10.1007/s11269-015-0916-z ⁷⁹ <https://www.theguardian.com/environment/2019/oct/21/the-lost-river-mexicans-fight-for-mighty-waterway-taken-by-the-us>

⁸⁰ <https://theconversation.com/ethiopia-dam-dispute-five-key-reads-about-how-it-started-and-how-it-could-end-187644> ⁸¹ Europe's Scorching Summer Puts Unexpected Strain on Energy Supply https://www.nytimes.com/2022/08/18/world/europe/drought-heat-energy.html?campaign_id=7&emc=edit_mbae_20220819&instance_id=69654&nl=morning-briefing%3A-asia-pacific-edition®i_id=185025816&segment_id=101756&te=1&user_id=120f7b8cbcbdc0cbf2de99d57de9e990 The dry summer has reduced hydropower in Norway, threatened nuclear reactors in France and crimped coal transport in Germany. And that's on top of Russian gas cuts.

⁸² <https://www.ihp.org/ihp/hydropower-facts-discover>

⁸³ ביו - אתנול הוא אלכוהול (עפ"ר אתנול) הנוצר בתהליך תסיסה כהלית של פחמימות שמפיקים בעיקר מתירס וקנה סוכר. ביו - אתנול צלולוזי הוא אתנול המופק מחלקי צמח שאינם אכילים או גידולים שאינם ניתנים למאכל לאחר תהליך מקדים של פירוק דופן התא על ידי אנזימים. ⁸⁴ With respect to water consumption – bio-fuels are even inferior to some ordinary fossil fuels: Mulder, K., Hagens, N., & Fisher, B. (2010) Burning water: a comparative analysis of the energy return on water invested. *Ambio*, **39**(1), 30-39.

אשר חש פה את ההשלכות של בירוא יערות ונטיעת דקלים לשם ייצור שמן להפקת אנרגיה בדרום-מזרח אסיה⁸⁵ כיום רוב המאמץ של פיתוח ביו-דלקים מושקע בניצול שטחים שאינם מתאימים לגידולי מזון וכן באמצעות גידולים חלקם מהונדסים גנטית) שאינם צמחי מאכל⁸⁶ או קיקיון *Jatropha, Switchgrass*,⁸⁷ ו אצות ימיות כן⁸⁸ (למשל).

למרות הנתונים המופיעים בטבלה 3.2 אודות הפוטנציאל המבטיח, נראה שהפוטנציאל של ביו-אנרגיה אינו גדול כמצופה בעיקר בגלל הסיבות שפורטו לעיל.

3.2.6 אנרגית רוח

אנרגית רוח משמשת אנשים כבר אלפי שנה להנעת טחנות רוח וכלי שיט, אולם רק בעשורים האחרונים החלה להוות מקור לייצור חשמל. אנרגית רוח ואנרגיה סולארית (בה נדון בסעיף הבא) הם שני מקורות האנרגיה להם חוזים רוב המומחים את הגידול המהיר ביותר בעשורים הבאים⁸⁹ בעוד שב-2020 הם תרמו כ-35% מייצור חשמל ממקורות מתחדשים (הכוללים בנוסף, הידרו-חשמל, גאז-תרמי ואחרים), הצפי הוא שב-2050 הם יתרמו מעל ל-50% מהמקורות המתחדשים. שתי הבעיות העיקריות עם אנרגית רוח ואנרגיה סולארית הן (1) קושי באגירת עודפי אנרגיה בתקופות של ייצור עודף לטובת תקופות של יכולת ייצור נמוכה או אפסית, ו (2) - לעיתים קרובות קווי הולכת חשמל - מאתרי ייצור אנרגיה סולארית/רוח נעשים ארוכים מאד. נושא זה יידון בנפרד בהמשך הפרק הנוכחי. לפי הערכות הגידול הנדרש באנרגיית רוח על מנת לעמוד ביעדי אפס פליטות של גזי חממה עד 2050 הוא 18% בשנה⁹⁰ IEA, אכן, בין השנים 2000 ל-2013 תחנות רוח ליצור אנרגיה צמחו בקצב של מעל 20% בשנה (הכפלת ייצור מידי כשלוש שנים). למרות קצב הגידול המהיר, הייצור של 2013 הוכפל רק אחרי חמש שנים ב-2018. כלומר גידול של כ-14% בשנה (ראו הגדרה בפרק ההקדמה של גידול המעריכי/אקספוננציאלי). בשנת 2009 פורסם מחקר שטען כי לאנרגית רוח יש פוטנציאל גדול מאד שעדיין לא מומש (פי 40 מצריכת החשמל העולמית של אותה שנה) ושפוטנציאל ייצור חשמל מאנרגיית רוח בתחנות רוח יבשתיות גדול הרבה יותר מן הפוטנציאל של תחנות רוח ימיות⁹¹ אולם, מאז השתנתה התמונה במידה מסוימת, בין היתר בגלל פיתוחים טכנולוגיים. כיום התרומה של תחנות רוח ימיות לייצור בו נטען כי לתחנות רוח ימיות - IEA-אנרגיה גדלה בהתמדה (איור 3.5). יתרה מזאת, ב-2019 התפרסם דו"ח של ה-כלומר הרבה מעל צרכי האנרגיה של כלל האנושות, TW-48 פוטנציאל לייצר כ-⁹² מחקר מעניין נוסף מציג אפשרות שתחנות רוח ימיות יעזרו בהחלשת עוצמתם של הוריקנים (בעיה⁹³ בכל מקרה, מימוש).

עליה נרחיב בפרק 6) הפוטנציאל הטמון בתחנות רוח יגיע רק עם תהיה הבנה מעמיקה יותר של כל ההיבטים, הפיזיקליים, המטאורולוגיים,

⁸⁵ (1) Carlson, K. M., et al., (2018) Effect of oil palm sustainability certification on deforestation and fire in Indonesia. *PNAS* 115(1), 121-126; (2) A case study: Palm Oil in Borneo; By Abraham Lustgarten

<https://www.nytimes.com/2018/11/20/magazine/palm-oil-borneo-climate-catastrophe.html>

2007: the U.S. mandated the use of vegetable oil in biofuels, → industrial-scale deforestation → a huge spike in carbon emissions.⁸⁶

<https://interestingengineering.com/innovation/seven-biofuel-crops-use-fuel-production>⁸⁷

[https://www.eiloteil.org/database/%D7%A6%D7%9E%D7%97-%D7%A7%D7%99%D7%A7%D7%99%D7%95%D7%9F-](https://www.eiloteil.org/database/%D7%A6%D7%9E%D7%97-%D7%A7%D7%99%D7%A7%D7%99%D7%95%D7%9F-%D7%9B%D7%AA%D7%97%D7%9C%D7%99%D7%A3-%D7%93%D7%9C%D7%A7%D7%99%D7%9D/)

https://www.researchandmarkets.com/reports/5576475/algae-biofuel-market-forecasts-from-2022-to-2027?gclid=EAlaIqobChMIqZ_RmK-m-wIVgoxoCR1u1Q3PEAAAYiAAEgJvRfD_BwE⁸⁸

EIA (2019) International Energy Outlook 2019 with projections to 2050, USA Energy Information Agency, www.eia.gov/ieo⁸⁹

IEA (2021), Wind Power, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2021/renewable-electricity?mode=market®ion=World&publication=2021&product=Total>

⁹¹ Lua X., McElroy M.B., Kiviluoma J. (2009) Global potential for wind-generated electricity. *PNAS* 106, 10933-10938 ⁹² IEA (2019),

Offshore Wind Outlook 2019, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>⁹³ Jacobson, M.Z., C.L. Archer, and W.

[illegible]

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

אנרגיה סולארית 3.2.7.

במהלך השנים פותחו שלוש טכנולוגיות עיקריות להמרת אנרגיה סולארית לחשמל (תרמו-סולארית מבוזרת, תרמו-סולארית מרוכזת (מגדלי שמש), ופוטו-וולטאית), אולם כיום הרוב המכריע של האנרגיה הסולארית מופקת בעזרת השיטה השלישית, הפוטו-וולטאית. מבין כל מקורות האנרגיה המתחדשת (הידרו-אלקטרית, ביו-דלקים, רוח, גלי ים, גאות ושפל, סולארי) נראה שלאנרגיה סולארית יש את הפוטנציאל הגדול ביותר לספק חלק ניכר מצרכי האנושות (אפילו יותר מאנרגיית רוח). במקביל, כבר מספר שנים מתמודדים מחקרים רבים עם החשש העיקרי המתעורר מול השיטה הפוטו-וולטאית והוא פגיעה בשטחים פתוחים. קיים כאמור הצורך להתמודד עם בעיית אגירת האנרגיה הסולארית (בדומה לאנרגיית רוח – נדון בכך בהמשך הפרק הזה) וכן הצורך להתמודד טביעת עם הרגל האקולוגית הגבוהה מבחינת חומרי הגלם הדרושים לבנייתן ועם הפסולת שהן יוצרות בהגיען לסוף דרכן, כפי שנראה בפרקים הבאים.

החשש מנגיסה בשטחים פתוחים הוביל לשני תהליכים. מחד גיסא, יש נטייה הולכת וגוברת להקים חוות סולאריות על גגות ומעל תשתיות קיימות (דו-שימוש). לדוגמא, לפי חישוב של המשרד להגנת הסביבה הישראלי, דו-שימוש (לא כולל התקנה מעל אזורים חקלאיים) יאפשר ייצור חשמל סולארי בכמות העונה על כ-40% מצריכת החשמל של ישראל⁹⁹ הצפויה. במקביל, נעשו בעולם ובישראל הערכות של מיקום והיקף השטחים הפתוחים הדרושים 2030 בשנת

להפקת אנרגיה סולארית כמקור אנרגיה עיקרי, תוך מזעור הנזקים האקולוגיים והסביבתיים הנגרמים לשטחים

TW 20. התמונה העולה היא שעל מנת לספק כ

אנרגיה, העולם זקוק לשטח כולל של כמיליון קמ"ר

הללו¹⁰⁰ (המפוזר

למטר רבוע וביעילות של 8% - 15% מקרינת W 250- בין היבשות השונות באזורים עם שטף אנרגיה סולארית של כ השמש המתורגמת לחשמל). שטח זה מהווה 0.7% משטח היבשות. בישראל, על מנת לספק את צריכת האנרגיה עם נתוני שטף קרינה ויעילות דומים, 20 GW- הכוללת של המדינה (חשמל, תחבורה, תעשייה) בהיקף של כ השטח הדרוש הוא כ 1-000 קמ"ר, המהווה 4% משטח המדינה, מספר גדול לכל הדעות. יתרה מזאת, מסתבר השטחים לא נלקח ת בחשבון הפגיעה בתפקוד המערכת האקולוגית שבה¹⁰¹ שבחישוב וכנראה ש גם לא מותקנים הקולטים האנרגיה וחומרי הגלם הנדרשים לייצר את האמצעים לאגירת האנרגיה. חישוב השטחים מדגים כי עם הטכנולוגיות המוכחות כיום אנרגיה סולארית אינה יכולה להיות ספק האנרגיה היחידי בישראל וייתכן שגם במדינות אחרות שבהן יש צריכת אנרגיה גבוהה ושיש להן שטח קטן. יחד עם זאת ישנם מספר כיווני פיתוח

¹⁰² כולל התקנת פאנלים כחלונות בבניינים רבי קומות,¹⁰³ מעניינים שעשויים לפתור חלק וכן דו שימוש

חקלאי¹⁰⁴. מהבעיות שהוצגו לעיל כגון פאנלים אנכיים

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
בנוסף, שיפור היעילות של תאים פוטו-וולטאים נמצא בחזית המחקר. חדשות לבקרים מתפרסמים מאמרים על סוגים חדשים של תאים פוטו-וולטאים ¹⁰⁵, אם כי יש פער גדול בין יחסי המרה הממירים אנרגיית שמש ביעילות הולכת וגדלה בתנאי מעבדה ובתנאי שטח. אחת הבעיות הסביבתיות העיקריות היא שחלק מהתאים החדשים, יעילות בעלי , perovskite- – ההמרה הגבוהה, עשויים מחומרי גלם רעילים (למשל עופרת-פרובסקיט ¹⁰⁶ ונדירים (למשל גליום כמו כן, יש לקחת בחשבון את הירידה ביעילות ההמרה של התאים עם עלייה Ga- ¹⁰⁷ הצטברות אבק , Pb בטמפרטורה זמן, מה שמצריך תחזוקה ותחלופה. לאחרונה החלו להתפרסם דיווחים לגבי הקושי במציאת פתרון משימוש והם נערכים ¹⁰⁸ לפנלים שיצאו . ברור לגמרי שגם בנושא זה יש ליישם את המעבר לכלכלה מעגלית באתרים מאולתרים
ראו פרק 4. במילים אחרות, תכנון פנלים צריך לכלול (Analysis Cycle Life – LCA) ולאנליזה של מחזור חיים התייחסות לסוף דרכם וכיצד ניתן להפוך אותם מפסולת למשאב, באמצעות מחזור או כחומר גלם למוצרים אחרים. לסיכום, לאנרגיה סולארית יש בהחלט את הפוטנציאל להוות מרכיב חשוב בסל האנרגטי בעיקר לייצור חשמל, אולם עדיין קיימות מספר בעיות לא פשוטות שיש לפתור על מנת להגיע ליעד זה.

3.2.8. אגירת אנרגיה

הפקת אנרגיה מרוח ומאור השמש (סולארית) אינה יציבה ומשתנה בהתאם לשעות היממה, עונות השנה והמצבים הסינופטיים באזור תחנת הכוח. לכן, אגירת אנרגיה היא מרכיב חשוב ביותר בהפקה של אנרגיה ממקורות אלה. מאמץ רב מוקדש לפיתוח טכנולוגיות אגירה וכיום המאמץ לאגירה מושקע בארבע טכנולוגיות. עיקריות ומספר טכנולוגיות משניות.
הטכנולוגיה הראשונה והבסיסית ביותר היא אגירה באמצעות שאיבת מים למאגר גבוה בזמני עודף ייצור של אנרגיה רוח או אנרגיה סולארית, ושימוש באנרגיה המים (בדומה לאנרגיה הידרו-אלקטרית) בתקופות מחסור ברוח או בקרינת שמש. הבעיה עם גישה זו שבדומה לאנרגיה הידרו-אלקטרית, היא תלויה בתנאי השטח. במקומות בהם ניתן להשתמש בה (אזורים עם טופוגרפיה תלולה) היא אכן הטכנולוגיה המועדפת. ביישום שיטה זו לא קיימת בעיה של מחסור אפשרי במים עקב שינויי אקלים או מסיבות אחרות, משום שמדובר בזרימת מים במעגל סגור. הגישה השנייה מבוססת על קירור או חימום של מים בזמנים של עודף ייצור ושימוש בהם לצרכי קירור או חימום מבנים ¹⁰⁹. הגישה השלישית לאגירת אנרגיה מתבססת על מערכים של סוללות הנטענות בזמני עודף ייצור של אנרגיה רוח או אנרגיה סולארית הן מספקות אנרגיה בזמני מחסור. קיים מגוון גדול של סוללות, חלקן מבוססות על מתכות נדירות יחסית כמו ליתיום וחלקן מתבססות על מתכות רעילות כמו עופרת. החיפוש אחר חומרי גלם לייצור סוללות המתאימים מבחינת

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

¹¹⁰ עלותם, רעילותם הנמוכה והיכולת למחזר אותם, ¹¹¹ נמצא בחזית המחקר המדעי בתחום האנרגיה ¹¹².

זמינותם הגישה הרביעית והמעניינת ביותר, היא אגירת אנרגיה באמצעות תאי-מימן. הרעיון מאחורי גישה זאת הוא לנצל את עודפי הייצור של אנרגיית רוח או אנרגיה סולארית על מנת לפרק מים למימן וחמצן (אלקטרוליזה) שנוצר כחומר ¹¹³ ולהשתמש במימן. אחת הבעיות עם שיטה זאת היא בעיה בטיחותית בגלל נפיצות הגבוהה של גלם לבעירה בזמן צורך

המימן. בעיה נוספת היא סוג המתכות בהן משתמשים ליצירת האלקטרודות. צריך לבחור מתכות שאינן ראקטיביות מבחינה כימית, על פי רוב (אבל לא תמיד) מתכות אצילות כמו פלטינה. אולם מחירן גבוה, ונדירותן הופכים את כרייתן ליקרה ולהרסנית מבחינה סביבתית (ראו פרק 4). לאחרונה הוצע לנצל מתכות (קובלט ופלטינה) הנמצאות תעשייתית וכך לפתור את הצורך ¹¹⁴ בפסולת. בעיה שלישית עם ייצור מימן היא כמות האנרגיה הגבוהה הדרושה לכרות אותן

לביצוע אלקטרוליזה של מים. נעשים ניסיונות רבים לשפר את נצילות התהליך, ולאח רונה עשתה חברה

ישראלית. במקומות רבים בעולם יש

חברות פרטיות וגופים ממשלתיים

פריצת (PRO2H) ¹¹⁵ הפועלים לקודים

דרך בתהליך הזה

מימן כאמצעי לאגירת אנרגיה ולהחלפה של דלקים פוסיליים ברכב-השימוש בתאי ¹¹⁶ לעומת זאת, ישנם מחקרים.

המצביעים על כך שמים כמקור למימן עלולים להוות בעיה (מחסור במים שפירים, בעיות קורוזיה וצורך בהתפלה

מקדימה של מים מליחים) וממליצים על שימוש ¹¹⁷ או לחילופין על ייצור אלקטרודות

במתאן הנוצר במטמנות אשפה

המאפשרות לייצר מימן ממים ¹¹⁸ כמו כן, נעשים מאמצים לייצר את האלקטרודות בתאי מימן ממתכות נפוצות וזולות.

(כמו בדל במקום מתכות נדירות ויקרות) (שכרייתן יוצרת מפגעים סביבתיים רבים) ¹¹⁹ בנוסף לארבע הגישות הללו יש.

י. סיונות לאגור אנרגיה באמצעות דחיסת אוויר, קפיצים ועוד. גישות אלו לא יידונו כאן

¹¹¹ L. Yang et al. (2023). batteries lithium spent from recovery lithium purity-high for method leaching electrochemical Direct. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00287> ¹¹² (1) Turner J.M. (2022) Charged. University of Washington Press. "Charged is more critical of battery power than most other books on this topic, noting that they appear "clean" only because they obscure other, more discrete, impacts. In the environmental dimension, batteries depend on some of the most toxic metals and materials in industrial supply chains. The list of environmental insults is long and sobering: lead, sulfuric acid, mercury, manganese, zinc, steel, carbon, graphite, ammonium chloride, potassium hydroxide, cadmium, lithium, nickel, cobalt, and sometimes rare earth minerals. Batteries are thus intimately connected with mining and extraction and with energy-intensive processing. When they are used up, they often return to the earth in the hazardous form of waste or pollution." In: The hidden costs of batteries by B. K. Sovacool (2022)

Science **377**, DOI: 10.1126/science.add0714; (2) Pang Q. et al. (2022) Fast-charging aluminum–chalcogen batteries resistant to dendritic shorting. *Nature* **608**, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04983-9>. (3) Velumani, D., & Bansal, A. (2022) Thermal behavior of lithium- and sodium-ion batteries: A review on heat generation, battery degradation, thermal runaway – Perspective and future directions. *Energy & Fuels*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02889>. (3) Zhu, G., Tian, X., Tai, HC. et al. (2021) Rechargeable Na/Cl₂ and Li/Cl₂ batteries. *Nature* **596**, 525–530. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03757-z> ¹¹³ (1) Lokesh, S., & Srivastava, R. (2022). Advanced two-dimensional materials for green hydrogen generation: Strategies toward corrosion resistance seawater electrolysis–review and future perspectives. *Energy & Fuels*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02013>. (2) Farooq, U., Ahmad, T., Naaz, F., & Islam, S. u. (2023). Review on metals and metal oxides in sustainable energy production: Progress and perspectives. *Energy & Fuels*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03396> ¹¹⁴ Thangamuthu M., et al. (2024) From scrap metal to highly efficient electrodes: harnessing the nanotextured surface of swarf for effective utilisation of Pt and Co for hydrogen production. *J. Materials Chemistry A*. <https://doi.org/10.1039/D4TA00711E> ¹¹⁵ Dotan H. et al (2019) Decoupled hydrogen and oxygen evolution by a two-step electrochemical–chemical cycle for efficient overall water splitting. *Nature Energy* **786**, 786–795. ¹¹⁶ (1) <https://www.gov.uk/government/publications/hydrogen-investor-roadmap-leading-the-way-to-net-zero>; (2) Long, C., Dong, X., & Huang, J. (2022). Latest progress on photocatalytic H₂ production by water splitting and H₂ production coupled with selective oxidation of organics over ZnIn₂S₄-based photocatalysts. *Energy & Fuels*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c03588>. ¹¹⁷ <https://ravensr.com/water-intensity-is-tantamount-to-carbon-intensity-for-climate-friendly-fuels/> ¹¹⁸ https://www.science.org/content/article/splitting-seawater-provide-endless-source-green-hydrogen?utm_source=sfmc&utm_medium=email&utm_campaign=DailyLatestNews&utm_content=alert&et rid=644476212&et cid=4639837 ¹¹⁹ Yuan Y., et al. (2022). Earth-abundant photocatalyst for H₂ generation from NH₃ with light-emitting diode illumination. *Science* **378**(6622), 889–893. <https://doi.org/doi:10.1126/science.abn5636>

58

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

סיכום וכיווני התפתחות 3.3.

משק האנרגיה העולמי נמצא בעיצומו של שינוי מערכתי רחב היקף. מעבר לטכנולוגיות שפורטו למעלה לייצור ואגירת אנרגיה, מתווסף ההיבט של רישות מקורות אנרגיה וצרכניה בקנה מידה יבשתי ואף יותר מכך ¹²⁰. (Internet Energy) (בנוסף, מקורות האנרגיה נעשים מבוזרים יותר. דוגמא מצוינת הן תחנות רוח לייצור אנרגיה שמיקומן מוכתב משיקולים של עצמת רוח ושכיחות מצבים של עצמת רוח גבוהה ולכן הן מותאמות לספק אנרגיה לאזורים בהן הן מותקנות (בסיוע מערך אגירת אנרגיה מתאים). כך גם לגבי תחנות הידרו-אלקטריות בקנה מידה קטן ולשדות סולאריים המותקנים על תשתיות קיימות (מבני תעשייה, מגורים, חממות וכדומה). השילוב של שתי הגישות הללו (שיפור ייצור האנרגיה ואגירתה ורישות יצרני האנרגיה וצרכניה) אמור לספק מידה גדולה יותר של בטחון אנרגטי למספר גדול של אנשים במדינות רבות. כפי שנדון בפרק על, 4 המעבר לאנרגיות חליפיות בכלל רוח וואנרגיית אנרגיה סולארית טבפר , מחייב עלייה ניכרת בשימוש במתכות, שחלקן רעילות וחלקן מחייבות שיטות כרייה הרסניות

לטבע ¹²¹.

תחזיות לגבי כיווני ההתפתחות של משק האנרגיה העולמי בעשורים הקרובים והצעות לפתרונות מתפרסמים חדשות . באופן כללי

- קיים ויכוח
- בין שתי
- אסכולות
- ששתיהן
- דוגלות
- בהחלפת
- דלקים
- פוסיליים.
- האחת

תפקיד מרכזי לאנרגיה גרעינית¹²³ בעיקר בגלל פער הזמן הגדול שחולף בין ההחלטה לבנות כור גרעיני ועד השלמתו (כ-10 עד 19 שנים ויותר לעומת 2-5 שנים למתקנים סולאריים או של רוח)¹²⁴ וזירוז ההליך עלול להביא לאסונות, פוטנציאליים כמו במקרה של יפן¹²⁵ האסכולה השנייה גורסת שללא מקור אנרגיה "צפוף" (המפיק הרבה אנרגיה. ליחידת שטח¹²⁶ בעיקר גרעיני), לא יימצא תחליף שלם לדלקים פוסיליים. לאנרגיה גרעינית יש יתרון נוסף. כור גרעיני, יכול לייצר חשמל מתי שזקוקים לו, ובנוסף, הוא מקנה בטחון אנרגטי מכיוון שהוא יכול לייצר חשמל במשך שנתיים (ובעתיד יוכל גם במשך 10 ואפילו 20 שנה) ללא תדלוק.

את הערכתה לגבי המחיר הסביבתי הכולל (UNECE) לאחרונה פרסמה הסוכנות הכלכלית של האו"ם לאירופה (לכל, ובמקביל פרסמה הסוכנות הבינלאומית מעגל החיים) של¹²⁷ לאנרגיה בשיתוף משרד תחליפי ייצור חשמל שונים

האנרגיה האמריקאית את תחזיתה לעשורים הבאים¹²⁸ הנקודות העיקריות של התחזית הן שפליטות פד"ח. לאטמוספירה ימשיכו לגדול עקב הגידול באוכלוסייה והצמיחה הכלכלית (עליה בצריכה), אם כי בקצב איטי יותר. במילים אחרות, כמות האנרגיה הנצרכת ב-2050 תהיה כ-150% מכמות האנרגיה ב-2020 אבל החלק היחסי של

¹²⁰ (1) Zou, C. (2020) Energy Internet Technology. In: New Energy. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2728-9_5 (2) Joseph A. & Balachandra P. (2020) Energy Internet, the future electricity system: Overview, concept, model structure, and mechanism. *Energies* **13**, 4242. 10.3390/en13164242. ¹²¹ Allesch, A., Huber-Humer, M. (2023). A Brief Glance on Global Waste Management. In: Tribaudino, M., Vollprecht, D., Pavese, A. (eds) Minerals and Waste. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. ¹²² https://doi.org/10.1007/978-3-031-16135-3_9 (1) <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/WWWSBook/WWWSBook.html>; (2) http://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/IEO2021_ChartLibrary_References.pdf ¹²³ <https://www.oneearth.org/the-7-reasons-why-nuclear-energy-is-not-the-answer-to-solve-climate-change/> ¹²⁴ פיתוח על במרץ עובדים כיום – כן כמו. לכור שנים 5-6 SMR שנים 5 עד 3 יהיה התקנתם בזמן. ¹²⁵ On the one hand Japan has built a total of eight nuclear power plants since 1996, being the fastest, taking only 46 months to build each plant. But with a cost: "Japanese nuclear power plants are disasters waiting to happen." – in: H. Blatt (2011) America's Environmental Report Card, 2nd edition, p. 224, published two months before the March 11th 2011 Fukushima nuclear disaster. ¹²⁶ Vaclav Smil (2017) Energy and Civilization: A History; MIT Press. ¹²⁷ https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf ¹²⁸ <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/introduction/sub-topic-01.php> intermittent disruptions to data availability:

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ דלקים פוסיליים יהיה נמוך יותר. כלומר, דלק פוסילי ימשיך להיות מרכיב מרכזי בסל האנרגיה, אם כי מקורות אנרגיה מתחדשים יגדלו בקצב מהיר ולקראת 2050 הם יהיו המקור העיקרי לייצור חשמל. הסיבה העיקרית למגמה זאת היא צריכת אנרגיה במדינות המתפתחות. מגמות אלה אינן מעודדות בלשון המעטה ודרוש שינוי דרמטי בכמות האמצעים. וההשקעה המופנים בכון של החלפת דלקים פוסיליים ברוב מדינות העולם על מנת לחרוג מהתחזית הזאת העקרונות הכלליים הנדרשים על מנת להשיג את השינוי הרצוי במשק האנרגיה העולמי פורסמו במאמר בשנת 2018 על ידי כמה מהדמויות הבולטות בתחום הפיתוח של אנרגיות חלופיות¹²⁹ והן מסוכמות באיור 3.6 המחברים טוענים שמעבר מוצלח למערכת אנרגטית שאינה פולטת גזי חממה (ומזהמי אוויר אחרים) צריך להתבסס על חמישה מרכיבים עיקריים: (1) זמינות של כמויות גדולות של חשמל זול המיוצר באנרגיות שאינן מזהמות. (2) מציאת דרכים

(, 3) Internet Energy + לאזן במהירות ובזול פערים בין שעות שיא של צריכה מול ייצור (אגירת אנרגיה יעילה חשמל¹³⁰ התחבורה " ¹³¹ התעשייה והמגורים. (4) מציאת תחליפים לחומרים שייצורם פולט מזהמים וגזי חממה או לשנות את דרכי ייצורם, לדוגמה ייצור פלדה וייצור מלט¹³² מציאת דלקים שאינם פולטים גזי חממה ומזהמים (5) . לצרכים שלא ניתן "לחשמל" (מימן, ביו-דלקים). לדעת המחברים, עדין בלתי אפשרי לבנא מה יהיו הטכנולוגיות הספציפיות שיעמדו במבחן השוק העתידי, אולם ברור שהבחירה תהיה בין הטכנולוגיות הנמצאות כבר כיום בשוק (Cycle Life – LCA) (ושפורטו בפרק זה). ברור לגמרי שיש לשלב בכל החישובים גם אנליזה של מחזור חיים¹³³ . (Analysis

בעשור האחרון התפרסמו מספר מאמרים המצביעים על קיומם של מאגרים גדולים מאד של מימן הנוצר בתהליכים . תהליך שריפת מימן (חמצונו על ידי חמצן גיאולוגיים¹³⁴ אטמוספירי) הוא תהליך פולט (3.7 במעמקי האדמה) איור

בדומה לשריפת דלקים פוסיליים, אולם בניגוד לדלקים פוסיליים, שריפת מימן אינה (process exothermic) חום פולטת פד"ח ומשחררת אדי מים שניתן ללכוד ולהשתמש להשקיה. בנוסף, להערכת חלק מהחוקרים, קצב היצירה של מימן גיאולוגי הוא מהיר דיו בהשוואה לצרכי האנרגיה של האנושות, מה שהופך אותו למקור מתחדש (ולא מתכלה בדומה לדלקים פוסיליים). יש נן הרבה שאלות מדעיות פתוחות לגבי תהליכי היצירה ובעיקר קצבי היצירה ומיקומם, אולם חשוב לזכור שכך היו פני הדברים גם לגבי דלקים פוסיליים עשורים לאחר שהתחילו להשתמש בהם בצורה מאסיבית. השאלות הדחופות היום מתמקדות בהיבטים ההנדסיים של הפקת המימן, אגירתו ושינועו ובמציאת 3 הצרכנים המועדפים, כמו למשל תחנות כוח, כלי רכב כבדים, ספינות ורכבות, ייצור דשן, אמוניה ופלדה (ראו פרקים

¹²⁹ Davis S. J. et al. (2018) *Science* **360**, eaas9793. DOI: 10.1126/science.aas9793. ¹³⁰ (1) <https://www.vox.com/2016/9/19/12938086/electrify-everything>; (2) Williams J. H., et al. (2012) The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: The pivotal role of electricity. *Science* **335**(6064), 53-59. ¹³¹ <https://doi.org/doi:10.1126/science.1208365> Aviation is the most difficult to convert, but there are attempts to reduce its GHGs emissions, at least in EU - <https://www.edf.org/media/us-airlines-give-legal-fight-against-eu-anti-pollution-law> ¹³² <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/NonEnergySolutions.pdf> ¹³³ IEA, Life Cycle Upstream Emissions Factors 2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/life-cycle-upstream-emissions-factors-2024-2> ¹³⁴ (1) Lollar, B. S., Onstott, T. C., Lacrampe-Couloume, G., & Ballentine, C. J. (2014) The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H₂ production. *Nature* **516**(7531), 379-382; (2) Warr, O., Giunta, T., Ballentine, C. J., & Sherwood Lollar, B. (2019) Mechanisms and rates of ⁴He, ⁴⁰Ar, and H₂ production and accumulation in fracture fluids in Precambrian Shield environments. *Chemical Geology*, **530**, 119322; (3) Hidden hydrogen - <https://www.science.org/content/article/hidden-hydrogen-earth-may-hold-vast-stores-renewable-carbon-free-fuel>; (4) Government offers first major funding for unexplored energy source - https://www.science.org/content/article/u-s-bets-it-can-drill-climate-friendly-hydrogen-just-oil?utm_source=sfmc&utm_medium=email&utm_campaign=DailyLatestNews&utm_content=alert&et rid=644476212&et cid=4892736

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ 51-). המגבלה העיקרית כיום בשימוש נרחב במימן היא הצורך לדחוס אותו על מנת שאגירתו לא תחייב נפחים גדולים מידי. קילוגרם אחד של מימן מספק אנרגיה השקולה לגלון (כמעט ארבע ליטר של דלק נזולי), אולם הנפח של קילוגרם אחד של מימן גזי הוא כ- 11.1 מטר מעוקב ב-25°C צלזיוס ובלחץ של אטמוספירה אחת. רוב האתרים ש נמצאו להפקת מימן הם אתרים בהם סלעי¹³⁵ מתאימים חמים נמצאים קרוב לפני השטח ויכולים להוות אתרי הפקה של תשתית אנרגיה גאו-תרמית. יתרה מזאת, אחת השיטות המוצעות להגברת הפקת מימן היא באמצעות החדרת מים לתת הקרקע כדי להחיש את ראקציות היצירה של מימן. אם מים אלה מכילים פד"ח מומס, הראקציות יוצרות-המימן מלוות

בריאקציות של קיבוע פד"ח ומסייעת בסילוקו מן האטמוספירה. ימים יגידו האם כריית מימן יכולה לתרום משמעותית להחלפת דלקים פוסיליים בשיטות הפקת אנרגיה ידידותיות יותר לסביבה.

להערכתי, כל פתרון למשק האנרגיה העולמי יתבסס על שילוב של מספר מקורות אנרגיה. בראש ובראשונה, אנרגיה גרעינית (ביקוע בשלב הראשון והיתוך בשלב השני) עם אנרגיה סולארית, אנרגיית רוח, אנרגיה הידרו-אלקטרית וביו-דלקים (עם הרבה מגבלות על שני האחרונים). במקביל, יהיה צורך לסלק פד"ח מן האטמוספירה וכן מתחנות כוח פוסיליות שימשיכו לפעול עוד שנים רבות (ובמקביל לסלק מזהמי אוויר אחרים). כל זאת בנוסף לטיפול בבעיית הביקוש, שנידונה באופן חלקי בפרק זה, במטרה לקדם מהלכים להתייעלות וצמצום צריכת האנרגיה.

¹³⁵ There are two major pathways to produce H₂ by igneous rocks (Lollar, et al., 2014): (1) ~80% is produced through serpentinization - water reaction with iron-rich minerals that reside in iron-rich rocks to make hydrogen; (2) ~20% is produced by water splitting facilitated by radiation emitted from trace radioactive elements (mostly U and Th) usually enriched in granites. This process is slow, so ancient (Precambrian) rocks are most likely to generate hydrogen.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 3 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
איור 3.6: השילוב המוצע בין מקורות האנרגיה העתידיים לשלוט בשוק האנרגיה לבין אמצעי האגירה ודרישות צרכני האנרגיה. מקור –
Davis S. J. et al., (2018) *Science* **360**, eaas9793. Reprinted with permission from AAAS.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 3 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

- איור: 3.7 תהליכי יצירה, תנועה והפקה של מימן גיאולוגי . על פי

Hand E. (Science) - <https://www.science.org/content/article/hidden-hydrogen-earth-may-hold-vast-stores-renewable-carbon-free-fuel>

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 4 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
"There is no such thing as away.
When you throw something away,
it must go somewhere." - Annie Leonard

4. תעשייה וחומרי גלם

הכלכלה העולמית מתבססת על צריכת מוצרים, עבודה ושירותים. צריכה היא אחד הגורמים העיקריים לנזקים

הסביבתיים שהאנושות יוצרת. בפרק זה נתמקד בחומרי הגלם מהם עשויים המוצרים שאנו רוכשים, מהם נבנים המרחבים בהם מתבצעת העבודה, או בהם ניתנים השירותים. מדובר במספר גדול ביותר של מינרלים וחומרים אחרים שבני האדם כורים מסלעי הקרום (החלק החיצוני) של כדור הארץ. אומדנים של הכמויות המופקות מדי מתפרסמים בדו"חות של המכון הגיאולוגי¹ שנה. בנוסף, יש חומרי גלם המופקים מצמחים או מבעלי חיים או האמריקאי

מסונתזים מדלק פוסילי. חלק מחומרי הגלם הוא משאב מתחדש וחלק מהם הוא משאב מתכלה המתנהג לפי עקומת עליה הרחב נו בפרק 3. לכל מוצר יש מסלול חיים המתחיל בכריית חומרי הגלם הדרושים ועיבודם (Hubbert) הוברט ומסתיים כאשר המוצר מגיע לסוף חייו. בהקשר זה ישנם שלושה אתגרים סביבתיים חשובים ביותר. האתגר הראשון הוא לעבור ממסלול חיים קווי (ייצור – שימוש – הטמנה) למסלול חיים מעגלי (כלכלה מעגלית² – ייצור – שימוש : פירוק ומחזור חומרי הגלם – ייצור מוצרים חדשים). האתגר השני הוא לעבור ככל שניתן ממוצרים המיוצרים מחומרי גלם מתכלים, לכאלה המיוצרים מחומרי גלם מתחדשים ולצורך את החומרים המתחדשים בקצב שאינו עולה על קצב התחדשותם. חשוב להדגיש ש החומרים העיקריים הניכרים כיום - חול, חצץ וגיר, מהווים יותר ממחצית מכמות הגלם, אולם כרייתם ובעיקר הגידול המתמיד בכמויות הנצרכות יוצרים בעיה חמורה בסביבות³ חומרי. האתגר ולאקוסיסטמה (toxicity) מסוימות השלישי הוא להחליף חומרים רעילים בחומרים חילופיים שרעילותם לבני אדם פחותה. זהו תהליך מורכב, רב שלבי ומייגע משום שבני האדם משתמשים ופולטים מגוון גדול מאד (ecotoxicity) של חומרים החשודים או ידועים כרעילים. ב-2014 פרסמה האקדמיה האמריקאית למדעים דו"ח מקיף הפורס את העקרונות של חיפוש אלטרנטיבות בטוחות לחומרים רעילים⁴

כלכלה מעגלית 4.1.

היישום של כלכלה מעגלית מתבסס על מספר⁵ יישום עקרונות (1) : (2) אנליזה של מחזור חיים – LCA עקרונות ייעול תהליך הייצור, (3) שילוב חומרי גלם ממוחזרים במוצר, כולל שימוש בחומרי גלם שהיו פסולת של פעילות

¹(1) <https://www.usgs.gov/special-topics/earth-mri>; (2) Minerals Yearbook - <https://www.usgs.gov/centers/nmic/publications>; (3) Mineral Commodity Summaries (2022) U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>; (4) https://eos.org/features/critical-minerals-for-a-carbon-neutral-future?utm_source=EosBuzz²(1) What is a circular economy? <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>; (2) <https://www.international-synergies.com/>; (3) United Nations Environment Programme (2021) Making Peace with Nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>: A circular economy is a systems-based approach to industrial processes and economic activities that enables the resources used to maintain their highest value for as long as possible. Key considerations in implementing a circular economy are reducing use, extending longevity, renewability, reusability, reparability, replaceability, upgradability of resources and products.³ Rangel-Buitrago N., Neal W. (2023) The unsustainable harvest of coastal sands. *Science* **382**,1116-1118. DOI:10.1126/science.adj9593 <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adj9593>⁴The National Academies (2014) Framework to Guide Selection of Chemical Alternatives. ISBN 978-0-309-31013-0, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK253965/> (Mavropoulos) הרצאה של אנטוניס מברופולוס (2). הרצאה של ד"ר דוד אסף, ממשרד הכלכלה שניתנה בינואר 2021 באוניברסיטה העברית (1) בפסולת לטיפול, 2021. (3) <https://ellenmacarthurfoundation.org> (4) <https://pacecircular.org> (5) <https://www.weforum.org> (6) LCA – Life Cycle Analysis: (1) Muralikrishna, I., & Manickam, V. (2017) Life Cycle Assessment. In (pp. 57-75). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1> – "Life cycle assessment is a technique for assessing the environmental aspects

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 4 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ כלכלית אחרת, (4) תכנון ועיצוב מוצר מראש, כלומר, מוצר שמתאים למחזור או מוצר שנועד לשימוש ממושך (עמיד, מתאים לשימוש חוזר, בר תיקון ומודולרי), (5) פיתוח מודל עסקי אשר מתעדף ככל האפשר מתן שירות במקום מוצר, שימוש חוזר במוצרים וייצור מחדש בהסתמך על החומרים המצויים במוצר הישן. ספר שפורסם ב-2023 מסכם בצורה

מקיפה את יישום העקרונות של כלכלה מעגלית לגבי פסולת של תעשיית מתכות, שאריות של תנורי שריפה בתחנות כוח ובמתקני שריפת פסולת, ופסולת עירונית⁷. הספר גם מציג את ההשלכות הסביבתיות והבריאותיות של שימוש בפסולת ופורס את הצעדים שיש לנקוט על מנת למזער את הסכנות הטמונות בכך⁸ בנוסף לכל אלה יש לפתח מאגרי מידע ודרכי סריקה של מידע לגבי חומרי פסולת היכולים לשמש כחומרי גלם⁹ כל זאת על מנת ל"שדך" בין מפעלי, ייצור בכל מדינה ולעיתים גם במדינות שונות. ישנה גם מגמה לעשות שדרוג של מוצרים ישנים באמצעות שימוש חוזר

למשל כחפצי נוי) וכך להעלות את ערכם הכלכלי, מושג¹⁰ Upcycling.

הנקרא

לכלכלה מעגלית יש חשיבות גדולה ביותר בהתמודדות עם הנזקים שגורמת החברה האנושית למשאבי כדור הארץ, אולם תרומתה מוגבלת כל עוד ממשיכה העלייה ברמת החיים וגידול האוכלוסייה, שכן שניהם מחייבים ניצול חומרי גלם חדשים. הגידול בצריכה של חומרי גלם מוסבר על ידי "פרדוקס ג'בונס"¹¹. בשנת 1865 הבחין הכלכלן האנגלי בתופעה מפתיעה. בעיצומה של המהפכה התעשייתית, לאחר שג'יימס (Jevons. S. William) וויליאם ס. ג'בונס וואט המציא סוג חדש של מנוע קיטור שהיה יעיל הרבה יותר מקודמיו והשתמש בפחות פחם ליחידת חום, צריכת הפחם לא פחתה, אלא באופן מפתיע, עלתה. הסיבה לכך, טען ג'בונס, היא שההתייעלות הביאה לחיסכון בספי, שהושקע חזרה בהרחבת הייצור. התוצאה הייתה צמיחה כלכלית שגרמה לעליה בביקוש לפחם. כמאה ועשרים מכן, התופעה שתיאר ג'בונס לגבי פחם הורחבה למשאבי טבע אחרים ("הנחת"¹² שנים לאחר). במסגרת השיטה קאזם-ברוקס" הקפיטליסטית, חברות מסחריות משתמשות בבסך שהן חוסכות בהפקת משאבים על מנת להשקיעו חזרה בהגברת לכהייצור, הצמיחה הכלכלית מבטלת את היתרונות הגלומים בהתייעלות וגורמת דווקא לעלייה כמו בנושאים אחרים המגמות הללו מתכתבות (ועומדות בסתירה מסוימת) עם יעדי האו"ם¹³. בצריכת המשאב לפיתוח בר קיימא

associated with a product over its life cycle. The most important applications are these: (1) analysis of the contribution of the life cycle stages to the overall environmental load, usually with the aim to prioritize improvements on products or processes, (b) comparison between products for internal use. An LCA study consists of four stages: **Stage 1:** Goal and scope aims to define how big a part of product life cycle will be taken in assessment and to what end will assessment be serving. The criteria serving to system comparison and specific times are described in this step. **Stage 2:** In this step, inventory analysis gives a description of material and energy flows within the product system and especially its interaction with environment, consumed raw materials, and emissions to the environment. All important processes and subsidiary energy and material flows are described later. **Stage 3:** Details from inventory analysis serve for impact assessment. The indicator results of all impact categories are detailed in this step; the importance of every impact category is assessed by normalization and eventually also by weighting. **Stage 4:** Interpretation of a life cycle involves critical review, determination of data sensitivity, and result presentation"; (2) <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/life-cycle-assessment>; (3)

<https://ecochain.com/knowledge/life-cycle-assessment-lca-guide/>; (3) <https://www.oneclicklca.com/>⁷ Tribaudino M, Pavese A., Vollprecht D. (eds.) (2023) Minerals and Waste. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. ISBN 978-3-031-16135-3.

<https://doi.org/10.1007/978-3-031-16135-3>⁸ Tomatis, M., Petriglieri, J.R., Turci, F. (2023) Waste, Environment, and Sanitary Issues: Are They Really at Odds?. In: Tribaudino, M., Vollprecht, D., Pavese, A. (eds) Minerals and Waste. Earth and Environmental Sciences Library.

Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16135-3_10⁹ Zhao, B., et al. (2024) Data science applications in circular economy: Trends, status, and future. *ES&T*.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.3c0833>¹⁰ <https://www.ecowatch.com/upcycling-facts-ecowatch.html>¹¹ (1) Polimeni J., Mayumi K., Giampietro M., Alcott B. (2008) The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements. *Earthscan*; (2) Richard York and

Julius Alexander McGee (2004) Understanding the Jevons paradox. *Social Sci. Quarterly* **85**, 1179-1190.¹² Harty D., Saunders (1998) The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth. *Eastern Economic J.* **24**, 285-298. ההנחה של Khazzoom-Brookes Postulate היא השערה שמציעה: ככל שיעילות אנרגיה מוגברת עשויה להוביל לצריכת אנרגיה מוגברת, בשל אפקט הריבאונד שבו עלויות אנרגיה נמוכות יותר יכולות לגרום לצריכת אנרגיה מוגברת. כן יעילות אנרגיה מוגברת עשויה להוביל לצריכת אנרגיה מוגברת, בשל אפקט הריבאונד שבו עלויות אנרגיה נמוכות יותר יכולות לגרום לצריכת אנרגיה מוגברת. ההנחה מדגישה את הקשר ¹³ goals.org.un.sdg/ הפרדוקס הזה היה נושא לויכוחים ומחקרים רבים בתחומי האנרגיה והכלכלה הסביבתית. ההנחה המורכבת בין יעילות אנרגטית, צריכת אנרגיה וצמיחה כלכלית.

מחקר שניסה לנבא מגמות בכריית חומרי גלם עד שנת OECD-בשנת 2019 פרסם ¹⁴, בהקשר לאמור לעיל. 2060 הממצא העיקרי של הדו"ח הוא שהמשך גידול האוכלוסייה והעלייה ברמת החיים יגרמו לעלייה בדרישה

ושירותים. ממצאי הדו"ח הנוספים הם (איור 1.4): (א) התוצר Domestic Gross - GDP ¹⁵ - למוצרים

המקומי הגולמי (מת"ג)

צפוי לגדול פי ארבע בין 2011 ו-2060- כך שערך הת"ג העולמי הממוצע ב-2060- (כ-40 אלף דולר) Product בשנת 2011. נתון זה מתכתב עם מושג ה"אמריקום" מה OECD-לנפש) יהיה דומה לערך התמ"ג של מדינות ה פורט בפרק המבוא. (ב) רוב הגידול בדרישה לחומרי גלם יגיע מהכלכלות המתפתחות. (ג) העלייה במרכיב השירותים בכלכלה העולמית ימתן את העלייה בדרישה לחומרי גלם. (ד) פיתוחים טכנולוגיים יסייעו לייעל את (ה) למרות זאת, צריכת GDP/ השימוש בחומרי גלם בתהליך הייצור ולהגדיל את ניצולת חומרי הגלם (חומרי גלם בשנת 2011 GT ¹⁶ ו) ענף חמה זור יהפוך תחרותי יותר בהשוואה לכריה הרגילה (כריה). -79 חומרי גלם תעלה מ 2060 בשנת GT -167

במכרות קונבנציונליים). (ז) יותר ממחצית מפליטות גזי החממה ינבעו מפעילויות הקשורות בהפקה, שינוע וייצור כאשר GT, 50-שווה ערך פד"ח. ב-2023 כלל פליטות גזי חממה שווה בערך ל GT 50- חומרי גלם, ויגיעו ב-2060- לכ 75% מהן נובעים מהפקת אנרגיה, כלומר העלייה הצפויה בצריכת חומרי גלם תחייב שימוש בדלקים פוסיליים בכמות שתבטל את מרבית החסכון שייצור ממעבר לאנרגיות חילופיות בהפקת אנרגיה. (ח) המשך שימוש חלקי בדלקים פוסיליים, כאשר יצור פלדה וייצור חומרי בניה (בעיקר מלט) יהיו גורמי הפליטה העיקריים ב-2060- (ט) כריית, המתכות הדרושות לכלכלה העולמית וייצורן יגרמו לזיהום הסביבה והרעלת אנשים וביוטה ¹⁷ כאשר הכרייה של מתכות ממכרות (כריה ראשונית) תגרום לזיהום רב יותר ופגיעה סביבתית גדולה יותר מאשר מחזור (כריה משנית). לאור זאת נזכיר ונציין שלהפקת חומרי הגלם השונים יש השפעות סביבתיות מרחיקות לכת, המפורטות במחקרים 4.2. והן מסוכמות באיור OECD-רבים, כולל בדו"ח של ה

באיור 3.4 מוצג הגידול בייצור מספר חומרי גלם מרכזיים ¹⁸ פלדה, מלט, אלומיניום, פלסטיק, אמוניה - בעיקר כדשן) חקלאי) לצד התמ"ג החל משנת 1970 בעוד שהעלייה בייצור אמוניה ופלדה הייתה מתונה יותר מהעלייה בתמ"ג, ביתר החומרים, בעיקר פלסטיק, העלייה ביצור הייתה מהירה מזו של התמ"ג. כאמור, לתהליכי הייצור השונים יש השפעות סביבתיות מרחיקות לכת שחלקן יפורטו בתת הפרקים השונים של פרק זה וחלקן ישולבו בפרקים הבאים (למשל, בפרק 8 נזכיר את צריכת המים במכרות ובפעילויות תעשייתיות מסוימות). בפרק זה נדגיש בעיקר את צריכת האנרגיה ופליטת הפד"ח (שווה ערך פד"ח) של כמה מענפי הייצור העיקריים (איור ¹⁹

4.4).

¹⁴ OECD (2019), Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris, [en/10.1787/9789264307452-org](https://doi.org/10.1787/9789264307452-org)

¹⁵ מדד שהחליף את התל"ג לצורך השוואה בין רמת ההתפתחות הכלכלית של (PPP Capita Per GDP) תמ"ג (תוצר מקומי גולמי) לנפש מותאם כוח קנייה

4.0 BY CC :License, petrochemicals-of-future-the/reports/org.iea.www Paris, IEA, Petrochemicals of Future The (2018), ¹⁸ Biot - יצורה - ¹⁶ GT = tonne-giga - 9¹⁰ tonne, where 1 tonne = 1,000 kg.

מונח המציין את סך כל האורגניזמים - יצורה - ¹⁸ Biot (2018), IEA, Petrochemicals of Future The, Paris, <https://petrochemicals-of-future-the/reports/org.iea.www> בנוסף להשפעה הסביבתית החמורה, את הפקת חומרי הגלם לתעשייה מלווה סחר בלתי חוקי, עבודת ילדים ותנאי העסקה לא הוגנים ¹⁷ באזור גאוגרפי מסוים של אוכלוסיות ¹⁹

מוחלשות. אנחנו עוד נחזור לנושא זה בהקשר של סחר במתכות מסוימות, אולם סקירה מקיפה מופיעה בדו"ח משנת 2020 של האו"ם - UNEP (United Nations Environment Programme) and GRID - Arendal (2020). *The Illegal Trade in Chemicals*

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 4 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

ההיבטים הסביבתיים של ייצור מוצרים הוא נושא רחב ביותר²⁰ אנחנו נתמקד במספר ענפי ייצור להם השפעה .

סביבתית גדולה במיוחד: (1) ייצור פלדה, (2) ייצור בטון (עם דגש על מלט), (3) הפקת מתכות עבור מוצרי

(ליתיום, REE,) עפרות נדירות, (Co,) קובלט, Cu,) אלקטרוניקה וחשמל, כולל תחנות כוח ואגירת אנרגיה : נחשת

ו 5-) (PFAS- ועוד רבות אחרות שבהן לא נדון 4 ;) סינתזה של מוצרים פטרו-כימיים (בדגש על פלסטיק ו Li,

תעשיית הטקסטיל. עם זאת, בשל קוצר היריעה, לא נטפל בהרבה תעשיות נוספות שגם להן השפעה סביבתית

למשל²¹ חמורה כמו . נסקור בקצרה את תהליכי הייצור של המוצרים והפקתם ונרחיב בנוגע להשפעתם על

תעשיית התרופות

הסביבה, האמצעים הננקטים כיום על מנת להתמודד איתם ואלו שיצטרכו להינקט בעתיד

²⁰ The Journal of *Cleaner Production* is an international, transdisciplinary journal focusing on Cleaner Production, Environmental, and Sustainability research and practice. Through our published articles, the Journal aim at helping societies become more sustainable.²¹

(1) <https://www.ecowatch.com/pharmaceutical-pollution-green-drugs-wildlife-biodiversity.html>

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 4 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
לגבי השינוי בצריכת חומרי גלם בהשוואה בין 2011 ו- 2060 תוך ניסיון OECD-איור: 4.1 תחזית הדו"ח של ה
22 – מקור . SDS לעמוד
- ביעדי אקלים

OECD (2018) www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf ;
Reprinted with permission.

²² SDS = Sustainable Development Scenario, indicating what would be required in a trajectory consistent with meeting the Paris Agreement goals of less than 2°C World average-temperature increase.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 4 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
-2060איור 4.2 : היבטים שונים של ההשפעה הסביבתית של ארבעה חומרי גלם (בהשוואה לחומרים אחרים, צפי ל
נחושת, בטון, ברזל ומתכות ²³ - מקור .) :
נוספות

OECD (2018) www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf ;
Reprinted with permission.

(כסף, Pb) עופרת, Li (ליתיום, Ta (טנטלום, Co) בהמשך הפרק ובפרק 5 נזכיר כמה מהמתכות העיקריות המשמשות בכלכלה העולמית, כגון קובלט
עפרות ²³ Ag, REE) נדירות

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 4 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
איור 4.3: הגידול בייצור פלדה, מלט, אלומיניום, פלסטיק, אמוניה (דשן חקלאי) ותוצר מקומי גולמי ביחס לשנת
1970. –
IEA (2018), The Future of Petrochemicals²⁴ <https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>; CC BY 4.0;
Reprinted with permission.

איור 4.4: צריכת אנרגיה ופליטת פד"ח של כמה מהפעילויות התעשייתיות העיקריות (כימיקלים מתייחס בעיקר
– לסנתוז כימיקלים מדלקים פוסיליים ולייצור חומרי דישון והדברה בחקלאות). מקור
IEA (2018) The Future of Petrochemicals <https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>; CC BY
4.0; Reprinted with permission.

²⁴ IEA (2018), The Future of Petrochemicals, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals>

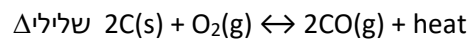
משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 4 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

²⁵ ייצור פלדה והשלכותיו הסביבתיות 4.3

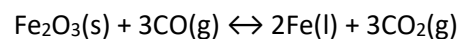
פלדה היא סגסוגת ברזל עם מתכות נוספות, בעיקר כרום, לעיתים ניקל וגם מעט וונדיום ומנגן. רוב סוגי הפלדה
העיקריים מכילים פחות מ- 1% פחמן. בעולם כיום מיוצרים כ שני מיליארד ²⁶ פלדה (כ-50% מהם לבנייה), כאשר

טון סין מייצרת כשני שליש מהכמות הכוללת. תהליך ייצור פלדה מהווה כ-95% מייצור כלל המתכות. בהמשך הפרק נרחיב על ההיבטים הסביבתיים של כרייה ועיבוד של חלק מהמתכות האחרות. ייצור פלדה מתבצע בשני שלבים: המכיל לפחות 27% (ore) השלב הראשון מתבצע רק כאשר מעבדים בצר. steelmaking (-) 2 (ironmaking) (1) מינרלים עשירי ברזל (בעיקר המטיט ומגנטיט²⁷). שהופק במכרה, ופוסחים עליו כאשר ממחזרים פלדה או ברזל (COKE - מחממים בתנור (כ-2550°C צלזיוס) את הבצר הטחון בנוכחות פחם מעובד (ironmaking) בשלב הראשון ומתרחשות חמש הריאקציות הבאות (האותיות (CaCO₃) ואבן גיר (air of absence the in heated coal (I (נזל - נתך, (s (מוצק, g) (בסוגריים מציינות את הפאזות של התרכובות השונות: גז

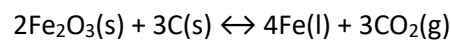
G; וחום (תהליך המשחרר אנרגיה) (CO) חמצון חלקי של פחם ויצירת פחמן חד חמצני²⁸ 1):



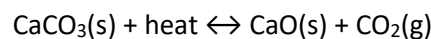
חיזור של ברזל תלת-ערכי הנמצא בהמטיט על ידי פחמן חד חמצני ויצירת נתך ברזל מתכתי ושחרור פד"ח².
(חיובי ΔG); (תהליך הדורש השקעת אנרגיה)



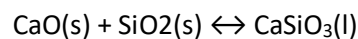
חיזור של ברזל תלת-ערכי הנמצא בהמטיט על ידי פחם מעובד ויצירת נתך ברזל מתכתי ושחרור פד"ח (תהליך³.
(הדורש השקעת אנרגיה)



4. (פרוק אבן הגיר ויצירת תחמוצת סידן ושחרור פד"ח (תהליך הדורש השקעת אנרגיה):



(slag) תגובה של תחמוצת סידן עם תחמוצת צורן שהגיעה עם מינרלי הברזל ליצירת סיג²⁹ 5. ועל ידי כך סילוק הצורן מהמערכת (הסיג פחות צפוף מברזל מותך וצף מעליו, וכך ניתן להפריד ביניהם) (תהליך הדורש השקעת אנרגיה):



עודפי הפחמן הנמצאים בברזל המותך מסולקים (בתור פד"ח) ויחד, (steelmaking) בשלב השני של ייצור הפלדה אתם מסולקים מהברזל עודפי גופרית וזרחן (שמגיבים עם עודפי הסידן ויוצרים סיג). לאחר מכן, מוסיפים את הכמויות הנדרשות של כרום ושל המתכות האחרות ליצירת הסגסוגת. כמו בשלב הראשון גם תהליך זה מחייב השקעת אנרגיה רבה והוא נעשה בטמפרטורה שמעל 2500°C צלזיוס. השלב השני נעשה בשני אופנים בהתאם לחומר הגלם, ברזל ראשוני שהופק בשלב הראשון ממינרלי ברזל, או ברזל או פלדה ממוחזרים.

²⁵ (1) <https://www.greenspec.co.uk/building-design/steel-products-and-environmental-impact/>; (2) <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/NonEnergySolutions.pdf>

²⁶ <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/global-crude-steel-output-decreases-by-0-9-in-2020/#:~:text=Global%20crude%20steel%20production%20reached,by%200.9%25%20compared%20to%202019.> ²⁷. ערכי- דו ברזל והן ערכי- ²⁸ ΔG = change in Gibbs free energy of the reaction. It equals the difference between the Gibbs free energy of the products minus the value the If .reactants favored thermodynamic is reaction the 0, <is

²⁹. סיג - חומר טפל המתקבל בזמן הכרייה. מכיל את מרכיבי הסלע שאינם נחוצים, ושאריות של המתכת אותה כורים

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 4 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
אחת ההשפעות העיקריות של תהליך ייצור הפלדה הוא שחרור פד"ח, הן כתוצאה מההאקציות לעילשצוינו והן
משריפת דלקים פוסיליים הנדרשים כדי להניע את התהליך. כיום, כ- 50% מהאנרגיה הנצרכת בתהליך מופנית
לשריפת פחם מעובד. כתוצאה מכך, ייצור טון אחד של פלדה מברזל ראשוני פולט לאטמוספירה כ-1.8 טון פד"ח וצורך

מיליארד ג'אול). בשנת 2020 ייצור פלדה תרם כ-8% מפליטת הפד"ח (GJ-19 כ³⁰ . מחזור של פלדה מקטין העולמית בעשרות אחוזים את פליטת הפד"ח לכל טון של פלדה. מקורם של כ-22% מכלל הפלדה המיוצרת כיום הם בברזל או פלדה ממוחזרים. בנוסף לפליטות פד"ח, אבק עשיר בברזל וכן גזים של וג פריט דו חמצנית, אמוניה וחומרים אורגניים נדיפים (שמקורם בפחם) נפלטות לאוויר מתנורי העיבוד ויוצרים זיהום אוויר. סקירה של המצב הקרובים ³¹ . בעולם וצפי לעשורים . בפרק 10 נרחיב על השיטות האפשריות בטיפול בזיהום אוויר תעשייתי התפרסמה לאחרונה

מעבר לפליטת פד"ח ומזהמי אוויר, ייצור פלדה גורם למספר נזקים סביבתיים נוספים: (1) מכרות ברזל הם ברובם מכרות פתוחים הפוגעים בנוף ובבתי גידול של צמחים ובעלי חיים . בשולי המכרות נערמים שפכים של חומר גלם עשיר בברזל אך באיכות ירודה. כאשר יורד גשם ומים זורמים דרך ערמות השפכים, הברזל, שחלקו ברזל דו-ערכי מתחמצן על ידי החמצן המומס במים והופך לברזל תלת-ערכי, בתהליך המגביר את חומציות המים. לכן תשטיפי הפוגעות בכל הנקרה במסלול זרימתן. במקומות בהם יש (corrosive) מכרות ברזל הם תמיסות חומציות מאכלות את תשטיפי המכרות ולנטרל את החומציות שלהם. (monitor) פיקוח סביבתי נאות, חברות כרייה נדרשות לנטר (2) מים המשמשים לקירור התנורים בשני שלבי ייצור הפלדה מזדהמים בתהליך (בעיקר ממתכות , גופרית וזרחן הנלווים לברזל בבצר). למעשה, ניתן למחזר את המים האלה ותוך כדי כך לטפל בהם ולסלק את המזהמים. בתנאים מסוימים אפשר להשתמש במתכות, בגופרית ובזרחן כחומרי גלם לתהליכים אחרים וכך לאפשר כלכלה מעגלית. יחד עם זאת לעיתים קרובות השימוש החוזר בחומרים הללו לא מתבצע ויש לדאוג להטמנתם. (3) חומרי הלוואי של תהליך העיבוד (בעיקר מהשלב הראשון - הסיג) מכילים בנוסף לתחמוצת צורן וסידן גם מתכות קורט, גופרית וזרחן היכולים להוות מטרד סביבתי אם אינם מטופלים כראוי. גם לבעיה זו קיימים כיום פתרונות, ובמפעלי הפקת ברזל (רבים משווקים את הסיג כחומר תשתית לכבישים (כלכלה מעגלית

למרות שפלדה היא אחד מחומרי הגלם שאחוז המחזור שלהם הוא גבוה יחסית (כ-2-2% מכלל הפלדה), עדיין יש

מקום .

העקרון

המוביל

בשיפור

אחוזי

המחזור

בתעשיות

השונות הוא

התחשבות

בשיקולי

מחזור כבר

רב ³² בשלב

לשיפור

הייצור או הבניה. למשל, נעשים ניסיונות כיום להימנע ככל הניתן מריתוך קורות פלדה ולהעדיף שימוש בברגים, על מנת להקל על השימוש החוזר. כמו כן נעשים מאמצים להפחית את פליטות גזי החממה בייצור פלדה על ידי שימוש . במקורות אנרגיה חילופיים לפחם וכן להשתמש במימן (המופק מאלקטרוליזה של מים באמצעות חשמל המיוצר הברזל תחמוצות את המחזור כחומר פחמן במקום) מתחדשת מאנרגיה
$$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \leftrightarrow 2\text{Fe}(\text{l}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{g})$$

³⁰ <https://www.iea.org/reports/industry>

³¹ Zhang J., et al. (2023) Iron and steel industry emissions: A global analysis of trends and drivers. Environmental Science & Technology.

³² Judge W. D., Paeng J., Azimi G. (2022) Electrorefining for direct decarburization of molten iron. *Nature Mater.* 21(10):1130-1136. doi: 10.1038/s41563-021-01106-z.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 4 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ תחמוצות הברזל בעזרת מימן גזי ³³ או בשיטות אחרות, ³⁴ ועל ידי כך להפחית פליטות פד"ח. אכן בשבע מתוך עשר המדינות העיקריות שמייצרות פלדה (סין, יפן, ארה"ב, רוסיה, דרום קוריאה, גרמניה וברזיל) החלו ניסיונות בסדרי גודל שונים לייצר פלדה "ירוקה". למרות זאת ב-2023 התפרסם מחקר שבחן מעל 4,800 מפעלי ייצור ברזל ופלדה והראה שהדרך להפחתה משמעותית של פליטות פד"ח עדין ³⁵ ארוכה.

4.4 ייצור מלט ובטון

בטון הוא כיום חומר הבנייה העיקרי. מרבית מבני המגורים ומתקני התשתית (מפעלים, תחנות כוח, סכרים וגשרים) בנוי מי מבטון. אחרי מים, בטון הוא החומר בו משתמשת האנושות בכמות הגדולה ³⁶,. הבטון מכיל חול, חצץ ביותר מים ומלט על פי רוב (גם קונסטרוקציה מברזל). מלט מהווה חמישית עד רבע מהבטון מבחינה נפחית, אולם מלט אחראי על 90% מהפד"ח שנפלט בעת ייצור הבטון ³⁷, ייצור. מידי שנה מיוצרים כארבעה מיליארד טון של מלט הפולטים כשלושה מיליארד טון פד"ח, והתחזית היא שעד 2030 כמות המלט המיוצר תעלה לחמישה מיליארד ³⁸. טון לפני שנדון בייצור מלט, בפליטות פד"ח ובאמצעים להפחית אותן, יש לתת את הדעת על כך ש בטון הוא הסוכן המובהק ביותר של האנושות בנגיסה בשטחים פתוחים, בפגיעה בנוף, ביצירת איי-חום עירוניים ובהשאת חותם ארוך טווח בטבע. במדינות כמו יפן וסין, השימוש בבטון במבני תשתית פוגע בנוף בצורה מאסיבית במיוחד. זאת ועוד, סין מייצאת כיום את תנופת ההקמה של תשתיות זוללות בטון למדינות נוספות ³⁹. מדינות אחרות הודו ביניהן ואינדונזיה נמצאות כעת בפתחה של תנופת בנייה בבטון. כמו כן, יש הטוענים שתעשיית הבנייה, הי בה מועסקים מאות מיליוני אנשים, מעודדת שחיתות שלטונית הנחוצה להמשך הפעילות התעשייתית ושבמסגרתה מקודמים גם פרויקטים שתועלתם מוטלת בספק ⁴⁰. עם זאת, לבנייה בבטון יש גם צדדים חיוביים, למשל החלפה של רצפות בוך ברצפות בטון מפחיתה משמעותית את הסיכוי לחלות במחלות זיהומיות שונות ⁴¹.

בשנים האחרונות מושקע מאמץ רב בפיתוח שיטות חדשות של חמ זור בטון ⁴² ומלט. אחת השיטות חמל זור בטון כוללת גריסת בטון והוספתו לקרקעות לחות על מנת לייצבן. שימושים נוספים של הבטון מתבססים על היותו חומר בהיותו חומר אלקלי ניתן למצוא $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ אלקלי (בסיסי, סותר חומציות) המסוגל לשחרר סידן הידרוקסיד לבטון שימוש גרוס לטיהור שפכים חומציים, נטרול גזים חומציים (עשירים בתחמוצת גופרית או תחמוצת חנקן) ועוד. אחד

השימושים ניסחםעניי ביותר הוא שימוש בבטון גרוס על מנת לקלוט פד"ח מן האטמוספירה (הגבה של תחמוצת סידן

שנמצאת בבטון בריכוז

- ³³ Gerres, T., et al. (2020) Green steel production: how G7 countries can help change the global landscape. Leadit - Leadership group for industry transition.
- ³⁴ Noble, B. B., et al. (2024) Electrochemical chlor-iron process for iron production from iron oxide and salt water. *Joule*, 8(3), 714-727. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.01.001>
- ³⁵ Lei, T. et al. (2023) Global iron and steel plant CO₂ emissions and carbon-neutrality pathways. *Nature* **622**, 514-520. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06486-7>
- ³⁶ <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>
- ³⁷ Lehne J. and Preston F. (2018) Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. CHATHAM HOUSE REPORT. ISBN: 978 1 78413 272 9
- ³⁸ <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>
- ³⁹ <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>
- ⁴⁰ <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>
- ⁴¹ <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>
- ⁴² Ho, H.-J., Iizuka, A., & Shibata, E. (2021) Chemical recycling and use of various types of concrete waste: A review. *J. Cleaner Production* **284**, 124785. https://www.researchgate.net/publication/346391392_Chemical_recycling_and_use_of_various_types_of_concrete_waste_A_review

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 4 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ

$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$

שמיצור (CaCO₃) היום מושקעים מאמצים רבים על מנת ליעיל את התהליך, לשפר את תכונות הקרבונט ולמצוא שימושים. ⁴³ בתהליך. המחזור מתבסס על שימוש בעיסת מלט לו לאחרונה פורסם מאמר שמציע תהליך למחזור מלט המופקת מבטון משומש. החומר שנוצר בתהליך המחזור דומה בתכונותיו למלט המקורי. השיטה נמצאת עדיין בחיתוליה והזמן יגיד האם ניתן ליישם אותה בקנה מידה מסחרי.

הספקת חומרי הגלם הדרושים לייצור בטון (חול, חצץ, מים ומלט) מהווה אתגר סביבתי. למשל, כריית חול באתרים הנמצאים באקוסיסטמות רגישות. רק לאחרונה התפרסמה עבודה המציגה שיטה לאיתור של מקורות החול הנמצא באתרי בנייה. השיטה מבוססת על אנליזה של תכונות מינרלוגיות וכימיות של החול, והיא יכולה לשמש למניעת כרייה לא חוקית. ⁴⁴ אולם, כפי שצוין קודם, ייצור מלט הוא החלק הבעייתי ביותר בייצור בטון מבחינה סביבתית. מלט באמצעות ריאקציה כימית (clinker) מיוצר בשני שלבים. בשלב הראשון מיוצר קלינקר (cement Portland mostly) בין חומר עשיר בסידן (למשל סלע קרבונטי כמו גיר או קרטון) עם חומר עשיר בצורן, אלומיניום וברזל כגון קרקע. עשירה בחרסית או אפר פחם ⁴⁵ ריאקציה זאת מחייבת חימום לטמפרטורה של כ- 1400° צלזיוס, כלומר השקעת והן משימוש בדלקים פוסיליים (CO₂ - אנרגיה רבה. לאור זאת, פד"ח נפלט הן מהתגובה הכימית (פירוק הקרבונט לחימום תנור הבעירה בו מתרחשת התגובה הכימית. בשלב השני הקלינקר מעורבב עם כמות קטנה של גבס וגיר. בפועל, ייצור טון מלט משחרר ל אטמוספירה כחצי טון פד"ח בקירוב ובחישוב כללי, ייצור מלט תורם כ- 3% מכלל

פליטות הפד"ח של ⁴⁶ (Amine-) בשנים האחרונות מנסים להוסיף למפעלי ייצור מלט מערכת סילוק פד"ח בטרם ייפלט לאטמוספירה, ולעשות זאת במינימום השקעת אנרגיה ותוספת שולית (CO₂ Based Capture) האנושות ⁴⁷ למחיר של. בנוסף, תהליך ייצור המלט גורם לזיהום אוויר במורד הרוח (בעיקר חלקיקים מרחפים – נרחיב על כך. ייצור המלט בפרק 10) ולמפגע נופי משמעותי בשל כריית חומרי הגלם של המלט. כמות המים הנצרכת בייצור בטון שקולה פחות או יותר לכמות המלט, כלומר כארבעה מיליארד מטר מעוקב מים

נגרעים מידי שנה ממחזור המים הטבעי ונבלעים בבטון. כמות זאת שקולה לכל נפח המים האגור בכנרת. במילים אחרות, מידי שנה האנושות מאבדת כנרת אחת לטובת ייצור בטון. האובדן הזה גרוע הרבה יותר מהנזק מזיהום מקורות המים (מצב שכמעט תמיד ניתן לפתור בדרך כזאת או אחרת, ראו פרק 8). לאור זאת, נעשים כיום מאמצים למצוא תחליפים למלט. כך למשל אסכולה של אדריכלים ומהנדסים המקדמת שימוש בעץ (מיערות הנטועים למטרה זאת) גם בבנייה של רבי קומות. כפי שרואים באיור 4.5 יש הבדל ניכר בין עץ המיועד לבנייה ומגיע מיערות נטועים (7 לבין עץ המגיע מיערות שאינם נטועים (נרחיב על נושא זה בפרק) (forests managed).

- ⁴³ Dunant, C.F. et al. (2024) Electric recycling of Portland cement at scale. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07338-8> ⁴⁴ (1) Sickmann, Z.T., Lammers, N.C. & Torres, A. (2023) Fingerprinting construction sand-supply networks for traceable sourcing. *Commun Earth Environ* 4, 405. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01071-2>; (2) Herring, M. (2024), Sandy fingerprints trace supply sources, *Eos*, 105, <https://doi.org/10.1029/2024EO240004> ⁴⁵ $\text{CaCO}_3(s) + \text{clay} + \text{heat} \rightarrow \text{clinker} \{ \text{SiO}_2(\sim 21\%), \text{Fe}_2\text{O}_3(\sim 3\%), \text{Al}_2\text{O}_3(\sim 7\%), \text{MgO}(\sim 2\%), \text{CaO}(\sim 63\%) \} + \text{CO}_2$
- ⁴⁶ <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector> ⁴⁷ Jiang, K., Yu, H., Sun, Z., Lei, Z., Li, K., & Wang, L. (2024). Zero-Emission Cement Plants with Advanced Amine-Based CO₂ Capture. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00197>

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 4 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
איור 4.5: כמות פליטות פד"ח והאנרגיה אשר גלומות בחומרים המשמשים לבנייה בבריטניה. על פי
- Lehne, J. and Preston, F. (2018) Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete.

בעיקר משום ש תהליך ייצורו מתבסס (Ferrock) "אחד החומרים שזוכה לאחרונה בתשומת לב רבה הוא "פרוק על שימוש בפסולת של תעשיות אחרות (פלדה וזכוכית) והוא מקבע פד"ח מן האטמוספירה. בשלב הראשון של תהליך ייצור ה"פרוק", תוצרי הלוואי של ייצור הפלדה (בעיקר אבק של פלדה וברזל) מחוממים ומגיבים עם פד"ח מן האטמוספירה ליצירת ברזל-קרבונט. בשלב השני מגיבים את הברזל-קרבונט עם שברי זכוכית ממוחזרת, שברי סלע עשיר בברזל דו-ערכי, מים ואוויר מועשר בפד"ח על מנת לקבל את התוצר הסופי, שהוא בעל תכונות דומות וחזק פי חמש ⁴⁸ למלט. כרגע ה"פרוק" עדיין מיוצר בכמויות קטנות יחסית המתאימות לפרויקטים קטנים וענף ממלט רגיל

הבנייה, הידוע בשמרנות שלו, עדיין לא אימץ את השימוש בו. אולם למרות השמרנות הזאת, יש בשנים האחרונות

מסוימתנטייה לאמץ חומרים וטכנולוגיות בניה חדשות, ידידותיות יותר לסביבה מבחינת חומרי סוג הגלם, חסכון .
באנרגיה, ופליטות פד"ח⁴⁹ . 6.4 כמה מהטכנולוגיות הללו מוצגות באיור

⁴⁸ <https://theconstructor.org/concrete/ferrock-characteristics-applications/565525/>
⁴⁹ https://www.weforum.org/reports/shaping-the-future-of-construction-a-breakthrough-in-mindset-and-technology/?DAG=3&gclid=Cj0KCQiApb2bBhDYARIsAChHC9s9m1xEMYy6bt1NnhbLoV-0qljims3TUI1TdBoadHKsJLVrxtAEjQaAqKSEALw_wcB

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק – 4 יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
איור: 4.6 דוגמאות לחומרי בנייה וגימור מתקדמים, בין היתר במובנים של יעילות אנרגטית גבוהה יותר . על פי
- World Economic Forum – shaping the future of construction a breakthrough in mindset and
technology. <https://www.weforum.org/publications/shaping-the-future-of-construction-a-breakthrough-in-mindset-and-technology/>

הפקת מתכות עבור מוצרי אלקטרוניקה וחשמל, תחנות כוח ואגירת אנרגיה

מתכות רבות חיוניות למגוון תעשיות, החל מאלקטרוניקה וכלה בייצור תחנות כוח מסוגים שונים ⁵⁰ כריית מתכות. ⁵¹ מגדילה בצורה משמעותית את קצב השחרור שלהן מסלעי הקרום של כדור הארץ לאטמוספירה, למאגרי מים ולקרקע בהשוואה לתהליכי בליה טבעיים (נחזור לנושא זה בפרק 5). חלק מהמתכות בהן נדון רעילות ביותר וחלקן מופקות ⁵²

⁵⁰ TCE = technology critical elements TCE. TCE are essential materials for high-tech technologies, characterized by scarcity and economic importance. They enable functions like energy storage, miniaturization, and high-performance capabilities in various industries. Identification is based on limited availability, supply chain risks, and impact on competitiveness - Klee, R. J., Graedel, T. E. (2004) Elemental cycles: A status report on human or natural dominance. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **29**, 69–107. (2) Cobelo-García, A. et al. (2015) COST action TD1407: network on technology-critical elements (NOTICE)—from environmental processes to human health threats. *Environ Sci Pollut Res* **22**, 15188–15194. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5221-0>

(Ni, ניקל, Co, קובלט, Li, ליתיום, Cu, בעיקר בפלדה, נחושת) – Cr, ברזל – בעיקר בפלדה, Mg, מנגן, Mn, ברזל – בעיקר בפלדה, Al, כולל: אלומיניום TCE פלטינה, Au, זהב, Se, סלניום, Ag, כסף, Sb, אנטימון, Ti, תליום, As, ארסן, In, ראו תת-פרק 4.5.4, אינדיום – REE, עפרות נדירות, Pb, עופרת, ועוד. (Rh, רודיום, Pd, פלדיום, Pt)

⁵¹ בריכוז שעושה את הכרייה כדאית מבחינה כלכלית ואפשרית, ore) = כרייה = חציבה של מינרלים מועשרים במתכת הרצויה שנמצאים בסוג סלע הנקרא בצר מבחינה טכנולוגית

⁵² הפקה = כרייה ועיבוד המתבצע לאחר הכרייה ובמהלכו נעשה מיצוי של המתכת הרצויה מהמינרלים המכילים אותה בשיטות של התכה או המסה (הרבה פעמים בעזרת חומצות) והשקעה.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 4 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ
בשיטות הרסניות לסביבה ולאנשים העוסקים בהן ⁵³ אם כי נעשים מאמצים לשפר, לייעל ולהפחית את הנזק שגורמת, הכרייה ⁵⁴.

המעבר למשק אנרגיה המבוסס על אנרגיות מתחדשות מחייב את הגברת ההפקה של מספר מתכות ⁵⁵ הצפי הוא .

תגדל פי 40, הדרישה לגרפיט (מינרל של פחמן הנוצר בטמפרטורות Li) שהדרישה של משק האנרגיה לליתיום תגדל פי (REE) תגדל פי 20-25, הדרישה למספר עפרות נדירות (Co) וקובלט (Ni) גבוהות ללא נוכחות חמצן, ניקל שבע, כל זאת על מנת לעמוד ביעד של עליית הטמפרטורה הממוצעת בכדור הארץ בפחות משתי מעלות צלזיוס (איור 4.7).

איור 4.7: הדרישה למינרלים ומתכות לצורך טכנולוגיות אנרגיה נקייה לפי שני תרחישים (אפס פליטות של גזי חממה עמידה ביעד של התחממות פחות של מ-2° צלזיוס). (א) עלייה מ-2020 ל-2040 - בתחומים – SDS 2050, עד - מקור: REE = earths Rare - SDS. שונים. (ב) גידול בצריכת גרפיט ומספר מתכות מ-2020 ל-2040 - על פי תרחיש ה- IEA (2021) The Role of Critical Minerals⁵⁶ in Clean Energy Transitions, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>; CC BY 4.0; Reprinted with permission.

דרישה גבוהה למתכות במשק אנרגיה המבוסס על אנרגיות מתחדשות נובעת מכך בש ייצור מתקני אנרגיה חילופית משתמשים בהרבה יותר מתכות בהשוואה לתחנות כוח גרעיניות ופוסיליות. לדוגמא, תחנת רוח ימית משתמשת בכמות מתכות הגדולה פי תשע מזו של תחנה השורפת גז טבעי. גם ייצור רכב חשמלי צורך פי שש יותר מתכות

⁵³ M. G. Macklin et al., Impacts of metal mining on river systems: a global assessment. Science 381,1345-1350(2023).

DOI:10.1126/science.adg6704

⁵⁴ Frenzel M., Tolosana-Delgado R., Gutzmer J. (eds.) (2023) Geometallurgy, Elements, Volume 19, Number 6, ISSN 1811-5209 ⁵⁵ (1) IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>; (2) Chen Z., Kleijn, R., & Lin, H. X. (2022). Metal requirements for building electrical grid systems of global wind power and utility-scale solar photovoltaic until 2050. ES&T. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06496>; (3) Allesch, A., Huber Humer, M. (2023). A Brief Glance on Global Waste Management. In: Tribaudino, M., Vollprecht, D., Pavese, A. (eds) Minerals and Waste. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16135-3_9 ⁵⁶ Kreiner, D. C., J. Hammarstrom, and W. Day (2023) Critical minerals for a carbon-neutral future, Eos, 104, <https://doi.org/10.1029/2023EO230403>.

משבר הסביבה והאקלים (2024), פרק 4 – יגאל אראל, מדעי כדור הארץ (4.8) לא כולל ברזל) מייצור רכב עם מנוע שריפה פנימית (איור)⁵⁷ כמו כן, הצורך לח שמל את כל צרכני האנרגיה. בבתים ובמפעלים מחייבת הרחבה בעשרות אחוזים של רשת קווי החשמל המושתת על אלומיניום וברזל (לתשתיות)

איור: 4.8: כמות המתכות (ללא אלומיניום וברזל) הנצרכות במכוניות ובמתקני הפקת אנרגיה. מקור: IEA (2021) The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>; CC BY 4.0; Reprinted with permission.

על מנת לייעל את הדיון בעתיד הצפוי לכריית מתכות והפקתן הוצע להתמקד במתכות המשמשות את התעשייה כיום, אולם נחשבות בעייתיות לפי אחד משלושה קריטריונים⁵⁸ מתכות שבריתן והפקתן כרוכות בנזק סביבתי (1): עקב ערכן הגבוה של מתכות אלה (Pd, Ir, Rh) ומתכות מקבוצת הפלטינה (בעיקר Pt) פלטינה (Au) גדול: זהב כרייתן, גם כאשר ריכוזן נמוך, כדאית מבחינה כלכלית, מה שגורר פגיעה מאסיבית בנוף; (2) מתכות נדירות בקרום (As – ארסן, In), כדור הארץ המופקות במקרים רבים כתוצר לוואי בתהליך הפקתן של מתכות אחרות: אינדיום אל מתכת (מתכות אלו Se – וסלניום Ag) מתכת למחצה, כסף – Sb) אנטימון, Tl) מתכת למחצה, תליום נדרשות בין היתר לייצור פאנלים סולאריים דקים, כך שהדרישה להן תעלה בשנים הקרובות; (3) מתכות שמקורותיהן אה ספקה שלהן אינם בטוחים, בעיקר מסיבות גיאופוליטיות (נמצאות בעיקר במדינה אחת או באזור רגיש מבחינה ברור (REE) ומספר נדירות Y) איטריום, Rh) רודיום, Mn) מנגן, Cr) כרום, Mg) יב טחופית: מגנזיום לגמרי שרשימת המתכות שלעיל דורשת עדכון אחת לכמה שנים. מחברי המחקר בו מופיעה הרשימה הציעו עדכון מידי חמש שנים, שכן דרישות התעשייה משתנות וייתכן (<https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>) שלחלק מהן יימצא תחליף. למיטב ידיעתי, למרות שחלפו מעל חמש שנים מאז פרסום המאמר, לא נעשה ניסיון לעדכן את הרשימה. שנתיים לאחר פרסומה, בשנת 2017 פרסם הבנק העולמי הערכות לגבי הדרישה הצפויה למתכות שונות על מנת לעמוד ביעדים של התחממות גלובלית של 2°C ו-4°C צלזיוס (בעיקר לייצור טורבינות רוח ותאים

⁵⁷ ניתוח מחזור-חיים של רכב חשמלי מצביע על כ 50% פליטות של גזי חממה, שיכול לרדת לרבע אם לוקחים בחשבון מפעלי ייצור הפועלים עם חשמל שמיוצר
⁵⁸ Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., Nuss, P., & Reck, B. K. (2015) Criticality of metals and metalloids. *PNAS* 112(14), 4257-4262. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>