

# לקראת עולם ירוק יותר?

כבר כ־200 שנה החברה המודרנית מכורה לנפט ולפחם, והדלקים המאובנים הם השחקנים הראשיים במשק האנרגיה העולמי - מה שמגביר את זיהום האוויר. האם אנרגיות מתחדשות הן הפתרון?

דוד אנדלמן וגי דויטשר

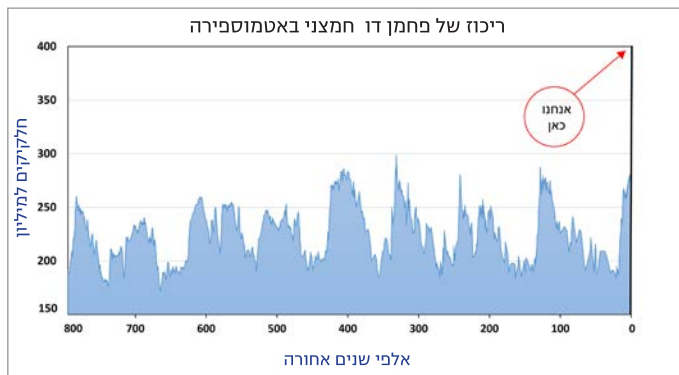


צילום: Shutterstock



**ל**קים מאובנים (נפט ופחם, גז), אנרגיה גרעינית ואנרגיות מתחדשות הם השחקנים הראשיים במשק האנרגיה העולמי, ולכל אחד מהם יתרונות וחסרונות משלו. ההתמכרות של החברה המודרנית לנפט ולפחם היא בת פחות מ־200 שנה, והפיתוח של אנרגיה גרעינית החל מאוחר יותר, רק לפני כ־60 שנה. ישנן סיבות טובות לשימוש במקורות מתחדשים להפקת אנרגיה, אבל פתרון מציאותי להפסקת התלות בדלק מאובנים יהיה אפשרי רק אם נפתור את בעיות האחסון והתמסורת של אנרגיה חשמלית. כשהסוכנות הבינלאומית לאנרגיה (IEA - International Energy Agency) נוסדה לפני יותר מ־40 שנה בעקבות מלחמת יום הכיפורים בין ישראל ושכנותיה ומשבר הנפט שפרץ בעקבותיה, העתיד של אספקת הנפט בשוק העולמי נראה עגום ולא ברור, אך כיום האתגרים במשק האנרגיה העולמי קיבלו תפנית משמעותית. בעקבות פיתוח מסיבי של מקורות פצלי שמן וגז טבעי בארצות הברית, יחד עם אמצעים משופרים להיסכון ולצריכה יעילה יותר של אנרגיה נראה כי יש מספיק דלק לכל. לעומת זאת, הבעיות הבעורות שעומדות כעת על הפרק הן סביבתיות: זיהום אוויר ומקורות מים, יציבות אקלימית והתחממות גלובלית. לכל אלו יש מכנה משותף אחד: תלות מאסיבית בדלקים מאובנים, ומכאן השאיפה הברורה לעבור למקורות אנרגיה חלופיים בני קיימא. הפחד מפני תאונות בתחנות כוח גרעיניות המספקות חשמל (כגון אירועי צ'רנוביל ופוקושימה) וכן בעיית הפסולת הגרעינית מהוות מקור לדאגה מתמשכת. בכמה מדינות החברות בארגון המדינות לשיתוף פעולה ולפיתוח כלכלי (OECD), כגון גרמניה, נעשה פיתוח מואץ של מקורות אנרגיה מתחדשים ונקיים מתוך מטרה כפולה: למנוע את הסיכון הגרעיני וכן לצמצם את התלות בדלקים מאובנים. כחצי מתחנות הכוח הגרעיניות של גרמניה נסגרו מאז 2011, והמגמה היא שעד 2022 יתר התחנות ייסגרו באופן הדרגתי. עם זאת, בחינה מקרוב של המדיניות הגרמנית מראה כי באופן פרדוקסלי גבר השימוש בפחם - אחד ממקורות הדלק המזהמים ביותר - לצורך הפקת חשמל בגרמניה. יתר על כן, חשמל המופק מאנרגיות מתחדשות גרם לעלייה משמעותית במחירי החשמל לצרכן. נראה כי המודל הגרמני לאספקה ולצריכה של אנרגיה זמינה, זולה ונקיה, רחוק עדיין מלהיות מושלם, וכי האנושות כולה אינה קרובה למציאת פתרון אנרגטי גלובלי שיוכל להבטיח עתיד בטוח יותר לכדור הארץ ולתושביו.

את הערך הקלורי שלו לאנרגיה החיונית לפעילות השוטפת של כל גוף חי; המחשב האישי ומכשירים אלקטרוניים ניידים פועלים על ידי סוללות הממירות אנרגיה כימית לחשמלית; והמכונית מסיעה אותנו בזכות מנוע בערה פנימי השורף דלק וממיר אנרגיה כימית לקינטית. לרוע המזל, המרה של אנרגיה מצורה אחת לאחרת היא תהליך שיכול לבזבז אנרגיה, כפי שהפיזיקאי והמהנדס הצרפתי, סאדי קרנו (Carnot), גילה כבר במאה ה־19. כדי להבין זאת, אנו זקוקים להסבר של מושג



**איור 1: ריכוז פחמן דו חמצני באטמוספירה ביחידות חלקיקים למיליון, ppm, כתלות בזמן באלפי שנים. עד לשנת 1958 - ממצאים שנלקחו מדוגמיות קרח, ומשנת 1958 - מהאטמוספירה**  
מקור: המכון האוקיינוגרפי סקריפס (Scripps)

## אנרגיה לעומת אנטרופיה

לפני שננתח מה השתבש בגרמניה ונסה להציע פתרונות משופרים, חשוב להבין מהי אנרגיה וכיצד היא נוצרת. המילה *energeia* הייתה בשימוש כבר על ידי אריסטו ותוארה כסוג של פעולה. רק במאה ה־18 השתרש מושג האנרגיה כפי שאנו מכירים אותו כיום. אנרגיה מגדירה את היכולת של כל מערכת לבצע פעילות מסוימת, כגון עבודה מכנית (טיפול במדרגות), קינטית (ירי של רקטה), תרמית (חימום מים), כימית (הבערת אש), או חשמלית (הפעלת מחשב נייד). המקור של כל צורות האנרגיה הללו, פרט לגרעינית ולגיאותרמית, הוא השמש. הקרינה האלקטרומגנטית מהשמש, הכוללת קרינת אור וכן קרינה אולטרה סגולה ואינפרא אדומה, היא הכוח המניע של רוב מקורות האנרגיה על פני כדור הארץ: דלקים מאובנים, רוח, סולארית (אנרגיית שמש), אנרגיה הידרואלקטרית (זרימת מים). אמנם אי אפשר ליצור אנרגיה יש מאין, אולם אפשר להפוך צורת אנרגיה אחת לאחרת. הנה כמה דוגמאות מחיי היומיום: הגוף שלנו מעכל את המזון שאנו אוכלים וממיר



צילום: Shutterstock

ניכרת על ידי אותם תהליכים שיצרו את הדלקים המאובנים והפחם. במשך מיליונים רבים של שנים, קרינת השמש הייתה מקור האנרגיה שהניע את הפוטוסינתזה - תהליך משותף לצמחים, לאצות ולמיקרו אורגניזמים פוטוסינתטיים. מים וגז  $CO_2$  שמקורו באטמוספירה הפכו לחומר אורגני (סוכר) ולחמצן. חלק מהחומר האורגני נרקב ופורק על ידי שחרור של  $CO_2$  חזרה לאטמוספירה. אבל חלקו האחר נקבר, נדחס, והפך לנפט, גז ופחם על ידי תהליכים גיאולוגיים אטיים שנמשכו מיליוני שנים. שרפת דלקים מאובנים בזמן מאוחר יותר היא ההליך ההפוך, שמחזיר את מולקולות ה- $CO_2$  לאוויר. הן ממלאות את אטמוספירת כדור הארץ תוך הגדלת האנטרופיה שלה, בדיוק כמו פתיחת בקבוק הבושם בדוגמה שתיארנו.

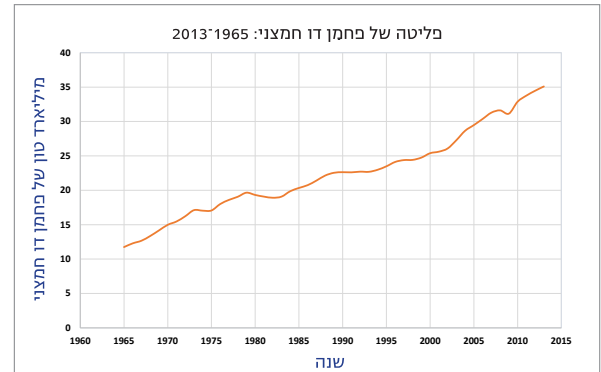
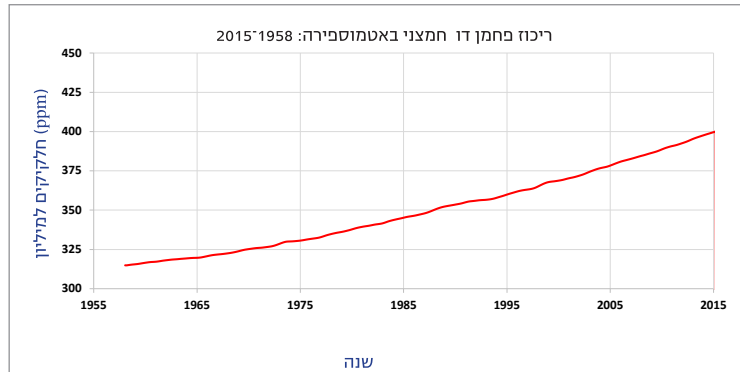
### האנטרופיה המתגברת של $CO_2$ באטמוספירה

השינויים לאורך השנים של ריכוז ה- $CO_2$  באטמוספירה נסקרים בהרחבה בספר "משבר האנטרופיה" של ג'י דויטש (2008), הוצאת World Scientific). לפני מיליוני שנים רמת ה- $CO_2$  באטמוספירה הייתה גבוהה. בגלל כמה סיבות (כולל יצירה של דלקים מאובנים), רמת ה- $CO_2$  ירדה והגיעה ליציבות במשך מאות אלפי השנים האחרונות, שבהן היא התנדנדה בין 180 ל-280 חלקיקים למיליון, ppm (ראו: איור 1). עם זאת ב-200 השנים האחרונות קיים גידול משמעותי בריכוז ה- $CO_2$  באטמוספירה. בשנים 1850 עד מלחמת העולם השנייה עלתה הרמה מ-280 ל-310 ppm בקצב של כ-3 ppm לעשור. תקופה זו מאופיינת בפעילות תעשייתית מואצת, בעיקר באירופה ובארצות הברית, שם

האנטרופיה - האחוזת התאומה אך הידועה פחות של האנרגיה. אנטרופיה קשורה לאי הסדר במערכת, הנובע ממספר התצורות המרחביות הזמינות למולקולות.

נסביר את מושג האנטרופיה באמצעות דוגמה: כאשר אנחנו פותחים בקבוק בושם, מולקולות הבושם מתנפחות לאוויר, ותוך זמן קצר וללא התערבות חיצונית הן יתפשטו ברחבי החדר. אחד מחוקי היסוד של התרמודינמיקה הוא שאנטרופיה (אי הסדר במערכת) אינה יכולה לקטון במערכת סגורה. לפיכך, מולקולות הבושם לא יישארו בתוך הבקבוק אלא יתפשטו באופן אחיד וימלאו את כל חלל החדר ויגדילו את האנטרופיה. אם נגדיל את החלל, המולקולות ימשיכו למלא את החלל הזמין הגדול יותר ובכך יגדילו עוד יותר את האנטרופיה שלהן. לעומת זאת, התהליך ההפוך שבו למשל מולקולות נדחסות באופן ספונטני ותופסות חצי מחלל החדר, לא אפשרי. האורח האקראי של תנועה מולקולרית לא מאפשר זאת. הדרך היחידה להקטין את האנטרופיה היא על ידי התערבות חיצונית (השקעת אנרגיה) ודחיסת המולקולות חזרה למצב המקורי שלהן. דוגמה חשובה להקטנה של אנטרופיה היא בתהליך של התפלת מים באמצעות אוסמוזה הפוכה. בתהליך זה, מי מלח נדחסים אל ממברנה בעלת חדירות ברירנית (סלקטיבית), כך שרק מולקולות המים עוברות ומופרדות מהמלח. ההשקעה האנרגטית שיוצרת את הלחץ, מפצה על הירידה באנטרופיה של תמיסת מי המלח המרוכזת.

ירידה דומה של אנטרופיה (או של אי הסדר) היא בדיוק מה שקרה לפני מאות מיליוני שנים על פני כדור הארץ. באותה תקופה ריכוז הפחמן הדו חמצני ( $CO_2$ ) באטמוספירה היה גבוה, אך ריכוזו ירד בצורה



**איור 2 - ימין: פליטה של CO<sub>2</sub> ביחידות של מיליארדי טונות לשנה בשנים 1965-2013**

**שמאל: ריכוז CO<sub>2</sub> באטמוספירה (ppm) בשנים 1960-2015**

מקור האיור מצד ימין: חברת הנפט הבריטית BP ([bp.com/statisticalreview](http://bp.com/statisticalreview))  
מקור האיור מצד שמאל: המכון האוקיינוגרפי סקריפס (Scripps)

במקורות אנרגיה מתחדשים שלא פולטים CO<sub>2</sub> כגון: שמש, רוח, אנרגיה הידרו-חשמלי ואנרגיה גיאותרמית, וגם להמשיך לייצר חשמל בכורים גרעיניים אשר לא פולטים גזי חממה, כולל CO<sub>2</sub>.

**אנרגיות מתחדשות: הדוגמה הגרמנית**

בשנים האחרונות אנו עדים למחקר ופיתוח תעשייתי נרחב שהוריד את מחיר החשמל המופק מאנרגיות מתחדשות והשווה אותו למחיר של החשמל שמופק מדלקים מאובנים (מלבד פחם). הדבר מהווה מקור לתקווה שאפשר יהיה להוריד את התלות בדלקים מאובנים ולהפחית את פליטת ה-CO<sub>2</sub> ללא מיתון כלכלי עולמי. נראה כי יש סיכוי למהפכה אנרגטית משמעותית, אך הדרך עדיין ארוכה. בחינה של האופן שבו גרמניה פועלת בתחום האנרגיות המתחדשות יכולה להבהיר אם התקוות שגלומות באנרגיות אלה יכולות להתגשם. גרמניה היא אחת המדינות המצטיינות ביכולת ייצור חשמל ממקורות אנרגיה מתחדשים. עם זאת, אחת הבעיות המיידיות היא השימוש המוגבר באנרגיות מתחדשות הן כתחליף לדלקים מאובנים והן לאנרגיה גרעינית, לוותה בעלייה תלולה במחיר החשמל לצרכן. כיום, מחיר החשמל בגרמניה הוא מהגבוהים באירופה.

אנרגיות מתחדשות חייבות להיות מגובות בתחנות כוח קונבנציונליות אשר מייצרות חשמל כלילה או בתנאי מזג אוויר שבהם הפנלים הסולאריים או טורבינות הרוח אינם פעילים. עלות הבנייה של תחנות אלה והפעלתן כגיבוי מעלה בצורה משמעותית את מחיר החשמל. כמו כן, לפי החוק הגרמני חברת החשמל מחויבת לקנות את החשמל שמופק על ידי המקורות המתחדשים ולשלם עליו מחיר קבוע לקוט"ש (קילו-ואט שעה), ללא קשר לדרישה לחשמל באותו הרגע. נוסף על כך, כדי להוריד עלויות, תחנות הכוח הגרמניות שורפות ליגניט (פחם חום) שהוא פחם זול ובאיכות נמוכה שמגביר עוד יותר את זיהום האוויר. כיום, 43 אחוז מייצור החשמל בגרמניה מופק משרפה של פחם, ופליטת ה-CO<sub>2</sub> בגרמניה לא פחתה ואפילו גדלה בשנים האחרונות. בשנים 2011 עד 2014 גדלה הפליטה ב-5 אחוז, מ-770 ל-800 מיליון טונות.

השתמשו בפחם כדלק למנועי קיטור בתעשייה ובאמצעי תחבורה, וכן להסקה. התקופה השנייה, לאחר מלחמת העולם השנייה ועד ימינו, מאופיינת בעלייה חדה של ה-CO<sub>2</sub> מ-310 ל-400 ppm (ראו: איור 2, שמאל), עם קצב מוגבר של כ-20 ppm לעשור, הממשיך לצמוח באופן מדאיג, וחורג בצורה משמעותית מהתנודות המתונות ב-800 אלף השנים האחרונות. בדו"ח של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה משנת 2014 מופיעה הערכה שגם אם קצב שינוי ה-CO<sub>2</sub> יפסיק לעלות, אנו צפויים להגיע בסוף המאה ה-21 לרמות של 600 ppm, שהן כפליים מהרמות הגבוהות ביותר שידע כדור הארץ ב-800 אלף השנים האחרונות. עובדות אלו מטרידות משום שאין עדות גיאולוגית לגידול כה גדול בפרק זמן קצר. עד כה, רוב תשומת הלב התמקדה בשאלת ההתחממות הגלובלית, אבל לגידול ברמות ה-CO<sub>2</sub> יכולות להיות השלכות אקלימיות קשות יותר, ובעיקר בלתי צפויות.

העלייה ברמות ה-CO<sub>2</sub> באטמוספירה בשתי המאות האחרונות קשורה קשר הדוק לפליטה של CO<sub>2</sub> מבערה מלאכותית של דלקים מאובנים. בקצב פליטה של עד 3 מיליארד טונות לשנה, הפליטה והספיגה חזרה של CO<sub>2</sub> מהאטמוספירה מאזנות זו את זו. אבל כיום הפליטה עומדת על קצב שנתי גדול פי עשרה - 35 מיליארד טונות (ראו: איור 2, ימין). פליטה מוגברת זו ממשיכה לעלות למרות פרוטוקול קיוטו - אמנה בינלאומית למניעת שינוי האקלים שאומצה על ידי האו"ם בדצמבר 1997 במטרה להפחית את פליטת גזי החממה, ולהתחייבויות שניתנו על ידי מדינות וארגונים שונים. הקצב כיום כה גדול עד שקרינת השמש יחד עם פוטוסינתזה ותגובות כימיות אחרות לא מספיקות להתגבר על גדילת האנטרופיה באטמוספירה, ויש סיכון ממשי שהביוספירה תוסט משיווי המשקל שאפיין אותה במיליון השנים האחרונות.

כדי לחזור לרמות של CO<sub>2</sub> שיכולות להיות מאוזנות על ידי תהליכים טבעיים הנשענים על קרינת השמש, צריך להפחית ב-90 אחוז את הבערה של דלקים מאובנים. אפשר לעשות זאת בכמה אופנים. הישיר ביותר הוא למתן את צריכת האנרגיה העולמית וכך להוריד את פליטת ה-CO<sub>2</sub>. כמו כן, אפשר לספוג בחזרה את ה-CO<sub>2</sub> מהמקור שממנו נפלט (תחנת הכוח). הליך זה אפשרי אך יקר, מכיוון שהוא יוריד את יעילות הייצור החשמלי. לבסוף, אפשר להחליף את הדלקים המאובנים כמקור האנרגיה הראשי



צילום: Shutterstock

מסחריות בתהליך של אלקטרוליזה - מעבר של זרם חשמלי המפריד את מולקולות המים לרכיביהן, מימן וחמצן. מימן הוא מקור אנרגיה נקי לחלוטין שלא פולט CO<sub>2</sub> או גזי חממה אחרים, ואפשר לאחסנו ולהשתמש בו לפי הצורך בתאי דלק שמפיקים חשמל. כבר כיום ישנן מכוניות קונספט שבהם מנוע חשמלי מופעל באמצעות תאי דלק המבוססים על מימן במקום על סוללות.

### אנרגיות מתחדשות: לאן?

למרות החידושים המרשימים בחומרים מתקדמים ובהתקנים שיפרו את מקורות האנרגיה המתחדשים, מקורות אנרגיה אלה מהווים כיום רק 5 אחוזים מאספקת החשמל העולמית (ראו: איור 3). אנרגיות מתחדשות לא יוכלו לספק את דרישת האנרגיה העולמית בשנים הקרובות מכמה סיבות. ראשית, הכוונה היא שאנרגיות מתחדשות יחליפו את הדלקים המאובנים כמקור לייצור חשמל. ואולם, כיום רק כ-20 אחוז מהשימוש בדלקים מאובנים הוא לצורך ייצור חשמל, ושאר 80 האחוזים מתחלקים בצורה שווה בין תחבורה (ציבורית ופרטית) וחימום. הגדלת חלקה של האנרגיה החשמלית תחייב שינויים מהותיים בתחבורה (מכוניות ואוטובוסים חשמליים), ושימוש במזגנים ובמשאבות חום חשמליות יעילות לחימום ולמיזוג בתים פרטיים ומבני ציבור. כל זה מחייב השקעה מסיבית בתשתיות, בחומרים ובתכנון. שנית, ואולי חשוב יותר, יצירה של מקורות אנרגיה מתחדשים שיתפסו את המקום הראשי בייצור אנרגיה בקנה מידה עולמי היא בעיה סבוכה. ולכן עד כה לא יותר מ-10 אחוזים מייצור האנרגיה בכל המדינות המפותחות הוא ממקורות מתחדשים. הפעילות הציבורית הנמרצת של תנועות הירוקים התמקדה בהפעלת לחץ על גופי הממשל לצמצום ואף להפסקת פעילותן של תחנות

### אחסון ותמסורת של חשמל

ייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים תלוי בתנאים מקומיים. למשל, המיקום המועדף לפנלים סולאריים הוא מקומות שטופי שמש, ואילו טורבינות רוח כדאי למקם במקומות שבהם נושבות רוחות חזקות. בגרמניה, רוב הטורבינות ממוקמות באזור הים הצפוני אך מרבית צריכת החשמל נעשית כ-700 ק"מ דרומה משם, באזור המתועש. בינתיים רק חלק קטן מקווי המתח הגבוה נבנו לצורך העברת החשמל, וכפתרון זמני גרמניה קונה חשמל ממדינות שכנות כגון פולין וצ'כיה, המייצרות חשמל על ידי שרפה של פחם, ומצרפת, שבה הוא מיוצר בתחנות כוח גרעיניות. לכן, קשה לראות כיום כיצד אפשר להרחיב את המודל הגרמני וליישמו בכל אירופה. סוגיה מורכבת יותר היא בעיית אחסון האנרגיה החשמלית. כיוון שאין בנמצא פתרונות לאחסון בקנה מידה גדול, יש לספק את החשמל המיוצר למקוטעין ולא בצורה רציפה מאנרגיות מתחדשות מיד עם ייצורו. הבעיה שנוצרה היא חוסר תאימות בין ייצור החשמל ממקור מתחדש (התלוי במזג אוויר ובעוצמת אור השמש) לבין הצריכה המשתנה לאורך שעות היממה (בוקר וערב) ולפי תקופות השנה (חורף וקיץ). פתרון אפשרי לאחסון חשמל הוא המרתו באנרגיה אחרת שבה אפשר להשתמש לפי דרישה בזמן מאוחר יותר. כך למשל, בשווייץ חשמל עודף משמש לשאיבה של מים ואחסונם במאגרים עיליים הממוקמים במעלה ההר. לאחר מכן, המים זורמים במורד ההר ומניעים טורבינות הידרו-חשמליות המייצרות חשמל בזמן של צריכת יתר.

דוגמה לאחסון אנרגיית השמש (ללא יצירת חשמל) הוא שימוש ברודי שמש לחימום ביתי של מים. שימוש זה אינו מצריך טכנולוגיות מתקדמות, ונפוץ מאוד בישראל במקומות שבהם שטח הגג מאפשר זאת. פתרון עתידי נוסף לאחסון אנרגיה הוא ייצור של מימן בכמויות

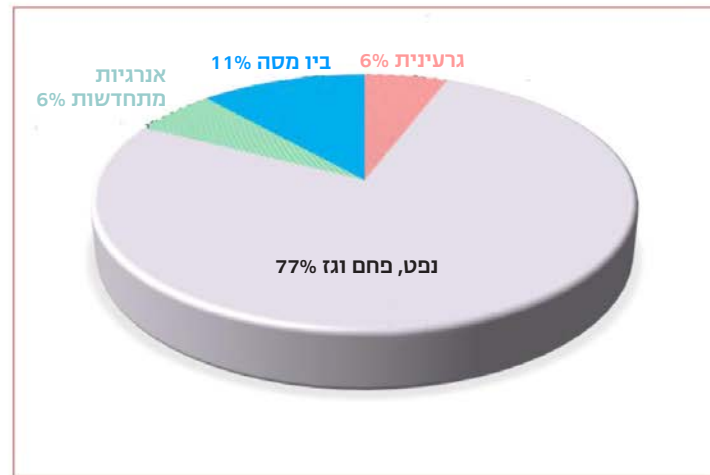
## מקורות לא מתחדשים



## אנרגיות מתחדשות



## צריכת אנרגיה עולמית - 2012



איור 3: התפלגות צריכת האנרגיה העולמית לשנת 2012 לפי מקורותיה: אנרגיות מתחדשות, ביו מסה, אנרגיה גרעינית ודלקים מאובנים: נפט, גז טבעי ופחם

ארוכים. אפשר לחשוב על פתרון חלופי - קווי מתח גבוה הפועלים בזרם ישר (DC) דווקא, הסובלים פחות מהפסדים משמעותיים בקווי העברה ארוכים. קווים אלו יונחו תת קרקעית ואף יהיו על מוליכים בקרבת מרכזים עירוניים. לכן, יש לתת עדיפות למחקר ולפיתוח של קווי העברת זרם חשמלי ישר וכן להמרה בין DC ל-AC, מאחר שרוב היישומים המסחריים משתמשים כיום בזרם חילופין.

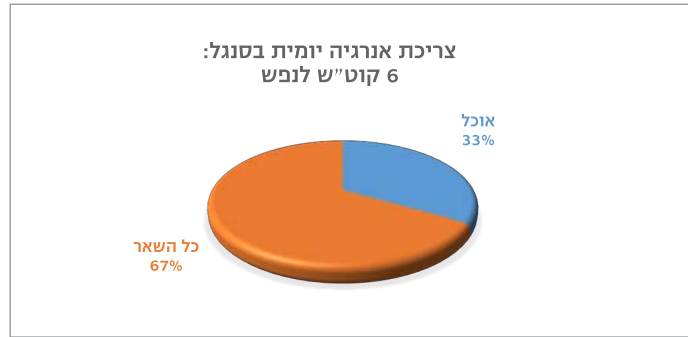
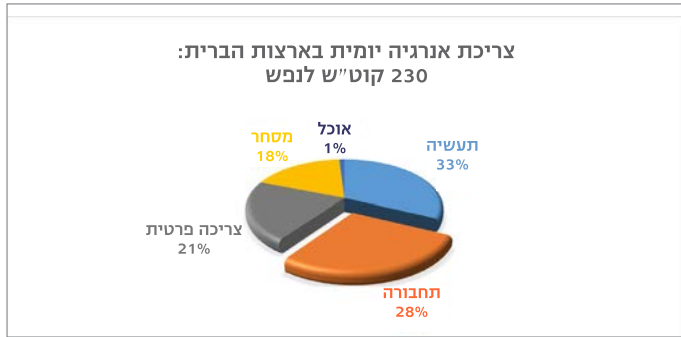
כיום אין עדיין בנמצא פתרונות חסכוניים לאחסון חשמל בקנה מידה גדול. בטווח הקצר והבינוני (כמה עשרות שנים) אחסון מבוזר ביחידות אחסון קטנות ובינוניות נראה כפתרון ביניים מצוי. עקב מסחור מואץ של מכונות חשמליות, הייתה התקדמות מהירה בפיתוח של סוללות חשמליות בקיבולת של כמה עשרות קוט"ש. למכונות חשמליות קטנה כגון שברולט וולט יש סוללה של כ-20 קוט"ש, ולמכונות חשמליות ארוכות טווח, כגון דגם S של חברת טסלה מוטורס, יש סוללה של 70-85 קוט"ש המאפשרת נסיעה רצופה של 450 ק"מ בין הטעינות. לאחרונה, החלה חברת טסלה בשיווק של יחידות אחסון (סוללות) למגזר הפרטי (בקיבולת של כ-10 קוט"ש) וגדולות יותר לתעשייה. יחידות אלה, בשילוב אפשרי עם מקור של אנרגיה מתחדשת, יכולות לספק את רוב תצרוכת החשמל היומית של צרכן פרטי ולכן מהוות פתרון מעולה למגזר גדול של צרכנים פרטיים ועסקיים. חברת החשמל יכולה לספק חשמל בשעות הצריכה הנמוכה (לילה) שיאוחסן אצל הצרכן כדי להשתמש בו מאוחר יותר בשעת צריכת שיא. לחלופין, הפנלים הסולאריים יוכלו לייצר חשמל בשעות היום. שימוש ביחידות אלו יכול להוריד עלויות הן לחברת החשמל והן לצרכנים, אם המחיר שייגבה מהצרכן יותאם לשינוי היומי והעונתי באספקת חשמל ובביקושו.

### הלם העתיד

אנרגיות מתחדשות יכולות לתרום תרומה חשובה להפחתה ואף לביטול

כוח גרעיני. אף שנראה שפעילים אלה מודעים להשפעה המזיקה של השימוש הנרחב בדלקים מאובנים על הביוספירה, הירוקים נתנו עדיפות עליונה לפירוק האופציה של אנרגיה גרעינית. לעניות דעתנו בחירה זו אינה מבוססת מדעית ואף שגויה. פליטה מסיבית של CO2 מסוכנת בהרבה משום שהיא מערערת את היציבות העולמית של הביוספירה. תאונות גרעיניות, אפילו רציניות כמו בצ'רנוביל, אפשר למנוע או לפחות למזער; אלו הם אירועים מקומיים. לעומת זאת, כאשר מולקולות CO2 משתחררות לאוויר, דבר לא יכול לעצור אותן. בין שהן משתחררות בסמוך אלינו ובין שהן משתחררות מצדו השני של כדור הארץ, כל הביוספירה מושפעת. העלייה החדה בריכוז CO2 באטמוספירה בעשורים האחרונים היא חסרת תקדים, ועלולות להיות לכך השלכות הוות אסון ובלתי צפויות על סביבת כדור הארץ, כגון עליית הטמפרטורה ופגיעה ביציבות האקלים.

ניתוח הדוגמה הגרמנית מוכיח כי לפחות בהסתמך על טכנולוגיות קיימות, לאנרגיות המתחדשות יש השפעה מוגבלת על משק האנרגיה העולמי, בשל היעדר תשתית מתאימה המאפשרת העברה למרחקים ארוכים של חשמל ואחסונו בצורה מסיבית. השימוש בנפט, בגז טבעי ובפחם, המייצגים כ-80 אחוז מצריכת האנרגיה בעולם (ראו: איור 3) לא פחת בגרמניה. להפך, הוא אף גדל וגרר בעקבותיו עלייה של חמישה אחוזים בפליטת CO2. כמות זו אף אינה מביאה בחשבון את הפליטה הנוספת של CO2 בתחנות הכוח השורפות פחם בפולין ובצ'כיה הסמוכות, המוכרות חשמל לגרמניה. העברת חשמל המופק מטורבינות רוח בצפון גרמניה לאזורי התעשייה בדרום היא לא רק יקרה, אלא מורכבת מבחינה טכנית. בדרך כלל, תחנות כוח מספקות חשמל ברדיוס של 150-200 ק"מ מהמקום שבו הן ממוקמות. ההתנגדות החשמלית (עכבה, impedance) של קו העברה של זרם חילופין (AC) גורמת לתזוזת המופע (פאזה) בין הזרם והמתח, ולכן גם לאיבודי הספק הגדלים עם אורך הקו. הפסדים אלו בקווי מתח גבוה של זרם AC מקשים על העברת חשמל למרחקים



**איור 4 – ימין: צריכת אנרגיה יומית ממוצעת לנפש בסוגל – 6 קוט"ש; שליש לאוכל ושני שליש לכל השאר. שמאל: צריכת אנרגיה יומית ממוצעת לנפש בארצות הברית – 230 קוט"ש (מכל מקורות האנרגיה) הגדולה פי 40 מהצריכה בסוגל. הצריכה מחולקת בין צריכה ביתית (50 קוט"ש), מסחרית (40 קוט"ש), אוכל (2 קוט"ש), תחבורה (65 קוט"ש) ותעשייה (75 קוט"ש)**

הגרעיניות כפתרון ביניים לאספקת חשמל לכמה עשורים. זה יאפשר שמירה על קצב בר קיימא של פיתוח כלכלי עולמי, בד בבד עם הפחתה ניכרת הן של פליטת CO<sub>2</sub> והן של ההתמכרות העולמית לנפט. עד כה, התקדמות גדולה בחקר חומרים הובילה למציאת מקורות אנרגיה מתחדשים, יעילים וזולים יותר. אבל רק כאשר אפשר יהיה ליישם פתרונות מתאימים ובני קיימא להעברה ולאחסון חשמל, תהיה לאנרגיות המתחדשות יכולת השפעה משמעותית על ייצור אנרגיה בעולם. יישום פתרונות אלו אינו נראה עדיין באופק, אבל עם השקעה ניכרת במחקר ובפיתוח נוכל להגיע אליו בעוד כמה עשורים.

אנו מודים לעמיתים על הערותיהם המועילות: רם אדר, לואיק אובריי, מיכל אנדלמן, רועי בקיברקאי, אליעזר גלעד, חיים דימנט, ברנרד הולצופל, ראול זאנה, ז'אק טריינר, אריק יוכליס, גיל מורן, קולין פרייס, דידיה רו, רון רוזנצוויג וז'אן-פייר שוורץ.

**להרחבה:**

מאמר זה מבוסס על מאמר מאת המחברים בשם: Kicking the oil addiction with renewables: fact or fiction? שפורסם ב'World Policy Journal', יוני 2015

**פרופ' דוד אנדלמן** מכהן כראש ביה"ס לפיזיקה ולאסטרונומיה באוניברסיטת תל-אביב. מחקריו עוסקים בפיזיקה של חומרים רכים, נוזלים מורכבים ומערכות ביולוגיות, ובפרט מחקר בסיסי במערכות נוזליות טעונות כגון תמיסות נוזלים יונים, ממברנות ופולימרים טעונים, עם יישומים בתאי דלק וסוללות ותהליכים ביופיזיקליים במערכות ביולוגיות.

**פרופ' (אמריטוס) גי דויטשר** הוא חבר סגל בביה"ס לפיזיקה ולאסטרונומיה באוניברסיטת תל-אביב. הוא משמש כנציג (ובמשך כמה שנים היה יו"ר) ישראל בוועדה למוליכי על של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה (IEA). חיבר ספר בשם "משבר האנטרופיה" שיצא לאור בהוצאת World Scientific בשנת 2008.

מאמר זה מוקדש לזכרו של רוד'ה מאנרד (Roger Maynard), פיזיקאי צרפתי דגול וידיד קרוב, שהתבונה שלו על תהליכים בלתי הפיכים הקשורים לתפקידה של אנטרופיה בשינויי האקלים האירה את עינינו ותרמה לנו רבות.

התלות בצריכת דלקים מאובנים, בתנאי שיישומן בקנה מידה עולמי לא יהיה מוגבל לייצור חשמל בלבד, אלא יכלול גם אחסון והעברת חשמל. גורם מרכזי נוסף ביעד של הפחתה ניכרת בפליטת CO<sub>2</sub> הוא חיסכון אנרגטי ושימוש חכם ומדוד באנרגיה. לצורך כך כבר כעת קיימים כמה פתרונות: בידוד תרמי טוב יותר של בתי מגורים, חימום וקירור יעילים יותר, דרכים חסכוניות יותר לשימוש בתחבורה פרטית וציבורית והפחתת האנרגיה הנדרשת לייצור מגוון רחב של מוצרים ושירותים על ידי יחידים, משפחות, קהילות, מדינות, ואף בקנה מידה עולמי. עם זאת, ראוי לציין שאם אוכלוסיית העולם תמשיך לגדול במהירות, כל חיסכון עתידי עלול "להיבלע", אבל גם במקרה זה עדיף לחסוך ולא לבזבז.

המסקנות שלנו נובעות בעיקר מניתוח נתוני הצריכה ומדיניות האנרגיה במדינות ה-OECD, אך עשויות להיות להן השלכות לא פחות חשובות גם עבור המדינות מתפתחות. אם מדינות אפריקה ומדינות מתפתחות אחרות ילכו באותה דרך של המדינות המפותחות, שבהן רוב האנרגיה הנצרכת עדיין מסופקת על ידי דלקים מאובנים, עתידו של כדור הארץ ותושביו נראה עגום. בנוסף, מעט מדינות יהיו מרוצות לאורך שנים עם רמות צריכת אנרגיה נמוכות, כמו אלה של סוגל שבה צריכת אנרגיה יומית לנפש היא 6 קוט"ש – כ-1/40 מהצריכה היומית לנפש בארצות הברית העומדת על 230 קוט"ש (ראו: איור 4). בטווח הארוך, פער וחוסר שוויון זה אינו רצוי ויכול לגרום בעקבותיו חוסר יציבות פוליטית וכלכלית בקנה מידה עולמי.

באפריקה, פתרון חלופי בר קיימא יכול להוות פיתוח בקנה מידה כלל אפריקאי של חשמל ממקורות סולאריים שיותקנו באזור מדבר סהרה. באמצעות קווי העברת חשמל ארוכי טווח (שסביר להניח שיפותחו במדינות ה-OECD), חשמל זה יכול להיות מועבר למדינות רבות באפריקה, הן מצפון לסהרה והן מדרומו. יחד עם פתרונות של אחסון חשמל, פיתוח כזה יכול להציע חלופה ודרך מתווה לשגשוג כלכלי, ללא צורך להתפשר על איכות הסביבה ועל עתידו של כדור הארץ ככלל. האנושות נמצאת בנקודת מפנה. הסכנה של שימוש באנרגיה גרעינית היא ברורה למדי. תאונות כגון צ'רנוביל ואף פוקושימה חקוקות היטב בזיכרונו הקולקטיבי ומדגישות את הסיכונים האפשריים של אנרגיה גרעינית. אמנם הסכנה של המשך השרפה של דלקים מאובנים דרמטית פחות, אך היא בעלת השלכות חמורות ביותר, ואולי אף בלתי הפיכות לביוספירה ולתנאי האקלים שייגבילו את המשך קיומנו כחברה מודרנית. בינתיים, אנו רואים יתרון משמעותי בהמשך הפעילות של תחנות הכוח