

כנס הרצליה  
השנתי העשירי  
על מאזן החוסן והביטחון הלאומי

הרצליה 2010 HERZLIYA

31 בינואר - 3 בפברואר, 2010

The Tenth Annual  
Herzliya Conference

## אנרגיה מתחדשת וכלכלה ירוקה כמנוע צמיחה

מסמך מסכם

מחברים: עידן לוי ואורי סלונים

המרכז הבינתחומי הרצליה  
בית ספר לאודר לממשל, דיפלומטיה ואסטרטגיה  
המכון למדיניות ואסטרטגיה

המסמך משקף את דעתם של הכותבים בלבד

## אנרגיה מתחדשת וכלכלה ירוקה כמנוע צמיחה

### נכתב ע"י : אורי סלונים ועידן לוי

ה"כלכלה הירוקה" היא ענף רחב מאד הנוגע לאנרגיה, מחזור, טיפול בפסולת, צמצום חתימה סביבתית, מים, חקלאות, תחבורה ועוד. על רקע שינויי האקלים וההשפעות הסביבתיות הנוספות של פעילות האדם זוכים התחום וענפיו לתשומת לב ציבורית רבה וכן מרכזים אליהם משאבים גדלים והולכים. רבים רואים את הכלכלה הירוקה כמנוף מרכזי לצמיחה ולגורם דומיננטי ביצירת משטר כלכלי-סביבתי גלובלי חדש.

בכנס הרצליה העשירי (2010) נגעו רבים מהדיונים בנושאים הקשורים בסביבה ובכלכלה ירוקה. מבין כל ענפי הכלכלה הירוקה מתמקד נייר זה בתחום האנרגיה המתחדשת, הגורם בעל הנתח המשמעותי ביותר בכלכלה זו. אנרגיה מתחדשת היא כבר כיום ענף המגלגל מחזורים עצומים של פעילות עסקית, פעילות מחקר ופיתוח והשקעות ממשלתיות ופרטיות. האנרגיה המתחדשת היא התחום הרלוונטי ביותר להתמודדות עם שינויי האקלים הנובעים מהצטברות של גזי חממה ופגיעה אקולוגית. הנייר כמעט ואינו נוגע בתחום חשוב מאד של ענף האנרגיה המתחדשת, דלקים ביולוגיים, שניידן בהרחבה בכנס במסגרת שני מושבים בנושא גמילת העולם מנפט, שסוכמו בניירות עבודה נפרדים.

ברצוננו להודות לפרופ' לאה בם, המדען הראשי של התעשייה האווירית וחברת המועצה הלאומית למחקר ולפיתוח (המולמו"פ) ולמר אורני פטרושקה, ממייסדי חברת קוריוליס-ווינד, על שהקדישו מזמנם ותרמו מנסיונם ומהידע שלהם בעזרה לכתיבת הנייר. הנכתב אינו מבטא את דעתם או דעת הארגונים אליהם הם משתייכים, כל הנכתב הוא על אחריות המחברים.

### ממצאים והמלצות עיקריות

- תחום הכלכלה הירוקה, ובמיוחד ענף האנרגיה המתחדשת, נתפש בעיני רבים כבסיס למערכת כלכלית גלובלית חדשה. הערכות אלה טוענות כי אנו נמצאים בתקופת מעבר בין כלכלה שניתן לכנותה כ"עידן הנפט", בו הנפט הזול והזמין עודד יצירת תרבות כלכלית של צרכנות ושפע, לעידן כלכלי המתנהל בהתאם לאילוצים סביבתיים מחמירים, יחד עם עלייה במחיריהם של מוצרים בסיסיים, באופן שיגביל את היקף צריכתם.
- במסגרת תפישה זו, מוצרי הכלכלה הירוקה ישמשו כבסיס למבנה כלכלי חדש. התחום זוכה כבר כיום לתשומת לב ציבורית ותקשורתית רבה אך יחד עם זאת קשה לקבוע מהו היקפו בפועל. נראה ומתקיים פער בין הדיווחים על הנעשה בתחום לבין הפעילות הממשית.
- בתנאים הקיימים כמעט כל ענפי הכלכלה הירוקה אינם תחרותיים מבחינה כלכלית והפעילות הנעשית בהם היא תוצר של מדיניות עידוד ותמריצים אגרסיבית מצד ממשלות.
- מיקוד המאמצים בהוזלת עלויות מוצרים והפיכתם תחרותיים ביחס לטכנולוגיות מסורתיות הוא היעד המיידי הנמצא בראש סדר העדיפויות של פעילות המו"פ הקשורה בתחומי הכלכלה הירוקה.

### אנרגיות מתחדשות: חשמל ממקורות אנרגיה מתחדשים

- כבר כיום מרכז ענף האנרגיה המתחדשת סכומים גדולים מאד והוא נחשב כמפתח להתמודדות והכלה של משבר האקלים העולמי.
- חשמל מאנרגיות מתחדשות: למרות המחזור העצום של ענף האנרגיה המתחדשת, מבחינה יחסית משמשים מקורות אנרגיה מתחדשת (ללא מתקנים גדולים של חשמל הידרו-אלקטרי) לשיעור קטן עד זניח מכלל הייצור. במדינות שהציבו את האנרגיה המתחדשת במיקום גבוה בסדר העדיפויות הלאומי מדובר על שיעורים גבוהים יחסית: 15% בגרמניה, 8% בספרד, פחות מ-5% בארה"ב. ברמה העולמית מדובר על שיעור נמוך של פחות מ-1%, כאשר עיקר יצור החשמל מאנרגיות מתחדשות מתבצע באמצעות טורבינות רוח.

- מול הגישה המצדדת בהרחבה משמעותית של תחום האנרגיות המתחדשות ישנה גישה הטוענת כי לא ניתן יהיה לבסס את אספקת החשמל על שימוש באנרגיות מתחדשות ולכן המאמץ צריך להתמקד בפיתוח טכנולוגיות לספיחה והפחתה של פליטות גזי חממה מייצור בפחם ובגז, וכן להקדיש מאמץ לפיתוח טכנולוגיות יעילות ונקיות יותר בתחום הגרעין. גישה זו מאפיינת את ה"ממסד האנרגטי", גורמי תכנון לאומיים ויצרני חשמל בעיקר במדינות בעלות משק חשמל בלתי משוכלל.
- ממשל ומערכת פוליטית הנשלטים ע"י כוחות בהם אג'נדה "ירוקה" הם המאיץ העיקרי לקידום האנרגיה המתחדשת. המצב צפוי להשתנות מרגע שיוטלו מגבלות על פליטה של גזי חממה, וכמובן מרגע בו תמצא הדרך להפחתת עלות השימוש באנרגיות אלה.
- הגדרה ברורה וארוכת טווח, במסגרת תכנית אב, של מדיניות תמריצים ממשלתית היא חיונית לפיתוח בהווה של תחום הכלכלה הירוקה, במיוחד בתחום האנרגיה. כל תחום הקשור באנרגיה הוא תחום עתיר רגולציה ולעתים קרובות גם תמריצים. אנרגיה מתחדשת זוכה היום לתמריצים ועידוד בהיקף גדול. לצורך השגת היעדים השאפתניים בתחום האנרגיה המתחדשת נדרשת "מפת דרכים" מחייבת, מפורטת וארוכת טווח, המגדירה סדר עדיפויות לריכוז מאמצי פיתוח ומגדירה מדיניות ממשלתית מתאימה.
- הפחתת רמת האיווואות במסגרת "מפת דרכים" היא רכיב חיוני בשיקולי החלטה של משקיעים מהמגזר הפרטי בטרם כניסה לפעילות בתחום, במיוחד על רקע צורך בפיתוח טכנולוגי נוסף והעדר ניסיון תפעולי שוטף ורב-שנים של ייצור חשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות.

## אנרגיות מתחדשות בישראל

- ישראל נמצאת בפער גדול מול המדינות המובילות כיום בעולם בתחום הירוק. למרות שברמה ההצהרתית קבעה ישראל יעדים מתקדמים חסר עדיין מתקווה מקשר להשגת יעדים אלה.
- במקרה הישראלי המחסור בקרקעות הנדרשות לפיתוח אנרגיה מתחדשת מציבים מערכת אילוצים נוספת, הכוללת מחסור בתשתית הולכה מתאימה מהנגב למרכז, קשיים טכנוניים ובירוקרטיים וכד'.
- הפער הגדול בין ישראל לעולם בתחומים הירוקים תקף גם לנושא המו"פ. ההשקעה הממשלתית במו"פ יעודי לנושא היא נמוכה מאד.
- גם הסקטור הפרטי מתקשה במימון וליווי פרויקטים בתחום הכלכלה הירוקה עקב מודל פעולתן של קרנות הון סיכון וההיקף המוגבל של השקעותיהן. מו"פ בתחום הירוק, ובמיוחד פרויקטים הקשורים באנרגיה מתחדשת, דורשים תקופת פיתוח ארוכה, 7-10 שנים, והשקעות שהן מעבר למחקר עצמו. בפרויקטים אלה נדרשת הקמתן של מערכות אנרגיה שלמות וכן מערך תפעול ותחזוקה. בפרויקטים מסוג זה נדרשת השקעה בסדר גודל של 50 עד 100 מיליון דולר.
- ענף ההון סיכון הישראלי קטן מכדי לתמוך במיזם ממוצע בתחום האנרגיה המתחדשת. פרויקטים בתחום דורשים השקעה של 50 עד 100 מיליון דולר לשלב הראשון, טרם הקמת מפעל או מתקן מבצעי בהיקף מלא.
- עד שיבשיל בשוק הפרטי הניסיון הדרוש להשקעה וליווי של פרויקטים מסוג זה נדרשת קרן תמיכה ממשלתית הדומה במתכונתה למסגרת קרנות "יוזמה" שהיו הבסיס לענף ההון סיכון הפרטי שהתפתח בארץ.
- על גורמי המו"פ הלאומיים לבצע מיפוי של התחומים הקשורים בכלכלה הירוקה שאינם זוכים להתעניינות ופעילות מצד הסקטור הפרטי ולבחון האם נדרשת התערבות ממשלתית במענקי עידוד ובפעילות מו"פ ישירה.
- ההערה הקודמת תקפה לא רק לישראל אלא לתחום כולו. ניתוח מגמות השקעה של הסקטור הפרטי במקומות שונים בעולם מגלה ריכוז השקעות בתחום ה"רשת החכמה", ברוח ובמקטעים מסויימים של התחום הסולארי. זאת לצד נטייה של תחומים שנהגו לרכז עניין והשקעות דוגמת ביו-דלקים.

## מבוא

תהליך ההתחממות הגלובלית, הגידול הצפוי בביקושים לאנרגיה, בעיקר מצד הכלכלות המתעוררות, והעלייה הדרמטית הצפויה במחירי הדלקים הפוסיליים הפכו מאז תחילת העשור הקודם את מושג ה"כלכלה הירוקה" למרכזי בפעילות ובשיח הכלכלי. מדובר במושג רחב המתייחס לפעילות מו"פ, פעילות מסחרית ופעילות ממשלתית שעניינה ייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים בעלי חתימה סביבתית נמוכה, טכנולוגיות מחזור וייצור "נקי", וכן פיתוח מוצרים תחליפיים למוצרים הגורמים לבעיות סביבתיות. במהלך העשור האחרון הפכה ה"כלכלה הירוקה" מפעילות בעלת היקף זניח לענף כלכלי הנחשב בעיני רבים כגורם צמיחה מרכזי בכלכלה העולמית. שוק זה הולך ומתרחב בהתמדה, אם כי נראה והתפתחות זו רחוקה מהמספרים המרשימים הנמצאים בדיווחי העיתונות ובדו"חות חברות מחקר העוסקות בתחום. מוצרי הכלכלה הירוקה, כעומדים בפני עצמם, הם בעלי היקף שוק הנאמד במיליארדים אך יחד עם זאת, מבחינה יחסית, הם עדיין שוליים במסגרת הענפים הכלכליים אליהם הם משתייכים. נראה והתרחבותו של שוק הכלכלה הירוקה עדיין נמצאת במסגרת ספקולטיבית על רקע הנחה לפיה תחום זה יוביל את הסדר החדש של הכלכלה העולמית, וזאת למרות שהמודל העסקי לפיו תתנהל ותנהג כלכלה זו עדיין אינם ברורים והם אף רחוקים מגיבוש.

ישנו קושי גדול במיפוי וניתוח תחום ה-"קלין טק". בחינה מקרוב של שפע הנתונים המתייחסים לטכנולוגיות, השקעות והתפתחויות עסקיות הקשורות בענף מגלה שונות גדולה. השוואת הדיווחים מגלה פערים בין היקף ההצהרות, ההשקעות והפעילות העסקית הממשית. פערים אלה, בין הדיווחים והנתונים השונים, ניתנים להסבר בהיותו של הענף חדש, ובהעדרם של כלי הערכה ואמידה המשקפים את מאפייניו היחודיים. כאמור, ישנו עדיין קושי גדול להשיב על שאלות בסיסיות הקשורות ב"קלין-טק" דוגמת ריווחיות גולמית ותפעולית, "מודל עסקי", פרמטרים לקביעת תשואה על השקעה וכן שאלות הנוגעות לניסיון שוטף, בלאי מכני, מחזורי פיתוח טכנולוגי וכד'.

הניתוחים המתייחסים לתחום משתמשים במודלים שונים, בהם כאלה המבוססים על הערכה השוואתית ביחס לייצור אלטרנטיבי בטכנולוגיות מסורתיות, כאלה המשקללים את הערך הכלכלי של מניעת תחלואה באוכלוסייה עקב הקטנת הזיהום וכאלה המתייחסים לעלות צפויה של מסים על פליטה של גזי חממה או עלות הטיפול בהם. במקומות אחרים נכללים בתחשיב כרווח ההוצאות שנחסכו עקב השימוש בטכנולוגיה הירוקה ("נגה-וואטים" או "וואטים שליליים"), וישנם נתונים הכוללים נתוני יצור של מפעלים הירדור-אלקטריים גדולים. יש לציין כי כל ענפי ה"קלין טק" נתמכים כיום בתמריצים ובסובדיות ממשלתיות המקשים על איפיון מודל שייצג את השימוש בתנאים תחרותיים המאפיינים כלכלת שוק<sup>1</sup>.

הקושי בהערכת הנעשה בתחום יוצר פערים בין הדיווחים על היקפי ההשקעות, הממשלתיות והפרטיות, בתחום על ענפי השונים לבין הפעילות השוטפת בו. המידע והדיווחים אודות המתרחש בשוק זה אינם אחידים מבחינת הפרמטרים אליהם הם מתייחסים בתחשיבים ובנתונים באמצעותם מתבצעת סכימה כוללת של הנעשה. חלקם מבצע הפרדה בין פעילות מו"פ ובין הטמעת ושימוש בפועל של מערכות או טכנולוגיות קיימות. הנתונים המתייחסים לתחום האנרגיה, המרכז את מירב תשומת הלב בענף, כוללים לעתים כושר ייצור מותקן בפועל ולעתים כושר ייצור אופציונלי הנכלל בחוזים חתומים לעתיד. חלק מהדיווחים על הנעשה בענף מתייחסים אך ורק לאנרגיה וחלק כוללים התייחסות לנושא ההתפלה, סינון מים, מחזור פסולת וכד'.

מול הנתונים שמפרסמות ממשלות וחברות השקעה ומחקר המתמחות בתחום, בדיקה פרטנית של פרויקטים ועסקאות מגלה היקפים מצומצמים יותר מהסכומים העצומים המצוטטים כמאפיינים את השוק, וכן קושי בגיוס כספים לגיבוש קרנות ולמימון מתמשך של פרויקטים הדורשים השקעות גדולות, בסדרי גודל של מעבר ל-50 מיליון דולר לפרויקט למשך יותר מחמש שנים<sup>2</sup>. מרבית המיזמים מסוג "סטארט-אפ" העוסקים ב"קלין טק" זוכים למימון בהיקף של מיליוני דולרים אחדים. הן במסגרת קרנות השקעה והן במסגרת "חממות" של יצרניות הצידוד הגדולות (ג'נרל אלקטריק, סימנס וכד' – הרחבה אודות מודל ההשקעות והמו"פ בתחום תובא בהמשך).

בתחום האנרגיה, לצד הפער בין היקף הענף בפועל ומה שמסתמן כהיקפו בפועל, מתקיים גם פער תדמיתי בין היחס החיובי לו זוכה הנושא מצד חלקים גדולים בציבור ובתקשורת ובין האופן בו נתפסת האנרגיה המתחדשת ע"י ה"מסד האנרגטי". הכוונה היא לגורמי ייצור גדולים וותיקים וגורמי תכנון לאומיים. נראה ודפוס זה נגזר מהיותו של תחום האנרגיה דוגמה מובהקת לענף

<sup>1</sup> סובסידיות הן מרכיב מקובל בכל ענף האנרגיה. בלא סובסידיות ורגולציה תומכת ענפים דוגמת כורי כח לא יכלו להצדיק עצמם כלכלית. אפילו בתחום הנפט והגז קיימות סובסידיות, למשל בכל הנוגע לחיפושים ולשימוש בטכנולוגיות למיצוי שדות קיימים.  
<sup>2</sup> במקרים מסויימים בשטח האנרגיה, טכנולוגית ייצור תרמו-סולארית למשל, רף הכניסה הוא גבוה יותר ומוערך בכ-70 מיליון דולר ובכיוון-דלקים מעל 100 מיליון דולר. גובה הסכום קשור גם בהקשר המשקי הכולל, בעיקר בנוגע לעלות קרקעות ועלות העסקה של כח אדם.

ממוסד, ו-"כבד" מבחינת התנהלותו. אנרגיה וחשמל הם ענפים המתאפיינים, ברמה הגלובלית, בסדרי גודל עצומים של השקעות בתשתית הייצור, עלויות תפעול ורכש. כן הוא מתאפיין בגמישות תכנונית צרה. לענף משמעות אסטרטגית עבור כל מדינה וכן הטיה טבעית לעבר רמה גבוהה של מעורבות ממשלתית. כל אלה מעודדים רמה גבוהה של בירוקרטיה ושמרנות. שינוי מזערי בכל אחד מהפרמטרים הקשורים לפעילות הענף עשוי להתברר כבעל משמעות משקית כוללת ולכן תכנון וקבלת החלטות הנוגעת לתחום האנרגיה מתבצעים בזירות מרבית תוך נקיטת מרווחי ביטחון גדולים. למעט אולי ארה"ב, ההיסטוריה של פעילות ענף החשמל כ"שוק" היא קצרה למדי, בת פחות מ-20 שנה.

בכל הנוגע להתמודדות עם פליטת גזי חממה ועם העלייה הצפויה במחירי הדלקים הפוסיליים, מבחינתו של ה"ממסד" האנרגטי" מרבית ההשקעה ותשומת הלב ביחס לעתיד צריכים להתרכז באנרגיה גרעינית כאמצעי לאספקת הביקושים הנוספים. מעבר לגרעין, עבור אותם גורמים, התחומים ה"ירוקים" העיקריים הם טכנולוגיות אגירה וניטרול פליטות של גזי חממה, טכנולוגיות לצמצום הפגיעה הסביבתית הכרוכה בייצור חשמל מפחם ומרכיבי "רשת חכמה"<sup>3</sup>.

ניתן לטעון בהכללה כי במסגרת הזהירות והשמרנות המאפיינות את ענף האנרגיה, ה"ממסד" ברוב המדינות בעולם מקנה לאנרגיות המתחדשות משקל נמוך בתמהיל מקורות הייצור. הדבר נובע הן משיקולי עלות והן משיקולים תפעוליים. הטכנולוגיות הקיימות עדיין לא מציעות עלות תחרותית למקורות הקיימים ועלות הייצור הגבוהה משמעותית במתקני ייצור של אנרגיה מתחדשת, הן ביחס לייצור הובד הבסיס (Base load) והן ביחס יכולות ייצור לביקושי שיא (Peak load). בנוסף קיימים שיקולי פחת ועלות שוקעה ביחס למתקני הייצור הקיימים (תחנות הכח הגדולות) שכולם יחד מפחיתים מאד את האטרקטיביות של המקורות המתחדשים בעיני גורמי הייצור והוויקיטים. מעבר להיבט העלות קיימת בעיה תפעולית הנגזרת מאופיים של מקורות מתחדשים. מקורות אלה, באופן השימוש בהם כיום, אינם מספקים את האמינות ברמה הנדרשת מרשת חשמל לאומית. ייצור חשמל באמצעות שמש ורוח בהיקפים גדולים יוצר בעיות רבות בניהול רשתות חשמל גדולות עקב התנדבותיות הגדולה שלהם, מבחינת הספק ומתח. כמו כן חלקים גדולים בענף מתבססים על טכנולוגיות שעדיין לא הוכחו כמתאימות להיקפי ייצור גדולים. כל אלה יצרו הסתייגות בקרב ה"ממסד" משימוש נרחב במקורות מתחדשים לייצור חשמל. למרות הצמיחה המרשימה בהיקפי הייצור, במונחים יחסיים משמשים מקורות אנרגיה מתחדשים רק ל-3.5% מסך ייצור החשמל במדינות ה-OECD, המדינות העיקריות בהם קיימים משקי חשמל משוכללים, כשבתוכן בולטות בפער גדול ארה"ב, גרמניה, יפן וספרד.

מדינות מובילות בשיעור ייצור החשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות הן בדרך כלל מדינות המתאפיינות במשק חשמל משוכלל, בו קיימים שחקנים רבים ובו מתבצעת הפרדה בין תחום הייצור לתחום ההולכה. ההפרדה בין ייצור והולכה מאפשרת פעילותם של מספר גדול יחסית של שחקנים בינוניים ואף קטנים, מאפיין המקנה גמישות ומקל על כניסתם של שחקנים חדשים המתמחים בייצור חשמל ממקורות מתחדשים. מלבד משק חשמל משוכלל נדרשת גם מדיניות תמריצים ממשלתית שיחד הפכות את האנרגיה הירוקה לרכיב בלתי זניח בתמהיל מקורות הייצור. גם סין רושמת עליה מתמדת בשיעור השימוש במקורות אנרגיה מתחדשים על רקע מדיניות תמריצים ממשלתית, אך בה מקורות אלה הם חלק זניח בתמהיל המקורות הכולל לייצור אנרגיה.

לגישה הממסדית השמרנית השפעה גדולה על מדיניות התכנון של מדינות רבות. חלקים ניכרים של עולם ה"כלכלה הירוקה" אינם נמצאים במסגרת תחומי עניין אלה. מדובר באלפי רעיונות שלגביהם לא קיימת יד-מכוונת או הגדרות לריכוז מאמץ (הרחבה בהמשך). ישנו מספר מצומצם של מדינות בעולם בהן מתקיימת התאמה בין ההצהרות בדבר קידום ה"כלכלה הירוקה" ובין הטמעה ושימוש בפועל של מוצרים מהתחום ה"ירוק" בהיקף בעל משמעות לאומית אסטרטגית.

כח פוליטי המגבה תיעודף גבוה לנושאים ירוקים הוא המודל היחידי עד כה שהצליח להביא לשימוש וקידום קוהרנטי של מוצרים וטכנולוגיות ירוקות. יש לציין כי לא מתקיים קשר הכרחי בין קידום והטמעה בפועל של שימוש במוצרים "ירוקים" ובין התקדמות ופריצת דרך טכנולוגית. מרכזי המו"פ הירוק המובילים נמצאים במדינות בהן קיימת תשתית מו"פ כללית מפותחת, בלא קשר לרמת השימוש במוצרים ירוקים. סין, למשל, הולכת ומסתמנת כמרכז עולמי לפיתוח טכנולוגיות הקשורות ב"קליין טק", תוך דגש מיוחד על תחום האנרגיה ובה בעת סין היא אחת המזהמות הגדולות בעולם.

<sup>3</sup> מושג ה"רשת החכמה" מתייחס לפיתוח טכנולוגיה וציוד להתאמה טובה יותר בין הביקוש לבין הייצור, יחד עם מרכיבים לחסכון וליעול השימוש בחשמל. בקרב המומחים לתחום קיימת הסכמה לפיה שימוש בארכיטקטורת "רשת חכמה" עשויה להגדיל בכ-40% את היצע החשמל הזמין ממקורות ייצור קיימים.

## פיתוח טכנולוגי: פריצת דרך ומו"פ אינקרמנטלי

תחום הכלכלה הירוקה ובמיוחד האנרגיות המתחדשות מתאפיין בשתי מגמות מו"פ עיקריות: שיפור ביצועים של דור טכנולוגי נוכחי ופיתוח רכיבים שישפרו ביצועים של מערכות קיימות<sup>4</sup>; שיפור תהליכי יצור של רכיבים וחומרים, תוך דגש על הפיכת הייצור עצמו לידידותי מבחינה סביבתית. שתי מגמות אלה מבטאות עיסוק בפיתוחים שנועדו להזיל את עלות השימוש במוצרי אנרגיה מתחדשת, גורם הנחשב כחסם העיקרי להתרחבות השימוש במוצרי "כלכלה ירוקה". מגמות אלה מוגדרות כמו"פ לטווח הקצר.

ישנו היגיון רב בעיסוק ובתמיכה בפעילות זו על רקע מאפייני הדור הנוכחי של הטכנולוגיה לייצור חשמל ואנרגיה. כל הטכנולוגיות בהן נעשה כיום שימוש לייצור אנרגיה הן טכנולוגיות לא יעילות משמעותית מבחינת היחס בין כמות האנרגיה המשתחררת בתהליך ובין האנרגיה המתקבלת כתוצאה ממנו כאנרגיה זמינה לשימושים נדרשים. כך למשל, רמת הניצולת של תחנת כוח פחמית ממוצעת עומדת על 35% ותא פוטו-וולטאי מאיכות טובה-בינונית מסוגל להמיר רק 12% מהאנרגיה הנקלטת בו לחשמל, וגם זאת בתנאים אופטימליים מבחינת עוצמת אור וטמפרטורה. כל פיתוח טכנולוגי המסוגל לשפר יחסים אלה, אפילו בשיעור מזער, הוא בעל משמעות כלכלית גדולה מאד.

הפיכת פרויקטים ורעיונות אלה לכדי יישומים היא סוגיה מורכבת והיא חלק מתהליך המעבר ממחקר המכונה "מחקר בסיסי" ל-"מחקר יישומי" וליישומים של ממש, שבד"כ נדרשים גם לעמוד בקריטריונים של הצדקה כלכלית ושימושיות. המערכת המודרנית יצרה מספר מסגרות התומכות בהמרה ויישום של רעיונות לכדי מוצר בפועל. מדובר על מנגנונים כמו מעבדות לאומיות, מערכי מו"פ של התעשייה, קרנות, בנקים והון סיכון וכן מערכת משפטית של עיסוק בבניין רוחני ובפטנטים. בכל הנוגע לכלכלה ירוקה, רב המימון כיום לתהליכי המרה ופיתוח עסקי של רעיונות לכדי מוצר יישומי מתרכז בפרויקטים שנועדו לשפר ריווחיות של טכנולוגיות ותהליכי יצור קיימים. דפוס זה מונע במידה מסוימת פיתוחן של טכנולוגיות פורצות דרך, במיוחד בכל הנוגע לתחום האנרגיה, בו הריווחיות היא הגורם התחרותי היחיד מאחר והמוצר הסופי הוא אחיד: חשמל, היינו הנעת אלקטרונים.

בעייה נוספת נוגעת למודל בו פועלים אפיקי המימון הפרטיים למו"פ, בעיקר קרנות ההון סיכון. נראה כי מסגרות המימון הקיימות אינן מתאימות לתמיכה בפרויקטים "ירוקים". ככלל, על רקע חוסר ניסיון מספיק, ענף הון הסיכון עדיין לא סיגל את רמת המקצועיות הנדרשת להערכה ותמיכה בפרויקטים מסוג. כמו כן המודל בו פועלות קרנות ההון סיכון, היינו של השקעה בשלבים מוקדמים ומימוש ההשקעה במכפיל גבוה תוך 5 שנים, אינו מתאים למאפייני המו"פ הירוק. בתחום האנרגיה נדרשת השקעה במערכות ייצור שלמות הדורשות בחינה לאורך זמן תוך עמידה בסטנדרטים גבוהים של אמינות וקלות תחזוקה הכרוכה בטמפרטורות ולחצים גבוהים. רכיב בתחום האנרגיה התרמו-סולארית חייב להיבחן לאורך זמן במסגרת תחנה תרמו-סולארית מלאה. פיתוח רעיון בתחום זה מחייב הקמה או הצמדות למערך ייצור שלם, דבר המייקר את עלות הפיתוח ומאריך אותה אל מעבר למסגרות הזמן בהן פועלות קרנות הון סיכון משלב ההשקעה ועד למימושה<sup>5</sup>. מעבר לכך, בהקמת תחנות כח מכל סוג נדרשת פעולת רישוי המקיפה מספר גדול של גורמים מתחום התכנון והבניה, סביבה ובטיחות.

לעומת הקושי באיתור השקעות הון-סיכון מוצלחות (במונחי מודל השקעה של הון סיכון) ישנו כבר ניסיון שלילי בתחום הביו-דלקים ובתחום הסולארי, שריכוזו לפני כחמש-שש שנים תשומת לב והשקעות הון-סיכון בהיקף גדול יחסית. בדיעבד התברר כי השקעות אלה לא הצליחו להגיע בפרק זמן מקובל לתוצאות עסקיות שיאפשרו מימון ברווח ובתשואה ברמות המאפיינות השקעה מוצלחת בתחום. חוסר ההצלחה של גל השקעות זה יצר מגמה נגדית של המנעות, למעט מקרים בודדים, מהשקעת הון-סיכון נוסף בתחומים אלה.

רבים מענפי האנרגיה המתחדשת נשלטים בידי מספר מועט של שחקנים גדולים מאד. שחקנים אלה הם גורמים המסוגלים לתמוך במימון פרויקטים מסוג זה ולשלב את תוצרם במסגרת מערכות אותן הן מייצרות. יש לציין כי תאגידי הענק מפעילים תשתית מו"פ ברמה גבוהה מאד, שיכולה לעתים להתחרות ברמתה בזו של מעבדות לאומיות למחקר, אך מודל זה עשוי ליצור עיוותי מו"פ עקב שמרנותם של תאגידי ענק או רצונם למצות רווחים מטכנולוגיות ומארכיטקטורה הנדסית קיימת. ייתכן ושימת הדגש על התאמה ושילוביות במערכות קיימות מעכב פריצות דרך בתחום. ייתכן גם שפיתוח רעיונות במסגרת תאגידי ענק נפגם עקב העדרה של "רוח יזמית" המאפיינת חברות או פרויקטים קטנים.

<sup>4</sup> מו"פ מסוג זה מכונה TIO: Technology Improvement Opportunities  
<sup>5</sup> המונח המתאים בהקשר זה הוא RDD&D: Research Development Deployment and Demonstration

יש לציין כי ניתוח עסקות השקעה, מיזוג ורכישה שביצעו תאגידי ענק בתחום האנרגיה המתחדשת מגלה כי אחת המוטיבציות העיקריות שעמדו בבסיסן היה הגדלת היכולת לשלב בין רכיבים וצידוד לצורך הרכבה של מערכת ייצור שלמה. העיסוק בה רכשה חברת סימנס את חברת סולל הישראלית בסכום של 430 מיליון דולר מוסברת ברצונה של סימנס להגדיל את ריווחיותם של פרויקטים סולאריים אותם היא מבצעת באמצעות הרחבת מגוון היצוד העומד לרשותה. שילוביות כמנוף להגדלת ריווחיות השימוש באנרגיה מתחדשת מושג גם באמצעות ארכיטקטורה היברידית המשלבת בין אמצעי ייצור מסורתיים לבין אמצעי ייצור של אנרגיה מתחדשת, דוגמת הגברת יעילות ייצור חשמל באמצעות טורבינות גז באמצעות הוספה של מערכת תרמו סולארית.

## אוטופיה ומחקר בסיסי בתחום האנרגיה המתחדשת

ההבחנה המדויקת בין מו"פ בסיסי למו"פ ישומי היא קשה והיא קשורה בשאלות מעשיות ופילוסופיות בנוגע להתפתחות רעיונות וידע, הוכחתם והפרכתם. באופן כללי מדובר בתהליך דו-כיווני היכול להתבטא בניסוח של רעיונות תיאורטיים ולאחר מכן ביצוע מהלכים, ניסויים ואחרים, לתמיכה בהם או כיוון מנגד של אירוע ניסויי שזוכה לניסוח כחלק מפרדיגמה תיאורטית רחבה יותר. תהליכים מסוג זה מתקיימים בעיקר באקדמיה אך גם בתעשייה, בכפוף למשאבים ולתרבות ארגונית מתאימה. במקרים רבים קיימת זיקה ושיתוף פעולה במו"פ הבסיסי בין האקדמיה והתעשייה.

המו"פ הבסיסי הקשור בפתרונות אותן באה הכלכלה הירוקה להציע מתמקד בתשתית מחקרית ובמערכי ניסוי לצורך פיתוחם של רעיונות תיאורטיים הנחשבים כפורצי דרך, מהפיכות של ממש. מדובר ברעיונות דוגמת היתוך גרעיני, תאי דלק מימניים, על מוליכים ונגזרותיהם<sup>6</sup> דוגמת כורי היתוך, קווים קוונטיים ועוד. כולם נמצאים בשלב הדורש משאבים גדולים מאד ורוחק מפתרון החסמים המונעים שימוש יישומי.

בין רעיונות אלה ומו"פ הטווח הקצר ישנו עיסוק בפיתוחים מחקריים הקרובים יותר לשלב היישומי. מדובר בפריצות דרך ממוקדות בתחום אגירת האנרגיה ובתחום הפוטו-וולטאי. טכנולוגיה יעילה לאגירת אנרגיה היא אחד החסמים העיקריים להתקדמות השימוש ברכבים חשמליים ולהפיכתם של מתקני אנרגיה מתחדשת (רוח, סולאר) לאמינים ויציבים מבחינת אספקה. בשלב המחקר הבסיסי קיימים עוד מספר רעיונות פורצי דרך העשויים לשנות את מפת תחום האנרגיה דוגמת העברת אנרגיה במיקרוגל (יאפשר ייצור אנרגיה סולארית בחלל באמצעות מערך לווינים ושיגורה לארץ).

## מגמות בכלכלה הירוקה והאנרגיה המתחדשת

למרות האמור לעיל בנוגע לפערים בין מחזורי הפעילות של ענף האנרגיה בכללותו ובין מחזורי הפעילות של תחום האנרגיה המתחדשת והאנרגיה הירוקה, ריכוז ענפים אלה השקעות ניכרות בפני עצמן. על רקע זה חשוב לזהות מגמות המסמנות את התחומים הנתפשים, בעיני הסקטור הפרטי, כאלה שיניבו את התשואה הגבוהה ביותר ביחס להשקעה. בחינה של המיזמים והחברות העוסקות בתחום מגלה כי ישנם ארבעה תחומים המזוהים כבעלי פוטנציאל גדול במיוחד:

### 1. אנרגיה סולארית

לאנרגיה סולארית פוטנציאל תיאורטי עצום, אנרגיית קרני השמש המגיעה לפני השטח של כדור הארץ בשנה שווה לפי 10,000 מצריכת האנרגיה השנתית של כלל האנושות. מקובל להתייחס לעוצמת קרינת השמש בצהרי יום בהיר כשווה לקילוואט לכל מטר רבוע<sup>7</sup>. שעות חשיכה, עונות השנה ותנאים אטמוספיריים אמנם מגבילים את העוצמה הממוצעת השנתית לכ-20% מנתון זה, אך נתוני צריכת החשמל מצביעים על כך ששיאי הדרישה מתואמים עם השעות בהן קרינת השמש מקסימלית.

<sup>6</sup> למשל "קווים קוונטיים", כינוי לסלילים מבוססים על שימוש במוליכי-על שיחליפו את סלילי הנחושת המשמשים כיום להולכת חשמל. מהפיכה המזכירה את המהפיכה שיצרו הסיבים האופטיים לעומת סלילי הנחושת בתחום העברת המידע.

<sup>7</sup> לצורך השוואה, תחנת הכח הפחמית "אורות רבין" בחדרה מייצרת 2,590 מגוואט ומנצלת שטח של כ-1,200 דונם. קרינת השמש על שטח בגודל זה בשעת צהריים שווה ל-1,200 מגוואט, כמעט מחצית מהספק התחנה. בטכנולוגיות המסחריות הקיימות כיום ניתן להגיע לנצילות של עד 100 מגוואט לתחנה בעלת שטח זה.

כל השיטות להפקת אנרגיה סולארית מנצלות שטחי קרקע נרחבים יחסית לתפוקה, מצריכות תחזוקה שוטפת (בעיקר ניקוי הפאנלים ו/או המראות מאבק ולכלוך) ויעילותן תלויה בתנאים האטמוספריים ובמיקומן הגיאוגרפי (קו רוחב). את האנרגיה הסולארית ניתן לנצל להפקת חשמל בשיטות פוטו-וולטאיות ותרמו-סולאריות או לנצל בצורה ישירה לחימום (למשל דודי שמש) או קירור (מיזוג סולארי).

הפקת חשמל פוטו-וולטאית (PV): בשיטה זו מנצלים את האפקט הפוטואלקטרי בו קרינת השמש הפוגעת במבנה שכבתי של מוליכים-למחצה גורמת לתנועת אלקטרונים ולזרם חשמלי. הלוחות (פאנלים) הפוטואלקטריים אינם כוללים חלקים נעים והופכים את אור השמש ישירות לזרם חשמלי ישר.

החשמל המיוצר בפאנלים ניתן לניצול ישיר או לאגירה במצברים וכן ניתן להמירו לזרם חילופין ולהזרימו לרשת החשמל הארצית. שימוש ישיר ואגירה במצברים מתבצע בעיקר במערכות קטנות שאינן מחוברות לרשת החשמל. במספר מקומות נהוגה מדיניות feed-in בה מוזרם חשמל שנוצר במערכת ה-pv לרשת בתעריף מועדף המקזז את עלותם הגבוהה של הפאנלים הסולאריים. מדיניות זו נהוגה הן ביחס למערכות ביתיות והן למערכות מסחריות גדולות יותר.

רוב התאים הפוטו-וולטאים עשויים מגבישי סיליקון<sup>8</sup> ומיוצרים בטכנולוגיה הדומה לייצור שבבי מחשב. נצילות התאים הנפוצים כיום עומדת על כ-10-15% ובמעבדות הודגמה נצילות של מעל 40%. כיווני המחקר המובילים כיום בתחום מכוונים להוזלת הייצור באמצעות מעבר לטכנולוגיות וחומרים חדשים. טכנולוגיית Thin Film<sup>9</sup> לייצור זול נחשבת למבטיחה ביותר כיום למרות שהניצולת של תאים מסוג זה נמוכה יותר (6-10%). טכנולוגיה מבטיחה נוספת היא תאים עשויים חומרים אורגאניים ופולימריים. גם תאים אלו סובלים מניצולת נמוכה אולם עלות חומרי הגלם והייצור מבטיחים מחירים תחרותיים. בדרך כלל במקומות בהם לא קיימת מגבלת שטח ישנה העדפה להשתמש בפאנלים מסוג thin-film זולים. יש לציין את היכולת להשתמש בפאנלים סולאריים כקירות מסך לבניינים המחליפים את זכוכיות המראה הרגילים. גישה זו היא חלק מנטייה ירוקה לבניית מבנים המספקים את תצרוכת האנרגיה של עצמם. גישה נוספת לשימוש בתאי pv היא שיפור הנצילות באמצעות ריכוז קרני שמש (concentrated PV -CPV). בשיטה זו מרוכזות קרני השמש באמצעות מראות לתא פוטו-וולטאי מקורר מאיכות גבוהה, וחוסכות הצבה של תאים על פני שטח גדול.

ההתנהגות הצפויה של שוק ה-pv דומה במאפייניה להתנהגות שוק המוליכים למחצה ושוק השבבים בפרט. כפי שהתנהג שוק השבבים, גם במקרה זה צפויה הוזלה דרמטית עם הגדלת היקפי הייצור. מוערך כי כל הכפלה בהיקף הייצור תוביל להוזלה של 20% במחיר התאים. הדימיין הרב בין שתי משפחות המוצרים הוביל בשנים האחרונות יצרניות מוליכים למחצה לעסוק בתחום ה-pv, לדוגמה חברת אפלייד-מטיריאלס האמריקאית. שוק ה-pv נמצא בשנים האחרונות במגמה של גידול מתמיד, בשנת 2009 נרשמה עלייה של 20% בהתקנות יחסית לשנת 2008, למרות פריצת המשבר הכלכלי העולמי. ישנן תחזיות הצופות לענף קצב צמיחה של 250% עד לשנת 2014.

הפקת חשמל תרמו-סולארית: הפקת חשמל בגישה התרמו-סולארית, מכונה CSP-Concentrated Solar Power, מתבססת על ריכוז קרינת השמש בעזרת מראות לנקודה בה מתפתחת טמפרטורה גבוהה (עד 600-700 מעלות) המחממת מדיום (נוזל/גז) המניע ישירות טורבינה לייצור חשמל או משמש ליצירת קיטור המניע את הטורבינה. למעט מקור החום השיטה זהה לחלוטין לייצור חשמל באמצעים מסורתיים ורוב הפיתוחים הישימים לנושא התרמו-סולארי הם למעשה פיתוחים בתחום ייצור החשמל הכללי.

ייצור בגישה זו מתבסס כיום על הקמת מערכי ייצור גדולים. תחנות תרמו-סולאריות הן כיום בעלות כושר ייצור של 200-400 מגה-וואט חשמל. מקביל להיקף ייצור של תחנת כח בינונית המופעלת באמצעות גז. התחנות מורכבות ממערכות של צלחות פרבוליות המפיקות כ-100 ג של עשרות קילוואט, או ממערך מראות עוקבות שמש (הליוסטטים) המופנה למגדל מרכזי המאפשר ייצור של מאות מגהוואט. מערכות תרמו-סולאריות עושות שימוש בטכנולוגיות ותיקות ומוכחות להפקת חשמל מאנרגיה תרמית, ניצולת הקרקע שלהן עומדת על כמחצית מזו של תחנה פוטו-וולטאית בעלת הספק זהה. כמו כן, וניתן לשלב

<sup>8</sup> תעשיית התאים הפוטו-וולטאים הפכה בשנים האחרונות לצרכנית הגדולה ביותר של סיליקון בעולם.  
<sup>9</sup> בניגוד לטכנולוגיה הותיקה של גידול איטי של גבישי סיליקון בה עושים שימוש גם בתעשיית השבבים, טכנולוגיית Thin Film עושה שימוש בשיטות שונות לכיסוי מצע דק בשכבות של מוליכים למחצה, בדומה לדרך בה מדפסות מכסות נייר בדיו מפעל Thin Film צפוי לייצר פנלי PV בקצב גדול במספר סדרי גודל ממפעל מסורתי.



בהן טכנולוגיות המאפשרות הפקת חשמל בכל שעות היממה, דוגמת אגירת אנרגיה תרמית<sup>10</sup>, דלקים סולאריים<sup>11</sup> או שימוש היברידי בתשתית התחנה לייצור חשמל מגז טבעי.

מאמצי המו"פ בתחום ה-CSP דומים מאד למאמצי המו"פ בתחום ייצור האנרגיה היינו, הגדלת הניצולת ע"י פיתוח מדיום תרמי לטמפרטורות גבוהות (600-700 מעלות) ובמיוחד פיתוח של מדיום גזי שיאפשר הנעה ישירה של הטורבינות (DSF - Direct Steam Generation<sup>12</sup>). כיוון טכנולוגי נוסף שישפיע על כדאיותן של תחנות אלה הוא בתחום אגירת החום, כך שתאפשר אגירה של החום בשעות שיא הקרינה ושימוש מאוחר יותר באופן שיגדיל את אמינות הייצור<sup>13</sup>. בתחום הסולארי מתבצעים מאמצי מו"פ בפיתוח אפשרויות לייצור בהיקפים גדולים של מראות פרבוליות. הפיתוח הטכנולוגי, הכולל גם ניסיון ליצור הרכב אופטימלי של מרכיבים, מתקיים במסגרת מאמץ להוזיל את עלויות ייצור החשמל כך שיעזו מחיר תחרותי, ומערכות peak כבר בשנת 2020, ומערכות baseload החל משנת 2030.

חלק גדול מהשימוש באנרגיה מתבצע לצורך חימום של מבנים, בתהליכי ייצור תעשייתיים ובפעילויות נוספות. שימוש באנרגיית השמש כחום זמין לשימושים אלה עשוי להביא לחסכון אנרגטי ניכר משום ביטול הצורך בהמרת אנרגיה לחום שמייצר חשמל ולאחר מכן מחשמל המייצר חום. ישראל היא מהמדינות המתקדמות בעולם בהתקנת דודי שמש, שהתקנתם מחויבת על פי חוק מאז אמצע שנות השבעים. 95% מבתי האב בישראל עושים שימוש בחימום מים סולארי והדבר מביא לחיסכון של כ-4% מצריכת החשמל במדינה.

ניצול ישיר של אנרגיית השמש לקירור אפשרי במספר שיטות הממירות חום לקור ללא שימוש במדחס או בחלקים נעים תוך ניצול התכונות התרמודינמיות ומצבי הצבירה של חומרים כימיים שונים בטמפרטורות שונות. מדובר במערכות מסובכות ויקרות המתאימות בעיקר להתקנות בקנה מידה גדול, אולם מאחר ואחוז ניכר מצריכת החשמל בשיא מנוצלת למיזוג אוויר (בישראל הנתון עומד על כ-50% בימות הקיץ) וקיימת קורלציה בין השעות בהן נדרש מיזוג האוויר לשעות בהן קרינת השמש מירבית, המערכות זוכות לפופולאריות הולכת וגוברת. הטכנולוגיה הבסיסית מוכרת מזה עשורים אולם בשנים האחרונות הושקעו משאבים רבים במו"פ לשיפור הניצולת והכדאיות הכלכלית של מערכות מסוג זה, בעיקר בגרמניה, יפן, סין והודו. מחקרים בנושא מתבצעים גם בטכניון בישראל.

למגה-ווט חשמל, דומה לעלות הייצור כיום באמצעות רוח, כבר בשנת 2015. תכנית ה-IEA מיעדות לייצור חשמל באמצעות CSP נתח של 11% מכלל ייצור החשמל העולמי, דומה לשיעור ייצור החשמל-רוח בתכנית.

## 2. אנרגיית רוח

השימוש באנרגיית הרוח נחשב כבר כיום למשאב המתחדש הקרוב ביותר לכדאיות כלכלית, ובאזורים מסוימים בעולם בעלי מאפיינים מסוימים של משטר רוחות אף מתחרה בהפקת חשמל מדלקים פוסיליים. שוק אנרגיית הרוח הפגין צמיחה של כ-30% לשנה במחצית השנייה של העשור הקודם, כשהנתונים מצביעים על מגמה לפיה כל 3 שנים מתבצעת הכפלה של ייצור החשמל באמצעות רוח. עפ"י נתוני ה-IEA סך טורבינות הרוח המותקנות כיום בעולם מסוגלות, בתנאים אופטימליים, לייצר כ-2% מצריכת החשמל העולמית, היקף השווה לתצרוכת החשמל של איטליה במשך שנה ממוצעת. עפ"י תכנית המתאר של ה-IEA צפויה אנרגיית הרוח לתפוס נתח של 12% מהמקורות לייצור חשמל בשנת 2050. לשם השגת יעד זה נדרשת השקעה שנתית ממוצעת של 81 מיליארד דולר במו"פ ובציוד מותקן. תכנית זו מניחה גידול בהיקף הייצור על רקע הוזלה של 25% בעלויות הייצור והתחזוקה.

קיימות מספר שיטות להפקת חשמל מאנרגיית הרוח, רובן מתבססות על העיקרון העתיק של תחנת הרוח, בה להבים המחוברים לציר אנכי או אופקי משמשים להנעת גנרטור. החסרונות העיקריים של ניצול אנרגיית רוח הם מגבלת מיקום הטורבינות בהתאם למיפוי משטר הרוחות וחוסר וודאות באשר לרציפות ההפקה. בטכנולוגיות הקיימות כיום התקנת טורבינה תהיה כלכלית רק באזורים בהם קיימת רוח רציפה בעוצמה של מעל 7 מ'שנייה במשך חלק משמעותי של השנה. חלק

<sup>10</sup> אגירת אנרגיה תרמית מתבצעת באמצעות חימום שמן או מלח מותך בשעות היום וניצול חום זה להפקת אנרגיה בשעות בהן אנרגיית השמש אינה זמינה.

<sup>11</sup> דלקים סולאריים הם תרכובות כימיות שתהליך ייצורם דורש השקעת חום (תהליך אנדותרמי) וניתן לאכנסם ולנצלם כדלקים להפקת חום וחשמל. בעזרת חום ממקור סולארי ניתן להפיק מימן ממים, מתאנול מפחמן דו חמצני ומים ועוד. הפקת דלקים סולאריים עדיין לא מומשה מסחרית ולמרות המחקר הרב בתחום עדיין אינה כלכלית.

<sup>12</sup> חוסך את המרת החום לייצור אדים בלחץ גבוהה להנעת הטורבינה.

<sup>13</sup> מערכת לאגירת חום תגביר גם את יעילות הייצור של תחנות כח קובנציונליות וגרעיניות בכך שתאצור עודפי חום הנוצרים בתהליך אך אינם מנוצלים כיום לצורך ייצור אנרגיה זמינה.

מהאזורים המתאימים הם בים והתקנת חוות טורבינות באזורים אלו הינה יקרה ומסובכת. עיקר התפוקה של טורבינות רוח הינו בחודשי החורף, עובדה המתאימה את התקנתן בארצות קרות בהן שיא הצריכה נמדד בחודשים אלו. מידול וחישוב של משטר רוחות ופיזור אופטימלי של טורבינות הוא תחום חשוב במו"פ הקשור באנרגיית הרוח.<sup>14</sup> בין יתרונות ניצול אנרגיית הרוח ניתן למנות את הפעלתן בכל שעות היממה (כתלות ברוח) את דרישות השטח הנמוכות המאפשרות ניצול מקביל של שטח חוות הטורבינות לשימושים נוספים, בהם חקלאות. בישראל מופה פוטנציאל להפקה של 1200-600 מגהוואט חשמל מאנרגיית רוח, בעיקר בצפון הארץ ובהר הנגב המהווים פוטנציאל לאספקת כ- 6-12% מצריכת החשמל כיום.

מאמצי המו"פ בתחום טורבינות הרוח מתרכזים בהגדלת הלהבים תוך הפחתת משקלם<sup>15</sup>, וכן הגדלה של אמינותה הכוללת של המערכת. אמינות שתתבטא בצרכי תחזוקה נמוכים יותר. במסגרת זו מושקעים מאמצים מיוחדים בשיפור טורבינות המיועדות לסביבה ימית. עלות ההתקנה של מערכות חשמל-רוח בסביבה זו גבוהה פי-2 מעלות התקנת מערכות יבשתיות, כשתחזוקתן קשה הרבה יותר. המו"פ בתחום הימי עוסק בפיתוח מערכות יצור חשמל-רוח (בסיס צף, תורן, להבים, גנרטור ומערכת הולכת חשמל אל החוף) המסוגלת לפעול, בתחזוקה מינימלית, הרחק מהחוף ובעומק 40 עד 200 מ'. מאמץ מו"פ מקביל מתבצע בניסיון לפתח טורבינות המתאימות ליצור חשמל מרוח בעוצמה בינונית-חלשה. זאת משום שכיום תנאי הפעולה האופטימליים של מערכות חשמל-רוח הם מהירות רוח גבוהות כאשר ישנה דעיכה מהירה של ההספק המיוצר עם הירידה במהירות הרוח.

### 3. ביו-דלקים<sup>16</sup>

ביו דלקים הנם דלקים המופקים ממקורות אורגניים ומהווים תחליפים לדלקים פוסיליים. כיום מיוצרים בעולם שני סוגי ביו-דלקים עיקריים: אתנול וביו-דיזל. תחום זה הוא תחום עצום האמור למעשה ליצור תחליף לשימוש בדלקים הפוסיליים בתחבורה והוא חורג מעניינו של נייר זה. דלקים אלה מתבססים על מרכיבים שומניים של הצמח באמצעות תהליכי התססה ומיצוי, הן כגידול מיועד למטרה זו והן כפסולת או שאריות צמחיות. דלקים ביולוגיים ניתנים לשימוש עצמאי וכן להיליה עם דלקים פוסיליים מסורתיים. שימוש בביו-דלקים בתחבורה מאפשר המשך שימוש במנועים הקיימים. ביו-דלקים צורכים אמנם כמות רבה של משאבים (קרקע, מים ובתנאים מסוימים פוגעים בשוק המזון) אך הם מקנים אמינות ויציבות: אצורה בהם אנרגיה זמינה ההופכת לשמישה בהתאם לצורך. המצדדים בשימוש בביו-דלקים כתחליף לדלקים הפוסיליים טוענים כי השימוש בהם ימנע את האפקטים הסביבתיים העשויים להיווצר עקב שימוש מסיבי בבטריות שישמשו להנעת רכבים חשמליים.

עלות הייצור של ביו-דלקים עדיין גבוהה משמעותית מעלויות הייצור של בנזין או סולר (פי 3 בקירוב). במטרה לעודד חדשנות, מענה טכנולוגי וצמיחה של חברות בתחום, הגדירו מדינות רבות ברחבי העולם נתח שוק מינימלי שיוקצה לדלקים ביולוגיים בלבד. בשנת 2008 היו למעלה מ-50 מדינות אשר חוקקו מכסות מינימליות לשימוש בביו-דלקים. האיחוד האירופי הכריז על יעד של 10% לשימוש במקורות אנרגיה מתחדשת בתחבורה עד לשנת 2020, כשביו-דלקים צפויים להיות החלק הארי במכסה זו.

### 4. Smart Grid

חידושים בתחום הולכת החשמל וקשר דו-כיווני בין יצרנים וצרכנים נכלל במסגרת תחום המכונה "רשת חכמה". רשת מסוג זה באה לשפר את ההתאמה בין ביקוש לייצור ולהתמודד עם חוסר היעילות הנובעת מהארכיטקטורה המאפיינת כיום רשתות הולכת חשמל בעולם. מבנה הרשת הנוכחי מתאפיין בארכיטקטורה היררכית שלא השתנתה באופן מהותי במאה השנים האחרונות. מבנה זה של המערכת מקשה על התאמה גמישה בין הצריכה ובין הייצור ונחשב כבעל מקדם ניצולת נמוך במיוחד ביחס שבין ייצור לחשמל זמין. יתירות היא בעיה מהותית נוספת במבנה הנוכחי של רשת החשמל כאשר תקלות מקומיות קטנות עשויות להוביל לתגובת שרשרת ברמה הלאומית ולהשבתות ממושכות של אספקת החשמל. רשת החשמל הנוכחית

<sup>14</sup> במקרים מסוימים, הזזה של טורבינה במספר עשרות מטרים יכולה להכפיל את תפוקתה. למיקומה המדויק של הטורבינה (micro-siting) השפעה גדולה על יכולותיה וההכנסות שתפיק.

<sup>15</sup> ככל ששטח הפנים של הרוטורים יהיה גדול יותר, בכפוף למגבלות אווירודינמיות של היחס ביניהם, כך יוכלו לאצור כמות גדולה יותר אנרגיה מהרוח העוברת דרכם. קיימים היום פיתוחים של טורבינות בעלות להבים דיפרנציאליים המתאימים את אורך הלהב לעוצמת הרוח.

<sup>16</sup> מקטע זה מתבסס על סקירה המופיעה ב: איציק ברזין, תמר ישראלי, אסף צחור. משבר האקלים: הזדמנות לצמיחה כלכלית (נייר עבודה לקראת כנס הרצליה 2010).

היא למעשה התפתחות בשלבים, כטלאי על טלאי, של המערכות מראשית המאה ה-20. ההתפתחות המקבילה של הכלכלה ושל רשת החשמל, יחד עם רמת האמינות הגבוהה יחסית של אספקת החשמל דחו עד כה את הצורך להחליף ולבנות רשת חשמל חדשה. האילוצים הנוכחיים והעתידיים הנוגעים לשימוש אנרגיה יוצרים לחץ והזדמנות להקמה של רשת חשמל בעלת ארכיטקטורה חדשה המכונה smart grid. רשת מסוג זה באה להתמודד עם הבעיות הנובעות ממבנה הרשת הנוכחי, להקנות גמישות ויתירות של המערכת וייעל מאד את הייצור באמצעים הקיימים. ישנן הערכות לפיהן שימוש בארכיטקטורה ובמרכיבי "רשת חכמה" תביא להגדלה של יותר מ-40% בהיצע החשמל הזמין שיכולים לספק אמצעי הייצור הקיימים.

רשת מסוג זה מתבססת על זרימה רציפה של מידע מיצרנים המחוברים לרשת ומצרכנים וביצוע התאמה אופטימלית בין היצע וביקוש. הרשת מבצעת אינטגרציה של כלל יכולות הייצור הקיימות במערכת בכל רגע נתון, כולל מתקני ייצור אנרגיה חלופית (רוח, PV's, תרמו-סולארי וכדומה), וכך גם לגבי הביקושים ומיקומם הגיאוגרפי. הרשת מבצעת התאמה בין צריכה לייצור והיא מבוססת על ארכיטקטורה מודולארית שמתאימה לכל מצב נתון תמהיל מקורות שונה, בהיקף, בסוג ובמיקום. הישענות על גישה זו לניהול הייצור ולמיתוג האספקה מאפשרת המרה של המשך פיתוח תחנות כוח גדולות, בעלות גמישות הפעלה נמוכה יחסית, במערכת מבוצרת של יחידות ייצור בינוניות וקטנות מסוגים שונים. היבט נוסף לשימוש ב"רשת חכמה" הוא ביטחוני, אפשרות ביזור הייצור מגדילה את שרידותה הכוללת של המערכת. מערכת במבנה זה תוכל לספק חשמל ולתעדף את חלוקתו גם אם ייפגעו חלק ממתקני הייצור.

פיתוח מוצרים לרשת חכמה הוא התחום המרכזי אליו את היקף ההשקעה הפרטית הגבוהה ביותר מכל ענפי האנרגיה המתחדשת. מו"פ של מוצרים לתחום זה נחשב זול יחסית וקצר מבחינת משך הפיתוח. במוצרי הרשת החכמה נכללים מכשירי מדידה וניטור של ביקושים ושל התנהגות הרשת, תוכנות לעיבוד המידע ורכיבי מיתוג.

## “כלכלה ירוקה” כמדיניות לאומית בישראל ובעולם

ביחס לנעשה בתחום הכלכלה הירוקה בעולם נמצאת ישראל במרחק גדול מאד מהמדינות המובילות, ביחס להטמעה ושימוש במוצרים ירוקים ואף ביחס למו"פ. זאת בניגוד לתפישה רווחת לפיה בתחומים מסוימים, דוגמת אנרגיה סולארית, ישראל היא מובילה עולמית. בחינת כלל העיסוק הישראלי בתחום מעלה מספר קטן מאד של פרויקטים ומיזמים שהם בעלי יתרון תחרותי מובהק ביחס לנעשה בעולם. באשר להטמעה בפועל של מוצרי כלכלה ירוקה המרחק ביחס לנעשה בעולם גדול עוד יותר, בהשוואה למדינות שהציבו את התחום במקום גבוה בסדר העדיפויות הלאומי. נראה והיתרון העיקרי העומד לזכותה של ישראל כמנוף למובילות עולמית בתחום הוא אופיים היזמי של הישראלים. למרות שלכאורה מדובר במרכיב זניח, יזמים ישראליים קנו שם עולמי בקידום פרויקטים בתנאים המאפיינים פיתוח רעיונות לכדי חברה עסקית. היזמות הישראלית מאופיינת ביצירתיות, בתושייה וביכולת ביקורת ובקרה עצמית החיוניות כל כך בפרויקטים מסוג זה.

מלבד איכות הרוח היזמית הישראלית, ישנו יתרון ישראלי מסוים ברמה ובידע שנצברו בארץ בשנים האחרונות בתחומי הננו-טכנולוגיה. הניסיון הישראלי ביישומי הנדסת חומרים במרחב ה"ננו" יש בהם יתרונות גדולים בפריצות דרך משמעותיות הנוגעות לכלכלה הירוקה, במיוחד ביחס לתחום האגירה (ארכיטקטורה של מצברים) ובתחום הפוטו-וולטאי. בכל שאר היבטים נמצאת ישראל בפיגור בקידום "כלכלה ירוקה" ביחס למדינות מתקדמות בעולם שהציבו את הנושא בראש סדר העדיפויות שלהן.

כלכלה ירוקה ואנרגיה מתחדשת הם בעלות משמעות מיוחדת עבור ישראל בשל היותה מדינה קטנה מוגבלת במשאבים וכן "אי-אנרגטי". השימוש באנרגיות אלטרנטיביות לאנרגיה ממקורות פוסיליים משמעה הקטנת התלות של ישראל במקורות חיצוניים לאספקת אנרגיה. כמו כן, אין להתעלם מהערך התדמייתי החיובי שעשוי להיקשר בשמה של ישראל אם תצליח להציג הישגים יוצאי דופן בתחום, כמפתחת טכנולוגיות וכמשתמשת. על רקע התחזיות מנבאות הרעה הקשורות להתחממות הגלובלית כל פיתוח בתחום נתפש באופן מיידי ובלתי מותנה כפיתוח לטובת האנושות כולה.

חשיבות זו זוהתה ברמה ההצהרתית ע"י הממשלה עוד בתחילת העשור הקודם. בשנת 2002 קיבלה הממשלה החלטה לפיה יגיע עד שנת 2007 שיעור ייצור החשמל ממקורות מתחדשים לכדי 2% מסך הייצור, עם קצב גידול שנתי של 1% עד ליעד של 5% בשנת 2016. בשנת 2008 החליטה הממשלה על הקצאת סכום של 800 מיליון ₪, במשך 5 שנים, המיועדים לתמיכה במו"פ "ירוק" ולהקמת מכון מחקר שיציע תשתית מחקרית ייחודית לתחום. בינואר 2009 עדכנה הממשלה מחדש את החלטתה הקודמת מ-2002 בהחלטה לפיה כל שנה, למשך עשור, יוקמו מתקני אנרגיה מתחדשת בהיקף של 250 מגה-ווט

חשמל לפחות. על תמיכה ממשלתית במו"פ. דוגמאות אלה מציבות את ישראל לכאורה בקו אחד יחד עם יתר מדינות ה-OECD אלא שבפועל החלטות אלה לא גובו במערכת תומכת ביצוע, תקציבית ובירוקרטית. מקורות אנרגיה מתחדשת תורמים לייצור האנרגיה בארץ שיעור זניח של פחות מ-0.5%. הסקטור הפרטי אמנם מגלה נכונות ורצון להקים מתקני ייצור, בעיר סולאריים, מעבר למכסה שהקצתה הממשלה באמצעות רשות החשמל הלאומית, אלא שרצון זה נתקל בחסמים רגולטוריים ומנהליים.

גם בתחום המו"פ לא מתקיים מתאם בין הצהרות והחלטות הממשלה לבין הנעשה בפועל. מתקני המחקר לאנרגיות מתחדשות שהיו אמורים לקום בנגב או בערבה עדיין אינם פועלים והיקף הכספים המוקצים למו"פ בנושא אנרגיה הוא עדיין קטן, רחוק מהתקציבים עליהם החליטה הממשלה. הפעילות בנושא אנרגיה במסגרת המדען הראשי, חממות טכנולוגיות וקרנות הון סיכון היא מצומצמת ביותר. ישנן דוגמאות ספורות לפרויקטים בתחום האנרגיה, רובם בתחומים משיקים דוגמת רשת חכמה והתייעלות אנרגטית, שני תחומים שעל רקע הצטיינות ישראל בתחום ה-IT מקנים לה יתרון תחרותי מובהק במסגרת תשתית המו"פ הקיימת. עיקר הפעילות והעסקאות הקשורות בארץ לאנרגיה ירוקה הן עסקאות המבוססות על יבוא ציוד וטכנולוגיה מחו"ל, בעיקר ציוד פוטו-וולטאי.

מדינות שהציבו את תחום הכלכלה הירוקה, ובמסגרתו את האנרגיות המתחדשות, במקום גבוה בסדר העדיפויות הלאומי התאימו ליעדים תכנית מו"פ מפורטת. כך למשל המקרה הסיני. בעשור הקרוב צפויה סין להשקיע בתחומים אלה סכום הנע בין 400 ל-600 מיליארד דולר. העידוד הממשלתי לשימוש בטכנולוגיות "כלכלה ירוקה" מתבצע במסגרת תכניות חומש הכוללות הצבת יעדים בתחום המחקר הבסיסי, פיתוחים במסגרת התעשייה, שימוש והטמעה בפועל. התכנית הסינית מציבה שלושה יעדים מרכזיים בתחום האנרגיה, כולם בגדר פריצות טכנולוגיות משמעותיות לקידום ה"כלכלה הירוקה". שלושה יעדים אלה הם: טכנולוגיות לאגירת אנרגיה; טורבינות רוח בהספק יצור 2-3 MW, הנחשבות במסגרת הארכיטקטורה הקיימת כיחס אופטימלי בין גודל והספק; ציוד ל"שידור" אנרגיה (high quality transmission, 800 KV DC/AC 1000KW UHV). במקביל מקימה סין ישובים בסגנון עירוני המיועדים למגורים ותעסוקה של 20-30 אלף תושבים, כפרויקטים לדוגמה בהם יעשה שימוש במגוון טכנולוגיות ירוקות שפותחו ויוצרו בסין. סין הציבה יעד שאפתני במיוחד לפיו עד שנת 2020 מקורות אנרגיה מתחדשים יתפשו נתח של 20% מכלל מקורות האנרגיה. סין נמנעת מלהתחייב על יעדים לצמצום פליטות של גזי חממה.

ארצות הברית היא דוגמה המשקיעה באנרגיות מתחדשות באמצעות תקציבים שהם חלק מתוכנית ההמרצה המשקית להתמודדות עם המשבר הכלכלי. הכספים במסגרת זו, בהיקף של 900 מיליארד דולר, מיועדים לסיוע במימון פרויקטים בהגדרה רחבה, כמענקים וכמספספי קווי אשראי. חלק מכספים אלה מוגדרים כמענק ישיר וחלקם כהטבות מס. עיקר הכסף מוקצה להתקנה של מערכות ייצור ולא למו"פ. היקף העידוד משתנה בהתאם לתחום כאשר פרויקטים בתחום אנרגית הרוח זוכים לתמריצים נמוכים יותר מאלה להם זוכים פרויקטים בתחום הסולארי למשל. כניסתו של ממשל אובמה מציינת תפנית של ממש בהתייחסות לנושא. במקרה האמריקאי יוחסה לפעילות בתחום ה"כלכלה הירוקה" תדמית שלילית לפיה השקעה בו לא תביא ליצירה של מקומות עבודה חדשים, מענקים והשקעות הם בגדר ביזבז של כספי משלם המסים וכי מקורות אנרגיה מתחדשים יביאו להתייקרות של מחיר החשמל. דימוי זה, שנתמך בכוח פוליטי בבתי הנבחרים ובמקומות מסוימים בממשל, הקשה מאד על קידום חקיקה ופיתוח תכניות תמריצים לקידום הענף.

מדינה נוספת שהנהיגה מפת דרכים לשימוש באנרגיה מתחדשת היא גרמניה. גרמניה היתה המדינה הראשונה בעולם שהחלה בפיתוח מדיניות לעידוד השימוש במקורות אנרגיה מתחדשים כבר בשנות ה-70, כלקח ממשבר הנפט. ממשלת מערב גרמניה השקיעה מאמצים וכסף רב במהלך 30 השנים האחרונות בפיתוח טורבינות הרוח המסחריות הראשונות ובטכנולוגיות חליפיות נוספות, בהן טכנולוגיית כורים. גרמניה פיתחה לאורך השנים מערכת חקיקה ותמריצים שהפכה אותה כיום למתקדמת בעולם מבחינת היקף השימוש בפועל באנרגיות מתחדשות ובפיתוחים חוסכי אנרגיה. רוח ודלקים ביולוגיים נמצאים בראש יעדי המו"פ של גרמניה. יש לציין כי מאז שנת 2000 עלה מאד היקף השימוש בחשמל פוטו-וולטאי, כתוצאה מהוזלה של חומרי גלם לייצורם, אך טורבינות רוח הן עדיין מקור אנרגיה דומיננטי ביחס לכל היתר. ההסבר לכך הוא דגש ששמה גרמניה על יעדי צמצום פליטה של גזי חממה אליהם התחייבה עוד קודם ל"אמנת קיוטו". עד שנת 2012 התחייבה גרמניה לצמצם בכ-20% את פליטת גזי החממה ביחס לרמות הפליטה של שנת 1990. מדינות קטנות יותר, לדוגמה דרום קוריה, הציבו גם הן תכנית יעדים "רוקים", עם תכנית מו"פ מפורטת. במקרה הדרום קוריאני הדגש בתכנית המו"פ הירוק הוא על פיתוח טכנולוגיה מוצרים המבוססים על צריכה נמוכה של חשמל, תאורת LED למשל.

לעומת דוגמאות אלה, במקרה הישראלי עד כה נמנעה הממשלה עד כה מלהצמיד להחלטות המסגרת מפת דרכים מפורטת ותקציבים לקידום ומימוש היעדים המופיעים במתווה, תוך תיאום המהלכים בין משרדי הממשלה השונים. ראוי לבחון את הנושא בהתאם לשני צירים שאין בהכרח קשר ביניהם: ישראל כיצרנית מוצרי אנרגיה מתחדשת וכלכלה ירוקה וישראל כצרכנית של מוצרים אלה

## סיכום

שינוי האקלים יחד עם העלייה החדה הצפויה במחירי הדלקים הפוסיליים הופכים כאמור את ענף האנרגיה הירוקה לגורם מוביל בצמיחה הכלכלית העולמית באופן כמעט דטרמיניסטי. האופן בו יתורגם הצורך במוצרי אנרגיה ירוקה לצמיחה ורווחיות כלכלית עדיין אינו ברור אך היקף העניין וההשקעות אותו הוא מרכז מבטא הכרה בתהליך בלתי נמנע זה.

בניגוד לתחומים אחרים בכלכלה, רובם של מוצרי הכלכלה הירוקה הם מוצרים תחליפיים למוצרים קיימים ואינם מוצרים המציעים שימוש או חוויה חדשניים. לרוב מוצרי הכלכלה הירוקה כמעט ואין נגיעה לצרכן הסופי בין אם מדובר באנרגיה, תחבורה או מיחזור. מימד זה ממקד כיום את הכלכלה הירוקה בצמצום הפער בין עלות השימוש במוצרים "ירוקים" ובין עלות השימוש במוצרים קונבנציונליים. הפער הגדול בין שני סוגי המוצרים מגושר כיום באמצעות מדיניות תמריצים אגרסיבית בה נוקטות מדינות וכן במאמצי מו"פ המתמקדים בהוזלת השימוש של מוצרים "ירוקים". מדיניות תמריצים יציבה לטווח ארוך היא אולי גורם ההשפעה המרכזי על השקעות ומשקיעים בתחום הכלכלה הירוקה.

באשר לאנרגיות מתחדשות קיימת מחלוקת לגבי היקף האנרגיה שיוכלו לספק. לעומת מומחים הטוענים כי אנרגיות אלה יוכלו למלא חלק של 40% מסך הדרישה לאנרגיה ישנם אחרים הטוענים כי השיעור המירבי אותם יוכלו לספק הוא רק 10%, כהשלמה וכתוספת למקורות ייצור base load שבעתיד יהיו בעיקר גרעין. שתי הגישות יוצרות שני אפיקי מדיניות שונים המגדירים שני מערכי עדיפויות שונים לחלוטין. קשה להעריך כיום איזו מהשתיים היא המגמה המובילה.

עד היום נמנעה ישראל מלקדם את נושא האנרגיה המתחדשת. אמנם הממשלה קיבלה מספר החלטות מסגרת אך עד כה לא התאימה להן משאבים ויעדים ביצועיים להשגתן. לנוכח האילוצים היחודיים לישראל, בעיקר המחסור במשאבי קרקע הדרושים לפיתוח פרוייקטים בתחום הרוח ובתחום הסולארי, ייתכן והשתהות הממשלה בקידום הנושא תתברר בעתיד כעדיפה. זאת בתנאי שהתפתחויות בתחום הייצור הקונבנציונלי והגרעיני יפכו את מוצרי הדור הנוכחי של האנרגיות המתחדשות למיותרים.