

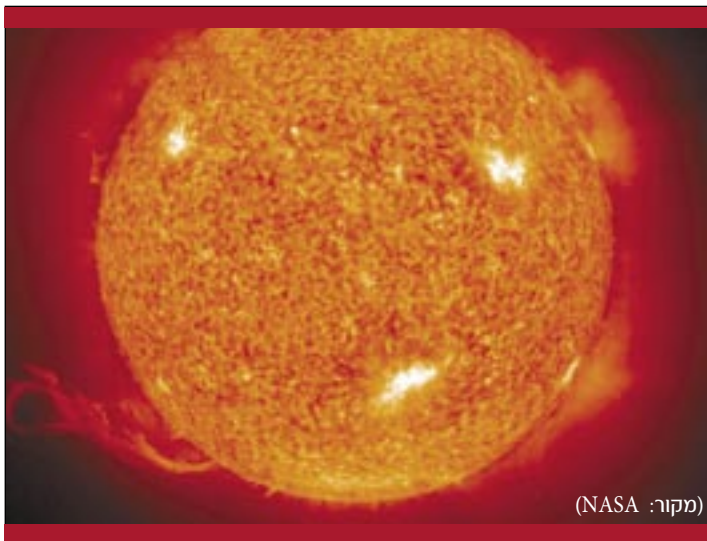
# ייצור חשמל באמצעות אנרגיה סולארית - סקירה טכנולוגית

השמש היא מקור אנרגיה ראשוני, עשיר, זמין ובלתי-נדלה. היא מהווה מקור עיקרי לאנרגיה על פני כדור הארץ, ויצרת מקורות אנרגיה רבים שמוצלים על-ידי המין האנושי. כמות האנרגיה שמגיעה מהשמש לפני כדור הארץ בכל שנה היא פי 10,000 לערך מצריכת האנרגיה העולמית בשנה. מאמר זה סוקר בקצרה את הטכנולוגיות העיקריות להפקת כוח (חשמל) וחום באמצעות אנרגיית השמש.

כאשר קרני האור פוגעות בחומר מוליך למחצה, גורמים חלקיקי אנרגיית האור שנקראים פוטונים לשחרור של אלקטרון מהמבנה האטומי של החומר. התוצאה הישירה של שחרור מטען שלילי (אלקטרון) היא היווצרות "גומה" בעלת מטען חיובי. כדי לפצל אלקטרונים באופן קבוע, החומר בנוי שתי שכבות, האחת בעלת יסודות של זרחן (קרניה סוג n), והשנייה בעלת יסודות של בוריום (קרניה סוג p). התוספת של יסודות זרחניים מביאה לגידול במספר האלקטרונים החופשיים, ואילו הבוריום גורר מחסור באלקטרונים.

כאשר קרני האור פוגעות בתאי PV, גורמים הפוטונים לתנועת

אלקטרונים משכבה n לשכבה p, הם מצטברים בשכבה n, כך ששכבה n נבנית כשכבת "חוסר" בעלת מטען חיובי (ראו איור 1). ההבדל בין כמות האלקטרונים בין השכבות הוא הפרש פוטנציאליים, אשר מהווה מקור מתח חשמלי. למעשה, תא PV מתפקד כסוללה בעלת פוטנציאל חשמלי חיובי ושלילי. רמת המתח בין ההדקים - החיובי והשלילי - תלויה ברמת החשיפה לאור וביעילות של התא בהמרת האור לחשמל. כאמור, לא נדרשת קרינת שמש ישירה כדי לייצר חשמל באמצעות התא.



(מקור: NASA)

הגידול הגובר בביקושי אנרגיה בעולם, אשר מתבטא בגידול בפליטות של גזי חממה ושל מזהמים המשפיעים על אקלים כדור הארץ ועל איכות הסביבה בה אנו חיים, וכן החתירה להשגת ביטחון באספקת אנרגיה לטווח ארוך, כל אלה מובילים לעניין גובר והולך בניצולה של אנרגיה סולארית כמקור בלתי-נדלה, בניגוד למקורות אנרגיה אשר מבוססים על דלקים מחצביים.

השימוש באנרגיה סולארית החל בשנות ה-50 וה-60 של המאה ה-20 כחלק מתוכניות החלל של ארצות הברית וברית המועצות לשעבר, ולוויינים וחלליות צידו בתאים סולאריים לאספקת

חשמל. בשנות ה-80 של המאה הקודמת הפכה האנרגיה הסולארית למקור כוח פופולרי בתעשיית האלקטרוניקה הזעירה (מחשבוני, שעונים, פנסים וכדומה). בד בבד החלו לפתח מערכות שמיועדות לשימוש בקנה-מידה ביתי ומסחרי. כיום צומחת תעשייה זו בסדרי גודל של 25% בקירוב בשנה.

קיימות שיטות שונות לייצור חשמל באמצעות אנרגיית השמש. שתי הטכנולוגיות הנפוצות ביותר והבשלות ביותר ליישום הן טכנולוגיית התאים הפוטו-וולטאיים, אשר ממירה באופן ישיר את אנרגיית השמש לאנרגיה חשמלית, והטכנולוגיה התרמו-סולארית, אשר מנצלת את חום השמש לייצור קיטור והנעת טורבינה לייצור חשמל, או להפקת חום עבור מים חמים/קיטור המשמשים לצרכים שונים.

## טכנולוגיית התאים הפוטו-וולטאיים (PV)

טכנולוגיה זו נחלקת ל-2 קבוצות עיקריות:

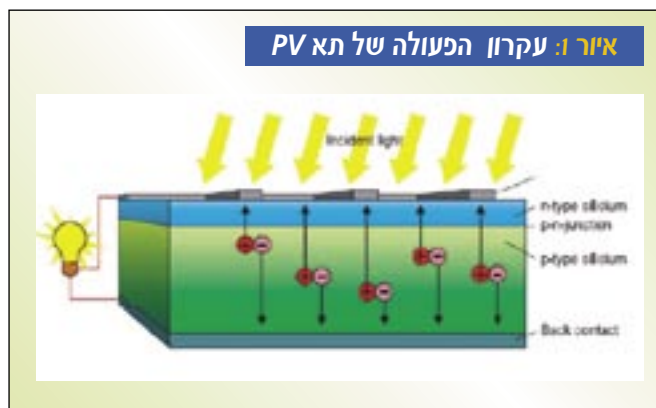
- טכנולוגיה שמבוססת על פאנלים ובהם תאים פוטו-וולטאיים (תאי PV), הממירים את אור היום לאנרגיה חשמלית אשר משמשת בעיקר לייצור חשמל מקומי מבזר.
- טכנולוגיה שמבוססת על תאי PV אשר משולבים בעדשות או במראות המשמשות לריכוז קרינת השמש אל התא. טכנולוגיה זו קרויה "תאי PV עם מרכזי קרינה" (CPV - Concentrated PV), והיא משמשת בעיקר לייצור חשמל בתחנות כוח פוטו-וולטאיות.

## פאנלים של תאי PV

### מבנה ועקרונות פעולה:

תאי PV עשויים מחומרים מוליכים למחצה, לרוב מצורן (סיליקון) גבישי. עבור יישומי תוכניות החלל נעשה שימוש בחומר נדיר ויקר יותר - גליום ארסניד (GaAs - Gallium arsenide), שיעילותו האנרגטית גבוהה בהרבה מזו של הסיליקון הגבישי.

### איור 1: עקרון הפעולה של תא PV



(מקור: Leonardo Energy: Distributed generation & renewables - (Photovoltaic Installations 2007)

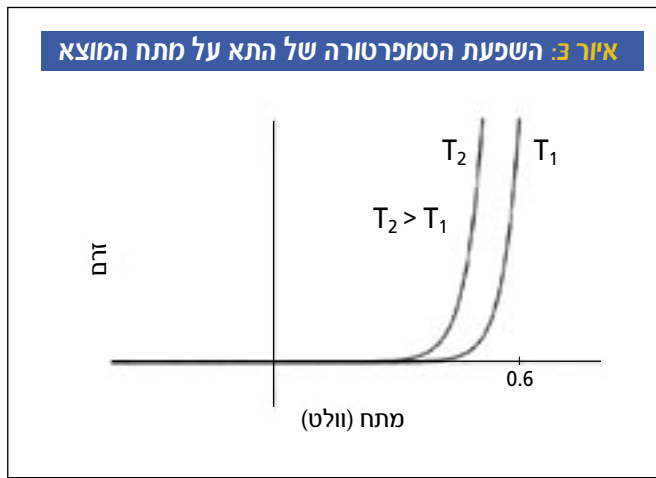
תא סיליקון גבישי אופייני מייצר כ-0.5 עד 0.6 וולט מתח ישר (DC). חיבור טורי של תאי PV מגדיל את מתח המוצא של המערכת, ואילו חיבור מקבילי מגדיל את תפוקת התא (זרם המערכת). פאנלים של מערכות PV בנויים במיגון גדלים וצורות, ופאנל בשטח של כמטר רבוע מכיל כ-60 תאי PV. חשוב לציין, שכדי לחבר את המערכת לרשת החשמל

קיימים כמה דגמים עיקריים של תאים מסוג זה, כדלקמן:  
 Amorphous silicon (a-si); Cadmium Telluride (CdTe)  
 Copper Indium/Gallium Diselenide/Disulphide (CIS, CIGS);  
 Multi junction cells a-si/m-si  
 בטבלה 1 מוצגת השוואה בין המאפיינים העיקריים של תאי ה-PV שתוארו לעיל.

פיתוח נוסף של התאים מסוג "סרט דק" הוא התאים הגמישים, שייצורם מבוסס על תהליך ייצור דומה לזה של תאי "סרט דק". בתאים אלו, החומר הפעיל מותקן בשכבת פלסטיק דקה אשר מעניקה למעשה את יכולת הגמישות של התא. הגמישות של התא מגדילה את אפשרויות היישום וההתקנה של התא, ומגבירה את התאמתו לצורות שונות של מבנים וגוות.

**טיפעול ותחזוקה של מערכת פאנלי PV**

פשוט יחסית לתחזק מערכת של פאנלים בטכנולוגיית PV, היות שאין בה חלקים נעים. תפוקתה תלויה בכמות האור הזמין ובנצילות של התא, אך היא מושפעת גם מתנאי סביבה נוספים - אבק, הצללה וטמפרטורה. לכן, מומלץ לדאוג לניקוי של הפאנלים מאבק ולכלוך ולמנוע את



(מקור: Earthscan: Applied Photovoltaics 2007)

הצללתם. כמו כן, עליית הטמפרטורה של תאי PV במעלת צלסיוס אחת מקטינה את היעילות של התא ב-0.5% לערך (ראו איור 3). לכן חשוב מאוד לדאוג לקירור הפאנלים, אם באמצעות קירור פסיבי (כגון באמצעות צלעות קירור), ואם באמצעות קירור אקטיבי (החלפת חום באמצעות מערכת של צינורות מים. ניתן ורצוי לנצל את המים החמים לשימושים נוספים).

**תאי PV עם מרכזי קרינה (CPV - Concentrated PV)**

מערכות CPV מתוכננות להפיק כמות גדולה של אנרגיה תוך שימוש בכמות קטנה של חומר פוטו-וולטאי, ובכך להקטין את הביקוש העולמי לחומר מוליך למחצה בתעשייה זו, ואף להקטין את העלויות של המערכות. טכנולוגיה זו מבוססת על תאי PV יעילים יותר (ראו איור 4) בשילוב מראות או עדשות אשר מרכזות את קרינת השמש אל התא, שהוא בעל שטח קטן פעיל. לפיכך, משיגים חיסכון של עד פי 1,000 בחומר התא, ומגדילים את יעילות הפקת האנרגיה החשמלית.

קיימות שתי שיטות עיקריות ליישום טכנולוגיה זו:

- תא PV ומראות/עדשות שלובים בתוך פאנל, אשר עוקב אחר קרני השמש ומקורר באמצעות קירור פסיבי (ראו איור 5).
  - מערכת של מראות העוקבות אחר קרני השמש ומרכזות אותן לתא PV אשר ממוקם בחזית המראות (ראו איור 6). תא זה מקורר באמצעות קירור אקטיבי (צנרת מים), המאפשר לנצל את המים החמים המתקבלים גם ליישומים נוספים.
- עלות של מערכת CPV עתידה להיות נמוכה מזו של מערכת PV קונבנציונלית, על אף העלות הגבוהה יותר של התא הפוטו-וולטאי, שהוא ייעודי למערכת CPV.

נדרש מהפך (inverter), שתפקידו העיקרי הוא להמיר את המתח הישר (DC) למתח חילופין (AC).

לקבלת מידע בנושא ההיבטים הטכניים של חיבור מערכות פוטו-וולטאיות בהספק שאינו עולה על 50 קו"ט לרשת חברת החשמל, ניתן לעיין במאמר "היבטי יישום וחיבור של מערכות פוטו-וולטאיות לרשת חברת החשמל" שכתבו המהנדסים אורי מאור וגיא רט, המתפרסם בגיליון זה.

ההספק המותקן של מערכת PV מבוטא ביחידות ואט-שיא (Wp) (Watt peak). התפוקה הנומינלית נמדדת תחת תנאי מדידה סטנדרטיים (STC - Standard Test Conditions), בהתאמה לתקן IEC61215: "Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) modules - Design, Qualification and type approval" כדלקמן: קרינה של 1,000 ואט למ"ר וטמפרטורת תא של 25 מעלות צלסיוס.

**סוגים של תאי PV**

סוגי התאים מבוססים על שתי טכנולוגיות עיקריות: "סיליקון גבישי" (crystalline silicon) ו"סרט דק" (Thin film) (ראו איור 2). תאי סיליקון גבישי בנויים משכבות דקות של סיליקון שנתכתו מתוך גביש בודד של סיליקון (monocrystalline - mono c-si), או מכמה גושים של סיליקון (polycrystalline - poly c-si או multicrystalline - multi c-si), ויעילותם היא בטווח של 12%-17%. הצבע של תא מסוג (multi c-si) הוא צבע פלדה כחול, ואילו זה של תא מסוג mono c-si הוא כצבע פחם.

תאים מסוג "סרט דק" בנויים משכבות דקות מאוד של חומר מוליך למחצה רגיש לאור, בתוך מעטפת בנויה מזכוכית, פלדת אל-חלד או פלסטיק. ייצור של תאים מסוג סרט דק זול יותר בהשוואה לייצור תאים מסוג סיליקון גבישי, והוא מצריך פחות שימוש בחומר, אולם יעילותם נמוכה בהשוואה לתאי סיליקון גבישי והיא נעה בטווח של 5%-13%.

**איור 2: פאנלים של תאי PV**



**טבלה 1: השוואה בין מאפיינים של תאי PV**

סוג התא מאפיין	סרט דק		סיליקון גבישי	
	a-si	CIS, CIGS, CdTe	poly	mono
יעילות	6%-7%	10%-11%	12%-14%	13%-17.5%
שטח מקורב נדרש (מ"ר) לכל קו"ט שיא	15 מ"ר	10 מ"ר	8 מ"ר	7 מ"ר

(מקור: Leonardo Energy: Residential Photovoltaic Systems 2008)

כך שניצול משולב של כוח וחום בטכנולוגיות CSP מאפשר להשיג נצילות של 85% ואף יותר.

מיתקני CSP בנויים משלושה מרכיבים עיקריים:

- מרכז (Collector) - מערך של מראות או רפלקטורים אשר קולטים את הקרינה וממקדים אותה. מערך זה מצויד במערכת עקיבה אחר קרני השמש.
- מקלט (receiver) - קולט את הקרינה הממוקדת ומשמש כתווך להסעת החום אל מערכת המרת האנרגיה.
- מערכת המרת האנרגיה (Energy Conversion System) - ממירה את החום לאנרגיה חשמלית.

הטכנולוגיה התרמו-סולארית מיושמת כיום באמצעות ארבע שיטות עיקריות כדלקמן (ראו השוואה של המאפיינים העיקריים בטבלה 2):

### שוקת פרבולית (parabolic trough)

מערך של רפלקטורים פרבוליים (מראות) בצורת שוקת, אשר מרכזים את קרני השמש וממקדים אותן אל צינור תרמי עשוי זכוכית בוואקום בעלת מעטפת שחורה, אשר ממוקם במוקד הרפלקטור, ובו עובר נוזל מוליך חום כגון שמן סינתטי. השמן מתחמם לטמפרטורה של כ-400 מעלות צלסיוס ומסוחרר דרך מחלפי חום לשם הפקת קיטור (ראו איור 7). הקיטור משמש ליצירת אנרגיה חשמלית באמצעות טורבינות קיטור במחזור יחיד או במחזור משולב. קיימת גם מערכת דומה שבה נוצר קיטור ישירות בצינור המרכזי, ללא מחלפי חום, דבר המגדיל את היעילות של המערכת ב-15%-20% לערך.

### איור 7: דוגמה של שוקת פרבולית



(מקור: www.trec-uk.org.uk)

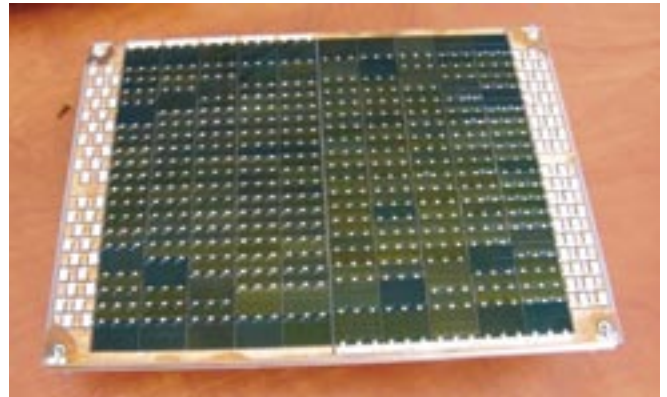
### קולט מרכזי/מגדל שמש (central receiver/solar tower)

מערך של מראות (קרויות heliostats) אשר מרכז את קרני השמש אל מקלט מרכזי בעל שטח של כמה מטרים רבועים, שממוקם בראש מגדל בגובה שבין 50 ל-100 מטרים. במקלט מסוחרר נוזל החימום, לרוב במלח מותך או בשמן סינתטי, אשר מחומם לטמפרטורות גבוהות מאוד (עד 1,000 מעלות צלסיוס) ומשמש ליצירת קיטור להנעת טורבינה (ראו איור 8).

### צלחת פרבולית (parabolic dish)

רפלקטור פרבולי בצורת צלחת בקוטר של כ-10 מטרים ויותר אשר מרכז את קרני השמש לעברו של מקלט, הממוקם במוקד הרפלקטור. הקרינה המרוכזת נספגת במקלט ומשמשת לחימום נוזל או גז לטמפרטורה של כ-750 מעלות צלסיוס. הנוזל או הגז המחוממים משמשים לייצור חשמל באמצעות מיקרו-טורבינה או מנוע תרמי כגון סטירלינג שמחוברים למקלט (stirling); מנוע סטירלינג מוצל אנרגיה ממקור חום חיצוני על מנת להפיק עבודה מכנית. חימום וקיור של הגז המצוי בצילינדר

### איור 4: דוגמה של תא PV יעיל במערכת CPV



(מקור: חברת ZenithSolar)

### איור 5: דוגמת מערכת PV עם מרכזי קרינה (CPV)



(מקור: EPRI: Concentrating Photovoltaic Solar Technology Assessment 2010)

### איור 6: דוגמת מערכת PV עם מרכזי קרינה (CPV)



(מקור: חברת ZenithSolar)

## טכנולוגיה תרמו-סולארית (Solar Thermal)

ניצול אנרגיית שמש כאמצעי להפקת אנרגיה תרמית הוא שימוש נפוץ במדינת ישראל כבר שנים רבות: דודי שמש משמשים כתחליף לחימום באמצעות חשמל או גז. הטכנולוגיה התרמו-סולארית פותחה בישראל עוד בשנות ה-80 של המאה הקודמת על-ידי חברת "לוז" הישראלית, ויושמה לראשונה במדינת קליפורניה שבארצות הברית. טכנולוגיה זו עושה שימוש רק בקרינה הישירה של השמש, אשר קרויה - DNI Direct Normal Irradiation או Beam radiation, והיא מרוכזת על-מנת לחמם נוזל תרמי (מים, שמן או תמיסות מלח מותך) ולהמירו לקיטור. לכן היא קרויה CSP - Concentrating Solar Power. למעשה, מיתקני CSP מפקים חשמל באופן דומה לתחנות כוח קונבנציונליות - נעשה שימוש בקיטור לשם הנעת טורבינה. יעילותה של המערכת תלויה ביעילות האופטית וביעילות המרת החום של המיתקן.

**איור 8: דוגמא של מגדל שמש**

**איור 9: דוגמא של צלחת פרבולית**



(מקור: www.trec-uk.org.uk)



(מקור: www.trec-uk.org.uk)

**טבלה 2: השוואה בין המאפיינים העיקריים של טכנולוגיות CSP**

שטח נדרש (מ"ר / מגוואט שעה לשנה)	יעילות מחזור תרמי (%)	יעילות סולרית מרבית (%)	ריכוז קרני השמש בפקטור של:	הספק מותקן (מגוואט)	
6-8	30%-40% (טורבינת קיטור)	21% (מוכח)	70-80	10-200	שוקת פרבולית
8-12	30%-40% (טורבינת קיטור) 45%-55% (מחזור משולב)	20% (מוכח) 35% (צפוי)	300-1,000	10-150	מגדל שמש
8-12	30%-40% (מנוע סטירלינג) 20%-30% (טורבינת גז)	29% (מוכח)	1,000-3,000	0.01-0.4	צלחת פרבולית
4-6	30%-40% (טורבינת קיטור)	20% (צפוי)	25-100	10-200	רפלקטור פרנל ליניארי

(מקור: German Aerospace Center (DLR): Concentrating solar power for the Mediterranean region, 2005)

כמות השטח הנדרש לייצור יעיל של אנרגיה חשמלית באמצעות אנרגיית השמש. נכון להיום, מערכות סולאריות מצריכות שטח ניכר, גדול בהרבה בהשוואה למיתקנים לייצור חשמל באמצעות דלקים מחצביים. לדוגמא, עבור הספק מותקן של 1,000 מגוואט שיא נדרש כקילומטר רבוע אחד של תחנת כוח בטכנולוגיית טורבינת גז במחזור משולב, ואילו עבור תחנת כוח בטכנולוגיית פוטו-וולטאית נדרשים כ-25 קילומטרים רבועים (ראו טבלה 3).

**טבלה 3: השוואת השטח הנדרש עבור תחנות כוח שונות לייצור חשמל**

שטח מקורב נדרש (קמ"ר) עבור 1,000 מגוואט מותקן	סוג התחנה
0.8	פחמית
1.1	טורבינת גז במחזור משולב
16-25	תרמו-סולארית
25	פוטו-וולטאית

(מקור: אקו אנרג'י - "אנרגיה חלופית ושטחים פתוחים", 2008)

גורם לתנועת הבוכנה שבמנוע). זו הטכנולוגיה היעילה ביותר מבין הטכנולוגיות התרמו-סולאריות עם יעילות של כ-29% בהשוואה ל-20% לערך של הטכנולוגיות האחרות (ראו איור 9).

**רפלקטור פרנל ליניארי (LFR- Linear Fresnel Reflector)** מערך של רפלקטורים שטוחים סמוכים אשר מרכזים את הקרינה הסולארית אל מקלט קווי (ליניארי) מוגבה, שבו זורמים מים שמתחממים והופכים לקיטור. המערכת דומה לשוקת הפרבולית, אך היא מצויה בראשית דרכה המסחרית (ראו איור 10).



(מקור: www.trec-uk.org.uk)

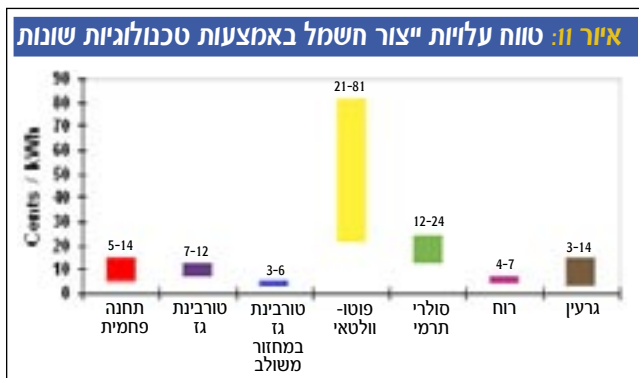
**יישומים נוספים של מערכות CSP**

נכון להיום, מרבית המערכות מתמקדות בייצור חשמל, אולם הן יכולות לשמש גם לתהליכים תעשייתיים וכימיים (לרבות התפלת מים), באמצעות שימוש בחום. השוקת הפרבולית היא הטכנולוגיה המתאימה ביותר לתהליכים שדורשים טמפרטורות נמוכות יחסית, כגון סילוק רעלים, מיחזור פסולת נוזלית וחימום מים. כל שאר הטכנולוגיות מתאימות לשימוש בתהליכים תעשייתיים שדורשים טמפרטורות גבוהות יותר, לדוגמא: ייצור כימיקלים, ייצור מתכות, ייצור מזון וטקסטיל, בישול וחימום מים.

**סוגיית הקרקעות**

אחת הבעיות המרכזיות המקשות על שימוש בטכנולוגיות של אנרגיה סולארית ומציבות אתגרים רבים בפני מפתחי מערכות סולאריות היא

שלל אפשרויות לייצור חשמל באמצעות אנרגיה סולארית, החל מייצור מקומי מבוזר באמצעות פנלים פוטו-וולטאיים וכלה בטכנולוגיות פוטו-וולטאיות עם מרכזי קרינה וטכנולוגיות תרמו-סולאריות לייצור חשמל בתחנות כוח גדולות.



(מקור: חברת החשמל - אגף ייצור והולכה, DOE, IEA)

על אף התועלות הסביבתיות הרבות של המערכות הסולאריות, קיימים עדיין מספר מכשולים בדרך לשימוש בהן בקנה-מידה מסחרי, ובהם: השטח הרב הנדרש להקמתן ולטיפעולן (עם קשר ישיר לנצילות של המערכות), עלויות ההקמה הגבוהות, ועלויות גבוהות יחסית של קוט"ש מיוצר, (ראו איור 11), בהשוואה לטכנולוגיות קונבנציונליות.

מערכות פוטו-וולטאיות מרכזות קרינה, שיתרון הגדול הוא החיסכון (עד פי 1,000) בחומר מוליך למחצה של התא הפוטו-וולטאי, עשויות להיות המובילות בחזית הטכנולוגיה של ייצור חשמל באמצעות אנרגיית השמש עקב יכולת תחרותית בעלויות קוט"ש מיוצר בהשוואה לטכנולוגיות קונבנציונליות.

## אגירת אנרגיה תרמית סולרית (TES- Solar thermal energy storage)

אגירה של האנרגיה התרמית הסולארית היא בעלת פוטנציאל רב לתרום להגדלת גמישות הפעולה של המערכת הסולארית לייצור חשמל. מערכות סולאריות לייצור חשמל אינן זמינות בשעות הלילה ובעת עננות גבוהה ולכן הן עשויות לסייע לייצור החשמל בשעות שיא הביקוש לחשמל בעונת הקיץ בלבד, היות ששעות שיא הביקוש לחשמל בעונת החורף הן לרוב בשעות אחה"צ והערב, בהן קרינת השמש נמוכה. מערכת אגירת אנרגיה מאפשרת לאגור את האנרגיה התרמית אשר מפיקה המערכת התרמו-סולארית, ולהשתמש בה לייצור חשמל בעת קרינת שמש ישירה נמוכה (כתוצאה מעננות וכדומה) או בהתאמה לשעות שיא הביקוש לחשמל, ובכך להגדיל את יכולת הייצור הכוללת של המשק בשעות השיא. נכון להיום, מערכות אגירת אנרגיה תרמית סולארית לא נפוצות בשל מחירן הגבוה. שני הרכיבים היקרים ביותר במערכת אגירת אנרגיה תרמית סולארית הם תווח האגירה (לרוב מלח ניתך) ומיכלי האגירה. אגירה בשיטת "תרמו קליין" (thermocline) היא שיטת אגירה בעלת פוטנציאל להפחית בצורה משמעותית את העלויות הללו. בשיטה זו נדרש רק מיכל אגירה יחיד במקום שני מיכלי אגירה שנדרשים בד"כ עבור מערכות אגירת אנרגיה תרמית לטמפרטורות גבוהות.

שימוש באגירת אנרגיה תרמית עשוי להקטין את עלויות ייצור החשמל באמצעות מערכות סולריות (פר קוט"ש) ואף להגדיל את גמישות הפעולה שלהן.

### סיכום

בשנים האחרונות, על רקע המודעות הגוברת להגנת הסביבה ולניצול מקורות אנרגיה מתחדשים, הולך וגובר העניין בייצור חשמל באמצעות אנרגיית השמש. מיגון הטכנולוגיות העומדות לרשותנו כיום מציע