

יולי 2024 | מחקר מספר 142

טיפול בפסולת לוחות סולריים בישראל

מירית קופרווסר

עמיתת מחקר, המשרד להגנת הסביבה
מרכז מילקן לחדשנות, מכון ירושלים
למחקרי מדיניות

מנחת המחקר: ד"ר תמר מקוב



מכון ירושלים למחקרי מדיניות
מרכז מילקן לחדשנות
המשרד להגנת הסביבה

Jerusalem Institute for Policy Research
Milken Innovation Center
Ministry of Environmental Protection

ברצוני להודות מקרב לב לכל מי שסייעו בכתיבת מחקר זה, על הזמן, על הנכונות לסייע ועל הידע הרב שחלקו עמי בחפץ לב. תודה רבה לד"ר תמר מקוב, מנחת המחקר, על ההנחיה, על רשת הקשרים המקצועית שהעמידה לרשותי, על הזמינות, על השאלות, ההערות וההארות שחלקה איתי. לד"ר תומר פישמן על שחלק ידע על המודל הסטטיסטי, לריד ליפסט על ההתייעצות בנושא אחריות יצרן. תודה לאלעד עמיחי, סמנכ"ל אשכול שלטון מקומי, שקיבל אותי לאשכול, ולכל אנשי האשכול שהיו נדיבים עם הזמן, הידע והניסיון שלהם ושמחו לחלוק. תודה גדולה לצוות אגף אחריות יצרן, אוראל כהן, אורית קצב ומוריה שפנגנטל שתרמו בנפש חפצה מניסיון וקיבלו אותי בחום רב. תודה למשה נוסבכר על הייעוץ המשפטי. תודה רבה ללבנת גולדברג מאגף פסולת על הידע הרב שחלקה ועל הדלת שתמיד הייתה פתוחה להתייעצות. תודה מקרב לב לחגית נובו, מנהלת אגף אחריות יצרן, שהשקיעה רבות מזמנה לחשוב יחד, לחדד סוגיות מפתח, לפתוח לפני דלתות לתחומים נוספים וללמד אותי שיעור על שירות מיטבי לציבור. תודה רבה לחברת EDF ישראל - ובמיוחד לשי כץ ותום מקמל, על המידע שחלקו, הזמינות והנכונות לסייע באיסוף הנתונים למחקר. תודה לחברות האנרגיה המתחדשת הנוספות שחלקו נתוני התקנת לוחות. תודה לאריאל אלמסי מרשות החשמל שחלק איתי מידע לגבי ההספק המותקן בתחילת דרכו של המחקר. תודה לתהל ישפה ולאדם שלימציק מאגף יחסים בינלאומיים על החיבור עם עמיתים מקבילים בטיוואן, לגילי צימנד ולגלעד שלו מאגף תעשיות ורישוי עסקים שחלקו מזמנם, לצוות העמיתים מהמשרד להגנת הסביבה ומהתוכנית לטיפול בפסולת לוחות סולריים הטיוואני וליאן קלינק, מנכ"ל ארגון אחריות יצרן PVCYCLE שחלק מניסיונו בטיפול בפסולת לוחות סולריים. תודה לעמיתים החברים גיל ורדי ויעקב פורמן על שחלקו איתי את השנה הזו. תודה גדולה לצוות תוכנית עמיתי מילקן, לפרופ' גלן יאגו על הרחבת האופקים והעניין הרב, לסטיבן זכר על ההערות המדויקות ולאורלי מובשוביץ לנדסקרונר על ההזדמנות הייחודית למחקר משולב בהתמחות ועל הנוכחות המיטיבה. זו הייתה שנה נפלאה.

על אודות תוכנית עמיתי מרכז מילקן לחדשנות

תוכנית עמיתי מרכז מילקן לחדשנות מקדמת את הצמיחה הכלכלית בישראל באמצעות התמקדות בפתרונות חדשניים, מבוססי שוק, לבעיות מתמשכות בתחומים חברתיים, כלכליים וסביבתיים. התוכנית מתמקדת באיתור פתרונות גלובליים והתאמתם למציאות הישראלית ובבניית ממשקים חינוכיים המחברים בין משאבים ממשלתיים, פילנתרופיים ועסקיים, לטובת צמיחה ופיתוח לאומי בר-קיימא. התוכנית מעניקה מלגות שנתיות לישראלים מצטיינים, בוגרי מוסדות להשכלה גבוהה בארץ ובעולם, המתמחים במוקדי קבלת ההחלטות הלאומיים ומסייעים בפיתוח פתרונות באמצעות מחקר והתמחות. היקף הפעילות של עמיתי התוכנית הוא מקסימלי – התמחות, הכשרה ומחקר במשך חמישה ימים בשבוע.

במשך שנת התמחותם עוסקים עמיתי מכון מילקן במחקר המדיניות במשרדי הממשלה וברשויות שלטוניות אחרות, ומסייעים למקבלי ההחלטות ולמעצבי המדיניות בחקר ההיבטים השונים של סוגיות כלכליות, סביבתיות וחברתיות.

בנוסף עורכים העמיתים מחקר מדיניות עצמאי, שמטרתו לזהות חסמים לתעסוקה ולצמיחה בישראל ולאתר פתרונות אפשריים. מחקרי העמיתים מתבצעים בהדרכת צוות אקדמאי ומקצועי מנוסה ותומכים במחוקקים וברגולטורים, המעצבים את המציאות הכלכלית, חברתית והסביבתית בישראל.

במהלך השנה מוענקת לעמיתים הכשרה אינטנסיבית במדיניות כלכלית, ממשל ושיטות מחקר. במסגרת מפגשי ההכשרה השבועיים, העמיתים רוכשים כלים מקצועיים לכתיבת תזכירים, מצגות וניירות מדיניות, וכן כלי ניהול, שיווק ותקשורת. בנוסף, נפגשים העמיתים עם בכירים בממשל ועם אנשי אקדמיה מהשורה הראשונה בישראל ובעולם. בסמסטר הראשון, העמיתים משתתפים בקורס המתמקד בחידושים פיננסיים, במסגרת בית הספר למנהל עסקים באוניברסיטה העברית בירושלים. הקורס מקנה 3 נקודות זכות אקדמיות, ומלמד אותן פרופ' גלן יאגו, מנהל בכיר, ומייסד, המעבדות לחידושים פיננסיים[™] במכון מילקן.

את בוגרי התוכנית ניתן למצוא במגוון תפקידים בכירים במגזר הפרטי, כמרצים באקדמיה, במגזר הציבורי וכיועצים לשרים ולמשרדי הממשלה. ישנם בוגרים שנקלטו במשרדי הממשלה, ואחרים המשיכו ללימודים גבוהים באוניברסיטאות מובילות בישראל, ארצות הברית ובריטניה.

תוכנית עמיתי מרכז מילקן לחדשנות היא לא פוליטית ובלתי מפלגתית, ואינה מקדמת קו פוליטי או אידאולוגי.

תוכן עניינים

4	מילון מונחים.....
4	תקציר.....
7	מבוא.....
9	מדיניות טיפול בפסולת.....
10	1. לוחות סולריים – טכנולוגיות ייצור ומחזור.....
10	1.1 טכנולוגיות של לוחות סולריים.....
11	1.2 מחזור של לוחות סולריים.....
16	2. הערכת כמויות פסולת לוחות סולריים בישראל.....
16	2.1 הספק מותקן בישראל.....
19	2.2 המרת יחידות הספק ליחידות מסה.....
20	2.3 מודלים סטטיסטיים להערכת כמות הפסולת.....
22	2.4 תוצאות.....
28	3. מדיניות הטיפול בפסולת לוחות סולריים.....
28	3.1 כלי מדיניות.....
33	3.2 הבסיס החוקי.....
45	4. ישראל.....
45	4.1 חקיקה ראשית.....
48	4.2 חקיקה משנית.....
49	5. דיון ומסקנות.....
49	5.1 מסגרת חקיקתית.....
50	5.2 מנגנון תפעולי במסגרת תיקון חקיקה.....
52	5.3 מנגנון מימוני.....
53	5.4 יעדים.....
54	5.5 היררכיית טיפול לפי היררכיית הטיפול בפסולת.....
56	5.6 סיכום.....
57	מקורות.....

רשימת ראשי תיבות	
KW	קילו ואט
KWh	קילו ואט שעה
MW	מגה ואט
GW	ג'יגה ואט
EVA	אתילן ויניל אצטט
CdTe	קדמיום טלור
CIGS	נחושת אינדיום גליום סלניום
GaAs	גליום ארסניק
PET	פוליאתילן טרה פתלאת
PVF	פוליוויניל פלואוריד

מילון מונחים

הספק מותקן - ההספק המרבי שמתקן לייצור חשמל יכול להפיק בתנאים אופטימליים.

דירקטיבה אירופית - כלי חקיקה של האיחוד האירופי הקובע מטרות ויעדים שכל המדינות החברות באיחוד חייבות להשיג. עם זאת, כל חברה באיחוד יכולה לקבוע את חוקיה כדי להשיג מטרות אלו.

תוכנית קחו-החזירו - הסדר המחייב משווקים של מוצרים לקבל חזרה מוצרים משומשים מאותו סוג ששווק ובאותה הכמות, בין במעמד הרכישה של מוצר חדש ובין במעמד האספקה של המוצר החדש.

ארגון אחריות יצרן - ארגון האמון על יישום מטרות חוק אחריות יצרן בשם היצרנים והיבואנים של מוצר כלשהו.

תקציר

אחד הכלים העיקריים להתמודדות עם הפחתת פליטות גזי חממה הוא המעבר לשימוש באנרגיות ממקורות מתחדשים על פני השימוש באנרגיות ממקורות פוסיליים, שכרייתם ושריפתם פולטים גזי חממה. השימוש העולמי באנרגיה סולרית, שמקורה בשמש, צומח בשנים האחרונות בקצב מהיר יותר משל כל האנרגיות האחרות ממקורות מתחדשים. נוסף על כך, קצב ההתקנות של מערכות סולריות לייצור חשמל הולך וגדל בשיעור שעולה על כל התחזיות. אמנם תהליך הייצור של

מערכות סולריות לא חף מייצור של פליטות גזי חממה, אך הזמן שבו על מערכת לפעול כדי לקזז פליטות אלו הולך ומתקצר, ועומד כיום על כשנה.

לוח סולרי, הרכיב שמייצר את האנרגיה במערכת סולרית, מתוכנן כך שיפעל במשך 30 שנים ויותר. ואולם, מחקרים ועדויות בשטח מראים שלא כל הלוחות הסולריים ממשיכים להפיק חשמל במשך 30 שנים, אלא מוסרים מוקדם מהצפוי. שילוב שתי מגמות אלו, מצד אחד התקנה בקצב גדל והולך של לוחות, ומצד שני הסרה מוקדמת שלהם, לפני תום זמן החיים המתוכנן, יוצר אתגר הולך ומתרחב של פסולת לוחות סולריים שיש לאסוף ולטפל בהם.

מדינת ישראל קבעה יעד לשיעור אנרגיה ממקורות מתחדשים בתמהיל החשמל שלה, וכדי לעמוד בו מותקנות מערכות סולריות רבות, לצד טכנולוגיות נוספות כמו טורבינות רוח ומתקני ביו-גז. 90% מכלל ההספק המותקן ממקורות מתחדשים במדינת ישראל מקורו במערכות סולריות, שכן מדינת ישראל משופעת בקרינת שמש חזקה ברוב ימות השנה. בסוף שנת 2023 עמד ההספק המותקן הסולרי על כחמישה וחצי ג'יגה וואט, וכדי לעמוד ביעדים לשנת 2030 יש לשלש כמות זו, ואף יותר. אף שמערכות סולריות מותקנות בישראל כבר משנת 2009, הטיפול בפסולת לוחות סולריים אינו מוסדר בישראל ולא קיימת הערכה של כמות הפסולת הצפויה בשנים הקרובות.

למחקר זה שתי מטרות עיקריות: (1) לספק הערכה של כמות הפסולת הצפויה בכל שנה של לוחות סולריים. (2) להמליץ על צעדי מדיניות שיובילו לטיפול הולם בפסולת זו ויתמכו בו. עבור מטרת המחקר הראשונה היה צורך להמיר את ההספק שהותקן בכל שנה ליחידות של מסה. בשל התפתחות הטכנולוגיה, בכל שנה אפשר להפיק הספק חשמלי גבוה יותר מאותה מסה של לוחות סולריים. כמה חברות אנרגיה הפועלות בשוק הישראלי חלקו נתונים על הלוחות שהתקינו בכל שנה, כך שהיה אפשר להעריך כמה טונות של לוחות סולריים ייצרו יחידת הספק אחת.

בהמשך נבחנו מודלים סטטיסטיים להערכת שיעורי הכשל של הלוחות, או במילים אחרות, הערכת שיעור הלוחות שיצאו משימוש בכל שנה. המודל הסטטיסטי שנבחר מבוסס על התפלגות וייבול, המשמשת במחקרים אחרים בנושא הערכת כמויות פסולת של לוחות סולריים ושל מוצרי אלקטרוניקה. שלושה תרחישים מוצעים להערכת כמות הפסולת השנתית והמצטברת לאורך זמן: האחד מעריך את כמות הפסולת על בסיס הירידה הצפויה ביעילות הלוחות בלבד, את השני מציע האיחוד האירופי לחישוב כמות פסולת של לוחות סולריים, והתרחיש השלישי מתחשב, בנוסף על ירידת היעילות ותקלות טכניות אופייניות, גם בסיבות כלכליות להסרת הלוחות.

ההערכות לשנת 2030 מתבססות על ההספק שיש להתקין כדי לעמוד ביעדי הממשלה לשנת 2030, ועל שני תרחישים שהציע משרד האנרגיה במסמך משק דל פחמן 2050, המתאר שתי אפשרויות לשיעור אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל בשנת 2050. אפשרות אחת מניחה 54% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל, ואפשרות שנייה שמניחה 90% אנרגיות מתחדשות. התוצאות שהתקבלו מצביעות על כמות פסולת שנתית ב-2030 שנעה בין 1,375 לבין 12,482 טונות. בשנת 2050 כמות הפסולת השנתית הצפויה עבור 90% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל נעה בין 54,657 לבין 110,882 טונות. עבור 54% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל, כמות הפסולת השנתית בשנת 2050 נעה בין 50,098 לבין 80,958 טונות. כמות הפסולת המצטברת הצפויה עד 2030 נעה בין 5,087 לבין 63,272 טונות. בשנת 2050 כמות הפסולת המצטברת הצפויה עבור 90% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל נעה בין 394,954 לבין 1,185,049 טונות. עבור 54% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל, כמות הפסולת המצטברת נעה בין 378,426 לבין 1,004,286 טונות. כמו כן חושבה כמות הפסולת לפי חומר לשנת 2050 עבור אחד התרחישים, בהתאם לשיעור המרבי של חילוץ החומר בתהליך המחזור.

עבור מטרת המחקר השנייה נסקרו בפרק הראשון טכנולוגיות של לוחות סולריים. הסקירה התמקדה בלוחות סולריים מבוססי סיליקון, מכיוון שלאור שיחות עם מומחים בתעשייה וחברות אנרגיה, הרוב המוחלט של הלוחות הסולריים בישראל מבוססי סיליקון. נוסף על כך נסקרו הרכב הלוחות, טכנולוגיות מחזור, זליגת חומרים מסוכנים במשך השימוש ובתנאים המדמים הטמנה, והכדאיות הכלכלית להקמת מפעל מחזור ללוחות סולריים. בפרק השלישי נסקרו כלי מדיניות שונים המשמשים לטיפול בפסולת, כמו סיווג הפסולת, עקרון "המזהם משלם", אחריות יצרן מורחבת, תכנון ועיצוב מוצר מקיים, טיפול בפסולת במעלה היררכיית הפסולת ואיסור הטמנה. כמו כן נסקרה החקיקה התומכת ומנגנוני התפעול והמימון שנקבעו בה, באיחוד האירופי - גרמניה, צרפת ופולין, וכן בטייוואן, ביפן ובארצות הברית.

עוד נסקרו מנגנוני מימון שונים לטיפול בפסולת לוחות סולריים: מימון בעת הרכישה שעובר לארגון אחריות היצרן במלואו (צרפת); מימון בעת ההפיכה לפסולת - ארגון אחריות היצרן מעביר את שארית הכספים במועד שבו יש לטפל בפסולת (רוב מדינות האיחוד); הבטחת טיפול בלוחות במקרה של הפסקת פעילות באמצעות פוליסת ביטוח (גרמניה); קרן שמועבר אליה סכום מתעריף הייצור לפי כמות האנרגיה שמיוצרת במערכת הסולרית (יפן); או קרן שאליה רוכשי הלוחות מעבירים סכום קבוע לפי הספק המערכת שרכשו (טייוואן).

לאחר הסקירה הבינלאומית, בפרק הרביעי, נסקרה החקיקה הקיימת בישראל וההשפעה של אסדרת לוחות סולריים במסגרת החקיקה הקיימת. בישראל לא קיימת כרגע אסדרה לטיפול בפסולת של לוחות סולריים. בשנת 2012 נחקק בישראל החוק לטיפול סביבתי בצידוד חשמלי ואלקטרוני ובסוללות התשע"ב 2012, אשר ברוח הדירקטיבה האירופית מטיל אחריות יצרן מורחבת על יצרנים ויבואנים לטפל בפסולת של צידוד חשמלי ואלקטרוני ובסוללות. לאורך השנים הופנו שאלות למשרד להגנת הסביבה בנוגע להכללתם או אי-הכללתם של לוחות סולריים במסגרת חוק זה, אך הסוגייה המשפטית האם לוחות סולריים מוכלים או מוחרגים מהחוק לא הוכרעה.

מסקנות המחקר הן שהחוק לטיפול בפסולת אלקטרונית, כפי שהוא כתוב היום, אינו מתאים לצרכים של מערך מיטבי לטיפול בפסולת של לוחות סולריים - לא בהיבט היעדים ולא בהיבט המערך המימוני להבטחת הטיפול בלוחות כשיצאו ממעגל השימוש. הכללת לוחות סולריים בחוק פסולת אלקטרונית תגרום בשנים הקרובות לעלייה לא פרופורציונית ביעדי המחזור של פסולת אלקטרונית. זאת משום שהיקפי הפסולת של לוחות סולריים נמוכים, אך הם משווקים בהיקפים ההולכים וגדלים בקצב מהיר. גופי היישום יצטרכו לאסוף כמות פסולת אלקטרונית גבוהה יותר כדי לעמוד ביעד המחזור. כתוצאה מכך, יאלצו להשתמש בכספים המשולמים עבור הלוחות כדי לאסוף ולמחזר את כמות הפסולת הנוספת, שאינה לוחות סולריים, באופן שיסכן את מימון הטיפול בלוחות במועד שבו יהפכו לפסולת.

לפיכך מוצע לתקן את חוק פסולת אלקטרונית, כך שיתאים לטיפול בפסולת לוחות סולריים. הסוגייה המכרעת היא ייסוד מנגנון מימוני שיבטיח את קיום הכספים בזמן היווצרות הפסולת, בטווח של שניים או שלושה עשורים קדימה. לכן מוצע לייסד קרן ייעודית, בניהול חיצוני, לארגון אחריות יצרן שתנהל ותחלק את הכספים לפי צורכי הטיפול. את הכספים אפשר לאסוף כסכום אחיד במעמד הרכישה או לאורך שנות השימוש הראשונות, כאחוז מתעריף הייצור. עוד מוצע שהאחריות התפעולית תושת על היצרנים, בהגדרתם המורחבת, הכוללת יבואנים, משווקים, נציגים של אתרי מכירה מרחוק או חברות אנרגיה וגופים מטעמן שרוכשים את הלוחות באופן עצמאי ומתקינים אותם בישראל.

נוסף על מסגרת החקיקה, מוצע שהמנגנון התפעולי יהיה באחריות היצרנים והיבואנים, בהגדרתם המורחבת, במסגרת של ארגון אחריות יצרן. מכיוון שלוחות סולריים מחייבים התקנה של מתקין מומחה, מוצע לחייב תוכניות של "קחו-החזירו",

שבמסגרתן על כל מתקין של לוחות לאפשר החזרה של הלוחות שהוסרו. במקום יעדי איסוף מוצע להגדיר סטנדרט שירות, שבמסגרתו כל פנייה לאיסוף לוחות שהוסרו ללא החלפה, תיענה במסגרת זמן סבירה שתיקבע על-ידי הרגולטור. לחלופין, מוצע לקבוע יעדי איסוף כלליים המבוססים על מודל הערכת הפסולת בכל שנה.

עוד מוצע לעודד מנגנונים שיתמכו במניעת פסולת באמצעות תחזוקה; אפשרות השוואה שתאפשר לבחור, במעמד הרכישה, בלוחות עמידים ויעילים יותר; מנגנונים שיתמכו בשימוש חוזר בלוחות באמצעות קביעת תקנים לבדיקה לפני העברה לשימוש חוזר; עידוד חברות בעלות שדות גדולים להעביר את הלוחות המוסרים לשם התייעלות לשימוש חוזר; ועידוד רשויות מקומיות להעביר את הלוחות המוסרים לשימוש חוזר זמני על שטחים שלא מופו לפני כן כמתאימים להתקנת לוחות בשל שינוי ייעוד, שיפוץ ושדרוג, או התקנתם על גבי גגות של בניינים משותפים בשטח הרשות המקומית.

מבוא

הצורך להגביל את ההתחממות הגלובלית למעלה וחצי או שתיים מעל לרמה הממוצעת בעולם טרום המהפכה התעשייתית, מחייב הפחתת פליטות של גזי חממה בכל הסקטורים. סקטור החשמל בשנת 2021 היה המקור ל-29% מכלל הפליטות של גזי חממה (Rivera et al., 2022). כדי להפחית את הפליטות קיים צורך הולך וגובר באנרגיות ממקורות מתחדשים ליצירת חשמל נקי מפליטות בעולם.

השמש היא מקור האנרגיה הסולרית. קיימים שני אופנים להפקת חשמל מקרני השמש: (1) הפקת אנרגיה חשמלית מאנרגיית האור באמצעות האפקט הפוטו-וולטאי. קרני השמש פוגעות בתא פוטו-וולטאי שבמרכזו חומר מוליך למחצה. אנרגיית האור גבוהה דיה ליצור מתח חשמלי במוליך למחצה, וכך נוצר זרם חשמלי. (2) הפקת אנרגיית חום מאנרגיית השמש באמצעות ריכוז קרני השמש. החום מחמם, ברוב המקרים, נוזל שיוצר קיטור המניע טורבינות ליצירת חשמל. רוב המתקנים בעולם ובישראל לייצור חשמל מאנרגיית השמש הם מתקנים המבוססים על לוחות סולריים שבמרכזם תאים פוטו-וולטאים, ולכן המחקר יעסוק בשלב סוף החיים של לוחות אלו. ככלל, במחקר זה, ייצור האנרגיה ממקור סולרי נעשה באמצעות תאים פוטו-וולטאיים.

בעשורים האחרונים, ובעשור האחרון בפרט, קצב ההתקנה של מתקני ייצור אנרגיה סולרית הולך וגדל אקספוננציאלית. בשנים האחרונות, נתח ההספק המותקן של מתקני אנרגיה סולרית מכלל ההספק המותקן בעולם, גבוה יותר וצומח בקצב המהיר ביותר מכל טכנולוגיה אחרת לייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים (IRENA, 2023 [a]), (Ganguly, 2022). בארצות הברית, אנרגיה סולרית הייתה 53% מכלל ההספק המותקן בשנת 2023 ממקורות פוסיליים ומתחדשים כאחד (SEIA, 2023). בישראל, 90% מכלל ההספק המותקן מאנרגיות מתחדשות כיום מקורו באנרגיה סולרית (רשות החשמל DB). כדי לעמוד ביעדי הממשלה ל-2030 - 30% אנרגיות מתחדשות בתמהיל האנרגיה של ישראל, ובהנחה שאין פוטנציאל מספק לייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים אחרים (בן ארי ודולב, 2021) - יש להגדיל את קצב ההתקנות של מערכות סולריות.

הסיבות המרכזיות לגידול בקצב ההתקנות הסולריות הן: (1) התחייבויות מדינות העולם להפחתת פליטות ולהעלאת שיעורי האנרגיה ממקורות מתחדשים בתמהיל החשמל שלהן, (2) התפתחות הטכנולוגיה ועלייה מתמדת ביעילות ייצור האנרגיה מלוחות סולריים, (3) ירידה מתמשכת במחיר לייצור יחידת אנרגיה, כך שכיום ייצור אנרגיה סולרית היא תחרותית ומשתלמת כלכלית לעומת ייצור אנרגיה מקורות אחרים (מקורות פוסיליים ומתחדשים כאחד). בשנת 2022 הייתה עלות

הייצור המשוקללת של אנרגיה פוטו-וולטאית נמוכה ב-29% מעלות הייצור המשוקללת של האנרגיה הזולה ביותר המופקת ממקור פוסילי (IRENA, 2023 [b]).

התפתחות הטכנולוגיה, שיעורי הגידול בהספק המותקן בכל שנה ושיעורי הירידה במחיר של מערכות פוטו-וולטאיות, עולים על המשוער: התחזיות לירידת מחירי הטכנולוגיה הפוטו-וולטאית לעשור השני של המאה ה-21 היו במוצע 2.6% לשנה, אך בפועל ירדו במוצע של 15% בשנה (Way et al., 2022). דוח של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה משנת 2010 (IEA, 2010) העריך שההספק המותקן העולמי בשנת 2020 יעמוד על 200GW, ואולם הספק זה הגיע בסוף 2020 ל-720GW. תחזית הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה מתחדשת (IRENA, 2016), לחצות את גבול ה-1000GW בשנת 2026, התבדתה אף היא, וגבול זה נחצה כבר במהלך 2021 (IRENA, 2023 [a]). בסוף שנת 2023 היה ההספק המותקן בעולם גבוה ב-60% מתחזית זו (Masson, 2024). השימוש ההולך וגובר בלוחות סולריים טומן בחובו את האפשרות לייצר אנרגיה ממקורות מתחדשים, ובכך להפחית את הפליטות שנגרמות משריפת דלקי מאובנים. אך מצד שני, בתום חיי המוצר של הלוחות ייווצרו כמויות הולכות וגדלות של פסולת, ויש מי שמכנה אותן "צונמי של פסולת" (Duran et al., 2022).

משך החיים של מוצר הוא הזמן שבו מוצר מממש את תפקודו, כפי שתוכנן, עד שהוא מפסיק לתפקד באופן שהוגדר בתכנון. עבור לוחות סולריים, משך החיים מוגדר כזמן שבו הלוח מייצר עד 80% מההספק המרבי. זמן זה נע לפי יצרנים שונים בין 25 ל-30 שנים (Kim and Park, 2018), (Jordan and Kurtz, 2013), (Laronde et al., 2013). עם זאת, מחקרים מצאו שישנם גורמים נוספים, מעבר לתפקוד טכני, המשפיעים על סוף השימוש בלוח הסולרי ומקצרים את אורך חייו הצפוי, בהם:

- תקלות בשלבים שונים - תקלות בשלב ה"ינקות" של הלוח (עד 4 שנות פעילות) שעיקרן תקלות ייצור, תקלות בהתקנה או תקלות חשמליות בתיבת המצמת או בחיווט. 2) תקלות בשלב "אמצע החיים" של הלוח (5-11 שנים) שעיקרן שחיקת שכבת החומר למניעת השתקפויות, הצהבה של שכבת ה-EVA, פגיעה בלמינציה, סדקים בלוח הפלסטיק האחורי, סדקים בבידוד של התא. 3) תקלות בשלב מאוחר יותר (12 שנים ומעלה) שעיקרן שברים בזכוכית, בעיות במגעים, מסגרות אלומיניום רופפות, השפעות לחות על התא, סדקים בתא הסולרי והתגברות בשכיחות התקלות מהשלב הקודם (Aghaei et al., 2022), (Jordan et al., 2022), (Libra, 2023), (IRENA, 2016).
 - אטרקטיביות כלכלית להחלפת המערכת, אם בשל העלאת תעריפי ייצור החשמל, אם בשל מדיניות ממשלתית לשדרוג מערכות קיימות והתקנת מערכות חדשות, ואם בשל יעילות גבוהה יותר של לוחות זמינים בשוק (Duran et al., 2022), (Tan et al., 2022), (Curtis et al., 2021 [b]).
 - פגיעה בלוחות במהלך שיפוץ המבנה, הזדמנות להחלפת הלוחות בשל סיבות אחרות כמו שיפוץ הגג והמבנה, החלפת ממירי המתח, שינוי בהתנהגות הצרכנים והתייחסות ללוח סולרי כמוצר צריכה (Mathur et al., 2021), (Jordan et al., 2020).
 - אירועי מזג אוויר קיצוני כמו רוחות עזות, ברד, חשיפה ממושכת לטמפרטורות גבוהות וקרינה אולטרה-סגולית. באזורים מדבריים השפעות מזג האוויר גורמות לדגרדציה מהירה יותר של הלוחות (Elhassene et al., 2024), (Younes et al., 2020), (Kherici et al., 2021).
- מערכות ביתיות ומסחריות רגישות יותר לגניבות ולמקרי ונדליות שבעטיים מחליפים לוחות. כמו כן, אף שבמערכות של שדות גדולים מתגלות יותר בעיות טכניות, הן בדרך כלל מזוהות ומטופלות מהר יותר, כך שמערכות אלו סובלות מירידה קטנה יותר ביעילות בהשוואה למערכות ביתיות (Jordan et al., 2020).

לוח סולרי מתוכנן כך שיפעל כ-30 שנים, תוך עמידה בתנאי סביבה קשים כמו ברד, רוחות, סופות חול וחשיפה לקרינה אולטרה-סגולית ולטמפרטורות קיצוניות. תנאי העמידות הנדרשים במהלך חיי הלוח מצריכים עיצוב מוצר שמהווה קושי בשלב סוף החיים של הלוח. למעט מסגרת האלומיניום החיצונית, קיים קושי לפרק את הלוח ולמחזר את החומרים המרכיבים אותו. טכנולוגיה פוטו-וולטאית קיימת כבר משנות החמישים של המאה העשרים, אך שימוש נרחב בלוחות סולריים החל רק בשנות התשעים, ובמדינות רבות - בעשור הראשון של המאה העשרים ואחת. מאז היקפי השימוש בטכנולוגיה שממשיכה להתפתח רק גדלים, וצפויים להמשיך ולגדול. מכיוון שאורך החיים של לוחות סולריים ארוך, היקפי הפסולת כיום קטנים בהשוואה להיקפי הייצור וההתקנה, ולכן הרגולציה הנוגעת לטיפול בפסולת של לוחות סולריים עדיין מתפתחת ונמצאת בראשית דרכה.

מדיניות טיפול בפסולת

כדי לטפל בצורה מיטבית בפסולת, מדינות מפעילות מערך שלם של כלי מדיניות התומכים בכל שלבי הניהול והטיפול בפסולת. פירמידת הטיפול בפסולת מציבה מדרג לאפשרויות הטיפול, החל במניעה ובהפחתת שימוש במקור, הן בהיבט הצריכה והן בהיבט עיצוב המוצר והפחתה בחומרים בשלב הייצור, דרך שימוש חוזר, מחזור והשבה, וכלה בהטמנה. כל שלב במדרג מצריך רגולציה תומכת המאפשרת השפעה בשלבי תכנון המוצר, הייצור והאריזה, השינוע, השימוש, ניהול הפסולת: איסוף ומיון, וטיפול בפסולת: השמשה מחדש, מחזור רכיבים ומחזור חומרים, השבה וטמנה.

קיימות כמה דוגמאות למדינות שקבעו רגולציה לטיפול בפסולת של לוחות סולריים. מדינות האיחוד האירופי היו הראשונות שגיבשו כלים רגולטוריים לטיפול בפסולת זו: באמצעות חקיקה שקבעה מנגנונים לטיפול בפסולת. עם התגברות קצב ההתקנות של לוחות סולריים החילו מדינות נוספות בעולם פתרונות שונים, הן בהיבט מימון הטיפול והן בהיבט האחריות לטיפול בפסולת זו. בישראל אין הסדרה של הטיפול בפסולת של לוחות סולריים, וגם אין כל הערכה בדבר כמויות הפסולת הצפויות. כמו בעולם, גם בישראל, היקפי הפסולת של לוחות סולריים קטנים כיום, אך צפויים לגדול בקצב העוקב ואף עולה על קצב התקנת הלוחות. ללא התייחסות רגולטורית לאופן הטיפול בפסולת זו, כמויות הפסולת צפויות להיערם ולהוות מפגע לסביבה. הערכה של כמויות הפסולת הצפויות תאפשר למחוקקים ולמקבלי ההחלטות להתוות ולפתח מדיניות ורגולציה מתאימות לטיפול בפסולת זו.

לפיכך, מטרות המחקר הן:

1. להעריך את כמויות הפסולת הצפויות בישראל של לוחות סולריים בכל שנה ובמצטבר עד 2050.
2. לזהות את כלי המדיניות הרגולטוריים והכלכליים שיקדמו ניהול וטיפול מיטבי ומקיים בפסולת של לוחות סולריים בישראל, לנוכח כמויות הפסולת הצפויות.

הפרק הראשון יציג את הטכנולוגיות המרכזיות הקיימות לייצור ולמחזור של לוחות סולריים, את השלכות אי-הטיפול בפסולת ואת הכדאיות הכלכלית של תהליך המחזור. הפרק השני יציע הערכה של כמות הפסולת הצפויה מדי שנה ובמצטבר עד שנת 2050, בהתבסס על שני משתנים. המשתנה הראשון הוא ההספק המותקן עד כה בטכנולוגיה סולרית וההספק המותקן העתידי לפי יעדי הממשלה ל-2030, ולפי שני תרחישים שונים שהציג משרד האנרגיה לשנת 2050. המשתנה השני מבוסס על מתודולוגיה סטטיסטית מקובלת להערכת שיעור השרידות של מוצרי אלקטרוניקה כפונקציה של הזמן. הפרק השלישי יסקור מגוון של כלי מדיניות שהוטמעו במדינות שונות כדי לבסס ולהטמיע מודל טיפול בפסולת של לוחות סולריים - הן בהיבט

מנגנוני האחריות והן בהיבט מנגנוני המימון ומנגנוני התפעול. הפרק הרביעי יעסוק בחקיקה הקיימת בישראל, בהשפעה של אסדרת לוחות סולריים במסגרת החקיקה הקיימת, ובחקיקת משנה שבמסגרתה אפשר לקדם חובת העברה למחזור של לוחות סולריים. בפרק החמישי יתקיים דיון, יוסקו מסקנות וינתנו המלצות למדיניות המתאימה למדינת ישראל בהתחשב בהערכת הפסולת ובתשתית החוקית הקיימת.

1. לוחות סולריים – טכנולוגיות ייצור ומחזור

1.1 טכנולוגיות של לוחות סולריים

אנרגיה חשמלית מופקת מאנרגיית אור באמצעות האפקט הפוטו-וולטאי - "פוטו" מלשון אור, "וולטאי" מלשון וולט, יחידת מתח. קרני השמש פוגעות בתא פוטו-וולטאי שבמרכזו חומר מוליך למחצה. רמת המוליכות החשמלית של מוליך למחצה קטנה מזו של חומרים מוליכים וגדולה מזו של מבודדים, והיא מושפעת מחשיפה לאור, משינויי טמפרטורה, מפגמים במבנה הגבישי, משדה חשמלי ועוד. שינויים בגורמים אלו מאפשרים לכוון את רמת המוליכות של המוליכים למחצה, על-פי הצורך. אנרגיית האור בקרני השמש גבוהה מספיק ליצור מתח חשמלי במוליך למחצה, וכך נוצר זרם חשמלי. קיימות טכנולוגיות שונות לייצור תאים סולריים המבוססים על מוליכים למחצה שונים. בפרק זה יובאו שלוש טכנולוגיות מבוססות חומרים שונים: סיליקון, גבישים שנוצרו משילוב יסודות מטורים שלוש וחמש או שתיים ושש בטבלה המחזורית, ופרובסקייט. מידע מפורט על טכנולוגיות אלו ונוספות אפשר למצוא בספר של Reinders ואח' Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications (2017).

הרוב המכריע של התאים הסולריים מיוצרים כיום מסיליקון, כחומר המוליך למחצה. בשנת 2022 יוצרו 96% מכלל התאים הסולריים מסיליקון בטכנולוגיות שונות (NREL, 2023 [a]). נתון זה אינו מפתיע שכן סיליקון הוא היסוד השני הנפוץ ביותר בקרום כדור הארץ (Yaroshevsky, 2006), הוא אינו רעיל, יעיל בהמרת אנרגיית אור לחשמל, עמיד ולא יקר (Reinders, 2017). נוסף על כך, תעשיית התאים הסולריים על בסיס סיליקון מבוססת היטב הן מבחינת מחקר, ידע ופיתוח, הן מבחינת שרשראות האספקה, מפעלי ייצור בהיקפים נרחבים ותשתיות מקצועיות. התא הסולרי המסחרי הראשון יוצר מסיליקון בשנת 1954 ויעילותו עמדה על 6%. כיום יעילות התאים הסולריים מבוססי הסיליקון מתקרבת לגבול היעילות התאורטי שלהם - 29.43% (Richter, 2013). היעילות המרבית כיום עומדת על 27.6% (NREL, 2023 [a]).

טכנולוגיה נוספת לייצור תאים סולריים היא טכנולוגיית סרט דק (thin film), שבה המוליכים למחצה הם גבישים המורכבים מכמה חומרים. המוליכים למחצה המובילים בטכנולוגיה זו הם קדמיום טלור CdTe, גליום ארסניק GaAs או נחושת אינדיום גליום סלניום CIGS. לצד יתרונות הטכנולוגיה, המאפשרת יישומים גמישים וקלים של לוחות בהשוואה ללוחות מבוססי סיליקון, קיימים גם כמה חסרונות, בעיקר בנוגע לרעילות המתכות ולהבטחת שרשרת אספקה יציבה לאורך זמן. המוליך למחצה בלוחות אלו עשוי מחומרים נדירים כמו אינדיום וטלור, או מחומרים בעלי רעילות גבוהה כמו קדמיום. מחקרים צפו שנתח השוק של לוחות סרט דק יגדל במידה משמעותית, אך הציפיות התבדו ונתח השוק העולמי של לוחות אלו עמד בשנת 2022 על כ-4% (NREL, 2023 [a]), (SolarGeneration, 2011), (Zimmermann, 2013), (Paiano, 2015).

בחמש-עשרה השנים האחרונות מפותחת טכנולוגיה מבטיחה לייצור תא סולרי מפרובסקייט (קלציום טיטנאט). חומר זה מאפשר לכוון את הפער האנרגטי של התא הסולרי (האנרגיה הדרושה כדי שמוליך למחצה יוליך). יכולת הכוון

מאפשרת להשתמש בתאים אלו במקביל (Tandem cell), זה מעל זה, כך שאורך גל אחד יפעיל את תא הפרובסקייט, ואורך גל אחר יפעיל תא אחר מסיליקון או פרובסקייט בעל פער אנרגטי שונה. מבנה מקבילי כזה מעלה את היעילות של לוח סולרי באותם תנאי שטח. יעילות התאים מפרובסקייט במגמת עלייה מתמדת: מ-3.8% בשנת 2009 ל-26.1% בשנת 2023 (NREL, 2023 [b]), (Kojima et al., 2009). התחזית לשימוש בתאים אלו במקביל לתאי סיליקון צופה יעילות של מעל 40% ללוח סולרי.

יתרון נוסף לתאים מסוג זה הוא הנגישות והעלות של שרשרת הייצור (Roy et al., 2022). שיטות הייצור של התאים מפרובסקייט הן שיטות תעשייתיות מוכרות וניתן להקים את התעשייה בקלות יחסית לתעשיית התאים מבוססי סיליקון (Reinders et al., 2017). ייצור פרובסקייט פשוט יותר מבחינה טכנולוגית, ודורש השקעה נמוכה של אנרגיה יחסית לייצור סיליקון. את המוליך למחצה ניתן לייצר כתמיסה וליישם אותו בטכנולוגיות ציפוי, התזה או הדפסה מוכרות ושכיחות בתעשייה (Rahmany and Etgar, 2020). שיטות של התזה מאפשרות יישום על אלמנטים דקים וקלי משקל, וכן שימור של שקיפות מסוימת של התא הסולרי - דבר המאפשר מעבר אור ויישומי דו-שימוש בחקלאות, באלמנטים אדריכליים ועוד (Roy et al., 2022).

1.2 מחזור של לוחות סולריים

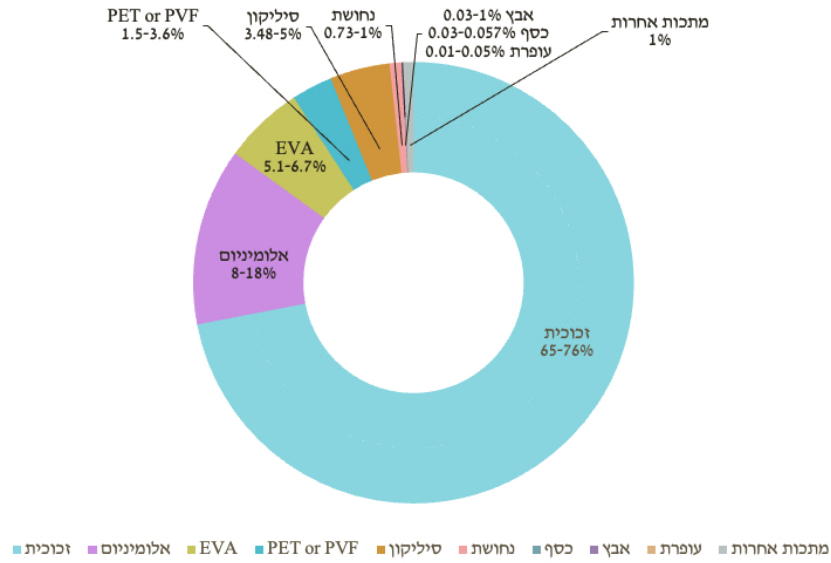
1.2.1 מבנה מערכת סולרית

מערכות סולריות הכוללות לוח יחיד נדירות מאד, ואפשר למצוא אותן באזורים מנותקי רשת או על עמודי תאורה, שילוט ותחנות אוטובוסים. רוב המערכות הסולריות כוללות כמה לוחות. בצדו האחורי של הלוח מותקנת תיבת חיבורים, ודרכה עובר הזרם אל ממיר מתח. בחלק מהמערכות ממיר מתח מחובר לכמה לוחות, ובמערכות אחרות, מתקדמות יותר לכל לוח מחובר ממיר מתח קטן. ממיר המתח הופך את הזרם הישר שהלוח מייצר לזרם חילופין, שכן הזרם במערכת החשמל הארצית הוא זרם חילופין. ממיר המתח מחובר למונה חשמל נפרד או למונה דו-כיווני, כך שחברת החשמל תוכל לחשב את כמות האנרגיה שהוזרמה לרשת החשמל, וגם את כמות האנרגיה שנצרכה מהרשת. הלוחות מעוגנים לגג או לקרקע באמצעות קונסטרוקציית מתכת.

1.2.2 הרכב לוח סולרי מבוסס סיליקון

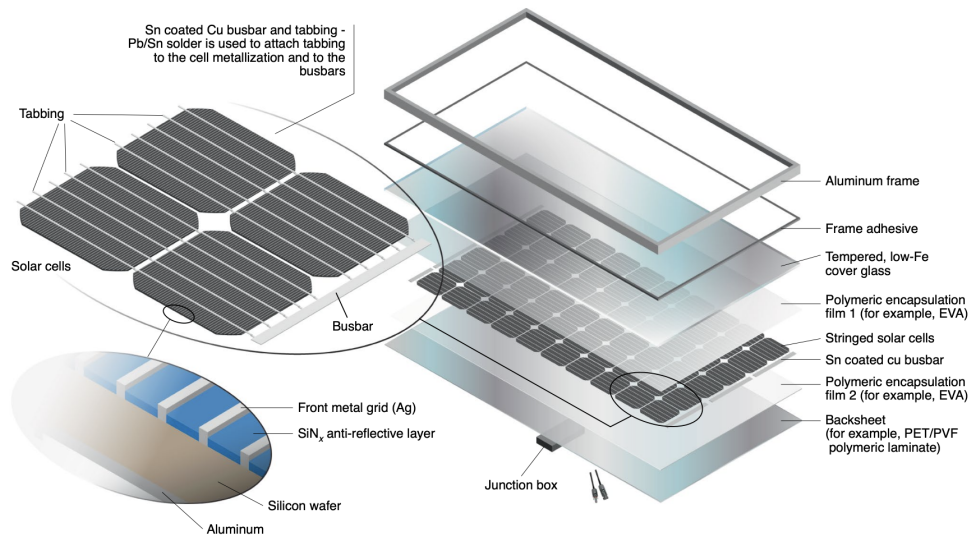
בישראל, הרוב המוחלט של הלוחות הסולריים מבוססים על סיליקון, ולכן הרכב החומרים וסקירת טכנולוגיות המחזור תיעשה עבור לוחות מסוג זה. לוח סולרי מבוסס סיליקון מורכב מכמה שכבות. השכבה המרכזית היא רשת של תאים סולריים שעטופים בשכבת ביניים של למינציה פולימרית שקופה ואטימה, עשויה אתילן ויניל אצטט (EVA). בשכבה החיצונית ממוקם לוח זכוכית עליון, ומהצד השני לוח פלסטיק או לוח זכוכית נוסף עבור לוחות דו-צדדיים (Bifacial). את מארג השכבות סוגרת, לרוב, מסגרת אלומיניום שדרכה מתבצע החיבור למערכת העגינה בגג או על הקרקע. רשת התאים מורכבת מסיליקון, שכבות דקות מאוד של תחמוצות שקופות המפחיתות איבודי אור, מגעי כסף, הלחמי עופרת, חיווט פנימי בין התאים באמצעות פסי צבירה של בדיל מצופה נחושת וחיווט חיצוני באמצעות כבלי נחושת (Heath et al., 2020), (Reinders et al., 2017).

תרשים 1. הרכב חומרים אופייני של לוח מבוסס סיליקון monocrystalline-Si לפי מסה



נתונים: Deng et al., 2022; Cui et al., 2022; IRENA, 2016; Latunussa et al., 2016; Corcelli et al., 2018; IEA, 2022.

תרשים 2. מבנה של לוח סולרי מבוסס סיליקון



מקור: Heath et al., 2020. Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy

1.2.3 השלכות של אי-טיפול בפסולת לוחות סולריים על בריאות האדם והסביבה

לוחות סולריים מבוססי סיליקון מכילים כמות מועטה של מתכות בעלות השפעה שלילית על הסביבה ועל בריאות האדם, שיכולות לזלוג לסביבה אם הפסולת של לוחות סולריים אינה מטופלת אלא מושלכת בסביבה או מוטמנת. עם זאת, לאורך השנים חלה ירידה מתמשכת בכמויות העופרת, ומגמה זו צפויה להתרחב: נתח השוק של לוחות מבוססי סיליקון ללא הלחמי עופרת היה 5%, והוא צפוי לגדול ולעמוד על 30% בשנת 2033, כך שהסיכון ילך ויפחת (ITRPV, 2023).

Sinha ואח' (2019) ניתחו את הפוטנציאל להשפעה על בריאות האדם של זליגת עופרת מלוחות סולריים מבוססי סיליקון שלוח הזכוכית שלהם נשבר. הניתוח כימת את השפעת העופרת בשלושה תרחישים שונים: כאשר הלוחות מותקנים על גג של בניין מגורים, על גג של מבנה מסחרי ובמתחם של שדה סולרי קרקעי. נמצא שריכוזי העופרת שכומתו עבור הקרקע, האוויר ומי התהום בסביבת הלוחות הייתה נמוכה בכמה סדרי גודל מהסף שהציב המשרד להגנת הסביבה האמריקאי. מחקר המשך בחן השפעה של זליגת עופרת מלוחות מבוססי סיליקון המושלכים למטמנה על ריכוזם במים, באוויר, בקרקע ובמי התהום. גם במחקר זה ריכוזי העופרת שכומתו היו נמוכים מהסף (Sinha et al., 2020).

Kilago ואח' (2022) בדקו זליגה של כמה מתכות מלוחות מבוססי סיליקון שבורים, בתנאים שונים המדמים השלכה של לוחות למטמנה. הזליגה נבדקה באמצעות פרוטוקול Toxicity Characteristic Leaching Procedure - TCLP ובאמצעות כמות החומר שנותרה בשברי הלוחות בתנאים של השלכה עם פסולת עירונית מעורבת. פרוטוקול TCLP משמש את הסוכנות האמריקאית לסביבה לקביעת הסיכון של חומרים המוגדרים מסוכנים לפי שיעור הזליגה שלהם בתנאים המדמים תנאי מטמנות.¹ בחלק מהדגימות היו הכמויות שזלגו בפועל גבוהות יותר מהכמויות שחושבו באמצעות פרוטוקול הבדיקה. מכלל המתכות שנבדקו, נמצאו עופרת מעל הגבול המותר בפרוטוקול ואבץ בשלושה סדרי גודל מתחת לגבול המותר. לא התגלו שאריות חומרים מסוכנים אחרים כמו ארסן, נחושת, ניקל וקובלט. בחלק מהדגימות שעורבבו עם פסולת עירונית הפרוטוקול לא גילה זליגה, אף שהבדיקה שבחנה את כמות החומר הנותר בשברי הלוחות זיהתה זליגה מסוימת של עופרת.

Xu ואח' 2018 מזהים את זליגת העופרת כבעיה הסביבתית הראשונה במעלה הכרוכה בהשלכה של לוחות סולריים מבוססי סיליקון. מחקרים נוספים זיהו זליגה של חומרים נוספים מלבד עופרת, כמו סיליקון, ניקל, אלומיניום, כרום ונחושת (Tammaro et al., 2016), (Kwak et al., 2021), (Sharma et al., 2021), (Panthi et al., 2021), (Brown et al., 2018), (Nain and Kumar, 2020), (al., 2021). בדיקות להערכת השפעת הרעילות של חומרים אלו על מיני צמחים ואורגניזמים שונים העלו שקיימת השפעה לרעה במדדים שונים, הן על צמחים והן על אורגניזמים ימיים (Kwak et al., 2021), (Tammaro et al., 2016), ולעופרת יש השפעה שלילית על בריאות האדם (Kumar et al., 2020). לפיכך יש חשיבות לטיפול הולם בפסולת של לוחות סולריים, כך שלא יושלכו לסביבה.

1.2.4 מחזור לוח סולרי

לוחות סולריים הם מוצרים עמידים מאוד, שתוכננו לפעול לאורך שלושה עשורים לפחות. המבנה שלהם לא כולל אפשרות של פתיחה לצורך פעולות תיקון או תחזוקה, כך שפעולת המחזור בטכנולוגיות הקיימות מצריכות הריסה של הלוח כולו. קיימות שתי גישות לאופי המחזור של לוחות סולריים. גישה אחת נקראת bulk recycling ומתמקדת בטיפול ברכיבי המסה העיקריים: זכוכית, אלומיניום ונחושת. הגישה השנייה, high-value recycling, מתמקדת בחילוץ חומרים בעלי

¹ <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-261/subpart-C/section-261.24>

ערך כלכלי גבוה כמו סיליקון, כסף ומתכות יקרות נוספות (Tsanakas et al., 2020). רוב מפעלי המחזור ללוחות סולריים בעולם פועלים בגישה הראשונה, ורק מפעלים בודדים מחלצים גם חומרים בעלי ערך כלכלי גבוה וחשיבות סביבתית גבוהה (Curtis et al., 2021 [b]).

השלב הראשון בכל תהליך מחזור כולל את הפירוק של תיבת החיבורים, כבלי הנחושת ומסגרת האלומיניום. שאר שלבי המחזור נעשים באמצעים מכניים, תרמיים או כימיים (Deng et al., 2022), (Farrell et al., 2020), (Corcelli et al., 2018). עיקר הקושי בתהליך המחזור הוא הסרת המעטפת הפולימרית, ניתוקה מהזכוכית מצד אחד ומהתאים הסולריים מהצד השני. כאשר המעטפת הפולימרית מוסרת, אפשר למחזר את שאר הרכיבים (Farrell et al., 2020), (Latunussa et al., 2016), (Schnatmann et al., 2022).

תהליך מחזור מכני של הלוח מטפל ברכיבי המסה העיקריים שלו באמצעות פעולות גריסה, ריסוק או כרסום בשיטות שונות. גריסה, ריסוק וכרסום באמצעים מכניים (סכינים, דיסקיות חיתוך או פטישים) נפוצים ביישומים תעשייתיים. לאחר הגריסה, השברים ממוינים לפי חומרים בשיטות שונות. מחזור בשיטות אלו נפוץ וזול יחסית, אך תוצרי המחזור הם שברים מעורבים באחוז טהורות וערך כלכלי נמוך (Polverini et al., 2024), (Preet and Smith, 2024), (Farrell et al., 2020). שיטה נוספת של מחזור מכני שנמצאת בשימוש בסדר גודל תעשייתי היא שיטת "סכין חם". שיטה זו מאפשרת הסרה של לוח הזכוכית כולו ביחידה אחת (Komoto, 2018), (Latunussa et al., 2016). להב בטמפרטורה של 200 מעלות צלזיוס מפריד בין הזכוכית לבין מעטפת ה-EVA ושאר מרכיבי הלוח (Deng et al., 2022). הזכוכית מופרדת לשימוש חוזר או אחר, ושאר השכבות מועברות לטיפול נוסף.

מחקרים ומפעלי הדגמה מציעים תהליכי גריסה והפרדה מכנית באמצעים נוספים, כמו ניפוץ באמצעות פעימות של מתח גבוה (Song et al., 2020) או באמצעות קרן לייזר המוקרנת על שכבת ה-EVA ומאפשרת את קילופה בלי לפגוע בשכבת התאים הסולריים (Li et al., 2022). ניפוץ באמצעות פעימות מתח גבוה יוצר שברי מתכות בגודל של פחות ממ"מ אחד ושברי זכוכית בגודל 2-5 מ"מ. החומרים הקשיחים כמו זכוכית, סיליקון ומתכות מתנפצים בהשקעת אנרגיה נמוכה יותר מאשר חומרים גמישים כמו EVA והלוח הפולימרי האחורי, המצריכים אנרגיה רבה יותר. בשיטה זו אפשר להפריד בין החומרים השונים בדרגת הפרדה טובה באמצעים מכניים בלבד.

מחזור באמצעים תרמיים מצריך הפעלה של חום לצורך הסרה של מעטפת ה-EVA. פירולזה - תהליך פירוק של חומרים בטמפרטורות גבוהות (400-500 מעלות צלזיוס) ללא נוכחות חמצן, הוא תהליך שבאמצעותו אפשר להסיר את מעטפת ה-EVA מהזכוכית מצד אחד ומשכבת התאים הסולריים מצד שני. מעבר להשקעת אנרגיה רבה בתהליך, חיסרון נוסף הוא יצירה של אדים רעילים (Preet and Smith, 2024), (Riech, 2021). לרוב, תהליך זה ישלים את הטיפול בתוצרי גריסה באמצעים מכניים והפרדתם, ולעתים ישמש כטיפול מקדים לתהליך כימי (Pagnanelli et al., 2017).

טיפול משלים נוסף לתוצרי גריסה הוא שימוש באמצעים כימיים לצורך הסרת המעטפת הפולימרית וחילוץ סיליקון ומתכות כמו כסף ונחושת (Farrell et al., 2020). תהליכים אלו יערבו, בדרך כלל, חומצות וממסים אורגניים או אנ-אורגניים וזרזים שונים לקיצור זמן התגובה, שעלול להגיע גם לכמה ימים (Deng et al., 2019). אף שאפשר להשיב מתכות באחוזים גבוהים באמצעות טיפול כימי, עלות תהליכים אלו גבוהה בהשוואה למחזור באמצעים מכניים, ולכן קיימת היתכנות כלכלית רק אם הערך של החומר המושב גבוה (Padoan et al., 2019). נוסף על כך, חלק מתוצרי הלוואי של תהליכים כימיים אלו הם רעילים ודורשים טיפול בפסולת שנוצרה (Farrell et al., 2020).

בשל היקפי הפסולת הנמוכים יחסית עד כה ברחבי העולם, מחזור לוח סולרי מבוסס סיליקון מבוצע כיום בעיקר במפעלים שתוכננו למחזור זכוכית או מתכת, וחלקו במפעלים ייעודיים בודדים למחזור לוחות סולריים. עלויות השינוע אליהם גבוהות בשל המרחק (ברוב מדינות אירופה אין מפעל ייעודי כזה). תהליכי המחזור בהיקפים תעשייתיים הם תהליכים מכניים, ותוצרי המחזור הם באיכות נמוכה בהשוואה לחומרים המרכיבים את הלוחות. הזכוכית המתקבלת לאחר טיפול מכני אינה מאפשרת על-פי רוב חזרה לשימוש בתעשיית הלוחות הסולריים, אלא לשימושים אחרים כמו קצפי זכוכית ופיברגלס לתעשיית הבניין. איכות הזכוכית נפגמת כאשר הלוח עובר תהליכי גריסה - שברי הזכוכית מכילים גם שאריות מתכת, כך שעיבוד מחדש יוביל לזכוכית באיכות נמוכה יותר (Tsanakas et al., 2020). כמו כן, הזכוכית ללוחות שמיוצרים בסין ובארצות נוספות במזרח היא זכוכית לא חלקה עם דוגמה, לשם קליטה טובה יותר של קרני האור, וזכוכית זו מכילה אנטימון (Sb). לפי דוח של תעשיית הלוחות הסולריים באירופה, 95% מהלוחות בשוק האירופי בנויים מזכוכית זו. זכוכית המכילה אנטימון משנה את צבעה במהלך החימום מחדש בתנור ההתכה, כך שאינה מתאימה לשימושי זכוכית שקופה (ESIA, 2023).

1.2.5 מחזור של לוחות סולריים – מבט צופה פני עתיד

לנוכח ההכרה כי הקושי העיקרי בתהליך המחזור הוא הפרדת החומרים מהמעטפת הפולימרית המשמשת כדבק בין שכבות הלוח ומבודדת את התאים מנזקי לחות, לכלוך וחמצון, מחקרים חדשים מציעים לתכנן ולבנות לוחות סולריים בצורה שונה, כך שיהיה קל יותר לפרק ולמחזר אותם או שערך תוצרי המחזור יהיה גבוה יותר. Young ואח' (2024) מציעים להלחים שני לוחות זכוכית באמצעות לייזר אולטרסוני, כך שמערך התאים הסולריים, המגעים והכבלים ישהו בתווך בין הלוחות המולחמים. מבנה כזה מפשט את תהליך המחזור, כך שעם שבירת הזכוכית אפשר למחזר אותה וגם את שכבת התאים הפנימית. מבנה נוסף שפותח על-ידי ITRI - מרכז המחקר לטכנולוגיה בטייוואן - בשיתוף עם יצרן לוחות מקומי, עושה שימוש במעטפת פולימרית כפולה. המעטפת הפנימית, שעוטפת את התאים הסולריים, עשויה מאלסטומר תרמו-פלסטי, והמעטפת החיצונית עשויה מהפולימר התרמוסטי הסטנדרטי בתעשייה - ה-EVA. החומר התרמו-פלסטי מאפשר הסרה של תאים שלמים לאחר תהליך פירולוזה, בשונה משברי תאים המתקבלים כאשר המעטפת עשויה כולה מ-EVA. בתאים אלו אפשר לעשות שימוש מחדש בלי לייצר מחדש מטיל סיליקון.

מבנים אלו ואחרים בפיתוח מגדילים לא רק את שיעור החומר הניתן למחזור, אלא גם את אחוז הטהורות של תוצרי המחזור, תוך הקטנה של האנרגיה הדרושה לתהליך. לוחות אלו יגיעו למחזור בעוד כמה עשורים, ועד אז יש צורך לפתח טכנולוגיות מחזור מתאימות למבנה הלוח הסטנדרטי ששווק בשלושת העשורים האחרונים. עם הגידול בהיקפי הפסולת, תהליכים שאינם כלכליים היום עשויים להבשיל לשימוש מסחרי (Rubino et al., 2020). לוחות מבוססי פרובסקייט מראים היתכנות לתהליך מחזור פשוט יותר. Schneider ואח' (2020) מציעים מבנה עבור תא סולרי מפרובסקייט, המאפשר שטיפה של התאים כשהלוח הופך לפסולת, ויישום מחדש לאחר חימום קצר.

1.2.6 כדאיות כלכלית של מחזור לוחות סולריים

מחזור לוחות סולריים, לכשעצמו, אינו כדאי כלכלית כיום (Deng et al., 2019), (D'Adamo et al., 2017), (D'Adamo et al., 2023). Choi ו-Fthnenakis (2014) מצאו שמפעל מחזור ללוחות סולריים יהיה כלכלי אם היקף הפסולת השנתי יהיה לכל הפחות 19,000 טונות. D'Adamo ואח' (2023) בחנו תרחישים שונים עבור מפעל בהיקף של 3,000 טונות פסולת בשנה. רווחיות המפעל נבדקה עבור תשעה תרחישים שמורכבים משלושה אלמנטים: תשלום היטל הטמנה, עלויות

הקמה ותפעול והכנסות מתוצרי המחזור. ללא היטל הטמנה, המפעל אינו רווחי. עם היטל הטמנה של 200 אירו לטונה, רק 37% מהתרחישים חוצים את סף הרווחיות. היטל הטמנה של 350 אירו לטונה עבור פסולת לוחות סולריים גורם ל-87% מהתרחישים להציג רווחיות עבור מפעל המחזור.

Rubino ואח' (2020) השוו בין שני תרחישים למפעל שממחזר גם את התאים הסולריים ומחלץ את המתכות היקרות מתוכו. תרחיש טיפול בהיקף של 3,000 טונות לשנה אינו רווחי, אך מפעל בהיקף 30,000 טונות לשנה רווחי. Faircloth ואח' (2019) השווה שני מפעלי מחזור בהיקף של 8,000 טונות לשנה בתאילנד. מפעל מחזור זכוכית המטפל בפסולת לוחות סולריים, ומפעל ייעודי לפסולת לוחות סולריים שמחלץ גם מתכות יקרות. שני המפעלים לא הראו כדאיות כלכלית, אם כי מפעל ייעודי ללוחות סולריים מציג הכנסות גבוהות יותר. בחינה של עלויות מחזור בארצות הברית העלתה שעלות המחזור של לוח סולרי נעה בין 15 ל-45 דולר, בתלות במרחקי השינוע, סוג הלוח ומצבו, בעוד עלות ההטמנה נעה בין דולר אחד ללוח שאינו מכיל חומרים מסוכנים ל-5 דולר ללוח המכיל חומרים מסוכנים (Curtis, 2021 [b]). ממצאים אלו מחזקים את הגישה שיש להתערב רגולטורית בשוק הטיפול בפסולת לוחות סולריים, מכיוון שאין רווח כלכלי בהקמה ובהפעלה של מתקני קצה לטיפול בפסולת זו כיום.

2. הערכת כמויות פסולת לוחות סולריים בישראל

כדי להעריך את גודל האתגר שעמו תתמודד מדינת ישראל ולבחון את כלי המדיניות המתאימים ביותר לתת מענה לאתגר זה, הכרחי להעריך את היקף הבעיה. לצורך כך, כומת ההספק המותקן כיום, והוערך ההספק שיתקן עד 2050. בהמשך הומר ההספק ליחידות של מסה, כיוון שפסולת נמדדת ביחידות מסה. מקדם ההמרה בין מסה להספק, לכל שנה, חושב על פי נתונים שהתקבלו מחברות אנרגיה סולרית בשוק הישראלי. מקדם המרה זה חושב לכל שנה עד לשנת 2050 בהתחשב בהתקדמות הטכנולוגיה כך שעם הזמן אפשר להפיק יותר יחידות הספק מאותה יחידת מסת לוח. באמצעות שימוש במודל סטטיסטי נבנו שלשה תרחישים שמספקים הערכה לכמות הפסולת השנתית והמצטברת עד 2050.

2.1 הספק מותקן בישראל

2.1.1 הספק מותקן בפועל ותחזית הספק מותקן עד 2050

בשנת 2008 קבעה הרשות לשירותים ציבוריים חשמל, כיום רשות החשמל, את ההסדרה הראשונה לייצור חשמל מבזר לצריכה עצמית והעברתו לרשת. הסדרה זו הייתה שריקת הפתיחה להתקנות מערכות פוטו-וולטאיות מגגות פרטיים ועד לשדות גדולים (רשות החשמל DB, 2008). בשנת 2009 הותקנו כ-71MW ובשנת 2023 כ-881MW. סך ההספק המותקן מטכנולוגיה פוטו-וולטאית עד סוף אפריל 2024 עומד על 5,513MW, שהם כ-90% מסך האנרגיות המתחדשות ברשת הישראלית (רשות החשמל דש).²

החלטת ממשלה 465³ משנת 2020 לקידום אנרגיה מתחדשת במשק החשמל קבעה יעד של 30% ייצור חשמל מאנרגיות מתחדשות עד שנת 2030. כדי לעמוד ביעד זה, ההספק המותקן ממקורות סולריים הדרוש הוא 17.145GW (בן ארי ודולב,

² דשבורד - רשות החשמל

³ החלטת ממשלה 465, "קידום אנרגיה מתחדשת במשק החשמל" https://www.gov.il/he/pages/dec465_2020

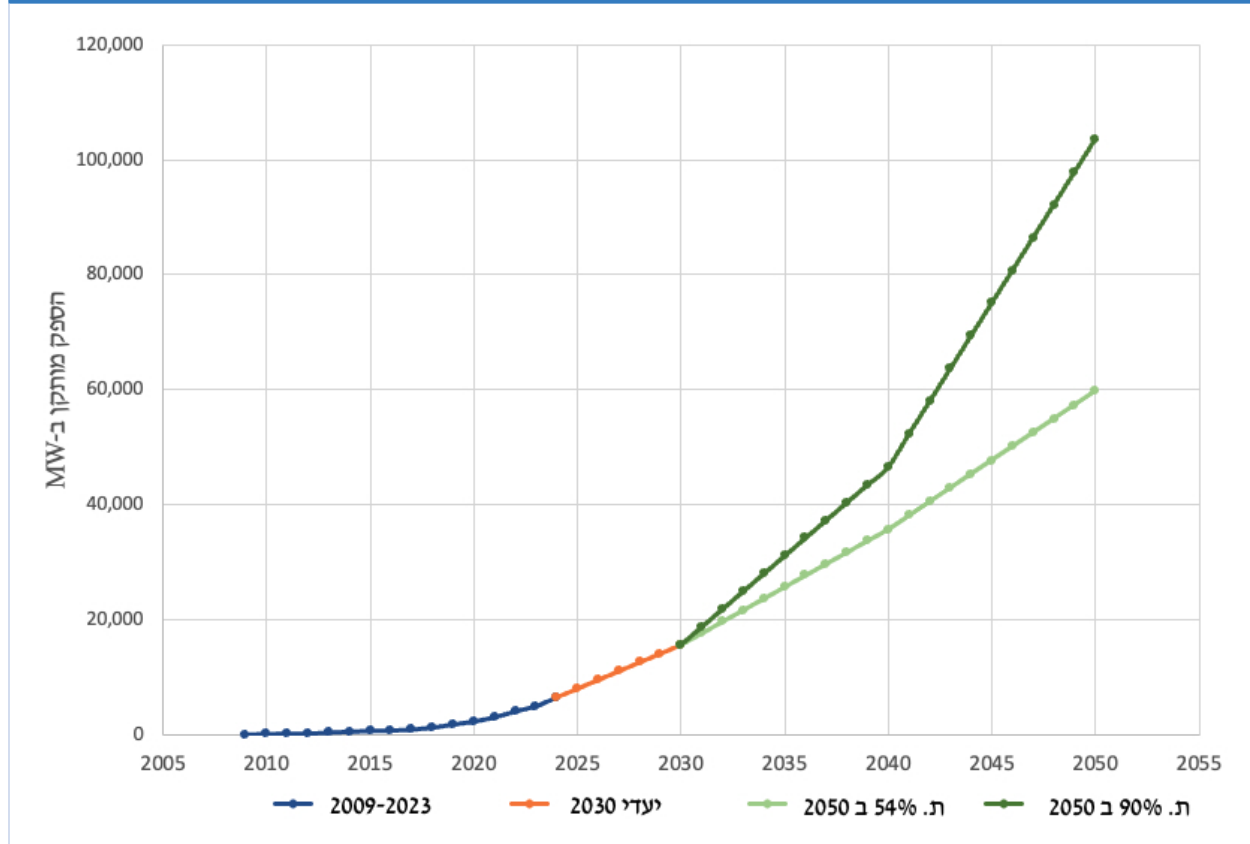
2022). המשמעות היא התקנה של 11.6GW נוספים בשבע השנים הבאות, כלומר כ-1.66GW בממוצע בכל שנה. במפת הדרכים למשק דל פחמן לשנת 2050 (בן ארי ודולב, 2021) מוצגים שלושה תרחישים לתמהיל מקורות האנרגיה במשק החשמל: עסקים כרגיל, טכנולוגיות חדשות, ואנרגיות מתחדשות. תרחיש "עסקים כרגיל" מניח שיעור של 17% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל, תרחיש "טכנולוגיות חדשות" משלב 54% אנרגיה מתחדשת בתמהיל החשמל, ותרחיש "אנרגיות מתחדשות" מניח ש 90% מהאנרגיה בתמהיל החשמל ייוצר ממקורות מתחדשים. בתרשים 3 מוצגים היקפי התקנת ההספק הסולרי לפי תרחיש ושנה, בהתאם לתרחישי משרד האנרגיה.

תרשים 3. תרחישי תמהיל מקורות האנרגיה במשק החשמל ותוספת ההספק הדרושה לעמידה בתרחישים. לפי מסמך מפת הדרכים למשק דל פחמן 2050. (בן ארי ודולב, 2021).

שנה / תרחיש	עסקים כרגיל	טכנולוגיות חדשות	אנרגיות מתחדשות
2030	9 GW סולרי 1 GW אגירה	14 GW סולרי 2 GW אגירה	* 17.145 GW סולרי 2 GW אגירה
תוספת נדרשת להספק הסולרי 2030-2024	3.48 GW	8.48 GW	11.62 GW
2040	12 GW סולרי 1 GW אגירה	34 GW סולרי 29 GW אגירה	48 GW סולרי 30 GW אגירה
תוספת נדרשת להספק הסולרי 2040-2031	3 GW	20 GW	30.855 GW
2050	17 GW סולרי 1 GW אגירה	58 GW סולרי 38 GW אגירה	105 GW סולרי 65 GW אגירה
תוספת נדרשת להספק הסולרי 2050-2041	5 GW	24 GW	57 GW
תוספת כוללת להספק הסולרי 2050-2024	11.48 GW	52.48 GW	99.475 GW

* עודכן לפי הנתון במפת הדרכים לאנרגיות מתחדשות בשנת 2030, משרד האנרגיה 2022.

תרשים 4. הספק מותקן מצטבר 2009-2050 לפי תרחישי משרד האנרגיה - 54%- ו-90% אנרגיה ממקור מתחדש ברשת החשמל



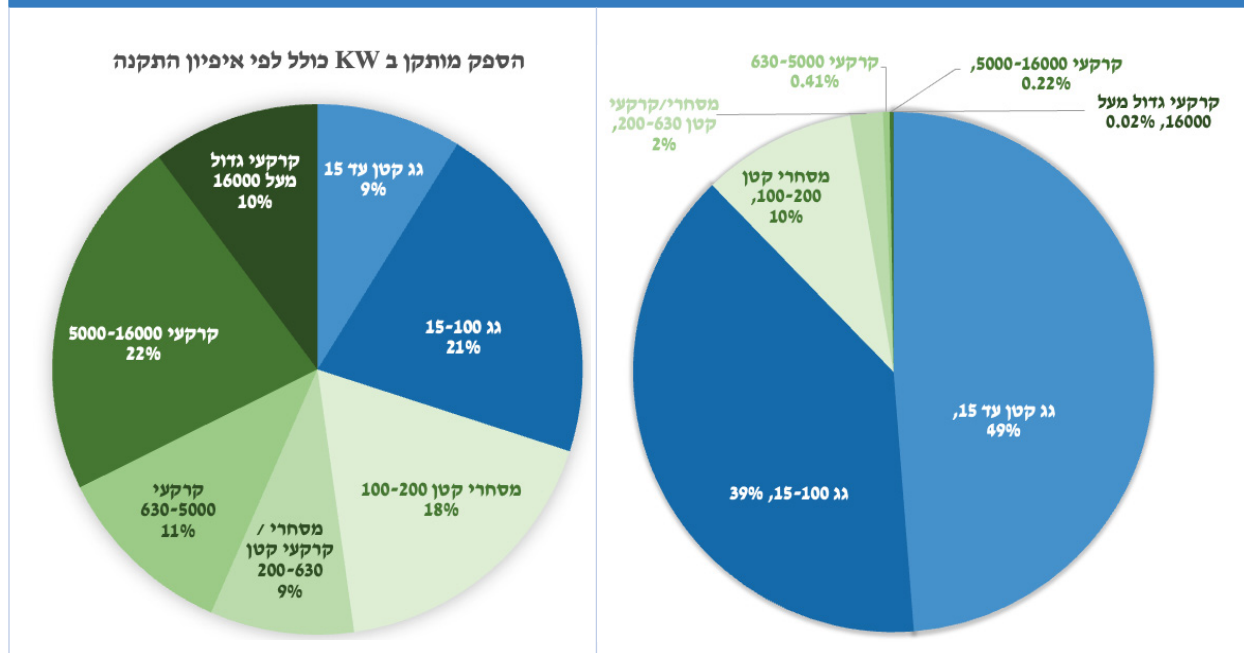
הספק מותקן מצטבר עד שנת 2023, עובד מנתוני רשות החשמל, 2030-2024 הספק לעמידה ביעדי 2030, 2031-2050 לפי תרחישי משרד האנרגיה, כפי שתוארו במסמך "משק דל פחמן 2050".

2.1.2 אפיון התקנות בישראל

עד אפריל 2024 הותקנו בישראל 48,712 מערכות של לוחות סולריים, בהספק כולל של 4,551.3 MW⁴ 88% מן ההתקנות הם התקנים קטנים ופזורים על גגות מבנים של בתים או עסקים (מפעלים, רפתות, מבני ציבור וכו') או דו-שימוש אחר, כמו מערכות צפות על בריכות דגים ומאגרי מים קטנים. פריסה זו מהווה קושי בניהול הפסולת, שכן יש מספר רב של נקודות איסוף מבוזרות בתוואי שחלקו עירוני ולא מספר נקודות קטן שבהן מרוכזת הפסולת. מבחינת ההספק המותקן, 9% מקורם בהתקנים קטנים על גגות של בתים פרטיים, 21% על מבנים של בניינים משותפים, מבני ציבור או עסקים, 27% בהתקנים מסחריים או קרקעיים קטנים ו-42% מקורם בהתקנים קרקעיים בינוניים וגדולים. בהקשר זה יש לציין שהרגולציה בישראל מקשה על הקמת מתקן סולרי על גג של בניין משותף, ולכן סביר ש-91% מכלל ההספק המותקן מקורם במתקנים ציבוריים או עסקיים.

⁴ [רשות החשמל - דשבורד, הספק מתקני יצור מחוברים באנרגיה מתחדשת](#)

תרשים 5. מספר התקנות והספק מותקן לפי גודל ההתקן בKW וסוגו: גג קטן, גג בניין מבנה ציבור או עסק, גג מסחרי קטן, מסחרי או קרקעי קטן, קרקעי



מקור: נתוני רשות החשמל, משנת 2009 ועד אפריל 2024.

מבחינה גאוגרפית, 48% מההספק מותקן בדרום, 29% בצפון, 16% במרכז, 4% ביהודה ושומרון ו-3% מסווגים כאחר. מבחינת מספר מתקנים, 40% בצפון ו-52% מתחלקים שווה בשווה בדרום הארץ ובמרכזה. מבחינת גודל המתקנים, רוב המתקנים הגדולים מותקנים בדרום: 84% מהמתקנים מעל 5MW ו-40% מהמתקנים הקרקעיים בגודל בינוני (0.63-5MW). מתקנים מסחריים וקטנים (מתחת ל-0.63MW): 40% בצפון, 26% בדרום ו-25% במרכז.

2.2 המרת יחידות הספק ליחידות מסה

כאמור, הפסולת נמדדת ביחידות של מסה, אך המידע לגבי התקנות לוחות סולריים נתון ביחידות של הספק. לכן, הערכת כמות הפסולת הצפויה מצריכה המרה של יחידות ההספק ליחידות של מסה. המרות כאלו מצויות בספרות, אך הן אינן חופפות לנתונים שהתקבלו מחברות בשוק הישראלי, שהם באופן עקבי נמוכים יותר. עם השנים יחס ההמרה של ההספק למסה משתנה: ככל שהטכנולוגיה מתקדמת והיעילות עולה, כך המסה ליחידת הספק קטנה. בתחילת שנות השמונים הותקנו כ-170 טונות של לוחות עבור הספק של מגה-וואט אחד, בתחילת שנות האלפיים מספר זה ירד ל 110 טונות, ובשנת 2012 לכ-78 טונות למגה-וואט (t/MW) (IRENA, 2016). Paiano ואח' (2015) חישבו יחס המרה של (t/MW) 102 עבור שנת 2014. Peeters ואח' (2017) השתמשו גם בנתונים שהתקבלו מ-PVCYCLE (ארגון אחריות יצרן אירופי המתמחה בטיפול בפסולת לוחות סולריים), כך שעד 2010 עמד יחס ההמרה על (t/MW) 100, בשנים 2010-2014 על (t/MW) 85, בשנים 2015-2020 על (t/MW) 70 ולאחר 2020 על (t/MW) 65. משיחה עם ארגון אחריות היצרן, כיום יחס ההמרה עומד על (t/MW) 55-60.

חברות ישראליות המתקינות לוחות בארץ מדווחות על יחס המרה של (t/MW) של 49-61 עבור הלוחות המותקנים כיום. יחס ההמרה שיחושב במודל הוא ממוצע הנתונים שהתקבלו מהשוק הישראלי. נתונים מ-Nieto-Morone ואח' (2023) העלו יחס המרה דומה ליחס עבור הנתונים שהתקבלו מהשוק הישראלי בשנת 2020. עד שנת 2024 יחס ההמרה שחושב הוא על-פי נתונים שהתקבלו מחברות ישראליות, שהם 42% מכלל ההספק המותקן בהתקנים הבינוניים-גדולים. החל בשנת 2025 חושב יחס ההמרה על-פי נוסחה המביאה בחשבון את התייעלות הלוחות לאורך השנים, כלומר הספק גבוה יותר ליחידת מסה (Nieto-Morone et al., 2023). כדי לשמור על רלוונטיות המודל יש לעדכן עם הזמן את יחס ההמרה לפי נתוני האמת בשטח.

2.3 מודלים סטטיסטיים להערכת כמות הפסולת

משך החיים של מוצר הוא הזמן שבו מוצר מממש את תפקודו, כפי שתוכנן, עד שהוא מפסיק לתפקד באופן שהוגדר בתכנון. עבור לוחות סולריים, משך החיים הוא הזמן שבו הלוח מייצר עד 80% מההספק המרבי, זמן זה נע לפי יצרנים שונים בין 25 ל-30 שנים (Kim and Park, 2018), (Jordan and Kurtz, 2013), (Laronde et al., 2013). ישנם מודלים סטטיסטיים להערכת משך חיי מוצר המביאים בחשבון את שיעורי הכשל של מוצרים שונים כפונקציה של הזמן, בין השאר של מוצרי אלקטרוניקה (Nelson, 2009). שלושה מודלים עיקריים נמצאו מתאימים להערכת שיעורי הכשל של לוחות סולריים לאורך זמן: התפלגות מעריכית, התפלגות וייבול (Weibull Distribution) והתפלגות לוג-נורמלית (Wang et al., 2019), (Kuitche, 2010). שיעור הכשל של לוחות סולריים הוא שיעור הלוחות שיצאו משימוש בפרק זמן נתון, במחקר זה בפרק זמן של שנה. באמצעות חישוב שיעורי הכשל הצפויים בכל שנה, אפשר לחשב את אובדן הלוחות - כמות הפסולת הצפויה מתוך כמות נתונה של לוחות מותקנים.

מחקרים המעריכים את כמויות הפסולת של לוחות סולריים משתמשים בפונקציית צפיפות ההסתברות של התפלגות וייבול (Weibull Probability density function) כדי לחשב את כמויות פסולת הלוחות הסולריים הצפויות בכל שנה (IRENA, 2016), (Kim and Park, 2018), (Santos and Alonso-Garcia, 2018), (Tan et al., 2022), (Van Straalen et al., 2016). הפרמטרים נקבעים לרוב באמצעות ניסויי דגרדציה מהירה, שבהם לוחות סולריים עוברים סדרת בדיקות המדמות תנאי שטח. מתוך תוצאות הניסויים מותאמים הפרמטרים השונים, במקרה של התפלגות וייבול, פרמטר הצורה ופרמטר הפיזור (Kumar and Sarkar, 2013), (Kuitche, 2010), (Nelson, 2009).

פונקציית צפיפות ההסתברות נתונה בנוסחה: $f_{(t)} = \frac{\alpha}{T} \left(\frac{t}{T}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^\alpha}$, כך ש: α פרמטר הצורה, T פרמטר הפיזור, t משתנה הזמן כך ש- $t \in \mathbb{N}$, מייצג את מספר השנים מרגע ההתקנה. $f_{(t)}$ הוא שיעור הכשל בכל שנה נתונה t מרגע ההתקנה.

המחקר שעליו מתבססות הערכות רבות של פסולת לוחות סולריים הוא מחקר של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה מתחדשת IRENA משנת 2016, שקבע שני תרחישי אובדן - תרחיש אובדן רגיל ותרחיש אובדן מוקדם. תרחיש האובדן הרגיל נקבע על סמך מחקרים שביצעו ניסויי דגרדציה מהירה לצורך חישוב שיעורי הכשל. המחקר של Kuitche (2010), שממנו הותאמו הפרמטרים לתרחיש האובדן הרגיל, כלל ניסויי דגרדציה מהירה ושלושה ניסויי שטח באקלים הדומה לאקלים של מדינת ישראל בשניים מהאזורים: אריזונה - אקלים מדברי ישראלי, פלורידה - אקלים דומה לאקלים הישראלי, וקולורדו. הנחות התרחיש הרגיל הן אורך חיים ממוצע של 30 שנים, ו-99.99% אובדן לאחר 40 שנים. תרחיש האובדן המוקדם התבסס על הנחות תרחיש האובדן הרגיל והנחות לכשלים טכניים אופייניים: 0.5% כשל בשלב ההובלה או ההתקנה, 0.5% כשל בשנתיים הראשונות לפעילות, 2% כשל לאחר עשר שנים ו-4% כשל לאחר 15 שנים.

על בסיס שני התרחישים במחקר של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה, כמות הפסולת המצטברת של לוחות סולריים בעולם תעמוד על כ-78 מיליון טונות עד שנת 2050. כמות הפסולת השנתית ב-2050, לפי מחקר זה, תעמוד על כ-6 מיליון טונות. יש לציין כי ההערכות לגבי ההספק המותקן בשנים שחלפו מ-2016 ועד 2023 היו נמוכות מההתקנות בפועל, כך שכמויות הפסולת יהיו גבוהות יותר. לצורך השוואה, כמות הפסולת האלקטרונית השנתית ב-2019 עמדה על 53.6 מיליון טונות בשנה, וכמות הפסולת האלקטרונית (כולל לוחות סולריים) השנתית הצפויה ב-2050 היא 111 מיליון טונות (Parajuly et al., 2019), (Forti et al., 2020).

האיחוד האירופי, באמצעות Statistics Netherlands יצר כלי⁵ להערכת כמות הפסולת של מוצרי חשמל ואלקטרוניקה בכל שנה, כך שכל מדינה באיחוד תוכל לחשב את הפסולת האלקטרונית שתיווצר בשטחה בכל שנה (Van Straalen et al., 2016). המודל שמשמש את מדינות האיחוד להערכת כמות הפסולת הנוצרת מדי שנה מבוסס על התפלגות וייבול. הערכה זו נקבעת על בסיס משקל המוצרים שנמכרו עד אותה שנה ועל בסיס פרמטרי צורה ופיזור רלוונטיים לכל קטגוריה שמופיעה בדיקטיבת פסולת אלקטרונית של האיחוד האירופי - WEEE.

Tan ואח' (2022) מציעים מודל שכולל שלושה תרחישים עבור השוק האוסטרלי, וכל תרחיש מורכב משלושה רכיבים בשיעורים שונים. הרכיב הראשון מתאר ירידה ביעילות הלוח בלבד, ומשתמש בפרמטרים של תרחיש האובדן הרגיל מהמחקר של IRENA. הרכיב השני מביא בחשבון תקלות טכניות לאורך זמן החיים ומשתמש בפרמטרים של האובדן המוקדם מאותו מחקר. הרכיב השלישי מתאר מניע כלכלי להחלפת הלוחות הסולריים, ומבוסס על שני מחקרים כלכליים (Duran et al., 2022), (Jean et al., 2019). מכיוון שבאוסטרליה רוב ההתקנים הם התקנים על גגות קטנים בבתים, והמניע הכלכלי של תעריף הייצור משמעותי מאוד, התרחיש הראשון שמוצע במחקר מבוסס על משקולות של 70% מניע כלכלי, 23% ירידה ביעילות הלוח ו-7% תקלות טכניות. תרחיש נוסף, המתאים יותר להתקנים גדולים, מבוסס על משקולות של 23% מניע כלכלי, 70% ירידה ביעילות הלוח ו-7% תקלות טכניות.

מחקרים נוספים מצאו שלוחות מוחלפים לאחר פרקי זמן קצרים יותר של 10-12 שנים (Mathur et al., 2021), (Curtis et al., 2021 [b]), (Libra et al., 2023). Curtis ואח' (2021) הציגו חמישה מניעים להחלפה המוקדמת של לוחות סולריים בארצות הברית: 1. מחיר נמוך של לוחות חדשים ויעילים יותר, 2. הסכמי רכישת חשמל והסדרה תעריפית שהסתיימו, 3. החלפה של רכיבי מערכת אחרים כמו ממירי מתח בשל תקלה או התאמה לדרישות בטיחות גבוהות יותר, 4. פגיעה והוצאה משימוש עקב אירועי מזג אוויר כמו סופות טורנדו וברד או תקלות ייצור, 5. הטבות מס - שיפוץ והחלפה עשויים להניב הטבות מיסוי.

תרחישי הערכת פסולת לוחות סולריים בישראל

במחקר הנוכחי יובאו שלושה תרחישים שונים עבור הערכת היקפי הפסולת במשק הישראלי, שיחשבו באמצעות התפלגות וייבול. כמו כן, כל תרחיש כזה יחושב עבור שני תרחישי משרד האנרגיה לשנת 2050.

- תרחיש 1 - מבוסס על תרחיש האובדן הרגיל במחקר הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה מתחדשת IRENA מ-2016. הפרמטרים לתרחיש זה: $T=30$, $\alpha=5.3759$. זמן החיים הממוצע - 28 שנים.

⁵ WEEE calculation tool Manual, Revised version: May 2023, UNITAR

- תרחיש 2 - מבוסס על הכלי להערכת כמות הפסולת של האיחוד האירופי. הפרמטרים לתרחיש זה: $T=25$, $\alpha=3.5$. זמן החיים הממוצע 23 שנים.
- תרחיש 3 - מבוסס על תרחיש המשלב השפעות טכניות וגם השפעות תמריצים כלכליים להחלפת הלוחות הסולריים. תמהיל המרכיבים בתרחיש זה: 7% השפעות של תקלות טכניות, 23% השפעות של תמריצים כלכליים ו-70% השפעות של ירידה ביעילות הלוח כמניע להחלפתו. הפרמטרים לתרחיש זה: $T=23$, $\alpha=2.4928$. זמן החיים הממוצע 20 שנים.

כמויות פסולת צפויות בהשוואה לכמויות פסולת שנוצרו בפועל

בגרמניה נאספו 42,000 טונות של פסולת לוחות סולריים בשנים 2016-2020. כמות זו גבוהה מהערכת האובדן הרגיל, שצפתה כמות פסולת מצטברת של 20,000 טונות עד 2020. לפי הערכות מומחים, חלק מהפסולת לא נאספת, ולכן אפשר לשער שכמות הפסולת בפועל גבוהה יותר. מצד שני, כמות זו קטנה מהכמות שהוערכה עבור תרחיש האובדן המוקדם, שהגיעה ל-200,000 טונות (IEA, 2024), (IRENA, 2016).

בצרפת נאספו כ-15,000 טונות של פסולת לוחות סולריים בשנים 2015-2020. כמות זו גבוהה מהערכת האובדן המוקדם, שצפתה 1,500 טונות של פסולת מצטברת עד 2020, אך נמוכה מהכמות הצפויה של 25,000 טונות לפי תרחיש האובדן המוקדם (Soren.eco, 2024), (Soren, 2024), (Santos and Alonso-Garcia, 2018), (IRENA, 2016).

בדומה לגרמניה ולצרפת, גם ביפן הפסולת השנתית בשנים 2019-2020 עלתה על תחזית האובדן הרגיל, אך הייתה נמוכה יותר מתחזית האובדן המוקדם (IRENA, 2016). בדרום קוריאה, כמות הפסולת השנתית בשנים 2018, 2019, 2022 הייתה גבוהה יותר מהערכות עבור כל התרחישים (IEA Korea, 2018), (IEA Korea, 2019), (IEA Korea, 2022), (IRENA, 2016), (Tan et al. 2022).

תרחיש האובדן המוקדם לפי המחקר של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה מתחדשת ותרחיש האיחוד האירופי קרובים מבחינת כמויות הפסולת המצטברת אחרי כ-25 שנים מתחילת המדידה, ולכן בסביבות 2020, כמות הפסולת המצטברת עבור שני תרחישים אלו דומה בהיקפה עבור גרמניה וצרפת. אפשר אפוא להניח שכמות הפסולת המצטברת עד 2020 היא בין התרחישים 1 ל-2, כפי שתוארו במחקר זה.

2.4 תוצאות

כמות הפסולת השנתית בישראל

בשנת 2030 הערכת כמות הפסולת השנתית נעה בין 1,375 טונות בתרחיש 1, לבין 12,482 טונות בתרחיש 3. בשנת 2050, כמות הפסולת השנתית המוערכת עבור תרחיש 90% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל, נעה בין 54,657 טונות בתרחיש 1 לבין 110,882 טונות בתרחיש 3. עבור תרחיש 54% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל, כמות הפסולת השנתית המוערכת בשנת 2050 נעה בין 50,098 טונות בתרחיש 1 לבין 80,958 טונות בתרחיש 3.

כמות הפסולת המצטברת בישראל

בשנת 2030 הערכת כמות הפסולת המצטברת נעה בין 5,087 טונות בתרחיש 1 לבין 62,517 טונות בתרחיש 3. בשנת 2050, כמות הפסולת המצטברת המוערכת עבור תרחיש 90% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל, נעה בין 394,954 טונות בתרחיש

1 לבין 1,185,049 טונות בתרחיש 3. עבור תרחיש 54% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל, כמות הפסולת המצטברת המוערכת נעה בין 381,498 טונות בתרחיש 1 לבין 1,004,286 טונות בתרחיש 3.

תרשים 6. הערכת כמות הפסולת השנתית והמצטברת (בטונות) לשנים 2030, 2050, לפי תרחיש			
תרחיש 3	תרחיש 2	תרחיש 1	
12,482	6,208	1,375	פסולת שנתית 2030
80,958	72,244	50,098	פסולת שנתית 2050 עבור 54% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל
110,882	90,313	54,657	פסולת שנתית 2050 עבור 90% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל
63,272	28,278	5,087	פסולת מצטברת עד 2030
1,004,286	756,049	378,426	פסולת מצטברת עד 2050 עבור 54% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל
1,185,049	846,000	394,954	פסולת מצטברת עד 2050 עבור 90% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל

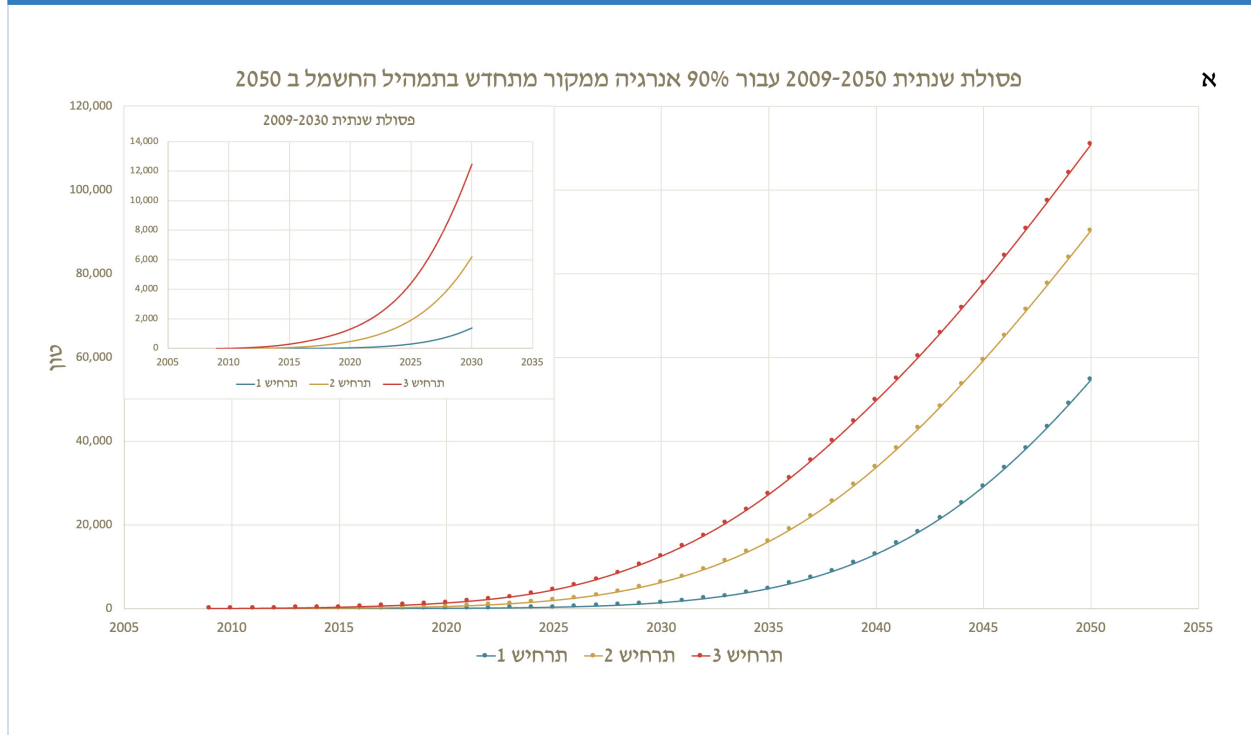
כדי לאשש את תוצאות המחקר נבחנו כמויות הפסולת המצטברות עד לסוף שנת 2023. נתוני הפסולת מתבססים על מידע שהעבירו חברות אנרגיה סולרית בישראל. כלל ההספק המותקן המצרפי של אותן חברות הינו 42% מכלל ההפקה בהתקנים הבינוניים והגדולים (מעל 200MW). עד סוף 2023 הוסרו משימוש כ-8,793 טונות לוחות. מהן 2,650 טונות נמכרו לשימוש חוזר, 5,973 טונות נשלחו חזרה ליצרן או למחזור בחו"ל בעקבות תקלת ייצור, וכ-170 טונות טופלו כפסולת בניין או הועברו להטמנה. בהנחה שכך התנהג שאר השוק של ההתקנים הבינוניים והגדולים, עד סוף שנת 2023 הוצאו משימוש 20,935 טונות לוחות סולריים, 6,714 מהן נמכרו לשימוש חוזר או הוטמנו. כמות זו לא כוללת את כמויות הפסולת שנוצרה בהתקנים הביתיים והמסחריים הקטנים.

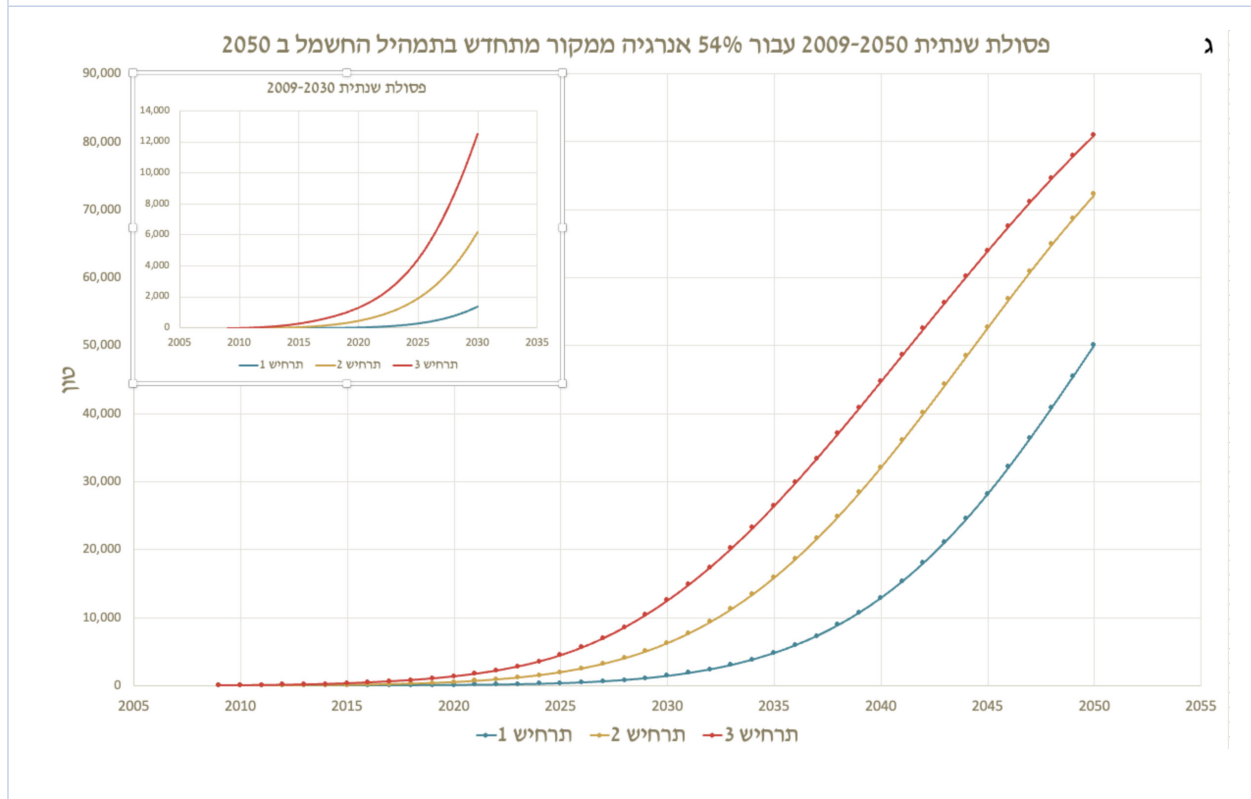
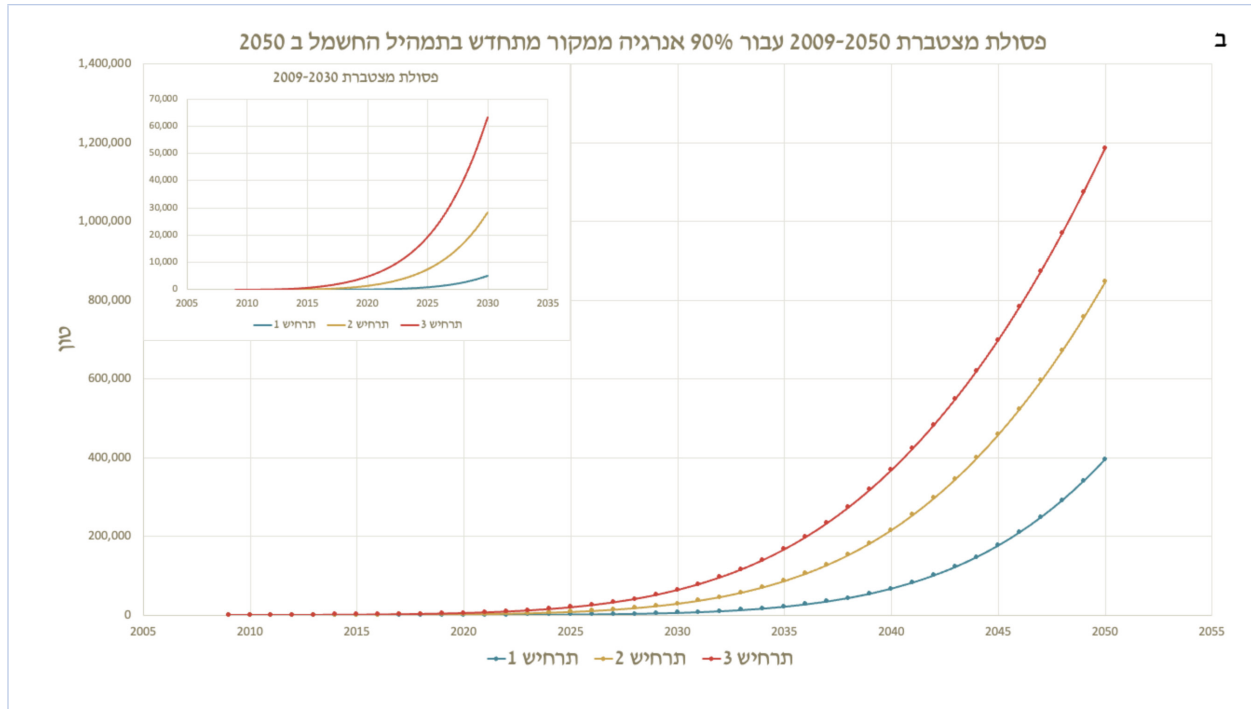
יש לציין שהלוחות שנשלחו חזרה ליצרן, נשלחו בעקבות פגם שהתגלה במספר לוחות. כיוון שהפגם נבע מתקלת ייצור, הוסרו כל הלוחות מאותה הסדרה, גם אם היו תקינים. פרקטיקה זו נהוגה גם בארצות בהן קיימת תשתית מחזור מקומית. התרחישים שנבדקו לא הביאו בחשבון החלפה סדרתית של לוחות. שאר הלוחות נמכרו לשימוש חוזר, לרוב בשוק הבינלאומי, והשאר נמכרו בארץ או הוטמנו. שוק ההתקנים שמתחת להספק 200MW, מתנהל באופן שונה משתי בחינות. מצד אחד, שוק השימוש החוזר אינו מפותח, ואין להתקנים ביתיים או מסחריים קטנים את היכולת לבדוק לוחות ולספק אחריות לרוכשים. מצד שני, שיעור הבלאי של התקנים ביתיים ומסחריים קטנים גבוה יותר עקב תחזוקה באיכות נמוכה יותר מאשר התקנים גדולים.

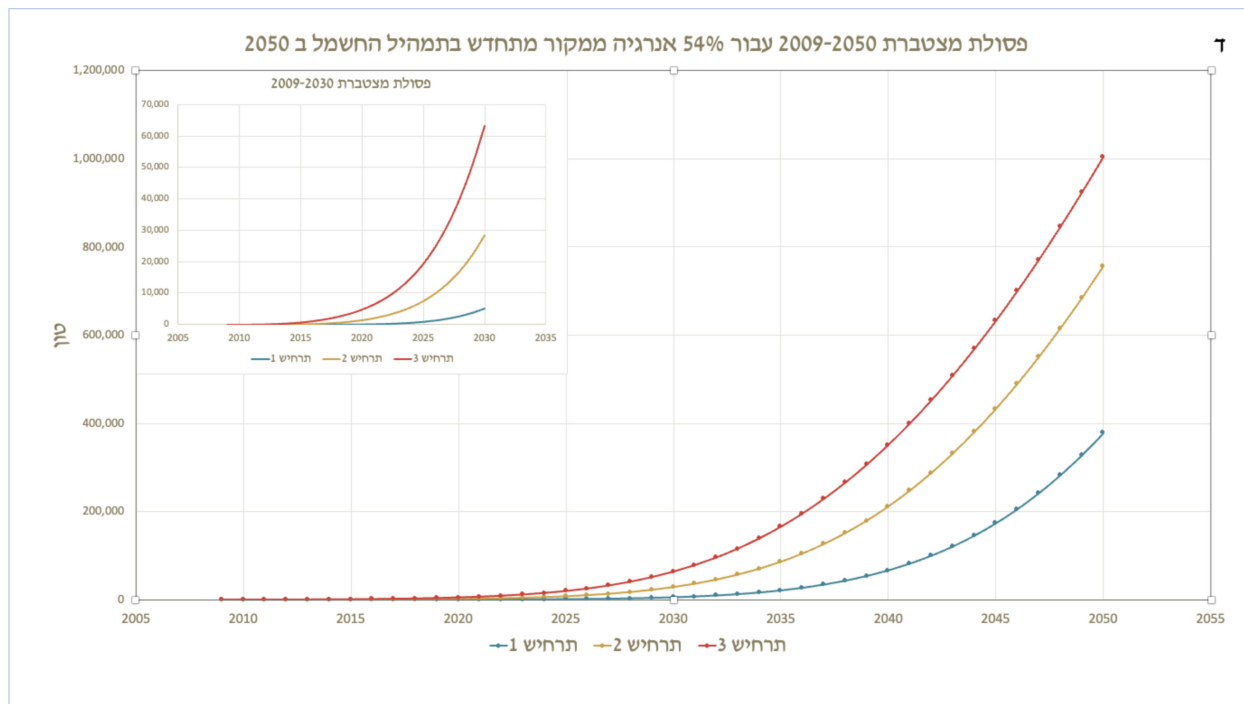
לפי התרחישים שהוצגו במחקר זה, הערכת כמות הפסולת המצטברת עד 2023 עומדת על 401 טונות בתרחיש 1, 4,064 טונות בתרחיש 2 ו-11,421 טונות בתרחיש 3. עד סוף 2023, 52% מההספק יוצר בהתקנים גדולים ובינוניים ו-48% יוצר בהתקנים

ביתיים ומסחריים קטנים. בהתחשב בהתנהגות השונה של שני סוגי התקנים אלו, כמויות הפסולת המשוערות (ללא החלפה סדרתית) נעות בין תוצאות תרחיש 2 לבין תוצאות תרחיש 3.

תרשים 7 א, ב, ג, ד: הערכת כמות פסולת של לוחות סולריים עד שנת 2050 לפי תרחיש ועבור שתי האפשרויות לשיעור אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל



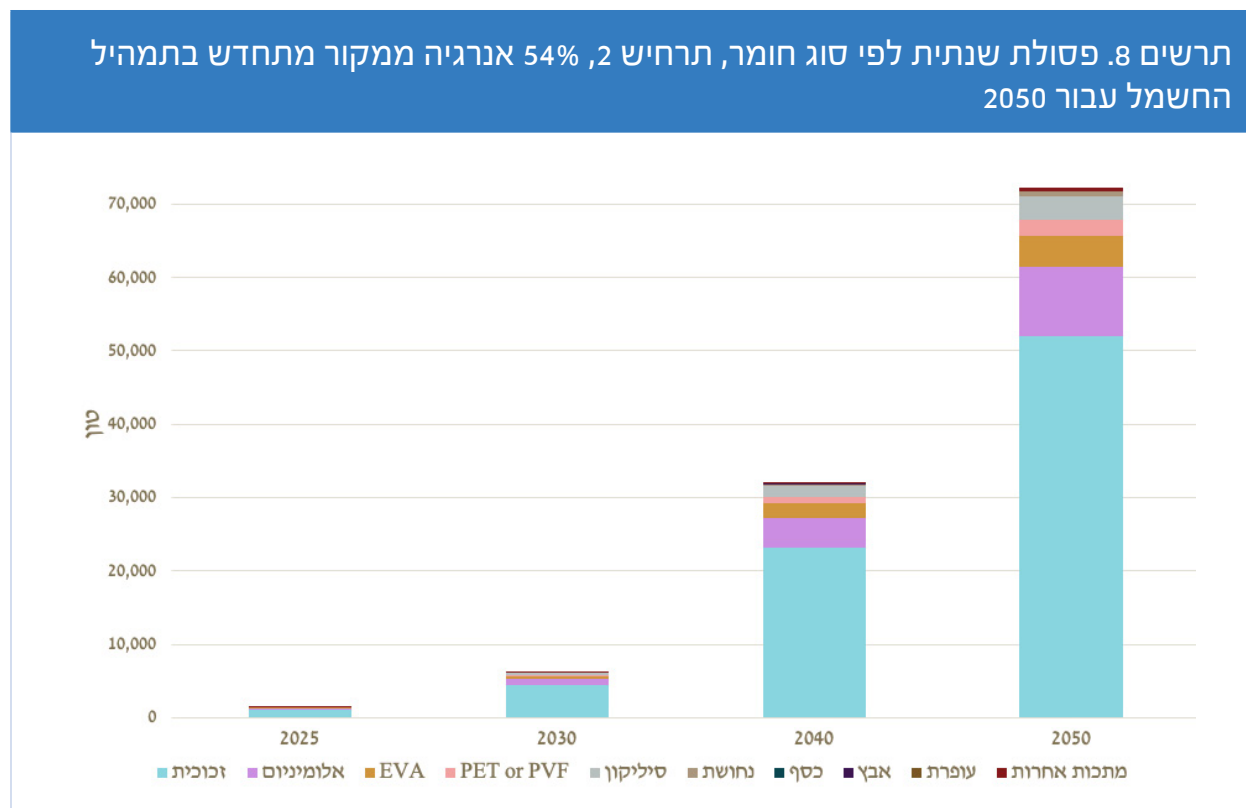




גרף א: פסולת שנתית עבור 90% אנרגיות מתחדשות בגריד החשמל עד 2050. גרף ב: פסולת מצטברת עבור 90% אנרגיות מתחדשות בגריד החשמל עד 2050. גרף ג: פסולת שנתית עבור 54% אנרגיות מתחדשות בגריד החשמל עד 2050. גרף ד: פסולת מצטברת עבור 54% אנרגיות מתחדשות בגריד החשמל עד 2050.

פסולת לפי חומר

לפי הרכב לוח מבוסס סיליקון, אפשר לחשב את כמויות הפסולת הצפויות מדי שנה לפי חומר. לפי תרחיש 2 ותרחיש 54% אנרגיות מתחדשות בתמהיל החשמל, צפויות בשנת 2050 כ-52,016 טונות זכוכית, 9,392 טונות אלומיניום, 6,429 טונות פלסטיק, 3,179 טונות סיליקון, 629 טונות נחושת, 47 טונות אבץ, 22 טונות כסף וכמות דומה של עופרת, וכן 542 טונות מתכות אחרות, בהן בדיל, תחמוצות בדיל ואנטימון.



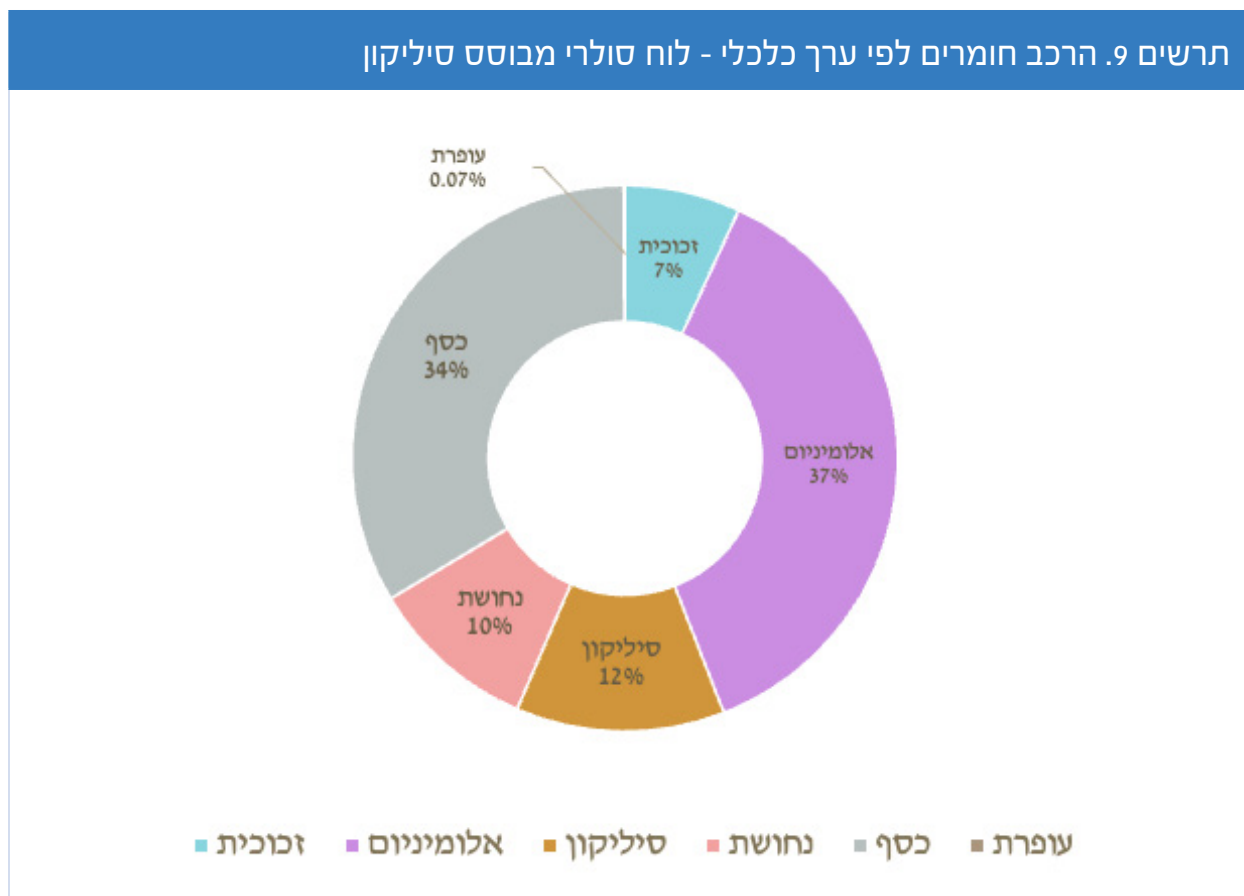
נתונים: Deng et al., 2022; Cui et al., 2022; IRENA, 2016; Latunussa et al., 2016; Corcelli et al., 2018; IEA, 2022.

לפי כמויות הפסולת של כל חומר, שיעור החומר המרבי שאפשר לחלץ, ומחיר החומרים בשוק בשנת 2024, אפשר להעריך את פוטנציאל ההכנסות מתהליך מחזור בגישת high-value recycling בכל שנה.⁶ בהנחה שאפשר לחלץ 98% מהזכוכית, 100% מהאלומיניום, 99% מהנחושת, 95% מהסיליקון, 94% מהנחושת ו-93% מהעופרת (Deng et al., 2019), (Latunussa et al., 2016), (Cui et al., 2022), ההכנסה בשנת 2030 מתוצרי המחזור תעמוד על כחמישה מיליון דולרים לפי תרחיש 2.

⁶ מחיר אלומיניום, נחושת ועופרת לפי בורסת המתכות בלונדון - www.lme.com

מחיר שברי זכוכית, סיליקון
מחיר כסף לפי מחיר שוק בינלאומי.

תרשים 9. הרכב חומרים לפי ערך כלכלי - לוח סולרי מבוסס סיליקון



נתונים: Cui et al., 2022; Deng et al., 2019 Latunussa et al., 2016;

3. מדיניות הטיפול בפסולת לוחות סולריים

3.1 כלי מדיניות

3.1.1 סיווג פסולת לוחות סולריים

הגדרת סיווג הפסולת של לוחות סולריים היא צעד המדיניות הראשון שמהווה את הבסיס לשאר כלי המדיניות וקובע את המטרייה שתחתיה יותווה הטיפול בפסולת זו. סיווג הפסולת כפסולת מסוכנת, לדוגמה, יחיל את החוקים והתקנות של פסולת מסוכנת הקיימים במדינה גם על לוחות סולריים, וכך יכתוב שרשרת טיפול אחרת מאשר סיווג של פסולת אלקטרונית או פסולת כללית. באיחוד האירופי, פסולת לוחות סולריים מסווגת כפסולת אלקטרונית. עם זאת, קיים שוני באופן הטיפול בפסולת: אם הלוחות מסומנים כפסולת לא מסוכנת, תחת הקוד 160214, כמו לוחות סולריים מבוססי סיליקון, או כפסולת מסוכנת תחת הקוד 160213 - אם הלוחות מכילים חומרים מסוכנים כמו לוחות סרט דק המכילים קדמיום או מתכות מסוכנות אחרות (IRENA, 2016).

קליפורניה שינתה את סיווג הפסולת של לוחות סולריים מפסולת מסוכנת לפסולת אוניברסלית בשנת 2021, וכך הפכה שרשרת הטיפול למהירה יותר עבור כלל הלוחות. לוחות שיש בהם חומרים מסוכנים עדיין מטופלים תחת התוויית פסולת מסוכנת, אך רוב הלוחות עוברים תהליך ראשוני מהיר וקל יותר. גם הדרישות ממרכזי המיזון והטיפול מקלים יותר, מה שמאפשר עלות טיפול נמוכה יותר בפסולת. במדינת ויקטוריה באוסטרליה, פסולת לוחות סולריים מוגדרת כפסולת אלקטרונית, ולכן יש איסור להטמינה. במדינות אחרות באוסטרליה פסולת לוחות סולריים היא פסולת כללית ולכן רובה מוטמנת (Mathur et al., 2021), (Dudley, 2018). בטייוואן, פסולת לוחות סולריים מסווגת כפסולת כללית או פסולת תעשייתית, על-פי החומרים המרכיבים את הלוח.

3.1.2 עקרון "המזהם משלם"

עקרון "המזהם משלם" רואה במזהם את האחראי לכיסוי כלל העלויות החיצוניות הנגרמות מפעולות הייצור או הצריכה שלו. ישנן שתי דרכים שבהן אפשר להבטיח שמחיר מוצר או שירות משקף את עלויות הייצור והצריכה המלאות: מיסוי בגובה הערכת הנזק הסביבתי שנגרם כתוצאה מייצור וצריכה של המוצר לכל אורך חייו, או רגולציה שאוסרת או מגבילה את הנזק בכלים כלכליים (de Sadeleer, 2020). השאלה "מיהו המזהם" היא כמובן חשובה ביותר: האם זהו יצרן המוצר? כורה החומרים? היבואן? המשתמש? לרוב, יש יותר ממזהם יחיד לאורך חיי המוצר (Heine, 2020). מענה לשאלה מיהו המזהם מאפשר לקבוע את זהות המשלם או המשלמים.

עקרון המזהם משלם הוא עיקרון יסודי בחקיקה הסביבתית, ומשמש בסיס לכלי מדיניות שונים, בהם אחריות יצרן מורחבת, מיסוי פחמן, מיסוי על חומרים שונים לשימושים שונים כמו מס על פלסטיק לשימוש חד-פעמי וכד'. עיקרון זה מוטמע בחקיקה הסביבתית של האיחוד האירופי, בהמלצות של הארגון לשיתוף פעולה ופיתוח כלכלי בינלאומי (OECD) ובהצהרות של ועידות האו"ם מאז שנות השבעים של המאה העשרים. גם בישראל התקבל עיקרון זה בפסיקות בית המשפט, והוא עומד בבסיס החקיקה הסביבתית כמו חוק הגנת הסביבה (המזהם משלם) (תיקוני חקיקה) 2008, חוק אויר נקי 2008, חוק שמירת הניקיון 2007 ועוד.

3.1.3 אחריות יצרן מורחבת

אחריות יצרן מורחבת הוא כלי מדיניות הרואה ביצרן את האחראי להשלכות הסביבתיות של המוצר לכל אורך מעגל החיים שלו, ומרחיבה אחריות זו גם לשלב סוף החיים - שבו המוצר הופך לפסולת. מנגנון זה מסיט את האחריות הבלעדית לטיפול בפסולת מהרשות המקומית ומטיל אותה על היצרן. אחריות זו יכולה להתרגם לאחריות מימונית, תפעולית או מנהלתית. הטיפול בשלב סוף החיים של המוצר כולל איסוף של המוצרים, מיונם, הכנה לשלב הטיפול הסופי - שימוש חוזר במוצר, שימוש חוזר בחלקים, מחזור, השבה או סילוק להטמנה. יצרנים רשאים לטפל בפסולת בעצמם, אך לרוב הם מצטרפים לארגון אחריות יצרן המייצג את היצרנים ופועל בשמם כדי לעמוד בדרישות החוק (Laubinger, 2021).

מנגנון אחריות יצרן מורחבת מושת על יצרנים ברחבי העולם עבור פסולת מסוגים שונים. מנגנון זה הוחל לראשונה בשנות השבעים בעיקר בצורת הסדרי פיקדון על מכלי משקה, בשנות התשעים על מוצרי אריזה, ובשנות האלפיים על מוצרי חשמל ואלקטרוניקה. כיום הסדרים אלו נפוצים בכל רחבי העולם, ומתפתחים גם בהיבט של הרחבת יעדי האחריות והיקפה, וגם

בהיבט של סוג המוצרים שעליהם מוטלת אחריות זו (תרופות ומוצרי קוסמטיקה, טקסטיל, בדלי סיגריות, ציוד דיג וכו') (OECD, 2024).

בעשור האחרון החילו מדינות שונות אחריות יצרן מורחבת גם על לוחות סולריים. באיחוד האירופי יצרני ציוד חשמלי ואלקטרוני מחויבים באחריות יצרן עבור מוצרים אלו. מכיוון שפסולת לוחות סולריים מוגדרת פסולת אלקטרונית באיחוד האירופי, יצרנים או יבואנים של לוחות סולריים במדינות החברות מחויבים באחריות יצרן מורחבת. גם בארצות הברית, מדינת וושינגטון⁷ ומחוז ניאגרה⁸ במדינת ניו יורק הטילו אחריות יצרן מורחבת על יצרנים ויבואנים של לוחות סולריים. בטייוואן נשקלת האפשרות לעבור ממנגנון המושתת על אחריות צרכן מימונית ואחריות תפעולית של המדינה, למנגנון אחריות יצרן מורחבת עבור פסולת לוחות סולריים.⁹

דרישות הסף למתכונת אחריות יצרן מורחבת, כפי שתוקנו בדירקטיבת הפסולת¹⁰ Waste Framework Directive (2018/851) בשנת 2018, קובעות שיש להחיל דרישות ייחודיות מיצרנים, אם אפשר, על מוצרים או על קבוצות מוצרים דומים, בהתאם לתכונות שונות, כדי לקדם עיצוב מקיים של מוצרים. בין התכונות שיקבעו את מדרג הדרישות: עמידות המוצר, האפשרות לתיקון, האפשרות לשימוש מחדש, האפשרות למחזור ונוכחות של חומרים מסוכנים. הסעיף מדגיש את הצורך בתיאום בין מדינות האיחוד לשם קביעת קריטריונים משותפים לבחינת תכונות אלו. מחקרים מראים שמנגנון אחריות יצרן מורחבת הפועל באמצעות ארגוני אחריות יצרן נכשל בקידום התכנון והעיצוב של מוצרים מקיימים, והם מציעים מנגנון של תעריף מוצר מדורג לקידום מטרה זו (Lifset et al., 2023), (Laubinger, 2021).

3.1.4 תכנון ועיצוב מוצר מקיים (Eco-design/Sustainable product)

לפי הנציבות האירופית, מוצר מקיים הוא מוצר המתאפיין לפחות באחת התכונות הבאות בהשוואה למוצר אחר דומה: צורך פחות אנרגיה, עמיד ומשמש לאורך זמן, ניתן לתיקון בקלות, ניתן לפירוק ולהרכבה מחודשת בקלות, מכיל פחות חומרים המוגדרים מעוררי דאגה, מתמחזר בקלות, מכיל חומר ממוחזר, ובעל טביעת רגל אקולוגית נמוכה יותר לכל אורך חיי המוצר. החקיקה האירופית מקדמת מנגנון זה במסגרות חקיקה שונות, בהן דירקטיבת הפסולת, דירקטיבת פלסטיק חד-פעמי, חקיקת המסגרת לתנאים לעיצוב מקיים עבור מוצרים בני-קיימא ודירקטיבת פסולת אלקטרונית.

אחד התמריצים לעיצוב מקיים הוא "תעריף מוצר מדורג" שארגון אחריות יצרן גובה מיצרן עבור הטיפול בשלב סוף החיים של המוצר. תעריף מוצר מדורג יכול להתבסס על משקל במקום על מספר היחידות, וכך לעודד הפחתה של חומר בתהליך הייצור, וכתוצאה מכך גם הפחתה בכמות הפסולת (OECD, 2016). תעריף מוצר מדורג יכול להתחשב בעמידות של המוצר (נבחן באמצעות שנות האחריות החינמית למוצר) או ביכולת לתקנו או להשמישו לשימוש חוזר, כך שהתעריף ישקף את עלות הטיפול הנמוכה יותר. כך גם עבור מוצרים שקל יותר למחזר אותם, וכאלו שאינם מכילים חומרים מסוכנים (Laubinger, 2021). עמידות נחשבת תכונה המעודדת הפחתה במקור: ככל שצרכן ישתמש במוצר לאורך זמן רב יותר, כך תיווצר פחות פסולת (Huang et al., 2019).

⁷ RCW 70A.510.010 Photovoltaic module stewardship and takeback program Definitions Requirements Enforcement

Penalty Fees Rule making. <https://app.leg.wa.gov/RCW/default.aspx?cite=70A.510.010>

⁸ Niagara county - solar panel recycling local law

⁹ שיחת ועידה עם נציגי המשרד להגנת הסביבה הטאיוואני ותכתובות דואר אלקטרוני, מאי 2024.

¹⁰ <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj> סעיף 8a.

Huang ואח' (2019) טוענים שבמקרה של לוחות סולריים, עיצוב המקדם עמידות ועיצוב המקדם מחזור אינם משתלבים זה בזה. בחירה בעמידות תבוא על חשבון קלות המחזור, ובחירה בעיצוב מוטה מחזור עלולה לפגוע בעמידותו של הלוח. טענה נוספת שעולה במחקר קושרת בין יעדי איסוף גבוהים לנטייה לעיצוב מוטה מחזור, לעומת יעדי מחזור גבוהים התורמים לעיצוב מוטה עמידות. בימים אלו פועלת קבוצת העבודה¹¹ לקביעת התנאים לעיצוב מקיים 2022-2024, שבמסגרתה נבחנים קריטריונים גם עבור לוחות סולריים.

בשוק האירופי, ארגון אחריות היצרן Soren בצרפת מתמחר את תעריף הטיפול בלוחות. התעריף נגבה במעמד רכישת הלוח הסולרי לפי הטכנולוגיה ולפי משקל הלוח. תעריף הטיפול הנוכחי נע בין 0.36 אירו ללוח קטן עם מסגרת אלומיניום, ל-1.57 אירו ללוח גדול ללא מסגרת אלומיניום. עלות הטיפול בלוחות סרט דק יקרים יותר בכ-36% מהעלות ללוחות מבוססי סיליקון.¹² יתכן שהתעריפים שונים מכיוון שלוחות סרט דק מכילים חומרים מסוכנים ודורשים טיפול יקר יותר, או משום שקיים רק מפעל אירופי אחד שממחזר לוחות מסוג זה, ועלויות השינוע מובאות בחשבון. בישראל, הרוב המוחלט של הלוחות מבוססים על סיליקון, ולכן יש היגיון בקביעת מחיר גבוה יותר ללוחות מסוג אחר, שיצריכו טיפול שונה, ובוודאי ללוחות שיכילו חומרים מסוכנים.

3.1.5 טיפול בפסולת במעלה היררכיית הפסולת

היררכיית הטיפול בפסולת קובעת מדרג להעדפת פעולות הטיפול בפסולת. בראש הפעולות לטיפול בפסולת עומדת פעולת מניעת הפסולת, ולאחריה הפחתה, הכנה לשימוש חוזר, מחזור, השבה לאנרגיה ולבסוף סילוק. פעולות למניעת פסולת בשלב הייצור כוללות הימנעות מחומרים מסוכנים בייצור והחלפתם בחומרים אחרים, וכן תכנון ועיצוב המוצר כך שיהיה עמיד יותר וישמש לאורך זמן. פעולות למניעת פסולת בשלב השימוש כוללות תחזוקה נכונה ויכולת תיקון של המוצר, כך שזמן השימוש שלו יהיה ארוך ככל האפשר.

הפעולה הבאה במדרג היא פעולת ההפחתה - הפחתה של חומרי הגלם הבתוליים בייצור המוצר תוך שימוש בחומר גלם ממוחזר, הפחתה של חומרי גלם המוגדרים "נדירים", והפחתה בכמות החומר באופן כללי. פעולות הכנה לשימוש חוזר כוללות בדיקה ותיקון פגמים קלים, מחדוש, החלפת רכיב תקול או שימוש במוצר למטרה שונה מזו ששימש עבורה, ופירוק לחלקים. בשלב הבא במדרג נמצאות פעולות המחזור, הכוללות פירוק ועיבוד של המוצר לחומרי גלם שניוניים. אחרונות במדרג הן פעולות ההשבה לאנרגיה ולבסוף סילוק והטמנה.

הכנה לשימוש חוזר ושימוש חוזר הם אתגרים מרכזיים בהארכת השימוש בלוחות סולריים: ההסרה, האיסוף, השינוע והאחסון חייבים להיעשות כך שהלוחות יגיעו שלמים - לוחות שהזכוכית בהם סדוקה לא ניתנים לשימוש חוזר (Tsanakas et al., 2020). נוסף על כך, צריך להיות ביקוש ללוחות משומשים בשוק. בשוק האירופי פועלות כחמש-עשרה חברות בתחום השימוש החוזר בלוחות, בהיקף שוק משוער של 300MW בשנה, שהם כאחוז מכלל ההספק המותקן השנתי בשנים 2023-2021 (Salim et al., 2020).

קיימים חסמים רבים לשוקי שימוש חוזר ללוחות סולריים (Tsanakas et al., 2020), (Curtis et al., 2021 [b]):

- תחרותיות נמוכה מול לוחות חדשים -

¹¹ https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.C_.2022.182.01.0001.01.ENG

¹² <https://www.soren.eco/wp-content/uploads/2023/06/Soren-Bareme-des-eco-participations-2020.pdf>

- מחיר הלוחות הסולריים היה בסוף 2023 כשליש ממחיר מערכת סולרית חדשה המותקנת על גג בהספק של 10-100 KW (Fraunhofer, 2024), אך כדי להתקנים נדרשת כל המערכת (ממירי מתח, מערכת עגינה, כבלים ועבודות תשתית והתקנה). קיימת עלות נוספת הכרוכה בשינוע הלוחות ובבדיקתם. בהינתן שמחירי הלוחות החדשים בירידה מתמדת, הרווח הכלכלי מהתקנת לוחות משומשים הולך וקטן.
- בעשור האחרון הספק הלוחות הכפיל את עצמו, לפיכך רכישת לוח משומש במקום חדש פירושה ייצור של פחות אנרגיה לכל יחידת שטח.
- חוסר סטנדרטים ותקנים עבור הטיפול בלוח משומש (Curtis et al., 2021 [b]), (Tsanakas et al., 2020) -
 - סטנדרט בדיקות לקביעת בטיחות השימוש ולקביעת יעילות מינימום ללוח משומש
 - סטנדרט תיקון
 - אחריות מחודשת לאחר בדיקה
- חוסר במידע על העלויות בפועל של טיפול והשמשה מחדש של לוחות, כולל תשתיות ומערך לוגיסטי תומך של הסרה, איסוף, שינוע, מיון ותיקון. הערכה אחת עבור השוק האירופי נעה בין 20 ל-90 אירו ללוח, בתלות בכמות הלוחות ובאופי התיקון (Tsanakas et al., 2020).
- פרויקט Circusol הפועל באיחוד האירופי לזיהוי מודלים עסקיים עבור הכלכלה המעגלית בשוק הלוחות הסולריים, פיתח מודל עבור סטנדרט בדיקה ותיקון של לוחות סולריים (Heide, 2022). ביפן פורסמו הנחיות בדיקה ותיקון מטעם המדינה,¹³ ובארצות הברית מעודדים שימוש חוזר בלוחות באמצעות הטבת מס עם תרומת לוחות למטרות צדקה (Curtis et al., 2021 [b]).

3.1.6 מנגנון מימוני

מערכי טיפול בפסולת דורשים השקעת משאבים בשלבי הטיפול השונים: איסוף, אחסון, מיון, שינוע וטיפול. במקרים שבהם תוצרי הטיפול אינם יוצרים רווח כלכלי, עולות שאלות בנוגע למימון המערך: מי הגורם המממן? מהו גובה המימון הנדרש? באיזה שלב המערך ממומן? האם קיימת נקודה בזמן שבה מערך הטיפול יתייצב כלכלית ותוצרי הפסולת יממנו אותו?

אגרת מחזור (Advanced Recycling Fee) משולמת בדרך כלל על-ידי הרוכשים במעמד רכישת המוצר. אגרה זו שקולה לעלויות הטיפול בפסולת בסוף חיי המוצר. האגרה יכולה להופיע באופן שקוף בחשבונית הקנייה, בנפרד ממחיר המוצר (Visible fee), או להיות מוטמעת במחיר הכולל (Inbuilt fee). (Lakhan, 2016) מצא מתאם גבוה בין מוכנות של צרכנים לשלם דמי טיפול בפסולת לבין רמת המסוכנות של הפסולת, כפי שהם תופסים אותה. כמו כן, נמצא מתאם גבוה בין המוכנות לשלם אגרה נפרדת לבין רמת מסוכנות הפסולת. ככל שהפסולת נחשבת מסוכנת יותר, כך מוכנים לשלם אגרת טיפול גבוהה יותר, ומוכנים שאגרה זו תהיה נפרדת ממחיר המוצר. ככל שהמוצר נחשב "לא מסוכן" בעת הפיכתו לפסולת, המוכנות לשלם אגרת טיפול בפסולת יורדת, אך לרוב קיימת אדישות לגבי החצנתם או הפנמתם של דמי הטיפול במחיר.

אגרה נפרדת ממחיר המוצר נחשבת גורם המעלה את מודעות הצרכנים למחזור ולפעולות הנעשות בסוף חיי המוצר. היא מורידה את הסיכוי לבקשת תשלום נוסף בעת הפינוי, ומספקת מימון קבוע מראש עבור שלב סוף החיים (Khetriwal et al.)

¹³ <https://www.env.go.jp/press/files/jp/116525.pdf>

(al., 2009). לעומת זאת, אגרה נפרדת נתפסת לעתים כמס (Gavrilescu et al., 2021) ונתקלת בהתנגדות ציבורית עזה, בין השאר בשל אמון ציבורי נמוך והחשד שהכסף אינו משמש למטרות מחזור וטיפול (Lakhan, 2016). אגרה המוטמעת במחיר המוצר נתפסת כמעלה את מחיר המוצר ומאפשרת לגופי היישום וליצרנים לשנות את תעריף הטיפול, כך שלא תמיד יובטח מימון מלא לטיפול הולם בשלב הפסולת.

3.1.7 איסור הטמנה / קביעת היטל הטמנה

איסור הטמנה או היטל הטמנה - מס המשולם על כל טונה של פסולת מוטמנת, הם פרקטיקות נפוצות להפניית פסולת לשיטות טיפול במדרג גבוה יותר, כמו השבה או מחזור (EEA, 2023 [a]). איסור ההטמנה של פסולת אורגנית בשוודיה, למשל, הביא לידי הסטה של כמויות גדולות של פסולת אורגנית להשבה לאנרגיה (Finnveden et al., 2013). בלגיה אסרה על הטמנה של פסולת לא ממוינת ופסולת אורגנית נוסף על היטלי הטמנה על פסולות אחרות, כך שכיום שיעור הפסולת העירונית המוטמנת עומד על 1% בלבד (EEA, 2023 [b]). ביוון ובספרד יש איסור הטמנה של פסולת אלקטרונית הכוללת לוחות סולריים, והחל בשנת 2014 כמה ממדינות אוסטרליה אוסרות הטמנה של לוחות סולריים בשטחן (Oteng et al., 2022). בכל מקרה של קביעת איסור הטמנה, חשוב ללוות אותו ברגולציה מתאימה ובפתרונות קצה שיאפשרו טיפול בפסולת שנאסר על הטמנתה. איסור הטמנה שאינו מלווה ברגולציה משלימה או בפתרונות קצה אחרים לטיפול בפסולת עלול לגרום לייצוא של פסולת לוחות סולריים, לאגירת לוחות או להשלכה לא חוקית בשטחים פתוחים, כפי שקורה במדינות אוסטרליה שלא קבעו רגולציות משלימות לאיסור ההטמנה (Oteng et al., 2022).

3.2 הבסיס החוקי

3.2.1 האיחוד האירופי

באיחוד האירופי, הדירקטיבה המרכזית המתווה את אופן הטיפול בפסולת לוחות סולריים היא דירקטיבת פסולת חשמלית ואלקטרונית - DIRECTIVE 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE). דירקטיבת עיצוב מקיים - EcoDesign 2009/125/EC הוחלפה על-ידי רגולציה 2024/1781 - חקיקת מסגרת לתנאים לעיצוב מקיים עבור מוצרים בני-קיימא, ביולי 2024.

3.2.1.1 דירקטיבת פסולת חשמלית ואלקטרונית (WEEE)¹⁴

דירקטיבת פסולת חשמלית ואלקטרונית EU/2012/19 נכנסה לתוקף בשנת 2012 והחליפה את הדירקטיבה הקודמת משנת 2002. כחלק מהתיקון, הדירקטיבה החילה את החובה לטפל, נוסף על פסולת של מוצרי חשמל ואלקטרוניקה, גם בפסולת של לוחות סולריים ובהתקנים הנלווים אליהם. מטרת הדירקטיבה היא להגן על הסביבה ועל בריאות האדם על-ידי מניעה או הפחתה של השפעות שליליות הנובעות מהטיפול בפסולת אלקטרונית, וכן על-ידי התייעלות בשימוש בחומרי גלם, תוך תרומה לפיתוח בר-קיימא. דירקטיבה זו מחילה את החובה לטפל בפסולת אלקטרונית, ובכללה גם לוחות סולריים וההתקנים הנלווים אליהם, בכל ארצות האיחוד האירופי, ומטילה את האחריות לכך על היצרנים, על היבואנים ועל המשווקים של מוצרים אלו. כדי לעמוד במטרותיה, הדירקטיבה מחייבת או מעודדת פעולות שונות והקמת מנגנונים עבור היבטים ושלבים שונים של הטיפול בפסולת אלקטרונית, ובכללה לוחות סולריים:

¹⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02012L0019-20180704>

- הגדרת יצרן: מי שמייצר, בעצמו או באמצעות אחר, ציוד חשמלי ואלקטרוני המשוק במדינות האיחוד. מי שמשווק, מוכר או מייבא ציוד חשמלי ואלקטרוני שיוצר באמצעות אחר (אלא אם יוצר על-ידי יצרן שתחת ההגדרה הקודמת) ומי שמוכר מרחוק מוצרים במדינות האיחוד.
- יישום עקרון "אחריות יצרן" בכל שלבי הטיפול בפסולת. חובת רישום יצרנים, יבואנים ומשווקים של מוצרי חשמל ואלקטרוניקה ברשומה ייעודית.
- עיצוב וייצור המוצר - יישום דירקטיבה EC/2009/125 לעיצוב וייצור תומך בשימוש חוזר, בפירוק נוח וביכולת למחזר את המוצר, עבור המוצרים המשוקים במדינה.
- איסוף בהפרדה במקור והקמת מנגנונים שיאפשרו איסוף זה מהמגזר הביתי ומהמגזר המסחרי ללא עלות.
 - הנגשת נקודות ומרכזי איסוף לפסולת אלקטרונית.
 - אחריות על היצרנים להפעיל תוכניות של "קחו-החזירו" בעת רכישת מוצר חדש, בין בעצמם ובין דרך ארגון מייצג.
 - התחשבות בקיום של חומרים מסוכנים והבטחת המשך הטיפול - מחזור או שימוש חוזר.
- הכנה לשימוש חוזר - שמירה על תנאי איסוף, שינוע ואחסון כך שיאפשרו הכנה לשימוש חוזר. קיום מתקנים להשמשה מחדש של פסולת אלקטרונית.
- קביעת יעדי איסוף ומחזור מדורגים - החל מ-2016 ולמשך שלוש שנים יש לאסוף לפחות 45% ממוצע משקל המוצרים ששווקו בשלוש השנים הקודמות. החל מ-2019 יעד האיסוף הוא לפחות 65% ממוצע משקל המוצרים ששווקו בשלוש השנים הקודמות, או לחלופין 85% מהפסולת שיוצרה באותה השנה. עבור לוחות סולריים יעד המחזור והשימוש החוזר הוא 80% ויעד ההשבה 85% מהכמות שנאספה.
- חובת דיווח של יצרנים בנוגע לכמות המוצרים ששווקו, כמות הפסולת שנאספה בכל ערוץ איסוף, כמות הפסולת שטופלה במפעלי השימוש מחדש, המחזור או ההשבה, וכמות הפסולת שהועברה לסילוק. כל דיווח יכול כמות בכניסה למתקן וביציאה מהמתקן.
- הבטחת טיפול הולם - מתקני הטיפול ישתמשו בטכנולוגיה הזמינה המיטבית, תוך התאמת התהליך לסטנדרט טיפול שיפתח מכון התקנים האירופי. כל מתקן טיפול יהיה חייב בהיתר הפעלה. כמו כן תינתן העדפה לאופן הטיפול לפי היררכיית הטיפול בפסולת.
- מימון עבור טיפול בפסולת מהמגזר הביתי - יצרנים מחויבים לממן את האיסוף, הטיפול, ההשבה ואת הסילוק כך שיעשה בסטנדרטים סביבתיים של פסולת ממרכזי איסוף. הדירקטיבה מעודדת את המדינות לחייב יצרנים במימון האיסוף מבתים פרטיים.
 - אחריות מימונית - יצרנים חייבים בערבות למימון הטיפול בפסולת המוצרים עם שיווקם, באמצעות הצטרפות למסגרת מימונית משותפת לטיפול בפסולת, ביטוח מחזור או ערבות בנקאית.
 - אחריות מימונית ל"פסולת היסטורית" (פסולת ששווקה לפני 13 באוגוסט 2005) - האחריות המימונית תחול על כלל היצרנים בשוק, לפי חלקם היחסי בו. סעיף זה תוקן בהמשך, והאחריות היא מרגע החקיקה.

- מימון עבור טיפול בפסולת מהמגזר המסחרי - יצרנים מחויבים לממן את האיסוף, הטיפול, ההשבה ואת הסילוק כך שייעשו בסטנדרטים סביבתיים. מדינות רשאיות להחליט מי יממן את הטיפול בפסולת היסטורית - יצרנים או משתמשים. ובכל מקרה, במגזר המסחרי יצרנים ומשתמשים רשאים להגיע להסדרי מימון מוסכמים ביניהם.
 - יידוע ציבור - מדינות רשאיות לחייב יצרנים לשקף לציבור את עלויות שלבי הטיפול בפסולת כבר במעמד הקנייה, ונוסף על כך ליידע על:
 - איסור השלכת הפסולת כפסולת מעורבת וחייב הפרדה.
 - מנגנוני הטיפול בפסולת הקיימים כולל מערך איסוף, הסבר לגבי אופן ההפרדה במקור וכד'.
 - האחריות החלה על הצרכן וחלקו בתהליך ועידודו לקחת בו חלק.
 - השלכות של אי-טיפול בפסולת על בריאות האדם והסביבה.
 - יידוע שרשרת הטיפול בפסולת - חובה לשתף את מפעלי הטיפול באופן המתאים ביותר לטיפול בפסולת חדשה בשוק, בין לצורך הכנה לשימוש חוזר ובין למחזור ולפירוק.
 - חיוב המדינות לקבוע מנגנוני ענישה למפרי ההתחייבויות הקבועות בחוק.
- הדירקטיבה עודכנה כמה פעמים. בעדכון הראשון מ-2012 לוחות סולריים סווגו בקטגוריה 4 - ציוד גדול. סיווג זה יצר קושי לעמוד ביעדי האיסוף עקב זמן החיים הארוך מאוד של הלוח הסולרי יחסית לשאר המוצרים בקטגוריה. ב-2019, בהנחיות החישוב של שיעורי המחזור והדיווח¹⁵ נקבע שהדיווח והעמידה ביעדי הטיפול בפסולת לוחות סולריים ידווחו בנפרד תחת קטגוריה 4b. בשנת 2023, בעקבות פסיקה של בית הדין האירופי, תוקף¹⁶ סעיף 12 בדירקטיבה כך שחובת מימון הטיפול בלוחות סולריים לא תחול רטרואקטיבית משנת 2005, אלא מתיקון הדירקטיבה ב-2012. כיום הדירקטיבה נבחנת מחדש, לצורך התאמתה לצרכים ולטכנולוגיות של העת הנוכחית.

כלי הערכת כמות הפסולת של מוצרי חשמל ואלקטרוניקה בכל שנה

כאמור, אפשר לעמוד ביעדי האיסוף בשני אופנים, או באמצעות שיעור מהכמות המשווקת, או באמצעות שיעור מהפסולת הנוצרת. על מנת להיערך לאיסוף שיעור מהפסולת, יש להעריך את כמות הפסולת שתיווצר באותה השנה. המודל שמשמש את מדינות האיחוד להערכת כמות הפסולת שנוצרת מדי שנה מבוסס על התפלגות וייבול. הערכה זו נקבעת על בסיס משקל המוצרים שנמכרו עד אותה שנה ועל בסיס פרמטרי צורה ופיזור רלוונטיים לכל קטגוריה שמופיעה בדירקטיבת הפסולת האלקטרונית.¹⁷

3.2.1.2 רגולציה 2024/1781 - חקיקת מסגרת לתנאים לעיצוב מקיים עבור מוצרים בני-קיימא¹⁸

חקיקה זו חלה על כל מוצר (למעט חריגים), ובכללם לוחות סולריים. מטרת החקיקה היא לקבוע תנאים של תכנון ועיצוב מקיים לכל מוצר שמשווק בשוק, כך שטביעת הרגל הפחמנית של מוצרים תקטן לאורך כל חיי המוצר. התנאים לעיצוב

¹⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1593162645597&uri=CELEX:32019D2193>

¹⁶ E-waste - Council amendments, 2023

¹⁷ .WEEE calculation tool Manual

¹⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1781&qid=1719580391746>

מקיים ייקבעו עבור קטגוריות מוצרים, או מוצרים ספציפיים, ויכללו בין השאר את הפרמטרים הבאים: עמידות, מהימנות, יעילות אנרגטית, יכולת לשימוש מחדש (reusability), יכולת לתיקון המוצר (repairability), אפשרות לתחזוקה שוטפת של המוצר, שיעור החומר הממוחזר, יכולת לעבור מחזור (recyclability), השפעה סביבתית והיקף הפסולת הצפוי. כדי לקבוע את התנאים הללו תאמץ הנציבות תוכניות עבודה של שלוש שנים עבור פיתוח התנאים לכל מוצר או קבוצת מוצרים. תוכנית העבודה עבור לוחות סולריים אמורה להסתיים בשנת 2024.¹⁹

במסגרת חקיקה זו חלה חובה ליצור דרכון דיגיטלי עבור כל מוצר באופן שיהיה נגיש: סימון על גבי המוצר, על גבי האריזה או על גבי מסמך מצורף במעמד הקנייה. הסימון חייב להיות קריא באמצעים דיגיטליים, כך שיוביל לכלל המידע. המידע יכול להינתן עבור דגם, אצווה או עבור מוצר בודד. נוסף על כך, המידע חייב להיות נגיש עבור כל שחקן בשרשרת הערך, לפי ההרשאות שקיבל. מידע שיהיה חשוף למפעל המחזור לא בהכרח יהיה חשוף למשתמש.

הנציבות האירופית תקים מרכז רשומות דיגיטלי עבור דרכוני המוצר ותנהל אותו. כמו כן היא תקים ותנהל פורטל אינטרנטי שינגיש לכלל השחקנים את המידע בדרכון הדיגיטלי, כך שיהיה אפשר לחפש ולהשוות מידע באופן חופשי. המידע על הדרכון יכלול: מידע מזהה ייחודי על היצרן והיבואן (אם המוצר מיובא), אופן ההתקנה, השימוש, התחזוקה והתיקון של המוצר. הדרכון יכלול מידע גם בנוגע לאפשרויות ולדרכי האיסוף לתיקון או למחזור, ומידע בנוגע למפעלי טיפול, פירוק, שימוש חוזר, תיקון ומחזור, וכן מידע בנוגע לנוכחות חומרים מסוכנים או חומרים מעוררי דאגה (substances of concern) במוצרים. כדי לאפשר לצרכן לקבל החלטה מושכלת לגבי הרכישה, המידע בדרכון יציג תמונה של ביצועי המוצר עבור פרמטרים שונים כמו עמידות ומהימנות, קלות התחזוקה והיכולת לתקן את המוצר, האפשרות לשימוש חוזר, עיצוב מוטה מחזור, טביעת רגל פחמנית ועוד.

סדרת מחקרים של מרכז המחקר של הנציבות האירופית בוחנת את הקריטריונים לקביעת עמידה בפרמטרים השונים. Polverini ואח' (2022) מציעים קריטריונים ליצירת מודל דירוג אנרגטי עבור לוחות סולריים. אינדקס היעילות האנרגטית, שמוצע במחקר, מודד את היעילות בשני אופנים: היחס בין האנרגיה שלוח בודד מייצר בשנה הראשונה לבין שטח הלוח, או היחס בין האנרגיה שהמערכת הסולרית מייצרת לאורך חיי המערכת לבין השטח של המערכת. במחקר נוסף, Polverini ואח' (2021) מציעים תנאים עבור עמידות, יכולת תיקון ויכולת המחזור של לוח סולרי. אינדקס המציינ את היכולת של לוח לעבור מחזור יכול להוות בסיס לקביעת תשלום דיפרנציאלי לגופי היישום: עבור לוח המתמחזר בקלות ישלם היצרן דמי טיפול נמוכים יותר (Polverini et al., 2024).

3.2.1.3 גרמניה

גרמניה היא אחת המדינות המובילות בעולם מבחינת ההספק המותקן, אחרי סין, ארצות הברית ויפן, ובה 5.2% מההספק המותקן העולמי לשנת 2022. באותה שנה סיפקו לוחות סולריים 11.7% מהאנרגיה בתמהיל החשמל של גרמניה (Fraunhofer, 2024). גרמניה היא אחת המדינות הראשונות שהתקינו לוחות סולריים בהיקפים גדולים: הלוחות הסולריים הראשונים הותקנו בה כבר בסוף שנות השמונים של המאה העשרים, כך שצפויה לה התמודדות עם היקפי פסולת לוחות הולכים וגדלים בשנים הקרובות (IEA, 2024). בדומה לישראל, ההתקנים הקטנים בהספק של עד 20KW הם 82% מסך ההתקנות, אך בשונה מישראל, התקנים אלו מספקים נתח גדול יותר מכלל ההספק המותקן - 25% (Fraunhofer, 2024).

¹⁹ https://energy.ec.europa.eu/publications/ecodesign-and-energy-labelling-working-plan-2022-2024_en

בגרמניה קיימים חמישה מפעלי מחזור ללוחות מבוססי סיליקון המופעלים על-ידי חברה אחת - Reiling, ומפעל אחד ללוחות סרט דק מסוג CdTe המופעל על-ידי יצרן לוחות מסוג זה - First Solar. מפעל זה, המשרת את כל מדינות האיחוד, משתמש בתוצרי המחזור לייצור לוחות חדשים. לוחות מבוססי סיליקון מטופלים באמצעים מכניים ותוצריהם משמשים ליישומי תעשייה אחרים (IEA, 2024). המפעל החדש של Reiling מסוגל למחזר 10,000 טונות של לוחות סולריים בשנה כבר כעת, ונבנה כך שיוכל למחזר עד 50,000 טונות בשנה. בשנת 2023 שיווקו 336 יצרנים ויבואנים בשוק הגרמני לוחות סולריים במשקל של 442,531 טונות. בשנה זו נאספו 4,676 טונות לוחות בלבד, אך הערכת מומחים בתחום היא שרק 10% מכלל הפסולת נאספת בערוצים החוקיים, ורובה זולגת להשלכה לא חוקית או לייצוא (IEA, 2024).

מסגרת חוקית

המסגרת החוקית לטיפול בפאנלים סולריים מעוגנת בחוק²⁰ ElektroG מ-2005, המסדיר את הטיפול בפסולת אלקטרונית. החוק תוקן ב-2015 בהתאם לשינויים בדירקטיבה EU/2012/19 כך שיחול גם על לוחות סולריים, נכנס לתוקף בשנת 2016 ותוקן שוב בשנת 2022. החוק מטיל את האחריות על היצרנים במסגרת רגולטורית של אחריות יצרן עבור כל שלבי הטיפול בפסולת של מוצרים שיוצרו על-ידם ושיווקו בשוק הגרמני. יעדי האיסוף והמחזור בחוק תואמים את יעדי הדירקטיבה. גרמניה בחרה לחשב את יעדי האיסוף כשיעור מתוך הכמות ששווקה, ולא מתוך הפסולת שנוצרה כפי שהדירקטיבה מאפשרת. החוק מחייב הקמת מסלקה שתפקידה לחשב את נתח השוק של כל יצרן כדי לתת מענה לאחריות יצרנים ל"פסולת היסטורית" בשוק, ולאיסוף מהרשויות המקומיות.

אחריות השחקנים השונים בחוק

- יצרנים - האחריות מוטלת הן במישור התפעולי בנוגע לאיסוף, ארגון ואחסון, מיון, פירוק, שימוש חוזר, מחזור והשבה, והן במישור המימוני: מימון המערך כולו. כמו כן חלות על היצרנים חובות רישום בגוף המתאם, דיווח על הכמויות המשווקות של המוצרים, סימון המוצרים ודיווח על כמויות הפסולת לאורך שרשרת הטיפול. על היצרן מוטלת גם חובת העמדת ערבות פיננסית.
- משווקים - משווקים של מוצרי חשמל ואלקטרוניקה שמספקים מוצרים, מחויבים לקחת בחזרה מוצרים בהיקף דומה ובאותו השימוש, אם הצרכן מבקש.
- רשויות מקומיות - מחויבות לקבל פסולת של מוצרי חשמל ואלקטרוניקה בנקודות איסוף עירוניות ולהשתמש בכלי אצירה ייעודיים לכל סוג פסולת בנפרד. חלה חובה ליידע את הציבור בנוגע לנקודות ההחזרה לפסולת ולשימוש חוזר, ובנוגע להשלכות של אי-טיפול או טיפול לא מורשה בפסולת אלקטרונית על בריאות האדם והסביבה.
- מפעלי טיפול - חייבים בדיווח ובהיתר.
- צרכנים / משתמשים - פינוי הפסולת לנקודות איסוף. במקרה שבהם משתמשים מעוניינים לייצא את הלוחות לשימוש חוזר, עליהם להוכיח שהם פועלים ולא בגדר פסולת.

²⁰ https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015

גוף מתאם

קיים גוף מתאם יחיד על-פי חוק Stiftung Elektro-Aitgeräte-Register (EAR) שמאגד את הרישום של יצרנים ושל מוצרי אלקטרוניקה, ובכללם לוחות סולריים שנמכרים. גוף זה מפקח על הליכי הטיפול בפסולת ומשמש כמסלוקה עבור השחקנים הרלוונטיים. החובה להקים את הגוף המתאם חלה על היצרנים. תפקידים נוספים של הגוף המתאם:

- פרסום רשימה לציבור של כל היצרנים ונציגיהם.
- פרסום רשימה של כל מפעלי הטיפול הראשוני.
- חישוב כמות הפסולת שעל כל יצרן לאסוף בהתבסס על דיווחי היצרנים: את הכמות שעליו לאסוף מהרשויות המקומיות ואת הכמות של הפסולת ההיסטורית שעליו לאסוף בהתבסס על נתח השוק שלו.
- חלוקת האיסוף באופן הוגן מבחינה גאוגרפית בין כל היצרנים.
- דיווח שנתי לרגולטור על יישום החוק והעמידה ביעדים.
- הקמת ועדה מייצגת שתורכב מנציגי היצרנים, המשווקים, רשויות טיפול בפסולת, נציגי ממשל, נציגי תעשיית הפסולת, איגודי צרכנות ואיגודי סביבה.

יצרנים רשאים לטפל בפסולת בעצמם, אך לרוב את האיסוף והטיפול בפסולת מבצעים תאגידי איסוף שונים בשם היצרנים והיבואנים. רוב התאגידים נותנים מענה לכל סוגי הפסולת האלקטרונית, אך קיימים תאגידים מתמחים עבור טיפול בפסולת לוחות סולריים. על-פי החוק, חובת הדיווח על כמויות האיסוף והטיפול לפי זרמים (שימוש חוזר, מחזור, השבה, סילוק) מוטלת על היצרנים, אך תאגידי האיסוף מבצעים בפועל את הדיווח בשמם.

מימון האיסוף והטיפול בפסולת

יצרנים מחויבים ברישום בגוף המתאם וברישום של כל מוצר חשמלי המיועד לשיווק בגרמניה. היצרנים משלמים דמי רישום עבור כל סוג מוצרים המיועד לשיווק ועבור בדיקת הערבות הפיננסית למוצרים המשווקים למגזר הביתי.

בגרמניה, עלות הטיפול אינה שקופה לרוכשים אלא מגולמת באופן חלקי או מלא במחיר המוצר. היצרנים והיבואנים משלמים דמי טיפול מינימליים לחברה המטפלת לפי כמות המוצרים ששווקו בשוק, ובנוסף סכום נוסף עבור הטיפול בפסולת, לפי כמות הפסולת שטופלה.²¹ החוק מבטיח את הטיפול בפסולת אלקטרונית במקרה שבו היצרן מפסיק לפעול ויוצא מהשוק, באמצעות ערבות פיננסית (ערבות בנקאית, או ביטוח) שמעמיד היצרן עבור כל מוצר למגזר הביתי שנמכר בשוק לראשונה. תוקף הערבות נקבע לפי אורך החיים הצפוי של המוצר.²² סכום זה משולם בנפרד מהתשלום לתאגיד האיסוף עבור הטיפול השוטף, וכך נוצר מצב של תשלום עודף שאינו משמש לטיפול במוצרים, אלא במקרה של הפסקת פעילות.

איסוף פסולת מהמגזר הביתי

איסוף פסולת מהמגזר הביתי נעשה במוקדי איסוף עירוניים ללא תשלום. בעת הקנייה מצורף לתשלום אישור על קבלת הלוחות חנים בתום השימוש, והמימון מתחלק בין הרשות המקומית ליצרנים. החוק מגדיר פסולת מהמגזר הביתי כפסולת בכמות "נורמלית". כמות שנחשבת ביתית נעה בין 20 ל-50 לוחות (LAGA, 2017). לעומת זאת, דוח של הסוכנות הבינלאומית

²¹ שיחה עם מנכ"ל ארגון אחריות יצרן - PVCYCLE, אפריל 2024

²² <https://www.elektrogesetz.de/umsetzung/kosten/#finanzielle-garantie>

לאנרגיה מעריך ש-10 עד 20 לוחות הם כמות אופיינית לאיסוף ללא עלויות נוספות ממגזר זה (IEA, 2024). האיסוף מהמגזר הביתי נעשה בנקודות איסוף לפסולת אלקטרונית ברשויות המקומיות, והאחריות להבאת הפסולת לנקודות אלו היא באחריות הצרכן. את הלוחות הסולריים יש לאסוף בנפרד מפסולת אלקטרונית אחרת במכלים ייעודיים. נכון ל-2022 קימות כ-1,700 נקודות החזרה במרחב העירוני (IEA, 2024).

איסוף פסולת מהמגזר המסחרי

לפי התיקון החדש לחוק משנת 2022, יצרנים מחויבים לספק ולאשר תוכניות "קחו-החזירו" ומערכי טיפול בגוף המתאם עבור המגזר המסחרי. המשתמשים חייבים להעביר את הלוחות לטיפול דרך היצרנים או תאגידי האיסוף בשם היצרנים, או באופן עצמאי למתקני הטיפול. כל שאר מערכי הטיפול ממומנים על-ידי היצרנים. בשונה מהמגזר הביתי, הטיפול ב"פסולת היסטורית" ממומן על-ידי המשתמשים.

טיפול בפסולת

הלוחות מועברים מנקודות האיסוף למפעלי טיפול ראשוני לבדיקת התאמתם לשימוש חוזר. אם הם מתאימים לשימוש חוזר, הלוחות מסומנים ומועברים להכנה לשימוש חוזר. אם לא, הם מועברים למחזור או להשבה, בתלות במצב הלוח. דוח של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה (2024) שנערך בהמשך לשתי סדנאות בשיתוף חוקרים ומומחים מהתעשייה בגרמניה, מצא שישנם ליקויים במערך האיסוף מהמגזר הביתי של לוחות סולריים, בהם:

- צוות לא מיומן הגורם למיון, אחסון ושינוע לא מיטביים. שברים בשיעור גבוה ונזק נגרמים ללוחות שהיה אפשר להשמיש מחדש לו היו מטופלים על-ידי צוות מיומן.
- חלוקת האחריות לגורמים שונים במגזר הביתי עלולה ליצור תנאי איסוף שונים בין רשות לרשות וליצור עלויות, למרות החובה לקבל את הלוחות בחינם. עלות הסרת הלוחות ושינועם באופן פרטי לנקודת איסוף עירונית עלולה להניא משתמשים ביתיים מהשתתפות במערך האיסוף.
- הציבור לא מודע דיו לחובה להביא לוחות לנקודות איסוף עירוניות, וחלק מהלוחות נאגרים במחסנים.
- איסוף של מעל 10-20 לוחות עלול להצריך תשלום נוסף, ולכן צרכנים נמנעים מלהחזיר אותם.
- כמות הפסולת שנאספת בערוצים החוקיים קטנה מהכמות הצפויה, וזאת בשל השלכה פיראטית, יצוא לא חוקי ואגירה של לוחות במחסנים פרטיים.
- תדירות האיסוף מנקודות איסוף עירוניות היא 48 שעות מרגע הדיווח, ללא התחשבות בכמות לפינוי, כך שלעתים משנעים למפעל מספר קטן של לוחות ותורמים לעלויות שינוע גבוהות.
- נוסף על כך, אין מענה למקטע שבין ההסרה מהגג לבין ההגעה לנקודת האיסוף העירונית, כך שהטיפול נעשה באמצעות אנשים פרטיים שאינם מנוסים בהסרה ובהובלה של לוחות סולריים.

3.2.1.4 צרפת

צרפת היא המדינה הרביעית באירופה מבחינת הספק מותקן של אנרגיה פוטו-וולטאית, אחרי גרמניה, איטליה וספרד. בשנת 2023, יותר מ-13% מכלל ההספק המותקן במדינה מקורו בהספק סולרי (IRENA stats tool). בשנים 2015-2023 נאספו בצרפת יותר מ-27,000 טונות של פסולת לוחות סולריים.

מסגרת חוקית

המסגרת החוקית לטיפול בלוחות סולריים מעוגנת בחוק Décret n° 2014-928²³ שנכנס לתוקפו ב-2014 ומסדיר את הטיפול בפסולת אלקטרונית על-פי הדירקטיבה האירופית. החוק מטיל את האחריות על היצרנים במסגרת רגולטורית של אחריות יצרן עבור כל שלבי הטיפול בפסולת של מוצרים שיוצרו על-ידם ושוקו בשוק הצרפתי. יעדי האיסוף והמחזור בחוק תואמים את יעדי הדירקטיבה. החוק הצרפתי מאפשר את שתי הגישות המוצעות בדירקטיבה לחישוב יעדי האיסוף של פסולת אלקטרונית: 65% מממוצע הפסולת ששוקה בשלוש השנים הקודמות, או לחלופין, 85% מהפסולת שתיוצר באותה שנה. אף ששתי האפשרויות מופיעות בחוק, בפועל החישוב לצורך עמידה ביעדים נעשה לפי 65% מהכמות המשווקת. עבור לוחות סולריים אין יעדי איסוף, וארגון אחריות היצרן מחויב להיענות לכל בקשה של פינני לוחות (Baldé et al., 2020).

ארגון אחריות יצרן

בצרפת הוכר ארגון אחריות יצרן אחד: Soren (לשעבר PVCYCLE) - גוף ללא כוונות רווח בבעלות שבעה בעלי עניין, בהם יצרני אנרגיה סולרית, האיגוד לאנרגיה מתחדשת, יצרנים וספקי חשמל.²⁴ ארגון זה אחראי, בשם היצרנים, על האיסוף והמחזור של לוחות סולריים, ומקבל הכרה לשש שנים באמצעות צו מיוחד. הצו האחרון²⁵ הכיר ב-Soren כארגון אחריות יצרן לטיפול בפסולת לוחות סולריים עד סוף שנת 2027, והוא פועל בנפרד מהגופים שמטפלים בפסולת אלקטרונית. הארגון המוכר מחויב לכנס אספת בעלי עניין להתייעצויות שונות. האספה מורכבת מיצרנים, מפעלי טיפול בפסולת, שלטון מקומי, ארגוני הגנת הסביבה וארגוני צרכנים.

מפעלי מחזור

כל מי שמטפל בפסולת לוחות סולריים חייב להתקשר בחוזה עם הארגון המוכר (Baldé et al., 2020). בצרפת פועלים שלושה מפעלי מחזור שקיבלו רישיון מהארגון המוכר. שלושת המפעלים מטפלים בפסולת לוחות מבוססי סיליקון, ואילו לוחות סרט דק מופנים למפעל בגרמניה. מפעל בצפון צרפת (Galoo) מקבל לוחות סולריים שלוח הזכוכית בהם שבור ותהליך המחזור בו הוא תהליך מכני של גריסה ולאחריה מיון של החומרים בשיטות שונות. לפי Soren, שיעורי ההשבה של המפעל הוא 95%. לא נמצאו נתונים על אחוז הטהורות של החומרים המתקבלים (IEA, 2022). לוחות שהזכוכית בהם שלמה מופנים למפעל אחר (Envie2e), ובו מתבצעים תהליכי הכנה הכוללים הסרת מסגרת האלומיניום ולוח הזכוכית. לוח הזכוכית מופרד בשלמותו באמצעות טכנולוגיית סכין חם. שאר הלוח מועברים להמשך טיפול במפעל אחר (ROSI) בשני שלבים - שלב תרמי ושלב כימי. תוצרי המחזור הם באיכות גבוהה ובשיעור טהורות גבוה (Soren web site). מפעל נוסף של ROSI, בעל קיבולת טיפול ב-10,000 טונות לוחות לשנה, נפתח ביוני 2023 ומסוגל למחזר 99% מכלל מסת הלוח. כשלושה חודשים לאחר פתיחתו החל למכור תוצרי מחזור, בהם סיליקון, כסף ונחושת.

²³ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000029387124>

²⁴ <https://www.soren.eco/statuts-modele-gouvernance-soren>

²⁵ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045331829>

מימון האיסוף והטיפול בפסולת

כל רוכש של לוח סולרי חייב בתשלום אגרה כבר במעמד הקנייה עבור הטיפול בלוח בסוף חייו. בין שהרוכש הוא חברה מסחרית ובין שהוא אדם פרטי לשימוש ביתי, עליו לשלם את אגרת המחזור לפי סוג הלוח שנרכש. אגרת המחזור מופיעה באופן שקוף בחשבונית הקניה (visible fee) ומגלמת את עלות הטיפול בלוח. התעריפים קבועים ומפורסמים וניתנים לשינוי לפי הצורך ותנאי השוק.²⁶ אגרת המחזור על לוחות שקשה יותר למחזר אותם גבוהה יותר מלוחות שקל יותר למחזר, בין שהסיבה לכך היא תהליך המחזור ובין שהיא מרחקי השינוע ומתקני הטיפול.

לארגון אחריות היצרן יש קרן שאליה מועברים הכספים, כדי להבטיח את הטיפול בלוחות בעתיד. הקרן אינה באחריות המדינה, אך נציג של משרד האוצר יכול לשבת כצופה בכל ישיבת דירקטוריון ולהתעדכן באופן ניהול הקרן והשקעותיה. זווית השפעה נוספת של המדינה על הבטחת הכספים לטיפול עתידי בפסולת היא במעמד אישור התוכנית הכלכלית של ארגון אחריות היצרן - מדי תקופת הכרה ובזמן אישור תוכניות הפעולה השנתיות. בצרפת, הארגון נדרש להחזיק לפחות 8% מהעלות הדרושה לטיפול בכלל הלוחות הסולריים בשוק.²⁷

איסוף פסולת מהמגזר הביתי והמסחרי וטיפול בה

בצרפת, מנגנון האיסוף במגזר הביתי לא נעשה דרך נקודות איסוף עירוניות. ארגון אחריות היצרן משתמש בשירותיהם של מתקיני לוחות או חברות טיפול בפסולת שרכשו ידע בהסרה ובהובלה של לוחות, כך שיגיעו למפעלי הטיפול במצב האופטימלי. בצרפת יש כיום יותר מ-300 נותני שירות בתחום האיסוף, שעוברים הכשרה על-ידי Soren.²⁸ המשתמש אינו משלם תשלום נוסף על ההסרה והאיסוף, מכיוון שתשלום זה בוצע במעמד הרכישה. אם המשתמש מחליף לוחות, הוא זכאי לאיסוף במסגרת "קחו-החזירו" באחריות המפיץ של הלוחות. איסוף במגזר המסחרי נעשה באופן דומה, באמצעות פנייה לארגון אחריות היצרן. על-פי הכמות שנאספה, צרפת עמדה ביעדי המחזור לשנת 2018, ולפי נתוני Soren הושגו יעדי המחזור גם בשנים שלאחר מכן (IEA, 2022).

בצרפת קיימת הבחנה בין מוצרים המיועדים למגזר הביתי לבין מוצרים המיועדים למגזר המסחרי. עם זאת, כל מוצר בשימוש תעשייתי שזהה למוצר בשימוש ביתי, נחשב מוצר למגזר הביתי (Baldé et al., 2020). באיטליה, לעומת זאת, החוק Decreto Legislativo n. 49/2014, מבחין בין המגזר הביתי למגזר המסחרי לפי מההספק המרבי של המערכת. שימוש ביתי מוגדר למערכות שההספק המרבי שלהן נמוך מ-10KW, ומערכות שההספק המרבי שלהן גבוה מערך זה, מוגדרות מערכות לשימוש מסחרי.

3.2.1.5 פולין

פולין הטמיעה את דירקטיבת הפסולת האלקטרונית האירופית בחוק מקומי²⁹ בשנת 2015 - USTAWA o zużytym sprzęcie - 2015. החוק (סעיף 20) תאמו את הדירקטיבה - 65% מממוצע משקל המוצרים ששווקו בשלוש שנים שקדמו או 85% מכלל הפסולת שיוצרה באותה שנה. החוק תוקן³⁰ בסוף שנת 2022 והסדיר את שיטות החישוב עבור יעדי האיסוף שנכנסו לתוקפם בראשית 2023. במסגרת התיקון, יעדי האיסוף עבור פסולת אלקטרונית, למעט

²⁶ <https://www.soren.eco/wp-content/uploads/2023/06/Soren-Bareme-des-eco-participations-2020.pdf>

²⁷ שיחה עם מנכ"ל ארגון אחריות יצרן - PVCYCLE, אפריל 2024

²⁸ שיחה עם מנכ"ל ארגון אחריות יצרן - PVCYCLE, אפריל 2024

²⁹ <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/zuzyty-sprzet-elektryczny-i-elektroniczny-18233050>

³⁰ <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20220002704/O/D20222704.pdf>

פסולת לוחות סולריים, ייגזרו מממוצע משקל המוצרים ששווקו בשלוש השנים שחלפו, ויעמדו על 65% מהממוצע. יעדי האיסוף עבור פסולת לוחות סולריים יעמדו על 85% מכלל הפסולת שנוצרה באותה שנה. אופן החישוב של כמות הפסולת שתיוצר כל שנה מופיע בנספח 2 לתיקון החוק.

החישוב אינו תואם את החישוב לפי הכלי שפרסם האיחוד, אלא מניח שיעור פסולת קבוע של 0.2% בכל שנה החל בשנת 2025. אופן החישוב נתון בנוסחה: $(R_{2019} + R_{2020} + \dots + R_n) \times a_n$, כך ש- R_n הוא משקל הלוחות שנמכרו בשנה כלשהי n , הוא מקדם עבור כל שנה n . עבור שנת 2022 המקדם הוא 0.0005, עבור 2023 - 0.001, עבור 2024 - 0.0015 והחל בשנת 2025 - 0.002. נוסחה זו אינה מתחשבת במשקל הלוחות שהותקנו לפני 2019, ומעריכה קצב כשל קבוע בכל שנה.

3.2.2 שאר העולם

3.2.2.1 טייוואן

טייוואן שינתה את מדיניות האנרגיה שלה בשנת 2019, כך שתהיה מאופסת אנרגטית עד 2050.³¹ מקורות האנרגיה המתחדשת בטייוואן הם רוח ושמשי, ולכן קצב ההתקנות של שתי הטכנולוגיות עלה בחדות. שינוי זה הצריך שינוי מדיניות חד ויישום מהיר. לכן נקבעה מדיניות שעל-פיה צרכן הלוחות, שהוא גם יצרן האנרגיה, אחראי על מימון הטיפול בסוף חיי המוצר, וחברת החשמל, רוכשת האנרגיה, משלמת מענק עידוד מחזור לבעל הלוחות.³²

רוכש הלוחות מחויב להירשם במאגר ממשלתי³³ (PVIS) לאחר הקנייה ולשלם אגרת מחזור בפריסה לעשר שנים. הסכום מועבר לקרן בניהול משרד הכלכלה, ועומד על 1,000 דולרים טייוואניים לכל קילו-וואט.³⁴ כספי הקרן מועברים למשרד להגנת הסביבה לשם מימון הטיפול בפסולת הלוחות הסולריים בשלב סוף החיים. נוסף על כך, כספי הקרן מממנים מחקר ופיתוח של טכנולוגיות ייצור מוטות מחזור ושל טכנולוגיות מחזור מתקדמות לשימור ערך כלל החומרים בלוחות. חברת החשמל משלמת לצרכן מענק עידוד מחזור בגובה 0.0656 דולר טייוואני על כל יחידת אנרגיה קילו-וואט שעה שהיא רוכשת במסגרת תעריף הייצור.³⁵ מענק עידוד כזה מעודד את המשתמשים לרכוש לוחות יותר יעילים.

בשלב סוף החיים רוכש הלוחות מחויב ברישום נוסף במערכת PVIS. המערכת מזהה את הרוכש כמי ששילם אגרת מחזור בעת הרכישה ומספקת מידע והכוונה עבור תהליך הסילוק של הלוחות. רוכש הלוחות אחראי להסרת הלוחות מהגג באמצעות מומחה ולמימון פעולת ההסרה. משתמשים פרטיים שמסירים פחות מחמישים לוחות מעבירים את הלוחות לטיפול באמצעות הרשות המקומית. משתמשים שמסירים 50 לוחות ומעלה זכאים לשירות הובלה מטעם המערכת.

3.2.2.2 יפן

ביפן, רוב הפסולת של לוחות סולריים עד 2018 נבעה מחשיפה לאירועי קיצון ואסונות טבע (Komoto, 2018). עם זאת, המדינה נערכת לעלייה בהיקפי הפסולת גם עקב הפסקת שימוש מסיבות טכניות או כלכליות. פסולת של לוחות סולריים ביפן מוגדרת פסולת תעשייתית, ולכן מנוהלת תחת חוק הפסולת הכללי Waste Management and Public Cleaning Act

³¹ https://en.mofa.gov.tw/News_Content.aspx?n=1575&s=96852

³² שיחת ועידה עם נציגי המשרד להגנת הסביבה הטאיוואני ותכתובות דואר אלקטרוני, מאי 2024

³³ <https://pvis.moenv.gov.tw/pvis/>

³⁴ שם, מאי 2024

³⁵ https://www.moeaea.gov.tw/ECW/main/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=10867

(IRENA, 2016). אף שאין ביפן חקיקה ייעודית לטיפול בפסולת לוחות סולריים, המדינה פועלת בכמה מישורים להקטנת כמויות הפסולת ולמימון הטיפול בה. כדי להקטין את כמויות הפסולת הצפויות, המדינה מעודדת את השימוש החוזר בלוחות סולריים, בעיקר מהתקנים גדולים, באמצעות קובץ הנחיות מפורט להשמשה בטוחה של הלוחות.³⁶ כדי להבטיח טיפול נאות בלוחות שלא ניתן להשמיש, המשרד להגנת הסביבה פרסם קובץ הנחיות מפורט לאופן הטיפול והמחזור המיטביים.³⁷ כמו כן נבנה מנגנון מימוני שיבטיח את הטיפול בסוף חיי הלוחות, בעת הפיכתם לפסולת.

ביפן האחריות המימונית לטיפול בפסולת לוחות סולריים מוטלת על הצרכן, שהוא גם יצרן האנרגיה. המנגנון המימוני מבוסס על קרן "Demolition Reserve Fund" המנוהלת על-ידי ארגון חוץ-ממשלתי שאמון על מימון הטיפול בלוחות בסוף השימוש. התקנים מעל 10KW מחויבים להפריש כספים לקרן מתוך תעריף הייצור שלהם. התקנים בהספק גבוה מ-10KW ועד 50KW ישלמו 1.33 ין ל-KWh, והתקנים מעל 50KW ישלמו 0.66 ין ל-KWh (METI, 2021), (IEA, 2022).

המשרד להגנת הסביבה מעדכן אחת לכמה שנים שני מסמכים משנת 2016: הנחיות לטיפול בפסולת לוחות סולריים והנחיות לשימוש חוזר בלוחות סולריים. המסגרת החוקית הרלוונטית מבוססת על החוק לסחר בעתיקות - Antique Dealings Act ועל החוק לטיפול בפסולת וניקיון המרחב הציבורי - Waste Management and Public Cleansing Act. עיקר ההנחיות נוגעות להשמשת הלוחות שאפשר להשמיש לשימוש חוזר. הנחיות אלו נוגעות להיקף הבדיקות ולסוג הבדיקות שיש לבצע, לאופן ביצוע הבדיקה - כולל דוגמאות, הנחיות לאחסון ולאריזה כך שלא ייגרם נזק ללוח.

הנחיות נוספות נוגעות למידע שיש להעביר למפעלי השימוש החוזר: שם היצרן, הדגם, סיבת ההוצאה משימוש, שם המוכר של הלוחות לשימוש חוזר, תאריך ההתקנה הראשונית ותאריך ההוצאה משימוש. את המידע יש להעביר לקונה של הציד המשומש. המידע הזה נגיש גם למכס, שבסמכותו לוודא שלא מייצאים את הלוחות שאינם מתאימים לשימוש חוזר. נוסף על כך, המסמך מכיל הנחיות עבור הרוכשים של לוחות לשימוש חוזר ומדריך לגבי סוג הבדיקות שעליהם לערוך כדי לוודא את תקינותם. כמו כן, הרוכשים מונחים לשמור תיעוד של בדיקת יעילות הלוח ולבקש אחריות על הלוח שרכשו.

3.2.2.3 ארצות הברית

בארצות הברית, כל מדינה קובעת לעצמה את מדיניות הטיפול בפסולת, ולכן אין מדיניות פדרלית בנושא זה. מדינת וושינגטון היא היחידה שחוקקה בשנת 2017 חוק (Senate Bill 5939) בנוגע לטיפול בפסולת לוחות סולריים. עוד לפני שהחוק נכנס לתוקף הוא נדחה, תוקן מחדש (H.B. 2645) בשנת 2020 וייכנס לתוקף בשנת 2025. האחריות בחוק מוטלת במשותף על בעלי עניין שונים, אך האחריות למימון ולהפעלה של תוכנית "קחו-החזירו" ולמימון תהליך המחזור היא של היצרנים. יצרן רשאי להצטרף לארגון שמייצג יצרנים לצורך יישום החוק, אך החובות בחוק עדיין מוטלות על היצרן עצמו.

חובות היצרנים:

- מימון תוכנית "קחו-החזירו" והנגשתה בכל רחבי המדינה.
- חובה לקבל את כל הלוחות שנמכרו מיום פרסום החוק.
- עמידה ביעדי שימוש חוזר או מחזור של 85% מהלוחות שהתקבלו בחזרה.

³⁶

³⁷ המשרד להגנת הסביבה היפני - מדריך לקידום מחזור נאות בלוחות סולריים <https://www.env.go.jp/press/files/jp/110514.pdf>

- חובת פרסום והפצת מידע לציבור לגבי אפשרויות החזרת הלוחות.
- יידוע כלל השחקנים - צרכנים, מתקינים, חברות שיפוצים והריסת מבנים ומתקני טיפול, לגבי האופן המיטבי שבו יש להסיר, לשנע ולטפל בלוחות.
- הגשת תוכנית הפעולה השנתית לאישור הרגולטור.
- דיווח שנתי של עמידה ביעדי התוכנית שאושרה על-ידי הרגולטור בשנה שלפניה.

התוכנית המוגשת לרגולטור תציג תוכנית כלכלית ותפעולית, ויתוארו בה האמצעים להפעיל מערכת "קחו-החזירו" כך שלא תושט עלות על המשתמש או המחזיק בלוח. התוכנית תציג גם את יעדי השימוש החוזר והמחזור, שלא יפחתו מהמינימום של 85% מכלל הפסולת שנאספת. הרגולטור רשאי לגבות מהיצרן אגרה קבועה עבור אישור התוכנית. אגרה זו תשמש אך ורק להוצאות הרגולטור עבור הכנת המדריך ליצרנים, סקירת תוכניות הפעולה עבור כל יצרן ותהליך אישור התוכניות. במקרה של הוצאות אכיפה או הוצאות אחרות הקשורות ביישום התוכנית של כל יצרן, הרגולטור רשאי לגבות דמי טיפול בהתאם לחלקו היחסי של היצרן בשוק. כל הכספים יועברו לחשבון ייעודי בקרן, בניהול אוצר המדינה, וישמשו לכיסוי ההוצאות האמורות בלבד.

החוק נותן מענה לפסולת בעת היווצרותה. התוכניות השנתיות מממנות את קבלת הפסולת הנוצרת באותה שנה והטיפול בה, כך שאין הבטחה למימון הפסולת העתידית במקרה שבו היצרן יפסיק את פעילותו.

קליפורניה שינתה בשנת 2021 את הסיווג של לוחות סולריים מפסולת מסוכנת לפסולת אוניברסלית, במטרה להקל את הנטל הרגולטורי בפעולות מקדימות למחזור לוחות סולריים. איסוף ופירוק של לוחות, כל עוד אינם כרוכים בתהליכים תרמיים או כימיים, מצריכים רק יידוע של הרגולטור ואין צורך בבקשה להיתר עבור הפירוק והמחזור. לוחות המכילים חומרים מסוכנים עדיין מוגדרים כך, ואם אין מידע זמין לגבי תכולת חומרים מסוכנים בלוח, קיימת חובה לבדוק שהלוח אינו מכיל חומרים מסוכנים לפני הפנייתו לטיפול. בשנת 2022 הקימה קליפורניה ועדה מייעצת המורכבת מנציגי ממשל, נציגי יצרנים, תעשיית הטיפול בפסולת - מחזור ותיקון, ארגוני סביבה וארגוני תקינה. תפקיד הוועדה, שהוקמה מכוח תיקון חוק³⁸ SB207, לייעץ למחוקקים ולהציג המלצות מדיניות שיבטיחו שכלל פסולת הלוחות הסולריים במדינה תושמש לשימוש חוזר או תעבור מחזור העומד בסטנדרטים סביבתיים ויהיה מעשי מבחינה כלכלית. את ההמלצות על הוועדה להגיש עד 1 באפריל 2025.

כמה מדינות בארצות הברית החלו בבחינה ובתהליכים לקראת חקיקה להסדרת הטיפול והמימון של פסולת לוחות סולריים: מינסוטה, אילינוי, אינדיאנה, צפון ודרום קרוליינה וניו ג'רזי. באריזונה ובהוואי נדחו שתי הצעות חוק, במרילנד נדחו ארבע הצעות חוק, מינסוטה דחתה הצעת חוק ואת אותה הצעת חוק שוב לאחר ארבע שנים, ניו יורק דחתה הצעת חוק אחת, ובשינויים קלים דחתה אותה פעמיים נוספות, צפון קרוליינה דחתה הצעת חוק אחת אך עדיין בתהליכים לקראת חקיקה ([Curtis et al., 2021] a).

<https://legiscan.com/CA/text/SB207/id/2401400> ³⁸

4. ישראל

4.1 חקיקה ראשית

בישראל לא קיימת כרגע אסדרה לטיפול בפסולת של לוחות סולריים. בשנת 2012 נחקק בישראל החוק לטיפול סביבתי בצידוד חשמלי ואלקטרוני ובסוללות התשע"ב 2012 (להלן: "חוק פסולת אלקטרונית" או "החוק").³⁹ ברוח הדירקטיבה האירופית, החוק מטיל אחריות יצרן מורחבת על יצרנים ויבואנים לטפל בפסולת של צידוד חשמלי ואלקטרוני ובסוללות. לאורך השנים הופנו שאלות, לעתים בתשובה לעתירות שהוגשו בנושא, למשרד להגנת הסביבה בנוגע להכללתם או אי-הכללתם של לוחות סולריים במסגרת חוק זה. מצד אחד, צידוד חשמלי ואלקטרוני מוגדר בחוק "מוצר, צידוד או מכשיר המיועד לפעול באמצעות זרם חשמלי או שדה אלקטרומגנטי, וכן צידוד לייצור, להולכה או למדידה של זרם או שדה כאמור, ובלבד שאינו עולה על 1,000 וולט בזרם חילופין או 1,500 וולט בזרם ישר...". לוח סולרי מייצר זרם ישר במתח החשמלי המתאים ללשון החוק, ולפיכך אמור להיות מוכלל בחוק. ואולם, עדיין לא הוכרעה הסוגיה האם לוחות סולריים מוחרגים מהחוק לפי סעיף 63 א (6), שבו מופיע סייג לחוק. אם הפריט שייך לקטגוריה של "מתקנים קבועים גדולים", הוא מוחרג מתכולת החוק. סעיף 63 ב מפרט מתקנים קבועים גדולים: "מתקנים המורכבים מכמה מערכות או מרכיבים, במיועדים לשימוש קבוע במקום מוגדר, כחלק ממבנה, ומורכבים, מותקנים ומפורקים על-ידי גורמים מקצועיים, כגון אסדות, מסועים ומעליות".

מטרות החוק לטיפול בפסולת אלקטרונית הן עידוד שימוש חוזר בצידוד חשמלי ואלקטרוני, צמצום כמות הפסולת ומניעת הטמנתה, והקטנת ההשפעות הסביבתיות והבריאותיות השליליות של פסולת זו. כדי לעמוד במטרות אלו, החוק מטיל אחריות מורחבת על יצרנים ועל יבואנים של צידוד חשמלי ואלקטרוני, סוללות ומצברים - למחזור של הפסולת, קביעת היעד למחזור, הסדרת גופי יישום מוכרים שיפעלו בשמם והתקשרות עמם ליישום החוק, ואחריות למימון כל העלויות של גוף היישום שעמו התקשרו. החוק אף מטיל על הרשויות המקומיות אחריות לפינוי הפסולת תוך איסופה בהפרדה מהמגזר הביתי, ועל המשווקים הוא מטיל את האחריות לקבל פסולת אלקטרונית מהמגזר הביתי במעמד הקנייה. עוד קובע החוק הפעלה של מרכזי פסולת ומתקני טיפול בפסולת, ולבסוף - איסור הטמנה.

על היצרנים והיבואנים מוטלת החובה לטפל בפסולת של מוצרי חשמל ואלקטרוניקה. קיימים שני גופי אחריות יצרן שאמונים על יישום החוק וטיפול בפסולת בשם היצרנים והיבואנים שהתקשרו עמם. כמו כן, גופים אלו מחויבים להתקשר עם משווקים, בעלי פסולת במגזר המסחרי ועם רשויות מקומיות, כדי לאסוף פסולת אלקטרונית מהאזרחים בשטח הרשות. הפסולת נאספת בארבע דרכים מרכזיות: איסוף מהמגזר העסקי, איסוף מהמשווקים שאספו פסולת בתוכנית קחו-החזירו מבתי הצרכנים עם הובלת המוצר החדש, איסוף סוללות ומוצרי חשמל קטנים מנקודות איסוף עירוניות, ואיסוף מדרכות, שבמסגרתו אזרחים מורידים את הפסולת אל המדרכה לפי הסדרי הפינוי ברשות המקומית, ובהתאם לקריאה קבלן איסוף מגיע לאסוף את הפסולת.

גופי היישום נבחרים בהליך הכרה מדי חמש שנים על-ידי הרגולטור לאחר בחינה מקיפה של התוכנית העסקית, העמידה ביעדים, התוכנית התפעולית, השירות לאזרחים והעמדת ערבות או בטוחה אחרת להבטחת פעילותם. עד לשנת 2024 פעלו שני גופי אחריות יצרן שנבחרו לשתי תקופות הכרה. ביולי 2024 קיבל אחד מהם הכרה לתקופה נוספת, וגוף חדש קיבל הכרה לחמש השנים הבאות. גופים אלו מפעילים קבלנים עבור האיסוף והטיפול בפסולת, וחייבים בדיווח לרגולטור על כמות

³⁹ החוק לטיפול סביבתי בצידוד חשמלי ואלקטרוני ובסוללות התשע"ב https://fs.knesset.gov.il/18/law/18_lsr_301464.pdf

המוצרים המשווקים וכמות הפסולת שטופלה מכל ערוץ איסוף לפי סוג וקטגוריה. בכל שנה חלה עלייה בכמות היצרנים והיבואנים שמתקשרים עם גופים אלו, אך עדיין קיימים "טרמפיסטים" שאינם מתקשרים עם אחד הגופים ולא משלמים על הטיפול בפסולת המוצרים שלהם.

עוד מטיל החוק חובה על רשויות מקומיות להתקשר עם גוף יישום מוכר, ולהקים ולהפעיל מוקדי איסוף בהפרדה לפסולת אלקטרונית בפריסה מספקת. פינוי ואיסוף הפסולת מהאזרחים אינו כרוך בתשלום. משווקים מחויבים, לפי החוק, לקבל פסולת במעמד הרכישה או האספקה של מוצר חשמלי דומה. היעדים הקבועים בחוק הם יעדי מחזור בלבד ולא יעדי איסוף. על היצרנים והיבואנים למחזר 50% ממשקל המוצרים ששווקו באותה השנה.

בשנת 2023 אומץ תקן EN 50625-2-3 לטיפול במקררים. התקן פותח ב-CENELC - גוף תקינה אלקטרו-טכני אירופי שמפתח תקנים וולונטריים עבור האיחוד האירופי בנוגע למוצרי חשמל ואלקטרוניקה. תקן המקררים הוא חלק מסדרת תקנים שמסדירים את האיסוף, האחסון, הטיפול, המחזור וההכנה לשימוש חוזר של פסולת אלקטרונית. במקביל לאימוץ התקן הוקם מפעל ייעודי שמטפל בפסולת מקררים באופן סביבתי. התקן מחייב טיפול נאות במקררים, כולל הנחיות להפרדת שמנים וגזי קירור. בשנת 2026 יכנס לתוקף תקן הטיפול הכללי EN 50625-1 לטיפול בפסולת אלקטרונית, שכלול גם הוא בסדרת התקנים האירופית. קיימים תקני CENELEC גם עבור טיפול בלוחות סולריים, המסדירים את הטיפול הבסיסי בלוחות. כדאי לבחון את התאמתם של תקנים אלו בחקיקה עתידית.

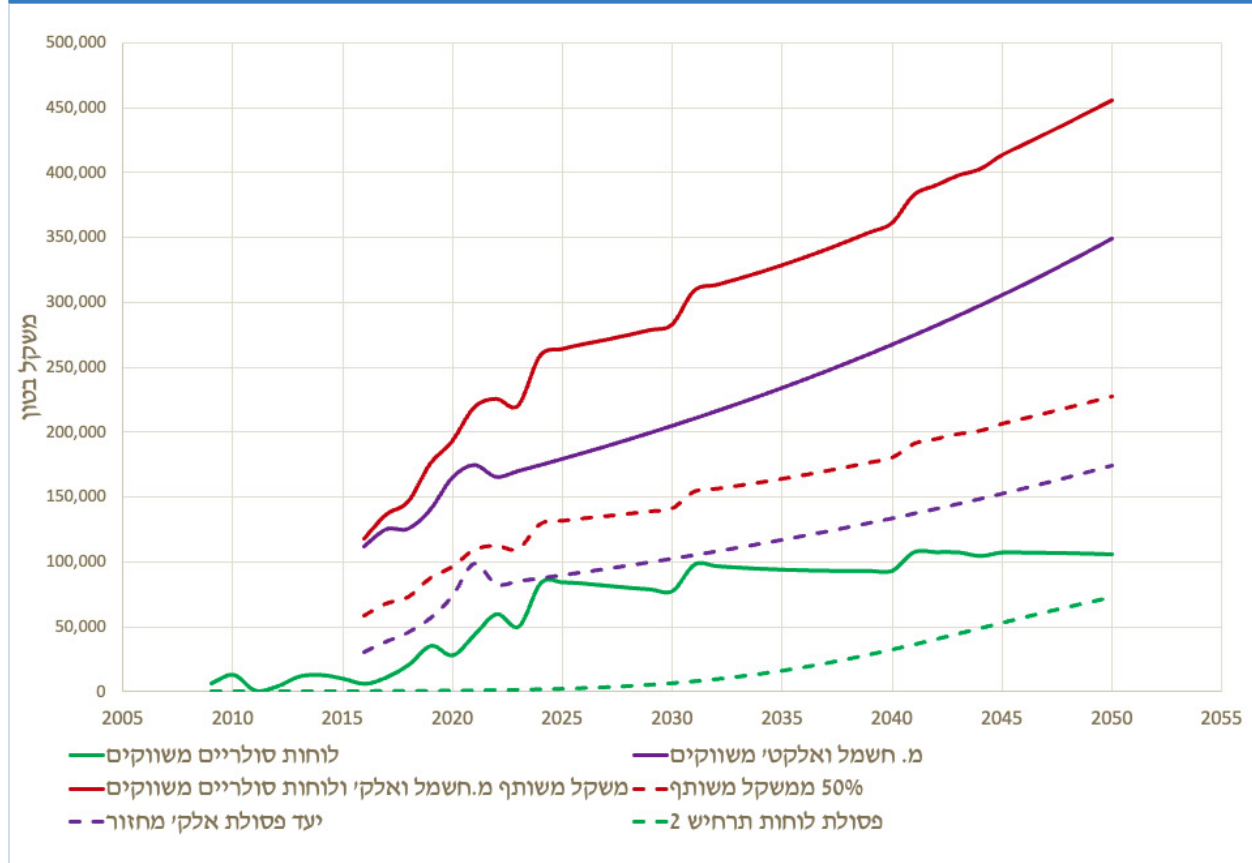
4.1.1 השפעת הכללת לוחות סולריים בחוק פסולת אלקטרונית על העמידה ביעדים

כאמור, יעדי המחזור בחוק הם 50% מהכמות המשקלית ששווקה באותה שנה. אם לוחות סולריים ייכללו בחוק, משקל כלל המוצרים המשווקים (מוצרי חשמל ואלקטרוניקה ולוחות סולריים) יגדל, אך כמות פסולת הלוחות הסולריים שתיווצר תהיה קטנה במידה משמעותית ממחצית הכמות ששווקה, לפחות בחמש-עשרה השנים הקרובות. כמו כן, לוח סולרי הוא מוצר המושפע מאוד מרגולציה (Magalini et al., 2014), ועלייה במחיר יחידת אנרגיה סולרית שתזרום לרשת עלולה לגרום עלייה חדה בהיקף ההתקנות. הפער בין כמות הלוחות הסולריים המשווקים לבין כמות הפסולת שתיווצר מלוחות עלול לגדול עוד יותר. כדי לעמוד ביעדי החוק יצטרכו גופי היישום לאסוף כמות פסולת אלקטרונית גבוהה יותר.

ברשות המשרד להגנת הסביבה שתי עבודות שבמסגרתן גובשה תחזית גידול לצריכת מוצרי חשמל ואלקטרוניקה בישראל. עבודה אחת מעריכה גידול שנתי של 2.7% בצריכת מוצרי החשמל, והאחרת מעריכה גידול שנתי של 3.5%. לצורך הערכת יעדי המחזור לחוק שכולל לוחות סולריים, נלקחה ההערכה השמרנית שמניחה גידול שנתי של 2.7% בשנה. כמו כן, לצורך הערכת כמות הלוחות שישווקו, הונח שבשנת 2050 יהיו 54% מהאנרגיה בתמהיל החשמל ממקור מתחדש, ועבור הערכת כמות פסולת הלוחות הצפויה הונח שמתקיים תרחיש 2.

בשנת 2030, הכללת הלוחות הסולריים בחוק תגדיל את משקל המוצרים המשווקים ב-38%, אך כמות הפסולת של לוחות סולריים תהיה פחות מ-4.5% מיעד הפסולת למחזור. המשמעות היא שיהיה צורך למחזר 38% יותר מהכמות ללא הכללת הלוחות הסולריים בחוק. במילים אחרות, היעד למחזור יעלה ל-66% מכלל המשקל של מוצרי החשמל והאלקטרוניקה (ללא לוחות סולריים) באותה שנה, בהנחה שכלל פסולת הלוחות מוחזרה. מצד שני, אם ימוחזרו כל הלוחות הסולריים בשנת 2050, שיעור המחזור עבור מוצרי חשמל ואלקטרוניקה יהיה 43% במקום 50%. כלומר יהיה אפשר לעמוד ביעדי החוק תוך מחזור נמוך יותר של פסולת אלקטרונית.

תרשים 10. משקל מוצרים משווקים (מוצרי חשמל ואלקטרוניקה, לוחות סולריים) פסולת אלקטרונית - יעד למחזור, פסולת לוחות סולריים לפי תרחיש 2 בטון



מקור: הנתונים עובדו מתוך נתוני שיווק של מוצרי חשמל ואלקטרוניקה והפסולת שנאספה בכל שנה (אגף אחריות יצרן, המשרד להגנת הסביבה)

4.1.2 השפעת הכללת לוחות סולריים בחוק פסולת אלקטרונית על מערך המימון

לעמידה ביעדי החוק יש השפעה מכרעת על מערך המימון. מכיוון שכדי לעמוד ביעדי החוק יצטרכו גופי היישום לאסוף כמות פסולת אלקטרונית גבוהה יותר, הם יאלצו לממן את הגידול באיסוף ובטיפול מהכספים ששולמו עבור האיסוף והטיפול בלוחות הסולריים, באופן שיסכן את המימון עבור הלוחות במועד שבו יהפכו לפסולת. עם הגידול בכמויות הפסולת תיתכן נקודה בזמן שבה תיווצר יותר פסולת לוחות מאשר מכירת לוחות. הצורך לשלם על יותר לוחות מאשר נמכרו בפועל, לצד הצורך לפצות על מימון הטיפול בפסולת אלקטרונית בתחילת הדרך, עלולים לפגוע בכדאיות הטכנולוגיה (Duran et al., 2022).

החוק מגדיר יבואן ציוד חשמלי ואלקטרוניקה "מי שמייבא במסגרת עסקו ציוד חשמלי ואלקטרוני למכירה או לשיווק בישראל". פרויקטים של שדות סולריים קרקעיים ממומנים ומופעלים לעתים באמצעות תאגיד ייעודי המחזיק בפרויקט (SPV - Special Purpose Vehicle), ולא באמצעות חברות האנרגיה עצמן. תאגיד זה, לרוב חברת בת של החברות המחזיקות, נוצר כדי לבודד את החברה ומשקיעיה מהסיכונים הפיננסיים של פרויקט עתיר השקעות. התאגיד נוצר בדרך כלל למטרה אחת: להקים את האתר ולעתים גם להפעילו לאורך שנות פעילותו. התאגידים רוכשים את הלוחות הסולריים ישירות מהיצרנים

ומייבאים אותם לישראל בלי למכור או לשווק אותם, ולכן עלולים שלא להיחשב יבואנים לפי החוק. אם חובת אחריות היצרן לא תחול על תאגידים אלו, לא יהיה מימון עבור הטיפול בלוחות בעת הפיכתם לפסולת.

4.1.3 השפעת הכללת לוחות סולריים בחוק פסולת אלקטרונית על מערך האיסוף והטיפול

מבחינת מערך איסוף הפסולת, לוחות סולריים אינם דומים למכשיר חשמלי רגיל שנקנה ביחידה אחת או במספר בודד של יחידות, אלא בכמה עשרות (להתקנים קטנים) ועד מאות אלפים (להתקנים גדולים). הבאתם למרכזי איסוף עירוניים אינה פתרון יעיל, כפי שאפשר להסיק מהמקרה הגרמני, והוצאת כמה עשרות לוחות לאיסוף מדרכות עלול להוות בעיה במרקם עירוני צפוף. לעומת זאת, מנגנון "קחו-החזירו", שנמצא בשימוש עבור יישום חוק פסולת אלקטרונית, יכול לספק מענה הולם לפסולת מסוג זה.

4.2 חקיקה משנית

קיימות שתי מסגרות של חקיקה משנית המאפשרות מתן מענה חלקי להסדרת הטיפול בפסולת לוחות סולריים. כיום, בהיעדר הסדרת הטיפול בלוחות סולריים, לא נעשה שימוש בכלים אלו.

4.2.1 תוכניות מתאר ארציות ותוכניות תשתית לאומית למתקנים פוטו-וולטאים

תוכנית המתאר הארצית למתקנים פוטו-וולטאיים תמ"א 10/ד/10 קובעת את ההנחיות לתוכניות פרטניות עבור מתקנים פוטו-וולטאיים. סעיף 7.5.6 קובע: "המועצה הארצית רשאית לשנות את נספח ההנחיות לעריכת המסמך הנופי-סביבתי ולהוסיף מסמך הנחיות לפינוי השטח בתום מועד פעילות המתקן הפוטו וולטאי... אם התקיימו התנאים:

שוכנעה המועצה הארצית שאין בכל כדי לפגוע במטרות התוכנית

אפשרה המועצה הארצית לוועדות המחוזיות להעיר את הערותיהן טרם קבלת ההחלטה"

בחלק מהתוכניות, גם תוכניות תשתית לאומית וגם תוכניות מפורטות למתקן פוטו-וולטאי, תחת סעיף "מניעת מפגעים סביבתיים בעת פירוק המתקן הפוטו-וולטאי", מופיע הסעיף: "עם הפירוק ישלחו החומרים למחזור/שימוש חוזר, ככל הניתן, ובהתאם לשימושים ולטכנולוגיות אשר יהיו זמינים באותה העת, או יפנו לאתר מורשה על פי כל דין ועל פי הנחיות המשרד להג"ס כפי שייקבעו במועד פירוק המתקן". בחלק מהתוכניות הסעיף חסר, וההנחיות אינן מפורטות לאן להפנות את הפסולת אלא רק מורות להשיב את השטח לקדמותו.

4.2.2 צו רישוי עסקים

צו רישוי עסקים (עסקים טעוני רישוי) תשע"ג 2013 קובע כי מתקן המייצר חשמל בהספק העולה על 5MW יהיה טעון רישוי עסק לפי פריט 2.4 "תחנת כוח". לפריט 2.4 יש מפרט אחיד, כלומר שלכל מתקן סולרי המייצר חשמל בהספק שעולה על 5MW יהיו דרישות אחידות. בדרישות לפריט 2.4 אין התייחסות לאופן הטיפול בפסולת של לוחות סולריים. רישוי עסק ניתן לתקופות קבועות של חמש, עשר או חמש-עשרה שנה לפי תיקון לחוק מ-2019. אפשר לשנות את תנאי המפרט האחיד כך שתהיה חובת הפניה של פסולת לוחות סולריים למחזור, אך עבור מתקנים רבים, הוא ייכנס לתוקף רק עם חידוש תנאי רישוי העסק תוך כמה שנים.

עבור עסקים שעל הגג שלהם מותקנים לוחות סולריים, אך ההספק המותקן נמוך מ-5MW, אין כל תנאי ברישוי העסק. באין חוק המחייב מחזור של לוחות סולריים, אי-אפשר לקבוע תנאים ברישוי העסק המחייבים הפניית פסולת למחזור, אלא רק לחייב

טיפול לפי היררכיית הטיפול בפסולת. דוגמה ממפרט תנאים אחידים בפרק טיפול בפסולת מוצקה: "בעל העסק יכין תוכנית לטיפול בפסולת שתכלול פרטים על סוגי הפסולות הנוצרות בבית העסק (הרכבים וכמויות), אופן ההפרדה, אחסון, איסוף הובלה ויעדי פינוי אפשריים. יש להתייחס בתוכנית להיררכיית הטיפול בפסולת (הפחתה במקור, שימוש חוזר, מחזור וסילוק)".

5. דיון ומסקנות

תוצאות המודל להערכת כמויות הפסולת מצביעות על היקפי פסולת נמוכים עבור השנים הקרובות, שילכו ויגדלו במהירות. בשנת 2030 כמות הפסולת המצטברת הצפויה נעה בין 378,426 ל-1,185,049 טונות פסולת מצטברת. לפי הערכת הפסולת בתרחיש 2, טיפול גדלות במידה משמעותית, ונעות בין 378,426 ל-1,185,049 טונות פסולת מצטברת. לפי הערכת הפסולת בתרחיש 2, כמות פסולת הלוחות תהיה כ-3% מכלל פוטנציאל הפסולת האלקטרונית בשנת 2030, וכ-21% בשנת 2050. תוצאות אלו מחייבות מענה רגולטורי הולם, כך שהמשק הישראלי יוכל להתמודד באופן מיטבי עם כמויות הפסולת הצפויות.

לנוכח בחינת הערכות הפסולת במדינות שלגביהן קיימים נתונים רשמיים, כמות הפסולת שנאספה בהן עולה על הערכות תרחיש 1 אך פחותה מהערכות תרחיש 2. זאת למעט דרום קוריא, שבה כמות הפסולת עולה על זו הצפויה לפי תרחיש 3. מהמידע שהתקבל מחברות אנרגיה סולרית בישראל, ובהנחה שכך התנהג שאר השוק של ההתקנים מאותו סדר גודל, נראה שכמות הלוחות שהוצאו משימוש עד סוף 2023 עולה על כמות הפסולת המצטברת בתרחיש 3. עם זאת, יש לציין שרוב הלוחות שהוצאו משימוש הועברו חזרה ליצרן עקב פגם בסדרת הייצור, כך שגם לוחות לא פגומים בסדרה הוסרו משימוש ונשלחו למפעלים מחוץ לישראל. כמות הפסולת המצטברת עד סוף 2023, שהוצאה משימוש וטופלה בארץ (הטמנה) או הועברה לשימוש חוזר, נעה בין תרחיש 2 לתרחיש 3. כמו כן, נתוני הפסולת התקבלו מחברות שמפעילות התקנים בהספק מעל 200MW, כדי לקבל תמונה מדויקת של היקפי הפסולת הצפויים יהיה צורך לנטר גם את התנהגות הצרכנים של ההתקנים הקטנים יותר. לסיכום, כמויות הפסולת הצפויות נעות בין תוצאות תרחיש 2 לבין תוצאות תרחיש 3.

כיום, הרוב המכריע של הלוחות המותקנים בישראל הם לוחות מבוססי סיליקון. לוחות אלו מכילים מעט עופרת, בכמויות שהולכות ופוחתות, כך שפסולת לוחות אלו אינה מוגדרת פסולת מסוכנת בעולם. עם התפתחות הטכנולוגיה, ובעיקר עם הפצעתם בשוק של תאים יעילים יותר הבנויים במקביל (כך שכל שטח קולט יותר מאורך גל אחד לשם הפקת האנרגיה), סביר שיגיעו לשוק הישראלי לוחות בטכנולוגיות חדשות. גם התפתחות המגזר האגרי-וולטאי (דו-שימוש של לוחות סולריים מעל שדות חקלאיים) שנמצא בימים אלו בראשיתו, אך מהווה עתודת שטח לא מבוטלת להתקנת מערכות סולריות, עשוי להביא לשימוש בלוחות בטכנולוגיות חדשות. לפיכך יש חשיבות מכרעת לבסס מערכת תפעול ומימון של הטיפול בפסולת לוחות סולריים, כך שתוכל לתת מענה גם ללוחות בטכנולוגיות חדשות שעלולים להכיל חומרים בעייתיים יותר מבחינה סביבתית, כמו עופרת בלוחות מבוססי פרובסקייט.

5.1 מסגרת חקיקתית

נפח הפסולת של הלוחות הסולריים אינו מצדיק חוק ייעודי לזרם פסולת זה. נבחנו שתי אפשרויות עבור מסגרת חקיקתית הולמת: (1) הכרעה משפטית בסוגיית ההכללה של הלוחות הסולריים בחוק לטיפול בפסולת אלקטרונית, וקביעה שהחוק יחול על לוחות סולריים. (2) תיקון החוק לטיפול בפסולת אלקטרונית כך שיתאים לטיפול בפסולת לוחות סולריים בהיבטי מימון לטווח ארוך ויעדים.

5.1.1 הכללת לוחות סולריים בחוק לטיפול בפסולת אלקטרונית

החוק לטיפול בפסולת אלקטרונית, כפי שהוא מנוסח כיום, אינו מספק מענה מיטבי לטיפול בפסולת של לוחות סולריים - לא בהיבט היעדים ולא בהיבט המערך המימוני להבטחת הטיפול בלוחות כשיצאו ממעגל השימוש. המנגנון בחוק הנוכחי אינו מאפשר צבירת הון מספק לטיפול בלוחות סולריים בסוף חיי המוצר.

כאמור, הכללת לוחות סולריים בחוק פסולת אלקטרונית תגרום בשנים הקרובות לעלייה לא פרופורציונית ביעדי המחזור של פסולת אלקטרונית, מכיוון שהיקפי הפסולת של לוחות סולריים נמוכים, אך הם משווקים בהיקפים ההולכים וגדלים בקצב מהיר. עלייה זו תאלץ את הגופים המוכרים להשתמש בכספים המשולמים עבור הלוחות, כדי לאסוף ולמחזר את כמות הפסולת הנוספת, שאינה לוחות סולריים, באופן שיסכן את המימון לטיפול בלוחות במועד שבו יהפכו לפסולת. כמו כן, החובה לטפל בפסולת אלקטרונית חלה על יצרנים ויבואנים. הגדרת "יבואן" כפי שמופיעה בחוק, עלולה לגרום לאי-הכללתן של חברות הרוכשות לוחות בעצמן לטובת הפקת חשמל ולא לצורך שיווקם. אי-הכללתן בתור יבואן תפגע בכל היבטי הטיפול בפסולת, הן מימונית והן תפעולית.

5.1.2 תיקון החוק לטיפול בפסולת אלקטרונית

כדי לתקן את החוק באופן שייתן מענה מיטבי גם לטיפול בפסולת לוחות סולריים, יהיה צורך לקבוע יעדים נפרדים עבור איסוף וטיפול בפסולת זו לפחות לפרק זמן ראשוני שבו קצב ההתקנות עולה משמעותית על קצב הפסקת השימוש; להגדיר מחדש "יצרן" ו"יבואן" או את נושאי האחריות לטיפול בפסולת; לקבוע מנגנון להבטחת המימון לטיפול בפסולת לוחות סולריים; לחייב סימון לוחות כך שיהיה אפשר להבחין בין לוחות המכילים חומרים מסוכנים לכאלו שלא; לקבוע הנחיות מינימליות לבדיקה ולהכנה לשימוש חוזר; ולעודד טיפול בפסולת לפי היררכיית הטיפול בפסולת.

תיקון חוק הוא תהליך עתיר זמן. הזמן העובר ללא חוק מתאים מעכב את צבירת המימון לטיפול העתידי בלוחות. לכן, מומלץ לייסד בהקדם מנגנון מימוני עבור הטיפול בלוחות הסולריים בעתיד הקרוב. נוסף על כך מומלץ להשתמש במנגנונים נוספים שיחייבו לוחות שנמכרים ומותקנים כיום באיסוף וטיפול בפסולת עד להשלמת החקיקה. מנגנונים אלו יכולים להיות הוראות מפורטות במסגרת תוכניות תשתית לאומית ותוכניות מפורטות למתקנים פוטו-וולטאיים, שמטרתן להסדיר את החובה לפנות את הלוחות המוחלפים במהלך הפעילות, ולא רק בסוף חיי המתקן. הוראות אלו יש להחיל באופן גורף על כל התוכניות ולא רק על חלקן. במקביל יש לאפשר את מחזור הלוחות, עד להשלמת החקיקה, במתקנים הממחזרים פסולת אחרות, אך מסוגלים לטפל גם בפסולת לוחות ברמה מספקת. כמו כן, יש לבחון את האפשרות להורות על סעיף אחריות לפינוי הפסולת במסגרת הצו לרישוי עסקים עבור כל עסק שיתקין לוחות סולריים בשטחו, עוד בטרם יש חוק המחייב טיפול בפסולת זו.

5.2 מנגנון תפעולי במסגרת תיקון חקיקה

מנגנוני אחריות יצרן הוכחו כמנגנונים המשפרים את הטיפול בפסולת מסוגים שונים, נוסף על החלת עקרון "המזהם משלם". ליצרנים, ובישראל באופן מדויק יותר ליבואנים ולמשווקים, יש מערכת לוגיסטית ענפה לשינוע הלוחות הסולריים ללקוחות. לכן להם יש הכלים והתשתית לפתח ולהפעיל מערכת לוגיסטית הפוכה להחזרת הלוחות המשומשים ולהפנייתם לטיפול. מומלץ אפוא להטיל על היצרנים והיבואנים חובת אחריות להקים ולהפעיל את מערך הטיפול בפסולת - משלב האיסוף ועד שלב גמר הטיפול, לפי היררכיית הטיפול בפסולת, באמצעות ארגון אחריות יצרן.

כפי שהוזכר בסעיף הקודם, פרויקטים של שדות סולריים קרקעיים ממומנים ומופעלים לעתים באמצעות תאגיד ייעודי המחזיק בפרויקט, ולא באמצעות חברות האנרגיה עצמן. בהיבט זה קיים שוני בין החייבים במנגנון אחריות יצרן עבור מוצרים אחרים כמו יצרנים, יבואנים ומשווקים לתאגידים ייעודיים שהוקמו למטרת פרויקט ייעודי. יהיה צורך למצוא מנגנון שיבטיח את האחריות של אותם תאגידים, או החברות שבשמן הם פועלים, לתפעול מערך הטיפול בפסולת - בין שיטפלו בפסולת הלוחות של הפרויקט הספציפי שלהן ובין שיצטרפו לארגון אחריות יצרן.

5.2.1 מאפייני המערך התפעולי

5.2.1.1 מנגנון איסוף

מנגנון איסוף עבור גגות פרטיים - כמחצית ממספר ההתקנים בישראל הם התקנים קטנים (פחות מ-15KW) המותקנים לרוב על גגות פרטיים ותורמים כ-9% מכלל ההספק המותקן. מבחינת מסה, התקנים אלו תורמים אף פחות מ-9%, מכיוון שלוחות הנמכרים למגזר הביתי בדרך כלל אינם לוחות דו-צדדיים, ולכן משקלם נמוך יותר מאלו המשמשים עבור התקנים קרקעיים. העובדה שההתקנים מבוזרים ומחולקים כמעט באופן שווה בצפון, במרכז ובדרום, מערימה קושי על האיסוף שלהם. עם זאת, לוחות סולריים מותקנים על-ידי מתקנים מקצועיים, ולכן בכל החלפה של לוחות יש לחייב את המתקין להציע פינוי של הלוחות שהסיר במסגרת תוכנית "קחו-החזירו". הלוחות שנאספו יובלו למתקני טיפול או יאוחסנו בהתאם להנחיות אצל המשווקים או המפיצים של לוחות סולריים, עד לפינוי באמצעות ארגון אחריות היצרן. בכל מקרה של הסרת לוחות ללא החלפה, משתמש יהיה רשאי לפתוח קריאה, ובתוך פרק זמן סביר שיקבע הרגולטור יפוננו הלוחות באמצעות ארגון אחריות היצרן או מובילים מטעמו, ללא תשלום.

מנגנון איסוף עבור גגות אחרים - מבני ציבור ועסקים המתקינים לוחות סולריים, יהיו זכאים לפינוי במסגרת תוכנית "קחו-החזירו" או במסגרת קריאה לפינוי, ללא תשלום נוסף. התקנים קרקעיים יהיו רשאים להעביר את הלוחות שלהם באופן עצמאי למתקני הטיפול המורשים או להתקשר עם ארגון אחריות היצרן לשם כך. לשדות קרקעיים יש הידע והיכולת להסיר לוחות באופן עצמאי, וכן היכולת לאחסן ולהוביל אותם באופן הולם.

5.2.1.2 בדיקה לקראת שימוש חוזר

יש צורך ליצור מערך הנחיות לבדיקות מינימום עבור השמשה מחדש של הלוחות, בדומה לנעשה ביפן. הנחיות אלו יבססו את אמון הצרכנים בשוק השימוש החוזר ויפחיתו את החשש לרכוש לוחות משומשים, וכן יבטיחו שפסולת לוחות לא תיוצא למטרות "שימוש מחדש". הנחיות אלו יאפשרו להסתמך על תוצאות בדיקות שנערכו בהתקנים קרקעיים גדולים ובינוניים שייצור חשמל הוא עסקם העיקרי. לוחות אחרים, הנאספים על-ידי מתקנים או על-ידי מובילים מטעם ארגון אחריות היצרן, יעברו בדיקה באחריות ארגון אחריות היצרן.

5.2.1.3 מנגנון סימון, רישום, ניטור ודיווח

כדי לטפל באופן המיטבי בלוחות הסולריים יש להנהיג מנגנון סימון, רישום, ניטור ודיווח ברוח הדירקטיבה האירופית לטיפול בפסולת אלקטרונית, וברוח חקיקת המסגרת לתנאים לעיצוב מקיים עבור מוצרים בני-קיימא. סימון זה יאפשר לזהות לוחות

- המכילים חומרים מסוכנים, למיין לוחות לפי הרכב החומרים ולהפנותם לטיפול המתאים. נוסף על כך, הנהגת "דרכון מוצר דיגיטלי" יאפשר לעגן מידע עבור כלל השחקנים בשוק הלוחות הסולריים:
- מידע עבור משתמשים: פעולות תחזוקה מומלצות לפי גיל הלוח, הפניה לגוף המטפל לאחר הסרת הלוח, פרמטרים שונים הנוגעים למפרט הטכני ושנות האחריות כך שאפשר יהיה להשוות בין דגמים ולקבל החלטה מושכלת בשעת רכישת הלוחות.
 - מידע עבור קבלני האיסוף ומפעלי הטיפול: סוג הלוח ולאיזה סוג טיפול להפנותו, תנאי השינוע והאחסון ואופן הטיפול המיטבי כפי שמסר היצרן.
 - מידע עבור הרגולטור: מידע על הלוחות החדשים ששווקו וסוגם יאפשר, בין השאר, את עדכון יחס הספק למסה עבור מודל הערכת כמויות הפסולת. מידע לגבי כמות הלוחות בשימוש, כמות הלוחות שהוסרו ושנת ההפעלה הראשונה שלהם ישמשו לצורך טיוב מודל הערכת הפסולת והתנהגות המשתמשים בשוק הישראלי. כמו כן מידע לגבי שיעורי השימוש החוזר והמחזור יאפשר להתאים את מדיניות הטיפול בפסולת בזמן אמת.
 - מידע עבור ארגון אחריות היצרן: מידע על סוג הלוחות המשווקים יאפשר התארגנות מראש לטיפול בלוחות בעלי טכנולוגיה אחרת מזו המשווקת כיום ובעבר בישראל. עדכון מודל הפסולת על-ידי הרגולטור יאפשר לארגון אחריות היצרן להיערך לכמויות הפסולת הצפויות.

5.2.1.4 מתקני קצה

מתקני קצה - מפעלי השמשה מחדש ומחזור לוחות יהיו חייבים ברישיון עסק מתאים כדי שהפסולת תפונה רק למתקנים מורשים שיעמדו בתנאים מינימליים שיפורסמו לציבור.

5.3 מנגנון מימוני

אחד היסודות המרכזיים בהבטחת הטיפול בפסולת של לוחות סולריים הוא מקור תקציבי זמין בשעה שהלוח הופך לפסולת. היבט קריטי במימון הטיפול בפסולת הוא עיתוי המימון. אפשר לממן את הטיפול בפסולת במעמד הקנייה, בזמן השימוש במוצר או בעת ההפיכה לפסולת. מהסקירה הבינלאומית עולה שמימון בעת הקנייה או בזמן השימוש במוצר עשוי להבטיח, במידה זו או אחרת, את קיום הכספים לאחר 20 או 30 שנים. כדי להעלות את הסיכוי להבטחת הכספים יש ליצור שקיפות ואחידות בסכום התשלום ושמירתו בקרן ייעודית למטרות טיפול בפסולת, בנפרד מהכספים המיועדים למטרות תפעול שוטף של המנגנון.

5.3.1 מימון בעת ההפיכה לפסולת

תשלום בעת ההפיכה לפסולת אינו מבטיח את המימון של הטיפול בפסולת. ארגון אחריות יצרן מממן את הטיפול בפסולת מתשלומי היצרנים המועברים אליו, לפי גודלם היחסי בשוק, שנקבע לפי היקף המכירות שלהם. יצרן שמכר לוח לפני עשרים שנים לא בהכרח יהיה שחקן פעיל באותו השוק גם בשעה שהלוח יהפוך לפסולת, כך שמי שישאו בנטל הטיפול בלוח הם יצרנים אחרים - מה שפוגע בעקרון "המזהם משלם". זאת ועוד, מכיוון שרכישת לוחות סולריים מושפעת מאוד מהחלטות

רגולטוריות, ייתכנו תרחישים של הפסקת העידוד להתקנת לוחות עקב רוויה בשוק או עקב העדפת טכנולוגיה אחרת לייצור חשמל, ומספר הלוחות המשווקים יקטן. אם מספר הלוחות המשווקים יקטן, לא יהיה מקור תקציבי מספק לטיפול בפסולת.

5.3.2 מימון בעת השימוש במוצר

רכישת מערכת סולרית אינה דומה לרכישה של מוצר חשמלי כמו מקרר או מכונת כביסה. מספר הלוחות במערכת סולרית נע בין כמה עשרות ועד לאלפים ולמאות אלפים של לוחות סולריים. תשלום סכום נמוך לאורך מספר שנים בודדות מתוך תעריף הייצור לקרן ייעודית, עשוי להקל על משתמשים ביתיים ועסקים קטנים ולא לייקר את עלות המערכת בעת הרכישה. מכיוון שמקור הכספים הוא בתעריף הייצור, יהיה צורך במנהל קרן מתאים (למשל מנהל מערכת החשמל) שיוכל גם לאסוף את הכספים וגם להפנות אותם בעתיד לגופים המטפלים לפי כמויות הפסולת שייאספו ויטופלו. מצד שני, הפנמת העלויות החיצוניות של הפקת אנרגיה סולרית בשלב הפסולת, בלי להשית עלויות חיצוניות על הפקת אנרגיה ממקורות פוסיליים או ממקורות אחרים, עלולה לגרור התנגדות ציבורית. חיסרון נוסף בתשלום מתוך תעריף הייצור הוא שהתעריף משולם לכל יחידת אנרגיה מיוצרת. לוחות יעילים בעלי הספק גבוה ייצרו אנרגיה רבה יותר מאשר אותו מספר לוחות בעלי הספק נמוך, ולכן המשתמשים ישלמו יותר אם ברשותם לוחות בעלי הספק גבוה. ניתוק הקשר בין מספר הלוחות לתעריף התשלום אינו מתיישב עם עקרון "המזהם משלם".

5.3.3 מימון בעת הרכישה

תשלום עבור הטיפול בלוח במעמד הרכישה הוא הפרקטיקה הנהוגה בצרפת. כאשר התשלום שקוף בחשבונית הקנייה, הוא עובר כולו לארגון אחריות היצרן. בחלק ממדינות האיחוד האירופי פרקטיקה זו הייתה נהוגה עבור מוצרי אלקטרוניקה שונים בשנים הראשונות לאחר יישום הדירקטיבה (Baldé et al., 2020). כאשר התשלום אינו שקוף, היצרנים אינם משלמים את מלוא סכום הטיפול במועד הרכישה אלא משלמים אותו בעת ההפיכה לפסולת. עלויות הטיפול בלוחות סולריים גבוהות יותר בתחילת הדרך, מכיוון שלרוב, כמויות הפסולת קטנות ויש להקים את תשתיות האיסוף והטיפול בה. עלויות אלו יורדות לאחר כמה שנים, עם העלייה בכמות הפסולת וביסוס התשתית לטיפול. באירופה עלות הטיפול ללוח של 20 ק"ג עמדה על כ-3.2 אירו בשנת 2011 וכיום העלות נמוכה בהרבה ונעה בין 0.36 אירו ללוח קטן ל-1.57 ללוח גדול (50 ק"ג) (Magalini et al., 2014).

בכל מקרה של מנגנון מימון, בעת הרכישה או במהלך השימוש, על הכספים להישמר בקרן חיצונית שתבטיח את המקור התקציבי לטיפול בפסולת בעת היווצרותה. מנגנון זה, בדומה למנגנון הנהוג ביפן ובטייוואן, יבטיח את קיום הכספים לטיפול בפסולת בעת היווצרותה. על הקרן להיות בניהול חיצוני ולא ברשות ארגון אחריות היצרן, מכיוון שארגון אחריות יצרן מקבל הכרה לחמש שנים או לתקופת זמן מוגבלת אחרת, ואין וודאות שאותו ארגון יהיה אמון על הטיפול גם כאשר הלוחות יהפכו לפסולת. כספי הקרן יופנו לארגון אחריות היצרן לצורך מימון הטיפול בפסולת בכל שנה.

5.4 יעדים

חקיקה המבוססת על מנגנון אחריות יצרן מציבה בדרך כלל יעדים כמו יעדי איסוף, יעדי מחזור או יעדים לשימוש חוזר. קביעת יעדי איסוף ויעדי מחזור מעלים את שיעורי האיסוף והמחזור של הגופים המוכרים, כך שמומלץ להציב יעדים שאפתניים אך בני-השגה, יעדים מדורגים המתחשבים ביכולת של התעשייה להשתפר עם הזמן (OECD, 2024). יעדי איסוף נגזרים לרוב

מהכמות המשוקת באותה השנה, או בממוצע של כמה שנים. עבור מוצרים שזמן החיים שלהם קצר או עבור מוצרים שבהם השוק רווי וקצב התחלופה קובע את קצב השיווק, קביעת יעדי איסוף גבוהים מעלה את שיעורי האיסוף. לעומת זאת, עבור מוצרים בעלי זמן חיים ארוך שקצב הכניסה שלהם לשוק הוא מהיר הרבה יותר מקצב ההחלפה, יעדי איסוף קבועים מהווים קושי רב ביישום החוק (Magalini et al., 2014).

5.4.1 קביעת יעדי איסוף לפי כמות הפסולת באותה שנה

יעדים הנגזרים מהפסולת המיוצרת באותה שנה מצריכים הערכה מראש של כמות הפסולת המיוצרת. כאמור, הדירקטיבה האירופית מאפשרת לקבוע את יעדי האיסוף לפי הערכת כמות הפסולת, עבור כל קטגוריית מוצרים בנפרד, במודל סטטיסטי. עם זאת, תעשיית הלוחות הסולריים היא תעשייה חדשה, והערכות הפסולת עדיין לא עמדו במבחן המציאות. הערכת פסולת גבוהה ממה שיווצר בפועל, תיצור מצב שלא יאפשר לעמוד ביעדי האיסוף. לעומת זאת, הערכת חסר של הפסולת תיצור מצב של עמידה ביעדים, אך כמויות של פסולת לא מטופלת. פולין, המדינה היחידה שבחרה לקבוע יעדים לפי הפסולת המיוצרת, ככל הידוע במחקר זה, סטתה מהמודל המוצע ובחרה באופן חישוב שונה.

5.4.2 סטנדרט שירות במקום יעד איסוף

בדומה למתרחש בצרפת ובטייוואן, שבהן יש לענות לכל קריאה לפינוי לוחות סולריים (בלי קשר ליעדי האיסוף הקבועים בחוק, במקרה של צרפת), מומלץ לקבוע סטנדרט שירות שבו כל קריאה לפינוי לוחות, שאינה נעשית כדי להתקין לוחות חדשים, תיענה על-ידי מתקין מקצועי מטעם גוף אחריות היצרן. עבור הסרת לוחות בכוונה להתקין לוחות חדשים, יש לחייב את מפיצי הלוחות בתוכניות "קחו-החזירו", שבהן בכל קנייה והתקנה של לוח סולרי, המתקין מחויב להסיר ולפנות את הלוחות לנקודת איסוף מוכרת. במקביל לאיסוף לפי קריאה, מומלץ לבחון את כמויות הפסולת המיוצרות בהשוואה למודל הסטטיסטי, כך שיהיה אפשר לכוונן אותן לפי כמויות הפסולת בפועל. צפי של כמויות הפסולת חשוב לא רק בהיבט של קביעת יעדים עתידיים, אלא גם בהיבט של תכנון כלכלי עבור פעולות מערך הטיפול בפסולת.

5.4.3 יעדי מחזור

יעדי המחזור הנהוגים כיום באיחוד האירופי מאפשרים טיפול במדרג נמוך. יעדי מחזור של 80% והשבה של 85% ממשקל הלוח מאפשרים עמידה ביעד, עם הטיפול במסגרת האלומיניום, כבלי הנחושת וחלק מהזכוכית. מומלץ לקבוע יעדים אלו, או יעדים מדורגים, עד שתתבסס תעשיית מחזור רלוונטית, עם כוונה לבחון את היעדים מדי חמש שנים ולהתאימם לטכנולוגיות הזמינות בשוק, כולל בחינת יעדי מחזור לפי חומר. התאמת היעדים מדי חמש שנים תאפשר מענה גמיש לטכנולוגיות המתפתחות.

5.5 היררכיית טיפול לפי היררכיית הטיפול בפסולת

כדי להפחית כמה שאפשר את הפיכת הלוח הסולרי לפסולת, מומלץ לקבוע צעדים שיעודדו שימושים נוספים, בראשם צעדי מניעת פסולת והארכת זמן החיים של הלוח במקום ההתקנה הראשון, צעדים לעידוד השימוש החוזר, מחזור עבור לוחות שאינם בני תיקון, ולבסוף הנחיות להשבה ולסילוק סביבתי של פסולת לוחות.

5.5.1 מניעה

- עידוד שימוש נכון ותחזוקה מיטיבה (מדריך תחזוקה) - הנגשת מדריכים והנחיות תחזוקה עבור משקי בית והתקנות מסחריות למניעה של תקלות (Jordan et al., 2020). הנחיות להסרה ולהתקנה מחדש לאחר שיפוץ הגג.
- עידוד הארכת זמן השימוש - מניבה תוצאות סביבתיות טובות יותר מתהליכי מחזור, בזכות צמצום של טביעת הרגל הפחמנית בשלב הייצור (Polverini et al., 2023).
- הנגשת מידע לציבור לקבלת החלטה מושכלת יותר במעמד הרכישה - עידוד רכישת לוחות בעלי תכונות עמידות ושרידות; אימוץ סימון מדרגי עמידות, יכולת מחזור ויכולת תיקון עבור לוחות סולריים, ככל שיהיו כאלה, לפי הרגולציה האירופית החדשה; תנאים לעיצוב מקיים עבור מוצרים בני קיימא. מכיוון שבישראל אין תעשייה מבוססת של ייצור לוחות סולריים, ומכיוון שגודל השוק הישראלי קטן ביחס לשוק העולמי, החלטות המדיניות הישראליות לא ישפיעו על תכנון ועיצוב המוצר. כאשר ייקבעו קריטריונים מחייבים בשוק האירופי לגבי קריטריונים להערכת התנאים לעיצוב מקיים, יהיה צורך לבחון את התאמתם לשוק הישראלי ולאמצם.

5.5.2 שימוש חוזר

פיתוח שוק יד שנייה ומודלים לשימוש חוזר - אחד החסמים של כדאיות כלכלית למערך שימוש חוזר נובע מהיקפי פסולת נמוכים. במצב כזה, כלל העלויות מתחלקות על מספר קטן של לוחות, וכך גדלה עלות הטיפול ללוח. גידול בכמויות של לוחות עם פוטנציאל שימוש חוזר גבוה, לוחות שהוסרו לטובת התקנת לוחות יעילים יותר, עשוי להקטין את העלות ללוח. שדות סולריים מתחזקים את הלוחות באופן שוטף, כך שהיעילות של הלוחות נפגעת פחות, והמצב הכללי שלהם טוב יותר משל לוחות שהיו בשימוש ביתי. בארץ, ממידע שהתקבל מחברות אנרגיה, רוב הלוחות שהוסרו משדות גדולים לטובת שדרוג, נמכרו לשימוש חוזר ולא הגיעו לזרם הפסולת. יצירת תמריצים לחברות אנרגיה או למפעילים של שדות סולריים להעביר את הלוחות שהסירו לשימוש חוזר, עשוי להסיט לוחות רבים מזרם הפסולת. בארצות הברית, תרומת לוחות למטרות צדקה אף מוכרת לקבלת הטבת מס.

חסם נוסף לפיתוח שוק לשימוש חוזר הוא מחסור בסטנדרטים ובתקנים עבור הטיפול בלוח משומש. פיתוח או אימוץ תקנים לבדיקה ולתיקון של לוח סולרי ותקן לאחריות מינימלית עבור הלוח בשימוש חוזר יסייעו להסרת חסם זה. גם בהיבט זה, לחברות אנרגיה יש יכולת לבצע בדיקות בקלות יחסית לפני הסרת הלוחות, ולמכור או לתרום לשימוש חוזר את הלוחות שעברו את הבדיקה.

רשויות מקומיות רבות מעודדות התקנה של לוחות סולריים על גגות מבני ציבור ועל נכסים נוספים של הרשות. כאשר רשות מחליפה לוחות ללוחות יעילים יותר, מומלץ להסיט את המערכת המוחלפת למבנים שלא אותרו כמבנים להתקנת לוחות סולריים מלכתחילה. מבנים אלו יכולים להיות מבנים שהייעוד שלהם שונה, אך יעבור זמן עד לשינוי הייעוד בפועל: מבנים שמיועדים להריסה או לשיפוץ בתוך כמה שנים, שטחים המיועדים לבנייה אך הבנייה בהם לא החלה וכד' (de Vilder et al., 2023). ערוץ נוסף ללוחות מוחלפים בשטחי הרשות המקומית עשוי להיות גגות של בניינים משותפים. הרגולציה בישראל מקשה על דיירי בניינים משותפים ליהנות מרווחי ייצור החשמל כיחידים. כלומר, אפשר ליהנות מהחשמל רק עבור הצרכים המשותפים של הבניין. מומלץ ליצור מודלים שיאפשרו לרשות להתקין לוחות שהוסרו במסגרת שדרוג גגות ציבוריים על בניינים משותפים, כך שהדיירים יוכלו ליהנות מהחשמל המשותף ומפיצוי בדמות שירותים עירוניים שונים.

5.5.3 מחזור

מכיוון שישראל מייבאת לוחות סולריים וכמעט אין ייצור של לוחות סולריים בשטחה, וכן לא קיימות תעשיות לקליטה של תוצרי המחזור, יש לפעול בשני מישורים: (1) עידוד הקמת מתקן טיפול בפסולת לוחות סולריים. (2) עידוד תעשיות מקומיות לבחון שימוש בתוצרי המחזור של לוחות סולריים. אין ביקוש כיום לתוצרי המחזור בתעשייה המקומית, למעט כמה תוכניות הבחנות שימוש בזכוכית גרוסה.

5.6 סיכום

לסיכום, כדי להיערך בצורה המיטבית לכמויות הפסולת הצפויות מלוחות סולריים, יש לקדם תיקון חקיקה שיסדיר את מערך האחריות המימונית והתפעולית לטיפול בפסולת זו באמצעות ארגון אחריות יצרן. מוצע לתקן את חוק הטיפול בפסולת אלקטרונית, כך שיתאים לטיפול בפסולת לוחות סולריים. מומלץ להטיל חובת אחריות מימונית ותפעולית על היצרנים והיבואנים להקמה ולהפעלה של מערך הטיפול בפסולת - משלב האיסוף ועד שלב גמר הטיפול, לפי היררכיית הטיפול בפסולת, באמצעות ארגון אחריות יצרן.

הסוגיה המכרעת היא ייסוד מנגנון מימוני שיבטיח את קיום הכספים בזמן היווצרות הפסולת, בטווח של שניים או שלושה עשורים קדימה. מוצע אפוא לייסד קרן ייעודית בניהול חיצוני לארגון אחריות היצרן, קרן שתאסוף, תנהל ותחלק את הכספים לפי צורכי הטיפול. את הכספים מומלץ לאסוף כסכום אחיד במעמד הרכישה. האחריות התפעולית תושט על היצרנים, בהגדרתם המורחבת, הכוללת יבואנים, משווקים, נציגים של אתרי מכירה מרחוק או חברות אנרגיה וגופים מטעמן הרוכשים את הלוחות באופן עצמאי ומתקינים אותם בישראל.

מומלץ לקבוע יעדי מינימום לאיסוף בשיעור של 85% מכמות הפסולת הנוצרת בכל שנה. את החישוב אפשר לעשות לפי המודל המוצע במחקר זה. במקביל ליעדי מינימום לאיסוף מתוך הפסולת הנוצרת, מומלץ לאמץ סטנדרט שירות שיחייב איסוף לפי קריאה כאשר יש פסולת לוחות לפינוי. את מודל הערכת כמויות הפסולת יש לעדכן באופן שוטף באמצעות הזנת מידע חדש בנוגע ליחס הספק-מסה מדי שנה ובאמצעות התאמת הפרמטרים במודל הסטטיסטי בהתאם לשוק הישראלי. בהיבט התפעולי, יש לחייב תוכניות קחו-החזירו לאיסוף הלוחות ואיסוף לפי קריאה. יש לחייב מערכת סימון שתישא מידע מזהה לגבי הלוחות, כך שיהיה אפשר לאסוף, למיין ולטפל באופן המיטבי בפסולת. לסימון בדמות דרכון מוצר דיגיטלי יש פוטנציאל לסייע גם לצרכנים לקבל החלטות מושכלות במעמד הקנייה וגם לשאר השחקנים בשוק. יש לחייב רישוי ותקני טיפול מתאימים עבור מתקני הטיפול בפסולת ותהליכי הבדיקה לשימוש חוזר. יש לייסד מנגנונים תומכים לטיפול בפסולת לפי היררכיית הטיפול בפסולת.

כמו כן, בהסתמך על מומחים בתעשייה, מחקר זה נערך על לוחות סולריים מבוססי סיליקון, מכיוון שזהו הזרם הכמעט בלעדי בארץ. יש לעקוב אחרי המגמות בשוק ההתקנות ולהתאים את ההנחיות גם עבור לוחות מסוג סרט דק, פרובסקייט או אחר, ככל שאלו ייכנסו לשימוש בישראל. יש לקדם מחקר ופיתוח לפתרונות טכנולוגיים עבור תעשיית המחזור ופיתוח של שווקים חדשים לקליטת תוצרי המחזור.

עד לתיקון החקיקה יש לקדם פתרונות ביניים: לחייב תוכניות תשתית לאומית או תוכניות מפורטות עבור מתקנים פוטו-וולטאיים להסדיר את מחזור הלוחות - לא רק בתום חיי המתקן, אלא אף במהלכו, במסגרת החלפת לוחות. כמו כן, מוצע להנחות רשויות מקומיות להכניס דרישות מחזור לוחות במכרזים שהן מפרסמות, בדומה לנוסח בתוכניות התשתית.

מקורות

- בן ארי, ח' ודולב, ש'. 2021. מפת הדרכים למשק דל פחמן 2050, משרד האנרגיה.
- בן ארי, ח' ודולב, ש'. 2022. מפת הדרכים לאנרגיות מתחדשות בשנת 2030, משרד האנרגיה.
- המשרד להגנת הסביבה ביפן. הנחיות לשימוש חוזר בלוחות סולאריים (ביפנית)
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/116525.pdf>
- רשות החשמל. 2008. רשות לשירותים ציבוריים חשמל. החלטות הרשות מישיבה מס' 216, תאריך 2.6.2008.
<https://www.tashtiot.co.il/wp-content/uploads/2009/11/8031.pdf>
- .DB .
- Aghaei, M., Fairbrother, A., Gok, A., Ahmad, S., Kazim, S., Lobato, K. & Kettle, J. 2022. "Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112160
- Baldé, C. P., Wagner, M., Iattoni, G., & Kuehr, R. 2020. "In-depth review of the WEEE Collection Rates and Targets". UNU UNITAR Bonn.
- Brown, F. C., Bi, Y., Chopra, S. S., Hristovski, K. D., Westerhoff, P., & Theis, T. L. 2018. "End-of-life heavy metal releases from photovoltaic panels and quantum dot films: hazardous waste concerns or not?". *ACS sustainable chemistry & engineering*, 6(7), 9369-9374.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). 2017; Mitteilung 31A – "Umsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes" Anforderungen an die Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten https://www.laga-online.de/documents/m-31-a_1517834714.pdf
- Choi, J.K. and Fthenakis, V. 2014. "Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives". *Journal of Cleaner Production*, 66, pp.443-449.
- Corcelli, F., Ripa, M., Leccisi, E., Cigolotti, V., Fiandra, V., Graditi, G., & Ulgiati, S. 2018. "Sustainable urban electricity supply chain—Indicators of material recovery and energy savings from crystalline silicon photovoltaic panels end-of-life". *Ecological indicators*, 94, 37-51.
- Cui, H., Heath, G., Remo, T., Ravikumar, D., Silverman, T., Deceglie, M., & Engel-Cox, J. 2022. "Technoeconomic analysis of high-value, crystalline silicon photovoltaic module recycling processes". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 238, 111592.

Curtis, T. L., Buchanan, H., Heath, G., Smith, L., & Shaw, S. 2021. "Solar photovoltaic module recycling: a survey of US policies and initiatives (No. NREL/TP-6A20-74124)". National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).[a]

Curtis, T. L., Buchanan, H., Smith, L., & Heath, G. 2021. "A circular economy for solar photovoltaic system materials: Drivers, barriers, enablers, and US policy considerations (No. NREL/TP-6A20-74550)". National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).[b]

D'Adamo, I., Ferella, F., Gastaldi, M., Ippolito, N. M., & Rosa, P. 2023. "Circular solar: Evaluating the profitability of a photovoltaic panel recycling plant". *Waste Management & Research*, 41(6), 1144-1154.

D'Adamo, I., Miliacca, M., & Rosa, P. 2017. "Economic feasibility for recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules". *International Journal of Photoenergy*, 2017(1), 4184676.

de Sadeleer, N. 2020. *Environmental principles: from political slogans to legal rules*. Oxford University Press.

de Vilder, S., van Driel, J., Cucurachi, S. & Vogt, M. 2023. *The Impact of Operational Lifetime Extension for Solar Panels in Cities*.

Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. 2019. "A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 532-550.

Deng, R., Zhuo, Y., & Shen, Y. 2022. "Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106612.

Deutsche Umwelthilfe, 2021. "Strengthening circularity in photovoltaics - Challenges and opportunities along the lifecycle".

Dudley, M. 2018. PV Systems Stewardship Options Assessment, Options Feasibility Study. Resource Recovery Strategies & Programs, Sustainability Victoria.

Duran, A. S., Atasu, A., & Van Wassenhove, L. N. 2022. "Cleaning after solar panels: applying a circular outlook to clean energy research". *International Journal of Production Research*, 60(1), 211-230.

EEA, European Environmental Agency. 2023. Economic instruments and separate collection systems – key strategies to increase recycling. [a].

EEA, European Environmental Agency. 2023. Technical note accompanying the EEA briefing 'Economic instruments and separate collection – key instruments to increase recycling'. [b].

Elhassene, I. C., El Heiba, B., Taha, M. Q., Mahmoud, T. M., Aoulmi, Z., Youm, I., & Mahmoud, A. 2024. "Early degradation factors of solar 33 kV grid connected power plant, a comparative study". *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 15(1), 442-453.

ESIA, European Solar PV Industry Alliance. 2023. Addressing uncertain antimony content in solar glass for recycling. <https://solaralliance.eu/wp-content/uploads/2023/10/Recommendation-on-Addressing-uncertain-antimony-content-in-solar-glass-for-recycling.pdf>

Faircloth, C. C., Wagner, K. H., Woodward, K. E., Rakkwamsuk, P., & Gheewala, S. H. 2019. "The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand". *Resources, Conservation and Recycling*, 143, 260-272.

Farrell, C. C., Osman, A. I., Doherty, R., Saad, M., Zhang, X., Murphy, A. & Rooney, D. W. 2020. "Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109911.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, PSE Projects GmbH. 2024. Photovoltaics Report. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

Finnveden, G., Ekvall, T., Arushanyan, Y., Bisailon, M., Henriksson, G., Östling, U. G. & Guath, M. 2013. "Policy instruments towards a sustainable waste management". *Sustainability*, 5(3), 841-881.

Forti, V., Balde, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. 2020. "The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential".

Ganguly, G. 2023. "Improved sustainability of solar panels by improving stability of amorphous silicon solar cells". *Scientific Reports*, 13(1), 10512.

Gavrilescu, D., Enache, A., Ibănescu, D., Teodosiu, C., & Fiore, S. 2021. "Sustainability assessment of waste electric and electronic equipment management systems: Development and validation of the SUSTWEEE methodology". *Journal of Cleaner Production*, 306, 127214.

Heath, G. A., Silverman, T. J., Kempe, M., Deceglie, M., Ravikumar, D., Remo, T. & Wade, A. 2020. "Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy". *Nature Energy*, 5(7), 502-510.

Heide, A. 2022. Labelling and Certification Protocols for second life PV modules. D3.2. Circusol Project. https://www.circusol.eu/files/Deliverables/D3-2_Labelling_and_certification_protocols_for_second_life_PV_modules.pdf

Heine, D., Faure, M. G., & Dominioni, G. 2020. "The polluter-pays principle in climate change law: An economic appraisal". *Climate Law*, 10(1), 94-115.

Huang, X., Atasu, A., & Toktay, L. B. 2019. "Design implications of extended producer responsibility for durable products". *Management Science*, 65(6), 2573-2590.

IEA. 2010. Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy. https://iea.blob.core.windows.net/assets/3a99654f-ffff-469f-b83c-bf0386ed8537/pv_roadmap.pdf

IEA. 2022. Status of PV Module Recycling in Selected IEA PVPS Task12 Countries 2022. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/09/Report-IEA-PVPS-T12-24_2022_Status-of-PV-Module-Recycling.pdf

IEA. 2024. Status of PV Module Take-Back and Recycling in Germany IEA PVPS Task12 Countries 2022.

IEA PVPS Korea. 2019. National Survey Report of PV Power Application in Korea 2018. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/03/NSR_Korea_2018.pdf

IEA PVPS Korea. 2020. National Survey Report of PV Power Application in Korea 2019. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/01/NSR_Korea_2019.pdf

IEA PVPS Korea .2023. National Survey Report of PV Power Application in Korea 2022. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/01/IEA-PVPS-National-Survey-Report-KOREA-2022.pdf>

International Energy Agency. 2021. "Achievements of Energy Efficiency Appliance and Equipment Standards and Labelling Programmes". OECD Publishing.

International Energy Agency (IEA). 2022. "Special Report on Solar PV Global Supply Chains". OECD Publishing.

ITRPV. 2023. *International Technology Roadmap for Photovoltaics, 2022 results*. Fourteenth edition.

IRENA and IEA-PVPS. 2016. "End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels". International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.

IRENA. 2023. Renewable capacity statistics 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi [a]

IRENA. 2023. Renewable power generation costs in 2022, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [b]

IRENA stats tool. <https://www.irena.org/Data/Downloads/Tools>

Jean, J., Woodhouse, M., & Bulović, V. 2019. "Accelerating photovoltaic market entry with module replacement". *Joule*, 3(11), 2824-2841.

- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. 2013. "Photovoltaic degradation rates—an analytical review". *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12-29.
- Jordan, D.C., Marion, B., Deline, C., Barnes, T. and Bolinger, M. 2020. "PV field reliability status—Analysis of 100 000 solar systems". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(8), pp.739-754.
- Jordan, D. C., Haegel, N., & Barnes, T. M. 2022. "Photovoltaics module reliability for the terawatt age". *Progress in Energy*, 4(2), 022002.
- Kherici, Z., Kahoul, N., Cheghib, H., Younes, M., & Affari, B. C. 2021. "Main degradation mechanisms of silicon solar cells in Algerian desert climates". *Solar Energy*, 224, 279-284.
- Khatriwal, D. S., Kraeuchi, P., & Widmer, R. 2009. "Producer responsibility for e-waste management: key issues for consideration—learning from the Swiss experience". *Journal of environmental management*, 90(1), 153-165.
- Kim, H. and Park, H. 2018. "PV waste management at the crossroads of circular economy and energy transition: the case of South Korea". *Sustainability*, 10(10), p.3565.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. 2009. "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells". *Journal of the american chemical society*, 131(17), 6050-6051.
- Komoto, K. 2018. PV Recycling in Japan. IEA PVPS Task12: PV Sustainability. <https://apvi.org.au/wp-content/uploads/2019/04/Session-3-PV-Recycling-in-Japan-Komoto.pdf>
- Kuitche, J. M. 2010. "Statistical lifetime prediction for photovoltaic modules. In Proceedings of the Photovoltaic Module Reliability Workshop".
- Kumar, A., Kumar, A., MMS, C. P., Chaturvedi, A. K., Shabnam, A. A., Subrahmanyam, G. & Yadav, K. K. 2020. "Lead toxicity: health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches". *International journal of environmental research and public health*, 17(7), 2179.
- Kumar, S., & Sarkar, B. 2013. "Design for reliability with weibull analysis for photovoltaic modules". *Int. J. Curr. Eng. Technol*, 3(1), 129-134.
- Kwak, J. I., Kim, L., Lee, T. Y., Panthi, G., Jeong, S. W., Han, S. & An, Y. J. 2021. "Comparative toxicity of potential leachates from perovskite and silicon solar cells in aquatic ecosystems". *Aquatic Toxicology*, 237, 105900.
- Lakhan, C. 2016. "Consumer perception of environmental harm and willingness to pay environmental handling fees". *Environments*, 3(1), 8.

- Laronde, R., Charki, A., & Bigaud, D. 2013. "Lifetime estimation of a photovoltaic module subjected to corrosion due to damp heat testing". *Journal of Solar Energy Engineering*, 135(2), 021010.
- Latunussa, C. E., Ardente, F., Blengini, G. A., & Mancini, L. 2016. "Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels". *Solar energy materials and solar cells*, 156, 101-111.
- Laubinger, F., Brown, A., Dubois, M., & Börkey, P. 2021. "Modulated fees for extended producer responsibility schemes (EPR)".
- LAGA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall. 2017. "Umsetzung des Elektro-und Elektronikgerategesetzes". www.laga-online.de/documents/m-31-a_1517834714.pdf
- Li, X., Liu, H., You, J., Diao, H., Zhao, L., & Wang, W. 2022. "Back EVA recycling from c-Si photovoltaic module without damaging solar cell via laser irradiation followed by mechanical peeling". *Waste Management*, 137, 312-318.
- Libra, M., Mrázek, D., Tyukhov, I., Severová, L., Poulek, V., Mach, J., Šubrt, T., Beránek, V., Svoboda, R. and Sedláček, J. 2023. "Reduced real lifetime of PV panels–Economic consequences". *Solar Energy*, 259, pp.229-234.
- Lifset, R., Kalimo, H., Jukka, A., Kautto, P., & Miettinen, M. 2023. "Restoring the incentives for eco-design in extended producer responsibility: The challenges for eco-modulation". *Waste Management*, 168, 189-201.
- Magalini, F., Wang, F., Huisman, J., Kuehr, R., Baldé, K., van Straalen, V. & Akpulat, O. 2014. "Study on collection rates of waste electrical and electronic equipment (WEEE)".
- Mathur, D., Gregory, R., & Hogan, E. 2021. "Do solar energy systems have a mid-life crisis? Valorising renewables and ignoring waste in regional towns in Australia's Northern Territory". *Energy Research & Social Science*, 76, 101934.
- Masson, G. 2024. PVPS Task 1, Strategic PV Analysis and Outreach – 2023 Snapshot of global PV markets. IEA PVPS, Apr.
- METI, Japanese Ministry of the Economy Trade and Industry. 2021. Procurement Price Calculation Committee. Page 45. https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/20210127_1.pdf
- Nain, P., & Kumar, A. 2020. "Metal dissolution from end-of-life solar photovoltaics in real landfill leachate versus synthetic solutions: One-year study". *Waste Management*, 114, 351-361.
- Nelson, W. B. 2009. *Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis*. John Wiley & Sons.

- Nieto-Morone, M. B., Alonso-García, M. C., Rosillo, F. G., Santos, J. D., & Muñoz-García, M. A. 2023. "State and prospects of photovoltaic module waste generation in China, USA, and selected countries in Europe and South America". *Sustainable Energy & Fuels*, 7(9), 2163-2177.
- NREL – Spring 2023 Solar Industry Update, national renewable energy laboratory. www.nrel.gov/docs/fy23osti/86215.pdf [a]
- NREL, Best research-cell efficiency chart <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed September 2023) [b]
- OECD. 2024. Extended Producer Responsibility: Basic facts and key principles. OECD Environment Policy Paper No.41.
- OECD. 2016. Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264256385-en>
- Oteng, D., Zuo, J., & Sharifi, E. 2022. "An expert-based evaluation on end-of-life solar photovoltaic management: An application of Fuzzy Delphi Technique". *Sustainable Horizons*, 4, 100036.
- Padoan, F. C., Altimari, P., & Pagnanelli, F. 2019. "Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development". *Solar Energy*, 177, 746-761.
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Granata, G., Atia, T. A., Altimari, P., Havlik, T., & Toro, L. 2017. "Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies". *Waste management*, 59, 422-431.
- Paiano, A. 2015. "Photovoltaic waste assessment in Italy". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 99-112.
- Panthi, G., Bajagain, R., An, Y. J., & Jeong, S. W. 2021. "Leaching potential of chemical species from real perovskite and silicon solar cells". *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 115-122.
- Parajuly, K., Kuehr, R., Awasthi, A. K., Fitzpatrick, C., Lepawsky, J., Smith, E. & Zeng, X. 2019. Future e-waste scenarios. StEP (Bonn), UNU ViE-SCYCLE (Bonn) & UNEP IETC (Osaka).
- Peeters, J. R., Altamirano, D., Dewulf, W., & Duflou, J. R. 2017. "Forecasting the composition of emerging waste streams with sensitivity analysis: A case study for photovoltaic (PV) panels in Flanders". *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 14-26.

- Polverini, D., Dodd, N., & Espinosa, N. 2021. "Potential regulatory approaches on the environmental impacts of photovoltaics: Expected improvements and impacts on technological innovation". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(1), 83-97.
- Polverini, D., Amillo, A. G., Taylor, N., Sample, T., Salis, E., & Dunlop, E. D. 2022. "Building Criteria for Energy Labeling of Photovoltaic Modules and Small Systems". *Solar RRL*, 6(5), 2100518.
- Polverini, D., Espinosa, N., Eynard, U., Leccisi, E., Ardente, F., & Mathieux, F. 2023. "Assessing the Carbon footprint of photovoltaic modules through the EU Ecodesign Directive". *Solar Energy*, 257, pp.1-9.
- Polverini, D., Alfieri, F., Spiliotopoulos, C., & Arcipowska, A. 2024. "Towards a recyclability index for photovoltaic modules: Methodology, challenges and policy implications". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*.
- Preet, S., & Smith, S. T. 2024. "A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: Challenges and future outlook". *Journal of Cleaner Production*, 141661.
- Procurement Prices from 2021 onwards, Cost and Price Calculation Committee.
- Rahmany, S. and Etgar, L. 2020. "Semitransparent perovskite solar cells". *ACS Energy Letters*, 5(5), pp.1519-1531.
- Reinders, A., Verlinden, P., Van Sark, W., & Freundlich, A. 2017. *Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications*. John Wiley & Sons.
- Richter, A., Hermle, M. and Glunz, S.W. 2013. "Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells". *IEEE journal of photovoltaics*, 3(4), pp.1184-1191.
- Riech, I., Castro-Montalvo, C., Wittersheim, L., Giacomán-Vallejos, G., González-Sánchez, A., Gamboa-Loira, C. & Méndez-Gamboa, J. 2021. "Experimental methodology for the separation materials in the recycling process of silicon photovoltaic panels". *Materials*, 14(3), 581.
- Rivera, A., Movalia, S., Pit, H., & Larsen, K. 2022. "Global Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020 and Preliminary 2021 Estimates". *Rhodium Group*, 19.
- Roy, P., Ghosh, A., Barclay, F., Khare, A., & Cuce, E. 2022. "Perovskite solar cells: a review of the recent advances". *Coatings*, 12(8), 1089.
- Rubino, A., Granata, G., Moscardini, E., Baldassari, L., Altimari, P., Toro, L., & Pagnanelli, F. 2020. "Development and techno-economic analysis of an advanced recycling process for photovoltaic panels enabling polymer separation and recovery of Ag and Si". *Energies*, 13(24), 6690.

- Salim, H., Florin, N., Wakefield-Rann, R., Madden, B. 2023. "Enabling a responsible *second-hand market for photovoltaic systems in Australia*". Report prepared by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney.
- Santos, J.D. and Alonso-García, M.C., 2018. "Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050". *Journal of cleaner production*, 196, pp.1613-1628.
- Schnatmann, A. K., Schoden, F., & Schwenzfeier-Hellkamp, E. 2022. "Sustainable PV module design—review of state-of-the-art encapsulation methods". *Sustainability*, 14(16), 9971.
- Schneider, A., Efrati, A., Alon, S., Sohmer, M., & Etgar, L. 2020. "Green energy by recoverable triple-oxide mesostructured perovskite photovoltaics". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(49), 31010-31017.
- SEIA. 2023. Solar Industry Research Data. <https://www.seia.org/solar-industry-research-data> Accessed 25.04.2024
- Sharma, H. B., Vanapalli, K. R., Barnwal, V. K., Dubey, B., & Bhattacharya, J. 2021. "Evaluation of heavy metal leaching under simulated disposal conditions and formulation of strategies for handling solar panel waste". *Science of the Total Environment*, 780, 146645.
- Sinha, P., Heath, G. A., Wade, A., & Komoto, K. 2019. Human Health Risk Assessment Methods for PV (Part 2: Breakage Risks) (No. NREL/TP-6A20-74470; IEA-PVPS-T12-15: 2019). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Sinha, P., Heath, G., Wade, A., & Komoto, K. 2020. "Human health risk assessment methods for PV, Part 3: Module disposal risks, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12". Report T12-16: 2020.
- Solar Generation 6. 2011. Solar photovoltaic electricity empowering the world. http://pvtrin.eu/assets/media/PDF/Publications/Other%20Publications/36.SolarGeneration6__2011.pdf
- Song, B. P., Zhang, M. Y., Fan, Y., Jiang, L., Kang, J., Gou, T. T., ... & Zhou, X. 2020. "Recycling experimental investigation on end of life photovoltaic panels by application of high voltage fragmentation". *Waste Management*, 101, 180-187.
- Soren web site. <https://www.soren.eco> accessed July 6th 2024.
- Soren activity report 2023. 2024. https://www.soren.eco/wp-content/uploads/2024/06/VF-RA_SOREN_2023.pdf

- Tamaro, M., Salluzzo, A., Rimauro, J., Schiavo, S., & Manzo, S. 2016. "Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels". *Journal of Hazardous Materials*, 306, 395-405.
- Tan, V., Dias, P.R., Chang, N. and Deng, R. 2022. "Estimating the lifetime of solar photovoltaic modules in Australia". *Sustainability*, 14(9), p.5336.
- Tsanakas, J. A., van der Heide, A., Radavičius, T., Denafas, J., Lemaire, E., Wang, K. & Voroshazi, E. 2020. "Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re-certification". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(6), 454-464.
- Van Straalen, V.M, Roskam, A.J., & Baldé, C.P. 2016. Waste over Time [computer software]. The Hague, The Netherlands: Statistics Netherlands (CBS). Retrieved from: <http://github.com/Statistics-Netherlands/ewaste>
- Wang, J. Y., Qian, Z., Wang, J. Y., & Pei, Y. 2019. A study on the lifetime estimation of photovoltaic modules under accelerated environmental conditions. In: 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 1035-1040). IEEE.
- Way, R., Ives, M. C., Mealy, P., & Farmer, J. D. 2022. "Empirically grounded technology forecasts and the energy transition". *Joule*, 6(9), 2057-2082.
- Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L., & Yang, C. 2018. "Global status of recycling waste solar panels: A review". *Waste management*, 75, 450-458.
- Yaroshevsky, A. A. 2006. "Abundances of chemical elements in the Earth's crust". *Geochemistry International*, 44, 48-55.
- Younes, M., Labeled, D., Kahoul, N., Cheghib, H., Kherici, Z., Affari, B. C., & De Cardona, M. S. 2020. "Silicon solar cells performance in Algerian desert". In *2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC)* (pp. 1-4). IEEE.
- Young, D. L., Silverman, T. J., Irvin, N. P., Huerta-Murillo, D., Holtkamp, B., & Bosco, N. 2024. Towards Polymer-Free, Femto-Second Laser-Welded Glass/Glass Solar Modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*.
- Zimmermann, T. 2013. Dynamic material flow analysis of critical metals embodied in thin-film photovoltaic cells.

מכון ירושלים למחקרי מדיניות
מרכז מילקן לחדשנות
רחוב רד"ק 20 ירושלים 9218604
משרד: 02-5630175 (שלוחה 34)
www.milkeninnovationcenter.org

