



צילום אילוסטרציה: Freepik

אנרגיות מתחדשות

הערכת סיכוני בריאות ובטיחות לקראת הקמת מפעלים לייצור פאנלים סולאריים פוטו-וולטאיים (PV) בישראל

מאת יפעת זר

רקע כללי

בעקבות משבר האקלים הגלובלי והשפעותיו, החלו מדינות מתפתחות בעולם ליישם בהצלחה תוכניות לצמצום התלות בדלקים מאובנים, להפחית את פליטות גזי החממה בהן ולנקוט צעדים משמעותיים להתייעלות אנרגטית ולהגדלת שיעור האנרגיות המתחדשות במשקי החשמל שלהן. קיימת תקווה כי גם בישראל תיושם תכנית היערכות נאותה לסיכונים האקלים וייעשה מאמץ לעמוד ביעד שקבעה המדינה לפני שנה - לפחות 30% מכלל החשמל הנצרך בישראל עד 2030 יגיע מאנרגיות מתחדשות.

מהי אנרגיה סולארית?

האנרגיה הסולארית היא שיטת ייצור אנרגיה

נקייה, מפותחת יותר מכל השיטות האחרות לייצור אנרגיות מתחדשות הקיימות בעולם (אנרגיית רוח, אנרגיה הידרואלקטרית, אנרגיה משריפת פסולת וביו-מסה, ביו-גז, אנרגיה גיאותרמית, אנרגיה גרעינית). הטכנולוגיה הנפוצה בעולם בתחום האנרגיה הסולארית היא טכנולוגיית PV או הפאנלים (הלוחות) הסולאריים, המבוססת על שימוש בתאים פוטו-וולטאיים. תנאי האקלים השוררים בישראל, בייחוד באזור הנגב, שבו קרינת השמש גבוהה ונמשכת רוב ימות השנה, מאפשרים הזדמנות להתבסס על אנרגיה סולארית כמקור משמעותי ואולי אף עיקרי לייצור החשמל בישראל.

על פי מחקר שערך המשרד להגנת הסביבה בשנת 2020, בתוך עשור ניתן יהיה לייצר 43% מהחשמל בישראל באמצעות

טכנולוגיית PV והתקנת פאנלים סולאריים על גבי המרחב הבנוי, קרי, גגות, מבנים וחניונים, ובהוספת פאנלים אלו גם בשטחים פתוחים, שטחי תשתיות וחקלאות, ניתן יהיה להכפיל את שיעור ייצור החשמל מאנרגיית השמש, תוך שאיפה לאפס פליטות של גזי חממה - עד שנת 2050.

בישראל עדיין לא הוקמו מפעלים לייצור פאנלים PV וכל הפאנלים המותקנים בארץ מיובאים מחו"ל, בעיקר מסין, שלפני כעשור השתלטה על השוק העולמי. אולם לאור התקדמות הטכנולוגיה, הרגולציה ויחסי העלות-תמורה בענף זה, צפויה לצמוח בארץ תעשיית ייצור פאנלים PV, שתתאים לצורכי השעה ותספק מענה מקומי ראוי. לקראת הקמת מפעלי ייצור אלו יש להכיר



צילום אילוסטרציה: Freepik

את הסיכונים הבטיחותיים הקיימים בענף ואת ההשלכות הבריאותיות-תעסוקתיות הצפויות בקרב העובדים בתהליכי הייצור - כדי להיערך אליהם מבעוד מועד.

הערכת הסיכונים הבריאותיים-תעסוקתיים בתעשיית ייצור פאנלים PV

אמנם, יחסית לתעשיית הדלקים המאובנים לייצור אנרגיה, שבה מעורבות כמויות גדולות של חומרים רעילים ודליקים, תעשיית ה-PV נחשבת ידידותית לסביבה ובטיחותית לעובדים הרבה יותר, אך עדיין מעורבים בייצור PV חומרי גלם ועזר מסוכנים. למשל, קיימות טכנולוגיות PV אשר מבוססות על החומרים המסוכנים גליום, ארסן, קדמיום ונחושת, אשר משמשים כחומרי גלם המרכיבים את התאים הפוטו וולטאיים, אם כי טכנולוגיות אלו אינן הנפוצות בענף.

הטכנולוגיות המובילות ביותר מסחרית, עם 90% מהייצור הגלובלי, הן אלו המבוססות על סיליקון חג גבישי Monocrystalline (מקור אחיד של גבישי סיליקון) או סיליקון רב גבישי Polycrystalline (שילוב מספר רב של מקורות של גבישי סיליקון), כאשר מבין השניים, יעילות הפקת האנרגיה מתוצרי Polycrystalline נמוכה יותר, אך מכיוון שגם עלות הייצור שלה נמוכה יותר, היא רווחית ונפוצה יותר.

בדיקת הסיכונים בתהליכי הפקת הסיליקון חוקריים מהמחלקה להנדסה כימית בשתי אוניברסיטאות במקסיקו בחנו את הסיכונים התעסוקתיים האינהרנטיים בשלושת תהליכי הייצור, המקובלים להפקת סיליקון באיכות המטלורגית הרצויה (SiMG) בתעשייה המתבססת על Polycrystalline Silicon : תהליך Seimens, תהליך Intensified FBR (Fluidized bed Reactor) union carbide ותהליך FBR משופר (Hybride).

בתהליכים אלו נעשה שימוש בחומרי הגלם סיליקה (SiO_2) ופחמן (C), ובחומרי העזר מימן (H_2) (וחומצה הידרוכלורית (HCl)). תוצרי הלוואי שמתקבלים כוללים, בין היתר, סילאנים וכלורוסילאנים (SiH_2Cl_2 , SiHCl_3 , SiCl_3 , SiCl_4 SiH_4), ופחמן חד חמצני (CO), ומתקני הייצור כוללים ריאקטורים מסוגים שונים (ריאקטור קשת חשמלית, ריאקטור מצע מרחף, שיקוע אדים כימי - CVD ועוד), מגרסות, עמודות זיקוק קונבנציונליות וריאקטיביות. עובדי הייצור והתחזוקה בתעשייה זו עלולים להיות חשופים לגורמים מזיקים, העלולים להתנדף או להתפזר ממתקני האחסון

על כל שלביהם, הוגדר על ידי החוקרים אינדקס PRHI (Process Route Healthiness Index), המחושב על פי הפרמטרים הבאים:
- גורמי הסיכון הנובעים מתנאי התפעול של התהליך, כגון טמפרטורה, לחץ, שינויים בנפח ובמצבי הצבירה של החומרים.

- מאפייני החומרים המסוכנים המעורבים בתהליך והעלולים להזיק לבריאות או לגרום למחלות מקצוע אופייניות בחשיפה אליהם.

- ספים עליונים מותרים לחשיפה סביבתית-תעסוקתית (OEL min), שנקבעו עבור החומרים המסוכנים.

- רמות החשיפה התיאורטיות הצפויות של החומרים המסוכנים בחלל העבודה.
- תרחישי החשיפה החמורים ביותר (Worst Case Scenario) האפשריים

והייצור השונים במהלך העבודה והתחזוקה שלהם. למשל, אבק סיליקה ופיח, חומצות ובסיסים, מינרלים וחומרים אנאורגניים אחרים (Trace metals), וממסים אורגניים, כגון טריכלורואתאן, המשמש לניקוי ריאקטורים. ההשפעות הבריאותיות של חשיפה לגורמים אלו יכולות להיות גירוי עור ועיניים, דרמטיטיס, בעיות נשימה, אסתמה, פגיעה במערכת העצבים המרכזית וסרטן. כמו כן, התנדפות אפשרית של גז המימן מוסיפה סיכונים פיצוצות ודליקות בסביבת העבודה.

הגדרת מדד לתהליך הייצור המועדף מבחינה בריאותית

מנקודת המבט של בריאות תעסוקתית, תהליך הייצור המועדף הוא זה אשר השפעותיו הבריאותיות המידיות וארוכות הטווח הן הפחותות ביותר. לצורך הערכת הפוטנציאל לסיכון בריאותי, בתהליכי הייצור

חשוב לבצע את הערכת הסיכונים לתהליכי הייצור עוד בשלבי התכנון, כדי לבחור במסלול ייצור בעל ההשלכות הפחותות ביותר על הבריאות, ועם זאת הבטיחותי ביותר, ולהקצות משאבים באופן יעיל לשמירה על בטיחות ובריאות העובדים

שלושת תהליכי הייצור לפי נוסחת ה-ROSF שלעיל, שבו נכללו גם גורמי הסיכון הפיזיים והארגוניים-פסיכולוגיים.

שלושת התהליכים נבחנו על ידי Ramirez et al גם מהיבטים של רווחיות כלכלית, השפעה סביבתית ובטיחות. תהליך ה-Seimens נמצא כבטיחותי ביותר, הידודות ביותר לסביבה והרווחי ביותר, אם כי כמויות התוצר שניתן להפיק בתהליך זה הן הנמוכות ביותר, יחסית לתהליכים האחרים. על פי ממצאיהם, אופציית תהליך ה-Hybride טובה יותר למטרת הפקת כמויות גדולות יותר של תוצר.

חשוב לבצע את הערכת הסיכונים לתהליכי הייצור עוד בשלבי התכנון התהליכי וטרם הקמת המפעל, כדי לבחור במסלול ייצור בעל ההשלכות הפחותות ביותר על הבריאות, ועם זאת הבטיחותי ביותר, ולהקצות משאבים באופן יעיל לשמירה על בטיחות ובריאות העובדים. עם זאת, גורמי הסיכונים וחומרתם יכולים להשתנות בהתאם למאפייני התהליך והשטח בפועל, ולכן, יש לעדכן את תחשיבי הערכת הסיכונים בהתאם למאפיינים האובייקטיביים.

כמו כן, החל מתחילת הייצור יש ליישם תוכנית לניהול סיכונים, אשר כוללת שיטות, נהלים וכללי עבודה להפחתת סיכונים, בין היתר, באמצעות הדרכת עובדים, ניהול חומרים מסוכנים, ניטור תעסוקתי-סביבתי, מעקב רפואי, שימוש באמצעים טכניים הנדסיים, שימוש בצידוד מגן אישי, פיקוח ובקרה, שמירה על תנאי עבודה נאותים, עידוד עובדת צוות ועוד. ●



צילום אילוסטרציה: Freepik

ארגונומית מזיקה, העלויות להוביל למחלות שלד-שריר.

הגדרת מדד לסיכונים פסיכולוגיים-ארגוניים

מפעלי ייצור PV חדשים עשויים להימצא בלחץ של עמידה בביקוש הולך וגובר לתוצרים מותאמים ללקוח, יחד עם צורך בשמירה על עלויות ייצור כדאיות ועל יתרון תחרותי בשוק הצומח. מאמצי הארגון להשגת יעילות וגמישות גבוהה בייצור עלולים להוביל להיווצרות גורמי סיכון פסיכולוגיים וארגוניים (WOPF), אשר פוגעים ברווחת העובדים ומסכנים את בריאותם. תנאי עבודה קשים, כגון עומס עבודה גבוה או עבודה מאומצת, ולעיתים חזרתית ומעייפת, בשעות ממושכות או במשמרות, עלולים לגרום להפרעה במאזן שעות העבודה והפנאי, לבידוד חברתי, לחולשה פיזית, להגברת הסיכון לאלימות, לחשיפה לחומרים מסוכנים ולתאונות עבודה.

בדומה לממצאי הערכת הסיכונים על בסיס חישוב אינדקס PRHI, יצא תהליך ה-Seimens כתהליך המועדף מבין השלושה, ותהליך Intensified FBR - כמסוכן ביותר מביניהם גם בתחשיב המהיר להערכת הסיכונים האינהרנטיים של

כתוצאה מהתאדות, דליפות וכו' של החומרים המסוכנים.

תהליך ה-Seimens קיבל את ערך האינדקס PRHI הנמוך ביותר, המעיד על פוטנציאל סיכון בריאותי תעסוקתי הנמוך ביותר, ותהליך Intensified FBR נמצא כבעל ההשלכות הבריאותיות המזיקות ביותר לעובדים.

ניתן לבצע גם הערכת סיכונים מהירה (IROSF), המבוססת על סכום הסיכונים המשמעותיים ביותר או העיקריים, האופייניים בענף הייצור, ובה להוסיף לגורמי הסיכון הכימיים (CH) ולאלו הנובעים מתנאי התפעול (WC), כאמור באינדקס PRHI, גם את גורמי הסיכון הפיזיים (PH) וגורמים פסיכולוגיים וארגוניים (WOPF) באופן זה:

גורמי הסיכון הפיזיים (PH), הכוללים גורמים בטיחותיים, פיסיקליים וארגוניים, ומעורבים בתהליכי הייצור, כוללים סיכונים עבודה בגובה, כגון נפילה מסולמות ומפלספורמות גבוהות, עבודה עם ובסביבת חלקי מכונות רוטטים, עבודה בחללים מוקפים, עבודה פיזית התובעת מאמצים של מערכות שלד-שריר ולב-ריאות, ביצוע משימות חזרתיות ויומיומיות בעלות השפעה

מקורות:

1. Inherent occupational health hazards in the production of solar grade silicon, Process Safety and Environmental Protection, Process Safety and Environmental Protection, 24 may 2020
2. Monocrystalline Vs. Polycrystalline Solar Panels: What's Best?, Eco watch, 22.8.21 Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels, American solar energy society
3. "ניתן לייצר 43% מהחשמל בישראל באמצעות פאנלים סולאריים - בתוך עשור" - כלכליסט, 20.1.20
4. "ישראל הבטיחה לייצר 30% חשמל נקי עד 2030 - אבל מה עם היעד ל-2020?", The marker, 17.3.21