מספר המחקר במשרד להגנת הסביבה: 165-4-10

SP Interface
Linking Science and Policy

גלעד-שיף אדריכלות

סקר התכנות ליישום של תאים פוטו-וולטאים משולבי מבנה בבניינים מסחריים בישראל

Feasibility study of implementing building integrated photovoltaics (BIPV) in commercial buildings in Israel

דוח מסכם

מוגש ע"י

חוקרים ראשיים:

ד"ר דניאל מדר	SP Interface
גלית שיף	גלעד-שיף אדריכלות
יעל גלעד	גלעד-שיף אדריכלות

חוקרים נוספים:

אבי בלאו	אבי בלאו יעוץ סביבתי
מיכל וורבר	אבי בלאו יעוץ סביבתי
חגי קוט	

מוגש למדענית הראשית

המשרד להגנת הסביבה

31.12.2018

תוכן עניינים

תוכן עניינים 2

רשימת תרשימים 5

רשימת טבלאות 7

תודות 8

תקציר מנהלים 9

Executive Summary 19

מילות מפתח 29

1 מבוא 30

1.1 רקע: תאים פוטו-וולטאים משולבי מבנה 30

1.1.1 בניינים ואנרגיה 30

1.1.2 ביזור מתקני ייצור אנרגיה וחוסן אנרגטי 32

1.1.3 אתגרים בייצור אנרגיה מתחדשת בבניינים 34

1.1.4 תאים פוטו-וולטאים משולבי מבנה BIPV 35

1.2 מטרות המחקר 37

2 סקירת ספרות: תאים פוטו-וולטאים משולבי מבנה (BIPV) 38

2.1 טכנולוגיות קיימות 38

2.1.1 סיליקון גבישי 40

2.1.2 פילם דק 43

2.2 מוצרים קיימים 46

2.2.1 גגות 46

2.2.2 חזיתות 52

2.2.3 השוואת מחירים בין מוצרי BIPV ומוצרי מעטפת רגילים 54

2.3 BIPV בעולם 60

2.3.1 פרויקטים בעולם 60

2.3.2 מדיניות בעולם 68

2.3.3 היקף שוק עולמי 71

2.4 הקשר הישראלי 72

2.4.1 בניין מת"ף, ראשל"צ 72
2.4.2 אקלים 74
2.4.3 מדיניות..... 75
2.4.4 פוטנציאל השוק הישראלי..... 76
3 מתודולוגיה 81
3.1 בחירת בניין משרדים חדש כמושא המחקר..... 81
3.2 סימולציה אנרגטית לחלופות לבניין משרדים על חזיתות BIPV..... 85
3.2.1 תיאור הבניינים אשר נחקרו בסימולציה 85
3.3 ניתוח כלכלי של חלופות ה-BIPV לבניין המשרדים..... 92
3.3.1 שיטות איסוף הנתונים 92
3.3.2 חישוב החזר השקעה 93
3.3.3 תועלות חיצוניות ומשקיות 94
3.3.4 בדיקות רגישות לניתוח הכלכלי 95
4 תוצאות ודיון בתוצאות..... 96
4.1 סימולציה אנרגטית לבחינת חלופות ה-BIPV של בניין המשרדים..... 96
4.1.1 תיקוף התוצאות 101
4.1.2 מקדם הפחתה לקונטקסט עירוני 102
4.2 ניתוח כלכלי לבחינת חלופות ה-BIPV של בניין המשרדים..... 103
4.2.1 הנחות עבודה וריכוז נתוני בסיס לניתוח הכלכלי..... 103
4.2.2 תוצאות כלכליות עיקריות של חלופות ה-BIPV לבניין המשרדים 110
4.2.3 בדיקת רגישות לניתוח הכלכלי 119
4.3 השפעת התייעלות אנרגטית של חלופות ה-BI(PV) על התוצאות..... 120
4.3.1 השפעת התייעלות אנרגטית על ביצועי חלופות I-H..... 121
4.4 תועלות משקיות, מחיר החשמל ותעריפים ל-BIPV..... 124
4.5 מבט לעתיד 125
4.6 מגבלות המחקר 126
5 חסמים..... 128
6 מסקנות 132

6.1 מסקנות אנרגטיות וסביבתיות.....132
6.2 מסקנות כלכליות.....134
6.3 מסקנות רגולטוריות.....135
7 אפשרויות יישום תוצאות העבודה בישראל 136
7.1 המלצות מדיניות.....136
7.2 המלצות רגולציה 136
7.3 המלצות אדריכליות 137
7.4 המלצות כלכליות 138
7.5 המלצות מודעות וידע.....140
7.6 המלצות טכנולוגיות לישראל.....140
8 המלצות למחקרי המשך 141
9 רשימת ספרות 142
10 נספחים.....152
10.1 ראשי תיבות וקיצורים 152
10.2 רשימת אנשי קשר להצעות מחיר למעטפות בניינים.....152
10.3 חישובי סימולציה אנרגטית 153
10.4 חישובי ניתוח כלכלי.....153

רשימת תרשימים

תרשים 1: סנוור ממגדל ה-**CSP** של פרויקט אשלים בנגב. 31

תרשים 2: תמונות לוויין של תאורה לילית בפוארטו-ריקו לפני ואחרי הוריקן מריה, 2019..33

תרשים 3: **BAPV** בטכנולוגיית **c-Si** מותקן על מבנה חקלאי. 34

תרשים 4: **BAPV** בטכנולוגיית **c-Si** מותקן על גג. 35

תרשים 5: רעפי **BIPV** בטכנולוגיית **c-Si**. 36

תרשים 6: התקדמות ביעילות המרה של תאים פוטו-וולטאים. 38

תרשים 7: **BIPV** דיו-צבעוני בבניין (**SwissTech Convention Center (EPFL**, בלוזן, שוויץ. 39

תרשים 8: השוואה במראה טכנולוגיות **m-Si** ו-**p-Si**. 41

תרשים 9: חיפוי בניין ב- **m-Si** צבעוני. 41

תרשים 10: מערכת **m-Si BIPV** לגג. 42

תרשים 11: גגות שכונת מגורים עם **p-Si BIPV**. 43

תרשים 12: **BIPV** פילם דק בשלל צבעים וטקסטורות. 44

תרשים 13: יעילות המרה של תאים פוטו-וולטאים..... 45

תרשים 14: מערכת **BIPV** התקנה בגג..... 47

תרשים 15: פתרון גג נטוי מלא **m-Si BIPV**..... 47

תרשים 16: מערכת **BIPV** טרומית. 48

תרשים 17: רעפי **BIPV**. 49

תרשים 18: התקנת **thin film BAPV** גמיש על גג. 50

תרשים 19: **BIPV** זכוכית סולארית..... 51

תרשים 20: קיר מסך..... 52

תרשים 21: הבדלים בין קיר רגיל, חזית חמה וחזית מאווררת. 53

תרשים 22: אופציות שונות לשילוב מוצרי **BIPV** סולאריים במעטפת המבנה. 54

תרשים 23: השוואה עלות סופית לצרכן בין מערכות **PV** לבין מוצרי מעטפת קונבנציונאליים לגג. 55

תרשים 24: השוואה עלות סופית לצרכן בין מערכות **PV** לחזיתות לבין מוצרי מעטפת קונבנציונאליים לחזיתות..... 56

תרשים 25: השוואה עלות סופית לצרכן בין מערכות **PV** לבין מוצרי מעטפת קונבנציונאליים לחזיתות. 57

תרשים 26: השוואה עלות חומרים בין מערכות PV לבין מוצרי מעטפת קונבנציונאליים לחזיתות. 58

תרשים 27: התפלגות עלויות הרכיבים של **BIPV** על גבי חזית משופצת של בניין מגורים. 59

תרשים 28: בניין **ENERGYbas** בווינה, אוסטריה 61

תרשים 29: **BIPV** עם סיליקון אמורפי (**A-Si**) בבניין **Enzian**. 62
תרשים 30: התאמת חזית הזיגזג של בניין **FKI** לזוויות שמש שונות.....64
תרשים 31: **BIPV** על גג בניין **FKI**. 65
תרשים 32: בניין **FKI** בסיאול, דרום קוריאה. 65
תרשים 33: חזית **BIPV** דרומית של בניין **The Edge** באמסטרדם, הולנד.....66
תרשים 34: חזית צפונית של בניין **The Edge** באמסטרדם, הולנד. 67
תרשים 35: בנייני **Willem de Zwijger** ב-**Best**, הולנד.....68
תרשים 36: תחזית להיקף שוק מוצרי ה-**BIPV** העולמי עבור 2015-2022 [70]. 71
תרשים 37: בניין ה-**Data Center** של מת"ף והבנק הבינלאומי. 73
תרשים 38: פוטנציאל יצור אנרגיה סולרית, על גגות, חזיתות שטוחות וחזיתות עם אופטימיזציה גיאומטרית של טיפולוגיות מבני מגורים. 84
תרשים 39: איור של מבנה הבקרה. 85
תרשים 40: 4 חתכי **BIPV** שנבחנו בבניין. 87
תרשים 41: מתווה הקשר עירוני צפוף שנבחן להצללה על הבניין שלנו מבניינים שכנים. ...92
תרשים 42: היקף השטחים הסולריים בחלופות **BI(PV)** של בניין המשרדים. 96
תרשים 43: כמות הקרינה **(Incident Solar Radiation)** השנתית על גבי המשטחים הסולריים הנבדקים בכל אחת מחלופות ה-**BIPV** של בניין המשרדים.....97
תרשים 44: ממוצע חשיפה לקרינה יומית בגג ובחזיתות למ"ר יישום סולרי, בחלופות ה-**BIPV** של בניין המשרדים.....98
תרשים 45: כמות קרינה שנתית לחלופות ה-**BIPV** של בניין המשרדים.....99
תרשים 46: פוטנציאל ייצור אנרגיה סולארית שנתית לכל המבנה ע"פ חלופות ה-**BIPV** של בניין המשרדים.....100
תרשים 47: ויזואליזציה של פוטנציאל ייצור האנרגיה השנתי עם קונטקסט עירוני (הצללות). 102
תרשים 48: פוטנציאל ייצור האנרגיה השנתי עם קונטקסט עירוני (הצללות). 103
תרשים 49: התפלגות רכיבי עלויות התקנת 4 חלופות **BI(PV)** לבניין המשרדים.....110
תרשים 50: כמות אנרגיה המיוצרת בחלופות **BI(PV)** לבניין המשרדים בשנה, לפי הניתוח הכלכלי. 111
תרשים 51: עלות וחסכון ל-20 שנה, בחלופות **BI(PV)** לבניין המשרדים. 113
תרשים 52: זמן החזר ההשקעה בשנים לחלופות **BI(PV)** לבניין המשרדים. 114
תרשים 53: תועלות חיצוניות ומשקיות מהפחתה ביצור חשמל במשך 20 שנה בחלופות **BI(PV)** לבניין המשרדים. 117
תרשים 54: זמן החזר ההשקעה בשנים לחלופות **BI(PV)** לבניין המשרדים, בשקלול עלויות חיצוניות ותועלות משקיות.....118

תרשים 55: בדיקת רגישות לזמן החזר ההשקעה לחלופות ה-**BI(PV)** בניתוח הכלכלי. ..119
תרשים 56: כמות אנרגיה נחסכת ו/או מיוצרת בחלופות **BI(PV)** לבניין המשרדים בשנה, כולל התייעלות אנרגטית בחלופות **I-H**. 122
תרשים 57: עלות וחסכון ל-20 שנה, בחלופות **BI(PV)** לבניין המשרדים, כולל התייעלות אנרגטית בחלופות **I-H**. 123
תרשים 58: זמן החזר ההשקעה בשנים לחלופות **BI(PV)** לבניין המשרדים, ללא תועלות חיצוניות ומשקיות, כולל התייעלות אנרגטית בחלופות **I-H**. 123
תרשים 59: סקר חסמים בתחום **BIPV** בקרב בעלי עניין בעולם. 131

רשימת טבלאות

טבלה 1: פוטנציאל ייצור חשמל ע"י **BI(PV)** בישראל. 80
טבלה 2: סיכום והשוואה של ההתאמה של שימושי מבנה שונים להתייעלות אנרגטית. [94]. 83
טבלה 3: רשימת חלופות ה-**BIPV** לבניין המשרדים אשר נבחנו בסימולציה 89
טבלה 4: הסבר על הפרמטרים במשוואה 3. 91
טבלה 5: חלופות **BIPV** לבניין והמוצרים שנבחרו בניתוח הכלכלי 108
טבלה 6: השוואה בין בניתוח הכלכלי של חלופה **D** ובניין מת"ף. 116
טבלה 7: תוצאות ניתוח הרגישות לניתוח הכלכלי. 120

תודות

Wiep Folkerts - Solar Energy Application Centre, SEAC

יוסי מוריאל מנהל מחלקת בינוי ונכסים ,רות דיין ראש מדור פרויקטים ואבי חיים מהבנק הבינלאומי הראשון.

עמוס פורן- Unirom Electronics LTD.

נדב כספי.

Christoffer Löfquist- Midsummer

Angelo Coscia- Solibro

Laurent Petit- Sunpartner

Jamie Pimblett-Speck- Polysolar

Bennie Pekel- Sanko Solar

רמי בונה- Alcon

Manuel Gil- Solar Innova

Mila Plaza- Onyx

Wim van del Wall- ZigZag Solar

משה גרפונקיל- Garfunkel

עמר זכוכית נתיבות - אסנת פרטוק

תקציר מנהלים

רקע

בניינים ואנרגיה

90% מהאנשים בעולם המפותח, מבלים 90% מחייהם בתוך בניינים. כל הציביליזציה האנושית המודרנית נטועה עמוק בתוך בניינים, ותלויה באופן קיומי באנרגיה בכלל ובחשמל בפרט. בניינים צורכים כ-40% מהאנרגיה בעולם המפותח, אחראים לפליטת כ-20% מגזי החממה ממקור אנתרופוגני (אנושי), ומהווים את הפגיעה המשמעותית ביותר בשטחים פתוחים. במקביל, היקף ייצור האנרגיה ע"י בניינים בעולם אפסי,

כיום, מתבצע מעבר גלובלי משימוש במקורות אנרגיה מבוססי פחמן (פחם, נפט, גז טבעי) אל מקורות אנרגיה הפולטים מעט מאוד פחמן דו-חמצני במחזור חייהם (דלים בפחמן, רוח, שמש, מים, ביומסה). מעבר זה, יאפשר צמצום דרסטי בפליטת גזי חממה, יצמצם את ההשלכות החמורות של שינוי אקלים לציביליזציה האנושי ולמערכות אקולוגיות, יצמצם את התלות במשאבים מתכלים, יצמצם פליטות מזהמים, ויקדם ייצור אנרגיה דמוקרטי וחסין ע"י כל מדינה ומדינה- ללא תלות בגורמים חיצוניים.

יחד עם זאת, כיום מעבר זה עדיין איטי מידי בכדי לספק צמצום משמעותי ומהיר מספיק בפליטות גזי חממה, לשם מניעת שינוי אקלים משמעותי. דוח חריף של ה-IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) מסוף 2018 קורא לפעולות דחופות של כל המדינות והארגונים לצמצום דרסטי של פליטות גזי חממה והשפעתם לפני 2030, ע"מ למנוע קטסטרופה אקלימית בסבירות גבוהה אשר תגרום לנזקים עצומים לבריאות, לרווחת האדם, לכלכלה ולסביבה. כמו כן, מתקני אנרגיה מתחדשת (שמש, רוח, מים, ביומסה) לרוב תופסים שטחים נרחבים לכל קוט"ש שהם מפיקים (לעומת מתקני אנרגיות מבוססי דלקי מאובנים). מכיוון שרוב רובם של מתקני האנרגיה הדלים בפחמן, מוקמים על שטחים פתוחים, הם ממשיכים את הפגיעה האנושית בשטחים הפתוחים ואף מעצימים אותה מבחינת תפיסת שטח ע"י מתקני אנרגיה.

במצב של פגיעה ברשת החשמל, בניינים יוצאים מכלל שימוש. במקרים רבים, לא ניתן אפילו לשהות או לישון בבניינים ללא חשמל לאורך זמן (אין מעלית, אין מים, אין חימום/ קירור). ללא חשמל בבניינים, הציביליזציה האנושית המודרנית לא יכולה לתפקד.

BAPV

במקביל להתייעלות אנרגטית בבניינים (בידוד תרמי, מערכות אנרגיה חסכוניות, ניצול מיטבי של השמש ועוד), פתרון טכנולוגי לבעיות שהוזכרו, הוא ייצור אנרגיה על מבנים. כיום, פתרון זה מיושם בעיקר באמצעות התקנת תאים פוטו-וולטאים רגילים על גגות מבנים ומתקנים (BAPV- Building Applied Photovoltaics). פתרון זה מבצע שימוש כפול בשטח בנוי גם לייצור אנרגיה. הירידה העקבית בעלויות מתקנים פוטו-וולטאים ואנרגיית רוח הביאה לכך כי הפקת אנרגיות אלו כיום זולה יותר מאשר הפקה באמצעות דלקי מאובנים. לכן, יישום פתרון

זה נמצא בעליה. פתרונות אלו מאפשרים בניית בנייני NZEB/ZEB (Near/ Zero Energy Building), אשר צורכים פחות מ-80% מהאנרגיה מבניין קונבנציונאלי מקביל, או אפילו מעבירים לרשת החשמל יותר אנרגיה לעומת מה שצורכים.

אולם, ל-BAPV מספר בעיות. אמנם, במבנים נמוכים (מספר קומות בודדות), ניתן לייצר הרבה אנרגיה יחסית לשטח הרצפה (השטח המצרפי של כל הרצפות בכל הקומות במבנה) של המבנה באמצעות תאים פוטו-וולטאים פשוטים על הגג, כך, המבנה מייצר נתח משמעותי (עשרות אחוזים ואף מאות אחוזים) של אנרגיה לעומת האנרגיה שהוא צורך. אולם, הבניה המודרנית מתאפיינת ביותר ויותר בניה לגובה. בבניה לגובה, לא ניתן לייצר הרבה אנרגיה יחסית לשטח הרצפה של המבנה (כי שטח הרצפה גדול פי כמה וכמה משטח הגג), ובמקביל צריכת האנרגיה של הבניין עולה (כי בכל קומה משתמשים באנרגיה). כך, המבנה לא מצליח לייצר אפילו אחוזים בודדים מצריכת האנרגיה שלו. כמו כן, BAPV לרוב הינו בעל חזות לא אסטטית, אשר מרתיעה אדריכלים משילוב שלו בבניינים רבים, והוא מונח על מעטפת הבניין מבלי שממלא שום תפקיד נוסף.

BIPV

תאים פוטו-וולטאים משולבי מבנה (BIPV- Building Integrated Photovoltaics), מהווים חלק ממעטפת הבניין וממלאים מספר פונקציות בו זמנית: ייצור חשמל, פתרון אסתטי, הגנה על הבניין מפגעי הסביבה (רוח, משקעים, חפצים, שמש, אבק), והצללה. טכנולוגיה זו מהווה פתרון כולל לבעיות אשר הוזכרו לעיל, ומצמצמת את המשאבים המושקעים בייצור נפרד של BAPV ומעטפת בניין רגילה. כיום, ישנם מאות מוצרי BIPV שונים בעולם, אשר נותנים פתרונות ייצור אנרגיה ומעטפת לגגות, לחזיתות ולחלונות. הוקמו ושופצו כבר מאות בניינים עם מערכות BIPV בעולם.

איור א: חזית BIPV צבעוני בבית הספר הבינלאומי של קופנהגן, דנמרק. *Source: F MØller, photo: Adam MØrk.*

בדומה לטכנולוגיות חדשות רבות אחרות, מכיוון שמדובר על טכנולוגיה חדשה אשר מכניסה ממד חדש ומורכב לענף הבניה, יישום של מוצרי BIPV לרוב יקר באופן ניכר לעומת מוצרי BAPV או מוצרי מעטפת של בניינים. כמו כן, קיים חוסר מודעות וחוסר ידע בנושא.

בעולם המפותח, זיהו את היתרונות של ייצור אנרגיה על מבנים ואת חסמי הכניסה בתחום, ונותנים סיוע ותמיכות ליישום אנרגיה על מבנים בכלל ואף ליישום BIPV בפרט. באיחוד האירופי קבעו תקנות אשר מחייבות כי כל הבניינים החדשים הציבוריים והפרטיים יהיו בנייני NZEB החל מ-2019 ו-2021 בהתאמה, והחל מ-2050 כל הבניינים יהיו ניטרליים מבחינה אנרגטית (לא יצרכו אנרגיה מעבר למה שמייצרים בעצמם). כמעט ולא ניתן לבנות/לשפץ בנייני N/ZEB רבי קומות ללא יישום BIPV. בהתאם למדיניות כזו ולאחרות דומות בעולם, ובהתאם לפיתוחים של מוצרי BIPV מתקדמים בשנים האחרונות, שוק ה-BIPV העולמי עמד ב-2015 על 7$ מיליארד דולר, עם קצב צמיחה שנתי של כ-33%, וצפי שוק של 61$ מיליארד דולר ב-2022.

בישראל, הודות למדיניות חדשה אשר תומכת בייצור אנרגיה על גגות והודות לירידה במחירי התאים הפוטו-וולטאים, ישנו מספר הולך ועולה של בניינים בעלי BAPV על הגגות, אולם אין שוק BIPV. ולמיטב ידיעתנו ישנו רק בניין אחד בעל חזית עם מערכת BIPV.

<u>מטרת המחקר</u>

המטרה העיקרית של מחקר זה הייתה לקדם יישום BIPV בישראל, באמצעות בחינת יישומו בבניין משרדים רב-קומות טיפוסי. המחקר סקר את תחום ה-BIPV בעולם, כלל ניתוח אנרגטי וכלכלי לשילוב BI(PV) ב-9 חלופות מעטפת מבנית שונות, סקר מדיניות, סקר חסמים ופירט המלצות לקידום התחום בישראל.

הניתוח האנרגטי בדק את פוטנציאל הפקת החשמל בחלופות השונות ואת ההשפעה של קונטקסט עירוני (הצללות עקב בניינים שכנים). הניתוח הכלכלי כלל איסוף הצעות מחיר של מערכות BIPV ליישום בישראל, ומולן בחן את פוטנציאל ההכנסות ממכירת חשמל. ממידע זה חושב זמן החזר ההשקעה לכל חלופה. בנוסף, נבחנו התועלות החיצוניות והמשקיות להקמת מערכות BIPV בישראל, הנובעות מהימנעות מייצור אנרגיה באמצעות דלקי מאובנים מזהמים.

איור ב: חזית BIPV צבעוני בבניין KingsGate, צ'לסי, לונדון, בריטניה. *Source: SUPSI, photo: P. Bonomo.*

תוצאות ומסקנות

שוק ישראלי פוטנציאלי

התקנה מחייבת של BI(PV) על כל המבנים החדשים בישראל, יכולה להביא להפקת 30-50% מביקוש החשמל בשנת 2040 בישראל באמצעות BI(PV), בתרחיש עסקים כרגיל (ללא שינויים בקצב גדילת שוק האנרגיה).

התקנה מנדטורית של BI(PV) על כל המבנים החדשים בישראל, יכולה להביא להפקת יותר מ-100% מביקוש החשמל בשנת 2040 בישראל, אם לוקחים בחשבון שיפור צפוי ביעילות ההמרה של קרינת השמש לחשמל, התייעלות אנרגטית לאומית, יישום אמצעים טכנולוגיים שכבר קיימים היום ו/או ירידה בצמיחה הדמוגרפית הלאומית.

התקנה נרחבת של BI(PV) על מבנים בישראל תעזור לצמצם פגיעה בשטחים פתוחים עבור תשתיות אנרגיה; תהפוך את הערים בישראל לבעלות חסינות אנרגטית גבוהה בהרבה לעומת המצב כיום; תחסוך במשאבים רבים; תאפשר דמוקרטיזציה של הפקת וצריכת אנרגיה; תצמצם את התלות של ישראל בדלקי מאובנים יקרים, מזהמים ומונופוליסטיים; תייצר מקומות עבודה רבים; תביא לצמצום ניכר בפליטות גזי חממה, זיהום אוויר ותחלואה נלווית; תביא להתייעלות אנרגטית ותצמצם אובדן חשמל ואנרגיה בייצור ובהולכה. כל זאת, תוך עליה של 1.54-12% בעלות הקמת הבניין.

סימולציה אנרגטית

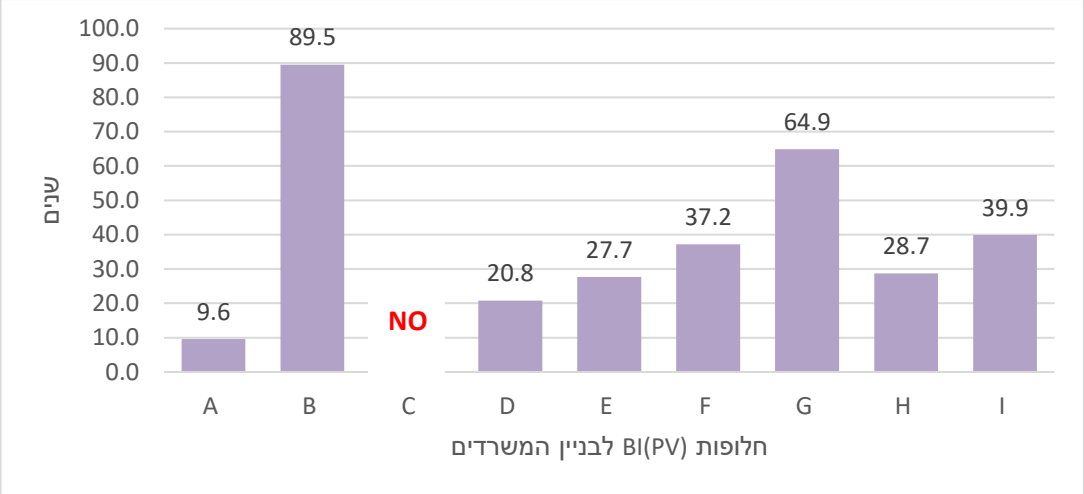
לאקלים הישראלי השופע בשמש, פוטנציאל ייצור חשמל גבוה יותר מאשר לאקלים האירופי ליישום BIPV על חזיתות. פוטנציאל זה גבוה ב-5% ועד 80% מזה אשר בדרום ובמרכז אירופה בהתאמה.

בהתאם להשערות המחקר, הסימולציה האנרגטית מצאה כי הדרך היחידה שבניין משרדים רב קומות סטנדרטי בישראל יכול לייצר חלק משמעותי מצריכת האנרגיה שלו, היא באמצעות יישום BIPV על 1-3 חזיתות, בנוסף ליישום BAPV על הגג. יישום זה, מביא לייצור חשמל בהיקף הגדול פי 3-7 לעומת ייצור על הגג בלבד. כמו כן, יישום BIPV המותקן על חזית בזווית 30° מעלות, מאפשר ייצור של 70-125% יותר חשמל לכל מ"ר, לעומת חזית שטוחה (ניצבת לקרקע). בחזית דרומית, היקף ייצור זה כמעט משתווה להיקף הייצור למ"ר בפאנל סולארי מוטה ב-30° מעלות עם מפנה דרומי על הגג.

במקרה הקיצוני של בנייה עירונית צפופה מאוד לגובה, ייצור החשמל בחלופות שנבדקו עלול לרדת להיקף של כ-80% לעומת מצב ללא קונטקסט עירוני. זאת, עקב הצללות על החזיתות בקומות התחתונות של הבניין.

ניתוח כלכלי

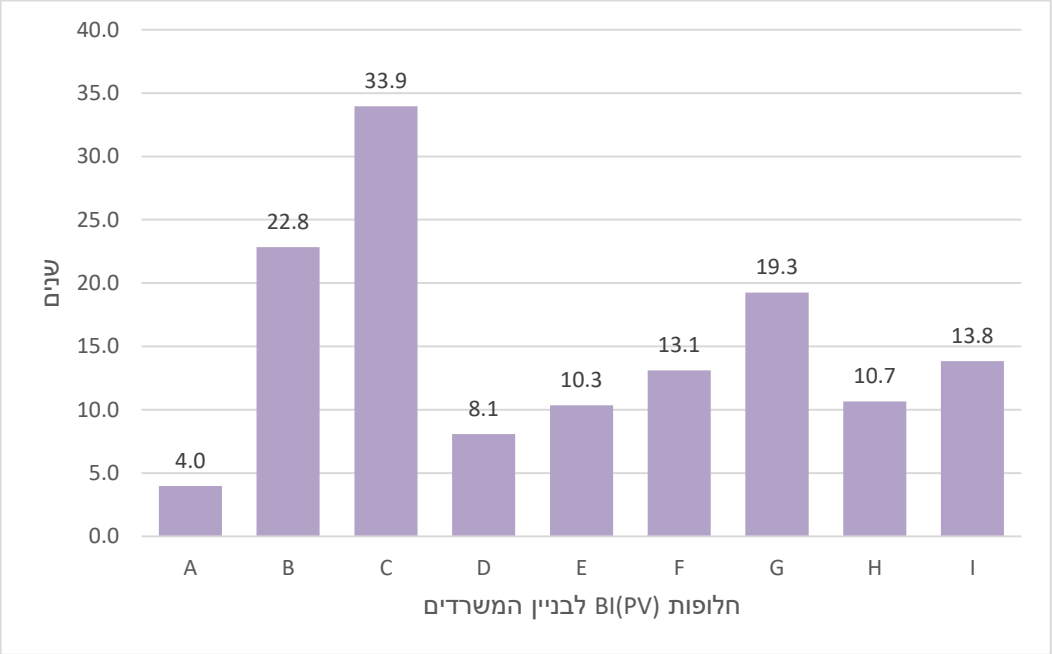
בשוק הישראלי הנוכחי, מחיר החשמל נמוך יחסית למקובל בעולם המפותח, ואינו כולל עלויות חיצוניות מלאות כגון השפעה של פליטת זיהום אוויר וגזי חממה על הבריאות, התשתיות ועל הסביבה. כמו כן, העדר שוק BIPV מקומי, גורר מחיר יישום BIPV גבוה מאשר באירופה. לאור מצב זה, הניתוח הכלכלי מצא כי אף אחת מחלופות ה-BI(PV) שנבחנו אינה מחזירה ליזם את ההשקעה תוך 20 שנה (פרק זמן סביר של פרויקט תשתית). רק חלופה אחת (D) התקרבה לכך, עם החזר השקעה תוך 21 שנה. לשאר החלופות זמן החזר ההשקעה נע בין 28 שנים למאות שנים (ראו איור ג).



איור ג: זמן החזר ההשקעה בשנים לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים. *Return of Investment (ROI). חושב מההכנסות מייצור חשמל, אל מול העלויות (ציוד, התקנה, תחזוקה). NO ROI- חלופה בה ההכנסות לא מכסות את ההשקעה גם כעבור מאות שנים.*

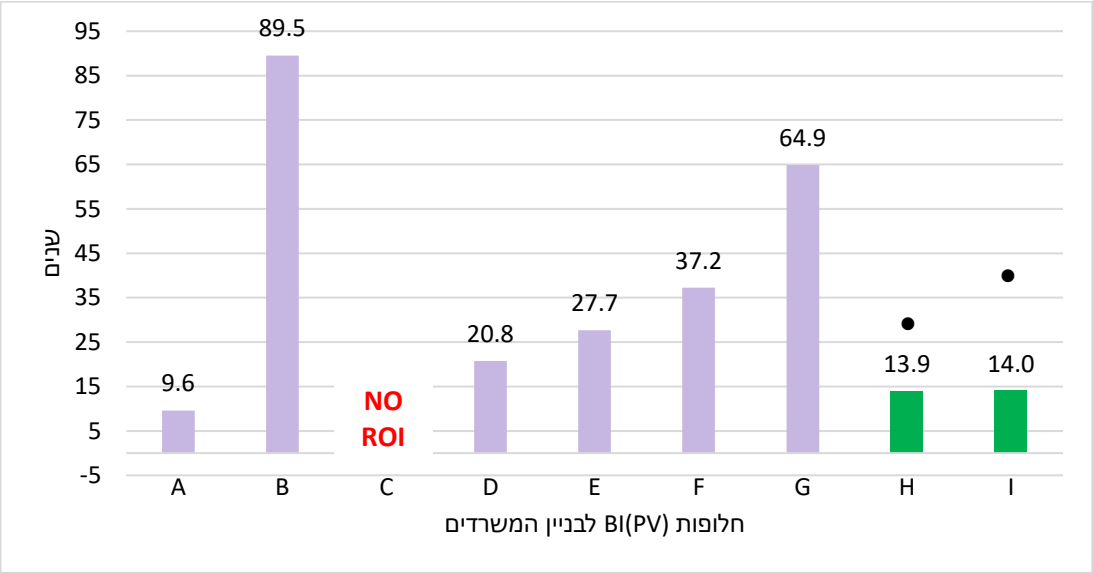
לכן, ע"מ שפרויקט BIPV בבניין המשרדים הטיפוסי אשר נבחן (כולל PV על הגג) יחזיר את ההשקעה ליזם תוך פחות מ-20 שנה , על עלויות מערכות BIPV למ"ר סולארי, לרדת בממוצע בכ-30% מהמחירים כיום.

כאשר לתעריף ה-PV הרגיל מוסיפים תועלות חיצוניות ותועלות משקיות מלאות מייצור חשמל פוטו-וולטאי, זמן החזר ההשקעה בכל חלופות ה-BIPV צונח, כך שרובן מחזירות את ההשקעה תוך 8-14 שנים. זאת, מכיוון שהוספת תועלות חיצוניות ומשקיות מכפילה את השווי הכלכלי של כל קוט"ש שמיוצר (ראו איור ד).



איור ד: זמן החזר ההשקעה בשנים לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים, בשקלול עלויות חיצוניות ותועלות משקיות. *Return of Investment (ROI). חושב מההכנסות מייצור חשמל, חסכון בעלויות חיצוניות, ותועלות משקיות; אל מול העלויות (ציוד, התקנה, תחזוקה). נתונים אלו מתאימים במקרה הספציפי בו המדינה היא גם היזם וגם נהנה מהתועלות המשקיות והחיצוניות, או לשם המחשת העלויות והתועלות למדינה, מיישום BIPV ע"י גורמים פרטיים.*

למרות כל זאת, גם כאשר לא משקללים תועלות חיצוניות ומשקיות אל תוך תעריף ה-PV, אך כאשר לוקחים בחשבון התייעלות אנרגטית המובנית בחלק מפתרונות ה-BIPV, מתקבל כי לפחות 2 חלופות BIPV מחזירות את ההשקעה תוך 14 שנים (חלופות I-H, חתך 4). זאת, משום שבחלופות אלו מערכות ה-BIPV מותקנות בזווית אופטימלית לניצול קרינת השמש של 30º מעלות, ומכיוון שהן מצלות על חלונות הבניין ובכך מצמצמות את השימוש באנרגיה בבניין (ראו איור ה).



איור ה: זמן החזר ההשקעה בשנים לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים, ללא תועלות חיצוניות ומשקיות, כולל התייעלות אנרגטית בחלופות I-H. *Return of Investment (ROI). חושב מההכנסות מייצור חשמל ומחיסכון בחשמל, אל מול העלויות (ציוד, התקנה, תחזוקה). NO ROI- חלופה בה ההכנסות לא מכסות את ההשקעה גם כעבור מאות שנים. בסגול- התוצאות לחלופות **G-A** ללא חישוב של התייעלות אנרגטית (כמו ב**איור ג**). בירוק- התוצאות לחלופות **I-H** הכוללות את ההתייעלות האנרגטית המובנית בחלופות אלו. עיגול שחור- ערכים לחלופות **I-H** ללא התייעלות אנרגטית (כמו ב**איור ג**).*

בשוק הנוכחי של ישראל, ללא הכוונה ותמיכה ממשלתית ייעודית לייצור חשמל על מבנים, שוק ה-BIPV לא צפוי לצמוח בישראל ב-5-10 השנים הקרובות. זאת, בניגוד לקצב צמיחה עולמי שנתי של כ-33%.

מחקר זה לא לקח בחישוב הכלכלי: עליה בשווי הנכס הודות ליישום BIPV בו, ירידה צפויה בהוצאות האנרגיה בחלק מהחלופות בשל יישום BIPV מצל, תועלות חיצוניות ומשקיות הייחודיות ל-BIPV (צמצום פגיעה בשטחים פתוחים, צמצום שימוש במשאבים). אנו מעריכים כי מחקר אשר ייקח בחשבון פקטורים אלו, צפוי להראות כי ליישום של BIPV בישראל תועלת רבה עוד יותר, וצפוי להראות כי חלופות כמו שנבחנו במחקר זה זמן החזר השקעה קצר עוד יותר בראיה משקית.

המלצות עיקריות [א]

המלצות מדיניות:

- קיימת דחיפות בצמצום פליטות גזי חממה, דחיפות לאדפטציה לשינוי אקלים, ודחיפות להתכונן לפגיעה פוטנציאלית ברשת החשמל. לכן, מומלץ למדינה להתחיל כבר עכשיו במדיניות שתעודד/ תחייב בניית מבני ZEB /NZEB עם מערכות BI(PV). מבנים אלו יצמצמו פליטות גזי חממה, יהפכו לחסונים לשינוי אקלים, וחסונים לפגיעה נרחבת ברשת החשמל (לחימה, אסון טבע, מתקפת סייבר).
- מומלץ לקדם אגירת אנרגיה בישראל אשר תאפשר שימוש נרחב ויעיל באנרגיות מתחדשות.

המלצות רגולציה:

- לעודד ערים לקבוע חוקי עזר עירוניים אשר מקדמים BI(PV) על בניינים.
- בדומה לרגולציה באיחוד האירופי, לקבוע כי כל בניין ציבורי אשר יבנה בישראל החל משנת 2021, יחויב להיות NZEB, וכל בניין אשר יבנה בישראל החל מ-2025, יחויב להיות NZEB.
- מכיוון שכיום מערכות BIPV יקרות ליישום בשוק הישראלי, מומלץ לאפשר לרבי קומות להיות ZEB /NZEB גם באמצעות התקנת מערכות PV רגילות וזולות על גגות אחרים בעיר (בדומה למתרחש באיחוד האירופי, ראו פרקים 2.3.1.4 ו-4.3). אולם, בשל מגבלות על התקנת PV על הגג בעיר, סביר כי תידרש השלמה של ייצור חשמל גם ע"י מערכות BIPV בחזיתות.
- הסרת חובת שימוש בחיפוי בניין ספציפי (כמו חיפוי אבן בירושלים), כאשר נעשה שימוש ב- BIPV בחזיתות.
- הגדלת אחוזי שטח שירות במבנה הממקם מתקני תשתית בתוך הבניין ולא על הגג לטובת התקנות סולאריות על הגג.
- לשקול חיוב הקמת בניינים עם מאפיינים המותאמים להתקנת BI(PV), או לפחות לתמרץ הקמת בניינים כאלו.

המלצות אדריכליות:

- מכיוון ששוק ה-BIPV הישראלי בחיתוליו, רב הנסתר על הגלוי בתחום. לכן מומלץ לפחות ב-5 השנים הקרובות, לבחון בדקדקנות התכנות ליישום BIPV על כל בניין בו נשקל יישום שכזה.
- לשם אופטימיזציה של ייצור אנרגיה סולארית ע"י בניינים, יש לתכנן בניינים בצורה המותאמת להתקנת BI(PV). למשל:

[א] רשימת ההמלצות המלאה מופיעה בפרקים 7-8.

- למקם מתקני תשתית של הבניין בתוך הבניין ולא על הגג, כך שיהיה פנוי להתקנת PV על כל שטח הגג.
- לתכנן מראש גג בזווית 30° מעלות עם מפנה דרומי, אשר יאפשר התקנת PV עם מתקון מינימלי, על כל שטח הגג, בזווית אופטימלית וללא הצללה הדדית של הפאנלים.
- להעדיף התקנת BIPV כחלק מחזית מאווררת, אשר שומרת על ה-BIPV בטמפ' נמוכה, השומרת על יעילות מערכת גבוהה יותר ומאפשרת הפקת יותר חשמל.
- לעודד התקנת BIPV בזווית 30° מעלות על חזיתות, לשם ניצול אופטימלי של קרינת השמש.
- עוד בשלב תכנון הבניין, רצוי לתכנן אותו כך שהמעטפת שלו תוכל לבצע שימוש אופטימלי במוצרי BIPV מכיוון שהכדאיות תלויה ביכולת ביצוע הפניות נכונות, מניעת השפעה של הצללות, ובחירה במוצרים נפוצים בשוק ובגדלים סטנדרטיים קיימים. כך יהיה ניתן למקסם את שטח החזיתות המכוסה בפאנלים סולאריים, לצמצם הצללה על פאנלים סולאריים, לצמצם שטחים עליהם לא ניתן בשל מגבלות בגדלים של פאנלים סטנדרטיים, ולחסוך בעלויות באמצעות הימנעות מרכישת מוצרי BIPV בייצור מיוחד (custom made).

- כאשר מתוכנן בניין עם מערכות BIPV בחזיתות, יש לבחון האם הקונטקסט העירוני ישפיע בצורה ניכרת על ביצוע המערכת. במקרים בהם הקונטקסט העירוני משמעותי, מומלץ שלא ליישם מערכות BIPV בקומות התחתונות של הבניין.

המלצות כלכליות:

- ע"מ לאפשר יצירת שוק BIPV בארץ, מומלץ לספק תמריצים כלכליים להקמת פרויקטים של BIPV, כמקובל במדינות אחרות בעולם.
- למרות המגמה של הורדת תעריף הייצור של חשמל באמצעות PV בארץ, לאור היתרונות הגבוהים בייצור חשמל מתחדש על מבנים, מומלץ שלא להוריד עוד תעריפי ייצור אלו, או אף לשקול להעלות אותם.
- מומלץ לקבוע תקציב ייעודי לתמיכה בבנייני ZEB/NZEB או למערכות BIPV כחלק מהתקציבים הלאומיים להתייעלות אנרגטית.
- מומלץ לבחון סבסוד התקנת מערכות BIPV בבניינים מעל גובה 5 קומות.
- מומלץ להתנות מתן תמריצים ליישום BIPV בהוכחת ייצור חשמל מעל רף מסוים בשנה הראשונה לפעילות, ואולי אף בשנים מאוחרות יותר. פתרון פשוט יחסית לבעיה זו, הוא יצירת אסדרה (באחריות רשות החשמל) הקובעת תעריף מועדף לייצור חשמל על בניינים. היקף התעריף משקף באופן ישיר את התרומה של ייצור חשמל על הבניין.

ככל שבניין מייצר יותר חשמל, הוא מתוגמל יותר. פתרון זה מבוצע כיום ביישום PV רגיל על גגות בישראל.

- מבחינה סביבתית, יש להעלות את תעריף החשמל המיוצר מדלקי מאובנים ע"מ לשקף את עלות הפגיעה שלהם בבריאות ובסביבה. אולם, בישראל פערים כלכליים גדולים בחברה. כמו כן, פוליטית קשה להעלות את מחיר החשמל. לכן, מומלץ שלא להעלות את מחיר החשמל לערכים גבוהים כמו בגרמניה למשל, אלא להשאיר אותו נמוך. על המחיר אותו משלם התושב, להוסיף תעריף מיוחד לייצור חשמל על מבנים (כפי שכבר קיים היום באופן חלקי), בייחוד ל-BIPV.
- לשם קבלת זמן החזר השקעה מינימלי (14 שנה) בשוק ה-BIPV הישראלי הנוכחי, מומלץ ליישם BIPV בחזיתות מזרח, מערב ודרום בבניני משרדים טיפוסיים, עפ"י חתך 4 (BIPV בשיפוע אופטימלי של 30° מעלות המצל על החלונות, ראו פרק 3.2.1.2) וחלופות I-H (ראו פרק 4.3.1).

המלצות מודעות וידע:

- על המדינה לפעול העלאת המודעות לנושא בקרב מקבלי החלטות, מובילי דעה ואנשי מקצוע בתחום ענף הבניה.
- בשל העובדה ששוק ה-BIPV בארץ בחיתוליו, מומלץ למדינה לבצע כל מספר שנים בדיקה עדכנית של טכנולוגיות זמינות ועלויות צפויות בישראל. זאת ע"מ להבין האם יש צורך בעדכון מדיניות, רגולציה, תמריצים וכדומה.
- מומלץ לתמוך בביצוע פרויקטי הדגמה של BIPV בישראל, לשם הגברת מודעות וצבירת ניסיון בתחום בארץ.

Executive Summary

Introduction

Buildings and energy

90% of the developed world population, spend 90% of their lives inside buildings. The modern civilization is deeply rooted in buildings and has an existential dependency in energy in general and in electricity specifically. Buildings consume 40% of the energy used in the developed world, responsible for 20% of anthropogenic greenhouses gases emissions, and constitute the most significant damage to open spaces and natural habitats. Moreover, the extent of energy production on buildings is negligible.

Today, there is a global transformation from using carbon-based energy sources (coal, petroleum, natural gas) towards low-carbon energy sources (wind, solar and hydro energy). This transition will enable a drastic reduction in greenhouse gases emissions, will reduce the devastating effects of climate change to the human civilization and to the ecological systems, will lower our reliance on perishable resources, will reduce pollutant emissions, and will promote a democratic and resilience energy production by all countries- without dependence on foreign entities.

However, this transition is still too slow to provide a significant and fast reduction in greenhouse gases, for prevention of a substantial climate change. A harsh report by the IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) from late 2018 calls for urgent and comprehensive actions of all governments and organizations for a drastic reduction in greenhouse gases emissions before 2030. This, to prevent a climatic catastrophe with high probability, that will cause huge health, human wellbeing, economic and environmental damages. Also, renewable energy facilities tend to occupy relatively vast areas per kWh they produce, compared to fossil fuel facilities. Since most renewable energy facilities are erected in open spaces, they perpetuate human damage to open spaces even increase it.

In the case of power grid failure, buildings become useless. In many cases, it is impossible even to sleep or to stay in buildings for long (no elevators, no water, no heating\ cooling). Without electricity in buildings, the modern civilization cannot function.

BAPV

Besides energy efficiency methods (thermal insulation, efficient energy systems, better utilization of sun energy, etc.), a technological solution for the above problems, is energy production on buildings. At present, this solution is mainly applied by installing conventional photovoltaic (PV) panels on rooftops (BAPV- Building Applied Photovoltaics). This solution is using the same land for a building and for energy production. The consistent decrease in PV systems prices resulted in renewable energy that is cheaper to produce compared to fossil fuel, and its widespread application. These solutions allow the construction of ZEB\NZEB (Near\Zero Energy Building), that consume 80% less energy than comparative conventional buildings, or even supply the power grid with more electricity than they consume.

Having said that, BAPV has its drawbacks. In low buildings (up to a few stories), it is common to be able to produce electricity using roof BAPV, in a comparable amount to the buildings' energy consumption. Nonetheless, in high-rise buildings, this is impossible. This is because the ratio between the roof area (energy production capability) and the combined floor area of all stories (energy demand), is very low. So, these buildings can produce only a fraction of a percent of their energy demand. An increasing portion of modern buildings, especially in crowded and dense countries like Israel, should and are being built as high-rise buildings. In this reality, buildings can produce only a small fraction of their energy demand. In addition, BAPV is predominantly not visually esthetic, a fact that deters architects from incorporating it in buildings.

BIPV

Building Integrated Photovoltaics (BIPV), are a part of the building envelope, and fulfill a few functions at once: electricity production, esthetic solution, building protection from the elements (wind, temperature, sun, precipitation, dust, objects). This technology gives a holistic solution to the problems mentioned above and cut back the resources used for separate manufacturing of building envelope and BAPV products. At present, there are hundreds of BIPV products globally, that provide energy and envelope solutions for roofs, facades and windows. There are already hundreds of new and refurbished BIPV building in the world.

Figure A: Façade BIPV on the Copenhagen International School - Nordhavn, DK. Source: F MØller, photo: Adam MØrk.

Like many other new technologies, because it is introducing a whole new dimension to the building industry, BIPV application is usually substantially more expensive compared to that of BAPV and conventional envelope products. Also, there is a lack of awareness and a knowledge gap in Israel.

The advantages of energy production on buildings and the barriers for BIPV\BAPV implementation, have already been identified in the developed world. Many countries are enabling and subsidizing energy production in buildings in general and BIPV specifically. The European Union has ruled that every new public building and every building will be NZEB, starting in 2019 and in 2021 respectively, and that after 2050 all buildings will be energy neutral (will not consume more energy that they produce). It is practically impossible to build or refurbish a high-rise NZEB building without BIPV application. In accord with policy and similar ones elsewhere, and with the development of new BIPV products- the global BIPV market was 7$ billion US dollars in 2015, with a 33% annual growth rate and a market projection of 61$ billion US dollars in 2022.

In Israel, thanks to a new policy that support energy production on roofs, and thanks to the drop in PV systems, there is a growing number of BAPV systems on buildings' roofs. But there is no Israeli BIPV market, and as far as we know- only one BIPV building.

Figure B: Colorful BIPV façade on the KingsGate House, Chelsi, London, UK. Source: SUPSI, photo: P. Bonomo.

Research objective

The main goal of this research was to promote BIPV implementation in Israel, though studying its application in a typical high-rise office building. The research reviewed BIPV in the world, performed an energetic and an economic analysis

of BIPV implementation in 9 different structural envelopes, review policy, barriers and gave recommendation for BIPV promotion in Israel.

The energetic analysis studied the electricity production in the different structural envelopes and the effect of an urban context (buildings shading). The economic analysis compared price quotes of the different structural envelopes against their potential income from electricity production. Out of this data, the time to return the investment was calculated per structural envelope. In addition, socio-economic gains from BIPV implementations were calculated.

Results

Potential Israeli Market

Mandatory BI(PV) installation on all new buildings in Israel, can lead to production of 30-50% of electricity demand in Israel in 2040 using BI(PV), at business as usual scenario (constant electricity demand growth).

Mandatory BI(PV) installation on all new buildings in Israel, can lead to production of more than 100% of electricity demand in Israel in 2040 using BI(PV), in a scenario with PV efficiency improvement, national energy efficiency measures, BI(PV) building retrofitting, and\or a decrease in the national demographic growth rate.

A widespread installation of BI(PV) on buildings in Israel will support reduction in open spaces damage from energy infrastructure; transform Israeli cities to energy resilient cities; reduce natural resources use; allow democratization of energy production and consumption; reduce Israel's dependence on costly, polluting and monopolistic fossil fuels; create plenty of jobs; dramatically reduce greenhouse gases emission and climate change risks; reduce air pollution and subsequent illnesses; increase energy efficiency and reduce electricity loss during production and transmission. All this, at a cost of 1.54-12% over the buildings' cost.

Energy simulation

The sun-abundant Israeli climate, has a higher electricity production potential using BIPV, compared to the European climate. This potential is 5-80% higher than in southern and central Europe respectively.

In accord with the research hypothesis, the energetic simulation has found that the only possibility for a high-rise building in Israel to produce a substantial part

of its energy demand, is by applying BIPV on 1-3 facades in addition for BAPV on the roof. BIPV application leads to 3-7 times higher electricity production compared to BAPV on the roof alone. Also, BIPV façade installation at 30° degrees, allows to produce 70-125% more electricity per square meter compared to standard flat façade installation (vertical to the ground). On a south-facing façade, this means producing almost as much as the BAPV on the roof per square meter.

In an extreme case of dense high-rise building surrounding, electricity production can decrease to 80% compared to a non-context scenario. This, due to shading on the low stories BIPV facades.

Economic analysis

In the present Israeli market, the electricity prices are low compared to many countries in the developed world, and do not include full externalities costs, such as the socio-economic effect of air pollution and greenhouses gases on health, infrastructure and the environment. Also, the lack of a local BIPV market leads to high BIPV installation prices compared to Europe. Therefore, the economic analysis found that none of the studied BI(PV) options can return the investment in up to 20 years (a common lifetime of an infrastructure facility). Only one option got near, with a return of investment time of 21 years. The rest of the BI(PV) options return the investments between 28 years and hundreds of years (see **Figure C**).

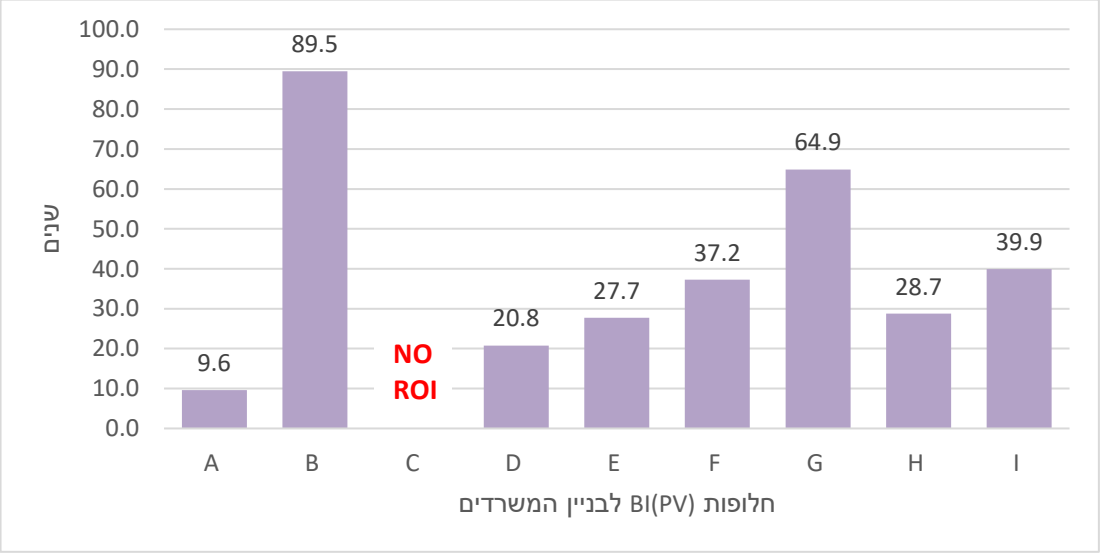


Figure C: Return of investment (ROI) time in years to the BI(PV) options for the office building. *Calculated from income from electricity production, and expenses (materials, instalment, maintenance). NO ROI- an option where the income does not cover the expenses ever after hundreds of years.*

For a BIPV project to return its investment in less than 20 years in the present Israeli market, the cost of installed BIPV systems per square meter of solar area, should decrease by an average of 30%.

When the socio-economic benefits of regular PV production are considered, the time to return the investments drops in all BI(PV) options, that most options return the investments by 8-14 years. This is because adding all of the socio-economic benefits of regular PV production doubles the economic value of each kWh produced (see **Figure D**).

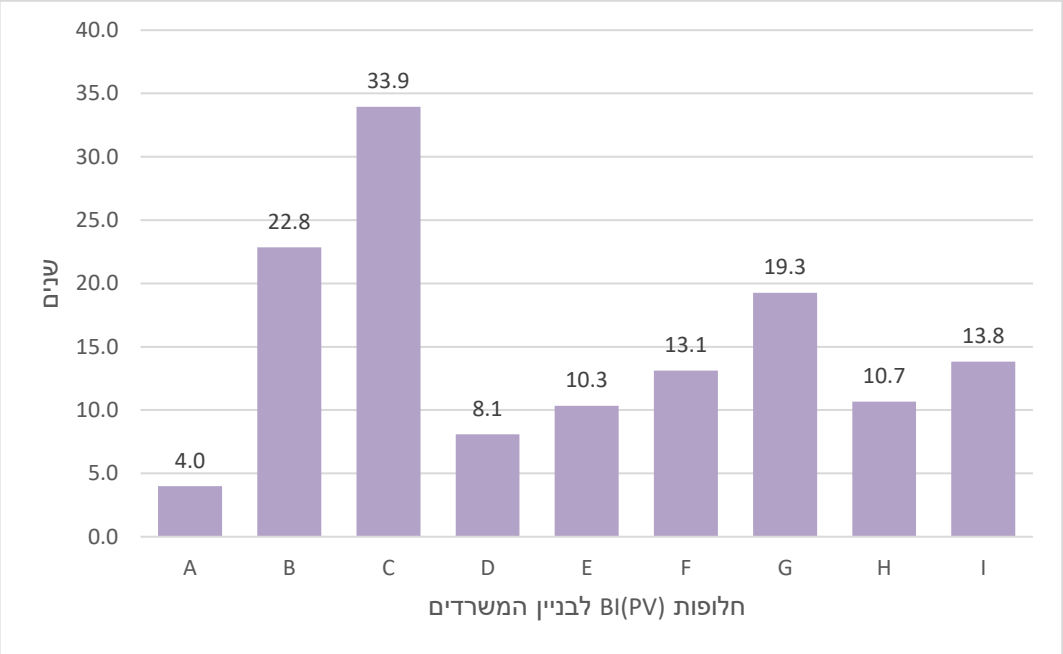


Figure D: Return of investment (ROI) time in years to the BI(PV) options for the office building, with externalities and economy benefits included. *Calculated from income from electricity production, expenses (materials, instalment, maintenance), externalities savings and economy benefits. These results are relevant in the specific case where the country is the entrepreneur and enjoys the externalities savings and economy benefits. Also, it can illustrate to the country the benefits of wide BIPV implementation.*

Despite all this, even when externalities and economy benefits are not taken into account, but structured energy efficiency within some of the BI(PV) options is taken into account, a return of investment of only 14 years was calculated for at least 2 BI(PV) options (options H-I, cross-section 4). This, because in these options the façade BIPV systems are installed in an optimal angle (30° degrees) to harvest the sun's radiation, and because that they shade the windows and reduce the building's energy consumption (see **Figure E**).

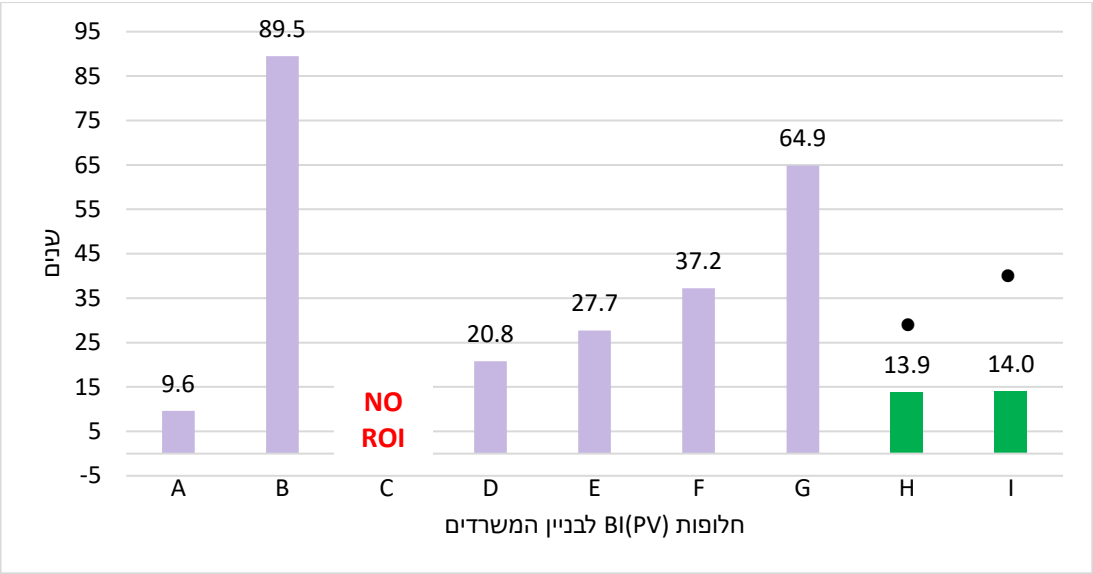


Figure E: Return of investment (ROI) time in years to the BI(PV) options for the office building, without externalities and economy benefits, with energy efficiency in option H-I. *Calculated from income from electricity production, and expenses (materials, instalment, maintenance). Purple- results for options A-G without energy efficiency (same as in* ***Figure C****). Green- results for option H-I that include energy efficiency structured in the BI(PV) system. Black circles- results for options H-I without energy efficiency (same as in* ***Figure C****).*

In the present Israeli market, without governmental aid and subsidy for electricity production on buildings, the BIPV market is not expected to grow in the next 5-10 years. This, in contrast to an annual global growth rate of 33%. This research did not take into account the following factors: an expected rise in building value thanks to BIPV installation, reduction in energy needs in some of the BI(PV) options due to BIPV shading, BIPV\BAPV-specific socio-economic benefits (reduction in open spaces damage and in natural resources depletion). We estimate that a study that will take these factors into account, will find that BIPV application in Israel has more benefits, and that at a holistic socio-economic perspective, BIPV returns the investment in faster compared to this analysis.

Main Recommendations [1]

Policy recommendations:

- There is an urgency in reducing greenhouse gases (climate change mitigation), an urgency in climate change adaptation, and an urgency to prepare for a potential power grid failure. So, it is advised to promote policies that will encourage\ coerce construction of NZEB\ ZEB buildings

[1] A full list of recommendation can be found in chapters 7-8.

with BI(PV) systems. These buildings will reduce greenhouse gases emissions, will be climate change resilient, and resilient for power grid failures (act of war, natural disaster, cyber-attack).

- It is recommended to promote energy storage that will allow a wide and effective use of renewable energy in Israel.

Regulatory recommendations:

- To encourage cities to set legislation to promote BI(PV) on buildings.
- In accord with the European Union regulation, to rule that **every public building** that will be built in Israel after 2022, will have to be NZEB, and that **every building** that will be built in Israel after 2025, will have to be NZEB,
- Since BIPV systems are expensive for implementation in the present Israeli market, it is advised to allow building to be recognized as NZEB\ ZEB, by allowing them to install cheap and conventional PV systems on other buildings' roofs in the city (as is done today in the European Union). However, since there are limitations on PV installments on city roofs, it is probable that façade BIPV installation will be necessary to cover all of the energy needs of the building.

Architectural recommendations:

- Since the Israeli BIPV market is in its infancy, there are a lot of unknowns. Therefore, it is recommended to investigate thoroughly BIPV feasibility before applying BIPV on a building, at least for the next 5 years.
- For solar energy production optimization in buildings, it is advisable to design the building with BI(PV) in mind:
    - To place building utility facilities inside the building, in order to leave the roof free for BI(PV) on all of the roof's area.
    - To plan roofs with a 30º degrees inclination facing south, for maximal and optimal BI(PV) cover without mutual PV shading.
    - To prefer applying BIPV on ventilated (cold) facades, that keeps the system cooler and more efficient in the Israeli heat.
    - Encourage 30º degrees inclination BIPV on façades, for optimal sun radiation utilization.

    - Optimize the building for BIPV during planning for sun orientation, shading, and BIPV panels sizes (planning the envelope to match standard BIPV panels sizes will keep BIPV systems as low as possible).
- When the urban context is dense, it is advised to consider whether BIPV on the façades lower stories is necessary.

Economic recommendations:

- In order to promote the Israeli BIPV market, it is advised to provide economic incentives for BIPV projects, as it is customary in the developed world.
- Despite the trend of lowering electricity production by building PV Tariffs, it is advised not to lower them further, or even consider raising them. This is because of the huge advantages they have.
- Set a dedicated budget for NZEB\ZEB or BIPV systems support as part of national budgets for energy efficiency.
- Subsidize BIPV systems installation in buildings over 5 stories.
- It is advised to provide BIPV implementation incentives after proving electricity production over a certain threshold in the first year of operation (and maybe even later). A simple solution for this is by applying a special tariff for energy production on buildings. The extent of the incentive is thus proportional for the electricity production. This solution is already in place today for conventional roof-top PV in Israel.
- Environmentally, there is a need to increase the prices for electricity that is produced using fossil fuels, to include the cost of their negative impact on the health and the environment. However, in Israel there are substantial socio-economic gaps. And, increasing electricity prices is politically hard. Therefore, it is advised not to raise the electricity prices to high levels as in Germany. But, to keep it low. On top of that, to add a special Tariff for energy production on buildings (as it is already partially done today), especially for BIPV.
- In order to achieve the minimal return of investment time (14 years) in the present Israeli BIPV market, it is advised to apply BIPV on the east, south and west facades in conventional office buildings. According to cross-section 4 (BIPV in an optimal 30° degrees tilt towards the sun, that

is shading the windows, see chapter 3.2.1.2) and BI(PV) options H-I (see chapter 4.3.1).

Awareness and knowledge recommendations:

- Raise awareness to BIPV within decision makers, opinion leaders and professionals in the construction section.
- Since the Israeli BIPV market is in its infancy, it is advised to review the technologies, products and prices once in a few years.
- It is recommended to support construction of demonstration BIPV projects, to increase awareness and experience.

מילות מפתח

Green building בניה ירוקה	photovoltaics- PV מערכת פוטו-וולטאית	Building Integrated photovoltaics- BIPV מערכת פוטו-וולטאית משולבת מבנה
Near Zero Energy Building- NZEB בניין כמעט מאופס אנרגטית	Zero Energy Building- ZEB בניין מאופס אנרגטית	Building applied photovoltaics- BAPV מערכת פוטו-וולטאית על מבנה
Architecture ארכיטקטורה	Building envelope מעטפת בניין	Energy efficiency התייעלות אנרגטית
Commercial building בניין מסחרי	Thin film PV מערכת פוטו-וולטאית פילם דק	Renewable energy אנרגיה מתחדשת
		Energy resilience חוסן אנרגטי

1 מבוא

1.1 רקע: תאים פוטו-וולטאים משולבי מבנה

1.1.1 בניינים ואנרגיה

ישראל מפיקה כמעט את כל החשמל שלה מדלקים מאובנים אשר פולטים גזי חממה במהלך השימוש בהם, בעוד רק כ-3% מהחשמל שלה מופק ע"י אנרגיות מתחדשות [1]. לכן, היקף השימוש באנרגיה נקייה בישראל הינו זניח. בנינים בישראל צורכים 60-70% מצריכת **החשמל** הלאומית [2,3], בעוד בארה"ב ובאירופה (וכנראה גם בישראל) בניינים צורכים כ-40% מצריכת **האנרגיה** הלאומית [4–6]. עולמית, בניינים אחראיים לפליטת כ-20% מפליטות גזי החממה האנתרופוגניות (ממקור אנושי) [7]. הפחתה בפליטות אלו ובפליטות זיהום אוויר שמקורו בבניינים אפשרית באמצעות בניה של בניינים יעילים מבחינה אנרגטית (או דרך שיפוץ בניינים קיימים), ובאמצעות יצירת בניינים אשר מייצרים אנרגיה מתחדשת בעצמם. בצורה זו, בניינים יכולים למלא חלק, רוב או כל צרכי האנרגיה שלהם בעצמם (Zero Energy Building- ZEB, Near ZEB- NZEB). בניינים אפילו יכולים לספק אנרגיה עודפת אל רשת החשמל [5,8–10].

לשם צמצום ובלימת שינוי האקלים, נדרש מאמץ משותף של רוב מדינות העולם, שיביא לצמצום פליטות גזי חממה מרוב ענפי הייצור, האנרגיה, השירותים ומרוב תחומי החיים. בהתאם להסכם האקלים בפריז מ-2015, מדינות העולם התחייבו לעשות ככל שביכולתן ע"מ לצמצם את פליטות גזי החממה שלהן, לשם בלימת עליית הטמפ' הממוצעת העולמית ל- $2^{o}C$ מעלות צלזיוס מעל זו של טרום המהפכה התעשייתית [11].

הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה (International Energy Agency- IEA), ניתחה את תמונת המצב של כל תחומי וטכנולוגיות האנרגיה בעולם [12]. זאת, ע"מ להבין באילו תחומים וטכנולוגיות העולם מתקדם לפי התוכנית אשר תאפשר צמצום פליטות גזי חממה כך שההתחממות הגלובלית הממוצעת לא תעלה על $2^{o}C$ מעלות צלזיוס (בהתאם להסכם האקלים בפריז 2015), ובאילו תחומים העולם לא מתקדם מספיק. אחד התחומים בהם העולם עדיין לא נמצא "על הפסים" בדרך לצמצום מספק של פליטות גזי חממה הוא תחום הבניינים [13]. באופן ספציפי יותר, מעטפות הבניינים כיום נמצאות במצב גרוע מבחינת השפעתן על פליטות גזי חממה להם אחראיים בניינים. הן חייבות להשתפר בעתיד הקרוב במידה ניכרת ע"מ שהבניינים יוכלו לצמצם את פליטות גזי החממה במידה מספקת [14].

בסוף 2018 פרסם ה-IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) דוח חריף אשר קרא למדינות העולם ולארגונים לבצע פעולות דחופות ונמרצות לשם צמצום דרמטי של פליטות גזי חממה והשפעותיהם לפני 2030. זאת, ע"מ שיהיה סיכוי למנוע שינוי אקלים קשה אשר יגרום בסבירות גבוהה לנזקים עצומים לבריאות ולרווחת האדם, לכלכלה העולמית ולסביבה [15].הקמה של מתקני הפקת אנרגיה מתחדשת לרוב באה על חשבון שטחים פתוחים. להפקת אנרגיה מתחדשת בבניינים עירוניים, היכן שהאנרגיה נצרכת, פוטנציאל להפחית את

הצורך לבנות תחנות כוח בפאתי הערים או בשטחים פתוחים, לצמצם את הנזק לשטחים פתוחים ולמערכות אקולוגיות, לצמצם את השימוש בחומרי גלם ובמשאבים (בהם עושים שימוש בהקמה של קווי הולכת חשמל למשל) ולצמצם את אבדן החשמל המיוצר עקב הולכה שלו לאורך עשרות ואף מאות ק"מ ממקום הייצור אל יעד הצריכה.

אנרגיות מתחדשות ואנרגיות דלות בפליטות גזי חממה פולטות גזי חממה ומזהמים לסביבה בסדר גודל אחד או שניים פחות לעומת דלקי מאובנים. יחד עם זאת, גם למקורות אנרגיה אלו ישנם מתנגדים בציבור משיקולים סביבתיים ובריאותיים (חלקם לא מבוססים): בעולם קיים חשש רב מפני יישום של אנרגיה גרעינית עקב סכנות קרינה; קיימת התנגדות להקמת מתקני PV בשל פגיעה בשטחים פתוחים והתנגשות בעלי כנף בפאנלים [16]; קיימת התנגדות לאנרגיה סולארית מרוכזת (concentrated solar power- CSP) עקב פגיעה בשטחים פתוחים, התנגשות בעלי כנף במראות, הפרעה נופית ניכרת, סינוור תושבים ונהגים (ראו תרשים 1), שריפה של מעופפים ע"י קרן האור המרוכזת, פגיעה נופית לטווח רחוק [16–18]; קיימת התנגדות לטורבינות רוח עקב פגיעה בשטחים פתוחים, פגיעה בבעלי כנף, חשש (לרוב לא מוצדק) מפגיעה בבריאות, פגיעה נופית לטווח רחוק [19]; קיימת התנגדות לאנרגיה הידרו-אלקטרית עקב פגיעה במקורות מים ובחיים בהם ועקב פגיעה בשטחים פתוחים עקב הצפות. לעומת זאת, כמעט ולא קיימות התנגדויות סביבתיות ו/או בריאותיות להפקת אנרגיה מתחדשת על בניינים. לכן, הפקת אנרגיה מתחדשת על בניינים לא צפויה ליצור התנגדות משמעותית בציבור או בקרב ארגוני סביבה. להיפך, היא מתקבלת בברכה [16].

תרשים 1: סנוור ממגדל ה-CSP של פרויקט אשלים בנגב.
צילום: נימרוד מדר.

1.1.2 ביזור מתקני ייצור אנרגיה וחוסן אנרגטי

האנשים בעולם המפותח מבלים 90% מזמנם בתוך בניינים [20,21]. 95-100% מהאנשים בעולם המפותח תלויים בחשמל לתפקוד היום-יומי שלהם. הציביליזציה האנושית המודרנית תלויה בבניינים ובחשמל להמשך קיומה ושגשוגה. פגיעה ברשת החשמל מוציאה בניינים מכלל שימוש. מבנה ללא חשמל אינו ראוי למגורים או לעבודה בסטנדרטים מודרניים. ללא חשמל, מבנים רבים אפילו לא יכולים לשמש אפילו מקום לשהות בו או לישון בו (ללא מעלית, מים, חימום/ קירור). ללא חשמל במבנים, הציביליזציה האנושית המודרנית לא יכולה להתקיים.

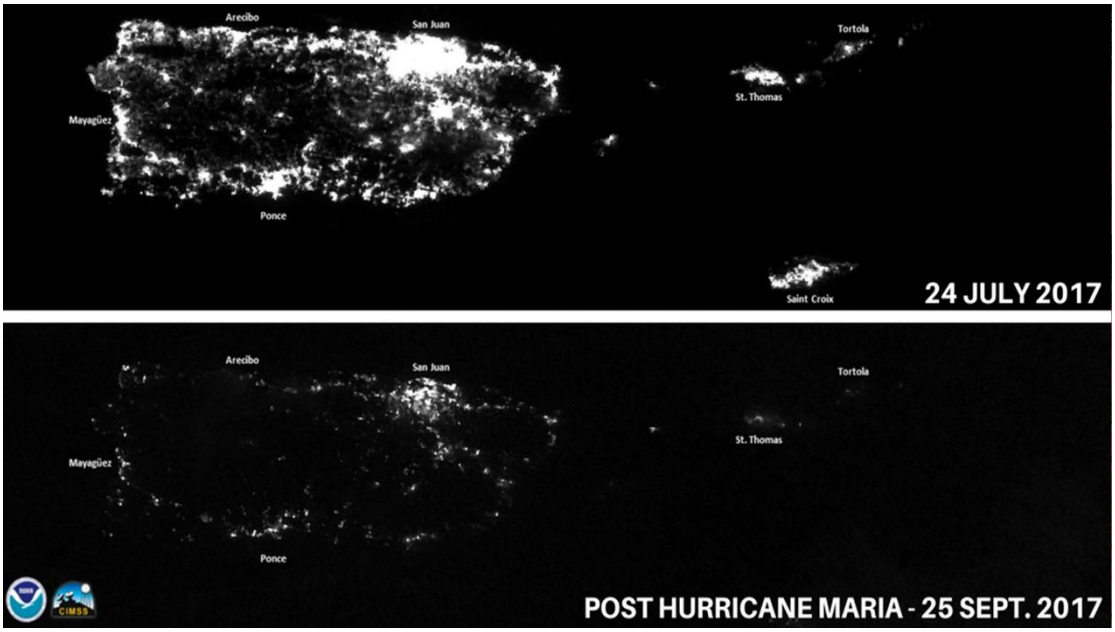
בניינים עצמאיים, או עצמאיים למחצה, מבחינה אנרגטית- הם בניינים חסונים (resilient). כאשר רשת החשמל המרכזית נופלת- עקב תאונה, אסון טבע או פגיעה מכוונת- בניינים כאלו יכולים להישאר פעילים מכיוון שעדיין יש בהם חשמל לכל/לחלק מצרכי הבניין, לכל/לחלק משעות היממה. אנשים עדיין יכולים לחיות או לעבוד בהם במשך ימים ושבועות עד אשר רשת החשמל הראשית משוקמת. ללא חשמל, אין מים, מיזוג אוויר או מעליות בבניינים גבוהים.

את הפגיעות של בניינים שאינם חסונים אנרגטית ניתן לראות ברחבי העולם. ביוני 2019, הפסקת חשמל פתאומית הפילה את כל רשתות החשמל של ארגנטינה ושל אורוגוואי, וחלקים מרשתות החשמל של ברזיל, פרגוואי, צ'ילה. 50 מיליון איש נותרו ללא חשמל למשך כיממה. הרשויות לא שללו כי מתקפת סייבר אחראית לאירוע [22].

מציאות קשה הרבה יותר ניתן לראות בארה"ב. כתוצאה מפגיעת הוריקן מריה בתחנות הכוח ובמערכת ההולכה של פוארטו-ריקו בספטמבר 2017, כל האי נותק מאספקת חשמל סדירה (ראו תרשים 2). לאחר חודש, 80% מהאי עדיין היה מנותק מאספקת החשמל. לאחר חודשיים, 50% עדיין היו מנותקים מחשמל [23].

גם אם ישראל אינה בסיכון מאירועי מזג-אוויר אלימים כגון הוריקנים, תרחישי הסיכון בישראל כוללים סיכון מוגבר לרעידות אדמה, סיכון לצונמי שיפגע ברוב תחנות הכוח והתפלת המים, סיכון למתקפות סייבר כנגד רשת החשמל, ולאירועי לחימה הכוללים ירי טילים.

ביזור מתקני הפקת החשמל ברחבי הארץ, על פני בניינים רבים, אשר מספקים חשמל לעצמם ולסביבתם הקרובה; במקום הסתמכות על מספר מצומצם של תחנות כוח, אשר מספקות חשמל למרחקים ארוכים במספר מועט של קווים- מצמצם את הפגיעות של רשת החשמל לאירועים קטסטרופליים [24]. פגיעה קריטית בתחנת כוח אחת בישראל (תחנת הכוח אורות רבין למשל), יכולה להוריד את כושר יצור החשמל בעד 20% [25], לגרום להפלת כל או חלק ניכר מרשת החשמל הארצית ולמנוע אספקת חשמל סדירה בכל שעות היממה למשל שבועות. יותר מכך, פגיעה באספקת הגז לישראל, אשר נשענת כיום על אסדת גז אחת, צינור גז אחד וטרמינל קליטת גז אחד בלבד (ובעתיד על שניים-שלושה בלבד)- עשויה לפגוע היום בייצור 60-70% מהחשמל בישראל (ועד 80-90% תוך 5-10 שנים [26,27]).



תרשים 2: תמונות לוויין של תאורה לילית בפוארטו-ריקו לפני ואחרי הוריקן מריה, 2019.
תמונות לוויין אשר ממחישות את היקף הפגיעה ברשת החשמל של פוארטו-ריקו. בלבן- תאורה לילית כפי שנקלטה ע"י הלוויין בפוארטו-ריקו (האי הגדול בצד השמאלי של התמונות) ובאיים הסובבים. התמונה העליונה צולמה לפני פגיעת ההוריקן, ומשקפת את התאורה החשמלית הנורמלית של האי. הכתם הלבן הגדול בצד ימין למעלה של האי המרכזי הוא עיר הבירה סאן-חואן. התמונה התחתונה צולמה 5 ימים אחרי פגיעת ההוריקן, ומשקפת את התאורה החשמלית באי לאחר קריסת רשת החשמל. מקור: NOAA National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS)[28]**.**

במאי 2019, בשל חשש כי ירי רקטות מעזה עשוי לגרום לנזק גדול לאסדת הגז תמר, החליט שר האנרגיה על השבתת האסדה ועל הפסקת הזרמת גז לישראל. אסדה זו, מהווה את המקור לאספקת 70% מהחשמל בישראל. אמנם רשת החשמל עברה לשימוש בדלקים חלופיים והרשת לא נפלה, אך הנזק הכלכלי למשק היה 115 מיליון ₪ לשבוע. מקרה זה ממחיש את הפגיעות של רשת החשמל המסורתית הנשענת על מספר מצומצם של מתקני ייצור ואספקת חשמל [29].

ביזור מתקני ייצור החשמל ומעבר לאנרגיות מתחדשות אף מצמצם את היקף ההשקעות של המדינה בהגנת רשת החשמל ואספקת האנרגיה (סוללות נגד טילים ורקטות, ספינות טילים ומל"טים להגנה על תחנות כוח ואסדות גז טבעי, הגנת סייבר ועוד), אשר מוערכת ב- 3-10 מיליארד ₪ [30–33].

הפתרונות הכי טובים כיום ליצירת בניינים חסונים אנרגטית, הם בניית בניינים פאסיביים אנרגטית שלא צורכים הרבה אנרגיה וייצור חשמל בבניין באמצעות PV (בעיקר במדינה שטופת שמש כמו ישראל). טכנולוגיית ה-PV בשלה כיום, יחסית זולה, וניתנת ליישום בכל מקום ועל רוב סוגי המבנים. מבנים כאלו יהיו גם חסינים פי כמה לשינוי אקלים (גלי חום, גלי קור, הפסקות חשמל, מזג אוויר קיצוני), לעומת מבנים קיימים.

1.1.3 אתגרים בייצור אנרגיה מתחדשת בבניינים

הטכנולוגיות העיקריות הזמינות כיום להפקת אנרגיה בבניינים הן מערכות אשר מנצלות את אנרגיית השמש: מערכות פוטו-וולטאיות (photovoltaics- PV) אשר מפיקות חשמל [34] ומערכות תרמו-סולאריות (thermo-solar) אשר מפיקות חום. מתוך שתיהן, למערכות PV עלות כלכלית נמוכה יותר להפחתת פליטות גזי חממה וזיהום אוויר [35].

בשנים האחרונות אנו רואים בישראל פעולות להרחבת התקנת מערכות PV על גגות: על בתי ספר; על מבני ציבור בירושלים, ת"א ורשויות אחרות; על מבני תעשיה; על בתים; ועל מבני חקלאות. ההתקנה על פי רוב במערכות PV סטנדרטיות מטכנולוגיה סיליקונית בהטיה של 30°~ מעלות לכיוון דרום. אלו הם **תאים פוטו-וולטאים מיושמים במבנה (Building applied pothovoltaics- BAPV)**. הם אינם חלק ממעטפת הבניין, ומתווספים בגמר בניית הבניין (ראו תרשים 3 ותרשים 4).

חרף ההתקדמות, יש מגבלות בדרך זו. ראשית, שטח הגג מצומצם ביחס לשטח המבנה ולצריכת האנרגיה בהתאם, במיוחד נכון הדבר ככל שהמבנה גבוה יותר . כמו כן לבניינים רבים יש מתקני תשתית על הגג (משאבות, חדרי מעליות, וכו'), המצמצמים עוד יותר את השטח השימושי ליישום סולרי.

שנית, מערכות PV סטנדרטיות בולטות לעין, בעלות 2 מופעים עיקריים בלבד ושילובם העיצובי במבנים הוא אתגר גדול. לכן יש סיכוי נמוך שארכיטקטים ואדריכלים ישלבו אותן בבניינים בצורה גלויה [8] (ראו פרק 2.1.1). שלישית, מערכות PV סטנדרטיות אינן מספקות פתרון למעטפת הבניין אלא הן מערכות נוספות- עם עלויות כוח אדם נוספות ושימוש בחומרי בניין נוספים, מעבר לתהליך הבניה הרגיל [5]. פערים אלו מונעים יישום מלא של פוטנציאל הפקת אנרגיה סולארית במבנים בישראל.

תרשים 3: BAPV בטכנולוגיית c-Si מותקן על מבנה חקלאי.
הפאנלים הסולאריים מוצבים על הגג במפנה דרומי, בזווית ~30^oC אופטימלית. מושב צופית, ישראל. דניאל מדר.

תרשים 4: BAPV בטכנולוגיית c-Si מותקן על גג.
הפאנלים הסולאריים אינם חלק ממעטפת הגג, ומונחים על הגג עצמו. אוקלנד, קליפורניה [36]. IRFTS Easy Roof

תאים פוטו-וולטאים משולבים במבנה (Building integrated photovoltaics- BIPV) פותרים את הבעיות הקיימות ביישום BAPV.

1.1.4 תאים פוטו-וולטאים משולבי מבנה BIPV

תאים פוטו-וולטאים משולבי מבנה (Building Integrated Photovoltaics- BIPV), הם תאי PV אשר משולבים במעטפת הבניין. התאים יכולים להיות משולבים בגג (ראו תרשים 5), בקירות, בפתרונות הצללה, בחלונות ובאלמנטים מבניים נוספים. דוגמאות למוצרי BIPV הם רעפים, זכוכית לחלונות ולחזיתות ואריחים סולאריים [8,9]. טכנולוגיות BIPV מאפשרות לנצל את כל/ חלק שטח מעטפת הבניין להפקת חשמל. בבניינים גבוהים, שטח זה יכול להיות גדול פי עשרות מונים מהשטח הפנוי על הגג למערכות PV רגילות, ולכן יכול להפיק הרבה יותר חשמל לעומת מערכת PV רגילה על הגג בלבד. מוצרי BIPV יוצרים מעטפת בניין מולטי-פונקציונאלית אשר ממלאת מספר תפקידים במקביל:

- מגינה על הבניין מפני הסביבה.
- מפיקה חשמל מתחדש מאנרגיית השמש.
- יוצרת מעטפת אדריכלית המדגישה המשקפת את תפקודה כמייצרת אנרגיה מתחדשת.

- BIPV משולב בזכוכית או באביזרי הצללה יכול להוסיף ייצור חשמל לאלמנט של הצללה, במקום שימוש במוצרים נוספים אשר רק מצלים (חלונות כהים או תריסים) [37,38].

באופן זה, ניתן להפיק יותר חשמל באמצעות בניין, לחסוך אנרגיה, לצמצם השימוש בחומרי גלם ובשעות עבודה. בנוסף, הקמת פרויקטי BIPV בולטים אך אסתטיים בלב העיר מאפשרת פרסום של הפקת אנרגיה מתחדשת למספר רב של אנשים [5,9,39].

אל מול PV פשוט שמותקן על גגות (BAPV), ניתוח מחזור חיים (LCA- life cycle analysis) מראה כי BIPV עדיף ב-5-25% בקטגוריות פליטות קרצינוגנים, זיהום אוויר אורגני, חלקיקים נשימים אנאורגניים, שינוי אקלים, רעילות למערכות אקולוגיות, החמצת/עודף נוטריינטים במקווי מים, שימוש בשטחים פתוחים, שימוש במינרלים ושימוש בדלקי מאובנים (ז"א, הוא בעל השפעות שליליות נמוכות יותר בקטגוריות אלו). יחד עם זאת, BIPV שווה ל-PV פשוט המותקן על גגות בקטגוריית קרינה, גרוע ב-20% בקטגוריית חלקיקים נשימים אורגניים, וגרוע ב-60% בקטגוריית פגיעה בשכבת האוזון [40].

תרשים 5: רעפי BIPV בטכנולוגיית c-Si.
הפאנל הסולארי הוא חלק אינטגראלי מהרעף ואינו מונח עליו. הפאנלים הסולאריים הינם חלק ממעטפת הגג, והינם בעלי תפקיד מבני .[6]

באירופה, תאי PV משולבים במבנה נחשבים BIPV אם ממלאים תפקיד מבני או פיסיקלי, בהתאם לרגולציה האירופית (European Construction Product Regulation CPR 305/2011) [41,42]. כמו כן, נעשתה סטנדרטיזציה בתחום (EN 50583-2016, Parts 1 and 2).

ל- BIPV גם חסרונות: מכיוון שזו טכנולוגיה יחסית חדשה עם יחסית מעט ניסיון, היא יקרה לעומת מוצרי מעטפת בניין ו- PV רגילים ואורך החיים של חלק ממוצריה לא ודאי; שוק BIPV עדיין לא קיים בארץ והתחום אינו מוכר בקרב בעלי המקצוע; זוהי טכנולוגיה מסובכת לשילוב בענף הבניה, אשר מחייבת התייחסות ספציפית אליה עוד בשלבי התכנון הראשונים; בשל שילובה במעטפת הבניין, הטכנולוגיה מסורבלת לתיקון ולשדרוג (בניגוד ל-BAPV למשל).

1.2 מטרות המחקר

המטרה העיקרית של מחקר זה היא לבצע סקר התכנות ליישום BIPV בבניין משרדים בישראל.

יעדי המחקר הם:

1. לסקור את תחום ה-BIPV, את הטכנולוגיה ואת השוק, ולהציע את הטכנולוגיות המתאימות ביותר לשימוש בישראל.
2. לבחון את ההתכנות של התקנת BIPV בבניין מסחרי טיפוסי בישראל, תוך שימת דגש על הנושאים הבאים:

א) אופציות שילוב BIPV בארכיטקטורה מבנית ובטכנולוגיות בניה הנהוגות בישראל.

ב) ניתוח הפקת האנרגיה הצפויה בבניין עם BIPV, אופטימיזציה של הפקת האנרגיה, והשוואה לבניין זהה ללא BIPV אך עם תוספת PV.

ג) ביצוע ניתוח כלכלי, בחינה כלכלית של חלופות תכנון ויישום טכנולוגי.

ד) ניתוח חסמים צפויים ביישום הטכנולוגיה בישראל והצעת דרכים להסרתם.

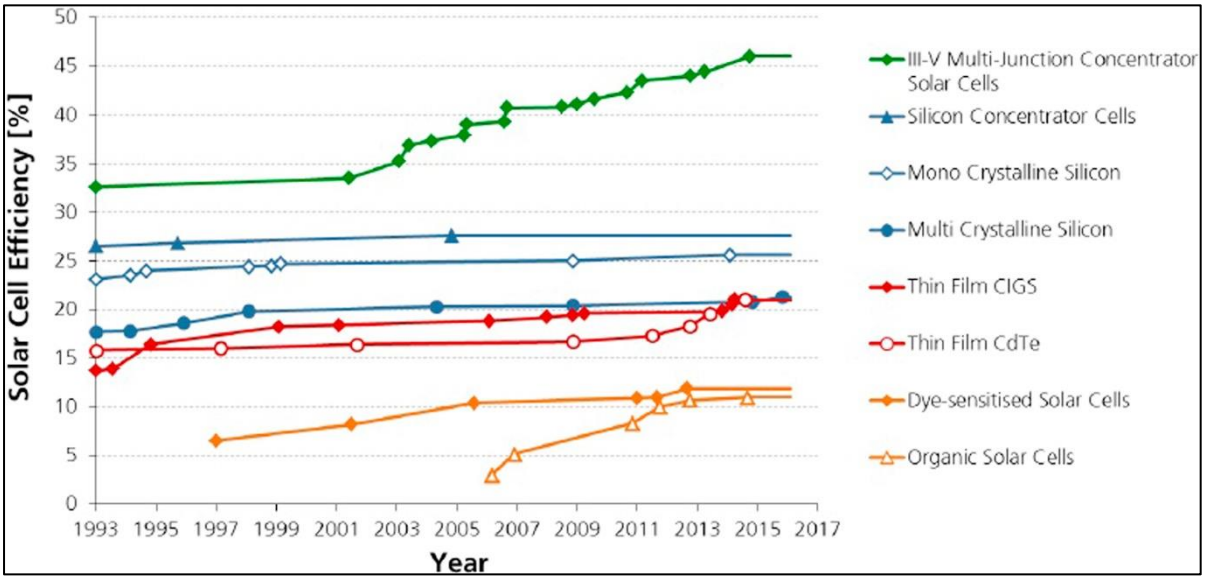
3. יעד לטווח ארוך הוא לקדם את תחום ה-BIPV בארץ.

2 סקירת ספרות: תאים פוטו-וולטאים משולבי מבנה (BIPV)

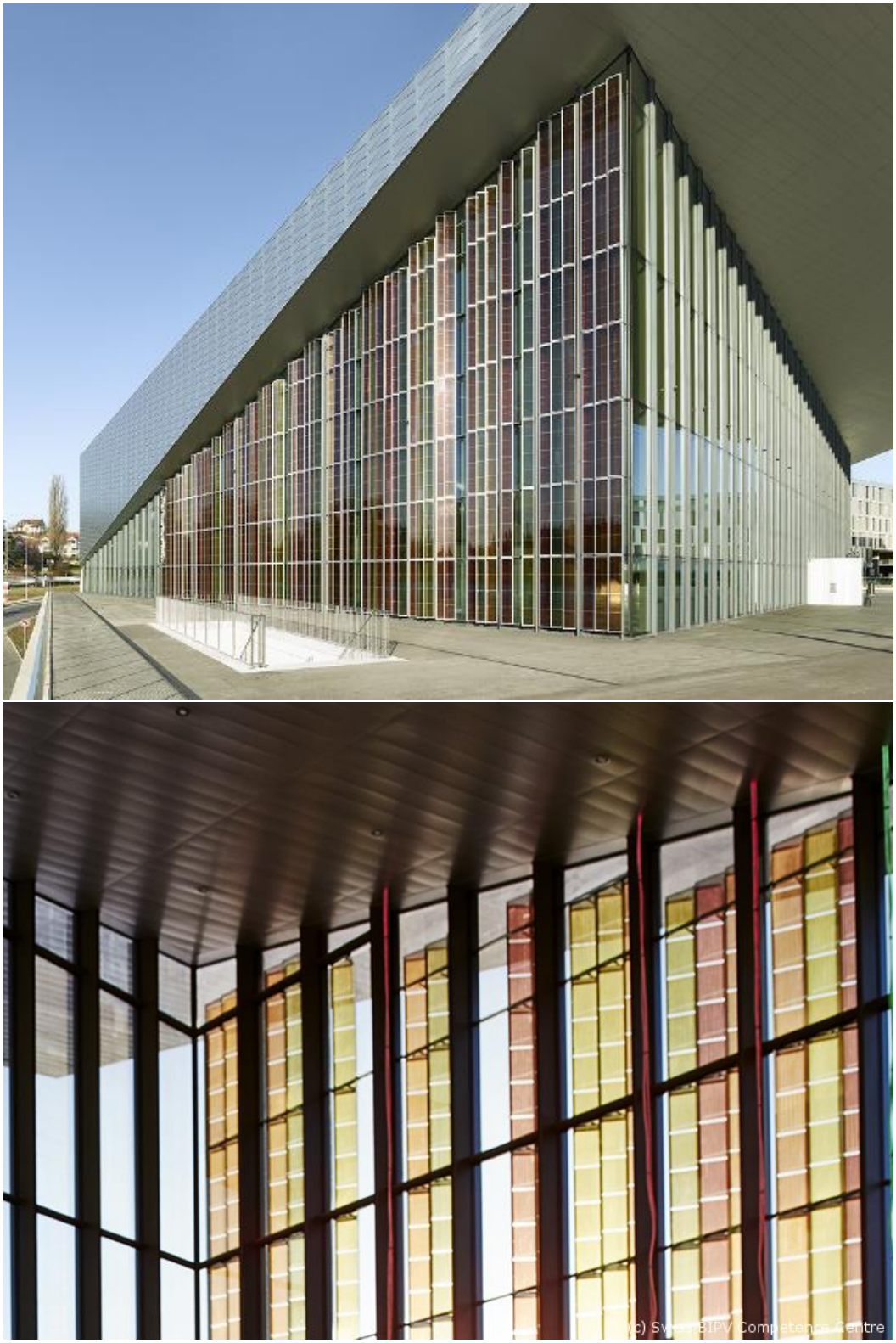
2.1 טכנולוגיות קיימות

בתחום התאים הפוטו-וולטאים מתקיים מחקר ופיתוח כבר במשך עשרות שנים (ראו תרשים 6). בתחום ה-BIPV, יש למעלה מעשרים שנות מחקר ופיתוח [6]. בד"כ, מחולקות טכנולוגיות ה-PV השונות לשלושה דורות [34]:

1. דור ראשון של מערכות פוטו-וולטאיות: טכנולוגיה בשלה ומסחרית. עושה שימוש בסיליקון גבישי (crystalline silicon: c-Si). המוצרים נמצאים בשוק ומפותחים מוצרים חדשים ומשופרים.
2. דור שני של מערכות פוטו-וולטאיות: טכנולוגיה בשלה ומסחרית למחצה. מבוססת על פילם דק (thin film). ישנם מוצרים בשוק, אבל הניסיון איתם עדיין לא רב. מוצרים חדשים נבחנים.
3. דור שלישי של מערכות פוטו-וולטאיות: טכנולוגיות חדשות כגון תאים מבוססים חומרים אורגניים (organic photovoltaics), הדפסות דיו פוטו-וולטאי (dye-sensitized, ראו תרשים 7), פורובסקייט (Perovskite), ננו-חוטי סיליקון (silicon nano-wires, SiNW). אלו טכנולוגיות לא בשלות, שעדיין בשלבי בחינה ופיתוח. ישנם מוצרים מועטים מאוד בשיווק ושימוש מוגבל. לכן, לא נעסוק במערכות אלו בעבודה זו.



תרשים 6: התקדמות ביעילות המרה של תאים פוטו-וולטאים.
שינוי ביעילות המרת אנרגיית שמש לחשמל במעבדה לאורך השנים, בסוגים העיקריים של טכנולוגיות תאים פוטו-וולטאים. כחול- דור ראשון (c-Si). אדום- דור שני (thin film). כתום- דור שלישי. ירוק- תאים פוטו-וולטאים מרוכזים (III-V Multi-Junction Concentrator Solar Cells) [34]. *Solar Cell Efficiency Tables (Versions 1–47), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 1993–2016. Graph: Simon Philipps, Fraunhofer ISE 2016*



תרשים 7: BIPV דיו-צבעוני בבניין **(SwissTech Convention Center (EPFL, *בלוזן, שוויץ*.**
יישום ראשון של דיו-צבעוני פוטו-וולטאי (דור שלישי) בבניין. BIPV ב-5 גוונים של ירוק, אדום וכתום; בשטח של 250 מ"ר, עם 2 kWp מותקן. מוצר זה אסתטי, יקר (2000 אירו למ"ר) ומייצר מעט חשמל למ"ר. הזכוכית שקופה למחצה, מאפשרת מעבר של 30% מהאור אל תוך הבניין, וכך גם מונעת חימום יתר שלו [6,43]**.**

בנוסף, קיימת טכנולוגיה של תאים פוטו-וולטאים מרוכזים (III-V Multi-Junction Concentrator Solar Cells), מרכזת את אור השמש בעזרת עדשות עד לפי 400-500 מעוצמתה הרגילה, אל תא פוטו-וולטאי יעיל במיוחד. הטכנולוגיה משלבת מנגנון עקיבה אחרי השמש, ולעיתים נעשה שימוש במחזירי אור להגברת היעילות. טכנולוגיה זו יעילה כאשר יש צורך לייצר חשמל בשטחים קטנים מאוד, כגון לוויינים. עודף קרינת השמש גורמת לחימום יתר של התא הפוטו-וולטאי. לכן, תאים אלו בד"כ זקוקים למערכת קירור. היא יקרה ומכילה בד"כ חומרים רעילים במיוחד (כמו ארסן, arsenic, למשל), לכן לא נעשה בה שימוש רב [34,44].

מכיוון שהדור השלישי עדיין לא בשל, והתאים הפוטו-וולטאים המרוכזים לא רלוונטיים כיום לתחום ה-BIPV, לא נעסוק בהם בעבודה זו.

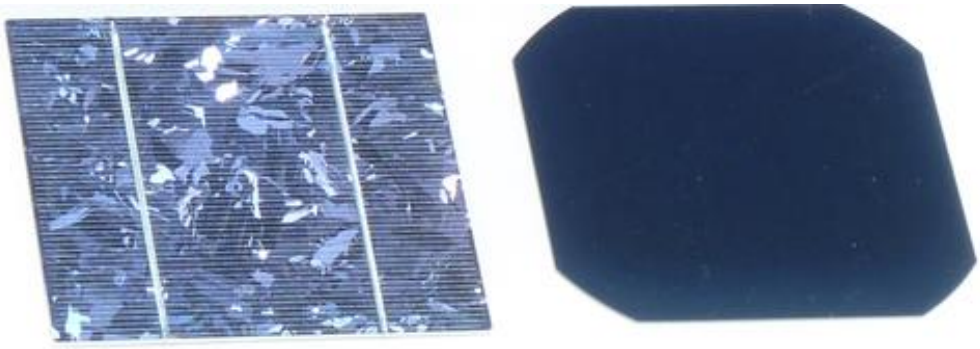
ניתוחי מחזור חיים (Life Cycle Analysis- LCA) מצאו מוצרי BIPV בד"כ מחזירים את ההשקעה האנרגטית הכרוכה במחזור חייהם (ייצורם, התקנתם, סיום חיים) תוך 3-5 שנים של פעילות [40,45].

2.1.1 סיליקון גבישי

בטכנולוגיית הסיליקון הגבישי (crystalline silicon: c-Si), עושים שימוש בגבישי סיליקון להמרת אור שמש לחשמל בתאים הפוטו-וולטאים [34]. זוהי טכנולוגיית ה-BIPV הנפוצה ביותר [6]. זאת מכיוון שזוהי הטכנולוגיה הוותיקה ביותר, המפותחת ביותר והיעילה ביותר בהמרת אנרגיית השמש לחשמל (ראו תרשים 13). סיליקון הינו היסוד השני הכי נפוץ על פני כדור הארץ, לכן הוא זול ונגיש.

בטכנולוגיה זו, תאי PV בעלי גבישי סיליקון קשיחים מוגנים מפני שבירה ואיתני הטבע בתוך סנדוויץ' של לוחות זכוכית. יישום זה מחייב פאנלים שטוחים וכבדים, ואינו מאפשר יצור יעיל של פאנלים עקמומיים, גמישים ו/או קלים.

עד לאחרונה, עקב אכילס של תאי c-Si היה הנראות שלהם. תאים אלו מגיעים בשני מופעים עיקריים בלבד, אשר מוכתבים מהחומר ממנו הם עשויים ומדרך הייצור שלהם (ראו תרשים 8). אמנם, נראות ואסתטיקה הינם פרמטרים סובייקטיביים. ישנם אנשים שאוהבים מראה של תאי c-Si "רגילים". ישנם אחרים שהמראה לא חשוב להם. אולם, יש כאלו אשר לא אוהבים את המראה. לכן, כאשר לטכנולוגיה יש רק 2 מופעים, סביר כי פחות אנשים יאהבו את המראה שלה, לעומת מציאות בה לטכנולוגיה יש 20 מופעים שונים. כאשר יש רק 2 מופעים לטכנולוגיה, הטכנולוגיה תהיה בולטת יותר על מבנה ואפשרויות השילוב העיצובי שלה תהיה מוגבלת יותר. כאשר ניתן לעצב את נראות הטכנולוגיה לפי הצורך, בעובי, צורה, עקמומיות, צבע, שקיפות, ומרקם- אפשרויות השילוב העיצובי שלה רבות הרבה יותר.



תרשים 8: השוואה במראה טכנולוגיות m-Si ו-p-Si.
מימין, תא סולארי בטכנולוגיית m-Si- לתא המורכב מגביש בודד, צבע כחול כהה/ שחור אחיד. משמאל, תא סולארי בטכנולוגיית p-Si- התא מכיל שלל גוונים של כחול, כל גביש בצבע אחר.

בשנים האחרונות פותחו תאי c-Si צבעוניים אשר משפרים את האסתטיקה של טכנולוגיה זו (ראו תרשים 9). אם בעבר נדחה שילוב של c-Si BIPV עקב בעיות אסתטיקה ובמקומו נבחר פילם דק צבעוני, כיום מגמה זו משתנה [6].

תרשים 9: חיפוי בניין ב- m-Si צבעוני.
בניין מגורים בציריך, שוויץ, ששופץ וחופה בחזיתותיו ב-m-Si צבעוני. לפי מראהו, לא ניתן לנחש שזהו בניין המחופה בפאנלים סולאריים [6]. BFE-SUPSI

Mono-crystalline silicon 2.1.1.1

סיליקון חד-גבישי (m-Si, monocrystalline silicon; או sc-Si, simple crystalline silicon). בטכנולוגיה זו, עושים שימוש בגביש יחיד ושלם של סיליקון בכל תא פוטו-וולטאי. לגבישים אלו תכונות המרה מעולות של אור שמש לחשמל (23-26%). אולם, תהליך יצירתם

יקר, מחזור החיים שלהם דורש אנרגיה רבה יחסית ולכן זמן החזר האנרגיה (energy return time, energy payback time- EPBT,- הזמן שלוקח למתקן להפקת אנרגיה להפיק את כמות האנרגיה שהושקעה בייצורו) שלהם ארוך יחסית, הם דורשים שימוש בחומרים טהורים במיוחד ועושים שימוש רק בגבישי סיליקון מושלמים [34] (ראו תרשים 10).

תרשים 10: מערכת m-Si BIPV לגג.
ניתן להבחין בקלות בגוון הכהה האחיד של טכנולוגיית m-Si, בניין מגורים טורי, איינדהובן, הולנד [6]. Esther Philipse and Alfred van Hese AERspire BV

Poly-crystalline silicon 2.1.1.2

סיליקון רב גבישי (poly-crystalline silicon, p-Si; או multicrystalline silicon, mc-Si). עקב החסרונות של m-Si שהוזכרו לעיל, פותחו תאים פוטו-וולטאים בטכניקות גיבוש חדשות מבוססי p-Si. ייצורם פשוט יותר, דורש פחות אנרגיה, ועושה שימוש גם בגבישי סיליקון לא מושלמים. לכן הם זולים יותר, יצורם פוגע פחות בסביבה והחזר האנרגיה שלהם מהיר יותר (ראו תרשים 11). בישראל, ה- EPBT שלהם עשוי להיות פחות משנה. יחד עם זאת, לתאי p-Si יעילות המרת קרינת השמש לחשמל של 19-21%. ז"א, הם יעילים ב-15-20% **פחות** לעומת ה- m-Si (ראו תרשים 13) [34].

תרשים 11: גגות שכונת מגורים עם p-Si BIPV.
אוטרכט, הולנד. ניתן לראות את הדוגמה הבולטת לעין של ריבוי הגבישים ב-p-Si. [46]*Frank van der Vleuten.*

2.1.2 פילם דק

בחיפוש אחר טכנולוגיות פוטו-וולטאיות זולות יותר, פותחו תאי פילם דק (thin film). תאים אלו עושים שימוש ב-99% פחות חומר לעומת תאי c-Si. בתהליך הייצור של פילם דק, חומר פוטו-אקטיבי מיושם על זכוכית דקה או פילם גמיש דק בשלב אחד (בניגוד לתאי הסיליקון הגבישי אשר מיוצרים במספר שלבים). לאור זאת, ה-EPBT של פילם דק בישראל יכול להיות 6-10 חודשים בלבד [34].

יתרונות נוספים של הפילם הדק הם משקלו הנמוך, שקיפותו, , היכולת ליישם אותו על משטחים עקומים ולא שטוחים, גמישותו, קלות התקנה, אורך חיים של 25 שנים, היכולת ליישמו בצבעים שונים ובטקסטורות מגוונות (ראו תרשים 12), ומחיר נמוך למ"ר [6,34]. פילם דק מאפשר יישום BIPV על זכוכית, תוך בליעת חלק מהאור הפוגע בזכוכית. כך, ניתן לייצר חשמל בחלקי מעטפת מבנים אשר לא מאפשרים יישום של תאי c-Si אטומים, כגון חלונות חזית וחלון עילי (skylight). ניתן לקבוע את רמת הבליעה של הפילם הדק, וכך לקבוע האם לייצר יותר חשמל על חשבון אור שנכנס לתוך הבניין. כך ניתן לייתר אמצעי הצללה שמשתמשים בהם בחלונות לשם יצירת תנאים נעימים יותר בתוך המבנה וכן לשם צמצום התחממות המבנה מהשמש.

תרשים 12: BIPV פילם דק בשלל צבעים וטקסטורות.
פרויקט PV OpMaat [47] בוחן צבעים, טקסטורות וביצועים אנרגטיים של BIPV פילם דק לשם הגדלת היצע מוצרי BIPV לחזיתות, לקראת חובת בניית כל הבניינים החדשים באיחוד האירופי כ-NZEB [48]. ,תמונה: SEAC.

מחירו הנמוך יחסית של BIPV עם פילם הדק למ"ר, הינו תחרותי יחסית לעומת טכנולוגיות חיפוי קונבנציונאליות לחזיתות (ללא BIPV), ומאפשר יישום BIPV בחזיתות ללא עלויות גבוהות [6]. יתרונות אלו, אשר חלקם משלימים את תאי ה-PV מבוססי הסיליקון הגבישי, הביאו לעליה בפופולריות היישום של פילם דק בשנים האחרונות.

חסרונות הפילם הדק בהשוואה ל-c-Si, הם יעילות נמוכה יותר בהמרת אנרגיית השמש לאנרגיה חשמלית (10-21%, ראו תרשים 13) וניסיון מועט יותר ביישום.

ישנן 3 טכנולוגיות פילם דק בשלות בשוק:

1. A-Si.
2. CI(G)S.
3. CdTe.

A-Si 2.1.2.1

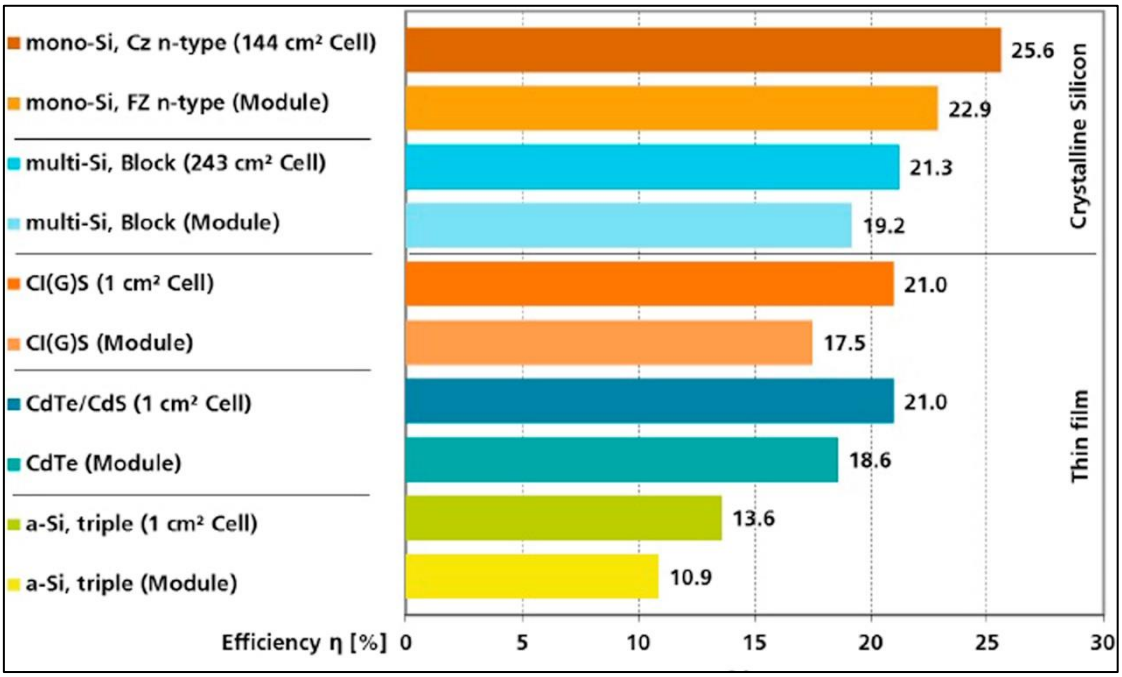
בסיליקון אמורפי (Amorphous silicon, A-Si), אטומי הסיליקון מסודרים בתצורה רנדומלית, ואינם מסודרים בגביש קשיח כמו בסיליקון גבישי (c-Si). מאפיין זה מאפשר לתא הפוטו-וולטאי גמישות ועובי דק. אולם, בטכנולוגיה זו לא הצליחו להגיע ליעילות המרה גבוהה (10-14% בלבד, ראו תרשים 13), וכן תאים אלו עוברים דגרדציה בחשיפה לשמש. עקב בעיות אלו, בשנים האחרונות מתמעט השימוש בטכנולוגיה זו [6,34].

2.1.2.2 CI(G)S

לתאי קופר אינדיום סלנייד/ גליום- Copper indium selenide (CIS), Copper indium gallium-deselenide (CIGS), CI(G)S, יעילות גבוהה מזו של a-Si, והיא מתקרבת ליעילות p-Si (ראו תרשים 13). חסרונות תאים אלו הם יעילות יצור לא גבוהה אשר מקשה על הוזלת הייצור, דגרדציה בחשיפה למים, ומחסור במתכת הנדירה אינדיום [34].

2.1.2.3 CdTe

לתאי קדמיום טלורייד- Cadmium telluride, CdTe, יעילות גבוהה מזו של a-Si, והיא מתקרבת ליעילות p-Si (ראו תרשים 13). חסרונם הגדול של תאים אלו הוא שימוש במתכת הרעילה קדמיום, אשר מחייבת טיפול נאות בתאי ה- CdTe בסוף חייהם ע"מ להגן על הסביבה. חסרון נוסף של תאים אלו, הוא השימוש במטלואיד (יסוד בעל תכונות כימיות בין אלו של מתכות, לבין אלו של אל-מתכות) הנדיר טלוריום (tellurium). מחירו של הטלוריום נוסק בשל שימושו הנרחב במוליכים למחצה (כמו בתאי PV), וצפוי בו מחסור בעשור הקרוב [34,49,50]. חברת First Solar פצחה בתוכנית מחזור יעילה של תאי CdTe, אשר עשויה להוזיל עוד את עלויות הייצור ולתת פתרון לבעיית שהוזכרו [34]



תרשים 13: יעילות המרה של תאים פוטו-וולטאים.
*יעילות המרת אנרגיית שמש לחשמל, בסיליקון גבישי (**c-Si**, דור ראשון) ובפילם דק (thin film, דור שני) [34]. לכל טכנולוגיה נתונים ליעילות תא PV בודד, ולמודול שלם. יעילות ההמרה של מודולים משקפת את היעילות בפועל בשטח יותר מאשר יעילות תא בודד.* *Green et al.: Solar Cell Efficiency Tables (Version 47), Progress in PV: Research and Applications 2016. Graph: PSE AG 201*

2.2 מוצרים קיימים

שוק ה-BIPV התחיל באופן טבעי עם מוצרים לגגות- זאת בשל חשיפתם הגדולה יותר לשמש לעומת חזיתות. עם זאת, הדרישה ההולכת וגוברת להפקת יותר ויותר אנרגיה ע"י בניינים, העלתה את הדרישה גם למוצרי BIPV על חזיתות.

כיום יש למעלה מ-100 ספקים שונים של מוצרי BIPV בשוק האירופי [6]. שוק ה-BIPV דינמי, וכיום אחד מכל שלושה מוצרים נכנס לשוק בשנתיים האחרונות. מוצרים חדשים מתווספים ואחרים נעלמים, עקב התקדמות טכנולוגית, רגולציה, עלויות, וחברות שמפסיקות לפעול או נרכשות ע"י חברות אחרות. לגופים שונים סיווגים שונים למוצרי BIPV. במחקר זה יעשה שימוש בסיווגים של SUSPI-SEAC האירופים [6].

2.2.1 גגות

הקטגוריה מחולקת לפי גיאומטריית הגג.

גג נטוי אטום (אטום=לא שקוף) עשוי מחלקים קטנים (רעפים למשל), ולכן נקרא גם "גג מקוטע" (discontinuous roof). חלקים אלו צריכים לשמור על אטימות כנגד מים ותנועת אוויר, וכן להגן מפני אש, לבודד מרעש ולהגן מרוחות ומחפצים. בגגות אלו קיימות קטגוריות המוצרים הבאות: זכוכית סולארית, מערכות התקנה בגג, פתרון גג מלא, רעפים גדולים וקטנים, פאנלים מתכתיים. רוב המוצרים הנ"ל עושים שימוש בטכנולוגית c-Si. אולם, ה- Thin Film היא הטכנולוגיה השלטת במוצרי זכוכית ובפאנלים מתכתיים.

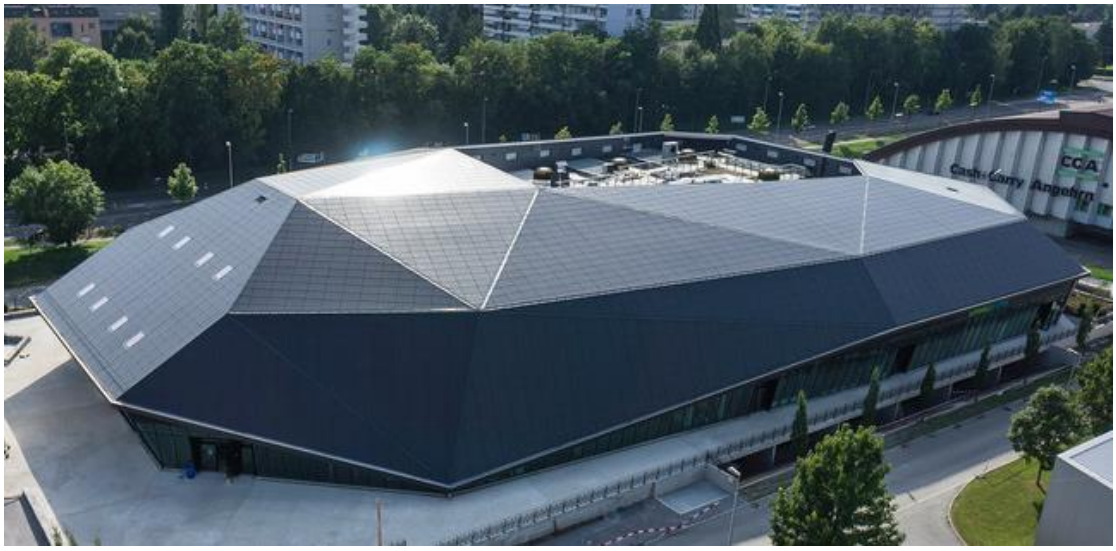
גג שטוח או מעוקל, נקרא גם "גג רציף" (continuous roof), בו שכבה רציפה שמכסה את כל או את רוב שטח הגג. בד"כ, ההתקנה נעשית מעל ממברנות לאיטום כנגד מים. בגגות אלו קיימות קטגוריות המוצרים הבאות: זכוכית סולארית, פאנלים מתכתיים וממברנות PV. הטכנולוגיה השלטת בגגות אלו היא ה-Thin Film. בגגות, היצרנים מנסים שמוצרי ה-BIPV ידמו כמה שיותר למוצרי גגות קונבנציונאליים (רעפים, לוחות וכו'), בין היתר, ע"מ לפשט ולהוזיל את תהליך הרכבתם [6]. שוק הגגות גדול יותר כיום מאשר שוק החזיתות.

להלן פירוט קטגוריות המוצרים השונות לגגות:

- **מערכת התקנה בגג (mounting systems)**: זוהי מערכת BIPV אשר משולבת באופן חלקי בגג (partially integrated), נמצאת בתפר שבין BAPV לבין BIPV. מערכות התקנה בגג משמשות להתקנת תאי PV בגגות משופעים באמצעות ערכה סטנדרטית עם רכיבים כגון מסגרות, שכבות אטומות למים, כליבים (clamps). בד"כ, רק חלק מהגג מכוסה במערכת זו, מכיוון שמגיעה בגדלים, בשיפועים ובצורות סטנדרטיים. אי אפשר לכסות איתה ארובות, אזור לא ריבועי, אזור מעוקל וכדומה. המערכת מותקנת בד"כ לצד מערכת גג רגילה אשר מכסה את שאר האזורים. תאי ה-PV לעיתים אינם תורמים לאטימות הגג כנגד מים. מערכות אלו לעיתים משמשות גם בחזיתות. רוב המוצרים הנ"ל מטכנולוגית c-Si (ראו תרשים 14).

תרשים 14: מערכת BIPV התקנה בגג.
שימוש בפאנלי c-Si, ניתן לראות את המסגרות אליהן מחוברים הפאנלים הסולאריים [6].

- **פתרון גג מלא (full roof solution)**: בניין שתוכנן ועוצב מראש בתפיסה של גג BIPV, הממלא תפקיד אסתטי ופונקציונאלי/מבני. פתרון זה כולל רכיבי דמה שנראים כמו מעטפת ה-BIPV אבל אינם כאלו- אותם מרכיבים באזורים שלא יכולים להפיק חשמל (בשל הצללה, זווית, מפנה, או מיקום). בתוצאה הסופית, לא נראה כאילו הוספה מערכת PV כמו במקרה של מערכת התקנה בגג, אלא מתקבל בד"כ גג אחיד. במקרים רבים, מכיוון שמדובר במבנים חדשים וייחודיים, יש לייצר רכיבים ספציפיים עבור מבנה ספציפי. רוב המוצרים הנ"ל מטכנולוגית c-Si (ראו תרשים 15).



תרשים 15: פתרון גג נטוי מלא m-Si BIPV.
Umwelt Arena, ציריך, שוויץ [9]. Meyer Burger

- **מערכת טרומית (prefab system)**: במערכת זו, הפונקציה המבנית (הידוק התאים, אטימות) כבר כלולה בתאי ה-PV. אלמנט המעטפת מגיע מוכן לאתר הבניה, להרכבה מהירה כגג או כחזית. מערכות אלו קלות להרכבה ולהחלפה טכנית וחשמלית (plug & play concept). מכיוון שמיוצרת מראש באופן סטנדרטי, היא אינה בהכרח אסתטית. רוב המוצרים הנ"ל מטכנולוגית c-Si (ראו תרשים 16).

תרשים 16: מערכת BIPV טרומית.
המערכת מגיעה מוכנה להרכבה. שימוש בטכנולוגיית c-Si [6].

- **רעפים סולאריים**: בד"כ מעוצבים כך שיראו כמו רעפים קונבנציונאליים. לרוב הם מוכנסים בחלק מהגג, לצד רעפים קונבנציונאליים, עקב בעיות יישום על כל הגג. לרוב גובה הרעפים ~40 ס"מ, ע"מ להדמות לשורות של רעפים קונבנציונאליים. רוחב הרעפים משתנה מקטנים (30 ס"מ) ועד גדולים (160 ס"מ). הקטנים דומים יותר לרעפים קונבנציונאליים מבחינה אסתטית, ויכולים למלא יותר שטח בגג לעומת הרעפים הגדולים (הרחבים). תיאורטית, הרעפים הגדולים אמורים להיות יותר זולים (פשטות ומהירות התקנה), אולם עדיין אין עדות לכך בסקרי מחירים [6]. ישנם רעפים עם תאי PV עם זכוכית (c-Si) ויש כאלו עם ממברנות/פילם דק. לרעפים סולאריים לרוב שוק קטן, עקב עלות גבוהה. אולם, לאחרונה כנראה ששוק זה גדל בשל היכולת להחליף גגות רעפים קיימים בגגות רעפי BIPV, להם אין פתרון אסתטי אחר (ראו תרשים 17 ותרשים 5).

תרשים 17: רעפי BIPV.
PANOTRON, FORNACE FONTI 9.

- **מערכות קלות**: מוצרים שמשקלם למ"ר נמוך משמעותית ממוצרי BIPV רגילים מבוססי זכוכית. מדובר על מוצרים במשקל נמוך מ-12-15 ק"ג למ"ר לפריט החיפוי (לא כולל משקל של מבנה תומך). המשקל הנמוך מאפשר הוספת BIPV בעת שיפוץ מבנים קיימים. ישנם פילמים דקים שניתן להדביקם כמעט על כל משטח. הטכנולוגיות המשמשות בקטגוריה זו הן בעיקר פילם דק a-Si, פילם דק CI(G)S, ופילם דק אורגני OVP. גם תאי PV סיליקוני גבישי קלים במיוחד (ci-S ultra-lightweight), או תאים עם שכבות זכוכית או פלסטיק קשיח דקות (<2 מ"מ) יכנסו לקטגוריה זו. חלק מהמוצרים בקטגוריה זו (בעיקר ה-PV הגמיש) הם בעצם BAPV, מכיוון שמודבקים למעטפת לאחר ההרכבה שלה ואינם מהווים חלק הכרחי במעטפת, אבל הם יכולים להיות מוטמעים בעתיד במעטפות שמיוצרות מראש כ-BIPV. ישנן 3 תת-קטגוריות:

- **תאי PV קלי משקל**: יכולים להיות קשיחים או גמישים, יכולים לעמוד בדרישות קיצוניות, כגון הרכבה והסרה פשוטים, והתאמה למגוון משטחים.
- **ממברנות לגגות**: פאנלי PV גמישים מודבקים לממברנות של גגות; כגון PVC, TPO, EPDM (ראו תרשים 18).
- **פאנלים מתכתיים**: פאנלי PV גמישים מודבקים לפאנלים ממתכת (פלדה, נחושת, אבץ, אלומיניום...) אשר משמשים לחיבור בין חלקים של גגות או חזיתות, או לגישור על חריצים.

תרשים 18: התקנת thin film BAPV גמיש על גג.
ה-thin film הזה של Uni-Solar מודבק על הגג, אינו חלק מהמעטפת של הבניין, ולכן נחשב BAPV ולא BIPV.
מוצר זה אף עמיד בהוריקנים [51]. *www.kenfields.net - Ken Fields*

- **זכוכית סולארית (solar glazing\ Skylight)**: בקטגוריה זו, פאנלים סולאריים משולבים בזכוכית, ליצירת זכוכית מצלה ומייצרת חשמל (ראו תרשים 19). המוצרים הראשונים שילבו תאי PV c-Si קשיחים ואטומים אשר שולבו בזכוכית, כאשר ביניהם רווחים שמאפשרים מעבר אור. המוצר המוגמר סבל מאסתטיקה ירודה ואינו מאפשר ראות שלמה ורציפה דרך הזכוכית. לנישה זו, נכנס הפילם הדק השקוף למחצה. הפילם הדק מאפשר כיסוי כל הזכוכית ב-PV, תוך קבלת מראה אחיד ומספק ראות שלמה ורציפה דרך הזכוכית. ניתן לכוונן את מידת השקיפות של הזכוכית הסולארית עם הפילם הדק, תוך הקרבת כושר ייצור חשמל, לשם שליטה בחימום ובהארת הבניין. כך ניתן למנוע עומסי חום וסנוור בבניין מצד אחד, וקור וחושך מצד שני (ככל שהזכוכית שקופה יותר, היא מעבירה יותר אור ויכולה לייצר פחות חשמל). זכוכית סולארית משמשת ב-skylight בגגות, וכמובן בחלונות בחזיתות.

תרשים 19: BIPV זכוכית סולארית.
שלוש שיטות לייצור זכוכית סולארית: תמונה עליונה- מודולי c-Si אטומים משולבים בזכוכית; תמונה אמצעית- רצועות c-Si; תמונה תחתונה- רצועות פילם דק [6].

2.2.2 חזיתות

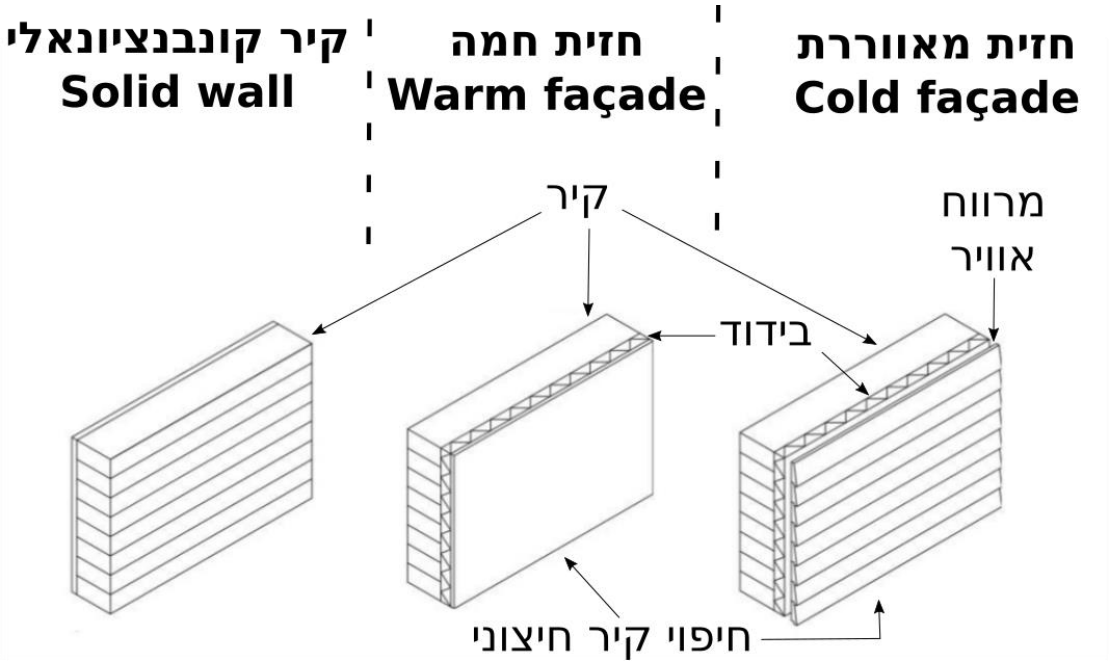
מוצרי BIPV משמשים כתחליפים לרוב מוצרי המעטפת הקונבנציונאליים בחזיתות- גם כאלו אטומים לאור וגם שקופים (זכוכית).

התקדמות הטכנולוגיה, כמו למשל זכוכית סולארית שקופה, מאפשרת כיום שילוב BIPV אסתטי יותר בחזיתות. בניגוד למוצרי BIPV לגגות, היצרנים פחות מנסים שמוצרי ה-BIPV לחזיתות ידמו למוצרים קונבנציונאליים לחזיתות, אלא פועלים לשפר את האסתטיקה של מוצרי ה-BIPV לעומת אלו הקונבנציונאליים [6]. בחזיתות קיימות התקנות בבניה קונבנציונאלית או בקירות מסך, באמצעות חזית חמה או חזית מאוררת והתקנות במוצרים נלווים (מעקות, סככות למשל).

- **קיר מסך (curtain wall)**: קיר מסך הינו באופן טיפוסי מערכת מעטפת רציפה בה הקיר אינו בעל תפקיד מבני (לא נושא את הבניין). קיר מסך ממלא את כל תפקידי המעטפת כמו נשיאת משקל המעטפת, בידוד תרמי, בידוד קול, והגנה מפני מזג האוויר. קירות מסך יכולים לשלב זכוכית או פאנלים סולאריים בתלייה, באופן בלעדי או בשילוב עם חומרי מעטפת אטומים או שקופים אחרים. (ראו תרשים 20).

תרשים 20: קיר מסך.
הקיר החיצוני המורכב מזכוכית אינו נושא את משקל הבניין. ניתן לראות את העמודים הפנימיים הנושאים את משקל הבניין. Dessau Werkstätten, גרמניה. Cethegus @ wikimedia.org

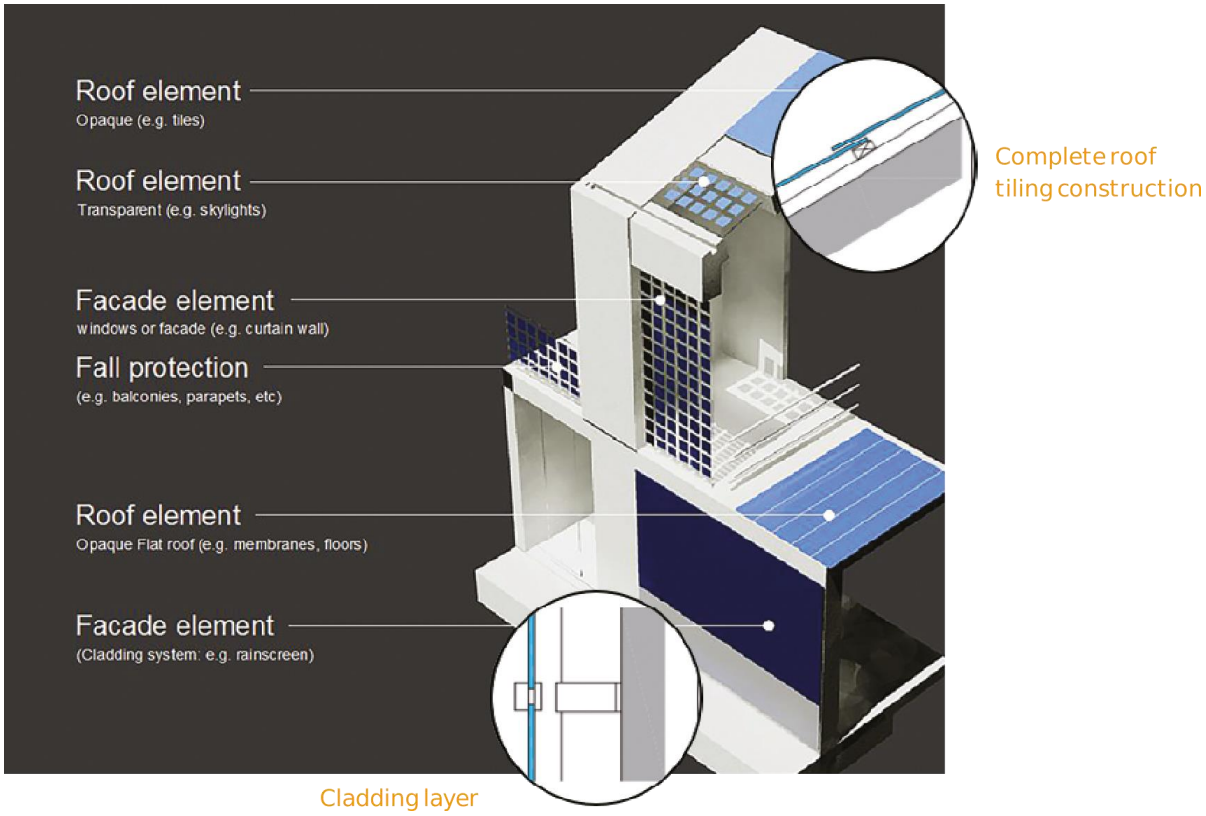
- **בניה קונבנציונאלית-** המשלבת עמודים נושאים ומילואה ביניהם. בבניה מסוג זה האזור הסולארי יכול להשתלב בפאנל מעטפת סולארי אטום, כמו גם בזכוכית סולארית בחלונות.
- **חזית מאוררת (cold façade\ rain-screen façade)** אל מול **חזית חמה (warm façade**): חזית מאוררת הינה תשתית נושאת משקל בחלק הפנימי של החזית, מרווח אוויר, ופאנל חיפוי חיצוני. מרווח האוויר רציף מתחתית החזית ועד לראשה. פתחים בתחתית ובראש מאפשרים כניסת אוויר קר מלמטה ויציאת אוויר חם מלמעלה, וכך משפרים את הביצועים התרמיים של החזית כאשר היא מתחממת משמש ישירה (לכן נקראת גם cold façade). מאפיין זה מאפשר למעטפת ה-BIPV לפעול בטמפ' נמוכה יותר וביעילות גבוהה יותר לעומת מוצרים אחרים. המודולים הסולאריים יכולים להשתלב במעטפת זו כמו כל חומר מעטפת אחר. החזית המאוררת יכולה להתקיים בבניה קונבנציונאלית או בקיר מסך. לעומתה, חזית חמה, אינה כוללת אלמנט אוורור שכזה, ולכן מתחממת יותר משמש ישירה (ראו תרשים 21).



תרשים 21: הבדלים בין קיר רגיל, חזית חמה וחזית מאוררת.
לכל הקירות אלמנט קיר עיקרי הממלא את החלל בין עמודי התמיכה ומהווה את החוצץ הפיזי העיקרי בין פנים הבניין והחוץ. בחזית חמה ומאוררת מחוברת שכבת בידוד אל הצד החיצוני של הקיר. בחזית חמה, החיפוי החיצוני מחובר לצד החיצוני של שכבת הבידוד. בחזית מאוררת בין שכבת הבידוד והחיפוי החיצוני יש שכבת אוויר. Abhinav Chunchu @ slideshare.net

- **מוצרים נלווים**: ניתן לשלב BIPV במוצרים נלווים למעטפת, כגון מרפסות, מעקות, מחיצות חיצוניות, מערכות הצללה ועוד. מערכות הצללה הינן הכי נפוצות, מכיוון שנדרשות להצללה של חזיתות זכוכית. כמו כן היות והן מתקני הצללה והן מתקנים ליצור אנרגיה סולרית מחפשים הפניה אופטימלית למסלול השמש יש הגיון במוצר המספק את השימוש הכפול ומאפשר תוך יצור האנרגיה מניעת עומס תרמי בבניין תוך

מקסום כניסת תאורה טבעית נוחה (ראו תרשים 22). על פי רוב את המוצרים הנלווים ניתן לשלב בקלות יחסית גם במבנים קיימים היות והם נוספים למעטפת השלד וחיצוניים לה.



תרשים 22: אופציות שונות לשילוב מוצרי BIPV סולאריים במעטפת המבנה.
שילוב BIPV בגג, במעקה, בחלון ובקיר. מתוך [6].

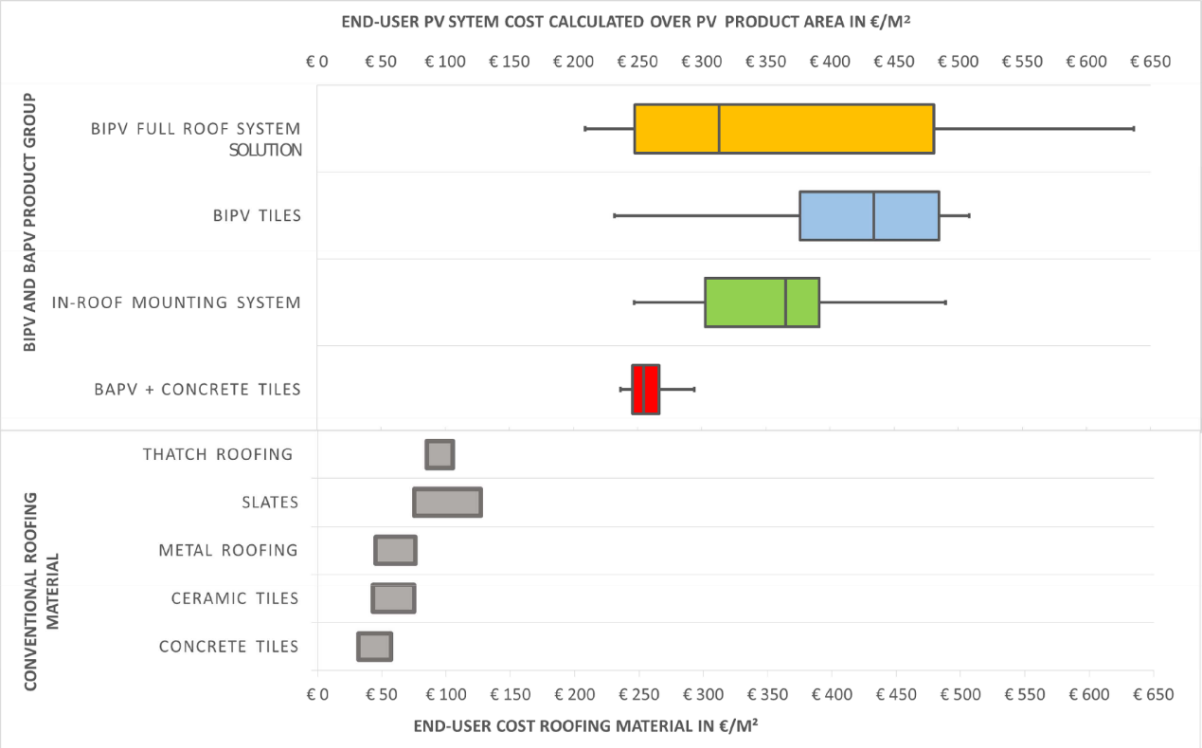
2.2.3 השוואת מחירים בין מוצרי BIPV ומוצרי מעטפת רגילים

באופן טבעי, מכיוון שמוצרי BIPV מהווים גם אלמנט מעטפת שמטרתו הגנה על המבנה מפני פגעי הטבע, וגם אלמנט אשר מפיק אנרגיה חשמלית מקרינת השמש, עלותו גבוהה למ"ר לעומת מוצר מעטפת קונבנציונלי מקביל (רעפים, אריחים, וכו'), או לעומת מ"ר של מערכת PV רגילה. מלבד תוספת עלותו של חלק מפיק אנרגיה למוצר BIPV , קיימת גם עלות חיבור מוצר ה-BIPV וה-BAPV לרשת החשמל של הבניין. לגבי מוצרי BAPV, העלות כוללת גם שימוש במוצרי מעטפת קונבנציונאלית אשר נדרשים בכל מקרה.

בד"כ, ככל שמוצר ה-BIPV יותר מיוחד (יצור בלעדי לפרויקט מסוים, גודל לא סטנדרטי, צורה לא סטנדרטית), מחירו גבוה יותר. למוצרי מדף קיימים עם מידות קבועות בד"כ מחירים נמוכים יותר- פי 1.5-3 פחות ממוצרים מותאמים אישית ללקוח.

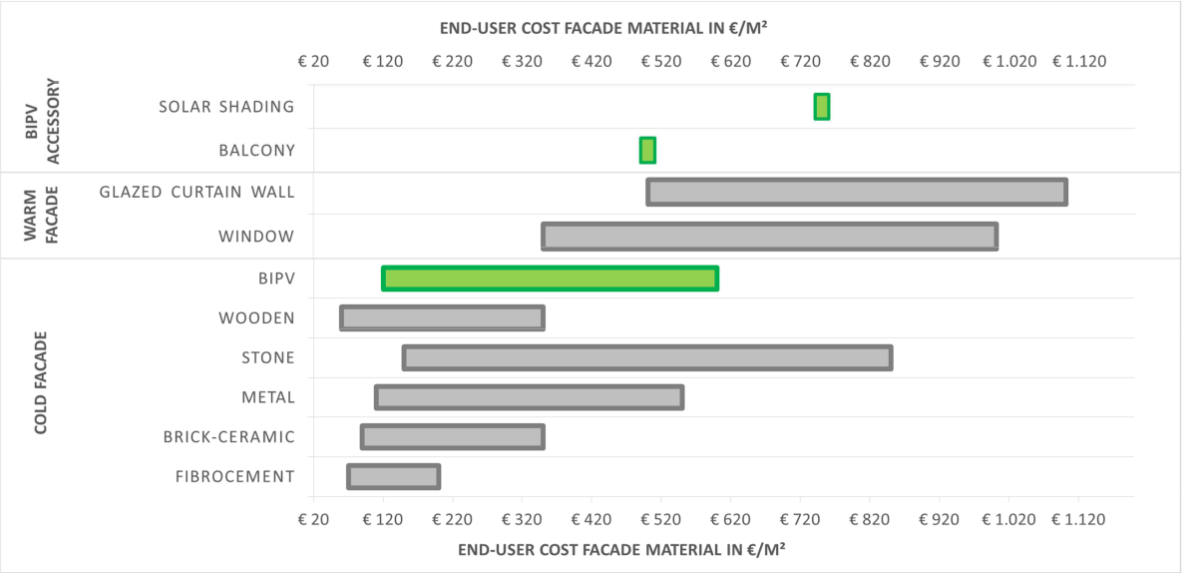
בסקר מחירים אשר נערך באירופה בין ספקים, חושבה עלות סופית לצרכן (חומרים + התקנה) של מוצרי BIPV, BAPV ומוצרי מעטפת קונבנציונאליים, ללא מע"מ [9]. במוצרים **לגגות**, טווח המחירים למוצרי מעטפת קונבנציונאליים נע בין 30-130 אירו למ"ר (ראו תרשים 23). לעומת

זאת, ממוצע המחירים של מוצרי BIPV ו-BAPV לגגות נע בין 250-490 אירו למ"ר. פי 2-16, ובממוצע ב-200 אירו למ"ר יותר יקרים לעומת מוצרי מעטפת מקבילים לגג.



תרשים 23: השוואה עלות סופית לצרכן בין מערכות PV לבין מוצרי מעטפת קונבנציונאליים לגג.
הנתונים מוצגים בעלות של אירו למ"ר (€/m²), וכוללים את עלות החומרים וההתקנה. בפאנל העליון מוצרי BIPV ו-BAPV (תיבות צבעוניות). בפאנל התחתון מוצרי מעטפת קונבנציונאליים לגג (תיבות אפורות). מתוך [9].

כאשר משווים בין מחירי מוצרי BIPV לבין מוצרי מעטפת קונבנציונאליים **לחזיתות**, הפער הכספי מצטמצם ואף נעלם. בקטגוריית חזית מאוררת (המשתמשת בקיר פנימי וחיפוי חיצוני עם רווח אוויר ביניהם), טווח מחירי מוצרי ה-BIPV נמצא בתוך טווח המחירים של מוצרים קונבנציונאליים: 120-620 אירו למ"ר אל מול 70-870 אירו למ"ר בהתאמה (ראו תרשים 24). איך זה יכול להיות? הסיבה לכך היא שיש מוצרי חזית מאוררת קונבנציונאליים יקרים כמו חיפוי אבן ומתכת, בעוד שישנם מוצרי BIPV לחזיתות מאוררות , בהם תאי ה-PV אינם משולבים בחיפוי מתכת או אבן, אלא עשויים חומרים זולים יותר לעומת אבן או מתכת.



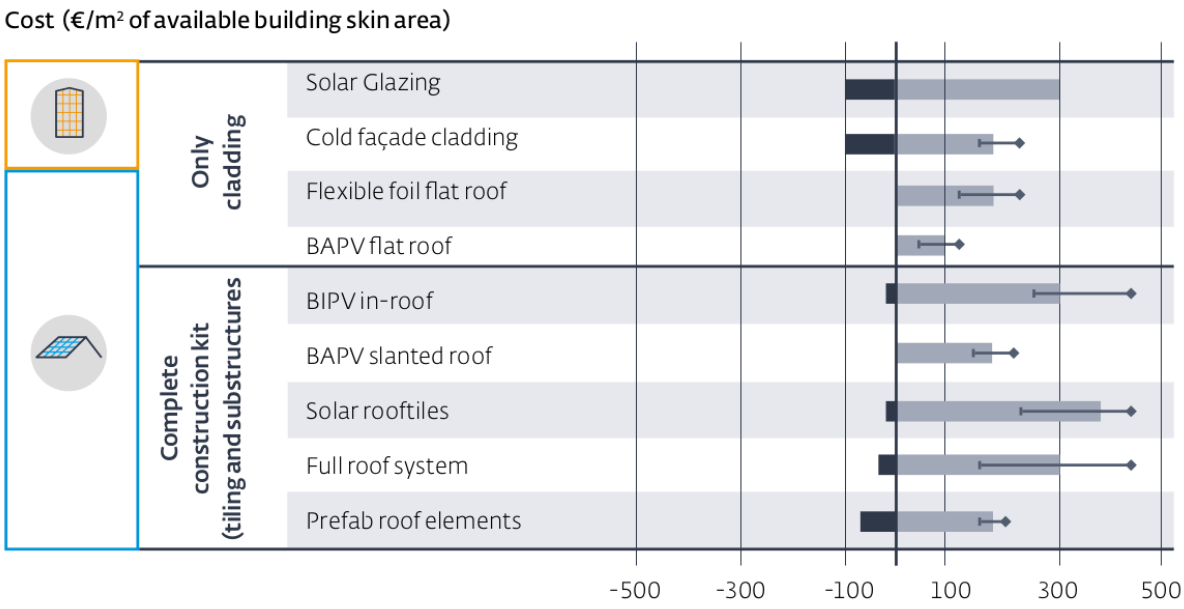
תרשים 24: השוואה עלות סופית לצרכן בין מערכות PV לחזיתות לבין מוצרי מעטפת קונבנציונאליים לחזיתות.

הנתונים מוצגים בעלות של אירו למ"ר ($€/m^2$), וכוללים את עלות החומרים וההתקנה. תיבות ירוקות ממחישות את טווחי המחירים של מוצרי BIPV. תיבות אפורות ממחישות את טווחי המחירים של מוצרי מעטפת רגילים [9].

בסקר אירופי זה לא נסקרו מחירים של מוצרי BIPV לקירות מסך, אך ניתן לראות כי מחירי מוצרי קירות מסך קונבנציונאליים לרוב יקרים יותר מאשר מוצרי חזית קרה עם BIPV. לכן, ניתן לבנות בניין עם מעטפת חזית קרה עם BIPV אשר מייצר חשמל והינו זול יותר מבניין עם מעטפת קירות מסך; קונבנציונאלית ללא BIPV. ל- חזית קרה עם BIPV גם כ-10% יותר יעילות לעומת קירות מסך עם BIPV מכיוון שהאוורור מאחורי תאי ה-PV מאפשר להם לשמור על טמפ' נמוכה יותר לעומת תאי PV ב- קירות מסך עם BIPV [52,53].

בנוסף, ניתן לראות כי מחירי מוצרי BIPV להצללה סולארית ולמרפסות יקרים בד"כ (740 ו-500 אירו למ"ר בהתאמה) מאלו של חזית קרה .

סקר מחירים דומה נוסף בוצע ב-2017 [6]. **בגגות**, מוצרי BIPV יקרים ב-100-380 אירו למ"ר לעומת מוצרים קונבנציונאליים מקבילים (כולל חומרים והתקנה, לא כולל מע"מ, ראו תרשים 25). **בחזיתות**, מוצרי BIPV יקרים ב-200-300 אירו למ"ר לעומת מוצרים קונבנציונאליים מקבילים (כולל חומרים והתקנה, לא כולל מע"מ, ראו תרשים 25). כצפוי, מוצרים מבוססי פילם דק זולים יותר מאלו המבוססים על סיליקון גבישי, אך גם מפיקים פחות חשמל לכל מ"ר מותקן.

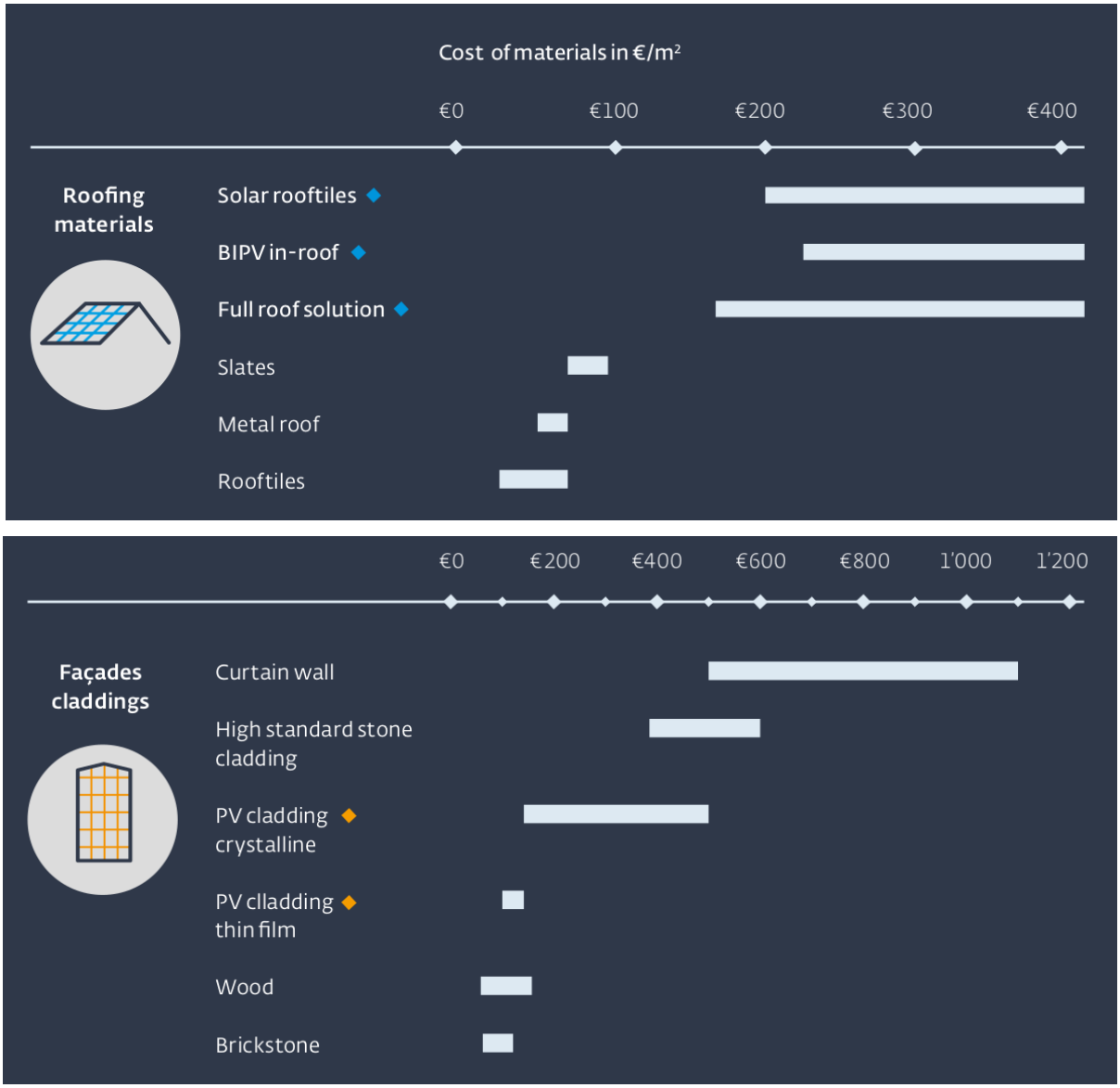


תרשים 25: השוואה עלות סופית לצרכן בין מערכות PV לבין מוצרי מעטפת קונבנציונאליים לחזיתות.
הנתונים מוצגים בעלות של אירו למ"ר (€/m²), וכוללים את עלות החומרים וההתקנה. מוצרי BAPV מסומנים ב-BAPV וכל השאר הם מוצרי BIPV. התיבות (bars) השחורות מציינות את העלויות הממוצעות של החומרים הקונבנציונאליים אשר נחסכו. התיבות האפורות מייצגות את העלויות הממוצעות האמיתיות הנוספות של מוצרי PV לעומת מוצרי מעטפת קונבנציונאליים (ההפרש בין עלויות המוצר הרגיל ומוצר ה-PV). העלות הכוללת של מוצרי מעטפת PV מורכבת מסכום שתי התיבות. קווי השגיאה (error bars) מייצגים את ערכי המינימום והמקסימום של המוצרים שנסקרו. מתוך [6].

בתרשים 26, ניתן להתרשם מההפרשים בין מחירי המוצרים עצמם, **ללא עלויות התקנה**.

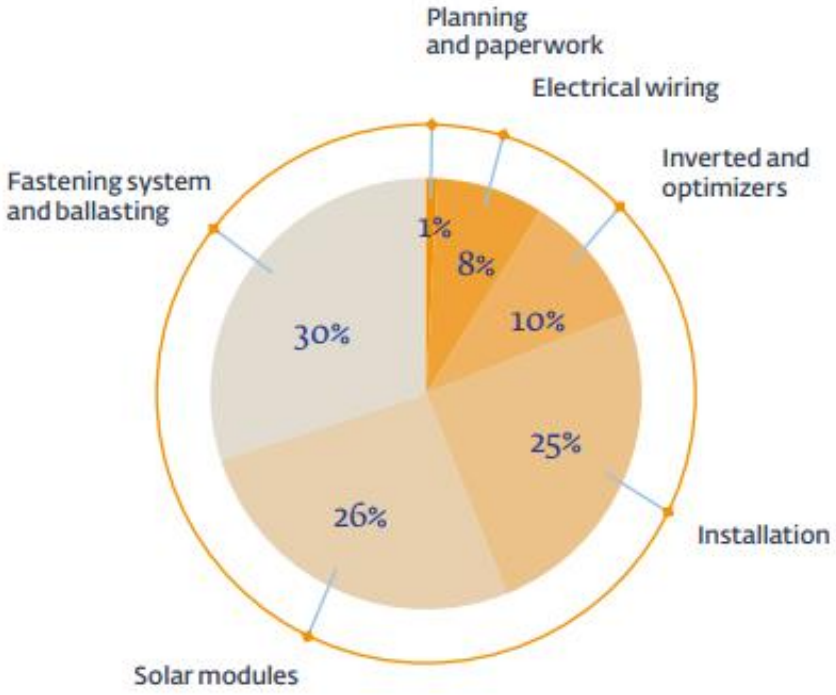
במוצרי חזיתות, יש לשים לב כי המחירים למוצרי חיפוי (cladding), כוללים רק את עלות חומר החיפוי- ללא בידוד, תשתית (substructures) וכו'. לעומת זאת, בקיר מסך (curtain wall), המחיר כולל את כל המרכיבים הפיזיים של המערכת (תשתית, הצללה וכו').

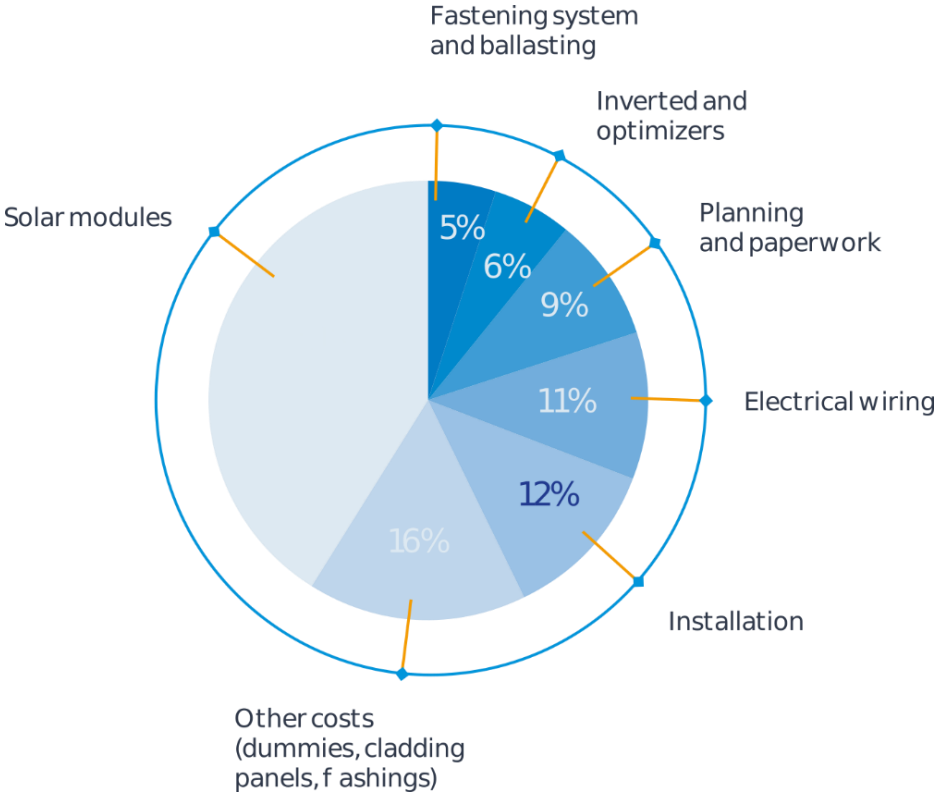
יש לציין כי לסקרים אלו מגבלות. עקב היקף שוק מצומצם בחלק מהקטגוריות (כמו warm facade BIPV למשל) והיענות חלקית של הספקים, לא התקבלו תוצאות לכל הקטגוריות, ובחלק מהקטגוריות התקבלו מעט תוצאות אשר מקשות על קבלת תמונה מלאה. כמו כן, למרות החלוקה לקטגוריות, בתוך חלק מהקטגוריות תתי קטגוריות עם מאפיינים שונים מאוד אשר גורמים לשוני ניכר במחירים.



תרשים 26: השוואה עלות חומרים בין מערכות PV לבין מוצרי מעטפת קונבנציונאליים לחזיתות.
הנתונים מוצגים בעלות של אירו למ"ר (€/m²), וכוללים רק עלות חומרים ללא התקנה. הפאנל העליון הוא מוצרים לגגות. הפאנל התחתון הוא מוצרים לחזיתות. שימו לב שסקאלות המחירים שונות בין שני הפאנלים. מוצרי BIPV מסומנים בצבע (כחול לגג, כתום לחזיתות) וכל השאר הם מוצרים קונבנציונאליים. התיבות מייצגות את טווח המחירים של המוצרים. מתוך [6].

מבחינת התפלגות העלויות השונות המרכיבות את המחיר הסופי של מ"ר BIPV מותקן, מחיר הפאנלים עצמם מהווה 25-40% מהעלות (גבוה יותר בבניין חדש), עלות ציוד נלווה (מחברים, כבלים...) מהווה 35-50% מהמחיר, ומחיר ההתקנה מהווה 12-25% (גבוה יותר בהתקנה על מבנה קיים) (ראו תרשים 27).





תרשים 27: התפלגות עלויות הרכיבים של BIPV על גבי חזית משופצת של בניין מגורים.
בפאנל העליון מידע על BIPV בחזית בבניין דירות למגורים. בפאנל התחתון מידע על גג בבית משפחתי [6].

2.3 BIPV בעולם

מכיוון שכמו טכנולוגיות חדשות רבות, יישום BIPV יקר יותר מיישום מעטפות רגילות לבניינים או מהתקנת מערכות סולאריות רגילות, עולה השאלה מהו הערך הנוסף ליישום BIPV. בשנים האחרונות, ערך נוסף זה היה **תדמית**. בניין עם BIPV תיקשר קיימות, אחריות, חדשנות ואידיאליזם. החזר השקעה לא היווה פקטור חשוב. לראיה, ידוע על פרויקטים עם BIPV בהם מערכת ייצור החשמל אפילו לא חוברה לאחר התקנתה...

כיום, מציאות זו משתנה. לפחות באירופה. רגולציות בנושא ביצועים אנרגטיים של בניינים נכנסות לתוקף, ומחייבות יישום נרחב יותר של BIPV ביותר ויותר מבנים. המאמצים העיקריים בפיתוח מוצרי BIPV כיום מונעים מהרצון שהם יהיו בלתי-נראים- לא רוצים לראות הבדלים בין מעטפת רגילה למעטפת BIPV. זאת, ע"מ להתגבר על אחד החסמים העיקריים ביישום BIPV שהוא חוסר הגמישות העיצובית במוצרי BIPV הראשונים. כמו כן, אין בגגות מספיק מקום לשם ייצור חשמל מספק באמצעות BAPV, והדבר נכון במיוחד לבניה לגובה במגדלים. מציאות זו דוחפת למו"פ בתחום, אשר שואף לפתח מוצרי BIPV בצבעים, גדלים וצורות שונים. ראיה לכך, היא כניסתה המתוקשרת של חברת טסלה לתחום ייצור גגות סולאריים [6].

2.3.1 פרויקטים בעולם

להלן דוגמאות למס' פרויקטי BIPV בעולם. הבניינים מוצגים לפי סדר כרונולוגי של הקמתם.

2.3.1.1 בניין ENERGYbase, וינה, אוסטריה

בניין ENERGYbase פותח כפרויקט מודל לבניין בר-קיימא ויעילות אנרגטית והושלם בשנת 2008. הוא היה הבניין העסקי הראשון באוסטריה שנבנה בסטנדרטים של בית פאסיבי וקיבל הכרה כ"בניין ירוק" (Quality-tested Passive house Certificate, Austrian Green Building Award) [54–56]. על מנת למקסם את הפקת האנרגיה הסולארית, מוצרי ה-BIPV (c-Si) הותקנו בחזית הדרומית בזווית אופטימלית לניצול שמש קיצית (31.5^{o} מעלות). סה"כ היקף התקנת ה-BIPV הוא 48.2 kWp (ראו תרשים 28).

תרשים 28: בניין ENERGYbas בווינה, אוסטריה
בחזית הדרומית הותקנה מעטפת BIPV בצורת זיגזג, עם שיפועים אופטימליים לניצול אנרגיית השמש [54].

2.3.1.2 בניין Enzian, Bolazno, איטליה

בניין Enzian הינו בניין משרדים בן 10 קומות, בעיר Bolzano שבאיטליה. זוהי דוגמא להתקנה כקיר מסך מבודד אך לא מאורר בחזיתות מזרח, דרום ומערב. היישום נרחב וכולל את מעטפת הקירות, החלונות ומעקות המרפסות בשטח של 2340 מ"ר. הטכנולוגיה הסולארית של ה Thin Film A-Si BIPV (סיליקון אמורפי) . על גג הבניין מוצבים תאי PV נוספים. לבניין הספק ייצור של 100 kWp, והוא מייצר חשמל בהיקף שנתי של כ- 113 MWh/year. האדריכלים בחרו ב- A-Si BIPV מכיוון שיוצר מראה אחיד לחלקים השקופים למחצה ולחלקים האטומים של החזיתות, וכן כי יוצר אפקט הצללה אחיד מהחלונות לתוך הבניין (ראו תרשים 29). זאת, בניגוד ל-c-Si המשולב בזכוכית סולארית, שבאותה תקופה (הבניין הושלם ב-2011) היה בעל חזות פחות אסטטית. אפקט ההצללה האחיד מנע את הצורך בשימוש בהצללה קונבנציונאלית וחסך את עלויות התקנתה. כל זאת, תוך יצירת חזות של עיצוב בר-קיימא. הבניין קיבל תקן CasaClima Gold [57].

תרשים 29: BIPV עם סיליקון אמורפי (A-Si) בבניין Enzian.
מימין ניתן לראות חיפוי BIPV אטום על החזית, וחיפוי שקוף על החלונות. משמאל ניתן לראות מעקות מרפסות עם BIPV שקוף. צילום: גלית שיף.

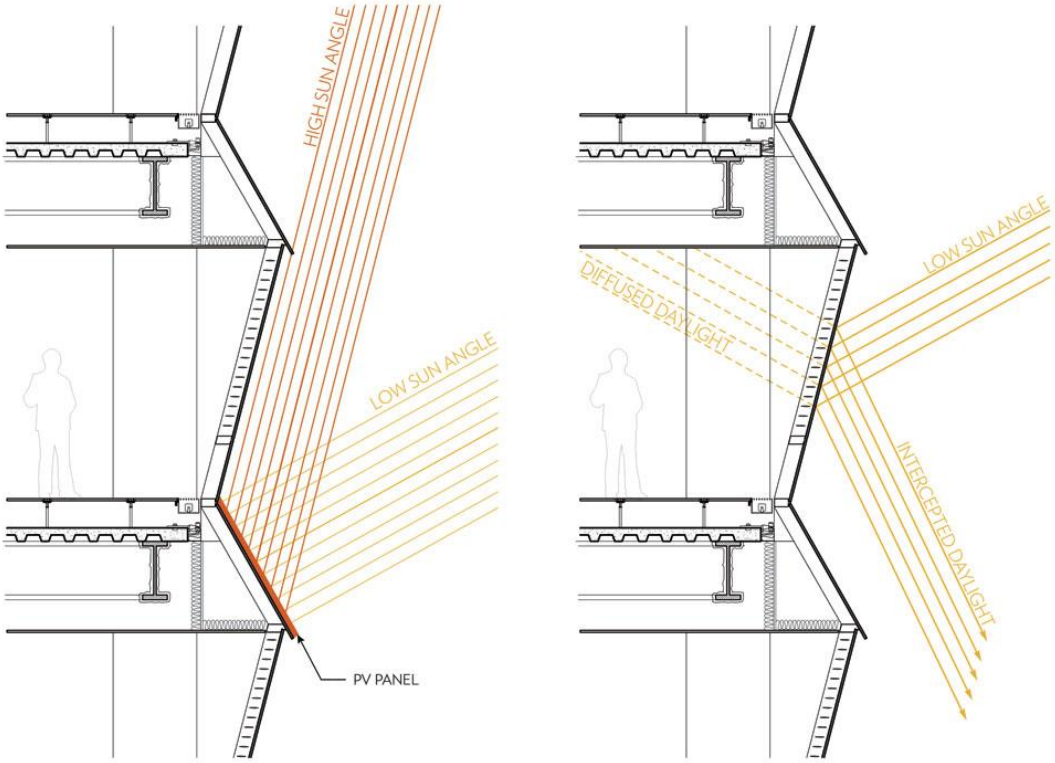
2.3.1.3 בניין FKI, סיאול, דרום קוריאה

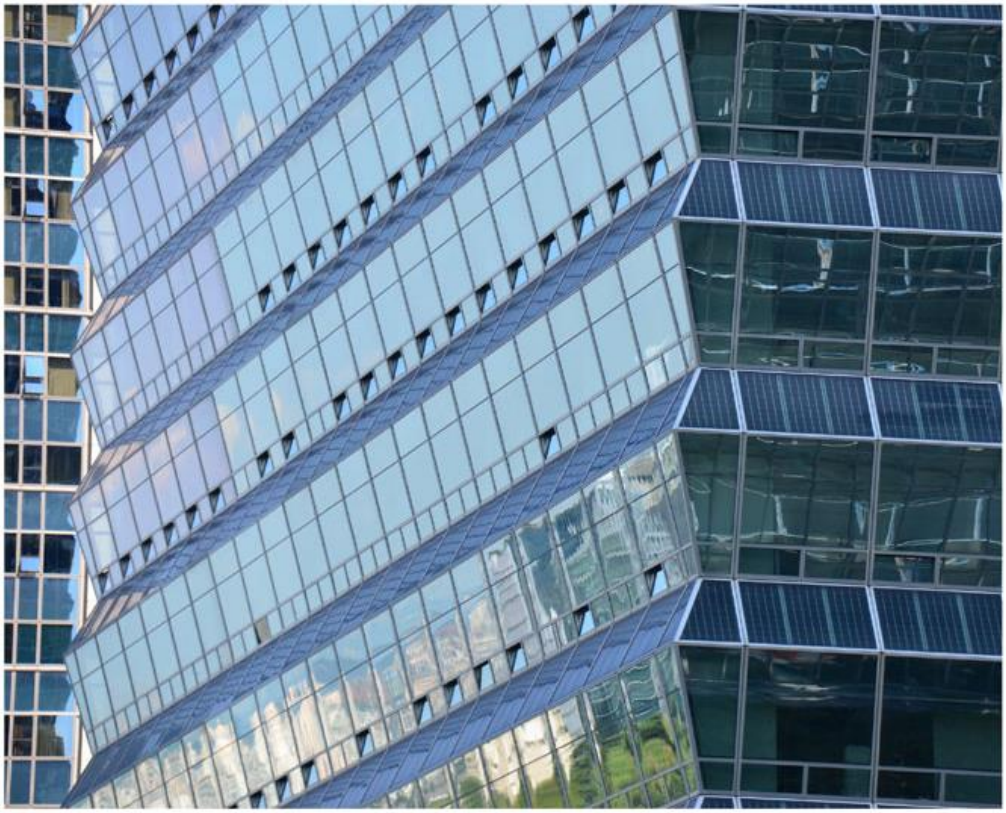
מגדל Federation of Korean Industries- FKI בסיאול שבדרום קוריאה, הינו בניין משרדים בן 50 קומות אשר הושלם ב-2013. הבניין זכה בעשרות פרסים ברחבי העולם, וקיבל דירוג Superior Grade אשר שווה ערך ל- LEED-Gold [58]. חזיתות הבניין בנויות כקיר מסך בדפוס

זיגזג אשר מצמצם חדירת שמש חזקה וישירה אל תוך הבניין (חסכון באנרגיית קירור ומניעת סנוור). זאת, תוך שהן מאפשרות חדירת שמש לא ישירה ונעימה יותר (חסכון באנרגיית תאורה, מאפשרת מבט חופשי לנוף). בחזיתות דרום-מערב ודרום-מזרח, על חלקי דפוס הזיגזג הפונים בזווית 60° מהקרקע לשמיים, מותקן BIPV. זווית זו מאפשרת ניצול טוב יותר של קרינת השמש לעומת חזית שטוחה הניצבת לקרקע (ראו תרשים 30). זווית זו היא בין חזית שטוחה לבין הזוויות האופטימליות המוצגות בפרק 3.2.1.2. בשל הצללות מבניינים שכנים, BIPV יושם רק החל מקומה 14 ומעלה. כל המעטפת נבנתה בצורה מודולארית, אשר תוכל לאפשר בעתיד החלפת פאנלי BIPV קיימים ב-BIPV מתקדם יותר, או אפילו להחליף חלקי מעטפת שאינם BIPV היום מכיוון שאינם חשופים לאור ישיר, בפאנלי BIPV עתידיים שיוכלו לנצל ביעילות שמש לא ישירה [59].

גג הבניין כולו גם נעטף ב-BIPV. הפאנלים בו הוצבו בצפיפות בזווית של 10° מעלות, שמאפשרת ניצול יותר קרינה מאשר פאנלים שטוחים על גג, אך תוך הצללה מינימלית על פאנלים שכנים (ראו תרשים 31). זאת, בניגוד לפאנלים שמוצבים על גגות בזווית אופטימלית של $30\text{-}40^{o}$, אך העלולים להצל אחד על השני, ולכן מוצבים במרווחים גדולים יותר. לפי ניתוח אנרגטי, סידור זה נותן את התפוקה האנרגטית הגבוהה ביותר בקו רוחב זה, אך לאו דווקא את החזר ההשקעה הכי מהיר (ראו תרשים 32). סה"כ, הבניין מייצר כיום כ-725,100 קוט"ש בשנה, שהם כ-7.2% מהאנרגיה שהוא צורך [58,60].

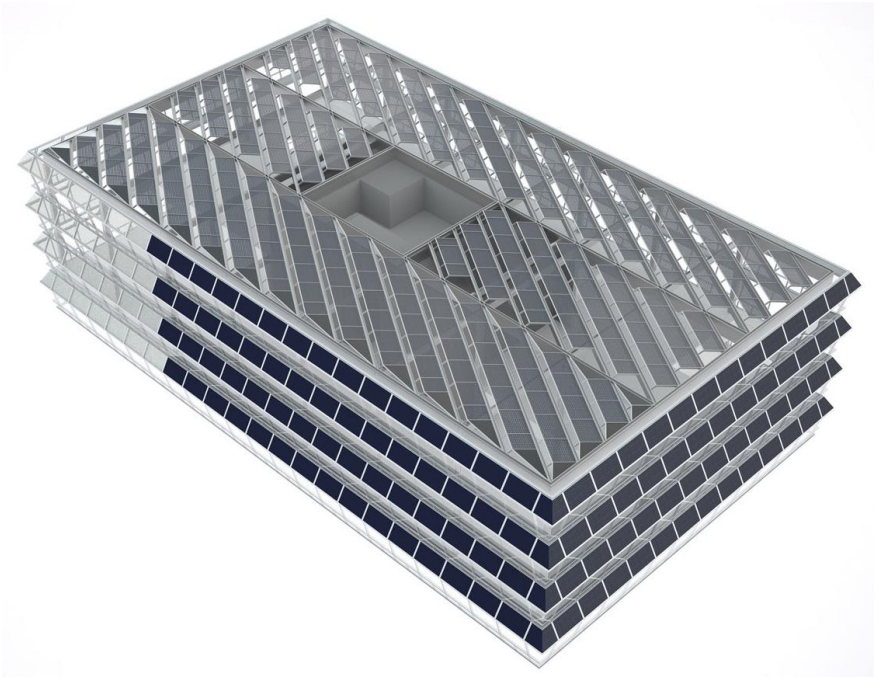
העיר סיאול מסבסדת ייצור אנרגיה בבניינים באמצעות מתן תעריף מועדף. תוכנית סבסוד זו, אפשרה לבניין FKI להחזיר את ההשקעה מהקמת מערכת ה-BIPV שלו תוך 7 שנים, במקום תוך 30-35 שנים ללא סבסוד. באזור בו נבנה הבניין בסיאול, כל בניין חדש חייב לייצר לפחות 5% מצריכת האנרגיה שלו. חברת החשמל המקומית (KEPCO) רוכשת את החשמל המיוצר בבניין בתעריף גבוה פי 5 מתעריף החשמל הרגיל [59–61].



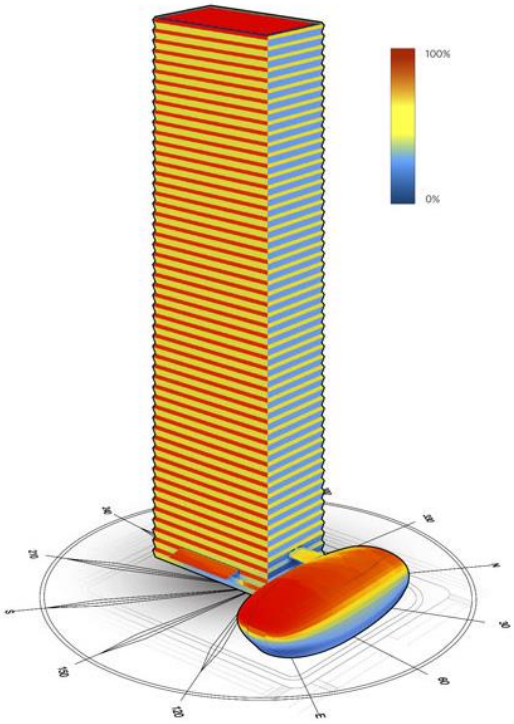


תרשים 30: התאמת חזית הזיגזג של בניין FKI לזוויות שמש שונות.

למעלה משמאל- *בזווית שמש גבוהה (קווים כתומים) ונמוכה (קווים צהובים), קרינת השמש פוגעת עם זווית פגיעה שקרובה יותר לזווית פגיעה ישרה בפאנלים הסולאריים המופנים בזווית מעלה (לעומת פגיעתה בפאנלים מאונכים לקרקע). שמש בזווית גבוהה לא חודרת לחלונות כלל.* ***למעלה מימין-*** *שמש בזווית נמוכה לא חודרת באופן ישיר לבניין אלא נשברת בחלון וחודרת אל הבניין כאור מוחזר לא ישיר. אור לא ישיר נכנס ללא בעיה אל הבניין.* ***למטה:*** *תקריב על חזית קיר המסך של הבניין. ניתן לראות את הפאנלים הסולאריים הפונים מעלה ואת החלונות פונים מטה. Design Architects: Adrian Smith and Gordon Gill, Design Firm: Adrian Smith + Gordon Gill Architecture; © Adrian Smith + Gordon Gill Architecture/photographs by Namgoong Sun.*



תרשים 31: BIPV על גג בניין FKI.
מבט מכיוון מערב. הפאנלים על הגג פונים בזווית 10° מעלות כלפי השמים, במפנה דרומי, להצללה הדדית מינימלית ושיפור זווית הפגיעה של השמש. מתחת לגג ניתן לראות את עיצוב החזיתות שבצורת זיגזג. Design Architects: Adrian Smith and Gordon Gill, Design Firm: Adrian Smith + Gordon Gill Architecture; © Adrian Smith + Gordon Gill Architecture/ photographs by Namgoong Sun.



תרשים 32: בניין FKI בסיאול, דרום קוריאה.
מימין- *תמונה כללית של הבניין מכיוון צפון-מזרח;* ***משמאל-*** *סימולציה להיקף קרינה יחסי (בין 0-100%) במעטפת הבניין. מבט מכיוון מזרח הגג וחלקי החזית אשר פונים מעלה זוכים ליחס קרינה גבוה. Design Architects: Adrian Smith and Gordon Gill, Design Firm: Adrian Smith + Gordon Gill Architecture; © Adrian Smith + Gordon Gill Architecture/photographs by Namgoong Sun.*

2.3.1.4 בניין The Edge, אמסטרדם, הולנד

תוכנן ונבנה בין 2010-2014. זהו בניין המשרדים הכי בר קיימא בעולם (תקן BREEAM). החזית הדרומית והגג כוסו במעטפת BIPV. בבניין 720 מ"ר BIPV בחזית דרומית (100 kWp מותקן) ו-1200 מ"ר BIPV בגג (190 kWp מותקן) בטכנולוגיית c-Si. ע"מ להגיע למעמד של Zero-energy Building (ZEB), כוסו גם גגות של שני בניינים שכנים ב-4100 מ"ר של PV (640 kWp מותקן). ז"א, ה-BIPV על הבניין עצמו מספק כ-30% מהאנרגיה הנצרכת בבניין. החזית הדרומית משלבת בין חלונות לבין קירות בטון בציפוי פאנלים סולריים מורחקים מהקיר לצורכי אוורור. לשם אופטימיזציה אדריכלית-אסתטית, נעשה בבניין שימוש ב-450 פאנלים של BIPV מותאמים במיוחד, ב-62 גדלים שונים. פתרון זה כמובן יקר יותר מאשר פאנלים סטנדרטיים של BIPV. הבניין גם מבצע אגירה של חום ושל קור, ועושה שימוש מושכל באור טבעי לתאורה ולחימום (ראו תרשים 33 ותרשים 34). בנקים מוכנים לממן פרויקטים ברי קיימא, והתדמית של חברות אשר פועלות מתוך הבניין הכי בר-קיימא בעולם-עולה [6,62,63].

תרשים 33: חזית BIPV דרומית של בניין The Edge באמסטרדם, הולנד.
"בניין המשרדים הכי בר-קיימא בעולם". תוכנן מראש עם מעטפת BIPV. בפרויקט הושם דגש על האסתטיקה של הבניין. לבניין מעטפת BIPV בחזית הדרומית ועל הגג. בשילוב עם הצבת PV על גגות סמוכים, הוא מסוגל לייצר את כל האנרגיה שצורך [6]. תמונה: Nena Rood (OVG real estate).

תרשים 34: חזית צפונית של בניין The Edge באמסטרדם, הולנד.
תמונות: Nena Rood (OVG real estate).

2.3.1.5 בנייני Willem de Zwijger, Best, הולנד

ב-Best אשר בהולנד, הושלמו ב-2017 צמד בניינים של דיור ציבורי בעלי חזיתות BIPV. הבניינים, בהם 48 דירות, מייצרים את כל האנרגיה הדרושה להם בעזרת חיפוי פאנלים של פילם-דק בשטח משולב של 2500 מ"ר, עם 250 kWp (ראו תרשים 35). המודל הכלכלי של הבניינים מורכב, נשען על סובסידות, תמריצים ותשתית חקיקתית. חלק מההשקעה כנראה לא תוחזר באופן ישיר. פרויקט זה נתפס כהשקעה לעתיד, כלמידה של דרכים לבניית בניינים מאופסי אנרגיה ZEB, כהשקעה בפרסום תדמיתי וכהשקעה בחברה ההולנדית.

תרשים 35: בנייני Willem de Zwijger ב-Best, הולנד.
אלו שני בנייני מגורים ניטרליים מבחינת צריכת אנרגיה (ZEB), אשר משמשים לדיור ציבורי. 2500 מ"ר BIPV מותקנים על כל החזיתות.[6] תמונה: Harold van der Ven (NBArchitecten) and Henrico van den Boomen (EigenEnergie.net).

2.3.2 מדיניות בעולם

ניתוח שוק מצא כי העלאת מודעות ליתרונות יצור חשמל בבניין ע"י BIPV, קידום חקיקה ורגולציה אשר מתעדפות יצור חשמל סולארי ותקנות בניה, מחקר ופיתוח בתחום, דגש על פיתוח מוצרי BIPV אסתטיים, קידום ערכים של התנהגות סביבתית אחראית - מעודדים את צמיחת השוק ואת התקנות מערכות BIPV [64].

מדינות שונות הנהיגו תעריפים וסבסוד לשם האצת התקנות BIPV בבניינים [65,66]:

- **אוסטריה**: ניתן תמריץ בגובה €0.115/kWh לחשמל המיוצר מ-PV בבניינים למשך 13 שנים. כמו כן, ניתן סבסוד בגובה 30% (עד €200/kW) להתקנת מערכות BI(PV).
- **צרפת**: ניתן תמריץ בגובה €0.2539/kWh לחשמל המיוצר ממתקני BIPV בהיקף של עד 9 kW למשך 20 שנים. תמריץ זה גבוה ב-76% וב-415% מהתמריצים הניתנים למערכות BAPV על גגות ולמערכות PV קרקעי בהתאמה. למערכות BIPV גדולות יותר ניתן תמריץ דומה לזה של מערכות BAPV גדולות על גגות ולמערכות PV קרקעי (€0.0612/kWh).
- **גרמניה**: ניתן תמריץ בגובה €0.0891/kWh-€0.127/kWh (כתלות בגודל המתקן) לחשמל המיוצר ממתקני BIPV ו-BAPV למשך 20 שנים. תמריץ זה גבוה בעד 42% לעומת מערכות PV קרקעי. ניתנו הלוואות מסובסדות ע"י המדינה עם ריבית של 1.3% להקמת מתקני BI(PV) [67].

- **ליטא**: ניתן תמריץ בגובה LTL0.69/kWh-LTL0.0.58/kWh (כתלות בגודל המתקן) לחשמל המיוצר ממתקני BIPV למשך 12 שנים. תמריץ זה גבוה ב-26-28% לעומת מערכות BAPV ו-PV קרקעי.
- **שוויץ**: ניתן תמריץ בגובה CHF0.240/kWh-CHF0.201/kWh (כתלות בגודל המתקן) לחשמל המיוצר ממתקני BIPV למשך 25 שנים. תמריץ זה גבוה ב-14-18% לעומת מערכות BAPV ו-PV קרקעי.
- **דרום קוריאה**: העיר סיאול קבעה תוכנית תמריצים **לייצור אנרגיה בבניינים**. חברת החשמל המקומית מתגמלת יצור חשמל בבניינים בפי 5 (~1.74 ₪\קוט"ש, 536 KRW/kWh) מאשר היא מוכרת חשמל רגיל (~0.35 ₪\קוט"ש). כל הבניינים המסחריים הגדולים החדשים בעיר מחויבים לייצר לפחות 5% מהאנרגיה שהם צורכים [59–61].

כמו גרמניה, מדינות רבות לא מבצעות אבחנה בין BIPV ו-BAPV, ונותנות לשתי הטכנולוגיות תמריץ גבוה יותר לעומת PV קרקעי. בחלק מהמדינות, התמריצים בעבר היו גבוהים יותר, כאשר טכנולוגיות ה-BI(PV) היו עדיין בחיתוליהן.

2.3.2.1 האיחוד האירופי

באיחוד האירופי [48], הכירו בנקודת המוצא כי מבנים צורכים 40% מהאנרגיה, אחראיים ל-36% מפליטות הפחמן הדו-חמצני באיחוד, 35% מהם בני למעלה מ-50 שנה, כ-75% מהם לא יעילים אנרגטית, ורק 0.4-1.2% מהם משופצים בכל שנה. לכן, שיפוץ אחוז גבוה יותר של מבנים בכל שנה בסטנדרטים של התייעלות אנרגטית מודרנית, יביא לצמצום צריכת האנרגיה באיחוד ב-5% ובאחוזים דומים לפליטות הפחמן הדו-חמצני.

שיפור היעילות האנרגטית עשוי גם לתרום לכלכלה, לחברה ולסביבה. בניינים יעילים אנרגטית יוצרים אקלים פנימי נוח יותר, אשר תורם לרווחת ולבריאות הדיירים. כמו כן, הוא גם יעזור לאנשים רבים לחמוק **מעוני אנרגטי-** מצב בו אנשים מעדיפים שלא להשתמש באנרגיה לחימום או לקירור הבית ע"מ לחסוך כסף. כתוצאה מכך, נגרמות להם עקות פסיכולוגיות ובריאותיות אשר מדרדרות את חייהם עוד יותר.

בתחום BIPV, באיחוד האירופי דירקטיבות רלוונטיות לביצועים אנרגטיים של בניינים, וליעילות אנרגטית. הדירקטיבות מאפשרות לצרכנים לבצע בחירות מודעות לשם חסכון באנרגיה ובכסף. כיום, בניינים חדשים צורכים חצי מכמות האנרגיה שצרכו בניינים טיפוסיים בשנות השמונים של המאה ה-20.

בשנתיים האחרונות נעשו מהלכים לעדכון הדירקטיבה לביצועים אנרגטיים של בניינים, ע"י קידום של טכנולוגיות חכמות בבניינים, שיפוץ חוקים קיימים והאצת שיפוץ מבנים. התוכנית מקדמת בניית תשתיות טעינת חשמל לרכבים בבניינים ואוטומציה. הועלה לרשת האינטרנט מאגר נתונים על ביצועים אנרגטיים של בניינים באירופה, והושקה תוכנית למימון בנייה ושיפוץ של מבנים יעילים אנרגטית. לתוכנית זו פוטנציאל לאפשר מימון בהיקף של €10 מיליארד יורו.

הנוסח המעודכן נכנס לתוקף ביולי 2018. עיקרי התוכנית:

- מדינות האיחוד חייבות לגבש אסטרטגיות שיפוץ בניינים משמעותיות לטווח ארוך לקראת הפיכת כל הבניינים לניטרליים מבחינת פליטות פחמן עד 2050, בצירוף תוכנית מימון אפקטיבית.
- תוצג תוכנית אירופית לדירוג מוכנות הבניינים להפוך לחכמים.
- יקודמו טכנולוגיות חכמות לבניינים- אוטומציה, בקרה על אקלים וכדומה.
- תחבורה חשמלית תקודם ע"י קביעת תנאי סף לאספקת עמדות טעינה לרכבים חשמליים בחניונים.
- המדינות יחויבו לבטא את הדרישות האנרגטיות באופן שיאפשר השוואה בין המדינות.
- יקודמו בריאות ורווחת המשתמשים בבניינים, למשל דרך שיפור איכות אוויר ואוורור.
- כל הבניינים הציבוריים החדשים שנבנים החל מתחילת 2019, חייבים להיות בניינים "כמעט מאופסי אנרגיה" (Near Zero Energy Buildings- NZEB). כל הבניינים החדשים שנבנים (כולל פרטיים) החל מ-2021, חייבים להיות NZEB. ז"א, לצמצם את צריכת האנרגיה שלהם בכ-80% לעומת בניינים דומים לא יעילים אנרגטית [68].
- חובה לספק ביצועים אנרגטיים של בניין בעת מכירת או השכרת דירה/ בית/ בניין.
- הקמת תוכניות לבדיקת יעילות מערכות מיזוג וחימום.
- חובה לקבוע דרישות מינימום אנרגטיות עם עלות-תועלת אופטימלית לבניינים חדשים, שיפוץ בניינים, והחלפת/שיפוץ מערכות בניין (גגות, מיזוג, קירות וכו'). כל 5 שנים יש לעדכן את דרישות המינימום בהתאם להתקדמות טכנולוגית.
- גיבוש ופרסום רשימות לאומיות למימון התייעלות אנרגטית בבניינים.
- המדינות חייבות לשפץ 3% בשנה משטח הרצפה (floor area, שטח מגורים/ משרדים/ מסחר...) הכולל בבניינים בבעלות ואשר מאוכלסים ע"י גורמי ממשל.
- הממשלות חייבות לרכוש רק בניינים יעילים אנרגטית במיוחד.
- האיחוד יצר סטנדרטים אחידים להערכת ביצועים אנרגטיים של בניינים (The Energy Performance of Buildings standards- EPB standards) לשם יישום יעיל של הדירקטיבות.

כל הבניינים המודרניים צורכים אנרגיה, גם אלו הכי יעילים אנרגטית. לכן, המשמעות של הדירקטיבות הללו היא שכל בניין חדש שנבנה מחויב לדאוג לעצמו לאספקת אנרגיה מתחדשת משמעותית. הדרך הכי ישימה כיום לבצע זאת בבניין עצמו היא באמצעות BIPV. בניינים חדשים יכולים גם להקים מתקני אנרגיה מתחדשות שלא בבניין עצמו, כמו הקמת PV על גגות בניינים אחרים, או הקמת PV, טורבינות רוח וכו' בשטחים אחרים.

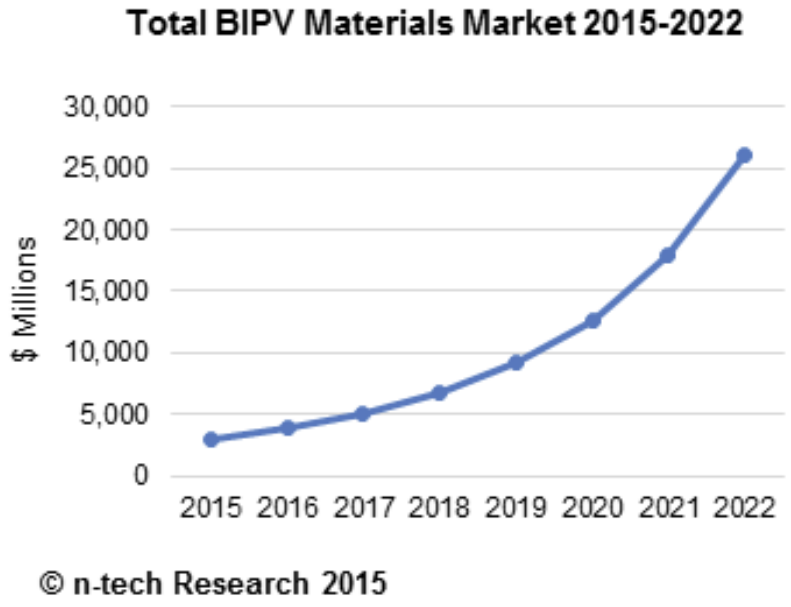
2.3.3 היקף שוק עולמי

טכנולוגיית ה-BIPV הינה טכנולוגיה חדשה ומסובכת ליישום, לכן צפוי כי היקף השוק שלה עדיין לא גדול. מוערך כי כלל התקנות ה-BIPV בעולם בשנת 2014 היה בהיקף של כ- 1-1.5 GW [39,65]. זהו עדיין חלקיק האחוז מכלל התקנות האנרגיות המתחדשות (1712 GW), ועוד פחות מזה מכלל מתקני הפקת החשמל בעולם (6180 GW) [69]. היקף שוק **מוצרי ה-BIPV** (לא כולל עלויות נלוות, כמו התקנה וכו') בשנת 2015 היה 3$ מיליארד USD [70].

יחד עם זאת, ב-2015 כלל ההתקנות בעולם עמדו כבר על 2.3 GW [65,71]- היקף אשר משקף צמיחה של לפחות 50% בשנה. אירופה שולטת בשוק, עם 41% ממנו ב-2015. זאת הודות למדיניות מחייבת ארוכת טווח (ראו פרק 2.3.2).

דוחות שבדקו את שוק ה-BIPV צופים כי עד סוף שנת 2019, ההיקף השנתי של התקנות ה-BIPV יגיע ל-2 GW~ [64,72], ב-2020 היקף ההתקנות המצטבר יגיע ל-11 GW [71], וכי עד 2024 היקף זה עשוי להגיע ל-32 GW [64].

היקף שוק **מוצרי BIPV** צפוי לעלות ל-9$ מיליארד USD בשנת 2019 ול-26$ מיליארד USD בשנת 2022 [70,71] (ראו תרשים 36). נתונים אלו משקפים צמיחה מצטברת של 300% ו-870% בהתאמה, וצמיחה שנתית ממוצעת של מעל 33%. השוק האירופי הוא בעל נתח השוק הגדול ביותר, כאשר השוק שצומח הכי מהר הוא אסיה-פסיפיק [64]. נתונים דומים עד 2020, מופיעים גם בניתוח הזה [73]. דוח אחר, מציג נתונים צנועים הרבה יותר, עם שוק בגודל 2.4$- מיליארד USD בלבד ב-2016, ועם צמיחה שנתית ממוצעת של 12% לשוק בגודל 4.3$- מיליארד USD ב-2021 [74].



תרשים 36: תחזית להיקף שוק מוצרי ה-BIPV העולמי עבור 2015-2022 [70].
הנתונים הם במיליוני USD.

מכיוון שהעלות הסופית של התקנת BIPV היא פי 2-4 מעלות מוצרי ה-BIPV [6], הרי **ששוק ה-BIPV כולו** בפועל גדול יותר. ואכן, דוח נוסף מדווח כי **שוק ה-BIPV כולו** היה שווה $7 מיליארד USD בשנת 2015 [75]. לפי הנתונים הללו, ניתן להעריך כי **שוק ה-BIPV כולו** יהיה שווה $21 מיליארד USD בשנת 2019, ו- $61 מיליארד USD בשנת 2022.

תעשיית ה-PV הצליחה להתייעל בתהליכי היצור, השיווק וההתקנה בארבעים השנה האחרונות. הדבר מביא לירידה מתמדת במחירים, אשר ירדו פי מאה בין השנים 1976-2013 [76]. ירידה זו במחירי מערכות PV רגילות בעשור האחרון דווקא פוגעת באופן מסוים בצמיחה של שוק ה-BIPV. זאת מכיוון שעלויות מוצרי ה-BIPV לרוב עדיין גבוהות, וזול הרבה יותר להקים מערכות PV רגילות. כמו כן, הקמה של מערכות BIPV יותר מסובכת מהקמת מערכות PV: יש צורך בחברה מומחית לייצור ולהתקנה של BIPV, צריך להקים אותן על בניין, קיים או חדש, לשלב אותן מראש בתהליכי התכנון ובמערכת החשמל של הבניין. פשוט וזול הרבה יותר להציב PV על גגות בניינים קיימים מאשר להחליף מעטפת קיימת ב-BIPV.
למרות היתרון הברור ליישום BIPV בבניה חדשה, כשליש מכלל השוק נכון ל-2015 מוקדש לשדרוג של בניינים קיימים [77]. במידה רבה, זאת הודות למדיניות האירופית אשר מקדמת שדרוג בניינים קיימים אל עבר NZEB, והפיכת כל הבניינים ל-ZEB עד 2050 (ראו פרק 2.3.2).

2.4 הקשר הישראלי

כיום, רק כ-3% מתמהיל החשמל המשקי מקורו באנרגיות מתחדשות, היקף זה אמור לגדול ל-10% ב-2020, ול-17% ב-2030. ~95% מחשמל זה כיום מגיע ממתקני PV (~1000 MW מותקן, הפקת 1.6 TWh חשמל בשנה). בזכות השמש הישראלית, בשעות הצהרים בקיץ, היקף הייצור של ה-PV בארץ מטפס עד ל-6% מכלל הייצור. אולם, בשעות אחרות ובחורף הנתונים כמובן נמוכים יותר. עפ"י רשות החשמל, מכסות בגובה 1600 MW לייצור חשמל מ-PV אשר אושרו בשנה האחרונה צפויות לקדם את היעד של 10% חשמל ממקורות מתחדשים בשנת 2020 [1].
כמו כל תחום הנדסי חדש, הפרויקטים בשנים הראשונות יבוצעו בעיקר ע"י אנשי מקצוע מחו"ל. רק מאוחר יותר, כאשר אנשי מקצוע מקומיים יעברו השתלמויות בתחום, יהיה ניתן להסתמך על כ"א מקומי. בתת-פרק זה נסקור את תחום ה-BIPV מהזווית הישראלית.

2.4.1 בניין מת"ף, ראשל"צ

בישראל, כיום, תחום ה-BIPV נמצא בחיתוליו. ידוע לנו כיום על בניין אחד עם חזית PV במדינה. מדובר **בבניין ה-Data Center החדש של מת"ף, חברת המחשוב של הבנק הבינלאומי** שהוקם במתחם העסקים מעוין שורק שליד ראשל"צ (2015). הבניין בן 8 קומות.

על החזית הדרומית הותקנו 1320 מודולים p-Si בגודל 100X160 ס"מ (ראו תרשים 37), מסוג 250P של חברת Conergy הגרמנית. יעילות ההמרה של קרינת השמש לחשמל של המודולים היא 15.36%, והם מכסים כ-2112 מ"ר. הספק המערכת בחזית הוא 330 kWp. המודולים הותקנו כחזית מאווררת, אולם הם אינם מהווים חלק מבני במעטפת הבניין, ואינם מגינים על הבניין מפגעי הסביבה. לכן הם יותר BAPV מאשר BIPV. בנוסף, הותקנו 136 מודולים זהים, בשטח 210 מ"ר על הגג בזווית ~30° מעלות, בהספק כולל של 34 kWp. בכל הבניין, סה"כ שטח PV של 2322 מ"ר, עם הספק של 364 kWp. המערכת הותקנה ע"י יונירום אלקטרוניקס בע"מ [78]. הבניין קיבל ציון 65.86, שני כוכבים עפ"י תקן בניה ירוקה ת"י 5281, גרסת 2014.

התקנת המערכת עלתה 4.693 מיליון ₪+מע"מ (5.058 מיליון ₪ כולל מע"מ), כאשר התקנת קונסטרוקציה למערכת על הקיר עלתה 2.55 מיליון ₪+מע"מ, וההתקנה עצמה עלתה 2.143 מיליון ₪+מע"מ.

עפ"י נתוני הבנק הבניין כולו צרך 6,803,960 קוט"ש בשנת 2017, וייצר 357,598 קוט"ש. ז"א, מערך ה-PV שלו מייצר כ-5% מהצריכה, וחוסך כ-163 אלף ₪ (+מע"מ) בשנה בחשבון האנרגיה [ג].

תרשים 37: בניין ה-Data Center של מת"ף והבנק הבינלאומי.
בבניין הוצבו מערכות PV על החזית הדרומית (בתמונה) ועל הגג בהיקף כולל של 364 kWp. תמונה: יונירום אלקטרוניקס בע"מ.

[ג] המידע סופק ע"י אבי חיים, רות דיין (ראש מדור פרויקטים), ויוסי מוריאל מהבנק הבינלאומי הראשון.

2.4.2 אקלים

כאשר קרני השמש פוגעות בקרקע ב-90° מעלות (זווית ישרה, במאונך לקרקע), הן מכסות שטח מינימלי על הקרקע. ככל שקרני השמש פוגעות בקרקע בזווית קטנה יותר, אותה כמות קרינה מתפזרת על פני שטח גדול יותר- לכן כל מ"ר של קרקע זוכה לקרינה מועטה יותר. ככל ששטח שוכן קרוב יותר לקו המשווה קו רוחב 0° מעלות), קרני השמש בממוצע פוגעות בקרקע בזווית קרובה יותר ל-90° מעלות, ולכן תיאורטית כל מ"ר זוכה ליותר קרינה (תיאורטית, לא כולל הצללה עקב עננות). ישראל שוכנת בין קווי רוחב 29°-34° צפון, קרוב יותר לקו המשווה יחסית לרוב מדינות ה-OECD. לכן, תיאורטית זוכה לקרינה רבה יותר לכל מ"ר.

בנוסף, ישראל שוכנת בחגורת המדבר של חצי הכדור הצפוני, ועד כ-200 ק"מ צפונית לקו המדבר. לכן, רוב האקלים של ישראל הוא מדברי, ספר מדבר וים תיכוני. מכיוון שבמדבריות ובספר המדבר היקף עננות נמוכה ביותר, ובאקלים ים תיכוני היקף עננות יחסית נמוכה המתרכזת בחורף, אזורנו זוכה לקרינה רבה אף יותר לעומת אזורי קו המשווה. זאת מכיוון שלמרות שתיאורטית יותר קרינה מגיעה לפני השטח בקו המשווה, אזורים טרופיים הסמוכים לקו המשווה מכוסים עננים למשך פרק זמן ארוך במצטבר בכל שנה, אשר מונעים מחלק ניכר מהקרינה מלהגיע לקרקע.

מדד נוסף המשפיע על עוצמת קרינת השמש המגיעה לקרקע הוא גובה יחסית לפני הים. ככל שהקרקע גבוהה יותר, הקרינה צריכה לעבור פחות אטמוספרה בדרך מהחלל לקרקע, ולכן פחות קרינה נספגת ומתפזרת ע"י האטמוספרה. לכן הקרינה בחרמון (גובה 2200 מ' מעל פני הים, 1800 KWh/kWp/year) גבוהה יותר מאשר בדרום ים המלח (-400 מ' מתחת לפני הים, 1670 KWh/kWp/year), למרות שהאחרון כ-230 ק"מ יותר קרוב לקו המשווה [79]. במדד זה, אין לישראל יתרון מבחינת עוצמת הקרינה, מכיוון שישראל באופן ממוצע לא גבוהה במיוחד מעל פני הים.

אירוסולים הם חלקיקים זעירים באטמוספרה, כמו אבק, רסס מים, זיהום אוויר. אירוסולים בולעים ומחזירים קרינת שמש. ככל שריכוז האירוסולים באטמוספרה גבוה יותר, פחות קרינה מגיעה לקרקע. מיקום מדברי, גם מצמצם מטבעו את היקף ההתיישבות האנושית הממוצעת באזור. ככל שאזור מיושב פחות, ריכוז האירוסולים באטמוספרה ממקור אנושי, כמו זיהום, נמוך יותר. זוהי סיבה נוספת מדוע מדבריות זוכות לקרינה רבה יותר לעומת אזורים מיושבים יותר. אמנם, מדבריות סובלים מאבק רב יותר לעומת כל שאר אזורי האקלים, אך עדיין השפעתו על הקרינה נמוכה יותר לעומת ההשפעות המצטברות האחרות.

כל הפקטורים אשר הוזכרו לעיל, מתרגמים בסופו של דבר לערכי קרינה ממוצעת שנתית, ולהספק יצור חשמל מתא פוטו-וולטאי ממוצע. בישראל, ניתן להפיק בתאי PV בין 1700-2050 KWh/kWp/year [79]. לשם השוואה, בדרום אירופה, ניתן להפיק 1150-1500 KWh/kWp/year, בצפון אירופה ניתן להפיק 700-1150 KWh/kWp/year, ברוב צפון אמריקה 700-1500 KWh/kWp/year. מתוך מדינות ה-OECD, רק בדרום-מערב ארה"ב,

באוסטרליה, בצ'ילה ובמקסיקו ערכים דומים או גבוהים (צ'ילה- בזכות הגובה הרב מעל פני הים) לערכים שלנו.

נציין כי האבק, בנוסף להשפעתו על צמצום קרינה שמגיעה לקרקע באזורים מדבריים, נוטה להצטבר על תאי PV (כמו על כל עצם אחר). עקב מיעוט גשמים באזורים מדבריים ובאזורים סמוכים להם, האבק נוטה להישאר ולהצטבר לאורך חודשים ארוכים. בעיה זו נוטה לפגוע באופן ניכר בביצועי תאי PV, ומצריכה ניקוי מתמיד של תאי PV באזורים שכאלה. ישנם מוצרי זכוכית ופלסטיק שקופים בפיתוח עם ציפויים מתחום הננוטכנולוגיה אשר לא מאפשרים הצטברות אבק, מים או כתמים ועשויים לפתור בעיות אלו.

כאמור, קו הרוחב בו שוכן מתקן PV משפיע על ההיקף האבסולוטי של קרינת השמש למ"ר קרקע. אולם, מכיוון שזווית השמש משתנה עם עונות השנה, קיימת השפעה על הקרינה בפועל אשר זוכים לה חזיתות אנכיים בבניינים. מצד אחד, הרחק מקו המשווה, בקווי רוחב גבוהים כמו צפון גרמניה (53° מעלות צפון), בחורף השמש נמוכה בשמי הדרום. לכן, היא נמצאת בזווית אופטימלית יותר (קרובה יותר להיות מאונכת לקיר, ל-90° מעלות) להקרין על חזית דרומית. זאת, לעומת קווי רוחב נמוכים יותר, כמו ישראל ($29\text{-}34^o$ מעלות צפון), בהם בחורף השמש גבוהה יותר בשמי הדרום. בקיץ, המצב הפוך. כמו כן, קווי רוחב גבוהים יותר מצד אחד סובלים משעות אור מועטות בחורף לעומת קווי רוחב נמוכים, אבל מצד שני זוכים לשעות אור ארוכות יותר בקיץ. המצב מסתבך עוד יותר כאשר מנסים לקחת בחשבון גם את שאר החזיתות בבניין. עולה השאלה, היכן זוכות החזיתות לקרינה רבה יותר בממוצע שנתי? או בניסוח אחר- היכן משתלם יותר אנרגטית להתקין BIPV על חזיתות בניינים?

קזבלנקה שוכנת בקו רוחב 33.57^o צפון, בדומה לישראל ($29\text{-}34^o$ צפון). לעומתן, מדריד שוכנת בקו רוחב 40.45^o צפון, והמבורג בקו רוחב 53.65^o צפון. עפ"י [80], מ"ר של חזית דרומית בקזבלנקה זוכה ל-6% ו-48% יותר קרינת שמש בשנה לעומת מדריד והמבורג בהתאמה. בנוסף, מ"ר של חזיתות מזרחיות ומערביות בקזבלנקה זוכות ל-8% ו-76% יותר קרינת שמש בשנה לעומת מדריד והמבורג בהתאמה. לכן, מבחינה אנרגטית, משתלם יותר להתקין BIPV על חזיתות בישראל מאשר באירופה.

2.4.3 מדיניות

כמו מדינות רבות, גם ישראל הנהיגה תעריפי חשמל מיוחדים לעידוד הפקת חשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות/ חלופיות. בדומה למדינות רבות, גם ישראל הורידה לאורך השנים את גובה תעריפים אלו עם הבשלת הטכנולוגיות וההוזלה של התקנתן [76]. מתעריף חשמל שמופק מ-PV בגובה 2.00 ₪ לקוט"ש ב-2008, ירדנו לתעריפים בגובה 0.20-0.48 ₪ לקוט"ש כיום. אולם, בניגוד למדינות אחרות, המכסות להקמת מתקני PV נמוכות מאוד, ואף לא היו קיימות כלל למשך מספר שנים. התוצאה היא שלמרות הפוטנציאל העצום להפקת חשמל ואנרגיה מקרינת השמש בישראל (ראו פרק 2.4.2), המימוש בפועל נמוך מאוד [1].

ישראל הינה המדינה השלישית בצפיפותה ב-OECD כיום [81]. אם מגמות גידול האוכלוסין הנוכחיות תמשכנה, ישראל עשויה להפוך למדינה הצפופה ביותר ב-OECD תוך 20-30 שנים. תוכנית המדינה להגדיל את מס' הדירות עד 2040 ב-60% (ובאופן דומה את היקף התשתיות והמבנים שלא למגורים), מגדילה את עומס השטח הבנוי עוד יותר. המשמעות היא שהשטחים הפתוחים בישראל מאוימים באופן חריג [82]. לכן, לישראל צריך להיות אינטרס חשוב לצמצם פגיעה בשטחים פתוחים נוספים. מכיוון שאחד החסרונות של מתקני PV הוא תפיסת שטחים נרחבת יחסית לאנרגיה המיוצרת (יחס נמוך של יצור אנרגיה\שטח מתקנים) [83]- לישראל צריך להיות אינטרס ברור ליישום PV על מבנים, תוך צמצום הקמת מתקני אנרגיה ותשתיות בשטחים פתוחים [16].

עד לאחרונה, הממשלה העדיפה באופן מובהק הקמת מתקני אנרגיות מתחדשות גדולים ע"י חברות גדולות, אל מול הקמת מתקנים קטנים ומבוזרים ע"י חברות קטנות ואנשים פרטיים. יחד עם זאת, בשנה האחרונה חלה התקדמות בנושא, עם הקלות משמעותיות להקמת מתקני PV רגילים (BAPV) על מבנים ע"י אנשים פרטיים [84], ועם תעריפים גבוהים יותר ל-PV על גגות לעומת PV קרקעי.

למרות התקדמות זו, אין עדיין מדיניות ייחודית המתאימה ל-BIPV.

עפ"י נתונים של המועצה הישראלית לבניה ירוקה הבנייה הירוקה בישראל נמצאת בצמיחה. חלפו כ- 6 שנים מאז הושק התקן הישראלי לבנייה ירוקה במסגרתו המורחבת ומאז נבנו על פיו מאות מבנים בישראל, לצד מבנים ירוקים שנבנו ודורגו על ידי כלי הערכה בינלאומיים כדוגמת ה LEED -האמריקאי. הבניינים הירוקים שנבנו בישראל הינם בפריסה גיאוגרפית רחבה, בייעודים שונים של מבנים (בתי ספר, משרדים, מגורים וכד') וכן ברמות יישום שונות של פרקטיקות בנייה ירוקה ושל חדשנות . ביולי 2014 התקבלה החלטת ממשלה לקידום בנייה ירוקה בישראל, אשר במסגרתה הוקצו 31.8 מיליון ₪ לקידום הבנייה הירוקה במשך שלוש שנים .ביוני 2013 ,פורום 15 הערים העצמאיות, בהן מתגוררת 40% מאוכלוסיית ישראל, החליט כי משנת 2014 ובאופן הדרגתי, הבנייה בתחומי ערים אלו תהיה בנייה ירוקה עפ"י התקן הישראלי לבנייה ירוקה, ת"י 5281 .בינתיים הצטרפו להחלטה זו גם רשויות מקומיות נוספות שאינן חברות בפורום ה-15 .כמו כן, גופים גדולים כגון מנהל הדיור הממשלתי ומשרד הביטחון החליטו כי כל בנייה חדשה תהיה על פי תקן לבנייה ירוקה. כ-350 מבנים הותעדו עד היום על פי תקן מוכר לבנייה ירוקה, 290 מהם מבני מגורים, 35 מבני משרדים ו-14 מבני חינוך .הפריסה הגיאוגרפית רחבה: מבאר שבע בדרום ועד נהריה בצפון. 1,100 מבנים נמצאים בבנייה ובתהליך התעדה על פי תקן לבנייה ירוקה .מתוכם כ-65% מבני מגורים וכ-32% מבני משרדים.

2.4.4 פוטנציאל השוק הישראלי

בישראל, גידול האוכלוסייה השלישי הכי מהיר ב-OECD נכון ל-2017. בשלושים השנים האחרונות, בישראל גידול האוכלוסייה **הממוצע** הכי מהיר ב-OECD [85]. על מנת שהמדינה

תוכל לעמוד בעומס זה, עליה לבנות הכי הרבה דירות, מבני תעשיה, מסחר ושירותים לעומת כל מדינות ה-OECD בעשורים הקרובים, יחסית לגודל אוכלוסייתה. אם נצרף לכך את העובדה כי בישראל אין שוק BIPV כיום, אזי נגיע למסקנה הפשוטה כי בישראל פוטנציאל שוק ה-BIPV במבנים חדשים הכי גדול ב-OECD, יחסית לגודל האוכלוסייה. בנוסף, ניתן ליישם BIPV גם בעת שיפוץ בניינים קיימים. אולם, כאן החזר ההשקעה בד"כ ארוך יותר לעומת בניה חדשה, מכיוון שצריך להתקין מעטפת חדשה לבניין שכבר יש לו מעטפת. יתכן ומוצרי BIPV\BAPV חדשים, כמו פילם דק שניתן להדביק על מגוון מעטפות קיימות (מוצרים שקיימים כבר כיום) או אפילו PV שניתן לרסס (בפיתוח)- יוכלו לצמצם את החזר ההשקעה לפרק זמן סביר.

ב-2015 היו בישראל כ- 2.5 מיליון משקי בית, אשר התגוררו בכ-2.5 מיליון יחידות דיור [86,87]. עפ"י נתוני הגידול האוכלוסין 'עד 2040 המדינה תתכנן 2.6 מיליון יחידות דיור, וצפויות לבנות 1.5 מיליון יחידות דיור [88,89]. ז"א, גידול של כ-60% במספר הדירות לעומת המצב היום. במקביל, צפוי כי גם שוק המבנים שלא למגורים (תעשיה, מסחר, שירותים וכו'), יגדל פחות או יותר בהתאמה.

כמה שטחי מעטפת (גגות וקירות) חדשים של בניינים, אשר ניתן לשלב בהם BIPV, יבנו בישראל עד 2040? כמה BI(PV) מותקן ניתן יהיה ליישם על בניינים חדשים?

דוח אפס פליטות פחמן (החישובים הרלוונטיים מופיעים בעיקר בנספחים ח-ט של הדוח) [87], אשר לקח בחשבון בניה של 1.1 מיליון דירות "בלבד" בין 2010-2040, חישב כי בתקופה זו יבנו עוד 153 מיליון מ"ר (153 אלף דונם) של גגות מבנים למגורים. מבחינת כל תוספות הגגות (כולל מבניה תעשיה, מסחר, שירותים וכו'), מדובר על תוספת של 200 מיליון מ"ר (200 אלף דונם) של גגות. מכיוון שלא כל הגג יכול להיות מנוצל באופן יעיל ע"י PV (ארובות, דודי שמש, בתי מעליות, הצללות, מדרגות, מעקות, מרזבים, skylights וכו'), חושב כי ניתן להתקין PV רק על 20% משטחי גגות מבני מגורים ועל 60% משטחי שאר הגגות. המשמעות היא כי על הגגות החדשים (שיבנו בין 2010-2040) ניתן להתקין PV בהיקף של 7840 MW מותקן, אשר יספקו כ- 14.6 TWh חשמל בשנה (נצילות של 135 ואט\מ"ר, יעילות המרה של קרינת שמש לחשמל של 14%) [87,90]. חישוב שמרני זה מהווה 22% מצריכת החשמל השנתית בישראל ב-2016, 16% מצריכת החשמל ב-2030 ללא התייעלות אנרגטית [91], וכ-10% מצריכת החשמל ב-2040 בתרחיש עסקים כרגיל (ללא התייעלות אנרגטית, ועם גידול אוכלוסייה קבוע). כל זאת מבלי לשנות את מאפייני הגגות.

במידה ותבוצע התאמה תכנונית מראש לאופטימיזציה של יישום PV על גגות (מניעת הצללות, זווית ומפנה אופטימליים, תכנון גג ללא מתקנים מלבד PV וכו'), ניתן להגיע ליישום PV על 60-80% משטח **כל** הגגות החדשים. מכיוון שבחישוב המקורי, רק 20% משטח גגות מבני מגורים נלקחים בחשבון ליישום PV, התאמה תכנונית כזו יכולה להכפיל ולשלש את היקף ה-PV המותקן על כל סך גגות חדשים. כמו כן, במידה ונעדכן את המספרים הללו לתוכנית

החדשה של הממשלה לבנות 1.5 מיליון דירות בין 2018-2040 כנזכר לעיל [89], היקף ה-PV המותקן על גגות חדשים עשוי לעלות עוד יותר (בהנחה שהבניה לא תהפוך רוויה יותר, ז"א יבנו יותר דירות בכל מגדל מגורים ושטח הגג הממוצע לכל דירה יקטן). כמו כן, סביר שטכנולוגיית PV תשתפר עם השנים וניתן יהיה להגיע ליעילות המרת קרינת שמש לחשמל גבוהה יותר מאשר קיים כיום ויחסית לנתונים של דוח אפס פליטות פחמן אשר נכתב ב-2013. לכן, לא בלתי נמנע כי ניתן יהיה להתקין PV MW 20,000 על גגות חדשים עד 2040, ולייצר באמצעותם TWh 37 ויותר (57% מצריכת החשמל השנתית בישראל ב-2016, 40% מצריכת החשמל ב-2030 ללא התייעלות אנרגטית [91], וכ-26% מצריכת החשמל ב-2040 בתרחיש עסקים כרגיל).

דוח אפס פליטות פחמן חישב גם תוספת שטח קירות חדשים של 583 מיליון מ"ר (583 אלף דונם) בין 2010-2040. גם כאן, לא כל שטח זה יהיה רלוונטי להתקנת BIPV- למשל קירות עם מפנה צפוני, קירות מוצלים (ע"י הגג, ע"י צמחיה, ע"י בניינים אחרים...), המצאות תשתיות ועוד. בסופו של דבר ניתן יהיה ליישם כ- 70 מיליון מ"ר של BIPV על הקירות. כמו כן, יעילות יצור חשמל בחזיתות נמוך מאשר על גגות, עקב זווית הקירות (90° מעלות לקרקע) אשר איננה אופטימלית. לפי הדוח, שטח נוסף זה יאפשר התקנה אפקטיבית של MW 9,395, אשר ייצרו TWh 4.82 בשנה (7% מצריכת החשמל השנתית בישראל ב-2016, 5% מצריכת החשמל ב-2030 ללא התייעלות אנרגטית [91], וכ-3% מצריכת החשמל ב-2040 בתרחיש עסקים כרגיל).

שוב, זוהי הערכה שמרנית. ניצול נרחב יותר של קירות, התקנת BIPV משופע עם זווית אופטימלית לשמש בחזיתות (מוצרים קיימים כבר היום), התקנת BIPV שקוף על חלונות (מוצרים קיימים הכבר היום), שיפור ביעילות המרת קרינת השמש לחשמל, תכנון בניינים מוכוון BIPV, בניית 1.5 מיליון דירות ולא רק 1.1 מיליון וכו'- יכולים גם להכפיל ולשלש את ייצור החשמל מקירות חדשים.

נזכיר כי תחזיות כאלו הן לא בשמיים. כאמור בפרק 2.3.2, החל מ-2022, כל המבנים באיחוד האירופי חייבים להבנות כ-NZEB. מה שאומר שרבים יהיו חייבים לשלב BIPV באופן נרחב.

בנוסף, במידה ו-10% מכל שטחי הקירות של הבניינים הקיימים ישופצו ויוטמעו בהם BIPV, יהיה ניתן להוסיף עוד 17 מיליון מ"ר של BIPV על קירות, בהספק מותקן של MW 2,305, ולייצר עוד לפחות TWh 1.2 חשמל בשנה.

גם כאן נזכיר, כי באיחוד האירופי התוכנית היא כי כל הבניינים, כולל הישנים, יהיו ניטרליים אנרגטית עד 2050, עם קצב שדרוג של ~3% בשנה מתוך כלל הבניינים הקיימים (פרק 2.3.2).

כאמור בדוח אפס פליטות פחמן, על גגות בניינים קיימים ניתן להוסיף 85,500,000 מ"ר PV בהספק של 11,540 MW מותקן, אשר ייצרו 21.5 TWh בשנה (33% מצריכת החשמל השנתית בישראל ב-2016, 24% מצריכת החשמל ב-2030 ללא התייעלות אנרגטית [91], וכ-15% מצריכת החשמל ב-2040 בתרחיש עסקים כרגיל)

חישוב שמרני של פוטנציאל BI(PV) על מבנים בארץ לוקח בחשבון הקמת BI(PV) על כל הבניינים החדשים, יישום על 20% בלבד משטחי מעטפות (גגות וקירות) מבני מגורים, יישום על 60% משטחי מעטפות (גגות וקירות) שאר המבנים, עם 14% יעילות המרה של קרינת השמש לחשמל. חישוב זה יביא להתקנת BI(PV) בהיקף של כ-31 GW מותקן, אשר יכולים לספק 42 TWh חשמל. היקף יצור זה מהווה 65% ו-30% מצריכת החשמל בישראל ב-2016 וב-2040 בהתאמה. זאת ללא התייעלות אנרגטית ובקצב צמיחה דמוגרפית ללא שינוי (תרחיש עסקים כרגיל, ראו טבלה 1).

חישוב נועז של פוטנציאל BI(PV) על מבנים בארץ לוקח בחשבון הקמת BI(PV) על כל הבניינים החדשים, תוך התאמת תכנון מעטפות מראש לאופטימיזציה של BIPV (זוויות, פינוי גג מתשתיות, הצללות) [92,93]. אופטימיזציה זו תאפשר יישום BI(PV) על 60% משטחי מעטפות (גגות וקירות) כל המבנים, עם 14% יעילות המרה של קרינת השמש לחשמל. חישוב זה יביא להתקנת BI(PV) בהיקף של כ-60 GW מותקן, אשר יכולים לספק 73 TWh חשמל. היקף יצור זה מהווה 112% ו-52% מצריכת החשמל בישראל ב-2016 וב-2040 בהתאמה. זאת ללא התייעלות אנרגטית ובקצב צמיחה דמוגרפית ללא שינוי (תרחיש עסקים כרגיל, ראו טבלה 1).

יותר מכך, אם ניקח בחשבון שיפור ביעילות ההמרה של קרינת השמש לחשמל בתאי BI(PV) עתידיים (כבר כיום יש מוצרים בעלי יעילות המרה גבוהה מ-14%), יישום BI(PV) בזווית 30° מעלות גם על קירות (טכנולוגיה שכבר קיימת היום), התייעלות אנרגטית ו/או ירידה בקצב הצמיחה הדמוגרפית הלאומית- ניתן יהיה לייצר את כל צריכת החשמל הלאומית מהתקנות BI(PV) אלו.

דוח אחר, אשר סקר ייצור חשמל מ- PV רגיל על גגות בלבד, מצא כי עד 2030 ניתן יהיה לייצר 16-22 TWh על גגות בניינים קיימים בלי שימוש בחזיתות כלל [16].

כמובן, שהתקנות BIPV בסדר גודל שכזה יחייבו הקמת מתקני אגירת חשמל/אנרגיה בבניינים ו/או מחוצה להם, ע"מ לאפשר צריכת חשמל מעבר לשעות ייצור חשמל מקרינת השמש.

טבלה 1: פוטנציאל ייצור חשמל ע"י BI(PV) בישראל

	חישוב שמרני		חישוב נועז	
	היקף BI(PV) מותקן MW	**היקף יצור חשמל שנתי TWh**	**היקף BI(PV) מותקן MW**	**היקף יצור חשמל שנתי TWh**
גגות חדשים	7,840	14.6	20,000	37
גגות קיימים	11,540	21.5	11,540	21.5
קירות חדשים	9,395	4.82	24,000	12.3
קירות קיימים	2,305	1.2	4,610	2.4
סה"כ	**31,080**	**42**	**60,150**	**73**
אחוז מצריכה שנתית 2016	-	65%	-	112%
אחוז מצריכה שנתית 2040 (תרחיש עסקים כרגיל)	-	30%	-	52%

על סמך הנתונים בפרק 2.3.3 (שווי שוק של ~7$ מיליארד דולר לכל 1 GW מותקן), ניתן להסיק כי היקף השוק ישראלי יכול להגיע ל- 210-420$ מיליארד דולר במידה ויותקנו 30-60 GW של מערכות BIPV.

3 מתודולוגיה

הסקר מתייחס למבני משרדים חדשים בהם המערכת הסולרית מתוכננת כחלק אינטגרלי של המעטפת, אך ניתן יהיה להסיק ממנו ולו בצורה חלקית, גם על שיפוץ אנרגטי של מבנים קיימים. הסקר נבנה כסקר מרובה משתנים בכדי לשקף מגוון רחב של משתנים ומצבים אפשריים ביישום בפועל.

הסקר בוצע בשישה שלבים:

1. תכנון המבנים הנבדקים בסקר: מבנה הבקרה-מבנה משרדים טיפוסי ללא התקנה סולרית, מבנה הייחוס- מבנה הבקרה בתוספת התקנה סולרית על הגג וחלופות מבני משרדים עם יצור סולרי על הגג וחזיתות משולבות מוצרי BIPV בהתאם למסקנות מסקירה הספרותית ומגמות השוק.
2. ביצוע סימולציות ממוחשבות להערכת כמות הקרינה על החלקים הסולריים בגג מבנה הייחוס ובחזיתות החלופות שנבדקו.
3. ביצוע חישובים להערכת כמות יצור האנרגיה הסולרית השנתית בחלופות השונות.
4. התאמה ספציפית של מוצרי BIPV למעטפות המבנים הנבדקים, דיוק חישובי האנרגיה וניתוח כלכלי של חישובי העלויות.
5. ניתוח כלכלי: זמני החזר השקעה, השפעה של תועלות חיצוניות ומשקיות.
6. המלצה על מוצרים מתאימים לשוק הישראלי.

3.1 בחירת בניין משרדים חדש כמושא המחקר

סקר זה מתמקד ביצור אנרגיה סולרית במעטפת מבני משרדים חדשים. הבחירה דווקא בטיפולוגית מבנים זו זה הינה בשל מגוון סיבות רחב:

- היקף הבניה של מבני משרדים במגמת צמיחה בדגש על מגדלי משרדים המתאפיינים בשטח מעטפת גבוה ושטח גג מצומצם.
- מאפיינים של צריכת אנרגיה גבוהה [94].
- הלימה בין זמן יצור האנרגיה לזמן הביקוש לאנרגיה [80].
- ע"פ רוב הבניה בשוק המשרדים הינה השכרה ו/או לשימוש עצמי ולא למכירה – חסכון אנרגטי יכול לשמש כתמריץ כלכלי ליזם.

לפי נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה שוק הבניה הישראלי מובל בפער ניכר ע"י בניה למגורים, ומשרדים הינו הסקטור השני בהיקפו. אולם בין השנים 2014-2017 שטחי הבניה בהיתרים למשרדים כמעט הכפילו את עצמם ואילו הגידול בסקטור הבניה למגורים הינו בשיעור של 15% בלבד. הפער בולט עוד יותר כשבודקים את התחלות הבניה בפועל, כאשר בין השנים הנ"ל תחום המגורים שומר על סטאטוס קוו יציב ואילו הבניה למשרדים גדלה בשיעור של כ-50% [95].

בניגוד לשוק הבניה למגורים בו הבניה הרוויה הינה ע"פ רוב למכירה, שוק הבניה למשרדים במקרים רבים הינו לשימוש עצמי ו/או להשכרה, ובמקרים רבים היזם אף מסתפק בבניית הגרעין והמעטפת בלבד וכל שוכר מתכנן את שטח הפנים שהוא מתכוון לשכור עפ"י צרכיו ותפיסתו. המגמה כה מקובלת עד כי מכון התקנים השיק בשנת 2016 תקן מיוחד לבניה ירוקה לבניני גרעין ומעטפת – מבני משרדים (ת"י 5281 פרק 3.3). במנגנון של שימוש פרטי או השכרה, התמריץ הכלכלי לחסכון בהוצאות אנרגיה גבוה יותר מפרויקטים למכירה, בהם נדרש היזם לממש את היתרון היחסי של הבניה הירוקה והחיסכון האנרגטי העתידי בנקודת זמן חד פעמית, ע"פ רוב עוד בטרם ההקמה של המבנה והוכחת ההתייעלות.

מבני משרדים בישראל מאופיינים בעומסי חום פנימיים גבוהים (internal gains) וצריכת אנרגיה גבוהה לאקלום ותאורה. צריכת החשמל האופיינית הינה 300 קוט"ש למ"ר למול צריכה של 94 קוט"ש למ"ר בבניה רוויה למגורים או 100 קוט"ש למ"ר למבנה לוגיסטי [94].

בניגוד למגורים המגיעים לשיא צריכת החשמל בשעות אחר הצהרים ובערב, השימוש בחשמל במבני משרדים בשיאו בשעות היום ולכן יש הלימה טובה בן זמן יצור האנרגיה לשעות הצריכה. שימוש ישיר בחשמל מאפשר חסכון בהולכת החשמל ומאפשר צמצום עתידי באגירת אנרגיה אשר מעלה עלויות אנרגיה [80].

ע"פ מחקר שנעשה בארץ 'לקראת בנייה מאופסת אנרגיה בישראל' , הבוחן בן היתר את פוטנציאל איפוס האנרגיה במבנים (ZEB) לפי סקטור, נמצא פוטנציאל גבוה במיוחד במבני מגורים בעיקר חד קומתיים, ובמבנים רחבים ונמוכים כדוגמת מבני חינוך ומבנים לוגיסטיים (ראו טבלה 2). כל המבנים הנ"ל בגובה קומה אחת עד שלוש, ויחס שטח הגג לשטח הבניה גבוה ,כך שהחזית כמעט ואינה רלוונטית ליצור אנרגיה וניתן להסתמך במקרים אלו על יצור אנרגיה סולרית בשטח הגג [94]. בנוסף, יש לציין בהקשר זה שנמצא שהקומות התחתונות/ מבנים נמוכים וגגות של מבנים נמוכים רגישים יותר לצל כתוצאה ממבנים סמוכים בקונטקסט העירוני, מהקומות העליונות וקומות הגג של מגדלים [96] .

טבלה 2: סיכום והשוואה של ההתאמה של שימושי מבנה שונים להתייעלות אנרגטית. [94].

תרחיש מתון

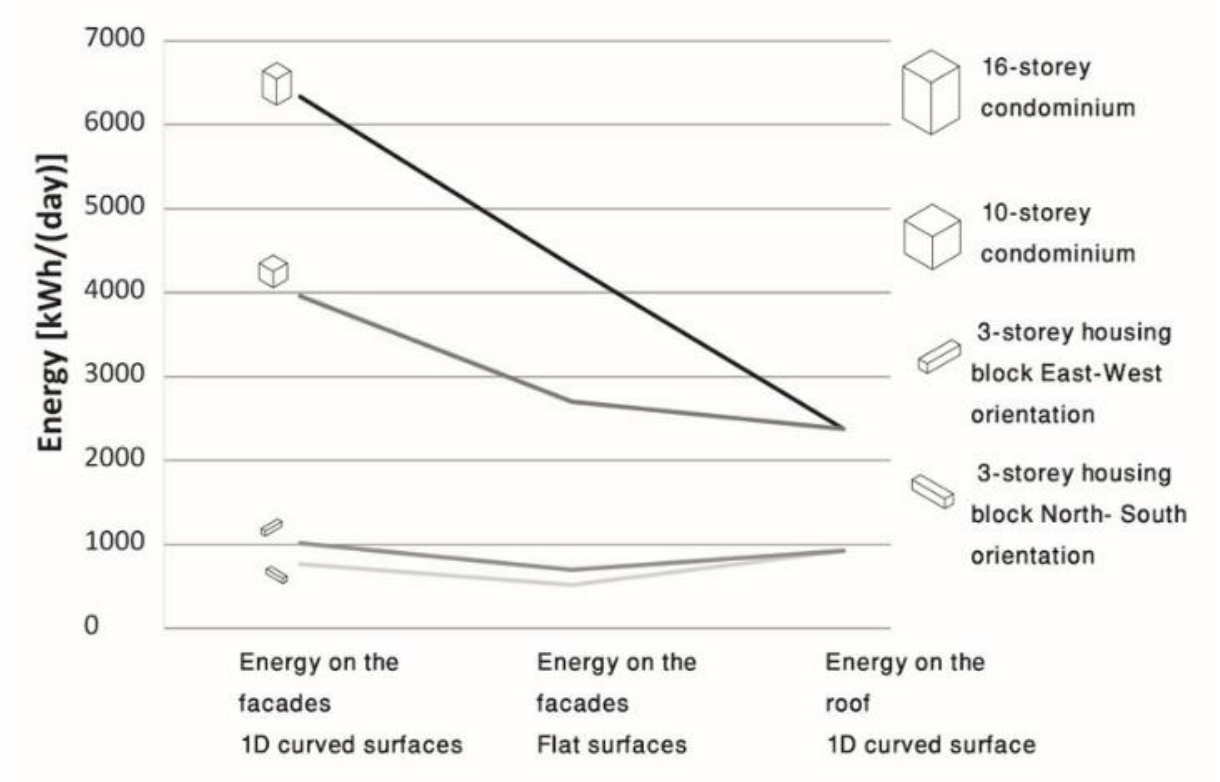
תרחיש שאפתני

B. ← B. ← C.

שימוש המבנה	טיפולוגיה	מספר קומות	יחס רח"ק (רצפה חלקי קרקע)	איפוס אנרגיה (EUI) מצב קיים	איפוס אנרגיה (EUI) לאחר התייעלות	איפוס אנרגיית תפעול המבנה בלבד (אקלום, מים חמים, תאורה)	ייצור ביחס לצריכה ב-% לפי מודל B	הערות / מסקנות
מגורים	בית חד-קומתי	1	0.4	X	√	√	120%	צריכת אנרגיה נמוכה יחסית בשילוב שטח מעטפת גדול מובילים להיתכנות תיאורטית גבוהה לאיפוס.
				√	√	√	330%	ייתכן קושי כלכלי ביישום אמצעי ייצור והתייעלות מתקדמים.
	שיכון	+4 קומת עמודים	1.3	X	X	X	35%	יש צורך בפיתוח מתודולוגיה להתאגדות דיירים ולעידוד השקעות בהתייעלות וייצור אנרגיה באזורים מוחלשים. יש לעודד הכוונה לאיפוס
				X	√	√	100%	במבני שיכון קיימים (במסגרת שיפוץ אנרגטי) בהגדרה מיוחדת.
	בית צמוד קרקע	+ 2 עלית גג	0.6	X	X	√	65%	חרף העובדה שבטיפולוגיה זו ניתן להגיע לאיפוס בקלות יחסית, יש להימנע מעידוד איפוס אנרגיה
				√	√	√	185%	בסקטורים קטנים בעשירון העליון בבנייה אנטי-עירונית.
	בנייה מרקמית	+ 6 קומת קרקע	2.5	X	X	X	23%	צריכה גבוהה וקומפקטיות לא מאפשרות יישום איפוס מלא. יש לעודד בנייה חדשה מרקמית לאיפוס
				X	X	√	65%	על ידי הגדרה של איפוס חלקי בשילוב מודלים כלכליים וטכנולוגיים לתמרוץ התייעלות ייצור וניהול אנרגיה משותפים.
	מגדל	+ 20 קומת קרקע	4.5	X	X	X	11%	צריכה גבוהה וקומפקטיות לא מאפשרות יישום איפוס כלל. יש לשקול טיפולוגיה זו מבחינה אנרגטית עם שיקולים עירוניים אחרים; להשתמש ביתרון הגודל
				X	X	X	33%	לתמרוץ התייעלות, ייצור וניהול אנרגיה משותפים ככל הניתן.
משרדים	מבנה הי-טק בגמר זכוכית ואלומיניום	6	2.2	X	X	X	7%	מבני משרדים מהווים אתגר משמעותי עקב רמות צריכה גבוהות מאוד, בנייה קומפקטית, שוק ספקולטיבי וחסר מוטיבציה
				X	X	X	21%	להתייעלות ולייצור אנרגיה. דרושה התאמה ייחודית של מושג האיפוס לשימוש זה.
מבנה לוגיסטי	מבנה נמוך מלבני סגור במפתח גדול	+1 גלריה	0.3	√	√	√	155%	מודל האיפוס ניתן ליישום בפשטות גבוהה יחסית. יש להימנע מניתוק בין יכולות הייצור לבין ההתייעלות הגבוהה הנדרשת באיפוס אנרגיה.
				√	√	√	490%	קיים פוטנציאל לסינרגיה אנרגטית בין מבנה זה למבנים אחרים.

מבני משרדים מהווים אתגר משמעותי לאיפוס אנרגיה בן היתר עקב רמות צריכת אנרגיה גבוהות כפי שהוזכר לעיל. במסגרת המחקר 'לקראת בנייה מאופסת אנרגיה בישראל' נמצא סקטור זה כפחות מתאים לאיפוס אנרגיה, אולם יש לסייג שמחקר זה התייחס רק לבניה למשרדים בגובה של 6 קומות שאינה מייצגת את פוטנציאל השוק. בישראל הטיפולוגיה של מבני משרדים נעה בין מבנים של 6-8 קומות ועד לגבהים של כ-60 קומות ומעלה (דוגמת

'עזריאלי שרונה' המשלב מסחר, משרדים ותיירות- 60 קומות, 'מגדלי עזריאלי' ו'מגדל אלקטרה' בת"א- 50 קומות וב'מגדלי בסר' ברמת גן ו'מגדלי אלון' בת"א – 40 קומות). כצפוי קיים יחס ישר בין פוטנציאל יצור האנרגיה בחזיתות המבנה לעליה לגובה והגדלת שטח המעטפת (ראו תרשים 38).



תרשים 38: פוטנציאל יצור אנרגיה סולרית, על גגות, חזיתות שטוחות וחזיתות עם אופטימיזציה גיאומטרית של טיפולוגיות מבני מגורים.
ערכים בקוט"ש\יום [97].

מחקר זה התמקד בגובה ממוצע שהוגדר כמשקף את בניני המשרדים הקונבנציונליים בישראל ומתייחס לבניין משרדים בן 20 קומות בגובה 80 מ' . בבניין יושמו מאפיינים תכנונים, עיצוביים ופונקציונליים המייצגים את המצב הקיים (common practice) בתכנון מבני משרדים קונבנציונליים, כגון בניין ריבועי סימטרי (אורך כל פאה 33 מ') עם קירות מסך מזכוכית בכל ההפניות [98].

יחס שטח תכסית/שטח הגג לגובה במגדלים אלו קרוב ל 1:12, כאשר על פי רוב ממוקמים מתקני תשתית על הגג (משאבות, חדרי מעליות, וכו'), המותרים רק 30% משטח הגג פנוי להתקנות סולריות [94].

הסקר מתמקד בבניה חדשה למשרדים היות והוא מאפשר מקסום היתרון היחסי של BIPV על BAPV, כך שהמוצר הסולרי מחליף מוצר בניה סטנדרטי ומאמצי ההתקנה משולבים בתהליך הבניה הכולל. ניתן יהיה בצורה חלקית ללמוד מהסקר גם עבור מקרים של השתלבות במבנים קיימים, אבל יש להניח שהעלויות והתהליך יהיו מורכבים יותר ביחס לבניה חדשה [94].

3.2 סימולציה אנרגטית לחלופות לבניין משרדים על חזיתות BIPV

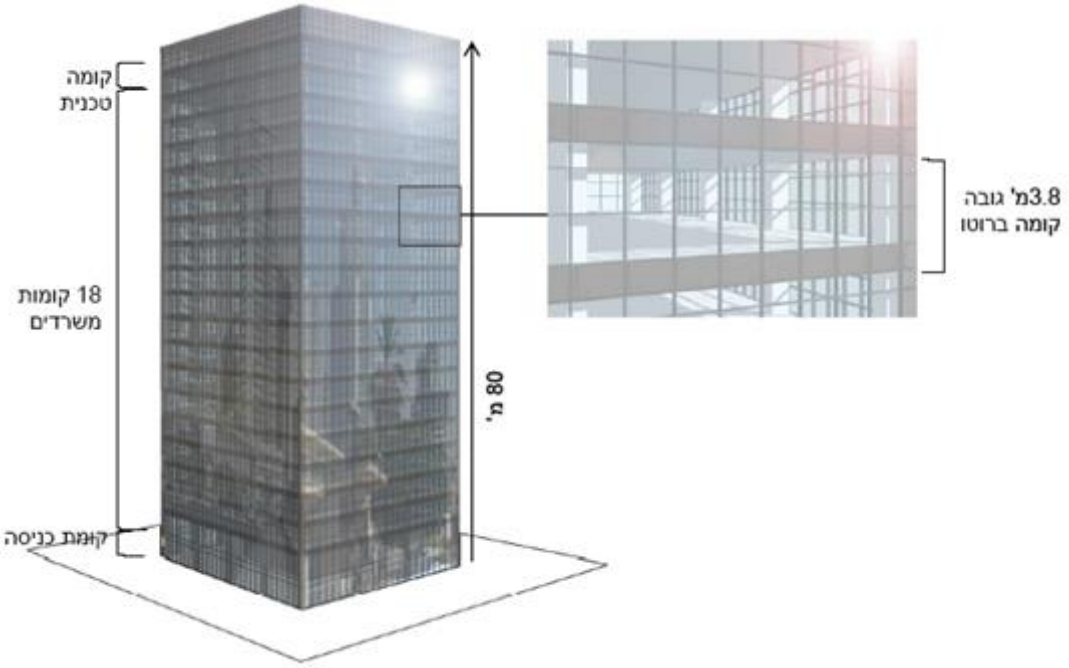
3.2.1 תיאור הבניינים אשר נחקרו בסימולציה

3.2.1.1 מבנה הבקרה

מבנה הבקרה הינו מבנה משרדים טיפוסי ללא יישום סולרי. באפיון בניין הבקרה לצורך הסקר יושמו מאפיינים תכנוניים, עיצוביים ופונקציונליים המייצגים את המצב הקיים בתכנון מבני משרדים בישראל באופן הרחב ביותר [98]. למיקום הבדיקה נבחרה העיר ירושלים, שנמצא שהיא מייצגת את ממוצע יצור האנרגיה בארץ, בקרוב של +/- 6% בתלות במיקום גיאוגרפי מדויק (6 אחוז פחות בחיפה ו-6% יותר באילת ביחס לנתונים בירושלים) [99].

בניין הבקרה מתנשא לגובה 80 מ' ובו 20 קומות. מתוכן, 18 קומות משרדים, קומת קרקע כפולה וקומת מערכות טכניות על הגג. צורת המבנה היא של ריבוע סימטרי 33 מטר אורך בכל חזית, ללא התייחסות תכנונית או עיצובית להפניה ספציפית. גובה קומה טיפוסית הינו 3.80 ברוטו מתוכם כ 2.80 מטר גובה החלל הנקי (ראו תרשים 39). שטח הקרקע של הבניין הוא 990 מ"ר, כאשר שטח הבניה הכולל (שטח רצפות כולל) הוא 21,200 מ"ר [98].

המבנה נבנה בטכנולוגית קיר מסך. אפיון מעטפת הזכוכית נקבעו עפ"י מדגם מייצג של מבני משרדים בקנה מידה דומה הנבנים כיום במרכזי עסקים עירוניים בישראל: חיפוי זכוכית מלא מרצפה עד תקרה, זיגוג כפול זכוכית LOW E סלקטיבית. גובה הפתחים צומצמו ל 1.60 מ' מתוך גובה הקומה הנקי, לצורך התייעלות אנרגטית [98].



תרשים 39: איור של מבנה הבקרה.
מתוך [98].

חלופה A- מבנה הייחוס

חלופה A, או מבנה הייחוס, זהה למבנה הבקרה בתוספת מערכת סולרית על הגג. המערכת אינה חלק אינטגרלי ממעטפת המבנה אלא התקנה קונבנציונאלית של תאים פוטו-וולטאים מיושמים במבנה (BAPV), בטכנולוגיה מהדור הראשון, סיליקון רב גבישי Poly-Crystalline. בשל המערכות הטכניות הצפויות על הגג (מעלית, משאבות, מכלי מים וכדומה) היישום משתרע על 30% משטח הגג בלבד [94] (ראו טבלה 3). המערכת פונה לכיוון דרום, בהטיה של 30° מעלות כמקובל בישראל [99]. חלופה זו נבחנה ע"מ שנוכל להשוות את מבנה הבקרה ואת החלופות עם מעטפות ה-BIPV לפתרון הסולארי היחידי הקיים קיום באופן מעשי בישראל.

3.2.1.2 חלופות למבנה הייחוס עם חזיתות BIPV

בהתחשב בסקירה הספרותית ומגמות השוק פותחו ארבעה חתכים מיצגים, לשילוב אפשרי של חזיתות BIPV במגדל משרדים. החתכים מתבססים על מבנה הבקרה כנקודת התחלה (ראו תרשים 39). חלופות אלו כוללות מערכת BAPV על הגג, בדומה לחלופה A. זאת, מכיוון שלא סביר כי יוקם מבנה BIPV ללא מערכת סולארית על הגג. בחלופות ה-BIPV השתמשנו גם כן במערכת BAPV בגג ולא במערכת BIPV. זאת, מכיוון שהיא זולה ופשוטה יותר ליישום לעומת מערכת BIPV לגג. יתרונות ה-BIPV לא באים ליידי ביטוי בגג עם שטח קטן יחסית, של בניין גבוה שאינו נראה ע"י 99.9% מהציבור, 99.9% מהזמן- לכן סביר כי תהיה העדפה להשקיע במערכת BAPV זולה יותר אשר תחזיר את ההשקעה במהרה.

הבחירה בטכנולוגיה סולארית בשלב זה הייתה סכמטית בהתאם לסקירה הספרותית ויועצי הפרויקט ממכון SEAC: בכל חלופה בה לא נדרשו שטחים שקופים השתמשנו בטכנולוגיית סיליקון גבישי p-Si, שאמנם בעלת יעילות נמוכה יותר מ-m-Si, אבל משמעותית זולה יותר. בחזיתות בהן השתמשנו בטכנולוגיית פילם דק, לצורך שקיפות בחלונות בחרנו בטכנולוגיית CI(G)S BIPV מכיוון שאינה רעילה כמו טכנולוגיית CdTe ויעילה באופן משמעותי בהמרת קרינת השמש לחשמל לעומת A-Si (אולם, קצת פחות יעילה מ-CdTe).

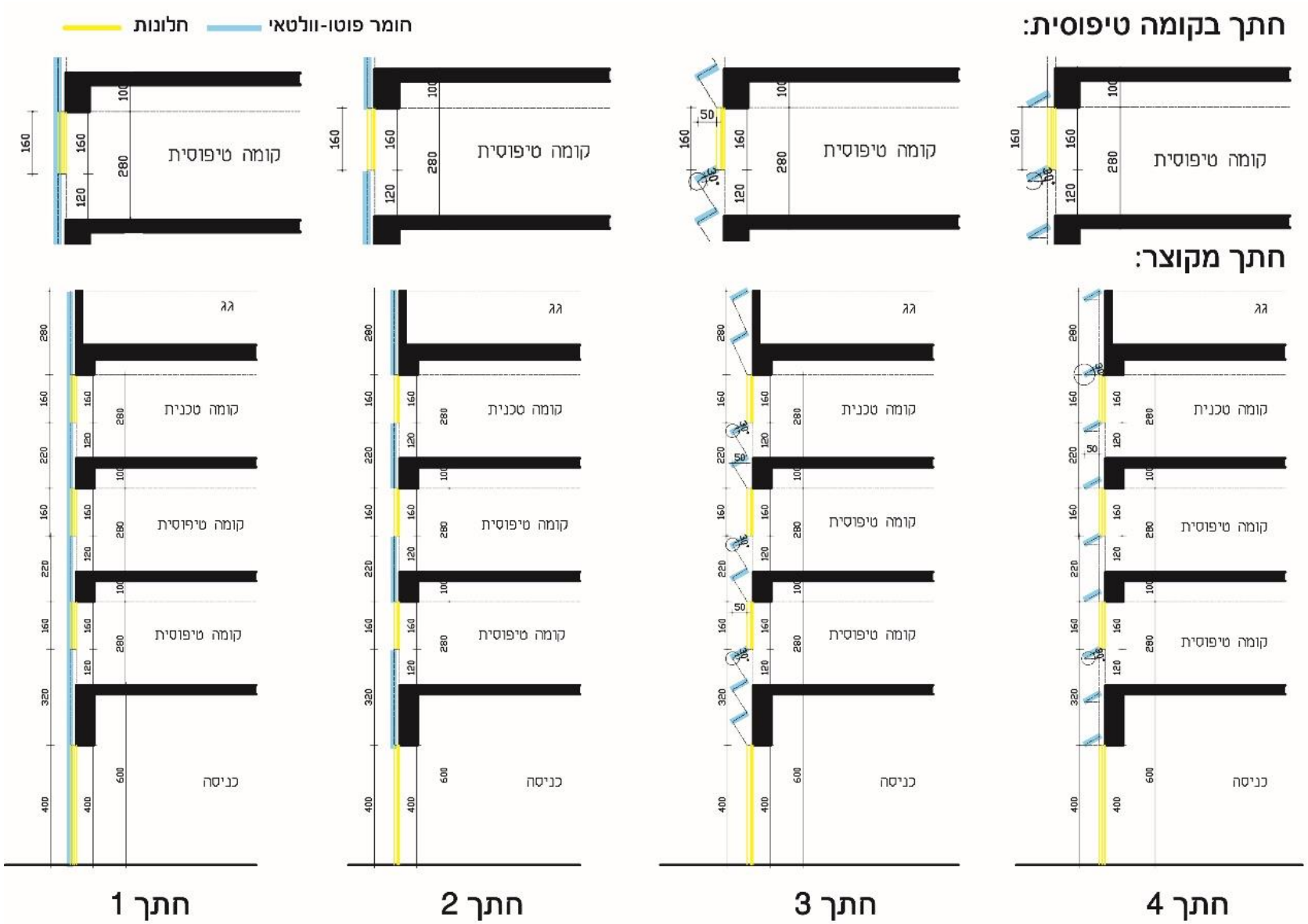
<u>להלן ארבעת החתכים</u> <u>(ראו תרשים 40)</u>:

<u>חתך 1</u>: Thin film CI(G)S על כל החזית, Warm Façade , שקוף למחצה באזורי החלונות ואטום בשאר השטח.

<u>חתך 2</u>: סיליקון רב גבישי p-Si רק באזורים האטומים של החזית, Cold Façade. החלונות ללא יישום סולרי.

<u>חתך 3</u>: הפיכת החזית מעל ומתחת לחלונות לקיר מסך תלת ממדי עם הפניה של המשטחים הסולאריים בזווית 30° מעלות, Warm Façade. טכנולוגיה סיליקון רב גבישי p-Si.

<u>חתך 4</u>: מדפי הצללה סולריים בזווית 30° מעלות, כתוספת חיצונית לחזית, בשל המרחק בין המערכת הסולרית למעטפת המבנה התייחסנו לחלופה זו כחזית מאוררת Cold Façade . הטכנולוגיה סיליקון רב גבישי p-Si.



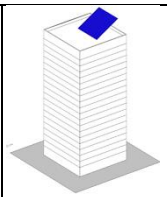
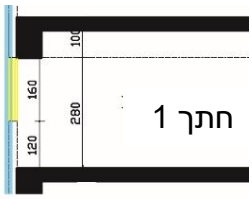
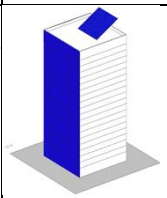
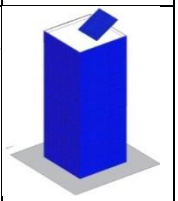
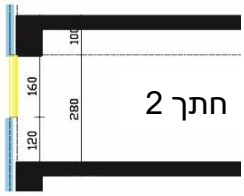
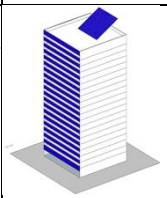
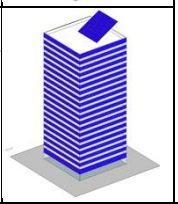
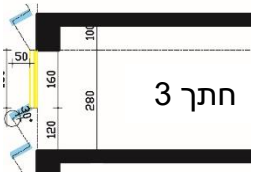
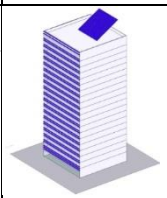
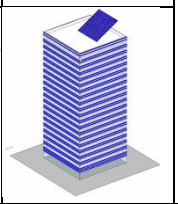
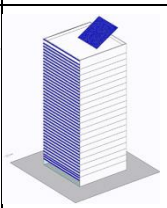
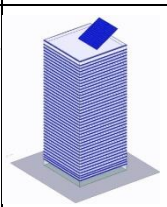
תרשים 40: 4 חתכי BIPV שנבחנו בבניין.
בשחור קיר ,תקרה או רצפה; בכחול פאנל סולארי; בצהוב חלון.

לכל חתך, יצרנו 2 חלופות: אחת הכוללת BIPV על החזית הדרומית בלבד, ושניה הכוללת BIPV על החזיתות המזרחית, הדרומית והמערבית. לא בחנו התקנת חזית BIPV על חזית צפון, מכיוון שחזית זאת חשופה אך ורק לקרינה מוחזרת ולא לקרינה ישירה. היקף קרינה זה נמוך מאוד ואינו מצדיק השקעה במערכת BIPV בחזית זו. החסרונות הכלכליים והסביבתיים גבוהים מהתועלות. כמובן, שבחצי כדור הארץ הדרומי, המצב הפוך (אין הצדקה להתקנת BIPV בחזית דרום) [80].

סה"כ, כולל מבנה הייחוס, חקרנו 9 חלופות סולאריות לבניין. החלופות מתוארות בטבלה 3 שלהלן.

הערה: יש לשים לב כי בסימולציה האנרגטית מדובר על ניתוח תיאורטי, בעוד הניתוח הכלכלי בוצע על הצעות מחיר קונקרטיות של ספקי BI(PV). מכיוון שניסינו לשמור על עלויות נמוכות בניתוח הכלכלי, החלופות חושבו לפי שימוש בגדלי פאנלי BI(PV) סטנדרטיים ולא מותאמים אישית. לכן, יש שונות בין הסימולציה האנרגטית לבין הניתוח הכלכלי בטכנולוגיות שנבחרו בסופו של דבר לכל חלופה (p-Si או m-Si), בטכניקת היישום (חזית מאוררת או לא) וגם בהיקף השטחים הסולאריים בפועל.

טבלה 3: רשימת חלופות ה-BIPV לבניין המשרדים אשר נבחנו בסימולציה

#	חתך חזית (בכחול PV, בצהוב חלון)	מיקום PV (כחול)- מבט לבניין מכיוון דרום מזרח		זווית ואופן היישום	סוג PV	Façade type
A			גג	מפנה דרומי, בזווית 30º מעלות.	p-Si	-
B	חתך 1 		גג	כמו A	p-Si	-
			חזית דרומית	התקנה ורטיקלית, חלק אינטגרלי מהחזית.	thin film CI(G)S	קיר מסך
C			גג	כמו A	p-Si	-
			חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית	התקנה ורטיקלית, חלק אינטגרלי מהחזית.	thin film CI(G)S	קיר מסך
D	חתך 2 		גג	כמו A	p-Si	-
			חזית דרומית	התקנה ורטיקלית, חלק אינטגרלי מהחזית.	p-Si	קיר מסך
E			גג	כמו A	p-Si	-
			חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית	התקנה ורטיקלית, חלק אינטגרלי מהחזית.	p-Si	קיר מסך
F	חתך 3 		גג	כמו A	p-Si	-
			חזית דרומית	התקנה בזווית 30º מעלות , חלק אינטגרלי מהחזית.	p-Si	קיר מסך
G			גג	כמו A	p-Si	-
			חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית	התקנה בזווית 30º מעלות , חלק אינטגרלי מהחזית.	p-Si	קיר מסך
H	חתך 4		גג	כמו A	p-Si	-
			חזית דרומית	התקנה בזווית 30º מעלות, תוספת לחזית.	p-Si	מוצר נלווה חזית מאוררת
I			גג	כמו A	p-Si	-
			חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית	התקנה בזווית 30º מעלות, תוספת לחזית.	p-Si	מוצר נלווה חזית מאוררת

3.2.1.3 אנליזה ממוחשבת

א. חשיפה לקרינה

בדיקת החשיפה לקרינת השמש בוצעה בתוכנת ECOTECT מבית התוכנה AUTODESK. זוהי תוכנה מאושרת תקן, הממפה את כמות הקרינה על כל משטח לאורך השנה בתנאי האקלים המקומיים של ישראל באמצעות קובץ אקלים של ירושלים ומתחשבת בהצללות עצמאיות. התוצאות התקבלו לכל נקודה ונקודה במשטח הבדיקה על גריד ברזולוציה של 1 מ"ר, וכממוצע קרינה שנתי:

משוואה 1

$$\frac{\frac{kWh}{m^2}}{year}$$

על בסיס חישוב זה נמצע גם הממוצע היומי:

משוואה 2

$$\frac{\frac{kWh}{m^2}}{day}$$

הקרינה שנמדדה הינה Incident Solar Radiation , אשר מורכבת מהקרינה הישירה (Direct Radiation) והקרינה המפוזרת מחופת השמים (Diffuse Solar). בשל מקדמי החזרה נמוכים במשטחים אורבניים הוזנחה בסקר זה הקרינה המוחזרת מהקרקע [96]. בשלב הראשון נבחנה כמות הקרינה ללא קונטקסט עירוני והתחשבות בצללים מצמחיה וממבנים שכנים. מקדם הפחתה כתוצאה מהקשר עירוני חושב בנפרד כמפורט בהמשך.

הסימולציות לחישובי הקרינה בוצעו אך ורק למשטחים שהוגדרו כסולריים: המתקן הסולרי על הגג והמתקנים הסולריים על חזיתות דרום ומזרח. החזית המערבית חושבה ע"פ תוצאות שהתקבלו מסימולציה של החזית המזרחית, מכיוון שקיימים רק הבדלים קטנים בין החזיתות [100].

ב. חישוב יצור אנרגיה

תפוקת החשמל השנתית מהמערכת הסולרית חושבה בשלב הסימולציה בצורה כללית, ע"פ הנוסחה הבאה [101] (הסברים בטבלה 4):

משוואה 3

$$\mathrm{E} = \mathrm{A} \times r \times H \times PR$$

טבלה 4: הסבר על הפרמטרים במשוואה 3.

משתנה	הסבר באנגלית	הסבר בעברית	יחידה
E	Energy produced in the system	כמות אנרגיה שהופקה במערכת (קוט"ש)	kWh/year
A	Total solar panel Area	שטח סולרי	m^2
r	Solar panel yield or efficiency	יעילות המרת קרינה סולארית לחשמל (ראו תרשים 13)	%
H	Annual average solar radiation per m^2	ממוצע חשיפה לקרינה שנתית למ"ר- כפי שהתקבל בסימולציות	$kWh/m^2/year$
PR	Performance ratio coefficient for losses	מקדם ביצוע המערכת- לוקח בחשבון הפסדים שלא קשורים לטכנולוגיה (למשל- עקב חום)	%

r- אחוזי יעילות המרת קרינה סולארית לחשמל של המערכת בשלב הסימולציה, חושבו בהתייחס לערכים מקובלים לטכנולוגיות השונות (ראו תרשים 13). עבור טכנולוגיית p-Si השתמשנו במקדם יעילות למודול של 19%.

עבור טכנולוגית CI(G)S Thin film מקדם היעילות למודול הוא 17%. אולם, אנו מעוניינים שה-BIPV על החלונות יהיה שקוף. על פי יועצי הפרויקט ככל שה-Thin Film שקוף יותר, יעילות ההמרה של הקרינה הסולארית לחשמל נמוכה יותר [ד]. מידת השקיפות הדרושה לאזורי החלונות נמצאת בטווח בין 20-50% שקיפות, ולכן היעילות הסופית לאזור החלונות היא 8.5% עבור 50% שקיפות. האזורים האטומים אינם נדרשים כלל לשקיפות ויכולים להיות ביעילות מקסימאלית של 17%. בהתחשב בחלוקת השטחים בפועל בין אזורי החלונות והאזורים האטומים במבנה הבקרה, חושבה יעילות ממוצעת של 13.4% ל-CI(G)S Thin film .

PR - מקדם יעילות המערכת חושב בעזרת יועצי הפרויקט ממכון SEAC מהולנד וכלל נתוני אזור האקלים המקומי והאם החזית מאוררת או לאו. ידוע לדוגמא שבתאי סיליקון חד-גבישי יש הבדל שנתי ביצור האנרגיה של 7-13% בין חזית חמה לחזית המאוררת בצורה אופטימלית [102]. מקדם היעילות לישראל חושב ע"פ 0.79 בחזית לא מאוררת ו- 0.84 בחזית מאוררת (79% ו-84% בהתאמה).

ג. <u>חישוב מקדם הפחתה כתוצאה מהקשר עירוני</u>

קיימים מודלים ממוחשבים שונים להערכת כמות הקרינה על משטחים, אולם רובם משמשים לביצוע חישובי קרינה על משטחים קטנים. כלים לחישוב אנליזה בקנה מידה עירוני ברזולוציית חישוב גבוהה נמצאים עדין בפיתוח [99].

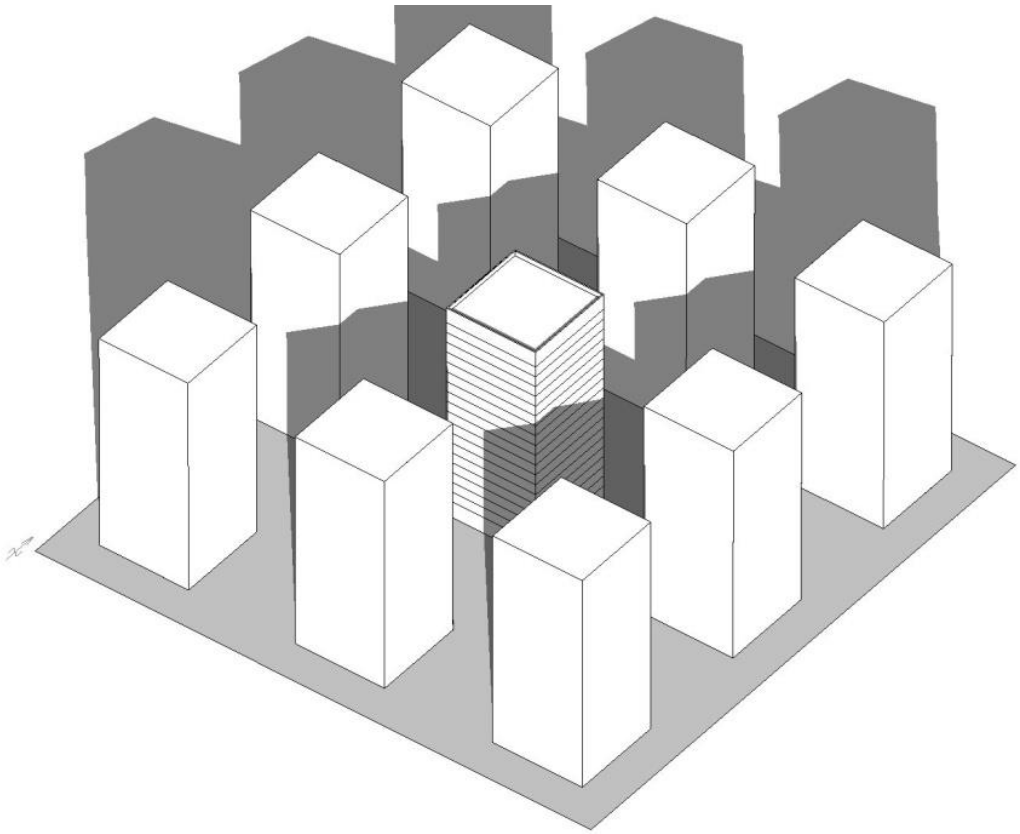
בכדי לפשט את שיטת החישוב, הסימולציות בוצעו על חזיתות המבנה ללא קונטקסט עירוני והשפעה מעצים או מבנים סמוכים והתחשבו בצל עצמי בלבד. בנפרד בוצעה סימולציה

[ד] על פי קטלוג של חברת Polysolar (Polysolar (2018) PS-CT Transparent panels STC product specifications for Cd-Te thin film glass/glass laminate transparent glazing units), Sunpartner (מקורSunpartner (2018) Wysips glass tran) ומידע שהתקבל בתכתובת מייל מחברת Sanko Solar.

ממוחשבת המתייחסת למבנים שכנים (חלופה J) הזהה בכל שאר המשתנים לאחת החלופות (חלופה C) . חלופה J מייצגת מצב אורבני קיצוני -סביבת מגדלים צפופה. המגדלים השכנים זהים למגדל הנבחן במרחק של 40 מטר ממנו, ומקבלים יחס 1:2 בין גובה המגדל: מרחק ממבנה שכן (ראו תרשים 41). מרחק זה נמצא כמרחק מקובל בין מגדלים בסביבות עירונית ישראליות צפופות לדוגמא מגדלי בסר ברמת גן.

מההשוואה בין חלופה C ו-J, ניתן להסיק על מקדם הפחתה עבור כל החלופות שנבחנו, כאשר סביר להניח שההשפעה של מבנים סמוכים על המבנה הנבחן בפועל תהיה פחותה.

הצללות מצמחיה הוזנחו בשלב זה בשל העדרן מסביבות עירוניות בצפיפות זו.



תרשים 41: מתווה הקשר עירוני צפוף שנבחן להצללה על הבניין שלנו מבניינים שכנים.
בחינת צללים בסביבת מגדלים צפופה ביום הקצר בשנה 21.12 בשעה 9 בבוקר. מבט מכיוון דרום-מזרח. מייצגת מצב אורבני קיצוני -סביבת מגדלים צפופה. המגדלים השכנים זהים למגדל הנבחן (המגדל המרכזי) במרחק של 40 מטר ממנו (יחס 1:2 בין גובה המגדל: מרחק ממבנה שכן).

3.3 ניתוח כלכלי של חלופות ה-BIPV לבניין המשרדים

3.3.1 שיטות איסוף הנתונים

הנתונים נאספו מיצרני ומתקיני BIPV באירופה, בסין ובקוריאה. זאת, תוך ניסיון לאתר את המוצרים המתאימים ביותר לאפיון החתכים, והטובים ביותר מבחינת מחיר ונצילות. בדקנו מול היצרנים וחברות התקנה ובקרה סולארית בעולם ובארץ על מנת להבין את מכלול העלויות

מעבר לציוד עצמו, (התקנה, חיווט, תחזוקה ובקרה). בדקנו עלויות התקנת קירות מסך אל מול חברות אלומיניום.

בביצוע חישובי החזר השקעה התייחסנו לאסדרת מונה נטו במסגרתה ישנם גם מרכיבי תשלום לחברת החשמל עבור דמי איזון [ה] 103. כמו כן התייחסנו לתועלות החיצוניות שמתקבלות מהפרויקט. בשלב הסימולציה הכלכלית התבצעה בחירה ספציפית של מוצרים מקובלים בשוק בעבור כל חלופה וחלופה, כולל ההתאמות הנדרשות בהתאם. מאפייני החתכים הראשוניים הגדירו את המערכת האידאלית אותה היינו רוצים להתקין, ונבחרו בהתאם להערכות בנוגע לצפי יעילות ועלויות .. מכיוון שקיימים פרמטרים רבים ל- BIPV, הרצון לקבע פרמטרים מסוימים בא על חשבון פרמטרים אחרים. לכן, נדרשנו לבצע אופטימיזציה של מספר שיקולים, דבר שהביא לבחירה של מערכות שלא היו בהכרח בעלות היעילות הגבוהה ביותר (אלו היו יקרות לרוב), או שלא היו הזולות ביותר (אלו לא בהכרח התאימו מבחינת גודל ואסתטיקה).

לגבי מחירי ההתקנה, תחזוקה וציוד היקפי, תחילה נבדקו המחירים בארץ, אך מפאת חוסר הניסיון של השוק הישראלי ביצענו הצלבות ואימות נתונים עם יצרנים וספקים בחו"ל. ההצעות הישראליות היו פעמים רבות מבוססות על הניסיון של המומחים, אשר יכלו לתת לנו הערכה כוללת של העלויות במתכונת turn-key [ו] ללא יכולת לפרוט אותן לעלויות המרכיבים השונים. בכל המקרים בחרנו בחלופות הזולות ביותר, וכפי שנציג בהמשך אלו נתנו גם את זמן החזר ההשקעה הקצר ביותר האפשרי.

סוגיה חשובה נוספת היא נושא עלויות חלפים ותיקונים. בעוד מערכות סולריות "רגילות" זוכות לאחריות של לפחות 20 שנה, ומרכיב התיקונים אינו דומיננטי, בתחום ה BIPV אין בעולם עדיין ניסיון ארוך שנים, ולא יכולנו לקבל נתונים קונקרטיים לגבי מרכיב זה.

ההתרשמות היא שבישראל לרוב בעלי העניין הפוטנציאלים עדיין אין מודעות וידע מספקים בתחום של ה-BIPV, סוגיה שהקשתה על איסוף הנתונים. רק לחברות ישראליות בודדות הייתה את היכולת להכוון ולתת יעוץ בעל ערך. מידע התקבל מספקים אירופאים, גם בנושאי מחירי הציוד ההיקפי וגם בנושאי עלות ההתקנה והתחזוקה.

כל נתוני הבסיס הללו, אשר שימשו אותנו לביצוע החישובים הכלכליים, מוצגים בפרק 4.2.1.

3.3.2 חישוב החזר השקעה

ע"מ לחשב את זמן החזר ההשקעה (Return of Investment (ROI (ראו פרק 4.2.2.4), חושבו עלויות ההתקנה של המערכת (Capex, or capital expenditure), אליהן נוספו עלויות התחזוקה השנתיות (Opex, or operational expenditure). אל מול סכום זה חושבו

[ה] תשלום שקבעה רשות החשמל במסגרת הסדרת "מונה נטו" הנובע מהצורך של חברת החשמל לבצע איזון ברשת בשל כניסת אנרגיות בעלות הספק לא קבוע (Intermittent). התשלום הינו בגובה 1.5 אג"ח עבור כל קוט"ש שמוזרם לרשת.

[ו] קבלן הנותן הצעת מחיר המגלמת את כלל מרכיבי העלות, מהציוד, דרך ההתקנה והחיווט, ועד למסירה,

ההכנסות או החיסכון השנתי מייצור חשמל ע"י ה-BI(PV). זמן החזר ההשקעה הוא מספר השנים שחולף עד הגעה לשוויון בין העלויות וההכנסות.

משוואה 4:

$$\frac{P.V\ capex + \Sigma opex(t=20)}{P.V\ \Sigma[solar\ income\ (t=20)]}$$

כאשר P.V = Present Value . חישוב זמן החזר ההשקעה בוצע לאורך תקופת פרויקט של 20 שנה- זוהי תקופת האחריות המקובלת בפאנלים סולריים "קונבנציונליים". בתחום ה- BIPV אין עדיין מספיק ניסיון בשוק העולמי, ומרבית החברות מציעות אחריות של 5 -10 שנים בלבד. עם זאת, בטווח זמן של 5-10 שנים אין כדאיות לפרויקטים של BIPV. לכן, בחרנו להאריך את משך המדידה ל- 20 שנה.

הסכומים הוצמדו לאינפלציה שנתית ממוצעת בגובה 2%.

3.3.3 תועלות חיצוניות ומשקיות

שימוש בדלקי מאובנים מביא לפגיעות רבות וממושכות בסביבה ובבריאות. שימוש באנרגיות מתחדשות מביא לצמצום פליטות וזיהום, הינו בר-קיימא יותר, ובעל טביעת רגל סביבתית קטנה בכמה סדרי גודל לעומת שימוש בדלקי מאובנים. כיום, מחירי החשמל והאנרגיה בישראל אינם כוללים את מלוא העלויות החיצוניות להן גורם השימוש בדלקי מאובנים [104]. הבלו על החשמל, שמייצג חלק קטן מעלויות חיצוניות אלו, מהווה רק 1.7-4 אגורות (5%) ממחיר קוט"ש שמיוצר [105]. מחירים אלו בד"כ נמוכים יותר מאשר במדינות מפותחות רבות, בהן עלויות חיצוניות מגולמות במחירי האנרגיה באופן חלקי או מלא. התועלת החיצונית של אנרגיית שמש היא 0.148 ₪ לקוט"ש נחסך [ז].

כמו כן, לפי דו"ח הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות [106], בהינתן בניית תחנת כוח סולארית בהספק של 200 MW התועלות המשקיות הן 0.413 ₪ לקוט"ש. ראו עמוד 48 לוח 1, עמודת PV סמוך לצריכה (BIPV מותקן על בניינים היכן שהחשמל נצרך), בדו"ח הנ"ל, בניכוי העלות החיצונית מזיהום אויר שכבר חושבה על ידנו בנפרד בעבודה זו, 0.413=0.491-0.078 ₪. אנו עשינו שימוש בתועלת המשקית שחושבה בדוח הוועדה, על אף שהיא מתייחסת לתחנות כוח ואילו אנו בודקים מקרה של התקנות בחזיתות מבנים. אנו מעריכים כי

בכדי להגיע לחיסכון משמעותי למשק ולאפשר אי התקנת חוות סולאריות על חשבון שטחים פתוחים בנגב, יהיה צורך בהתקנה מסיבית של PV על גבי בניינים בכל רחבי הארץ ולשם כך

[ז] NOx: 0.92 gram/kWh (2017), 26016 ils/ton(2018) ; SO2: 0.77 gram/kWh (2017), 44923 gram/ton (2018); PM (average): 0.04 gram/kWh (2017), 77033 ils/ton (2018); CO2: 614 gram/kWh (2017), 121 ils/ton (2018).

המשרד להגנת הסביבה, עדכון ערכי העלויות החיצוניות, של מזהמי האוויר וגזי חממה ל-1.1.2018.

חברת החשמל, דין וחשבון סביבתי לשנים 2016-2017.

מומלץ להוביל תכנית לאומית הכוללת תמריצים על בסיס התועלות המשקיות שיניב הפתרון הסולרי על גבי חזיתות המבנים. בנתוני העבודה להלן, נדרשת התקנה של BIPV בסדרי גודל של מאות בניינים (בין 300 ל-800, בהתאם לאחוז כיסוי שטח הבניין ויעילות הפאנל) ע"מ להגיע להספק של 200 MW.

בנוסף לחישוב החזר השקעה רגיל, ביצענו חישוב החזר השקעה אשר לוקח בחשבון תועלות אלו למדינה (ראו פרק 4.2.2.7). או במילים אחרות, לכל קוט"ש שמיוצר ע"י מערכות ה-BIPV שבחנו, הוספנו לתעריף את התועלות החיצוניות והמשקיות.

משוואה 5:

$$\frac{P.V\ capex + \Sigma opex(t=20)}{P.V\ \{\Sigma[solar\ income\ (t=20)] + External\ benefits\}}$$

3.3.4 בדיקות רגישות לניתוח הכלכלי

במסגרת הניתוח בחנו גם כיצד ישפיעו שינויים במספר פרמטרים על התוצאות. בבדיקות הרגישות התייחסנו ל-ROI רגיל, ללא תועלות החיצוניות והמשקיות. הפרמטרים שנבדקו הם:

שיעור היוון- במחקר עבדנו עם שער היוון של 2%. במסגרת ניתוח הרגישות בחנו גם שיעור היוון של 3%.

מחיר החשמל – במחקר עבדנו עם ההנחה שמחיר החשמל אינו צפוי להשתנות, ואולם כאן נבדוק גם מה היה קורה אילו מחיר החשמל היה גבוה יותר ב 15% ממחירו היום.

מחיר הציוד והמערכות – השוק הסולרי לא מפסיק להתפתח וכתוצאה מכך, מחירי המערכות יורדים בקצב מהיר. בנוסף, שוק ה BIPV בישראל הינו בתולי ומחירי העבודה גבוהים יחסית בהשוואה לעולם. לפיכך, בחנו גם תסריט בו מחיר המערכות, הציוד וההתקנות יורדים ב 20% בהשוואה למצב כיום.

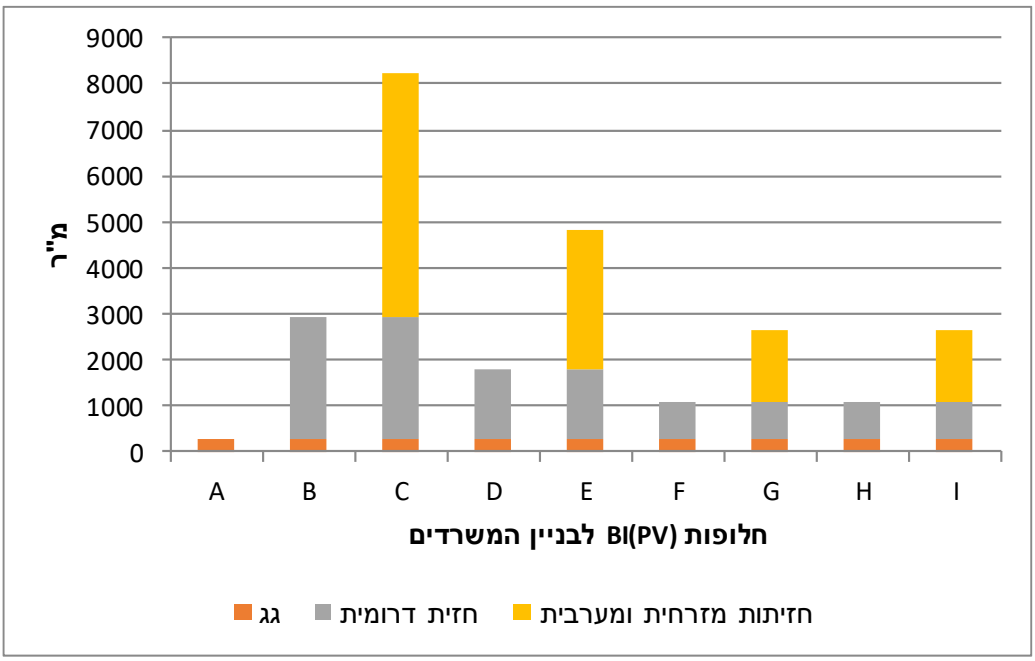
4 תוצאות ודיון בתוצאות

פרק זה מורכב משלושה חלקים עיקריים:

- פרק 4.1, בוחן סימולציה אנרגטית תיאורטית לחישוב ייצור חשמל בחלופות ה-BIPV של בניין המשרדים. חישובים מפורטים מופיעים בנספח 10.3.
- בפרק 4.2, נאספו נתוני עלויות, הכנסות והתכנות ביצוע; מהם חושבו החזרי ההשקעה בחלופות ה-BIPV של בניין המשרדים. חישובים מפורטים מופיעים בנספח 10.4.
- פרקים 4.3-4.6 דנים בהשלכות הרחבות יותר של תוצאות המחקר.

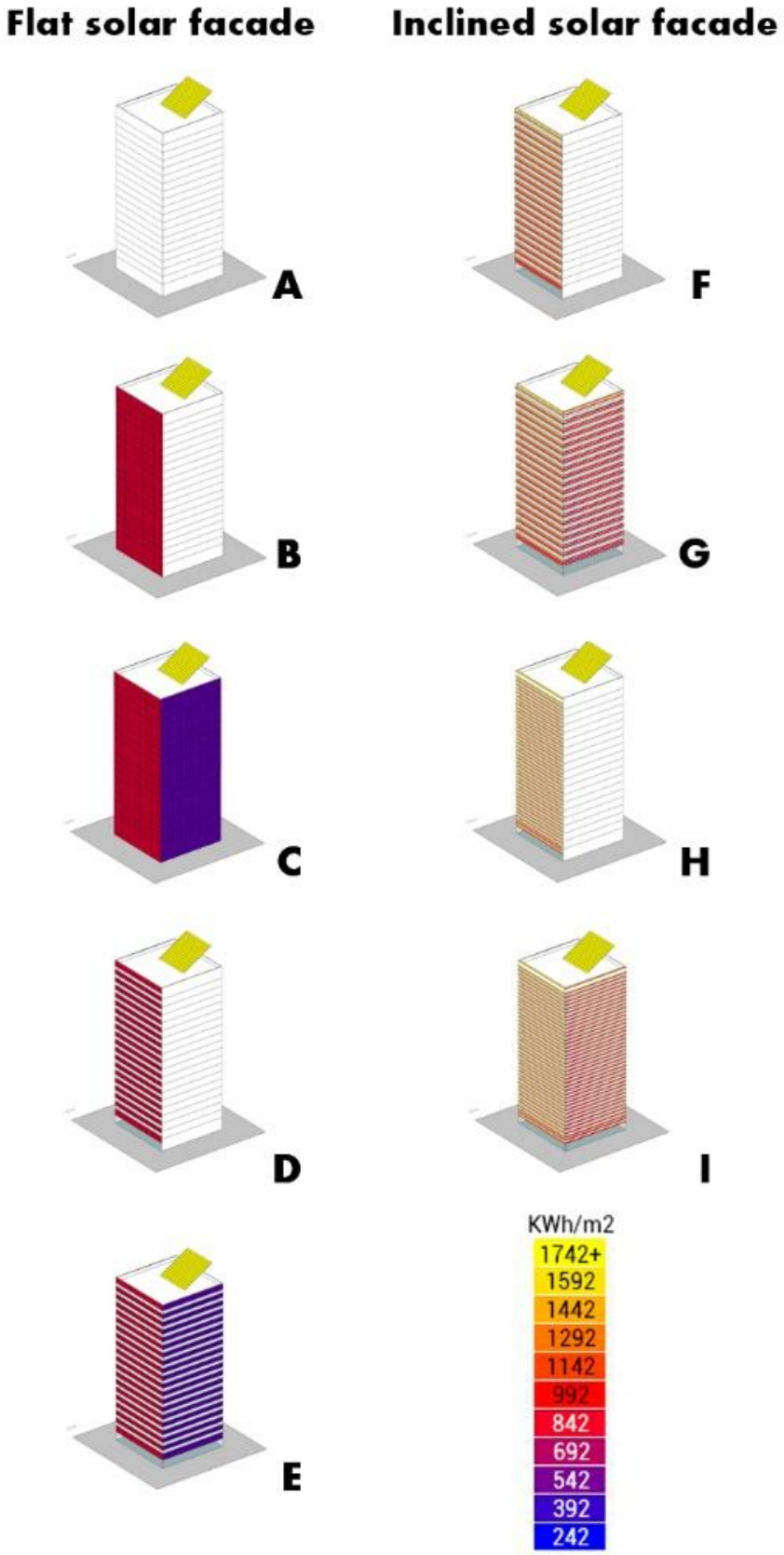
4.1 סימולציה אנרגטית לבחינת חלופות ה-BIPV של בניין המשרדים

בתחילה, חושבו שטחי המתקנים הפוטו-וולטאים בכל חלופה (ראו תרשים 42). כצפוי, ניתן לראות כי קיים הבדל ניכר בשטח בין החלופות בהן יש שימוש רק בגג ובחזית הדרומית (B, D, F, H) לבין החלופות הזהות להן בחתך אך שיש בהן שימוש גם בחזית המזרחית והמערבית (C, E, G, I). בחלופה C, בה כל שטח החזיתות המזרחית, הדרומית והמערבית עטופים BIPV, שטח המתקנים הפוטו-וולטאים הוא הכי גדול. לחלופות F-I, אשר מציגות חזית תלת-ממדית לניצול מיטבי של קרינת השמש שטח קטן יותר, ע"מ לצמצם הצללות הדדיות של המערכת אשר תפגע ביעילותה, וע"מ לצמצם את מחיר ההתקנה.



תרשים 42: היקף השטחים הסולריים בחלופות BI(PV) של בניין המשרדים.
הערכים במ"ר. כתום- גג, אפור- חזית דרומית, צהוב- חזיתות מזרחית ומערבית.

תוצאות הסימולציה התקבלו באופן גרפי על גבי מודלים ממוחשבים של החלופות השונות ובקבצי נתונים בתוכנת אקסל בעבור כל חלופה וכל נקודה שמופתה במודל. בתרשים 43 ניתן לראות את היקף הקרינה (ממוצע שנתי $kWh/m^2/year$) על הגג והחזיתות בכל חלופה.

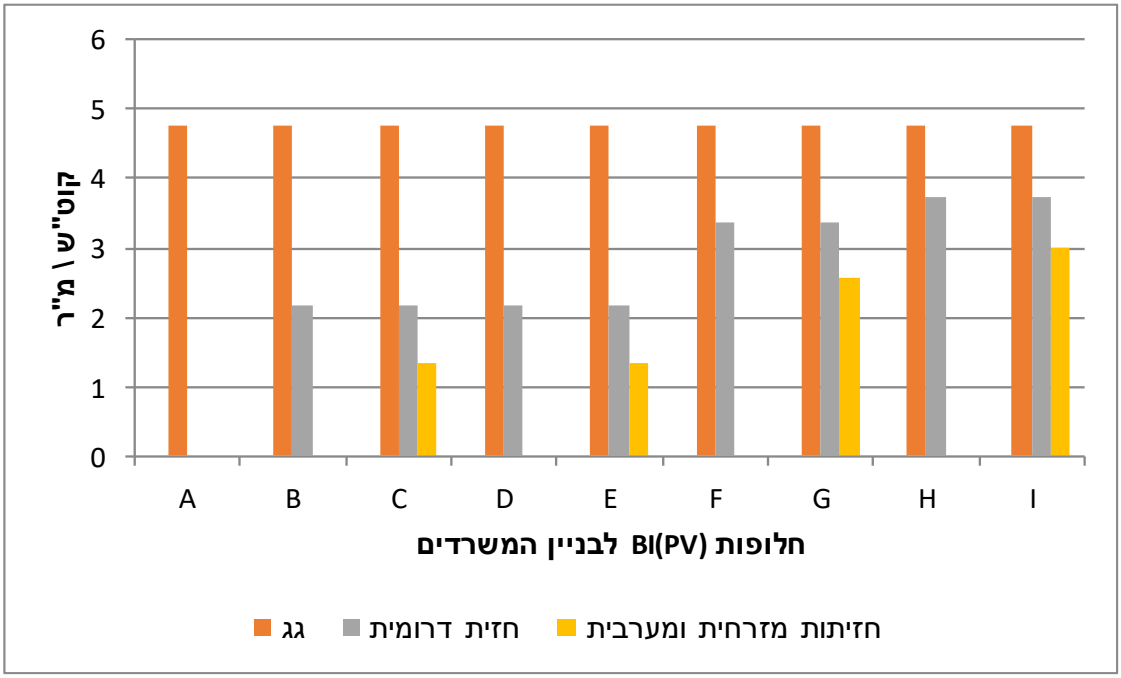


תרשים 43: כמות הקרינה (Incident Solar Radiation) השנתית על גבי המשטחים הסולריים הנבדקים בכל אחת מחלופות ה-BIPV של בניין המשרדים.

בעמודה השמאלית החלופות בהן נבדקו התקנות סולריות ורטיקליות בחזית. בעמודה הימנית החלופות בהן נבדקו התקנות סולריות בהטיה של 30% על החזית. ערכים בממוצע שנתי (קוט"ש\מ"ר\שנה).

כצפוי, מניתוח ממוצע הקרינה היומית על המשטחים הסולריים, נמצא שהגג בהטיה 30% לדרום (בנין הייחוס) הינו המשטח החשוף ביותר לשמש עם ממוצע יומי של 4.765 Kwh/m^2 (ראו תרשים 44).

ממוצע הקרינה היומי על מ"ר חזית דרומית ורטיקלית שטוחה מגיע לכ-45% מכמות הקרינה על משטח סולרי עם הטיה של 30° לדרום, על גג בניין הייחוס (ראו עמודות אפורות אל מול כתומות בחלופות E-B בתרשים 44). ממוצע הקרינה היומי על מ"ר של חזית מזרחית ורטיקלית הינה כ- 28% מבניין הייחוס הנ"ל (ראו עמודות צהובות אל מול כתומות בחלופות C ו-E בתרשים 44).



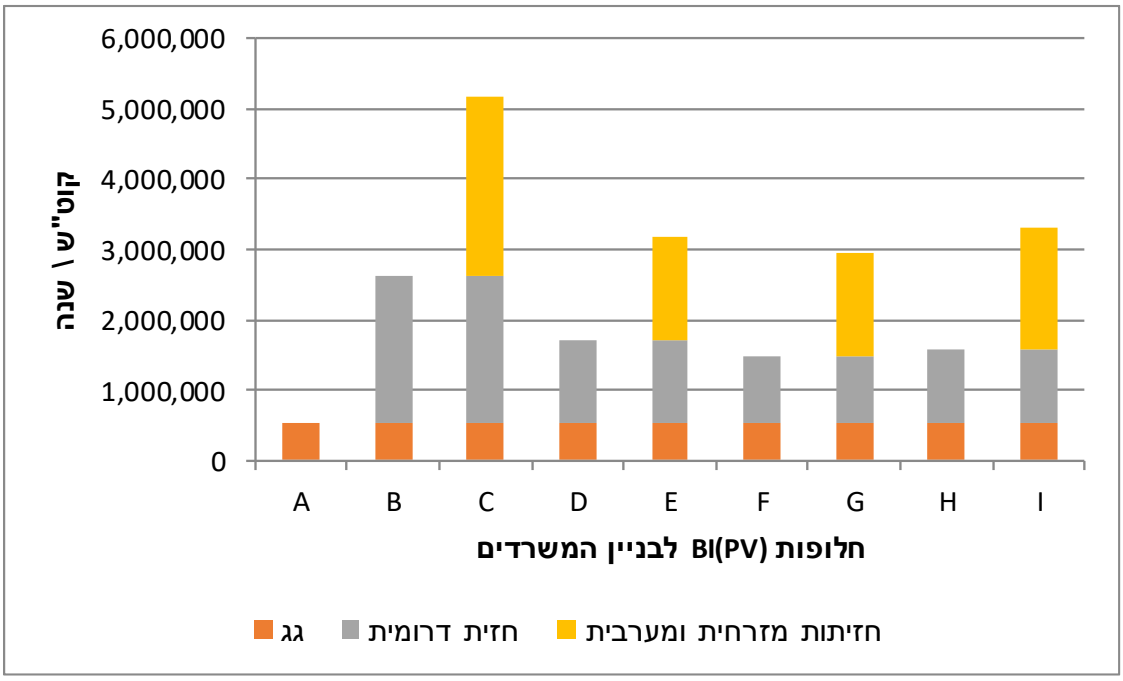
תרשים 44: ממוצע חשיפה לקרינה יומית בגג ובחזיתות למ"ר יישום סולרי, בחלופות ה-BIPV של בניין המשרדים.

Incident solar radiation. הערכים היומיים מוצגים בקוט"ש\מ"ר. כתום- גג, אפור- חזית דרומית, צהוב- חזית מזרחית או מערבית. התוצאות מוצגות לחלופות A-I שנבחנו.

בדומה למחקרים קודמים של הצוות [107], נמצא שע"י הטיה של 30° של המשטחים הסולריים בחזית ניתן לשפר החשיפה של החזית לקרינה סולרית. האופטימיזציה הגיאומטרית מהווה שיפור של 70% בחזית דרומית ביחס להתקנה ורטיקלית שטוחה, ו- 125% בחזית מזרחית ומערבית. אופטימיזציה מסוג זה יכולה לצמצם את הפער בכמות הקרינה למ"ר בין החזית להתקנה סולרית על הגג. לדוגמא, בחלופה I, ממוצע הקרינה היומי למ"ר בחזית הדרומית הינו 80% מממוצע הקרינה היומית על המשטח הסולרי על גג מבנה הייחוס עם הטיה 30° לדרום (ראו עמודות אפורות אל מול כתומות בחלופות F-I ב בתרשים 44). כמו כן, ממוצע הקרינה למ"ר על חזית מזרחית עם הטיה של 30° מעלות הינה לפחות 63% מזו המתקבלת

למ"ר עם מפנה דרומי מוטה ב- 30° על הגג (ראו עמודות צהובות אל מול כתומות בחלופות G ו-I ב בתרשים 44).

כמות הקרינה השנתית לה זוכים המשטחים הסולאריים בבניין שלם בחלופות השונות נבדקה (ראו תרשים 45), בהתחשב בהבדלים בין החלופות הן בכמות הקרינה והן בשטח היישום. אמנם, יש שיפור בכמות הקרינה הסולרית למ"ר בחזיתות עם הטיה של 30° של המשטחים הסולריים (חלופות F-I) לעומת חזיתות ורטיקאליות (חלופות B-E) (ראו עמודות צהובות ואפורות בחלופות תרשים 44). אולם, חלופה C עם יישום סולרי אנכי, חשופה לפי 1.6-1.8 קרינה סולרית לעומת חלופות G ו- I עם יישום סולרי במשטחים המוטים בזווית של 30° (ראו עמודות מצטברות בחלופות C, G ו-I תרשים 45). זאת, בשל הבדלים ניכרים בשטח הסולארי, למעלה מפי 3 בחלופה C ביחס לחלופות G ו-I (ראו עמודות מצטברות בחלופות C, G ו-I תרשים 42). כאמור מגבלת השטח במשטחים הסולריים המוטים בזווית, מבוססת על הרצון להימנע ככל האפשר מאפקט של הצללה בין המשטחים תוך צמצום שטח ועלויות התקנה.
למרות כי שטח המתקנים הפוטו-וולטאים בחלופה E כמעט כפול מזה של חלופות G ו-I (תרשים 42), כמות הקרינה השנתית בחלופות אלו זהה (תרשים 45). זאת הודות להטיה האופטימלית של הפאנלים בחלופות G ו-I.



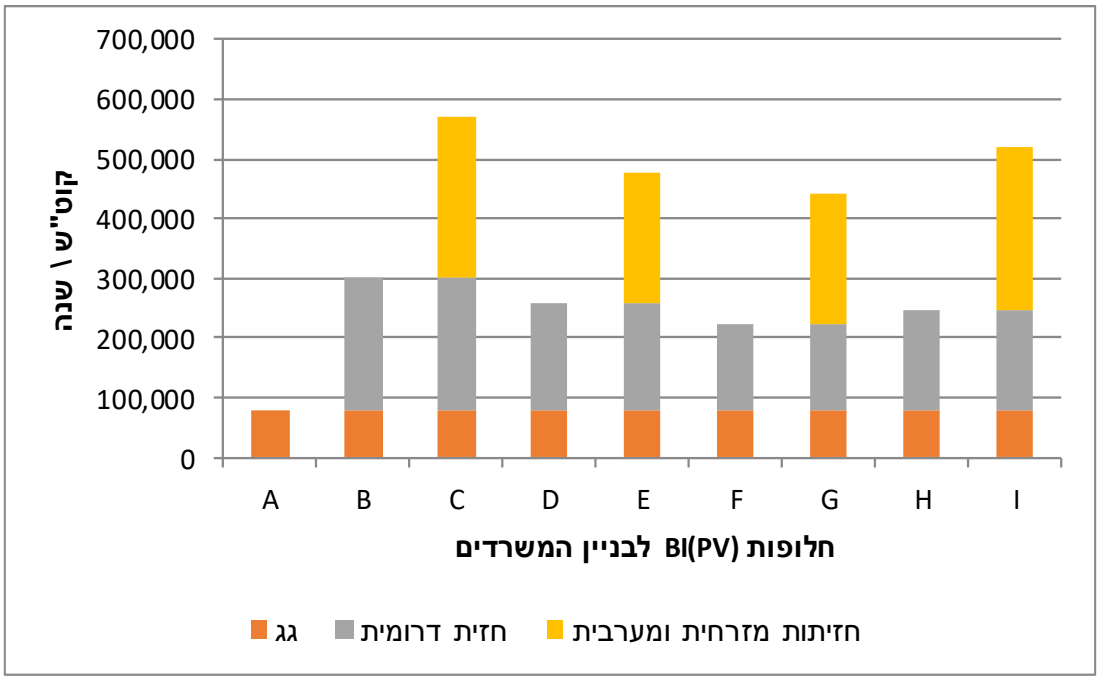
תרשים 45: כמות קרינה שנתית לחלופות ה-BIPV של בניין המשרדים.
Incident solar radiation. הערכים מוצגים בקוט"ש\שנה. כתום- גג, אפור- חזית דרומית, צהוב- חזית מזרחית ומערבית, התוצאות מוצגות לחלופות A-I שנבחנו. יש לשים לב שלא מדובר על ייצור בפועל של חשמל.

פוטנציאל יצור האנרגיה הסולארית השנתי חושב על פי משוואה 3, כשקלול של פרמטרים שונים, המשלבים את התוצאות הקרינה כפי שהתקבלו בסימולציה עם מאפייני האזור והתכנון

ליישום הטכנולוגיה הסולרית בחלופות השונות. בשלב זה כאמור ללא התייחסות לצל ממבנים וצמחיה באזור וללא שיקולי עלות.

החזית הדרומית מייצרת פי 2-4 אנרגיה לעומת הגג במבנה הייחוס. והחזית המזרחית/מערבית **כל אחת** מייצרת 40-70% יותר אנרגיה לעומת הגג במבנה הייחוס.

מבחינה כמותית, פוטנציאל יצור האנרגיה הסולארית השנתי היה הטוב ביותר בחלופות עם שימוש בכל החזיתות והגג קרי חלופות C, E, G, I (ראו תרשים 46). חלופות אלו ייצרו פי 6-7.3 אנרגיה לעומת ייצור אנרגיה על הגג בלבד במבנה הייחוס A. בחלופות המובילות, בהן יש שימוש בחזית המזרחית והמערבית, תרומת חזיתות אלו יחד כ- 50% מסה"כ פוטנציאל יצור האנרגיה בחלופות אלו. בחלופות המשתמשות רק בחזית הדרומית והגג, קרי חלופות B, D, F, H יש צפי ליצור פי 2.8-3.8 מיצור האנרגיה על הגג בלבד במבנה הייחוס. או במילים אחרות, יישום BIPV על חזיתות מזרחיות ומערביות בנוסף לגג ולחזית הדרומית, **מכפיל** את פוטנציאל יצור האנרגיה הסולארית של מבנה משרדים טיפוסי.



תרשים 46: פוטנציאל ייצור אנרגיה סולארית שנתית לכל המבנה ע"פ חלופות ה-BIPV של בניין המשרדים.
הערכים מוצגים בקוט"ש\שנה. כתום- גג, אפור- חזית דרומית, צהוב- חזית מזרחית ומערבית. התוצאות מוצגות לחלופות A-I שנבחנו.

מבין ארבעת החלופות המובילות, פוטנציאל יצור האנרגיה הגבוה ביותר התקבל בחלופה C , כאשר על החזיתות יש התקנה שטוחה של Thin film CI(G)S , שקוף למחצה בחלון ואטום מתחת ומעל. החלופה השנייה הכי טובה היא חלופה I , בה מתקן סולרי המחובר לחזיתות בזווית 30° מעלות של Polycrystalline. מבין החלופות המבטיחות, ניתן לזהות שחלופות G ו-I מגיעות לתוצאות יצור אנרגיה טובות ע"י שימוש בשליש מהשטח הסולרי (במ"ר) של חלופה

C, (thin-film וורטיקלי) ובחצי מהשטח הסולארי של חלופה E (poly-crystalline וורטיקלי).
זאת מכיוון שחלופות G ו-I עושות שימוש גם בטכנולוגיית poly-crystalline שיעילה יותר בהמרה אנרגטית וגם בהטיה אופטימאלית של הפאנלים בחזיתות ב- 30° מעלות לכיוון השמיים.

חלופה B מייצרת 15% יותר חשמל לעומת חלופה D (ראו תרשים 46). זאת, מכיוון שמצד אחד יעילות הפקת החשמל הממוצעת למ"ר בחלופה B היא בסביבות 75% מזו של חלופה D (ראו פרק 3.2.1.3), ומצד שני השטח הסולארי המותקן בחלופה D הוא בסביבות 60% מהשטח של חלופה B (ראו תרשים 42).

על אף שכמות הקרינה השנתית הכוללת , כפי שהתקבלה בסימולציות האקלימיות בהתחשב בשטח היישום והחשיפה לקרינה, הייתה הגבוהה ביותר בחלופה C- פי 1.6 מהחלופה הבאה אחריה – חלופה I , יתרונה מול חלופה זו בכמות האנרגיה המיוצרת בשנה מצטמצם ל-9% בלבד. ישנן מספר סיבות לכך: יעילות המרת קרינה לחשמל (r) של thin-film CI(G)S נמוך משמעותית לעומת טכנולוגיית c-Si, ומקדם ביצוע המערכת (PR) נמוך יותר של חזית לא מאוררת (C, G) ביחס לחזית מאוררת (E, I) (ראו תרשים 46).

בסיכומו של דבר, למרות כי בחלופה C שטח סולארי שגדול בלמעלה מפי 3 מזה של חלופה I (תרשים 42), היקף יצור האנרגיה של הראשונה גבוה ב-9% בלבד (תרשים 46). זאת, הודות להטיה האופטימלית של המשטחים הסולאריים וליעילות מערכת גבוהה יותר בחלופה I.

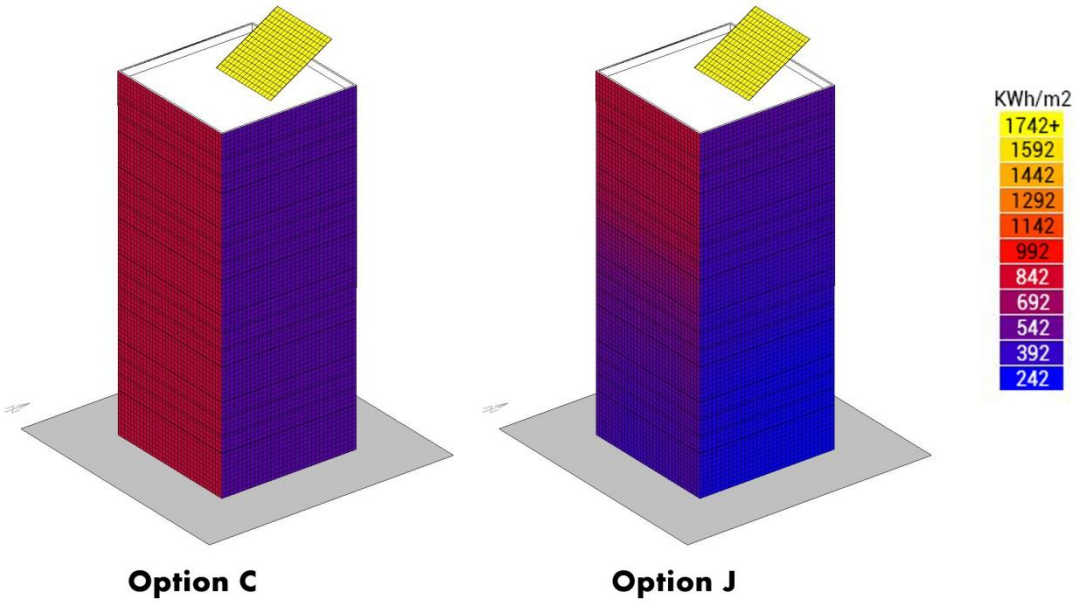
4.1.1 תיקוף התוצאות

לצורך תיקוף תוצאות הסקר הושוו תוצאות הקרינה מהמודל הממוחשב עם מחקרים ישראלים נוספים עדכניים הממפים את כמות הקרינה בארץ על משטחים אנכיים ואופקיים. תוצאות הסימולציה שהתקבלו נמוכות בהשוואה לחישובים בעבור ירושלים מהמחקר Faiman 2000 [99], אולם מחקר זה התייחס למקדם החזרה גבוה (אלבדו 0.3) מהקרקע ואילו בסקר זה לא נכללה כל קרינה מוחזרת מהקרקע בשל אופיו של ההקשר העירוני. במקרים בהם ניתנה במחקר של Faiman 2000 התפלגות לסוגי הקרינה השונה, כך שניתן להשוות בצורה ברורה בין חישובי קרינה ישירה ומפוזרת, הקרינה הייתה גבוהה ב-15% מאשר אצלנו. התאמה גבוה עוד יותר נמצאה במחקר עדכני יותר Vulkan 2018 המתייחס לעיר ראשון לציון ולמקדמי החזרה באופן דומה (וללא התחשבות בקונטקסט עירוני) [96]- התוצאות גבוהות ב-11% מאלו שלנו. ניתן להניח שההפרשים בסימולציות המחקרים השונים נובעים ממודלים מתמטיים שונים עליהן בנוי אלגוריתם החישוב ומהגדרה שונה של חופת השמים ומקדמי ההחזרה. תוצאות המודל הממוחשב בסקר זה הינם השמרניות מבין המחקרים שנלמדו וניתן להעריך שמדידות שטח ישקפו תוצאות טובות עוד יותר.

תיקוף נוסף לתוצאות מופיע בפרק 4.2.2.5, בהשוואה בין חלופה D שלנו לבין תוצאות אמת מבניין מת"ף שהוקם בראשל"צ.

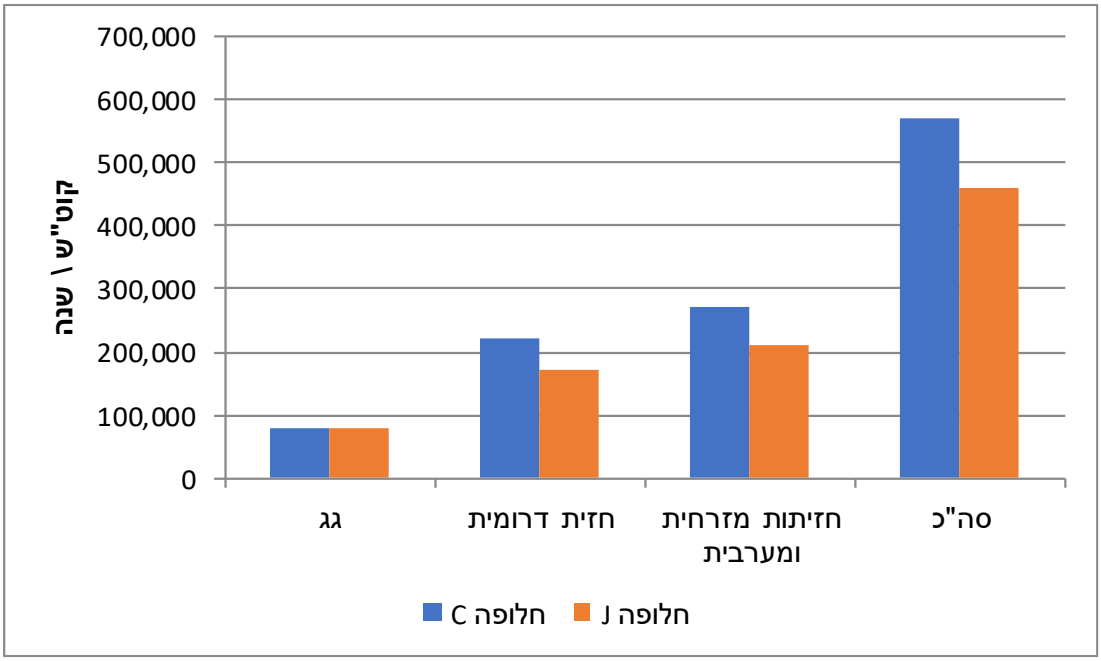
4.1.2 מקדם הפחתה לקונטקסט עירוני

מתקנים פוטו-וולטאים מושפעים מהצללות הנגרמות מסביבתם- טופוגרפיה, צמחיה ומבנים. מוצרי BIPV על חזיתות צפויות להיות מושפעים יותר מהצללות הנגרמות מקונטקסט עירוני, לעומת מתקנים פוטו-וולטאים על גגות. זאת מכיוון שבאופן טבעי גגות גבוהים יותר מהחזיתות. אם נדייק יותר, תחתית החזיתות תהיה מושפעת מהצללות בעוד לרוב החלק העליון של החזיתות לא יושפעו בדומה לגג. גובה ההשפעה תלוי כמובן בגובה הקונטקסט העירוני הסמוך. בסימולציה אשר בחנה קונטקסט עירוני קיצוני (ראו תרשים 41), נמצא שהקומות התחתונות רגישות יותר להשפעה מההקשר העירוני בדומה למחקרים נוספים הבוחנים השפעה אורבנית על יצור אנרגיה סולרית [96] (ראו תרשים 47). בחזית דרומית יצור האנרגיה בקומת המסד צפוי להיות 57% מיצור האנרגיה בקומות העליונות ואילו ההשפעה בחזית מזרח (ומערב) נמוכה יותר וקומות המסד צפויות ליצר 63% מיצור האנרגיה בקומות העליונות. סימולציה מסוג זה יכולה להיות גם כלי לבדיקת כדאיות של יישום על חלקים ספציפיים מתוך החזית ביחס לתנאי שטח מדויקים. במקרה של יישום BIPV על הבניין שלנו בקונטקסט עירוני קיצוני, ניתן לראות כי אין הצדקה כלכלית ואנרגטית להתקנת BIPV עד קומות 7-8 בחזיתות מזרח ומערב. כמו כן, כדאיות ההתקנה בקומות 7-8 בחזית דרום יורדת ומשתווה לזו של חזיתות מזרח ומערב ללא קונטקסט עירוני (או בקומות הגבוהות של חזיתות מזרח ומערב עם קונטקסט).



תרשים 47: ויזואליזציה של פוטנציאל ייצור האנרגיה השנתי עם קונטקסט עירוני (הצללות).
*כמות ופריסת הקרינה Incident Solar Radiation על גבי המשטחים הסולריים הנבדקים, משמאל- חלופה **C** ללא הקשר עירוני, מימין- חלופה J הזהה לחלופה C אך מושפעת מסביבת מגדלים צפופה. ערכים בממוצע שנתי (קוט"ש\מ"ר\שנה).*

כצפוי, נמצא שלהקשר העירוני אין השפעה על יצור האנרגיה בגג, אך יכולה להיות לו השפעה על היצור בחזית. סה"כ האנרגיה המיוצרת בחזיתות מזרח, מערב ודרום בסביבת המגדלים בצפיפות שיא צפויה להיות 77% מסה"כ האנרגיה הסולרית שתיוצר בסביבה נטולת מבנים שכנים (ראו תרשים 48). בשקלול הכולל, המתחשב גם ביצור האנרגיה על הגג שאינו משופע מצל מבנים שכנים, כל החלופה צפויה ליצר 80% מהאנרגיה שיוצרה ללא הקשר עירוני.



תרשים 48: פוטנציאל ייצור האנרגיה השנתי עם קונטקסט עירוני (הצללות).
כחול- חלופה C (ללא קונטרסט עירוני). כתום- חלופה J (זהה לחלופה C אך מושפעת מסביבת מגדלים צפופה אשר מצלים על הבניין). הערכים מוצגים בקוט"ש\שנה.

4.2 ניתוח כלכלי לבחינת חלופות ה-BIPV של בניין המשרדים

4.2.1 הנחות עבודה וריכוז נתוני בסיס לניתוח הכלכלי

בתת-פרק זה יוצגו הנחות עבודה, עלויות הציוד, התקנה והתחזוקה לכל החלופות שנבחרו והוצגו בפרקים הקודמים. על סמך הנתונים והנחות העבודה הללו, התבצעו החישובים הכלכליים העיקריים שבפרק 4.2.2. כל המחירים המופיעים ללא מע"מ.

4.2.1.1 הנחות עבודה

- בחלופות I-B בהם היישום הסולרי הינו הן על הגג והן על החזית ההתקנה מתבצעת בשני האזורים במקביל.
- התקנת מערכות BIPV על חלונות או משופעות בחזיתות יכולה להקטין את כמות האור הנכנס לחלופות הנחקרות בהשוואה לבניין הייחוס. לכך יכולה להיות השפעה על צריכת החשמל בבניינים הנחקרים, בהשוואה לבניין הייחוס. למשל, בבניינים הנחקרים

צריכת החשמל לתאורה יכולה להיות גבוהה יותר, וצריכת החשמל לקירור יכולה להיות נמוכה יותר בהשוואה לבניין הייחוס. במסגרת המחקר הנוכחי השפעות אלו לא נבחנו לעומק ויש מקום לבחון אותן במחקרי המשך. בפרק 4.3 הנושא נידון, ויש חישובים לגבי חלופות I-H.

- נתוני קרינה- לרוב השתמשנו בנתוני הקרינה כפי שהתקבלו בפרק הסימולציה. בחלופות על החזיתות השטוחות (E-B) השתמשנו בנתוני קרינה מתוך מחקר וולקן [96]. מדובר על נתוני קרינה הגבוהים ב-11% מאלו שהתקבלו בסימולציה. לאור התוצאות אשר התקבלו בבניין מת"ף, נראה כי נתוני קרינה אלו קרובים יותר למציאות (ראו השוואה בין חלופה D ובניין מת"ף, פרק 4.2.2.5).

4.2.1.2 עלויות

- מחיר החשמל לאורך תקופת הפרויקט נקבע כקבוע [ח], ומבוסס על ממוצע תעריפי תעו"ז ועומד על 0.4556 ₪\קוט"ש (ללא מע"מ) [ט] [י].
- שער היוון - 2%. שער היוון זה מקובל בעבודות דומות. ראו [108]. בניתוח הרגישות (ראו פרק 4.2.3) נבחן גם שער היוון של 3% [98,109].
- תשלום של דמי איזון בגובה 0.015 ₪ לקוט"ש לחח"י באסדרת "מונה נטו" [103].
- שער חליפין מהתאריך 11.6.2018 : 3.58 ש״ח לדולר ; 4.22 ש״ח לאירו.
- עלויות הייבוא בגובה 12% מעלות הציוד (התקבלה הצעה של מנכ"ל חברת Aluminum Construction "רמי בונה". התקבלו גם הערכות האחרות ונלקחה ההערכה הזולה ביותר)
- תועלות חיצונית לייצור חשמל פוטו-וולטאי: 0.14809 ש״ח\קוט"ש, על בסיס שקלול המקדמים המופיעים ב"עדכון ערכי העלויות החיצוניות, של מזהמי האוויר וגזי חממה ל-1.1.2018, המשרד להגנת הסביבה" וב"חברת החשמל, דין וחשבון סביבתי לשנים 2016-2017":

NOx: 0.92 gram/kWh (2017), 26016 ils/ton(2018) ;

SO_2: 0.77 gram/kWh (2017), 44923 gram/ton (2018);

PM (average): 0.04 gram/kWh (2017), 77033 ils/ton (2018);

CO_2: 614 gram/kWh (2017), 121 ils/ton (2018).

[ח] לאחר בדיקת מגמות של 10 השנים האחרונות. המחיר לקוט"ש לתעריף כללי (כולל מע"מ) בשנת 2008 היה 0.5657 ₪ והוא זהה למחיר של שנת 2018. בין השנים המחיר עלה וירד כמה פעמים. בנוסף, בימים אלו נחתמת רפורמה במשק החשמל ולא ניתן לקבוע מה תהה השפעתה על מחיר החשמל העתידי.

[ט] חברת החשמל לישראל בע"מ, תעריפי החשמל לאספקה במתח גבוה, ממוצע תעו"ז חושב לפי כל העונות ובין השעות 05:00-19:00 בתוקף מ-15.1.2018

[י] ביצענו בדיקה כלכלית האם שימוש בתעריף תעו"ז דיפרנציאלי עפ"י שעות היממה וחודשי השנה עדיף כלכלית על שימוש בתעריף אחיד וממוצע. הבדיקה העלתה כי מתקבל הבדל זניח של כ-1% בלבד בין שתי הגישות, לכן בחרנו בתעריף אחד ממוצע

- תועלות משקיות נוספות על פי דו"ח הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות: 0.413 ש״ח\קוט"ש [106].
- כל העלויות, מחירים והחישובים לא כוללים מע״מ.
- מרכיבי העלות של התקנת BIPV הינם:
  - ציוד: סוג הפאנל ומחירו, כולל עלויות ייבוא, מוצרים נלווים כגון חיווט, ממירים ומערכת ניהול ובקרה.

הבדיקה נעשתה על סך העלויות (ציוד, התקנה, בקרה ותחזוקה) בחלופות אשר הוצגו בפרק 3.2.1.2. בתחום הסולרי בכלל וב-BIPV בפרט, קיימות מספר גרסאות של גדלי פאנלים המשתנים מחברה לחברה. כאשר המתכנן מבקש גדלים ייחודיים המתאימים למבנה ספציפי (custom made) עלות המוצר עולה משמעותית. לפיכך, השתדלנו להשתמש ככל הניתן בגדלים סטנדרטיים שמציע היצרן, ולעתים המשמעות היא שהכיסוי של החזית אינו מלא או שהוא גדול מהמתוכנן (כפי שהופיע בפרק הסימולציה, למשל בחתך 4). כיסוי לפי התוכניות המקוריות של החזית היה מפיק יותר אנרגיה, ואולם המחיר למ"ר היה עולה משמעותית – דבר שהיה מעלה את זמן החזר ההשקעה. במסגרת איתור המוצרים המתאימים ביותר, חיפשנו את השילוב האופטימלי של נצילות, שטח המתאים ביותר, ועלויות למ"ר.

  - התקנה- בסעיף זה עלות לתוספת התקנת המערכת הסולרית בלבד, ללא עלות התקנת רכיב המעטפת הסטנדרטי שמתקיימות גם בבניין הייחוס.
  - עלויות התחזוקה מורכבות משני רכיבים: ניקיון ותחזוקה מונעת.
    - **ניקיון-** ניקיון של BIPV המותקן על גבי חזיתות כולל בעיקר את רכיב השטיפה. כיוון שעלויות אלו זהות לעלויות ניקוי קיר מסך רגיל, אין כאן עלות נוספת ביחס לבניין הייחוס. יחד עם זאת, ישנה עלות נוספת של ניקיון ל-PV המוצב על הגג בכל החלופות, לעומת בניין הייחוס עלות הניקיון השנתית ל-PV המוצב על הגג היא 16.2 ₪ למ"ר [יא].
    - **תחזוקה מונעת-** לאחר התייעצות עם גורמי מקצוע בשוק, נלקחה עלות תחזוקה של פאנלים קונבנציונליים של 2€ (8.4 ₪) למ"ר (עבור ה-PV בגג וה-BIPV בחזיתות) [יב]. בוצע אימות לנתון זה עם ספק אירופי והמחיר נמצא בטווח הנכון.

[יא] לפי תשובתם של מספר רב של ספקי הפאנלים (למשל Sunpartner , Zigzag Solar ומספר חברות אחרות שלא נכללו בחישובים).

[יב] הצעה של משה גרפונקיל, ד"ר להנדסת חשמל, יועץ ומבצע פרויקטים בתחום הסולארי; וגם של Manuel Gil CEO Innova Solar.

- עלות בניית בניין משרדים היא בממוצע 4,672 ש״ח\מ״ר [ג][98]. בהנחה שמכפילים את עלות למ״ר בשטח ברוטו של בניין הייחוס: 21,200 מ"ר בנוי ברוטו (מתוכם רק 15,720 מ״ר הם שטחי משרדים), תהה עלות בניה 99 מיליון ₪.
- אנו מניחים שאין ייקור פרמיית ביטוח למבנה עקב הוספת BIPV. אמנם בארץ אין ניסיון עם הנושא, אולם כל המומחים והספקים מחו"ל איתם עבדנו, לא ציינו נושא זה. הוא אינו מופיע בעבודות בתחום מחו"ל (כולל בסקר חסמים ליישום BIPV שנערך בקרב בעלי עניין).

4.2.1.3 הכנסות

<u>תועלות המתקבלות מהיצרנות של הפאנלים (ראו פרק 3.3):</u>

- חסכון בהוצאות חשמל לפי אסדרת "מונה נטו" – ראו תרשים 51, ופרק 3.2 לפירוט החישובים.
- עלויות חיצוניות בגובה 0.148 ₪ לקוט"ש נחסך עקב חיסכון בפליטות גזי חממה וזיהום אויר [יד][110] (ראה תרשים 53).
- תועלות משקיות נוספות בגובה 0.413 ₪ לקוט"ש [טו] המתקבלות מהקמה של מספר רב של מבנים (דו"ח הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות [106]).

4.2.1.4 נתוני בסיס לחישובים הכלכליים של חלופות ה-BIPV לבניין המשרדים

נתונים הבסיס, אשר נדרשו לצורך החישובים הכלכליים של חלופות ה-BIPV לבניין המשרדים, נאספו, חושבו ורוכזו בטבלה 5.

<u>הערות לטבלה 5:</u>

- **שטח בתכנון האדריכלי-** לפי הנתונים בפרק 3.2, פרק 4.1, תרשים 40 ותרשים 42.
- **שטח כיסוי אפקטיבי-** שטח כיסוי ב-BIPV בתכנון האדריכלי לקח בחשבון כיסוי מקסימלי אפשרי. אולם, כיסוי מקסימלי מצריך ייצור פאנלים של BIPV בגדלים

[ג] עלות בניית בניין משרדים – בעבודתם של דר' דוד כץ וחגי קוט (מקור: 92) נמצא כי עלות בניה לבנין משרדים בישראל עומדת על 4,500 ש״ח למ״ר משרדים במחירי 2014. עפ"י מחירון דקל "המאגר המאוחד" לשנת 2018 (כרך א, עמוד יא) חל יקור של 5.3% במדד עליות הבניה למסחר ומשרדים דצמבר 2018 בהשוואה ל דצמבר 2012, וייקור של 1.47% באותו מדד בין דצמבר 2014 ודצמבר 2012. מכאן, כי בין דצמבר 2018 ודצמבר 2014 חל יקור של 3.83% במחירי הבניה למשרדים והמחיר הנכון לדצמבר 2018 עומד לפיכך על 4500*1.0383=4,672 ₪.

[יד] NOx: 0.92 gram/kWh (2017), 26016 ils/ton(2018) ; SO2: 0.77 gram/kWh (2017), 44923 gram/ton (2018); PM (average): 0.04 gram/kWh (2017), 77033 ils/ton (2018); CO2: 614 gram/kWh (2017), 121 ils/ton (2018).

המשרד להגנת הסביבה, עדכון ערכי העלויות החיצוניות, של מזהמי האוויר וגזי חממה ל-1.1.2018.

חברת החשמל, דין וחשבון סביבתי לשנים 2016-2017.

[טו] החישוב לתועלת למשק בגובה 0.413 ₪\קוט"ש חושבה כך: מתוך לוח 1 שבעמ' 49 שבדוח [106], נבחרה עמודת PV סמוך לצריכה (מתקן PV אשר סמוך למקום צריכת החשמל- זוכה לתועלת נוספת בשל מניעת אבדן חשמל ברשת ההולכה), עם תועלת של 0.491 ₪\קוט"ש. מתוך תועלת זו, הוחסרה התועלת בגין מניעת זיהום אוויר (0.078 ₪\קוט"ש). זאת מכיוון שתועלת זו כבר נספרת בעלויות החיצוניות שבבולט הקודם.
0.491-0.078 = 0.413 ₪\קוט"ש.

מיוחדים לבניין (custom made)- עובדה שמייקרת מאוד את עלות ה-BIPV ומאריכה באופן ניכר את זמן החזר ההשקעה. לכן, עבור הניתוח הכלכלי, בחזיתות נעשה שימוש אך ורק בפאנלים של BIPV בגדלים סטנדרטיים. לפיכך, שטח הכיסוי האפקטיבי עשוי להיות שונה משטח הכיסוי בתכנון האדריכלי, ובהתאמה מייצר כמות חשמל שונה.

- **שטח ברוטו**, הכוונה היא לשטח המערכת כולה, כולל תושבות (משמש לחישוב עלות המערכת למ"ר, ולניכוי עלות מעטפת רגילה). במידה ומצוין **שטח נטו**, הכוונה היא לשטח הפאנלים הסולאריים עצמם (משמש לחישוב ייצור חשמל בפועל)

- **עלות-** סה"כ עלות ההקמה של מערכות BI(PV) מורכבות מתת-העלויות הבאות: עלות למ"ר פאנל BI(PV), עלות ייבוא, עלות ציוד נלווה וחיבור של המערכת, ועלות התקנה. מחיר סה"כ עלות לא כולל תחזוקה (שמופיע בעמודה משמאל) ולא כולל עבודה בגובה שמשולמות ממילא בעת בניית קיר מסך. המחיר כולל את כל הציוד ועבודת ההתקנה הספציפית ל-BI(PV). עבור חלופה A, מדובר בעלות התקנת BAPV על הגג. עבור חלופות I-B, מדובר בעלות עבור BIPV בחזיתות בלבד, יש לזכור שבחישובים הסופיים לחלופות I-B, נכללו גם עלויות של BAPV על הגג.
  - **מחיר למ"ר לפאנל ₪** - לפי שער מיום 11.6.2018:
    - $1 = 3.58 ₪; €1 = 4.22 ₪.
  - **עלות הייבוא-** כאחוז ממחיר הפאנל למ"ר, הנוספת למחירו. אלא אם נכתב אחרת.
  - **עלות ציוד נלווה וחיבור של המערכת-** המחיר לא כולל תחזוקה ולא כולל עבודה בגובה שמשולמות ממילא בעת בניית קיר מסך.

  Wp- ההספק המקסימלי של המערכת שניתן להפיק מפאנל סולרי בתנאי טמפרטורה וקרינה קבועים מראש.

  עלות ציוד נלווה וביצוע חיבורים – חושבה לפי 2.1 ₪ ל Wp [טז].לדוגמה - עלות ציוד נלווה וביצוע חיבורים של מערכת עם הספק מקסימלי של 100 kWp, תהיה: 2.1 ₪ * 1000 * 100 = 210,000 ₪.

הערה: יש לשים לב כי בסימולציה האנרגטית מדובר על ניתוח תיאורטי, בעוד הניתוח הכלכלי בוצע על הצעות מחיר קונקרטיות של ספקי BI(PV). מכיוון שניסינו לשמור על עלויות נמוכות בניתוח הכלכלי, החלופות חושבו לפי שימוש בגדלי פאנלי BI(PV) סטנדרטיים ולא מותאמים אישית. לכן, יש שונות בין הסימולציה האנרגטית לבין הניתוח הכלכלי בטכנולוגיות שנבחרו בסופו של דבר לכל חלופה (p-Si או m-Si), בטכניקת היישום (חזית מאוררת או לא) וגם בהיקף השטחים הסולאריים בפועל.

[טז] הצעה של Laurent Petit, Sales & Marketing Building Division , חברת Sunpartner..

טבלה 5: חלופות BIPV לבניין והמוצרים שנבחרו בניתוח הכלכלי [יז].

חלופה	אפיון חלופה	יעילות	שם מוצר וספק/ יצרן	שטח כיסוי בחזית בתכנון האדריכלי	שטח כיסוי אפקטיבי בחזית	עלות					עלות תחזוקה וניקיון למ"ר לשנה	הערות
						פאנל BI(PV) למ"ר	ייבוא	ציוד נלווה וביצוע חיבורים	התקנה למ"ר	סה"כ למ"ר בנוי		
A	p-Si PV רגיל על הגג, מפנה דרומי, מונח בזווית 30° מעלות.	18%	Garfunkel [יח]	299 מ"ר בגג	299 מ"ר בגג	340 ש"ח	נכלל במחיר הפאנל		300 ₪	**640 ₪**	8.4 ₪ לתחזוקה ו- 16.2 ₪ לניקיון	שימוש בנתוני קרינה מפרק 4.1.
B	גג, חזית דרומית שטוחה, קיר מסך, Thin Film CI(G)S. 56% מהחזית אטומה והשאר ב- 20% שקיפות.	במצוע משוקלל 12.08% [יט]	Solibro Solar [כ] and Sanko Solar [כא]	2640 מ"ר בחזית דרומית	1986 מ"ר	510 ₪	12%	2.1 ₪ ל- Wp [כב]	1150 ₪ [כג]	**2000 ₪**	גג: 8.4 ₪ לתחזוקה ו- 16.2 ₪ לניקיון. חזית: 8.4 ₪ לתחזוקה.	נתוני קרינה מ- [96]. עבודת חיווט נספרה פעמיים. להערכתנו המשמעות זניחה.
C	בדומה ל- B, אך: גג+ חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית			7920 מ"ר בחזיתות	5957 מ"ר							
D	גג+ חזית שטוחה, חזית מאוורר .p-Si	17%	Garfunkel [כד]	1505 מ"ר בחזית דרומית	לא רלוונטי [כה].	הצעת קבלן לפרויקט turn key, לא התקבל פירוט של הרכיבים. התקבלו גם הצעות נוספות מפורטות יותר על ידי מציעים נוספים, אך משמעותית יותר יקרות [כו].				**930 ₪**	גג: 8.4 ₪ לתחזוקה ו- 16.2 ₪ לניקיון. חזית: 8.4 ₪ לתחזוקה.	נתוני קרינה מ- [96].
E	בדומה ל-D, אך: גג+ חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית			4515 מ"ר בחזיתות								

[יז] הסברים על כותרות העמודות בעמודים הקודמים.
[יח] הצעה של משה גרפונקיל, ד"ר להנדסת חשמל, יועץ ומבצע פרויקטים בתחום הסולארי.
[יט] פאנל אטום (56% משטח החזית)- יעילות המרה של 14.9%. פאנל עם 20% שקיפות (44% משטח החזית)- יעילות המרה של 8.5%. הממוצע המשוקלל יוצא 12.08% לכל החזית.
[כ] הצעה של Solibro Solar: Angelo Coscia , Product Manager PV Systems ו Junior Sales Coordinator , Darja Wagner.
[כא] הצעה של Bennie Pekel, Sanko Solar.
[כב] הצעה של Laurent Petit, Sales & Marketing Building Division , חברת Sunpartner.
[כג] הצעה של מנכ"ל חברת Aluminum Construction , רמי בונה כולל ניכוי של עלויות התקנת חשמל של Sunpartner.
[כד] הצעה של משה גרפונקיל, ד"ר להנדסת חשמל, יועץ ומבצע פרויקטים בתחום הסולארי.
[כה] לא רלוונטי. במקרה זה מכיון שהצעת המחיר שהתקבלה היא עבור שטח הכיסוי בתכנון האדריכלי ללא בדיקת השטח האפקטיבי.
[כו] Aluminum Construction (Alcon) and by Mila Plaza, Global Business Development of Onyx.

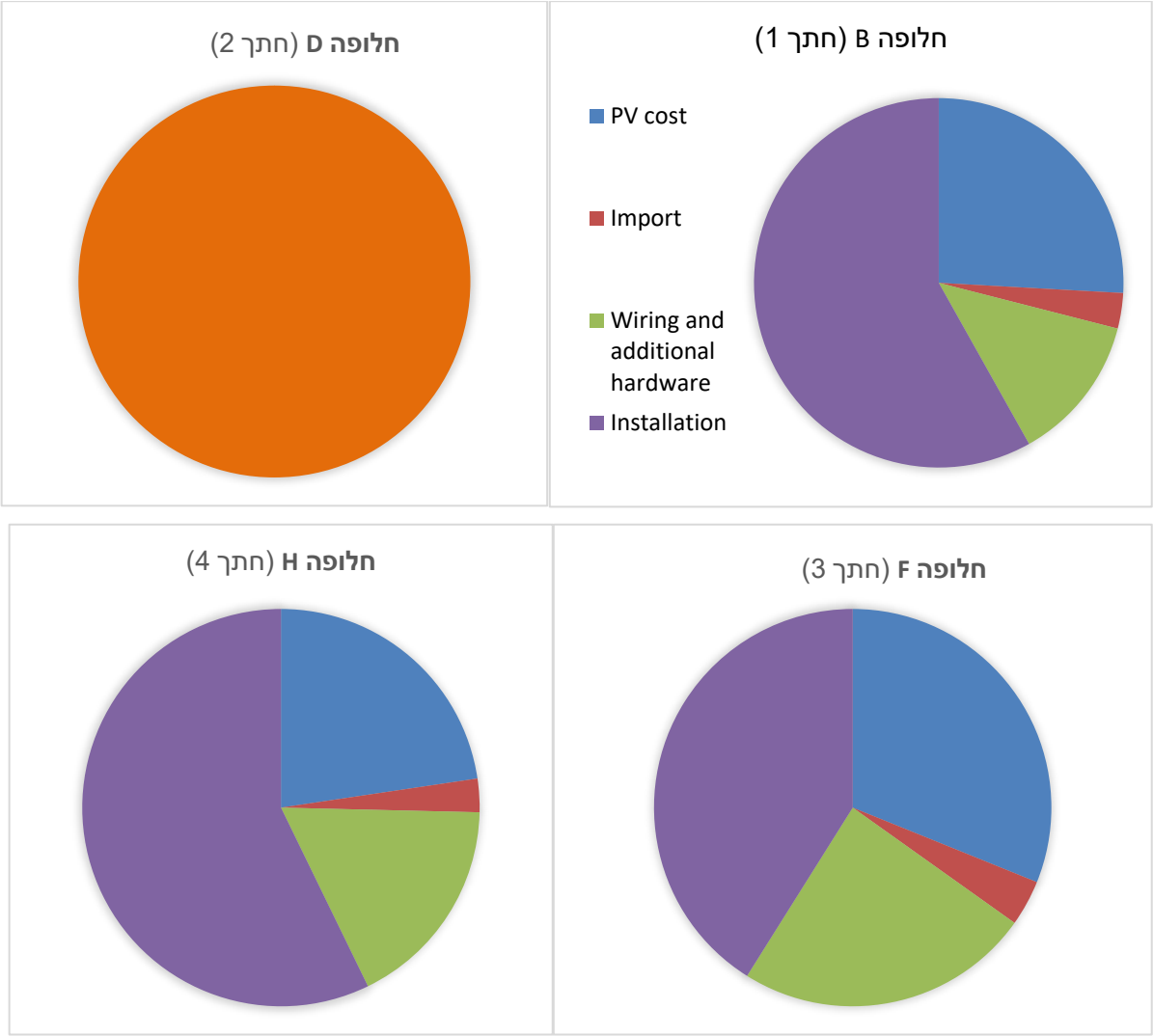
חלופה	אפיון חלופה	יעילות	שם מוצר וספק/ יצרן	שטח כיסוי בחזית בתכנון האדריכלי	שטח כיסוי אפקטיבי בחזית	עלות					עלות תחזוקה וניקיון למ"ר לשנה	הערות
						פאנל BI(PV) למ"ר	ייבוא	ציוד נלווה וביצוע חיבורים	התקנה למ"ר	סה"כ למ"ר בנוי		
F	גג+ חזית דרומית תלת ממדית, זווית 30° מעלות, חלק אינטגרלי מהחזית m-Si.	16.4%	ZigZag Solar [כז]	781 מ"ר בחזית דרומית	ברוטו- 1505 מ"ר. נטו- 898 מ"ר.	החל מ- 450 ₪ למ"ר (ברוטו) של מערכת.	12%	2.1 ₪ ל- Wp [כח]	590 ₪	**1260 ₪**	גג: 8.4 ₪ לתחזוקה ו- 16.2 ₪ לניקיון. חזית: 8.4 ₪ לתחזוקה.	נלקחה בחשבון הערכת חיסכון של 110 ₪ למ"ר- עלות LOWE בקיר המסך שניתן כעת להחליפו בזכוכית רגילה [כט].
G	בדומה ל F אך: גג+ חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית			2343 מ"ר בחזיתות	ברוטו- 4515 מ"ר. נטו- 2694 מ"ר.							
H	גג + חזית תלת ממדית, זווית 30° מעלות, מחובר לחזית m-Si.	16.6%	Solar Innova [ל]	781 מ"ר בחזית דרומית	1318 מ"ר	455 ₪	12%	2.1 ₪ ל- Wp [לא]	1150 ₪ [לב]	**2010 ₪**	גג: 8.4 ₪ לתחזוקה ו- 16.2 ₪ לניקיון. חזית: 8.4 ₪ לתחזוקה.	. עבודת חיווט נספרה פעמיים– להערכתנו המשמעות זניחה.
I	בדומה ל H אך: גג+ חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית.			2343 מ"ר בחזיתות	3954 מ"ר[א]							

[כז] הצעה של Wim van del Wall, CEO of Zigzag Solar.
[כח] הצעה של Laurent Petit, Sales & Marketing Building Division , חברת Sunpartner.
[כט] הצעה של אסנת פרטוק מחברת ""עמר זכוכית"
[ל] הצעה של Manuel Gil, CEO of Solar Innova.
[לא] הצעה של Laurent Petit, Sales & Marketing Building Division , חברת Sunpartner.
[לב] הצעה של מנכ"ל חברת Aluminum Construction , רמי בונה.

4.2.2 תוצאות כלכליות עיקריות של חלופות ה-BIPV לבניין המשרדים

4.2.2.1 התפלגות רכיבי עלויות התקנת חלופות BI(PV) לבניין המשרדים

תחילה, בדקנו את התפלגות רכיבי העלויות, בחלופות/ חתכים השונים (לא כולל תחזוקה שהיא זהה בכולם). חלק הארי בכל החלופות הוא עלות ההתקנה, בין 40-60% מעלות ההקמה הכוללת. בחלופות B ו-H מדובר על יותר מפי 2 ממחיר הפאנל הסולארי. מכיוון שבחלופה D התקבל מחיר turn-key, לא ניתן לפצל אותו לרכיבי עלות (ראו תרשים 49.



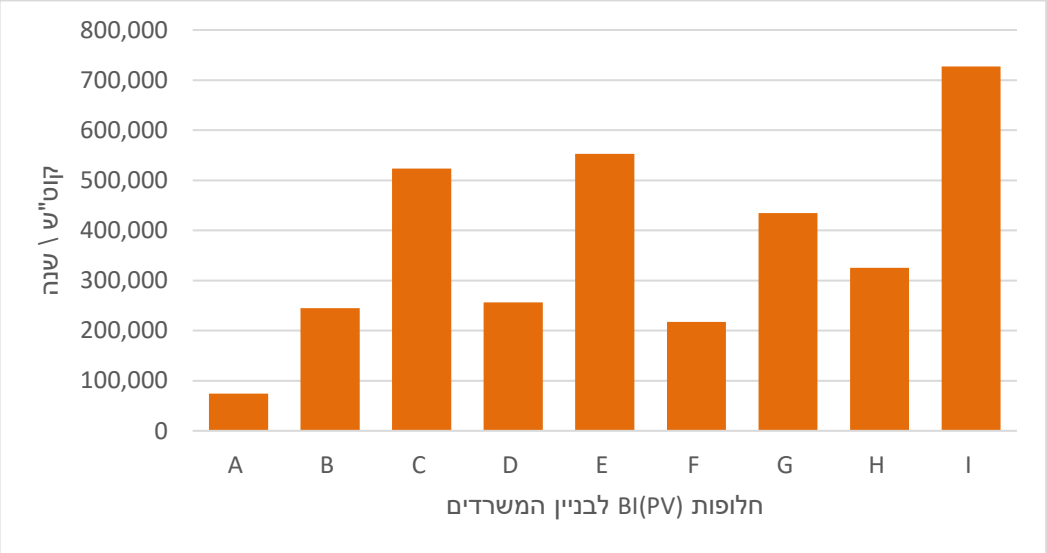
תרשים 49: התפלגות רכיבי עלויות התקנת 4 חלופות BI(PV) לבניין המשרדים.
*בתרשים 4 חלופות שמייצגות את 8 חלופות B-I (כפי שמופיע ב**טבלה 5**), ואת 4 החתכים (**תרשים 40**). התפלגות העלויות הן באחוזים למ"ר מותקן. כחול- עלות פאנל סולארי, אדום- עלות יבוא, ירוק- עלות חיבורים וציוד היקפי, סגול- התקנה, כתום- בחלופה D לא התקבל פירוט, והמחיר שהתקבל כולל בתוכו גם עלויות התקנה וציוד היקפי. העלויות המוצגות לא כוללות עלויות תחזוקה אשר זהות בכל החלופות/ חתכים.*

את התוצאות שלנו השווינו לאלו של מכוני המחקר SEAC ו -SUPS משנת 2017 [6] (ראו תרשים 27). במחקר האירופי עלות התקנה (installation), ומתאמים (Fastening system and ballasting) מגיעה ל-55%, אשר מקבילות לעלות התקנה אצלנו (40-60%). בסה"כ התפלגות המחירים דומה.

4.2.2.2 יצרנות אנרגיה לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים

הסימולציה האנרגטית (פרק 4.1) ביצעה חישובי יצרנות אנרגיה אופטימליים לחלופות ה-BI(PV) השונות. סימולציה זו השתמשה בשטחי BI(PV) אופטימליים ובהערכות כלליות בנוגע לטכנולוגיית היישום וסוג החזית. כאן, ביצענו חישוב יצרנות אנרגיה בהתאם למוצרים ספציפיים ולהצעות המשתלמות ביותר כלכלית אשר קיבלנו מהספקים (ראו טבלה 5). ההצעות המשתלמות כוללות שימוש בפאנלים של BIPV בגדלים סטנדרטיים, ולא בגדלים מותאמים אישית. לכן, שטחי ה-PV בחישוב זה שונים לעומת אלו האופטימליים (פרק 4.2). כמו כן, בחלופות עם החזיתות השטוחות השתמשנו בפרק זה בנתוני קרינה [96] אשר בממוצע גבוהים ב-10% מאלו שקיבלנו בסימולציה. כאמור, זאת מכיוון שעפ"י תוצאות בניין מת"ף הן יותר קרובות למציאות.

ניתן לראות כי בחלופה I, יצרנות האנרגיה השנתית הגבוהה ביותר, ואחריה E, C ו-G. כולן החלופות עם BIPV על חזיתות דרום, מזרח ומערב (וגג). החלופות עם BIPV על חזית דרום בלבד מייצרות פחות אנרגיה. בסוף, חלופה A עם PV על הגג בלבד. חלופות E ,C ו-I מייצרות פי 7-10 יותר חשמל מאשר חלופה A בעלת PV על הגג בלבד (ראו תרשים 50).



תרשים 50: כמות אנרגיה המיוצרת בחלופות BI(PV) לבניין המשרדים בשנה, לפי הניתוח הכלכלי.
הערכים הם בקוט"ש\שנה.

למרות שלחלופות בעלות חזית זיגזג שטח PV נמוך יחסית, הן צפויות לייצר כמות חשמל דומה לחלופות עם BIPV שטוח. זאת מכיוון שההפניה של הסולאריים כלפי מעלה משפרת משמעותית את ניצול קרינת השמש. חלופה I אפילו השיגה את התוצאה הגבוה ביותר.

כצפוי, באמצעות חלופה A לא ניתן לייצר חשמל בכמות משמעותית לעומת צריכת הבניין. הבניין מסוגל לייצר רק כ-1% מצריכת האנרגיה השנתית שלו (74,000 קוט"ש אל מול 6,500,000 קוט"ש בשנה [בניין ללא התייעלות אנרגטית] [94]). רק חלופות הכוללות BIPV בחזיתות מייצרים כמות חשמל משמעותית (3-11%) מסך הצריכה של הבניין. המשמעות היא

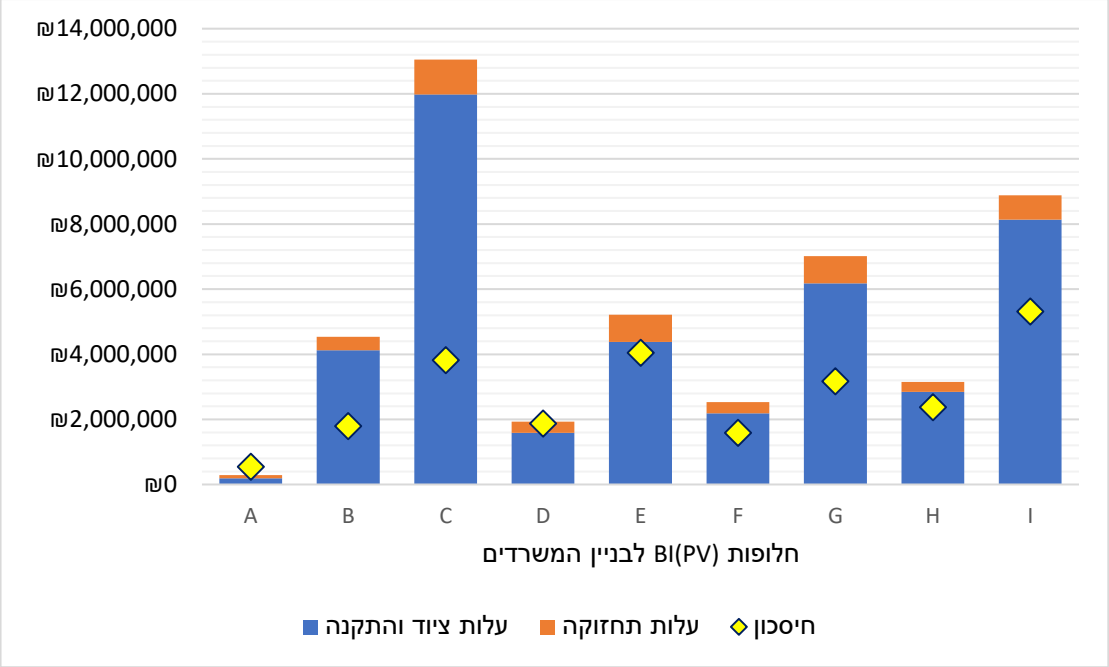
שלא ניתן להפיק כמות אנרגיה משמעותית בבניינים רבי קומות באמצעות הגג. הפתרון היחידי כיום שמאפשר הפקת כמות אנרגיה מתחדשת משמעותית שלא על שטחים פתוחים, היא BIPV על חזיתות בניינים רבי קומות.

התוצאות מהסימולציה האנרגטית בתרשים 46 שונות מאלו בניתוח הכלכלי בתרשים 50. זאת בשל הבדלים נקודתיים בשטח היישום, סוג הטכנולוגיה (m-Si אל מול p-Si) יעילות הטכנולוגיה וסוג החזית (מאוררת או חמה). לצורך המחשה, למרות כי בסימולציה האנרגטית (תרשים 46) חלופה B מייצרת 15% יותר חשמל בשנה לעומת חלופה D, בניתוח הכלכלי (תרשים 50) חלופה D מייצרת כ-10% יותר חשמל מחלופה B. זאת, כי בחלופה B בניתוח הכלכלי יעילות יצור חשמל בחלונות היא רק 20% (לעומת 50% בסימולציה האנרגטית), .

4.2.2.3 עלויות וחסכון לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים

לאחר חישוב יצרנות האנרגיה, חישבנו את העלויות והחיסכון לחלופות ה-BI(PV) השונות (החלופות מופיעות בטבלה 3 ובטבלה 5). החיסכון מורכב מהחיסכון הכספי באנרגיה הודות לייצור חשמל ע"י ה-BI(PV) לאורך 20 שנה. העלויות מורכבות מעלויות ההקמה של ה-BI(PV) ומהתחזוקה לאורך 20 שנה. עלויות התחזוקה מהווים בד"כ 10% מהעלות הכוללת ל-20 שנה. כצפוי, העלויות הנמוכות ביותר הן לחלופה A המתייחסת ליישום נקודתי רק על הגג (ראו תרשים 51). היא הציגה את היחס הטוב ביותר של חיסכון/הכנסות אל מול עלויות תוך 20 שנה. זאת בשל העלות הנמוכה של PV רגיל המוצב על גגות, בהשוואה למוצרי BIPV. יחד עם זאת, כאמור, חלופה זו אינה מביאה אותנו ליעדים אנרגטיים מספקים.

החלופות הכוללות BI(PV) על הגג ועל חזית דרום בלבד יקרות יותר, והחלופות היקרות ביותר הן אלו עם BI(PV) על הגג ועל 3 חזיתות. החלופה היקרה ביותר, היא חלופה C. מבין חלופות ה-BIPV, רק חלופה D התקרבה להחזר השקעה תוך 20 שנה. זאת, בעיקר הודות למחיר נמוך למ"ר מותקן. בשאר החלופות החיסכון ל-20 שנה מגיע ל-30-85% מהעלויות ל-20 שנה. ניתן לראות כי חלופות ה-BIPV על חזית דרום בלבד קרובות יותר להחזר השקעה אחרי 20 שנה לעומת חלופות ה-BIPV על חזיתות מזרח, דרום ומערב. זאת, מכיוון שעלות ההתקנה למ"ר זהה בכל החזיתות, אבל חזיתות מזרח ומערב זוכות לפחות קרינה ומייצרות פחות חשמל למ"ר לעומת חזית דרום.



תרשים 51: עלות וחסכון ל-20 שנה, בחלופות BI(PV) לבניין המשרדים.
בכחול, עלויות ציוד והתקנה, כתוספת למחיר מעטפת רגילה לבניין משרדים. בכתום- עלויות תחזוקה. מעוין צהוב- חיסכון בגין ייצור חשמל.

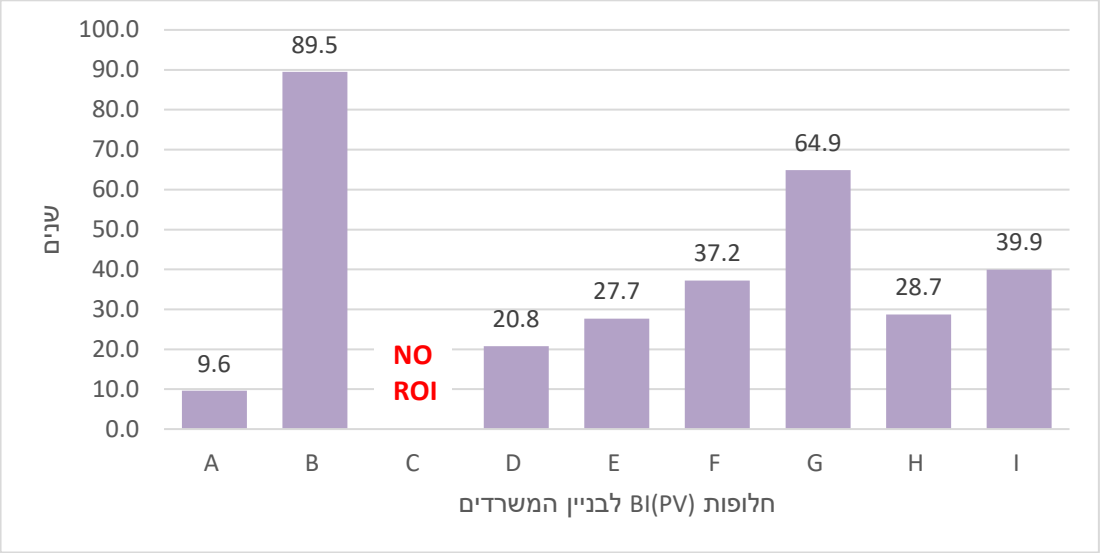
בעולם, מחירי thin film BIPV לרוב זולים בצורה משמעותית לעומת c-Si BIPV (ראו פרק 2.2.3). לכן, אחת מהשערות המחקר הייתה כי thin film BIPV יהווה חלופת BIPV זולה, ויהיה משתלם למרות שמייצר פחות חשמל למ"ר. אולם, המחיר הזול ביותר אשר אנו קיבלנו למ"ר מותקן של thin film BIPV היה אחד משני המחירים הגבוהים ביותר בחלופות שלנו (חלופות C-B). לכן, השערת מחקר זו התבדתה.

בחלופות שנבחנו, תוספת העלות למערכות ה-BIPV מהווה בין 1.54-12% מעלות הבניה (כ-1.5-12 מיליון ₪ אל מול עלות בניין של 99 מיליון ₪, ראו פרק 4.2.1.2).

4.2.2.4 זמן החזר השקעה לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים

על מנת לחשב את זמן החזר ההשקעה לחלופות ה- BI(PV) השונות, נספרו השנים עד להגעה לשוויון בין העלויות לחיסכון (ראו תרשים 52). התפלגות התוצאות כמובן תואמת את התוצאות בפרק הקודם.

ה-ROI לחלופה A קטן מ-10 שנים, וזו החלופה היחידה בה ההשקעה מוחזרת בפרק זמן סביר. לחלופה D החזר השקעה של כ 21 שנים, ולחלופה C לא ניתן לחשב החזר השקעה – סך ההכנסות לא מכסה על העלויות גם לא כעבור מאות שנים. לשאר החלופות ROI בין 28-90 שנה.



תרשים 52: זמן החזר ההשקעה בשנים לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים.
Return of Investment (ROI). חושב מההכנסות מייצור חשמל, אל מול העלויות (ציוד, התקנה, תחזוקה).
NO ROI- חלופה בה ההכנסות לא מכסות את ההשקעה גם כעבור מאות שנים.

בהתאם לחישוב העלויות והחיסכון של החלופות מתרשים 51, בתרשים 52 אנו רואים כי רק חלופה A מחזירה את ההשקעה בפחות מ-20 שנה, כאשר שאר החלופות מחזירות את ההשקעה תוך 20-65 שנה (לחלופה C לוקח מאות שנים). כמו כן, מכיוון שחזיתות מזרח ומערב זוכות לפחות קרינה ומייצרות פחות חשמל, זמן החזר ההשקעה של חלופות הכוללות חזיתות אלו (C, E, G, I) משמעותית ארוך יותר מחלופות חזית דרום המקבילות להן (B, D, F, H).

למרות כי בטבלה 5, מופיע כי המחיר למ"ר **בנוי** של חלופות G-F (1260 ₪ למ"ר) נמוך משמעותית לעומת חלופות I-H (2010 ₪ למ"ר), יש לשים לב כי מדובר על מחיר למ"ר שטח חזית **בנוי** ולא למ"ר של שטח חזית **סולארי**. בחלופות G-F רק 60% מהשטח של מערכת ה-BIPV מייצר חשמל, השאר משמש כחזית רגילה שאינה מייצרת חשמל. בחלופות I-H כל שטח מערכת ה-BIPV מייצר חשמל. לכן, המחיר של חלופות G-F למ"ר של שטח **סולארי**, הוא 2100 ₪ למ"ר. יקר יותר מאשר בחלופות I-H. לכן, יצור החשמל לכל ₪ שמושקע בהתקנה נמוך בחלופות G-F לעומת I-H, וכך גם זמן החזר ההשקעה של הראשונות ארוך יותר.

חלופת ה-BIPV עם החזר ההשקעה הקצר ביותר (21 שנים), היא חלופה D, בה נעשה שימוש בפאנלים סולאריים רגילים המותאמים להתקנה אנכית, עם אחוזי יעילות גבוהים (17%) ומסוג p-Si אשר מותקנים בשיטת החזית המאווררת (cold facade). זאת, בעיקר הודות למחיר הזול יחסית למ"ר. בעצם, חלופה D היא על התפר בין BAPV ל-BIPV על החזית.

בהינתן אותו בניין ייחוס, אותה קרינה, אותו מחיר חשמל (0.4381 ₪ לקוט"ש - ממוצע של תעריפי תעו"ז למתח גבוה לא כולל מע"מ ובניכוי דמי איזון), הקמת מערכת BIPV בשיטת ה-cold façade בעלת נצילות של 17-19%, צריכה לעלות בין 980 ל-1500 ₪ למ"ר מותקן

בכדי שזמן החזר ההשקעה יהיה באזור ה-15 שנה (כולל ציוד, התקנה, תחזוקה ל-15 שנים ועליות הקמת מערכת סולארית על הגג). כאמור, בחלופה D, עם החזר ההשקעה הקצר ביותר מבין החלופות, המחיר למ"ר מותקן הינו 1230 ₪. בכדי להגיע לזמן החזר השקעה של 15 שנים בחלופה זו, מבלי לשנות את יעילות הפאנל (17%) או את עלות החשמל, המחיר למ"ר מותקן יצטרך לרדת ב-21%.

בחלופות G-F, זמן החזר ההשקעה הוא 37-65 שנים. אולם, על פי דברי היצרן למוצר יש רפלקטיביות פנימית גבוהה שפוטנציאלית הייתה מגדילה הקרינה וכך מקצרת את זמן החזר ההשקעה [לג]. ביצוע סימולציה לבדיקת השפעת הרפלקטיביות חרג ממסגרת המחקר ולכן לא הייתה ביכולתנו האפשרות לבדוק את ההשפעה הזו על זמן החזר ההשקעה.

אופציה אחרת לקיצור משך החזר ההשקעה היא כמובן להעלות את תעריף החשמל המיוצר ע"י BIPV, כפי שקיים בעולם (ראו פרק 2.3.2). למרות העובדה כי מחירי החשמל בישראל נמוכים מאוד יחסית לעולם המפותח ואינם משקפים את העלויות החיצוניות של ייצור החשמל, העלאת מחיר החשמל צפויה לפגוע בעיקר בשכבות החלשות וצפויה להתקל בהתנגדות ציבורית. במידה ומימון התעריף הגבוהה ל-BIPV יגיע דרך העלאת תעריף החשמל (כפי שנעשה עם מימון התעריף של ה-CSP בישראל), המהלך צפוי לגרור התנגדות ואף חמור מכך- עוינות ציבורית כלפי יישום אנרגיות מתחדשות [18,111].

אין הלימה בין היצרנות האנרגטית לבין זמן החזר ההשקעה. זאת מכיוון שמחירי ה-BIPV שאנו קיבלנו אינם משקפים מחיר אחיד לכל קוט"ש שמיוצר (או ל-kWp). כמו שציינו בתת-הפרק הקודם, דווקא לחלופות ה-thin film (C-B) שאמורות להיות זולות יותר מאשר ה-c-Si, קיבלנו מחירים גבוהים. אם מחברים לזה את העובדה שהן מייצרות פחות חשמל לכל מ"ר, מתקבל כי זמן החזר ההשקעה שלהן הוא הארוך ביותר ולא פרקטי בשום צורה. זאת בניגוד להשערת המחקר אשר ניבאה כי חלופות אלו תהנה המשתלמות ביותר.

טכנולוגיות ה-BIPV הן עדיין טכנולוגיות חדשות, והן מסובכות ליישום בישראל. לכן, מחירן עדיין גבוה כאשר משווים אותן לחלופות: מעטפות בניין קונבנציונאליות ו-PV רגיל. בנוסף, מחיר החשמל בישראל נמוך (0.4556 ₪\קוט"ש ללא מע"מ), ואינו כולל את מלוא העלויות החיצוניות של השימוש בו [104]. לפיכך, קשה להגיע לחסכון/ הכנסות אשר מכסים את גובה עלויות התקנת ותחזוקת BIPV תוך זמן סביר.

בניתוח הכלכלי, ניכר היה כי לעלות של מערכת ה-BIPV ההשפעה המכרעת ביותר על זמן החזר ההשקעה. לכן קיבלנו הבדלים כה משמעותיים בזמני החזר השקעה בין החלופות השונות. שינויים ביעילות המערכות או בשטח הפאנלים הסולאריים השפיעו פחות. זאת, עקב המחיר הנמוך בישראל של קוט"ש חשמל.

[לג] הצעה של Wim van del Wall, CEO of Zigzag Solar.

4.2.2.5 השוואת חלופה D אל מול בניין מת"ף

ע"מ לבחון את תוצאותינו, השווינו בין חלופה D בניתוח הכלכלי (ראו פרק 4.2.2) לבין התוצאות בשטח של בניין מת"ף (ראו פרק 2.4.1). לשניהם BIPV שטוח על החזית הדרומית, ו-PV על הגג בזווית 30° מעלות במפנה דרומי, הכל בטכנולוגיית p-Si (ראו טבלה 5, טבלה 6).

טבלה 6: השוואה בין בניתוח הכלכלי של חלופה D ובניין מת"ף.

קריטריון		חלופה D	בניין מת"ף
מספר קומות		20	8
חזית דרום	שטח סולארי מ"ר	1505 מ"ר	2112 מ"ר
	הספק מותקן	232 kWp	330 kWp
גג	שטח סולארי	299 מ"ר	210 מ"ר
	הספק מותקן	48 kWp	34 kWp
סה"כ שטח סולארי (מ"ר)		**1804 מ"ר**	**2322 מ"ר**
סה"כ הספק מותקן		**280 kWp**	**364 kWp**
יעילות המרת קרינה לחשמל		17%	15.36%
מחיר לכל המערכות, ללא תחזוקה (ללא מע"מ)		1.6 מיליון ₪	4.7 מיליון ₪
מחיר ממוצע למ"ר PV מותקן כולל גג		886 ₪ \ מ"ר	2024 ₪ \ מ"ר
יצור חשמל (קוט"ש לשנה)		256 אלף קוט"ש	358 אלף קוט"ש
ייצור חשמל (קוט"ש\מ"ר\שנה)		141 קוט"ש\מ"ר\שנה	154 קוט"ש\מ"ר\שנה
חסכון באנרגיה בשנה (ללא מע"מ)		116 אלף ₪	163 אלף ₪
החזר השקעה		21 שנה	45-50 שנה (הערכה)

שני המבנים בעלי טיפולוגיה ופריסה מרחבית שונה: חלופה D בגובה 20 קומות, עם שטח גג קטן (1000 מ"ר), לעומת בניין המת"ף לו 8 קומות עם שטח גג גדול יותר (כנראה פי חמש). לכן, היחס בין שטח החזיתות לשטח הגג בחלופה D גדול יותר ומכאן שיש ערך גדול יותר ליישום BIPV על החזיתות בחלופה זו.

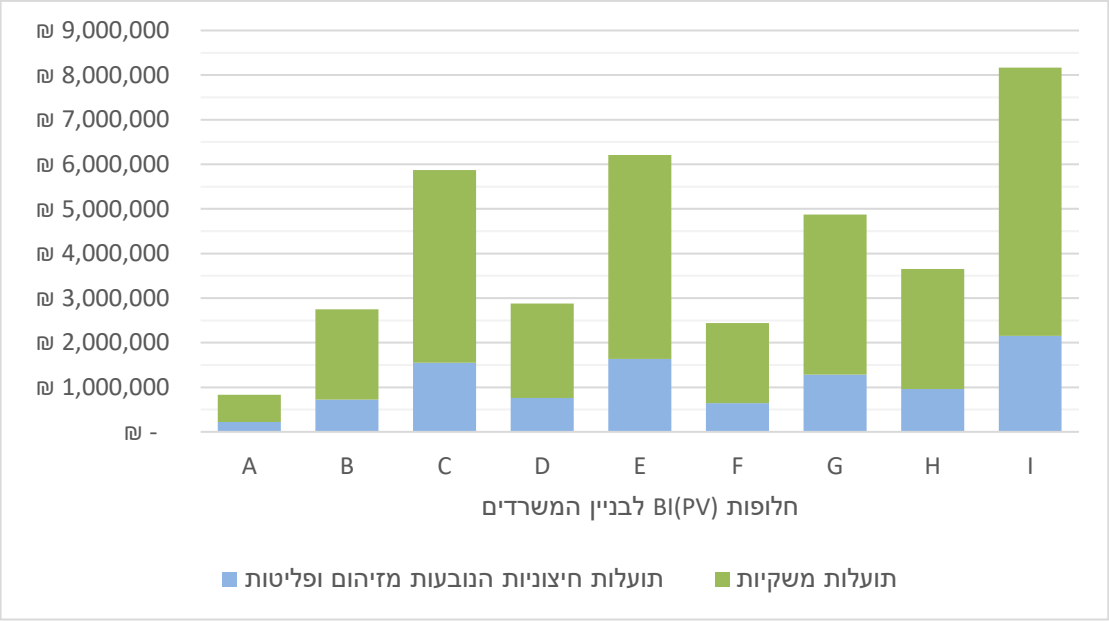
עלות הבניה של BIPV למ"ר בבניין המת"ף כפולה מאשר בחלופה D. זאת, יתכן משום שהמערכת היא בעצם BAPV ובתחשיב נכנסה העלות הנוספת של עבודה בגובה מעבר לעבודה בגובה של בניית המעטפת הרגילה של הבניין. כזכור, בחישובים שלנו העלויות כל חלופה כוללות רק תוספות עלויות לבניה הרגילה בשל הוספת ה-BIPV. זמן החזר ההשקעה במת"ף צפוי להיות בערך פי 2.5 לעומת חלופה D. זאת בעיקר עקב העלות הגבוהה למ"ר מותקן.. הדמיון הרב בין החלופות יצר ציפייה לעלויות למ"ר מותקן דומות. הבדלי העלויות הגבוהים הללו משקפים את העובדה כי התחום בארץ לא בשל.

העובדה שייצור החשמל בפועל למ"ר סולארי בבניין המת"ף גבוהה ב-9% מאשר בבניין D מעודדת. זאת מכיוון שהיא מצביעה על כך כי החזר ההשקעה בפועל צפוי להיות מהיר יותר מאשר בתוצאות הסימולציות והניתוחים שלנו. יחד עם זאת, יתכן ומדובר בהבדל הנובע משונות היקף קרינה בין שנים, בטווח סטיית התקן.

4.2.2.6 תועלות חיצוניות ומשקיות לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים

מלבד החיסכון באנרגיה המתרגם לחיסכון בחשבון האנרגיה של הבניין, ייצור אנרגיה באמצעות אנרגיות מתחדשות מביא גם לתועלות חיצוניות ומשקיות (ראו פרקים 3.3.3 ו-4.2.1.3). על מנת להבין את ההשפעה הנרחבת על איכות החיים, הבריאות והכלכלה של התקנת חלופות ה- BI(PV) השונות, חישבנו את התועלות החיצוניות והתועלות המשקיות עבורן ל-20 שנה (ראו תרשים 53). שקלול גורמים אלו, מעלה את שוויו של קוט"ש המיוצר באמצעות PV מ-0.45 ₪ לכ-1.00 ₪.

התוצאות משקפות את היקף יצור האנרגיה בחלופות השונות (ראו תרשים 50). החלופות עם BIPV בשלוש חזיתות, אשר מייצרות הכי הרבה חשמל, מובילות בתועלות. גובה התועלות הן החל ממיליון ₪ לחלופה A, ועד ל-8 מיליון ₪ לחלופה I.



תרשים 53: תועלות חיצוניות ומשקיות מהפחתה ביצור חשמל במשך 20 שנה בחלופות BI(PV) לבניין המשרדים.

מבוסס על דו"ח הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות[106].

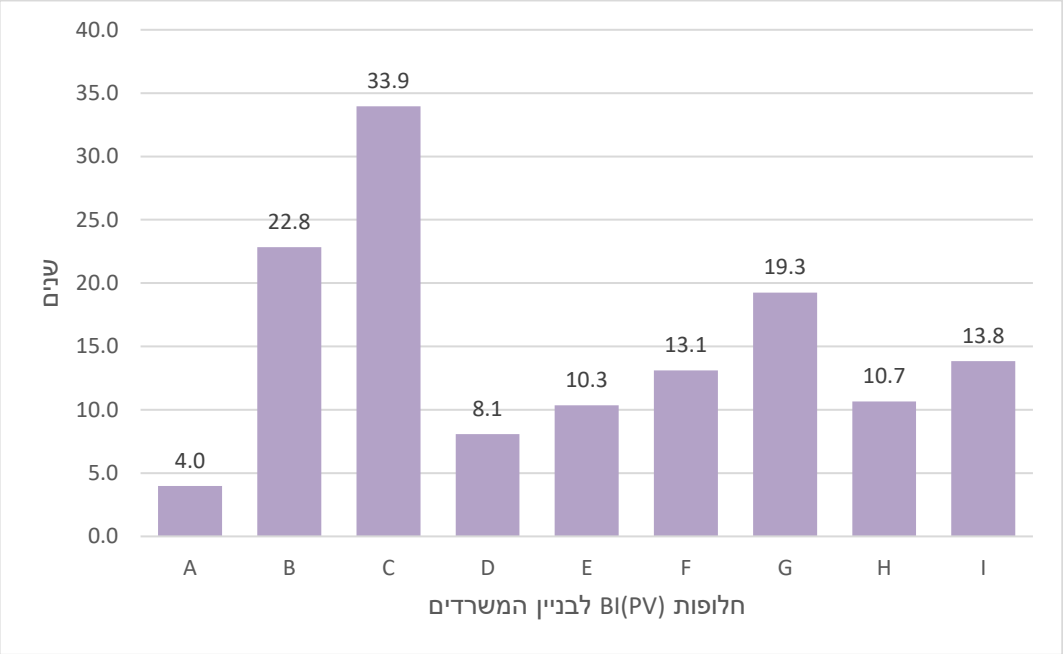
4.2.2.7 החזר השקעה כולל תועלות חיצוניות ומשקיות לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים

על מנת להגיע לשיווי משקל יעיל יותר, התיאוריה הכלכלית מצדיקה התערבות ממשלתית במחירי השוק, בכדי להפנים השפעות חיצוניות למערכת השיקולים של שחקני השוק. לכן, בסעיף זה נבחן מה קורה לניתוח הכלכלי כאשר מפנימים לתוכו את התועלות החיצוניות והמשקיות של החלופות השונות. חשוב לבצע ניתוח זה בכדי לבחון האם הגיוני כלכלית למדינה

ליישם מערכות BIPV בבנייני משרדים בהן המדינה היא היזם, ובכמה כסף לסבסד הקמת מעטפות BIPV בבניינים שאינם בבעלות המדינה.

במקרה הפרטי בו המדינה היא היזם והמשתמש בבניין המשרדים שלנו, והיא הנהנית גם מהתועלות החיצוניות והמשקיות וגם מהחיסכון בעלויות הישירות, , ניתן לכלול את התועלות הללו בניתוח עלות-תועלת של חלופות ה- BI(PV) ולראותן מנקודת המבט של היזם.

כאשר מכלילים את התועלות החיצוניות והמשקיות של מעטפות BIPV בניתוח עלות-תועלת, זמני החזר ההשקעה של חלופות ה-BI(PV) מתקצרים באופן דרמטי (תרשים 54) לעומת המצב ללא תועלות חיצוניות ומשקיות (תרשים 52). ניתן לראות כי ה-ROI עבור כל החלופות למעט חלופות C-B, יורד מתחת ל-20 שנה. ה-ROI של חלופה D יורד ל-8 שנים, של חלופה E יורד ל-10 שנים, ושל חלופות G, H ו-I יורד ל-11-14 שנים.



תרשים 54: זמן החזר ההשקעה בשנים לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים, בשקלול עלויות חיצוניות ותועלות משקיות.

Return of Investment (ROI). חושב מההכנסות מייצור חשמל, חסכון בעלויות חיצוניות, ותועלות משקיות; אל מול העלויות (ציוד, התקנה, תחזוקה). נתונים אלו מתאימים במקרה הספציפי בו המדינה היא גם היזם וגם נהנה מהתועלות המשקיות והחיצוניות, או לשם המחשת העלויות והתועלות למדינה, מיישום BIPV ע"י גורמים פרטיים.

כאשר אנו בוחנים רק את הפן הכלכלי הצר של היזם, אין ספק שכיום בניה של BIPV בישראל אינה כלכלית (ראו תרשים 52). אולם, כאשר בוחנים את התועלת המשקית של המדינה וכלל אזרחיה, המצב שונה בתכלית. גם כיום, כאשר התועלת המשקית הגלומה ב-BIPV אינה מוכרת במדינה (מניעת פגיעה בשטחים פתוחים, ייצור אנרגיה במקום בו היא נצרכת, חוסן אנרגטי ועוד), ניתן לכמת לפחות חלק מהתועלת המשקית מייצור חשמל בחלופות ה-BI(PV) השונות. זאת, לפי חישוב עלויות חיצוניות ותועלות משקיות מייצור חשמל באמצעות PV (ראו תרשים 53). כאשר משקללים נתונים אלו, החזר ההשקעה של רוב חלופות ה-BI(PV) יורד

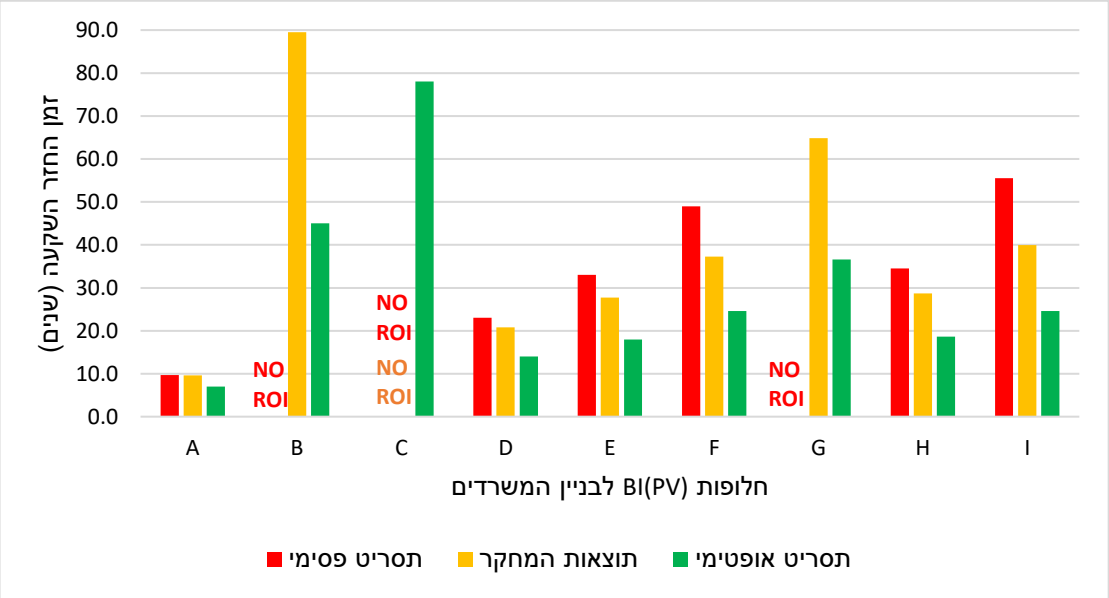
אל מתחת ל-20 שנה, כאשר בשלוש מהן (D, E, H) החזר ההשקעה מגיע אחרי פחות מ-11 שנים, ובחלופה D זמן החזר ההשקעה הוא רק 8 שנים (ראו תרשים 54).

נציין כי תועלות אלו לא כוללות מרכיבים ייחודיים ל-BIPV שאיננו יכולים כיום לחשבן, כמו חוסן עירוני (אספקת חשמל לבניין גם במידה ויש כשל ברשת החשמל), חסכון בהקמת מערך הולכה, צמצום פגיעה בשטחים פתוחים, עליה בערך הבניין ועוד. לכן, אנו מעריכים כי בפועל התועלות המשקיות מהקמת BIPV גבוהות עוד יותר.

4.2.3 בדיקת רגישות לניתוח הכלכלי

להלן יוצגו תוצאות ניתוח הרגישות באופן כזה שבו נשווה 2 תסריטים: הפסימי (3% היוון, מחיר חשמל זהה, מחירי המערכת זהים) עם האופטימי (2% היוון, מחירי החשמל עולים ב-15% ומחירי המערכת יורדים ב-20%). התוצאה אותה בחנו היא ההשפעה על זמן החזר ההשקעה. החישובים אינם כוללים תועלות חיצוניות (ראו תרשים 55 וטבלה 7).

כצפוי, בתסריט הפסימי, זמני החזר ההשקעה מתארכים, כאשר כעת 3 חלופות לא מצליחות להחזיר את ההשקעה כלל. החלופה המוצלחת ביותר (D), עולה מ-ROI של 21 שנה ל-23 שנה. התסריט האופטימי משפר את המצב באופן מהותי, ובו 3 חלופות (D, E, H) מחזירות את ההשקעה בפחות מ-20 שנים.



תרשים 55: בדיקת רגישות לזמן החזר ההשקעה לחלופות ה-BI(PV) בניתוח הכלכלי.
באדום, תסריט פסימי; בכתום, תוצאות המחקר; בירוק, תסריט אופטימי. NO ROI- אין החזר השקעה, כאשר צבע הכיתוב מעיד על התסריט. התוצאות הן בשנים.

טבלה 7: תוצאות ניתוח הרגישות לניתוח הכלכלי.

חלופה	אפיון חלופה	שם מוצר וספק/ יצרן	זמן החזר השקעה בתסריט הפסימי	זמן החזר השקעה מקורי	זמן החזר השקעה בתסריט האופטימי
A	PV רגיל על הגג, מפנה דרומי, מונח בזווית 30º מעלות.	Garfunkel	9.7 שנים	9.6 שנים	7 שנים
B	גג, חזית דרומית שטוחה, קיר מסך, 56% Thin Film. מהחזית אטומה והשאר ב- 20% שקיפות.	Solibro Solar[x] and Sanko Solar	ההשקעה לא מחזירה את עצמה	89.5 שנים	45 שנים
C	בדומה ל B אך: גג+ חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית		ההשקעה לא מחזירה את עצמה	ההשקעה לא מחזירה את עצמה	78 שנים
D	גג+ חזית שטוחה, חזית מאוורר p-Si.	Garfunkel	23 שנים	21 שנים	14 שנים
E	בדומה ל-D, אך: גג+ חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית		33 שנים	28 שנים	18 שנים
F	גג+ חזית דרומית תלת ממדית, זווית 30º מעלות, חלק אינטגרלי מהחזית m-Si.	ZigZag Solar	49 שנים	37 שנים	24.6 שנים
G	בדומה ל F אך: גג+ חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית		ההשקעה לא מחזירה את עצמה	65 שנים	36.6 שנים
H	גג + חזית תלת ממדית, זווית 30º מעלות, מחובר לחזית m-Si.	Solar Innova	34.5 שנים	28.7 שנים	18.6 שנים
I	בדומה ל H אך: גג+ חזיתות דרומית, מערבית ומזרחית.		55.5 שנים	40 שנים	24.6 שנים

4.3 השפעת התייעלות אנרגטית של חלופות ה-BI(PV) על התוצאות

כיום, בניין ZEB משרדים רב קומות טיפוסי (דומה לבניין הייחוס במחקר זה) יכול לייצר **בעצמו** 20-35% מכל האנרגיה שהוא צורך (BIPV+ PV על הגג). הערך המדויק תלוי במספר הקומות (או יותר נכון, ביחס בין שטח הקרקע עליו יושב הבניין והשטח הכולל של כל הרצפות בכל הקומות), היקף ההתייעלות האנרגטית, הקונטקסט העירוני, והאקלים המקומי. ע"מ להפוך לבניין ZEB מלא, על הבניין להקים מערכות ייצור אנרגיה נוספות שלא בבניין עצמו (כמו מערכות PV רגילות על גגות בניינים אחרים, ראו פרק 2.3.1.4) [94].

עבור האקלים הישראלי, עדיפה התקנת BIPV כחלק מחזית מאווררת (cold facade), אשר תשמור את טמפ' הפאנלים נמוכה יותר לעומת חזית חמה (warm facade), ותאפשר הפקת יותר חשמל באותם תנאי קרינה.

כפי שצוין בפרק 3.1, החלופות נבדקו אל מול בניין משרדים קונבנציונאלי שאינו יעיל אנרגטית. עקב היקפו המוגבל של מחקר זה, לא ניתן לבצע חישוב מדויק על השפעת התייעלות אנרגטית על כל חלופה. אולם, במקרה הפרטי של חתך 4 (חלופות H-I), ניתן לשקלל יחסית בקלות את ההשפעה של ההתייעלות האנרגטית הנובעת ממאפייני חתך זה על ה-ROI של החלופות.

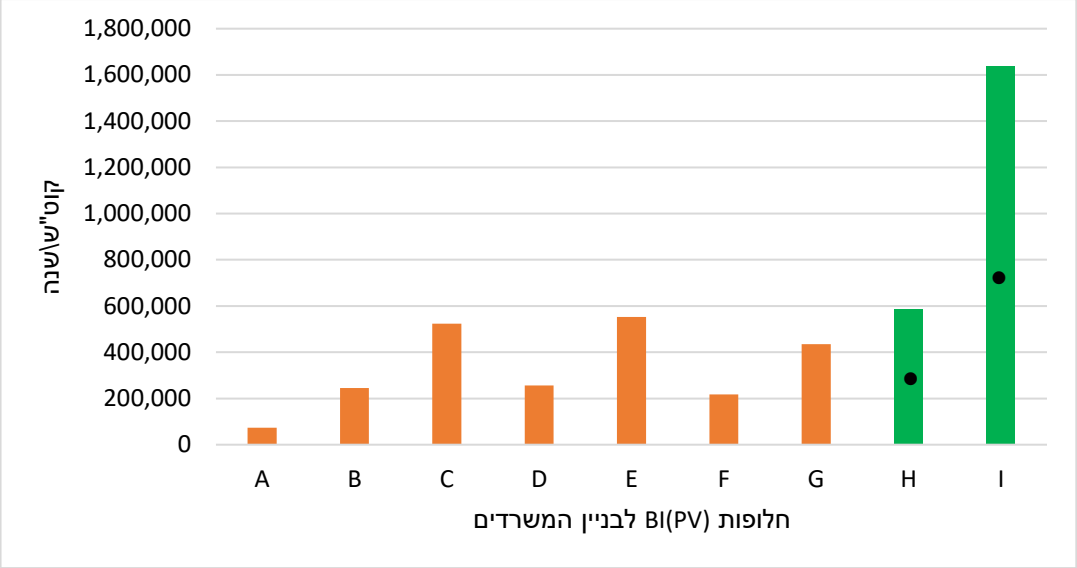
4.3.1 השפעת התייעלות אנרגטית על ביצועי חלופות I-H

במקרה הפרטי של חתך 4 (חלופות I-H), מערכות ה-BIPV בחזיתות מונחות בזווית אופטימלית של 30° מעלות מעל החלונות, באופן אשר גם אופטימלי להצללה על החלונות. הצללה זו מצמצמת את עומס החום בבניין אך מאפשרת כניסת אור שמש לתאורה טבעית.

במגזר העסקי בישראל, 15% ו-60% מצריכת האנרגיה משמשים לתאורה ולאקלום (חימום וקירור) בהתאמה [94]. סה"כ, 75% מצריכת האנרגיה במגזר העסקי מקורה בתאורה ובאקלום. הצללה של חזיתות עשויה לחסוך בבניין משרדים באתונה (יוון, קו רוחב $37.58^{o}N$) וב-Chania (כרתים , קו רוחב $35.30^{o}N$), עד 26% ו-32% בהתאמה, מצריכת האנרגיה לאקלום ולתאורה [38]. בישראל, לה קווי רוחב נמוכים יותר וקרינה גבוהה יותר, חסכון זה גדול עוד יותר (הערכה 35-40%).

הצללה בסגנון דומה להצללה בחתך 4 (חלופות I-H) של מחקרנו, חוסכת 16% מצריכת האנרגיה של התאורה והאקלום בכרתים. ניתן להעריך כי הצללה שכזו בישראל עשויה לחסוך כ-18% מצריכת האנרגיה של התאורה והאקלום. לכן, הצללה שכזו יכולה לחסוך כ-14% מצריכת האנרגיה **הכוללת** (תאורה, אקלום, חימום מים, מכשירי חשמל...) של בניין במגזר העסקי בישראל. לכן, ניתן להסיק כי חלופה I, בנוסף ליצור האנרגיה על החזית, יכולה לחסוך כ-910,000 קוט"ש בשנה (0.14 X 6,500,000 קוט"ש בשנה שצורך בניין הייחוס שלנו).

בחלופה H, רק החזית הדרומית מוצלת באמצעות מערכת ה-BIPV (מתוך 3 חזיתות חשופות לשמש). לכן הערכה גסה היא כי ניתן להשיג חסכון של 4% בצריכת האנרגיה השנתית. חסכון זה מתרגם ל-260,000 קוט"ש בשנה (0.04 X 6,500,000 קוט"ש בשנה שצורך בניין הייחוס שלנו). כך, כמות האנרגיה הנחסכת בחלופה H קופצת מ- 325,000 ל-585,000 קוט"ש בשנה- קפיצה של 80%. בחלופה I, כמות האנרגיה הנחסכת קופצת מ-727,000 ל-1,637,000 קוט"ש בשנה- קפיצה של 125% (ראו תרשים 50 ו-תרשים 56).



תרשים 56: כמות אנרגיה <u>נחסכת ו/או מיוצרת</u> בחלופות BI(PV) לבניין המשרדים בשנה, כולל התייעלות אנרגטית בחלופות I-H.

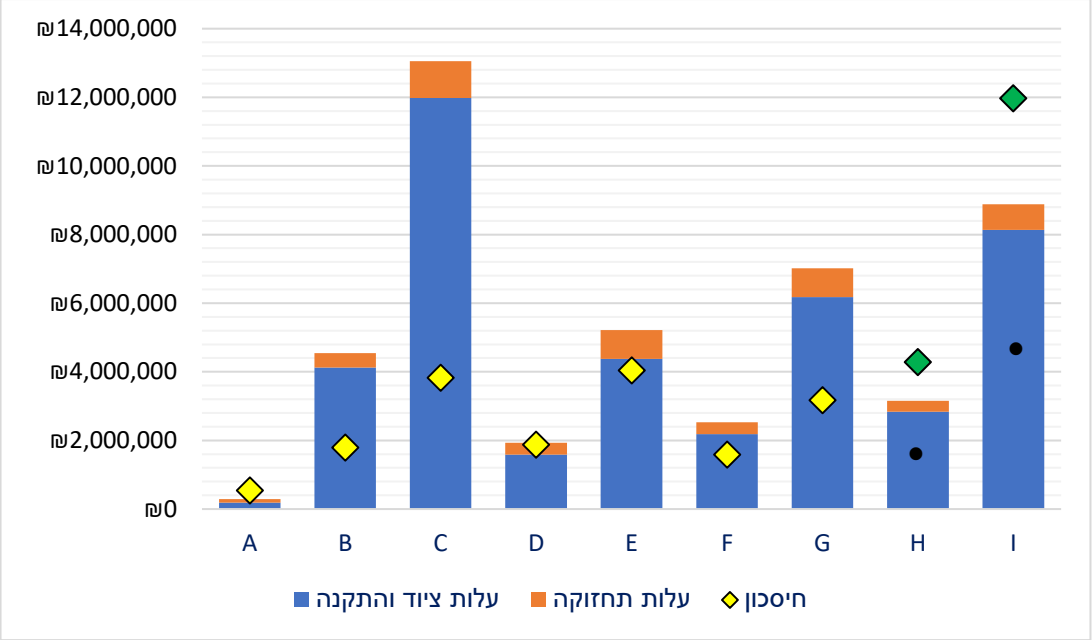
*בכתום, תוצאות חלופות **G-A** ללא חישוב של התייעלות אנרגטית. בירוק, התוצאות של חלופות **I-H**, הכוללות חישוב לחסכון בהוצאות אנרגיה לאור הצללת החלונות המובנית במערכות ה-BIPV שלהן. עיגול שחור- ערכים לחלופות **I-H** ללא התייעלות אנרגטית. הערכים הם בקוט"ש\שנה.*

חלופה H שקודם לכן הייתה במקום ה-5 מבחינת ייצור/חסכון באנרגיה בין כל החלופות, קופצת למקום 2 מבחינת ייצור/חסכון באנרגיה. חלופה I שהייתה במקום הראשון מבין כל החלופות, פותחת פער של 170% לפחות על החלופות האחרות. חלופה I מצליחה לחסוך 25% מצריכת החשמל השנתית של הבניין (1.637 מיליון קוט"ש בשנה\6.5 מיליון קוט"ש בשנה = 0.25). זהו חסכון אנרגטי משמעותי ביותר, בעיקר במבנה שלא בוצעה בו שום התייעלות אנרגטית אחרת.

כאשר הנתונים המעודכנים משוקללים בניתוח עליות חסכון של שתי חלופות אלו, אנו מקבלים כי חלופה H חוסכת בשנה כ- 4,275,000 ₪, אל מול עלויות של 3,150,000 ₪ על פני 20 שנה. בחלופה I חוסכים כ-12,000,000 ₪, אל מול עלויות של כ-8,900,000 ₪. מכיוון שעלות התקנת מערכת ה-BIPV כבר נכלל בעלויות חלופות I-H, אנו מקבלים כאן התייעלות אנרגטית בנוסף לייצור חשמל, ללא עלויות נוספות בגין ההתייעלות האנרגטית (ראו תרשים 57).

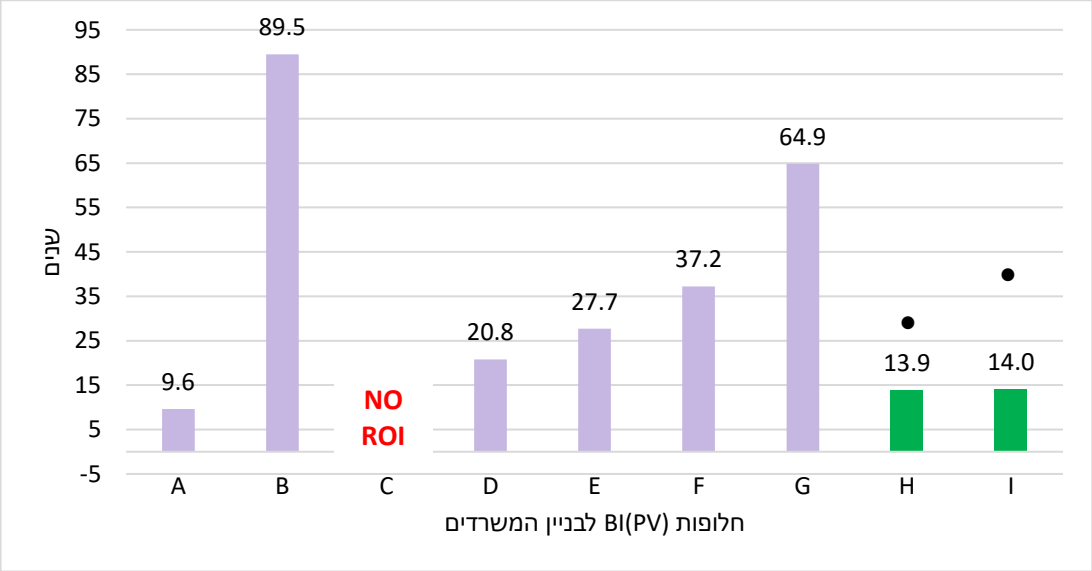
כאשר מבצעים חישוב החזר השקעה (ROI) בשקלול ההתייעלות האנרגטית המובנית בחלופות I-H, אנו מקבלים תוצאות מרשימות. זמן החזר ההשקעה של חלופה H צונח מ- 29 שנה ל-14 שנה, וזה של חלופה I צונח מ-40 שנה ל-14 שנה (ראו תרשים 52 ותרשים 58). אלו תוצאות שהופכות חלופות אלו לחלופות המובילות ליישום BI(PV) על בנייני משרדים גבוהים. אלו תוצאות המאפשרות החזר השקעה תוך פחות מ-20 שנה גם ללא תמריצים ממשלתיים נוספים.

בדומה, Thin Film BIPV על חלונות (כפי שקיים בחלופות C-B) יכול לצמצם קליטת חום ע"י החלון ב-65%[37]. אולם, מפאת היקפו המוגבל של המחקר, לא בוצע חישוב זה.



תרשים 57: עלות וחסכון ל-20 שנה, בחלופות BI(PV) לבניין המשרדים, כולל התייעלות אנרגטית בחלופות I-H.

*בכחול, עלויות ציוד והתקנה, כתוספת למחיר מעטפת רגילה לבניין משרדים. בכתום- עלויות תחזוקה. מעוין צהוב- חיסכון בגין ייצור חשמל בחלופות **G-A** ללא התייעלות אנרגטית. מעוין ירוק- חיסכון בייצור חשמל בחלופות **I-H** כולל התייעלות אנרגטית. עיגול שחור- ערכי חסכון אנרגיה לחלופות **I-H** ללא התייעלות אנרגטית. הערכים הם בש"ח.*



תרשים 58: זמן החזר ההשקעה בשנים לחלופות BI(PV) לבניין המשרדים, ללא תועלות חיצוניות ומשקיות, כולל התייעלות אנרגטית בחלופות I-H.

Return of Investment (ROI). חושב מההכנסות מייצור חשמל ומחיסכון בחשמל, אל מול העלויות (ציוד, התקנה, תחזוקה). NO ROI- חלופה בה ההכנסות לא מכסות את ההשקעה גם כעבור מאות שנים. בסגול- התוצאות לחלופות G-A ללא חישוב של התייעלות אנרגטית. בירוק- התוצאות לחלופות I-H הכוללות את ההתייעלות האנרגטית המובנית בחלופות אלו. עיגול שחור- ערכים לחלופות I-H ללא התייעלות אנרגטית.

4.4 תועלות משקיות, מחיר החשמל ותעריפים ל-BIPV

מחיר החשמל הבסיסי (ללא תעריף מועדף לאנרגיות מתחדשות) הממוצע במדינות האיחוד האירופי גבוה ב-40% מזה של ישראל [112]. במדינות רבות ב-OECD, מכירים בחשיבות של ייצור חשמל על בניינים, וניתנים תמריצים לייצור חשמל זה. כאשר מוסיפים לתעריף החשמל הבסיסי במדינות אירופה, תעריפים נוספים מיוחדים לייצור חשמל על בניינים (BIPV\BAPV) [65–67], מגיעים לתעריף מלא בגובה של 1.25-1.5 ₪ לכל קוט"ש המיוצר על בניינים. בסיאול אשר בדרום קוריאה, התעריף מגיע עד 1.74 ₪ לקוט"ש [59–61]. תעריפים אלו משקללים לתוכם את התועלות החיצוניות והמשקיות של BIPV אשר הוזכרו לעיל.

במחקר שבוצע בבריטניה, התקבל כי בלי סיוע ממשלתי החזר ההשקעה להתקנת מערכת BIPV צפוי רק אחרי 45-70 שנה. סיוע בצורת סבסוד טכנולוגיה חדשה שהיה נהוג בבריטניה לא הצליח להביא את החזר ההשקעה לטווח של 25 שנים. מדיניות חדשה של תעריף מיוחד לייצור חשמל מ-PV שיישומה החל ב-2010 הצליח להוריד את זמן החזר ההשקעה ל-13-20 שנה [40].

כמו שהוזכר לעיל, במקרה של בניין FKI בסיאול, תעריף מועדף לייצור אנרגיה במבנים (בגובה פי 5 מתעריף החשמל הרגיל), קיצר את החזר ההשקעה מ-30-35 שנים, ל-7 שנים [60].

כאמור, ישראל היא המדינה השלישית בצפיפותה ב-OECD, ועלולה להפוך לצפופה ביותר תוך 20-30 שנה. לכן, בישראל חשיבות גבוהה עוד יותר מרוב מדינות ה-OECD לשמירה על שטחים פתוחים. כמו כן, תשתית האנרגיה בישראל מאוימת יותר מרוב מדינות ה-OECD בשל אירועי לחימה, סיכון מוגבר לרעידות אדמה, הסתמכות על תשתיות גז טבעי פגיעות (1-2 קווי אספקת גז טבעי, 1-2 אסדות, 80-90% מהמשק צפוי להסתמך על גז טבעי ב-2025) [16,24,81–83]. משקלול גורמים אלו ברור כי לישראל צריך להיות אינטרס לייצור אנרגיה בבניינים יותר מרוב מדינות ה-OECD.

סביבתית, עדיף להעלות את תעריף החשמל המיוצר מדלקי מאובנים. אולם, בישראל פערים כלכליים גדולים בחברה. העלאת מחיר החשמל באופן גורף צפוי לפגוע יותר בשכבות החלשות. לכן, פוליטית קשה להעלות את מחיר החשמל. לאחרונה אנו עדים להפגנות משמעותיות נגד העלאת מחירים עם "מוטיבציה סביבתית" בתחום הדלקים לתחבורה בצרפת (לשם צמצום צריכת דלקים מזהמים לתחבורה), ואף בארץ החלו הפגנות כנגד התייקרות צפויה במחיר החשמל (התייקרות ממקור לא סביבתי).

לפיכך, כיום מומלץ שלא להעלות את מחיר החשמל לערכים גבוהים (כמו בגרמניה למשל), אלא להשאיר אותו נמוך. יחד עם זאת, על מחיר בסיס זה מומלץ להוסיף תעריף מיוחד שיתגמל ייצור חשמל על מבנים, בייחוד באמצעות BIPV.

לכל הפחות, על תעריף זה לעמוד על 0.55 ₪ לקוט"ש, כך שעל כל קוט"ש חשמל שייוצר על מבנה, היצרן יקבל 1.00 ₪. תעריף זה, אשר משקף אך ורק את התועלות החיצוניות והמשקיות שכבר חושבו בישראל עבור PV, צפוי להוריד את החזר ההשקעה בחלופות ה-BI(PV) שלנו

לזמנים המופיעים בתרשים 54 (8-14 שנים לרוב החלופות). אנו מעריכים כי שקלול היתרונות המיוחדים של ייצור חשמל על מבנים עשוי להעלות את התועלות החיצוניות והמשקיות שלו ל-0.80 ₪ לקוט"ש. כך שבסופו של דבר שווי קוט"ש שמיוצר בבניין עשוי להיות 1.25 ₪. לכן, אנו מעריכים כי פרויקטי BIPV יהיו אפילו כלכליים יותר מהמוצג בעבודה זו, בראיה משקית.

4.5 מבט לעתיד

נזכיר כי התוצאות אשר מוצגות כאן הן הצעות המחיר הזולות ביותר אשר הצלחנו להשיג עבור החלופות השונות. הצעות מחיר אחרות, אשר לא מוצגות כאן, העלו את עלויות ה-BIPV ב-35-100% (ראו נספח 10.4). בנוסף, מחירים אלו הם של פאנלים סולאריים בגדלים סטנדרטיים. שימוש בפאנלים בגדלים מיוחדים (custom made) גורר עלויות גבוהות עוד יותר. לכן, יזם או אדריכל אשר שוקל ברצינות שימוש ב-BIPV, טוב יעשה אם יתכנן את הבניין מראש לפי גדלים סטנדרטיים של פאנלים סולאריים של BIPV. כך, ימקסם את שטח הבניין המשמש לייצור אנרגיה, מבלי לשלם פרמיה גבוהה על פאנלים בייצור מיוחד.

כיום השוק האירופי מציע מגוון רב של מוצרים: טכנולוגיות הפאנל עצמו, צבעים, מידת שקיפות, שיטות התקנה וגם אלו משפיעים על טווחי מחירים. בבואנו לבצע חישוב לכדאיות הכלכלית של כל פתרון ניכר כי המושגים של שיטות ההתקנה עוד לא נמצאים בשימוש עקבי, והשוק לא עושה שימוש בגדלים סטנדרטים לשם מתן הצעות מחיר. כל אלו מביאים לכך שלא ניתן להעריך עלויות והחזר השקעה בצורה פשוטה כמו במקרה של פאנלים קונבנציונליים. על מנת לקבל הערכה כלכלית מדויקת יש לבצע בדיקה פרטנית לאתר הספציפי, אשר תביא בחשבון מספר רב של גורמים: אילוצים אדריכליים, צל, הפניות, מחיר ויעילות הציוד. כל גורם משפיע על שאר הגורמים וצריך לבצע שקלול תמורות מורכב.

ההתייחסויות הכלליות והחשובות שקיבלנו תוך כדי שיחות עם הגורמים בארץ ובחו"ל הן שהשוק עוד לא מבוסס, יעילות המערכות עדיין בתהליך שיפור, וטווחי המחירים רחבים. כמו כן, כאשר מקבלים הצעות מחיר ראשוניות מספקים, קשה להבחין בין מחיר גבוה ומחיר הגיוני, לפני שמבצעים תחשיב מלא לכל מרכיבי המערכת.

יש לזכור כי תוצאות הסימולציה האנרגטית במחק זה הינן השמרניות מבין המחקרים שנלמדו וניתן להעריך שמדידות שטח ישקפו תוצאות טובות עוד. כמו כן המחירים משקפים מצב נוכחי של שוק בהתהוות ויש צפי לירידה בעלויות עם התפתחות הטכנולוגיה באופן כללי וגדילת השוק המקומי.

ישנם כיום בפיתוח זכוכיות עם ציפוי ננו-טכנולוגי אשר מונע הצטברות אבק או כתמים [113]. כאשר פיתוח זה יכנס כמוצר לשוק ה-BIPV, יהיה ניתן להתקין מוצרי BIPV אשר אינם דורשים שטיפה מחזורית במשך השנה ע"מ לשמור אותם נקיים. מצד אחד, צפוי כי מוצר כזה יהיה יקר יותר ממוצר BIPV עם זכוכית רגילה, אולם, לאחר התקנתו הוא לא יצטרך שטיפה, ורוב העלות

של התחזוקה (רוב העלות היא עלות השטיפה) השנתית תתבטל. יש לציין שעלות השטיפה היא עלות מקובלת גם במבני משרדים מסוג זה ללא יישום סולרי.

כמו כן, צפוי כשיפור ביעילות טכנולוגיות PV יחדור גם אל שוק ה-BIPV, וישפר את יעילות המרת קרינת השמש לאנרגיה חשמלית. כמו כן, צפוי שיפור בנראות מוצרי BIPV עם הבשלת מוצרי דור I-II בגוונים, צורות ומרקמים חדשים, וכן עם הבשלת טכנולוגיית דור III (ראו פרק 2.1).

בהנחה והרגולציה האירופית לבנייני NZEB אכן תיושם עפ"י תכנון (ראו פרק 2.3.2), צפוי כי בשל גדילת שוק ה-BIPV (ראו פרק 2.3.3), מחירי ה-BIPV ירדו. זאת, בדומה לטכנולוגיות רבות, כגון הפאנלים הסולאריים הרגילים [76].

4.6 מגבלות המחקר

כצפוי, עקב העובדה ששוק ה- BIPV בארץ עדיין לא קיים, קשה להשיג מידע רב על עלויות וביצועים אמיתיים של BIPV בישראל. עם שילוב BIPV בפרויקטים נוספים בארץ, יהיה ניתן להשיג מידע מדויק יותר על העלויות ועל הביצועים בפועל של מערכות BIPV.

לא מצאנו ניתוח כלכלי אשר מכמת את היתרון היחסי של BIPV לעומת PV רגיל או לעומת דלקי מאובנים, בצורה של תועלות חיצוניות או משקיות. כימות כזה צפוי לשפר את החזר ההשקעה של BIPV בראיה משקית.

מחקר זה לא לקח בחשבון ניתוח מחזור חיים (Life Cycle Analysis- LCA) של BIPV לעומת PV רגיל, מוצרי מעטפת בניה ללא BIPV, התייעלות אנרגטית ושימוש בדלקי מאובנים לאנרגיה. אולם, מחקרים אחרים מצאו כי LCA אנרגטי של BIPV גורם לפליטת פי 10 פחות גזי חממה לכל קוט"ש מיוצר, לעומת דלקי מאובנים (גז ופחם), ובערך אותו סדר גודל עד פי 2 יותר גזי חממה לכל קוט"ש לעומת PV רגיל ואנרגיה גרעינית. בחירה חכמה של רכיבי ה-BIPV יכולה להוריד את פליטת גזי החממה לקוט"ש מיוצר אל מתחת לאלו של PV רגיל [45].

לא חושבה במדויק הוזלה של עלויות תאורה ואקלים המתקבלת במבנה כתוצר לוואי של חלק מחלופות ה-BI(PV), הודות להצללות (ראו פרק 4.3).

לא נלקח בחשבון חסמים פסיכולוגים ואחרים כמפורט בפרק החסמים.

אין עדיין מחקרים אשר מצאו יתרון בשווי נכסים ודמי שכירות בבניינים עם BI(PV) לעומת בניינים אחרים [6]. אולם, קיימים מחקרים אשר מראים כי בבניינים "ירוקים" בעלי ביצועים אנרגטיים גבוהים במיוחד (דרוג A, כפי שצפוי בבניין BIPV), דמי השכירות גבוהים ב-7% [114,115] מאלו של בניין עם דירוג אנרגטי נמוך (G). כמו כן, מאפיינים "ירוקים" אחרים בבניין יכולים להעלות את דמי השכירות ב-10% נוספים [115]. לכן, סביר כי בפועל ההשקעה הישירה של היזם בבניה של בניין BIPV תחזיר עצמה מהר יותר מאשר התוצאות המוצגות כאן (ראו תרשים 52). אגב, הפרמיה הנוספת על דמי שכירות בבניין עם יעילות אנרגטית גבוהה, קטנה מהחיסכון האנרגטי המתקבל בבניין זה. ז"א, למרות ששוכר הדירה משלם פרמיה גבוהה יותר,

הוא בנטו חוסך לעומת השכרת משרד שאינו יעיל אנרגטית, כי משלם הרבה פחות על הוצאות אנרגיה [115,116]. לא לקחנו בחשבון אספקט זה בניתוח הכלכלי.

לא נבדק האם עדיפה מבחינה כלכלית העמדה של בניין המשרדים עם חזיתות לכיוון צפון/ דרום/ מזרח/ מערב (כמו שנבחן בעבודה) אל מול חזיתות לכיוון דרום-מזרח/ דרום-מערב/ צפון-מזרח/ צפון-מערב. באופציה השנייה, יש להתקין BIPV על 2 חזיתות בלבד (דרום-מזרח/ דרום-מערב), לכן מצד אחד העלות הכללית נמוכה יותר. אולם מצד שני ייצור החשמל בחזיתות אלו יהיה ברמת ביניים בין חזית שפונה כולה מזרח או מערב, לבין חזית שפונה לכיוון דרום.

5 חסמים

כמו טכנולוגיות ינוקא רבות, תחום ה-BIPV סובל מחסמים רבים ליישום בקנה מידה נרחב בישראל.

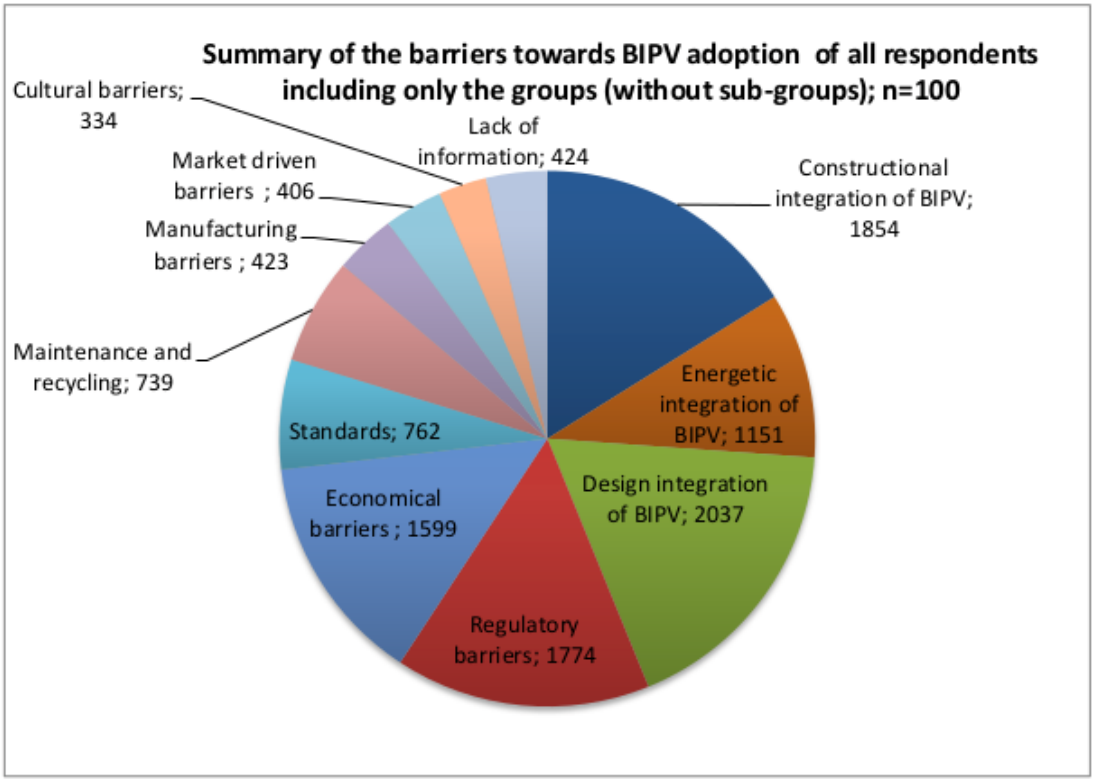
- חסמים בתחום משאב אנושי [117]:
  - חוסר באנשי מקצוע אשר בקיאים ב-BIPV בשלל תחומים: אדריכלים, חשמלאים, קבלנים, חברות PV, סוכני מכירות ועוד [117].
  - חוסר מיומנות בתכנון, הקמה, תפעול ותחזוקה של פרויקטי BIPV.
  - חוסר מודעות והתנגדות כללית לשינויים בקרב ענף הבניה. חלק ניכר מענף הבניה עושה שימוש בטכנולוגיות פשוטות. קשה להכניס לענף זה שימוש בטכנולוגיות מתקדמות [73].
  - חוסר שיתוף פעולה בקרב בעלי העניין: ענפי הבניה וה-PV לא מתקשרים [73].
- חסמים אדריכליים
  - שטח גגות בישראל מוקדש לאחסון מתקני תשתית כגון אמצעי מיזוג, משאבות מים, חדרי מעליות, מנחת מסוקים, אנטנות, ועוד. מתקנים אלו מקטינים את השטח אשר עליו ניתן להתקין PV וכן עלולים להצל על PV שמותקן. לכן רק 30% מהגג פנוי למערכות סולאריות אם בכלל.[93]
  - העדפה של מתכננים למוצרי גמר בעלי נראות שונה מזו של פאנלי PV נפוצים. למשל- גגות רעפים, שינגלס, או חזיתות עם חיפוי אבן או עץ.
  - מורכבות נוספת ביישום והצורך בהטמעה מוקדמת בתהליכי התכנון.
- חסמי מידע [117]:
  - חוסר במידע זמין בעברית לאנשי מקצוע על טכנולוגיות, ספקים ומוצרי BIPV.
  - חוסר בלימוד ואימון אנשי מקצוע בתחום BIPV.
  - חוסר במידע על BIPV לקובעי מדיניות ולהנעת החברה האזרחית.
  - חשש פסיכולוגי מקרינה אלקטרומגנטית בלתי מיוננת (לא מבוסס לגבי PV על בניינים).
- חסמים טכנולוגיים [117]:
  - קושי בזיהוי סטנדרטים נדרשים ואישורים המשותפים לבניה ול-PV [73].
  - ייצור מקומי לא מספק של ציוד מיוחד לתחום.
  - חוסר מספק של התקדמות טכנולוגית בתחום שתאפשר יישום רחב היקף (למשל: יעילות ה-PV עדיין מוגבלת, פתרונות לאגירת אנרגיה ברמת הבניין עדיין לא נפוצים).
  - הצטברות אבק על התאים הסולאריים מוריד את התפוקה.
  - שטפי קרינה נמוכים יותר על חזיתות לעומת גגות/ PV קרקעי.

- חסמים כלכליים [117]:
  - מכיוון שהתחום עדיין בחיתוליו בארץ (ובעולם גם כן לא בתנופה מלאה), אין Economy of scale, אשר מאפשר הוזלת עלויות לכל יחידה על סמך ייצור/ התקנה של מספר רב של יחידות.
  - מיידע מוגבל על פוטנציאל השוק.
  - חוסר במדיניות תומכת לטווח ארוך לא מעודדת משקיעים להיכנס לתחום בארץ.
  - מודל עסקי מסובך יותר לעומת בניה בלבד או PV בלבד. איך מממנים פרויקטים כאלו? (האם באמצעות משכנתא? הלוואות ארוכות טווח?); איך מבטחים? (מי יכסה ביטוחית? מה בנוגע לתחזוקה? חלקי חילוף?); האם יש ערבות? (מי יכסה את החשבון במידה ויתגלה פגם בשלב מאוחר לאחר ההתקנה?) [73].
  - למרבה האירוניה, הירידה התלולה במחירי מערכות PV רגילות בעשורים האחרונים וכתוצאה מכך ירידה בעלות ייצור החשמל באמצעותם, פוגעת ביישום מוצרי BIPV אשר כיום לרוב עדיין יקרים משמעותית לעומת מערכות PV רגילות. בשאיפה, גם מחירי ה-BIPV ירדו בעקבות מוצרי ה-PV.
- חסמי מדיניות [117]:
  - יעדי אנרגיות מתחדשות נמוכים בישראל (17% בלבד מכלל החשמל ב-2030).
  - חוסר יישום של החלטות הממשלה הצנועות בתחום יעדי אנרגיות מתחדשות. רק 2-3% מצריכת החשמל כיום (2018) מקורה באנרגיות מתחדשות, אל מול יעדים מקוריים צנועים של 5% עד 2015 ו-10% עד 2020.
  - חוסר ודאות משקית בנוגע לתמיכות המדינה באנרגיות מתחדשות.
  - הסתמכות כמעט בלעדית על גז טבעי כמקור אנרגיה העיקרי של ישראל בעשורים הבאים.
  - העדר תמיכות, הנחות, מכסות חשמל ותעריפים ייעודיים ל-BIPV אשר עדיפים על PV קרקעי (וכמובן עדיפים על דלקי מאובנים).
  - ירידה בתעריף לחשמל המיוצר מ-PV בעשור האחרון לאור הירידה בעלויות ייצור והתקנה של PV רגיל, ובמקביל עלויות ייצור והתקנה גבוהות של מוצרי BIPV- לא מאפשרות לפרויקטים של BIPV להסתמך על תעריף יצור חשמל באמצעות PV לשם החזר ההשקעה בפרק זמן סביר.

- מדיניות נוכחית של בניית דירות מגורים במהירות האפשרית ובעלות מינימלית ללא שילוב מאפיינים של בניה ירוקה (כמו למשל בפרויקט "מחיר למשתכן").
- העדפה להקמת מתקני אנרגיות מתחדשות גדולים ע"י חברות גדולות, אל מול הקמת מתקנים קטנים ומבוזרים ע"י חברות קטנות ואנשים פרטיים. יחד עם זאת, בשנה האחרונה חלה התקדמות בנושא, עם הקלות להקמת מתקני PV על מבנים ע"י אנשים פרטיים.
- בניגוד לאירופה [112,118,119], בישראל מדיניות של מחיר חשמל זול, אשר לא כולל את העלויות החיצוניות של שימוש בחשמל (זיהום, פגיעה בבריאות, פגיעה בסביבה, ייצור פסולת...). מדיניות זו פוגעת ביכולת של אנרגיות נקיות להתמודד עם דלקי מאובנים מבחינה כלכלית.
- מדיניות של סבסוד מסיבי ישיר (מימון תשתיות הולכה, סבסוד מעבר מפעלים לשימוש בגז טבעי, אבטחה צבאית של אסדות גז טבעי ותשתיות אנרגיה נוספות) ועקיף (מימון של התמודדות עם נזקים בריאותיים וסביבתיים) של דלקי מאובנים, אשר גבוה מזה הניתן לאנרגיות מתחדשות, פוגעת ביכולת של אנרגיות נקיות להתמודד עם דלקי מאובנים מבחינה כלכלית.

- חסמי רגולציה:
  - שטחי הגג והחזיתות בבניינים גדולים משותפים למספר ישויות. יש בעיה של קבלת הסכמות משותפות וחלוקת רווחים ביניהם [93].
  - ישנם חוקי עזר עירוניים: כמו הדרישה לחפות באבן כל מבנה חדש בירושלים (למעט מקרים יוצאי דופן); או חוקי/תקנות שימור מבנים-המגבילים יישום BIPV רגיל בערים [120].

בסקר אשר כלל בעלי עניין בתחום מכל העולם [77], דורגו חשיבויות של חסמים שונים בתחום ה-BIPV. החסמים הכי משמעותיים שזוהו היו (לפי סדר חשיבות יורד): שילוב עיצוב BIPV במבנים, שילוב מבני של BIPV, חסמים רגולטוריים, חסמים כלכליים, ושילוב אנרגטי של BIPV (ראו תרשים 59). יש לשים לב כי בישראל התחום בפועל לא קיים, לכן דירוג החסמים לא בהכרח זהה למצב במדינות בהן שוק ה- BIPV כבר קיים. סביר כי הדירוג בישראל הוא קודם כל חוסר ידע, חסמים כלכליים, וחסמים רגולטוריים.



תרשים 59: סקר חסמים בתחום BIPV בקרב בעלי עניין בעולם.
הסקר כלל 100 בעלי עניין. המספרים מייצגים את מידת החשיבות שהנסקרים נתנו לחסם, כאשר מספר גבוה יותר מצביע על חשיבות גבוהה יותר. מתוך [77].

6 מסקנות

6.1 מסקנות אנרגטיות וסביבתיות

- התקנה מנדטורית של BI(PV) על כל המבנים החדשים בישראל (מגורים, משרדים, מסחריים, תעשיה), יכולה להביא להפקת 30-50% מכלל צריכת החשמל בשנת 2040 בישראל, בתרחיש עסקים כרגיל (ללא שינויים בקצב גדילת שוק האנרגיה, ללא שינויים טכנולוגיים, ללא שינוי בקצב הגדילה הדמוגרפי- ראו פרק 2.4.4).
- התקנה מנדטורית של BI(PV) על כל המבנים החדשים בישראל, יכולה להביא להפקת יותר מ-100% מצריכת החשמל בשנת 2040 בישראל, אם לוקחים בחשבון שיפור צפוי ביעילות ההמרה של קרינת השמש לחשמל, התייעלות אנרגטית לאומית, יישום אמצעים טכנולוגיים שכבר קיימים היום ו/או ירידה בצמיחה הדמוגרפית הלאומית (ראו פרק 2.4.4).
- התקנה נרחבת של BI(PV) על מבנים בישראל תעזור לצמצם פגיעה בשטחים פתוחים עבור תשתיות אנרגיה; תהפוך את הערים בישראל לבעלות חסינות אנרגטית גבוהה בהרבה לעומת המצב כיום; תחסוך במשאבים רבים; תאפשר דמוקרטיזציה של הפקת וצריכת אנרגיה; תצמצם את התלות של ישראל בדלקי מאובנים יקרים, מזהמים ומונופוליסטיים; תייצר מקומות עבודה רבים; תביא לצמצום ניכר בפליטות גזי חממה, זיהום אוויר ותחלואה נלווית; תביא להתייעלות אנרגטית ותצמצם אובדן חשמל ואנרגיה בייצור ובהולכה.
- התקנה סולרית רק על הגג אינה מייצרת פוטנציאל אנרגטי מספק ברבי קומות. רק התקנה של מוצרי BIPV על חזיתות מזרחית, דרומית ומערבית (חלופות C, E, G, I), מאפשרת הפקת אנרגיה בהיקף משמעותי לעומת צריכת האנרגיה בבניין המשרדים אשר נבחן (מעל 5% מהצריכה).
- מוצרי ה-BIPV המתקדמים אשר מותקנים על חזיתות בזווית אופטימלית לקליטת קרינת השמש (30° מעלות, זיגזג) מייצרים הכי הרבה אנרגיה לכל מ"ר סולארי מותקן (חלופות I-F).
- בישראל החמה, התקנת BIPV בחזית מאווררת (cold facade) עדיפה מבחינת ייצור חשמל לעומת התקנה בחזית חמה (warm facade).
- תוצאות הסימולציה האנרגטית במחקר זה שמרניות ביותר. סביר כי הפקת החשמל בפועל תהה טובה יותר בכ-10% מאשר בתוצאות שלנו (ראו פרקים 4.1.1 ו-4.2.2.5).
- ייצור חשמל במערכות BIPV הינו בעל יתרון סביבתי ניכר לעומת ייצור ב- PV קרקעי, ובעל יתרון סביבתי מתון ברוב הפרמטרים לעומת PV רגיל המותקן על הגג. היות וההתקנה של PV על גג בישראל עדין פשוטה, זולה ויעילה יותר מאשר התקנה על

החזית, ניתן במבנה NZEB/ ZEB רב-קומות, למצות ראשית את הפוטנציאל של התקנות סולאריות על גג, במסגרת שטח הפרויקט ו/או המבנים הסמוכים לו (כמו שנעשה באירופה). אולם היות ושטח הגגות הזמין לשימוש זה, על פי רוב מוגבל, סביר שתידרש השלמה בכדי לכסות את צריכת האנרגיה המלאה בבניין החדש. פער זה ניתן לצמצום באמצעות שימוש ב-BIPV גם בחזיתות המבנה ליצור אנרגיה סולארית.

- בבניין משרדים רב-קומות טיפוסי הדומה לבניין הייחוס במחקר זה, אשר יעיל אנרגטית, ניתן לייצר 20-35% מהאנרגיה הנצרכת בבניין. ע"מ לייצר את כל האנרגיה הנצרכת בבניין, על הבניין להקים מערכות ייצור אנרגיה מתחדשת נוספות במקומות נוספים (למשל, מערכות PV רגילות על גגות מבנים סמוכים, ראו פרקים 2.3.1.4 ו-4.3) [94].
- התוצאות המוצגות בפרק הכלכלי הן של הצעות המחיר הכי אטרקטיביות. קיימות הצעות מחיר יקרות יותר אשר מתאימות יותר לתכנון האדריכלי המקורי של 4 החתכים. להצעות מחיר אלו ROI ארוך יותר מאשר לחלופות המוצגות בפרק הכלכלי.
- יש הבדלים מהותיים בין היקף ייצור החשמל בין הסימולציה האנרגטית לבין הניתוח הכלכלי (ראו סוף פרק 4.2.2.2). לכן, לשם תכנון אופטימלי של מערכות BI(PV) סטנדרטיות (לא מותאמות אישית) על בניין חדש, תכנון החזיתות (רוחב בניין/חזית, גדלי חלונות, גדלי שטחים אטומים, גובה קומות וכו') צריך להתבצע בהתאם לגדלים של מערכות ה-BI(PV) הסטנדרטיות.
- ניתן לזהות 3 מוטיבציות עיקריות ביישום BIPV על חזיתות: מיקסום ייצור אנרגיה, מינימום זמן החזר השקעה, ומצב ביניים עם ייצור אנרגיה אופטימאלי תוך זמן החזר השקעה אופטימלי. להלן הדרכים למימוש כ"א מהמוטיבציות:
  - מיקסום ייצור אנרגיה- בניית בניין עם חזיתות לכיוון רוחות השמיים (חזית דרומית, חזית מערבית, חזית מזרחית...), יישום BIPV על חזיתות מזרח, דרום ומערב. כך אמנם יש עלויות של יישום 3 חזיתות BIPV, אך יש ניצול של כל קרינת השמש הזמינה לבניין (חזיתות מזרח ומערב יצרניות פחות מחזית דרום).
  - מינימום זמן החזר השקעה- בניית בניין עם חזיתות לכיוון רוחות השמיים (חזית דרומית, חזית מערבית, חזית מזרחית...), יישום BIPV על חזית דרום בלבד. כך, יש עלויות של יישום חזית BIPV אחת בלבד החשופה למקסימום קרינה.
  - מצב ביניים עם ייצור אנרגיה אופטימאלי תוך זמן החזר השקעה אופטימלי- בניית בניין עם חזית לכיוון דרום-מזרח, חזית לכיוון דרום-מערב וכו'; יישום BIPV על חזיתות דרום-מזרח ודרום-מערב. כך, יש עלויות של יישום 2 חזיתות

BIPV בלבד, החשופות לקרינת שמש יחסית גבוהה. ניתן לנצל רמת ביניים של קרינת השמש הזמינה לבניין.

6.2 מסקנות כלכליות

- למרות העובדה שמחירי ה-BIPV עדיין יחסית גבוהים, מחירי החשמל הגבוהים באיחוד האירופי, אשר כוללים עלויות חיצוניות של ייצור חשמל, הופכים פרויקטים של BIPV באירופה לכלכליים (ראו פרק 2.3.2).
- בשונה מהמצב באיחוד האירופי, מחיר החשמל הנמוך בישראל, אשר אינו משקף את העלויות החיצוניות של הפקת חשמל, אינו מאפשר לרוב חלופות ה-BIPV להיות כלכליות כיום עבור היזם הפרטי אשר אינו מתחשב בתועלות החיצוניות והמשקיות של טכנולוגיה זו (ראו פרקים 4.2.2 ו-5).
- חלופה D, הכוללת התקנת p-Si על החלקים האטומים של החזית הדרומית ו-PV על הגג, הינה החלופה היחידה שמחזירה עצמה תוך פרק זמן סביר (21 שנים) בשוק הישראלי ללא התחשבות בהתייעלות אנרגטית- (ראו פרקים 4.2.2 ו-5).
- כאשר לוקחים בחשבון את ההתייעלות האנרגטית המובנית אשר מספקות חלופות H-I (חתך 4), מקבלים כי חלופות אלו מחזירות את ההשקעה תוך 14 שנה. הן היחידות שמחזירות את השקעה בפחות מ-20 שנה. כל זאת ללא תמיכה ממשלתית נוספת. בנוסף, חלופה I היא החלופה אשר מייצרת וחוסכת הכי הרבה חשמל מכל החלופות.
- ע"מ שפרויקט BIPV בבניין המשרדים הטיפוסי אשר נבחן (כולל PV על הגג) יחזיר את ההשקעה תוך פחות מ-20 שנה במציאות הישראלית הנוכחית וביעילות המערכות הנוכחיות, צריך שהעלויות הנוספות של מערכות BI(PV) מעבר לעלויות של בניין רגיל, תהיינה (ללא מע"מ):
  - **בפרויקט c-Si BIPV שטוח על חזית דרומית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-900 ₪ למ"ר סולארי.
  - **בפרויקט c-Si BIPV שטוח על חזיתות דרומית, מזרחית ומערבית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-675 ₪ למ"ר סולארי.
  - **בפרויקט c-Si BIPV בזווית אופטימלית לשמש על חזית דרומית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-1500 ₪ למ"ר סולארי.
  - **בפרויקט c-Si BIPV בזווית אופטימלית לשמש על חזיתות דרומית, מזרחית ומערבית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-1150 ₪ למ"ר סולארי.

- **בפרויקט thin film BIPV על חזית דרומית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-590 ₪ למ"ר סולארי.
- **בפרויקט thin film BIPV על חזיתות דרומית, מזרחית ומערבית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-425 ₪ למ"ר סולארי.

- מחקרים עתידיים, אשר ייקחו בחשבון: חיסכון בצריכת אנרגיה בבניינים עם BIPV הודות להצללות, ופרמיה גבוהה על השכרת/ רכישת בית/ דירה/ משרד/ בניין "ירוק" המייצר אנרגיה- עשויים להעלות את ההכנסות/חיסכון בפרויקטים של BIPV בבנייני משרדים. זאת, לרמה אשר תצמצם את זמן החזר ההשקעה שלהם אל מתחת ל--15 20 שנה.
- כאשר תועלות חיצוניות ומשקיות נלקחות בחשבון, רוב מערכות ה-BIPV שנבדקו (D, E, F, G, H, I), מחזירות את עצמן תוך 8-20 שנה (ראו פרק 4.2.2).
- הודות לרגולציה תומכת BIPV בעולם, ולהשקעות גבוהות בצמצום פליטות גזי חממה, שוק ה-BIPV העולמי צומח בקצב שנתי של 33%, וצפוי להגיע ל- 61$ מיליארד USD בשנת 2022. זוהי הזדמנות לחברות ישראליות להיכנס לשוק מתפתח זה.
- שוק ה-BIPV הישראלי עשוי להגיע להיקף של 210-420$ מיליארד ₪ במידה ויותקנו מערכות BIPV בהיקף של 30-60 GW.

6.3 מסקנות רגולטוריות

בתנאים הנוכחיים של ישראל, ללא הכוונה ותמיכה ממשלתית ייעודית לייצור חשמל על מבנים, שוק ה-BIPV לא צפוי לצמוח בישראל ב-5-10 השנים הקרובות בניגוד לקצב צמיחה עולמי שנתי של כ-33%. עם זאת, מתן תמיכה ממשלתית בגובה התועלות החיצוניות והמשקיות שמתקבלות מהתקנת BIPV תשנה את תמונת הכדאיות ובחלק מהחלופות תציג זמני החזר השקעה סבירים של 8-11 שנה.

7 אפשרויות יישום תוצאות העבודה בישראל

ישראל יכולה להחליט שלא להשקיע בתחום ה-BI(PV), לחכות ששוק ה-BI(PV) יבשיל, שהמחירים בו ירדו עוד, ושהמוצרים ילכו ויתרבו. זוהי המדיניות שישראל בחרה בה בתחום ה-PV הרגיל. התוצאה אמנם היא שכעת מוקמים בישראל פרויקטים של PV במחירים נמוכים משמעותית לעומת העשור הקודם, אולם יש לכך מחיר. בראש ובראשונה, ישראל שטופת השמש נמצאת בשנת 2019 עם היקפי ייצור אנרגיות מתחדשות מהנמוכים מבין המדינות המפותחות, ומשלמת על כך בהוצאות בריאות ותשתיות עקב שימוש בדלקי מאובנים, ובתלות אנרגטית בגז טבעי יקר אשר פולט גזי חממה רבים. בנוסף, ישראל פספסה הזדמנות להפוך לאתר מו"פ בתחום ה-PV, וחברות מקומיות בתחום נסגרו או עברו לחו"ל. והרי, ישראל יודעת להפוך למוקד מו"פ עולמי- היא עשתה זאת בתחום המים, בתחום החקלאות, בתחום ההיטק ועושה זאת כעת בתחום תחליפי דלקים ותחבורה חכמה.

בנוסף, מעבר לטיעונים הללו, אשר רלוונטיים לטכנולוגיות חדשות רבות- קיימת דחיפות בצמצום פליטות גזי חממה עד 2030, דחיפות להתכונן לשינוי אקלים [15], ודחיפות לצמצם את פגיעות רשת החשמל. לכן, מומלץ למדינה להתחיל כבר עכשיו במדיניות שתעודד/ תחייב בניית מבנים עם BI(PV), אשר יצמצמו פליטות גזי חממה, יהפכו לחסונים לשינוי אקלים, וחסונים לפגיעה נרחבת ברשת החשמל (לחימה, אסון טבע, מתקפת סייבר).

7.1 המלצות מדיניות

- קיימת דחיפות בצמצום פליטות גזי חממה, דחיפות להתכונן לשינוי אקלים, ודחיפות להתכונן לפגיעה פוטנציאלית ברשת החשמל. לכן, מומלץ למדינה להתחיל כבר עכשיו במדיניות שתעודד/ תחייב בניית מבני NZEB בכלל ועם מערכות BI(PV) בפרט. מבנים אלו יצמצמו פליטות גזי חממה, יהפכו לחסונים לשינוי אקלים, וחסונים לפגיעה נרחבת ברשת החשמל (לחימה, אסון טבע, מתקפת סייבר).
- מומלץ לקדם אגירת אנרגיה בישראל אשר תאפשר שימוש נרחב באנרגיות שמש ורוח.

7.2 המלצות רגולציה

- לעודד ערים לקבוע חוקי עזר עירוניים אשר מקדמים BI(PV), בדומה לנעשה בסיאול (ראו פרקים 2.3.1.3 ו-2.3.2).
- בדומה לרגולציה באיחוד האירופי, לקבוע כי כל בניין <u>ציבורי</u> אשר יבנה בישראל החל משנת 2021, יחויב להיות NZEB, <u>וכל</u> בניין אשר יבנה בישראל החל מ-2025, יחויב להיות NZEB.
- מכיוון שכיום מערכות BIPV יקרות ליישום בשוק הישראלי, מומלץ לאפשר לרבי קומות להיות NZEB/ ZEB גם באמצעות התקנת מערכות PV רגילות וזולות על גגות אחרים

בעיר (בדומה למתרחש באיחוד האירופי, ראו פרקים 2.3.1.4 ו-4.3). אולם, בשל מגבלות על התקנת PV על הגג בעיר, סביר כי תידרש השלמה של ייצור חשמל גם ע"י מערכות BIPV בחזיתות.

- הסרת חובת שימוש בחיפוי בניין ספציפי (כמו חיפוי אבן בירושלים), כאשר נעשה שימוש ב- BIPV בחזיתות.
- הגדלת אחוזי שטח שירות במבנה הממקם מתקני תשתית בתוך הבניין ולא על הגג לטובת התקנות סולאריות על הגג.
- לשקול חיוב הקמת בניינים עם מאפיינים המותאמים להתקנת BI(PV) (ראו המלצות אדריכלות בפרק זה), או לפחות לתמרץ הקמת בניינים כאלו.

7.3 המלצות אדריכליות

- מכיוון ששוק ה-BIPV הישראלי בחיתוליו, רב הנסתר על הגלוי בתחום. לכן מומלץ לפחות ב-5 השנים הקרובות, לבחון בדקדקנות התכנות ליישום BIPV על כל בניין בו נשקל יישום שכזה. לשם אופטימיזציה של ייצור אנרגיה סולארית ע"י בניינים, יש לתכנן בניינים בצורה אופטימאלית להתקנת BI(PV) [92,93]. למשל:
  - למקם מתקני תשתית של הבניין בתוך הבניין ולא על הגג, כך שיהיה פנוי להתקנת PV על כל שטח הגג.
  - לתכנן מראש גג בזווית 30° מעלות עם מפנה דרומי, אשר יאפשר התקנת PV עם מתקון מינימלי, על כל שטח הגג, בזווית אופטימלית וללא הצללה הדדית של הפאנלים.
  - להעדיף התקנת BIPV כחלק מחזית מאווררת, אשר שומרת על ה-BIPV בטמפ' נמוכה, השומרת על יעילות מערכת גבוהה יותר ומאפשרת הפקת יותר חשמל.
  - לעודד התקנת BIPV בזווית 30° מעלות על חזיתות, לשם ניצול אופטימלי של קרינת השמש.
  - כאשר מתכננים בניין עם מעטפת BIPV, מומלץ ליצור מעטפת בניין מודולרית, אשר מאפשרת בקלות רבה יחסית להחליף את המעטפת במעטפת BIPV חדשה כאשר דור חדש ויעיל יותר של BIPV נכנס לשוק. (בדומה לבניין FKI, ראו פרק 2.3.1.3).
  - בשל העובדה ששוק ה-BIPV בארץ בחיתוליו, מומלץ לבצע כל 5 שנים בדיקה עדכנית של טכנולוגיות זמינות ועלויות צפויות בישראל.
  - עוד בשלב תכנון הבניין, רצוי לתכנן אותו כך שהמעטפת שלו תוכל לבצע שימוש אופטימלי במוצרי BIPV מכיוון שהכדאיות תלויה ביכולת ביצוע הפניות נכונות, מניעת השפעה של הצללות, ובחירה במוצרים נפוצים בשוק ובגדלים

סטנדרטיים קיימים. כך יהיה ניתן למקסם את שטח החזיתות המכוסה בפאנלים סולאריים, לצמצם הצללה על פאנלים סולאריים, לצמצם שטחים עליהם לא ניתן בשל מגבלות בגדלים של פאנלים סטנדרטיים, ולחסוך בעלויות באמצעות הימנעות מרכישת מוצרי BIPV בייצור מיוחד (custom made).

- כאשר נראות הבניין היא הפקטור הכי חשוב בבניין, מומלץ להשתמש בפאנלים של BIPV בייצור מיוחד.
- כאשר מתוכנן בניין עם מערכות BIPV בחזיתות, יש לבחון האם הקונטקסט העירוני ישפיע בצורה ניכרת על ביצוע המערכת. במקרים בהם הקונטקסט העירוני משמעותי, מומלץ שלא ליישם מערכות BIPV בקומות התחתונות של הבניין המושפעות מהצללות משמעותיות.

7.4 המלצות כלכליות

- ע"מ לאפשר יצירת שוק BIPV בארץ, מומלץ לספק תמריצים כלכליים להקמת פרויקטים של BIPV, כמקובל במדינות אחרות בעולם, לפחות לפרק זמן התחלתי של 5 שנים.
- למרות המגמה של הורדת תעריף הייצור של חשמל באמצעות PV בארץ, לאור היתרונות הגבוהים בייצור חשמל מתחדש על מבנים, מומלץ שלא להוריד עוד תעריפי ייצור אלו, או אף לשקול להעלות אותם.
- מומלץ לקבוע תקציב ייעודי לתמיכה בבנייני ZEB/NZEB או למערכות BIPV כחלק מהתקציבים הלאומיים להתייעלות אנרגטית.
- סבסוד התקנת מערכות BIPV בבניינים מעל גובה 5 קומות.
- אופציות לתמריצים כלכליים אפשריים:
  - יישום פחת מואץ (למשל, 5% בשנה) על מערכות BIPV.
  - מתן הקלות מס רכישה ומס הכנסה למערכות BIPV.
  - מענקים.
  - תעריפים מיוחדים לייצור חשמל על גבי מבנים.
  - הלוואות בתנאים מועדפים.
  - הנחות על רכישת קרקע אשר תשמש לפרויקטים עם BIPV.
  - אגרות חוב ירוקות.
- מומלץ להתנות מתן תמריצים ליישום BIPV בהוכחת ייצור חשמל מעל רף מסוים בשנה הראשונה לפעילות, ואולי אף בשנים מאוחרות יותר. זאת, ע"מ להבטיח כי מערכות ה-BIPV המותקנות אכן מייצרות חשמל בהיקף ראוי (כאחוז מסוים מצריכת האנרגיה של הבניין, וביחס לשטח הרצפה [יחס לשטח הדירות/ משרדים בבניין]), ואף

מתוחזקות כראוי ושומרות על יעילות. פתרון פשוט יחסית לבעיה זו, הוא יצירת אסדרה (באחריות רשות החשמל) הקובעת תעריף מועדף לייצור חשמל על בניינים. היקף התעריף משקף באופן ישיר את התרומה של ייצור חשמל על הבניין. ככל שבניין מייצר יותר חשמל, הוא מתוגמל יותר. בנוסף, באופן זה, בניגוד למתן מענקים, המדינה לא נדרשת להעמיד סכומי כסף גדולים בבת אחת עם הקמת מערכות ה-BIPV, אלא הסבסוד נפרש על פני שנים רבות. פתרון זה מבוצע כיום ביישום PV רגיל על גגות בישראל.

- מבחינה סביבתית, יש להעלות את תעריף החשמל המיוצר מדלקי מאובנים ע"מ לשקף את עלות הפגיעה שלהם בבריאות ובסביבה. אולם, בישראל פערים כלכליים גדולים בחברה. כמו כן, פוליטית קשה להעלות את מחיר החשמל. לכן, מומלץ שלא להעלות את מחיר החשמל לערכים גבוהים כמו בגרמניה למשל, אלא להשאיר אותו נמוך. על המחיר אותו משלם התושב, להוסיף תעריף מיוחד לייצור חשמל על מבנים (כפי שכבר קיים היום באופן חלקי), בייחוד ל-BIPV.
- לשם קבלת זמן החזר השקעה מינימלי (14 שנה) בשוק הישראלי הנוכחי, מומלץ ליישם BIPV בחזיתות מזרח, מערב ודרום בבניני משרדים טיפוסיים, עפ"י חתך 4 (BIPV בשיפוע אופטימלי של 30° מעלות המצל על החלונות) וחלופות I-H (ראו פרק 4.3.1).
- ע"מ שפרויקט BIPV בבניין המשרדים הטיפוסי אשר נבחן (כולל PV על הגג) יחזיר את ההשקעה תוך פחות מ-20 שנה במציאות הישראלית הנוכחית (ללא סבסוד) וביעילות המערכות הנוכחיות, מומלץ שהעלויות הנוספות של מערכות BIPV מעבר לעלויות של בניין רגיל, לא יעלו על (כולל מע"מ):
  - **בפרויקט c-Si BIPV שטוח על חזית דרומית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-900 ₪ למ"ר סולארי.
  - **בפרויקט c-Si BIPV שטוח על חזיתות דרומית, מזרחית ומערבית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-675 ₪ למ"ר סולארי.
  - **בפרויקט c-Si BIPV בזווית אופטימלית לשמש על חזית דרומית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-1500 ₪ למ"ר סולארי.
  - **בפרויקט c-Si BIPV בזווית אופטימלית לשמש על חזיתות דרומית, מזרחית ומערבית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-1150 ₪ למ"ר סולארי.
  - **בפרויקט thin film BIPV על חזית דרומית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-590 ₪ למ"ר סולארי.

- **בפרויקט thin film BIPV על חזיתות דרומית, מזרחית ומערבית**, על העלות הכוללת (עלות כל הציוד + התקנה) של מערכת ה-BIPV להיות פחות מ-425 ₪ למ"ר סולארי.

7.5 המלצות מודעות וידע

- על המדינה לפעול העלאת המודעות לנושא בקרב מקבלי החלטות, מובילי דעה ואנשי מקצוע בתחום ענף הבניה.
- סבסוד הדרכות מקצועיות החל ממקבלי החלטות וכלה בהכשרות מקצועיות.
- בשל העובדה ששוק ה-BIPV בארץ בחיתוליו, מומלץ למדינה לבצע כל מספר שנים בדיקה עדכנית של טכנולוגיות זמינות ועלויות צפויות בישראל. זאת ע"מ להבין האם יש צורך בעדכון מדיניות, רגולציה, תמריצים וכדומה.
- מומלץ לתמוך בביצוע פרויקטי הדגמה של BIPV בישראל, לשם הגברת מודעות וצבירת ניסיון בתחום בארץ [121].

7.6 המלצות טכנולוגיות לישראל

- ככל הניתן, יש להתקין בישראל BIPV כחלק מחזית מאוררת, השומרת על טמפ' נמוכה יותר של מערכת ה-BIPV, ומאפשרת יעילות הפקת חשמל גבוהה יותר.
- לשם קבלת זמן החזר השקעה מינימלי (14 שנה), מומלץ ליישם BIPV בחזיתות בניני משרדים טיפוסיים עפ"י חתך 4 (BIPV בשיפוע אופטימלי של 30° מעלות המצל על החלונות) וחלופות I-H (ראו פרק 4.3.1), תוך שימוש בפאנלי BIPV בגדלים סטנדרטיים (לא costume made).

8 המלצות למחקרי המשך

לשם השלמת הידע על יישום BIPV בבנייני משרדים בישראל, ועל BIPV בישראל בכלל, מומלץ לבחון את האופציות הבאות למחקרי המשך:

1. מכיוון שיישום BIPV בבניין עשוי להעלות את הפרמיה על שכירות או שווי הנכס, הדבר עשוי לאפשר החזר השקעה מהיר יותר לפרויקטים של BIPV. לכן, מומלץ להוסיף לחישובים בדיקה של שינוי בפרמיית השכירות או שווי נכסים בעלי BIPV, לעומת בניינים רגילים.
2. יישום BIPV אשר גורם להצללה בחזית (thin film על חלונות, פאנל בזווית המצל על החלונות) צפוי להוריד את צריכת האנרגיה של בניין בישראל. מומלץ לכמת התייעלות אנרגטית זו ולשלב אותה בחישובים. בדיקה זו עשויה להראות כי ניתן לקצר את החזר השקעה לפרויקטים של BIPV.
3. מומלץ לכמת את היתרון הסביבתי של BIPV לעומת PV רגיל המותקן על הקרקע (צמצום פגיעה בשטחים פתוחים, חוסן אנרגטי, חיסכון במשאבים, דמוקרטיזציה של הפקת וצריכת אנרגיה, צמצום תלות בדלקי מאובנים, הוספת מקומות עבודה, התייעלות אנרגטית), ע"מ להכניס פקטור זה בתועלת המשקית של BIPV.
4. לאסוף ולנתח נתונים על פרויקטים חדשים של BIPV אשר יקומו בישראל.
5. לבצע בדיקת התכנות כלכלית ליישום BIPV בקנה מידה רחב בישראל.
6. לבחון האם עדיף אנרגטית וכלכלית להתקין BIPV על חזיתות מזרח, דרום ומערב; או על חזיתות דרום-מזרח ודרום-מערב.
7. מומלץ להרחיב את המחקר כך שיכלול בדיקת התכנות ליישום BIPV בסוגי שימושים אחרים.
8. מומלץ להרחיב את המחקר כך שיכלול בדיקת התכנות ליישום BIPV בשיפוץ מבנים קיימים.
9. לבחון את היכולת של BIPV להקנות חוסן עירוני בישראל.
10. מחקרים לצמצום עלויות של פרויקטי BIPV בישראל.
11. קידום מחקרים ליצירת מוצרי BIPV בסגנונות מעטפת מבוקשות/ נפוצות בישראל, כגון מוצר BIPV בסגנון חיפוי אבן.

9 רשימת ספרות

1. רשות החשמל. (2018). *דו"ח מצב משק החשמל לשנת 2017*
2. (2009). *פוטנציאל הפחתת פליטות גזי חממה בישראל*.
3. ישעיהו, ל. & סטמקר-כהן, א. (2015). *מאזן האנרגיה של ישראל לשנת 2013*
4. Buildings' energy use in the USA. *US Energy Information Administration* (2017). Available at: https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=86&t=1. (Accessed: 21st December 2017)
5. Kalogirou, S. A. Building integration of solar renewable energy systems towards zero or nearly zero energy buildings. *Int. J. Low-Carbon Technol.* **10**, 379–385 (2015).
6. Zanetti, I. *et al. Building Integrated Photovoltaics: Product overview for solar building skins- Status Report 2017*. (2017).
7. IPCC. *Fifth Assessment Report - Synthesis Report*. (2014).
8. Heinstein, P., Ballif, C. & Perret-Aebi, L.-E. Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. *Green* **3**, 125–156 (2013).
9. Frontini, F. *et al. BIPV PRODUCT OVERVIEW FOR SOLAR FAÇADES AND ROOFS- BIPV STATUS REPORT 2015*. (2015).
10. Kylili, A. & Fokaides, P. A. Investigation of building integrated photovoltaics potential in achieving the zero energy building target. *Indoor Built Environ.* **23**, 92–106 (2014).
11. UNFCCC. The Paris Agreement. *United Nations Framework Convention on Climate Change* (2018). Available at: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement. (Accessed: 15th June 2018)
12. Tracking Clean Energy Progress- Informing Energy Sector Transformations. *International Energy Agency- IEA* (2018). Available at: http://www.iea.org/tcep/. (Accessed: 15th June 2018)
13. Buildings- Tracking Clean Energy Progress. *International Energy Agency- IEA* (2018). Available at: http://www.iea.org/tcep/buildings/. (Accessed: 15th June 2018)
14. Building Envelopes- Tracking Clean Energy Progress. *International Energy Agency* (2018). Available at:

http://www.iea.org/tcep/buildings/buildingenvelopes/. (Accessed: 15th June 2018)

15. IPCC. *Global Warming of 1.5 ºC*. (2018).

16. חכם יפרח, ש. & בוימל, ד. *חשמל במסלול הירוק- אנרגיה מתחדשת תומכת סביבה וטבע*. (2017).

17. קוריאל, א. מגדל התחנה הסולארית בנגב מסנוור למרחקים: צורב בעיניים. *ynet* (2018).

18. פויר, ד. מה קרה כשדרור פויר עלה על מגדל סולארי בגובה 200 מטר. *גלובס* (2019).

19. חגית אולנובסקי, ערן ברוקוביץ' & דניאל מדר. *השפעות טורבינות רוח על הבריאות והסביבה*. (2016).

20. European Commission. *Indoor air pollution: new EU research reveals higher risks than previously thought*. (2003).

21. KLEPEIS, N. E. *et al.* The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* **11**, 231–252 (2001).

22. כלכליסט. ארגנטינה: לא פוסלים אפשרות שמתקפת סייבר הפילה את החשמל. *כלכליסט* (2019).

23. Hurricane Maria | FEMA.gov. *US Department of Homeland Security* (2017). Available at: https://www.fema.gov/hurricane-maria. (Accessed: 25th December 2017)

24. Weinstock, D. & Elran, M. *Securing the Electrical System in Israel- Proposing a Grand Strategy*. (2016).

25. תחנת הכוח אורות רבין. *חברת החשמל לישראל*. Available at: https://www.iec.co.il/Community/Documents/אתר תחנות הכוח אורות רבין בחדרה.pdf. (Accessed: 21st December 2017)

26. Press release- Completion of a strategic-environmental project to reduce air pollution from the Orot Rabin facility. *Israeli Ministry of Energy* (2018). Available at: https://www.gov.il/he/Departments/news/orot_rabin. (Accessed: 18th February 2018)

27. Press release- Reduction of 30% in the use of coal for electricity production. *Israeli Ministry of Environmental Protection* (2018). Available at: http://www.sviva.gov.il/InfoServices/NewsAndEvents/MessageDoverAndNews/Pages/2018/01-Jan/30percent-reduction-use-coal-electricity-

generation.aspx. (Accessed: 18th February 2018)

28. Leslie, J. NOAA Shares First Satellite Images of Puerto Rico After Hurricane Maria | NOAA National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS). *NOAA, USA* (2017). Available at: https://www.nesdis.noaa.gov/content/noaa-shares-first-satellite-images-puerto-rico-after-hurricane-maria. (Accessed: 2nd October 2018)

29. מדר, ד. עצמאות אנרגטית אמיתית. *ynet* (2019).

30. אזולאי, י. צהל: ניסוי מוצלח לגרסה הימית של מערכת כיפת ברזל. *גלובס* (2017).

31. האבר, ק. צהל ישקיע 2.7 מיליארד שקל באבטחת אסדות הגז. *תשתיות* (2013).

32. אזולאי, י. צהל יבקש ספינות קרב ב-600 מ' ד' להגן על אסדות הגז. *גלובס* (2013).

33. מבקר המדינה: ההגנה על תשתיות הגז הטבעי של ישראל – חלקית. *תשתיות* (2014).

34. Sampaio, P. G. V. & González, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **74**, 590–601 (2017).

35. אראל, א. *שימור אנרגיה בבנייני מגורים בישראל* (2015).

36. IRFTS Easy Roof. P1010371 | IRFTS Easy Roof | Flickr. *flickr.com* (2014). Available at: https://www.flickr.com/photos/irfts/16374975751/. (Accessed: 2nd October 2018)

37. Lu, L. & Law, K. M. Overall energy performance of semi-transparent single-glazed photovoltaic (PV) window for a typical office in Hong Kong. *Renew. Energy* **49**, 250–254 (2013).

38. Mandalaki, M., Zervas, K., Tsoutsos, T. & Vazakas, A. Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. *Sol. Energy* **86**, 2561–2575 (2012).

39. Temby, O. *et al.* Building-Integrated Photovoltaics: Distributed Energy Development for Urban Sustainability. *Environ. Sci. Policy Sustain. Dev.* **56**, 4–17 (2014).

40. Hammond, G. P., Harajli, H. A., Jones, C. I. & Winnett, A. B. Whole systems appraisal of a UK Building Integrated Photovoltaic (BIPV) system: Energy, environmental, and economic evaluations. *Energy Policy* **40**, 219–230 (2012).

41. EU-OSHA | an agency of the European Union. *Regulation (EU) No 305/2011 - construction products - Safety and health at work - EU-OSHA*. *EU-OSHA | an agency of the European Union* 64 (EU-OSHA | an agency of the European Union,

2011).

42. Snow, M. *Understanding BIPV-T and Market Trends*. (2015).

43. Swiss energy, S. SwissTech Convention Center. *Swiss energy, SUPSI* (2016). Available at: http://www.bipv.ch/index.php/en/other-s-en/item/1197-swisstech-eng. (Accessed: 5th July 2018)

44. Aldossary, A., Algarue, A., Mahmoud, S. & AL-Dadah, R. K. Performance of Multi Junction Photovoltaic Cells with High Concentration Ratio. *Energy Procedia* **61**, 2258–2261 (2014).

45. Perez, M. J. R., Fthenakis, V., Kim, H.-C. & Pereira, A. O. Façade-integrated photovoltaics: a life cycle and performance assessment case study. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **20**, 975–990 (2012).

46. van der Vleuten, F. Nieuwland, Amersfoort | frank van der vleuten | Flickr. *flickr.com* (2009). Available at: https://www.flickr.com/photos/elfrank70/3696855529/in/photostream/. (Accessed: 2nd October 2018)

47. Tzikas, C. Aesthetic styling of colored thin film PV façades - SEAC. *SEAC* (2018). Available at: https://www.seac.cc/en/aesthetic-styling-of-colored-thin-film-pv-facades/. (Accessed: 6th July 2018)

48. European Parliament, C. of the E. U. *Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings and on energy efficiency*. *European Parliament, Council of the European Union* 17 (European Parliament, Council of the European Union, 2018).

49. Merchant Research & Consulting. *Tellurium: 2018 World Market Review and Forecast to 2027*. (2018).

50. Jones, N. A Scarcity of Rare Metals Is Hindering Green Technologies - Yale E360. *Yale School of Forestry & Environmental Studies* (2013). Available at: https://e360.yale.edu/features/a_scarcity_of_rare_metals_is_hindering_green_technologies. (Accessed: 2nd July 2018)

51. Fields, K. Thin Film Flexible Solar PV Installation 2. *flickr.com* (2008). Available at: https://www.flickr.com/photos/kenfields/4783039248/. (Accessed: 2nd October 2018)

52. BMVIT, F. Cold facades: solarfassade.info - Portal for building integrated

photovoltaics. *BMVIT, FFG* (2011). Available at: http://www.solarfassade.info/en/architecture/facades/cold_facades.php. (Accessed: 3rd July 2018)

53. BMVIT, F. Warm facades: solarfassade.info - Portal for building integrated photovoltaics. *BMVIT, FFG* (2011). Available at: http://www.solarfassade.info/en/architecture/facades/warm_facades.php. (Accessed: 3rd July 2018)
54. Vienna Business Agency. Vienna Business Agency › ENERGYbase. *Vienna Business Agency* (2018). Available at: https://viennabusinessagency.at/property/location-development/vienna-innovation-area/energybase/. (Accessed: 4th July 2018)
55. Vienna Business Agency. Office complex of the future- ENERGYbase. 11 (2008).
56. GLASSOLUTIONS. GLASSOLUTIONS AUSTRIA - References - ENERGYbase. *GLASSOLUTIONS* (2010). Available at: http://eckelt.at/en/referenzen/energybase.aspx. (Accessed: 10th October 2018)
57. Maturi, L., Adami, J. & Tilli, F. *Building integrated photovoltaic (BIPV) in Trentino Alto Adige*. (Springer International Publishing, 2018).
58. Rethinking The Future. FKI Tower | Adrian Smith & Gordon Gill Architecture – Rethinking The Future – RTF. *Rethinking Internet Media Pvt. Ltd.* (2015). Available at: https://www.re-thinkingthefuture.com/commercial/fki-tower-adrian-smith-gordon-gill-architecture/. (Accessed: 12th November 2018)
59. CTBUH. FKI Tower, Seoul. *CTBUH* (2015). Available at: http://www.ctbuh.org/TallBuildings/FeaturedTallBuildings/FeaturedTallBuildingArchive2014/FKITowerSeoul/tabid/6908/language/en-US/Default.aspx. (Accessed: 1st November 2018)
60. Betancur, J. Multitasking Façade: How to Combine BIPV with Passive Solar Mitigation Strategies in a High-Rise Curtain Wall System. *Int. J. High-Rise Build.* **6**, 307–313 (2017).
61. Smith, A. & Gill, G. FKI Tower. *urbanNext* (2018). Available at: https://urbannext.net/fki-tower/. (Accessed: 1st November 2018)

62. BREEAM-NL. The Edge Amsterdam. *BREEAM-NL* (2015). Available at: https://www.breeam.nl/projecten/edge-amsterdam-0. (Accessed: 10th October 2018)
63. OVG real estate. The Edge - OVG. *OVG real estate* (2015). Available at: http://ovgrealestate.com/cases/the-edge. (Accessed: 10th October 2018)
64. Global Industry Analysts Inc. *Building Integrated Photovoltaics (BiPV) Market Trends*. (2016).
65. The Dem4BiPV Consortium. BIPV Market and Outlook. *The Dem4BiPV Consortium* (2016). Available at: http://www.dem4bipv.eu/bipv/bipv-market/. (Accessed: 10th July 2018)
66. pv magazine International. Feed-in tariffs (FITs) in Europe. *pv magazine International* (2015).
67. Schneider, A. Financing Opportunities for BIPV. in *Building Integrated PV Symposium 2013* 28 (2013).
68. European Commission. Commission Recommendation (EU) 2016/1318 of 29 July 2016 on guidelines for the promotion of nearly zero-energy buildings and best practices to ensure that, by 2020, all new buildings are nearly zero-energy buildings. 12 (2016).
69. Galán, E. M. *et al. Renewables 2015- Global Status Report*. (2016).
70. *BIPV Technologies and Markets, 2015-2022*. (2015).
71. Tabakovic, M. *et al.* Status and Outlook for Building Integrated Photovoltaics (BIPV) in Relation to Educational needs in the BIPV Sector. *Energy Procedia* **111**, 993–999 (2017).
72. *Building Integrated Photovoltaics (BIPV) Market (Product Type - Rooftop, Curtain Wall, and BIPV Window; Technology Type - C-Si, and Thin Film; End User - Commercial, Industrial, and Residential) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2013 - 2019*. (2014).
73. Masson, G. BIPV Competitiveness and Market Potential. *BECQUEREL INSTITUTE* 22 (2017). Available at: http://www.energyville.be/sites/default/files/7masson_0.pdf. (Accessed: 8th July 2018)
74. Vickstrom, E. *Building-Integrated Photovoltaics (BIPV): Technologies and Global*

Markets. (2017).

75. Grand View Research. *BIPV Market Analysis By Technology, Application, End-Use, Region, And Segment Forecasts, 2018 - 2024*. (2016).

76. *Technology Roadmap- Solar Photovoltaic Energy*. (2014).

77. Tabakovic, M., Fechner, H. & Knoebl, K. *BIPV Framework and Requirements' Analysis*. (2016).

78. Unirom Electronics. Unirom Electronics. *Unirom Electronics* Available at: http://www.unirom.co.il/. (Accessed: 17th October 2018)

79. The World Bank Group. Global Solar Atlas. *The World Bank Group* (2016). Available at: http://globalsolaratlas.info/?c=31.423976,35.859375,7. (Accessed: 9th July 2018)

80. Martín-Chivelet, N. & Montero-Gómez, D. Optimizing photovoltaic self-consumption in office buildings. *Energy Build.* **150**, 71–80 (2017).

81. The World Bank. Population density (people per sq. km of land area) | Data. *The World Bank* (2018). Available at: https://data.worldbank.org/indicator/EN.POP.DNST?end=2017&locations=LU-NZ-IL-AU-AT-BE-CA-CL-CZ-DK-EE-FI-FR-DE-GR-HU-IS-IE-IT-JP-KR-LV-LT-MX-NL-NO-PL-PT-SK-SI-ES-SE-CH-TR-GB-US&start=1960&view=chart&year_high_desc=true. (Accessed: 8th July 2018)

82. שורק, מ., דורמן, מ., פרלברג, א. & דרורי, ר. *דוח מצב הטבע בישראל 2016 | המארג*. (2016).

83. Hertwich, E. G. *et al.* Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **112**, 6277–82 (2015).

84. רשות החשמל. הסדרות ענק להקמת גגות סולאריים ברחבי ישראל -כמות שיא של 1900 MW תייצר 10% מהיקף יצור החשמל בארץ באנרגיה מתחדשת עד שנת 2020. *רשות החשמל* (2017). Available at: https://pua.gov.il/Publications/PressReleases/Pages/gagsolar.aspx. (Accessed: 2nd August 2018)

85. The World Bank. Population growth (annual %) | Data. *The World Bank* (2018). Available at: https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW?end=2017&locations=LU

-NZ-IL-AU-AT-BE-CA-CL-CZ-DK-EE-FI-FR-DE-GR-HU-IS-IE-IT-JP-KR-LV-LT-MX-NL-NO-PL-PT-SK-SI-ES-SE-CH-TR-GB-US&start=1960&view=chart&year_high_desc=true. (Accessed: 8th July 2018)

86. לשכה מרכזית לסטטיסטיקה. *הדיור בישראל, נתונים מסקר הוצאות משק הבית, 2015-1997*. (2018).

87. דולב, ש., סגל, נ., כהן־פארן, י., רוזנטל, ג. & גבאי, ד. *אפס פליטות פחמן 2040*. (2013).

88. ועדת המדע והטכנולוגיה של הכנסת. ועדת המשנה לקידום טכנולוגיות לאנרגיה מתחדשת- פיקוח ומעקב אחר יישום החלטות ועדת פריז, קיימה היום (ב') דיון בנושא בנייה ירוקה. *ועדת המדע והטכנולוגיה של הכנסת*. (2017). Available at: http://main.knesset.gov.il/Activity/committees/Science/News/Pages/mada6317.aspx. (Accessed: 8th July 2018)

89. רז-דרור, ע. & קוסט, נ. *התוכנית האסטרטגית לדיור לשנים 2017-2040*. (2017).

90. Einav Levy, H., Cohen & Yoel. *Grid parity in Israel*. (2012).

91. Gal, N., Paltar, N., Rabi, R. & Kiro, R. *The Israeli Electriciy Sector Status 2016*. (2017).

92. שמר, ה. - אייקון או עבמ- מתחם ToHa של רון ארד ברחוב תוצרת הארץ בתל אביב. *Xnet*. (2017).

93. לוטן, נ. *הרחבת ייצור האנרגיה הסולארית על גבי מבני מגורים*. (2016).

94. נתניאן, י., זוהר, ט., שלום, א. & פלמן, ב. *לקראת בניה מאופסת אנרגיה בישראל*. (2016).

95. הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. *בינוי - התחלת בנייה וגמר בנייה. הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה*. (2018).

96. Vulkan, A., Kloog, I., Dorman, M. & Erell, E. Modeling the potential for PV installation in residential buildings in dense urban areas. *Energy Build.* **169**, 97–109 (2018).

97. Gilad, Y., Shiff, G. & Ophir, A. Three Dimensional Optimized BIPV Envelopes: Optimizing an academic institute facade for increased energy production. in *PLEA 2016 -Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environments, Proceedings of the 32nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture (Volume 3)* (eds. La Roche, P. & Schiler, M.) 1584–1588 (PLEA 2016 Los Angeles, 2016).

98. קוט, ח. & נתניאן, י. *עלויות וחיסכון של בניה ירוקה במבני משרדים בישראל*. (2014).

99. Faiman, D. *et al. PV Systems for Israel's Cities: How Large Should They Be?*

(2000).

100. Wei, C., Hui, S. & Yufang, C. Performance Evaluation of PV Arrays at Different Tilt Angles and Orientations in BIPV. in *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)* 315–317 (Springer Berlin Heidelberg, 2008). doi:10.1007/978-3-540-75997-3_52

101. Photovoltaic-software.com. How to calculate the output energy or power of a solar photovoltaic system, Excel PV calculator to estimate solar electricity output. *Photovoltaic-software.com* (2013). Available at: https://photovoltaic-software.com/PV-solar-energy-calculation.php. (Accessed: 7th August 2018)

102. Bigaila, E., Hachem-Vermette, C., El-Sayed, M. & Athienitis, A. K. SOLAR ENERGY POTENTI AL FOR COMMERCIAL BU ILDING FAÇADE RETROFIT. in *eSIM 2016 Conference Proceedings* 12 (IBPSA, 2016).

103. הרשות לשירותים ציבוריים חשמל. *נספח א' להחלטה מס' 10 ישיבה מס' 389 מיום 25.12.2012- פרק ח': איכות הסביבה*. 13 (הרשות לשירותים ציבוריים חשמל, 2012).

104. בלבלן ראשי, מ. ה. *דו"ח הכנסות המדינה- 2015-2016- פרק י"ג- מיסוי דלק*. (2017).

105. רשות המיסים. *עדכון שיעורי מס הבלו על דלק לשליש הראשון של 2017*. (רשות המיסים, 2017).

106. המועצה הלאומית לבלבלה. *דוח הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות*. (2013).

107. Shiff, G., Gilad, Y. & Ophir, A. ADAPTIVE POLYMER BASED BIPV SKIN. in *Emerging Experience in Past, Present and Future of Digital Architecture, Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA* (eds. Ikeda, Y. et al.) 345–354 (The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), 2015).

108. קוט, ח. & עשת, א. *עלויות בניה ירוקה בפרויקטים של שיפוץ מבני מגורים במסגרת תמא 38*. (2016).

109. קוט, ח. & ב"ץ, ד. *עלויות בניה ירוקה בבנייני מגורים בישראל*. (2013).

110. המשרד להגנת הסביבה. *עדכון ערכי העלויות החיצוניות של מזהמי האוויר וגזי חממה ל - 1.1.2018*. (2018).

111. טרילניק, א. האנרגיה הסולארית תעלה לציבור 1.5 מיליארד שקל. *דה מרקר*. (2012).

112. OECD. *OECD Economic Surveys: Canada 2016*. (OECD, 2016).

doi:10.1787/eco_surveys-can-2016-en

113. Sun, K. *et al.* Integrated effects of PM2.5 deposition, module surface conditions and nanocoatings on solar PV surface glass transmittance. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **82**, 4107–4120 (2018).

114. Kok, N. & Jennen, M. The impact of energy labels and accessibility on office rents. *Energy Policy* **46**, 489–497 (2012).

115. Baas, L. *The incorporation of sustainability into the real estate investment portfolio*. (2013).

116. Snoei, G. Huisvestingsvoorkeuren kantoorgebruikers: Energiezuinigheid nader beschouwd. (TU Delft, Architecture, Real Estate & Housing, 2008).

117. Shukla, A. K., Sudhakar, K., Baredar, P. & Mamat, R. Solar PV and BIPV system: Barrier, challenges and policy recommendation in India. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **82**, 3314–3322 (2018).

118. Statista. Electricity prices around the world 2017. *Statista* (2018). Available at: https://www.statista.com/statistics/263492/electricity-prices-in-selected-countries/. (Accessed: 1st November 2018)

119. *חברת החשמל*. הגז הטבעי. חברת החשמל (2015). Available at: https://www.iec.co.il/pages/aboutgaz.aspx. (Accessed: 1st November 2018)

120. *ישן מול חדש בירושלים*. קמחי, י. (2014).

121. Chang, R., Cao, Y., Lu, Y. & Shabunko, V. Should BIPV technologies be empowered by innovation policy mix to facilitate energy transitions? - Revealing stakeholders' different perspectives using Q methodology. *Energy Policy* **129**, 307–318 (2019).

10 נספחים

10.1 ראשי תיבות וקיצורים

Building applied photovoltaics – BAPV

Building integrated photovoltaics – BIPV

giga-watt -GW

kilo-watt -KW

kilo-watt-hour -kWh

mega-watt -MW

photovoltaics -PV

Tera-watt-hour -TWh

10.2 רשימת אנשי קשר להצעות מחיר למעטפות בניינים

חברה	מוצר/שירות	איש קשר	תפקיד
Midsummer	BIPV - CIGS (thin film)	Christoffer Löfquist	Sales engineer
Solibro	BIPV - SL2 CIGS (thin film)	Angelo Coscia	Product Manager PV Systems
Sunpartner	BIPV - CIGS (thin film)	Laurent Petit	Sales & marketing VP
Polysolar	BIPV - PS-CT (thin film)	Jamie Pimblett-Speck	Business Development
Sanko Solar	BIPV - CdTe (thin film)	Bennie Pekel, Sanko Solar BV	Business Development Manager
Alcon	BIPV -	רמי בונה	מנכ"ל אלומיניום קונסטרקשן
Solar Innova	BIPV - Poly C-Si	Manuel Gil	CEO
Onyx	BIPV – Poly C-Si	Mila Plaza	Architect, Global buisness develoment
ZigZag Solar	BIPV – Mono C-Si	Wim van del Wall	CEO
Garfunkel	BAPV – C-Si	משה גרפונקיל	ד"ר להנדסת חשמל ויזם עצמאי
עמר זכוכית נתיבות	זכוכית מחוסמת	אסנת פרטוק	נציגת החברה עמר זכוכית נתיבות

10.3 חישובי סימולציה אנרגטית

בקובץ אקסל מצורף.

10.4 חישובי ניתוח כלכלי

בקובץ אקסל מצורף.