

מספר המחקר במשרד להגנת הסביבה

145-6-19

שם המוסד והמחלקה המגיישים:

המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, מחלקת מחקר ופיתוח

כותרת המחקר בעברית:

מודלים למבנים מאופסי אנרגיה, התכונותם והתאמתם ליישום בישראל

כותרת המחקר באנגלית:

Models for Zero-energy buildings, their suitability and feasibility for implementation in Israel

סוג הדו"ח: שנה ב (מחקר דו שנתי)

מחקר וכתיבה:

יאיר שוורץ	המועצה הישראלית לבנייה ירוקה
גל גבריאל	המועצה הישראלית לבנייה ירוקה
רוני דניאל	המועצה הישראלית לבנייה ירוקה

מחקר נוסף ועריכה:

קרן שוץ	המועצה הישראלית לבנייה ירוקה
---------	------------------------------

מוגש למדען הראשי, המשרד להגנת הסביבה

דצמבר 2016

רשימת טבלאות

מספר טבלה	שם הטבלה	מספר עמוד
טבלה 1	הערכת מרכיבי השימוש בחשמל במשקי הבית בישראל	34
טבלה 2	פירוט תכונות מקרי הבוחן	56
טבלה 3	סה"כ עומסים בדירות הייחוס (קוט"ש"מ"ר/שנה)	61
טבלה 4	איפוס בניין הייחוס	62
טבלה 5	סה"כ עומסים בדירות האידיאליות (קוט"ש"מ"ר/שנה)	64
טבלה 6	מספר הדירות המאופסות בבניין האידיאלי	65
טבלה 7	סה"כ עומסים בדירות הריאליות (קוט"ש"מ"ר/שנה)	66
טבלה 8	מספר הדירות המאופסות בבניין הריאלי	67
טבלה 9	סה"כ צריכת האנרגיה במבנה הייחוס (קוט"ש"מ"ר/שנה) - דופלקס ייחוס	68
טבלה 10	יכולת האיפוס בבניין - דופלקס ייחוס	69
טבלה 11	סה"כ צריכת האנרגיה במבנה האידיאלי (קוט"ש"מ"ר/שנה)	70
טבלה 12	יכולת האיפוס בבניין - דופלקס אידיאלי	71
טבלה 13	סה"כ צריכת האנרגיה במבנה הריאלי (קוט"ש"מ"ר/שנה) - דופלקס ריאלי	72
טבלה 14	יכולת האיפוס בבניין - דופלקס ריאלי	73
טבלה 15	איפוס אנרגטי בבנייה רוויה - סיכום	74
טבלה 16	איפוס אנרגטי בבנייה צמודת קרקע - סיכום	74
טבלה 17	תוצאות השוואת העלויות בבנייה רוויה	75
טבלה 18	תוצאות השוואת העלויות הבנייה צמודת קרקע	76
טבלה 19	תוצאות הבדיקה ההשוואתית	78
טבלה 20	הגדרות ותכניות ממשלתיות למבני מגורים מאופסים או כמעט מאופסים	82
טבלה 21	דוגמאות מן העולם למנגנוני מדיניות להתייעלות אנרגטית	90

רשימת איורים ותרשימים

מספר איור	שם האיור	מספר עמוד
איור 1	אספקת אנרגיה עולמית (OPEC 2010)	29
איור 2	גידול באוכלוסיית העולם בין 2009 ל-2030	29
איור 3	התפלגות צריכת החשמל לפי צרכנים	30
איור 4	צריכת אנרגיה במגורים	33
איור 5	הגורמים המשפיעים על צריכת האנרגיה הבניין	35
איור 6	סיכום הגדרות המונח "מבנה מאופס אנרגיה"	38
איור 7	עקרון הפעולה של מערכת לשחזור חום	42

איור 8	עקרון הפעולה של Ground Source Heat Pump	43
איור 9	עקרון הפעולה של הזרמת חשמל חזרה לגריד ושימוש בחשמל מהגריד בעת הצורך	44
איור 10	מספר המבנים מאופסי האנרגיה בפילוח המדינות והאקלים בהם תכננו	46
איור 11	האזורים בהם תוכננו המבנים מאופסי האנרגיה	47
איור 12	מבנה מאופס אנרגיה באוקלנד, ניו-זילנד	47
איור 13	מבנה מאופס אנרגיה בדנור, קולורדו	48
איור 14	פרויקט ג'וזפין בלה-פאייט	49
איור 15	תכנית וחזיתות המבנה הממוצע בדרום קוריאה	51
איור 16	Z-home, מתחם מגורים בווינגטון	52
איור 17	הבסיס ליחידת דיור בבניה רוויה	55
איור 18	הבסיס ליחידת דיור בבניה צמודת קרקע	55
איור 19	השיטה המוצעת לתכנון מבנה מאופס אנרגיה	56
איור 20	תיאור תהליך הבדיקה האבסולוטית	58
איור 21	פירוט סוגי התרחישים בבדיקה האבסולוטית	58
איור 22	השוואת תכנון סכמטי בין בניין הייחוס לגרסה המשופרת בבנייה רוויה	59
איור 23	השוואת תכנון סכמטי בין בניין הייחוס לגרסה המשופרת בבנייה צמודת הקרקע	60
איור 24	הבדיקה ההשוואתית - השוואה בין מודלים אשר נבדלים זה מזה באמצעי תכנון פאסיבי אחד	60
איור 25	בניין הייחוס – בנייה רוויה	61
איור 26	תכנון משופר – בנייה רוויה	63 ו- 66
איור 27	דופלקס - מבנה הייחוס	68
איור 28	התכנון המשופר - דופלקס	70 ו- 72
איור 29	המבנה והרציונל העומדים מאחורי ההגדרה הבריטית למבנה Zero Carbon	85
איור 30	היררכיית צעדים לקידום בנייה מאופסת אנרגיה בישראל	124

מילות מפתח

1. בנייה ירוקה	4. חיסכון באנרגיה	ZERO-ENERGY BUILDINGS.7
2. מבנים מאופסי אנרגיה	5. הפחתת זיהום	8. חיסכון למשק
3. חיסכון כספי	6. רכיבים אנרגטיים	9. צעדי מדיניות

תוכן העניינים

7	תודות	
8	תקציר מנהלים	
28	Abstract	
29	הקדמה	1
29	1.1 רקע - צריכת אנרגיה בסביבה הבנויה	
29	1.2 הזוית הישראלית	
31	1.3 מטרות המחקר	
31	1.4 מבנה המחקר	
33	סקר ספרות	2
33	2.1 צריכת אנרגיה במבנים – רקע	
36	2.2 מבנים מאופסי אנרגיה – הגדרות	
40	2.3 אמצעי תכנון למבנים בעלי צריכת אנרגיה נמוכה	
46	2.4 מגורים מאופסי אנרגיה - מקרי מבחן מהעולם	
54	מתודולוגייה - בדיקת היתכנות	3
54	3.1 בחירת הגדרה לאיפוס אנרגיה	
54	3.2 הצגת מקרי מבחן	
56	3.3 שיטת התכנון וכלי המחקר	
57	3.4 חישוב צריכת האנרגיה	
57	3.5 שלבי הבדיקה	
61	מהלך הבדיקה והתוצאות	4
61	4.1 בדיקה אבסולוטית - איפוס אנרגטי בבניה רוויה	

68	4.2	בדיקה אבסולוטית - איפוס אנרגטי בבנייה צמודת קרקע 'דופלקס'
74	4.3	סיכום בדיקות איפוס אנרגיה של מקרי המבחן
75	4.4	בחינת עלויות לבנייה רוויה מאופסת אנרגיה
77	4.5	בדיקה השוואתית (ניתוח רגישות Sensitivity Analysis)
79	5	בדרך לאיפוס אנרגטי – רגולציה, תקנים ומדיניות ממשלתית לעידוד מבנים מאופסי אנרגיה
79	5.1	תקנים והגדרות חוקיות למבנים מאופסי אנרגיה בעולם
88	5.2	תקני פאסיבהאוס להתייעלות אנרגטית
89	5.3	מנגנונים ומדיניות לעידוד בנייה מאופסת אנרגיה
96	6	מוכנותו של שוק הבניה הישראלי לבנייה מאופסת אנרגיה
97	6.1	המדינה והשלטון המקומי
107	6.2	מוכנות תשתית החשמל
108	6.3	המתכננים
110	6.4	היזמים וחברות הבנייה
112	6.5	היצרנים והספקים של חומרי הבנייה והטכנולוגיות
113	6.6	מודעות הציבור
115	7	מסקנות המחקר והמלצות
115	7.1	תוצאות הבדיקה היישומית -הכוונת שוק האנרגיה
116	7.2	מדיניות תומכת בבנייה מאופסת אנרגיה בישראל
119	7.3	מודעות אנשי מקצוע
120	7.4	תמרוץ כלכלי
123	7.5	מחקר, פיתוח ועידוד חדשנות
127		ביבליוגרפיה
130		נספחים

130	נספח א - חישוב מאזני אנרגיה
131	נספח ב - פירוט חישובי עלות הבנייה
144	נספח ג - הרחבת דוגמאות בינלאומיות למדיניות מבנים מאופסי אנרגיה
145	נספח ד - אקלים ותקינה ישראלית
150	נספח ה - ת"י 5281 והתאמתו למבנה מאופס אנרגיה
153	נספח ו - חישוב והערכת תועלת כספית וסביבתית למשק

תודות

מחקר זה לא היה מתאפשר ללא סיוע, ייעוץ ותמיכה של אנשי המקצוע הבאים. כותבי המחקר מעוניינים להודות להם על תרומתם (מצוינים לפי סדר א-ב של שם המשפחה):

רן אברהם, יהושפט אהרוני, סיימון הר, אבנר וישקין, אריאל טולידנו, מיכאל לוי, זיו לזר, הילה מאיר, אופיר נבו, קרין נצר, פרופ' איתי סנד, פרופ' דוד פרלמוטר, אולגה קולודי, דדי קדישביץ, דב קוטלר, אבישי קימלדורף, פרופ' גדי קפלוטו, יוגב קציר, חן שליטא.

תקציר מנהלים

הקדמה

צריכת האנרגיה במדינת ישראל נמצאת במגמת עלייה מתמדת. בין השנים 1970 ל-2010 חל גידול בצריכת החשמל האבסולוטית בישראל בשיעור של כפי עשרה: מ-5 לכ-50 מיליארד קוט"ש בשנה¹. הגידול הנ"ל נובע מסיבות רבות ומגוונות, ביניהן – גידול באוכלוסייה, צמיחה כלכלית ועלייה באיכות החיים². על פי דין וחשבון סטטיסטי שפרסמה חברת החשמל ב-2011, כ-30% מצריכת החשמל הכללית בישראל – מקורה במבני מגורים. שטחן של יחידות מגורים בישראל נמצא במגמת עלייה מתמדת: שטחה של יחידת מגורים ממוצעת עלה מכ-100 מ"ר ב-1970 לכ-180 מ"ר (ברוטו) ב-2010⁴. הגידול בשטח יחידות המגורים תרם אף הוא לעלייה בביקוש לאנרגיה, שכן קשה יותר לאקלם יחידות מגורים גדולות, וכמו כן, יש בהן ריכוז גדול יותר של מכשירי חשמל ביתיים.

מתוך הבנה כי מבני מגורים מהווים את עיקר המבנים בישראל, מסמך זה דן באמצעים הקיימים להפחתת צריכת האנרגיה במבני מגורים בישראל בכלל, ובוחן את ההיתכנות של תכנון והקמת מבני מגורים מאופסי אנרגיה בפרט.

מטרות המחקר

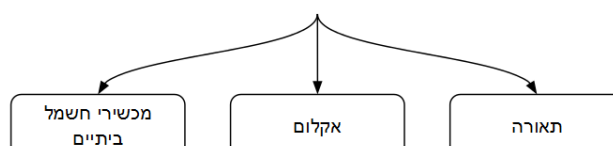
1. לערוך דיון מקיף ומעמיק בספרות הקיימת הנוגעת למבנים מאופסי אנרגיה ולרכז ידע תיאורטי ומעשי בנושא.
2. לבחון את התכונות של מבנים מאופסי אנרגיה לסוגי מגורים נפוצים בישראל.
3. להציג אסטרטגיות ומודלים אפשריים למימוש מבנים מאופסי אנרגיה בישראל.
4. לדון בהזדמנויות ובחסמים (כלכליים ורגולטוריים) בתכנון ובניית מבנים מאופסי אנרגיה במסגרת השוק הישראלי.
5. לשמש כפלטפורמה לדיון מחזיקי עניין ליישום בפועל של מבנים מאופסי אנרגיה בישראל.

רקע וסקר ספרות

מאפייני צריכת אנרגיה במגורים

על מנת להביא לאיפוס צריכת האנרגיה במבני מגורים, יש להבין את אופן צריכת האנרגיה ואת האפשרויות לצמצומה. ככלל, ניתן לחלק את צריכת האנרגיה במגורים לשלושה מרכיבים:

צריכת אנרגיה במגורים



¹ Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers. Ipcc (2014).

² Lichtblau, J. World oil outlook. The Leading Edge 4, (1985).

שני המרכיבים הראשונים (תאורה וצריכת אנרגיה לאקלום וחימום מים) הם מושא עיקרי בתקינה ובחקר צריכת אנרגיה במבנים, הן כיוון שהם אחראיים על חלק ניכר מסך כל צריכת האנרגיה במגורים והן כיוון שעל מרכיבים אלה יכולים הרגולטורים והמתכננים להשפיע (באמצעות תקנות בנייה וחוקים, או על ידי תכנון המתחשב באקלים ובנתוני הבניין). לעומת זאת, יכולת ההשפעה של הרגולטור והמתכננים על מספר מכשירי החשמל הביתיים או על אופן השימוש בהם מצומצמת, אם כי הרגולטור יכול לקבוע הגבלות על איכות המכשירים (כגון דירוג אנרגטי מינימלי, החלפת מכשירים ישנים וכדומה).

הערכת מרכיבי השימוש בחשמל במשקי הבית בישראל:

מוצר חשמלי ביתי	צריכת קוט"ש בשנה של המוצר	אחוז הצריכה של המוצר מסך חשבון החשמל השנתי
מזגנים	2,569	35%
מקררים	1,299	17%
חימום מים	848	12%
מכונות כביסה	647	9%
טלוויזיות	629	8%
תאורה	566	8%
מצב המתנה של מכשירים	409	5%
אחר	252	3%
מייבשים	197	2%
תנורים	116	1%
מדיחי כלים	83	1%
סה"כ	7,363 קוט"ש בשנה	100%

הגדרת מבנים מאופסי אנרגיה

מבנים מאופסי אנרגיה הם מבנים אשר צריכת האנרגיה השנתית בהם היא אפס (לאחר קיזוז כמות האנרגיה המיוצרת בהם), וזאת מבלי לפגוע בתנאי הנוחות בהם. לאופן בו מוגדר המונח חשיבות רבה, שכן בהתאם להגדרה נגזרות החלטות אופרטיביות שונות. להלן פירוט הגדרות שונות למבנים מאופסי אנרגיה כאשר השוני המרכזי בניהן הוא אופי המדידה.

מבנים מאופסי אנרגיה ראשונית

ייצור שנתי של אנרגיה באתר (kWh)
=
צריכת אנרגיה שנתית בבניין + איבודי אנרגיה בייצור ואספקה (kWh)

מבנים מאופסי אנרגיית אתר

ייצור שנתי של אנרגיה באתר (kWh)
=
צריכת אנרגיה שנתית בבניין (kWh)

מבנים מאופסי פליטות אנרגיה

ס"כ כמות הפחמן הדו חמצני הנחסכת (ק"ג)
=
ס"כ כמות הפחמן הדו חמצני כתוצאה מאנרגיה שמקורה בדלקים מאובנים (ק"ג)

מבנים מאופסי עלות אנרגיה

ס"כ הזיכוי השנתי כתוצאה ממכירת אנרגיה שיוצרה באתר (ש"ח)
=
ס"כ ההוצאות השנתיות על אנרגיה (ש"ח)

אמנם למונח "מבנה מאופס אנרגיה" ישנן מספר הגדרות מקובלות בפרקטיקה, אולם יש לציין כי בין כל ההגדרות הנ"ל אין הגדרה "טובה יותר" מרעותה. לכל הגדרה יש יתרונות וחסרונות שכן הן תלויות פרוייקט, אם כי שתי ההגדרות הנפוצות ביותר בספרות המקצועית הן איפוס אנרגיה אתר ואיפוס אנרגיה ראשונית. על ההגדרה הנבחרת להתאים למטרות הפרויקט ולציפיותיהם של המתכננים והלקוחות.

אמצעי תכנון למבנים בעלי צריכת אנרגיה נמוכה

לשם צמצום צריכת האנרגיה במבנים, ניתן להשתמש בשלושת האמצעים הבאים במשולב: אמצעים פאסיביים - אמצעי תכנון אשר אינם דורשים כל פעולה המצריכה השקעת אנרגיה בכדי לייצר נוחות אקלימית בתוך הבניין (הפניית הבניין וארגון החללים הפנימיים לאוריינטציה אופטימלית, התקנת אמצעי הצללה, שימוש במסה תרמית ועוד).

אמצעים אקטיביים - אמצעי מיזוג ואוורור אשר מייצרים סביבה בעלת נוחות תרמית באופן מלאכותי ותוך שימוש באנרגיה. מכשירים בעלי יעילות גבוהה יכולים להביא לצמצום צריכת זו (למשל: מערכות מיזוג בעלות יעילות גבוהה, מערכות בקרת אנרגיה במבנים (BEMS - Building Energy Management Systems), מערכות "שיחזור חום" (MVHR), משאבות חום קרקע (Ground Source Heat Pump) ועוד.

ייצור אנרגיה מתחדשת - שימוש בטכנולוגיות המסוגלות לרתום תהליכים שאינם מתכלים מהטבע בכדי לייצר אנרגיה (למשל: תאים פוטוולטאים, שבשבות רוח, טכנולוגיות לאגירת אנרגיה ועוד).

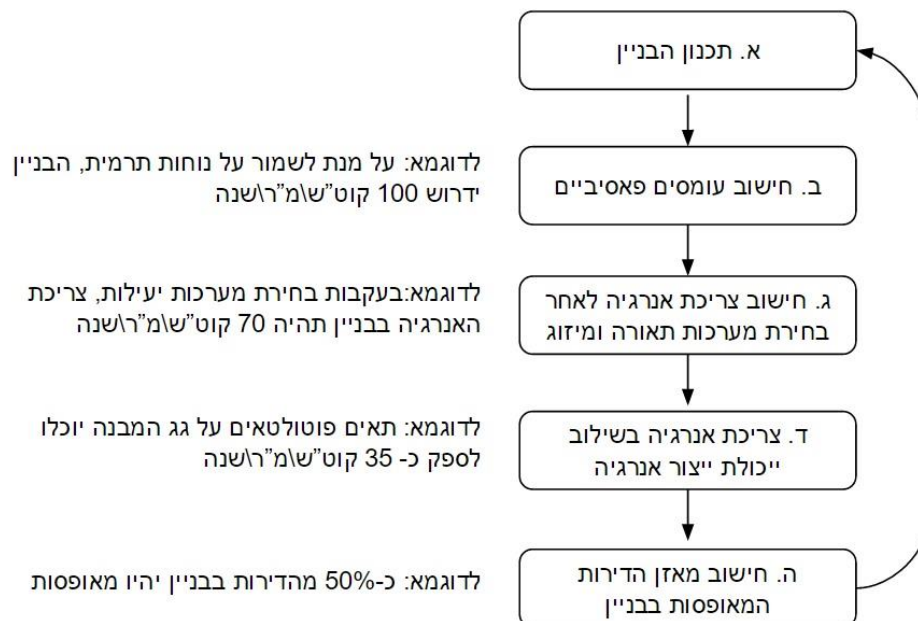
יישום - בדיקת היתכנות

במסגרת המחקר נערכו בדיקות תיאורטיות להיתכנות היישום של מבנים מבני מגורים מאופסי אנרגיה בישראל. לצורך כך הוחלט לנתח שני מקרי מבחן: מבנה בן 10 קומות ומבנה צמוד קרקע. לצורך איפוס האנרגיה של מקרי המבחן, מחקר זה בחר להתייחס לאיפוס אנרגיית אתר נטו. אנרגיית אתר הועדפה על איפוס אנרגיה ראשונית (הכוללת את איבודי האנרגיה המלווים את תהליך הפקת ושינוע האנרגיה) בין השאר כי איפוס אנרגיה ראשונית מצריך שימוש במקדמי המרת אנרגיית מקור-אתר. ככל הידוע לעורכי מחקר זה מקדמים אלו לא חושבו עדיין לרשת החשמל בישראל.

כלי המחקר ושיטת התכנון המוצעת:

• כיוון שחיזוי צריכת אנרגיה במבנים מתיימר לצפות מה תהיה צריכת האנרגיה במבנים עתידיים – כאלו שלא נבנו עדיין – יש לקחת בחשבון כי התהליך מאופיין באי וודאות. מחקרים מראים כי במקרים רבים ישנם פערים לא מבוטלים בין ההנחות הנלקחות בעת חיזוי הצריכה לבין הצריכה בפועל (כשהבניין בנוי ומאוכלס), תופעה המכונה ה-Energy Gap.

• מסמך זה מציע חמישה שלבים לבדיקה ולתכנון של מבנה מאופס אנרגיה:



- ביצועיהם של מקרי המבחן נבחנו בשלושה תרחישי תכנון שונים:
מבנה ייחוס – מודלים של הבניין המקורי. מבנים אלו אופיינו בתכונות בסיסיות (בידוד, זיגוג וכו'), התואמות את תקני הבסיס המחייבים על פי חוק.
מבנה אידיאלי – הוא מבנה אשר עבר סידרה ארוכה של שיפורים ושינויים בכדי לצמצם באופן מקסימלי את צריכת האנרגיה בו.
מבנה ריאלי – מבנה אשר בו שולבו חלק מהשיפורים שנבחנו במבנה האידיאלי – אלו אשר הונח כי הם מתאימים במידה רבה לשוק הישראלי.

- למקרי המבחן נערכו שני סוגים של בדיקות:
 א. בדיקה אבסולוטית: תכנון מבנה מאופס אנרגיה מצריך חישוב אבסולוטי ומדויק של צריכת האנרגיה בבניין לאחר בנייה ואכלוס. חישוב שכזה מציג מספר חד-משמעי (באופן אידיאלי – 0 קוט"ש"מ"ר\שנה). בבדיקה האבסולוטית, ההשפעה של כל האמצעים לצמצום צריכת האנרגיה בבניין **מתווספים** האחד לשני, וסה"כ צריכת האנרגיה בבניין לאחר שילוב כל האמצעים – מחושבת.

- ב. בדיקה השוואתית: שיטה זו בוחנת את מידת ההשפעה של כל אמצעי תכנון בנפרד, ואומדת את תרומתו של כל אמצעי לצמצום אנרגיה באופן יחסי (באחוזים) למבנה ייחוס. שיטת בדיקה זו נעשית בשימוש בתקנים שונים להערכת ביצועי מבנים (LEED, BREEAM ועוד) כיוון שהיא מייטרת את התלות בערכים מספריים אבסולוטיים (כדוגמת "0 קוט"ש"מ"ר") ובאי הוודאות הכרוך בחישובם.

מקרי מבחן

על מנת לבחון תרחישי תכנון המייצגים את המציאות בצורה מדוייקת ככל האפשר, יחידות המגורים הנבחנו מבוססות על תכנון אמיתי – מבנים אשר אושרו ונבנו.

א.בניין מגורים בבנייה רוויה – בניין בעל 11 קומות (לובי + 10 קומות מגורים) הכולל 40 יחידות דיור.

ב.בניין "דופלקס" – יחידת דיור דו-משפחתית.

יחידות הדיור הנ"ל נבחרו לבדיקה כיוון שהן טיפוסי המגורים אשר מהווים את מספר התחלות הבנייה הגבוה ביותר בישראל. אזור האקלים בו נבחנו יחידות המגורים הנ"ל הוא אזור אקלים "ב", כיוון שבו חל הגידול המשמעותי ביותר בהתחלות בניה בשנים האחרונות.



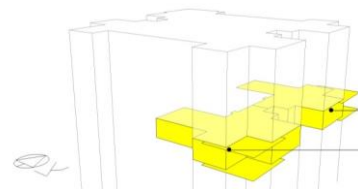
הבסיס ליחידת דיור בבניה רוויה (משמאל. מקור: אדר' קרן אשד) וליחידת דיור בבניה צמודת קרקע

בדיקה אבסולוטית - בניה רוויה

1. בתרחיש מבנה הייחוס- המערכות שנבחרו לשימוש הן מערכת מיזוג מיני מרכזית סטנדרטית ונורות ליבון לתאורה. צריכת האנרגיה השנתית לבניין בן 10 קומות מגורים היא 343,600 קוט"ש\שנה. לאחר שילוב האמצעים לייצור אנרגיה, מספר הדירות המאופסות בבניין הייחוס:

תמהיל	סה"כ דירות מאופסות
א. דוד שמש לכל דירה (260 מ"ר)	דירה אחת (כ-2.5%)

ההתייחסות לדירה אחת מאופסת נובעת מאופן החישוב של ייצור מצטבר והשימוש הפוטנציאלי בו. בפועל כאמור לא יתקיים איפוס של דירה במצב זה.



2. בתרחיש המבנה האידיאלי – הבניין עבר סידרה של שינויים:

הפרש מחיר (ש"ח)

אמצעי תכנון
תוספת עלויות בנייה

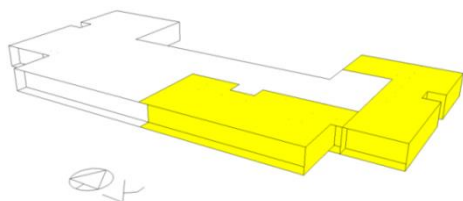
11,254	התקנת חלונות בעלי זיגוג כפול ($U\text{-Value} = 2.2 \text{ (W/m}^2\text{K)}$)
8,884.5	תוספת בידוד לקיר ברנוביץ' ($U\text{-Value} 0.25 \text{ (= W/m}^2\text{K)}$)
ללא עלות	אורור טבעי
12,000	תאורת LED
886	שיפור הסננה של המעטפת (איטום אויר = 0.6 החלפות אויר לשעה)
13,000	מערכת מ"א אינורטר מקדם יעילות $SEER = 3.32$ ו- $CoP = 4.0$
11,740	פאנלים סולארים
ללא תוספת	דוד שמש
58,486.5	סה"כ

חיסכון בעלויות הבנייה

- 62,700	תכנון קומפקטי (זיכוי מהקטנת מעטפת המבנה)
- 4,214	סה"כ

צריכת האנרגיה השנתית לבניין בן 10 קומות מגורים לאחר שינויים אלו הייתה 90,470 קוט"ש\שנה. לאחר שילוב האמצעים לייצור אנרגיה, מספר הדירות המאופסות בבניין האידיאלי בתמהילים שונים של תאים פוטוולטאים ודודי שמש הוא:

תמהיל	סה"כ דירות מאופסות
א. דוד שמש לכל דירה 240 מ"ר תאים פוטוולטאים	19 דירות (כ-48% מסך הדירות) חסרים עוד כ-330 מ"ר של תאים פוטוולטאים כדי להגיע לאיפוס מלא
ב. 30 (מתוך 40) דירות עם דודי שמש. 300 מ"ר תאים פוטוולטאים	27 דירות (כ-68%) חסרים עוד כ-200 מ"ר של תאים פוטוולטאים כדי להגיע לאיפוס מלא
ג. ללא דודי שמש מקסימום תאים פוטוולטאים (500 מ"ר)	35 דירות (כ-88%) חסרים עוד כ-70 מ"ר של תאים פוטוולטאים כדי להגיע לאיפוס מלא

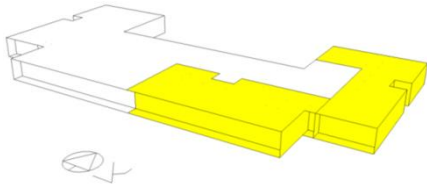


3. בתרחיש המבנה הריאלי – נבחרו מספר אמצעי תכנון אשר נחשבים כשיפורים ריאליים, בהתחשב בשוק הבנייה הישראלי:

אמצעי תכנון	הפרש מחיר (ש"ח)
תוספת עלויות בנייה	
התקנת חלונות בעלי זיגוג כפול ($U\text{-Value} = 2.2 \text{ (W/m}^2\text{K)}$)	11,254
אורור טבעי	ללא עלות
תאורת LED	12,000
מערכת מ"א אינורטר מקדם יעילות $SEER = 3.32$ ו- $CoP = 4.0$	16,000
פאנלים סולארים	16,065
דוד שמש	ללא תוספת
	56,205 סה"כ
חיסכון בעלויות הבנייה	
תכנון קומפקטי (זיכוי מהקטנת מעטפת המבנה)	- 71,258

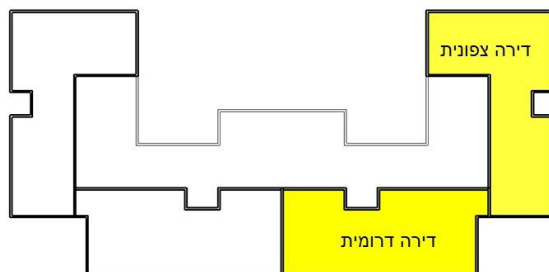
צריכת האנרגיה השנתית לבניין בן 10 קומות מגורים לאחר בחירת השינויים הרצויים הייתה 120,600 קוט"ש/שנה. לאחר שילוב האמצעים לייצור אנרגיה, מספר הדירות המאופסות בבניין הריאלי בתמהילים שונים של תאים פוטוולטאים ודודי שמש הוא:

תמהיל	סה"כ דירות מאופסות
א. דוד שמש לכל דירה 240 מ"ר תאים פוטוולטאים	14 דירות (כ-36% מסך הדירות) חסרים עוד כ-520 מ"ר של תאים פוטוולטאים כדי להגיע לאיפוס מלא
ב. 20 (מתוך 40) דירות עם דודי שמש. 370 מ"ר תאים פוטוולטאים	20 דירות מאופסות (כ-51%) חסרים עוד כ-390 מ"ר של תאים פוטוולטאים כדי להגיע לאיפוס מלא
ג. ללא דודי שמש מקסימום תאים פוטוולטאים (500 מ"ר)	26 דירות מאופסות (כ-65%) חסרים עוד כ-260 מ"ר של תאים פוטוולטאים כדי להגיע לאיפוס מלא

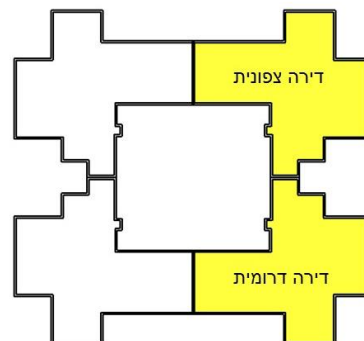


התרשים הבא מתייחס באופן סכמתי להבדל התכנוני בין בניין הייחוס בבנייה רוויה לבין הבניין המשופר (מבנה ריאלי ומבנה אידיאלי).

בניין משופר



בניין ייחוס



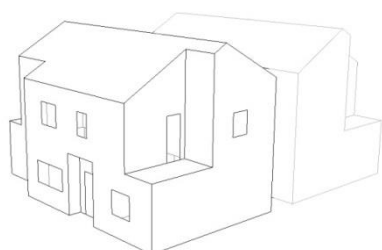
בבנייה הרוויה ניתן לראות שהשיפורים הנדרשים לאיפוס האנרגטי, הכוללים את שדרוג מעטפת הבניין וההכרח שבהתקנת מערכות האקלום על ידי הקבלן (לעומת ביצוע הכנות בלבד כמקובל לעיתים רבות בשוק), מייקרים את עלות הבנייה ליחידה ב כ-56 עד 58 אלף ₪. אך הגילוי המעניין והחשוב במחקר זה הוא שבאמצעות תכנון קומפקטי איכותי המתייחס לפוטנציאל האלמנטים הבין-אקלימיים ומצמצם את שטח המעטפת של הבניין (כפי שתואר בבדיקה המעשית), גובר החיסכון בעלויות הבנייה על התוספות. כך למעשה יחידה מאופסת אנרגיה בנוסף לטיבה המעולה, עשויה להיות זולה יותר לקבלן בכ-15,000 ₪ לעומת יחידת הייחוס בתרחיש הריאלי ובכ-4,000 ₪ לעומת יחידת הייחוס בתרחיש האידיאלי, זאת לאור צמצום עלות ההוצאה על מעטפת המבנה, המהווה אחוז ניכר מעלות הבנייה. נתונים אלו תואמים מחקרים נוספים המציינים כי בנייה מאופסת אנרגיה אינה

בהכרח יקרה יותר מבנייה סטנדרטית וכי ישנם ייצוגים שונים לעלויות בנייה מאופסת אנרגיה, מעל ומתחת לממוצע עלות הבנייה ובהתאם לנסיבות השונות.³

בדיקה אבסולוטית - בבנייה צמודת קרקע 'דופלקס'

1. בתרחיש מבנה הייחוס - המערכות שנבחרו בבניין הייחוס הם מערכת מיזוג מיני מרכזית סטנדרטית ונורות ליבון לתאורה. צריכת האנרגיה השנתית ליחידת דופלקס היא: 10,720 קוט"ש/שנה.

לאחר שילוב האמצעים לייצור אנרגיה, אחוז האנרגיה המאופסת בבניין הייחוס בתמהילים שונים של תאים פוטוולטאים ודודי שמש הוא:



תרחיש	% בניין מאופס
א. דוד שמש* + תאים פוטוולטאים	57%
ב. תאים פוטוולטאים בלבד	60%

2. בתרחיש הדופלקס האידיאלי עבר הבניין סידרת שינויים שכללה:

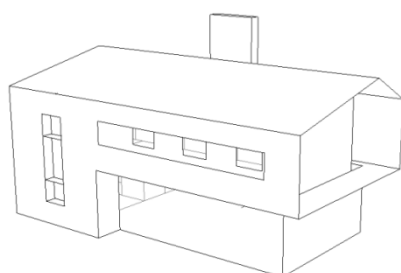
אמצעי תכנון	הפרש מחיר (ש"ח)
תוספת עלויות בנייה	
התקנת חלונות בעלי זיגוג כפול (U-Value = 2.2 W/m2K)	25,183
תוספת בידוד לקיר ברנוביץ' (U-Value 0.25 W/m2K)	28,159
אוורור טבעי	ללא עלות
תאורת LED	לא תומחרה
שיפור הסננה של המעטפת (איטום אויר = 0.6 החלפות אויר לשעה)	1,117
מערכת אוורור מאוזנת CoP, MVHR 9.0 - 16.0	4,100
פאנלים סולארים	29,700
דוד שמש	ללא תוספת
	סה"כ 88,259
חיסכון בעלויות הבנייה	
מערכת מ"א אינוורטר מקדם יעילות CoP = 4.0 ו- SEER = 3.32	- 5,000
תכנון קומפקטי (זיכוי מהקטנת מעטפת המבנה)	-19,795
	סה"כ - 24,795
	סה"כ 63,496

³ The Power of Zero: Optimizing Value for Next Zero. BNIM, Integral Group, Davis Langdon/AECOM. 2014.

המחקר סקר כ 200 מקרי מבחן, ביניהם מבנים מאופסי אנרגיה, מבנים בעלי תווי תקן ירוקים בינלאומיים, מבני LEED ומבני ביקורת סטנדרטים, והשווה את עלות בנייתם.

לצפייה במחקר: <http://bnim.com/images/powerofzero/index.html>

צריכת האנרגיה השנתית הכוללת בדופלקס האידיאלי לאחר השינויים הייתה 4,620 קוט"ש/שנה. לאחר שילוב האמצעים לייצור אנרגיה, אחוז האנרגיה המאופסת בבניין האידיאלי בתמהילים שונים של תאים פוטוולטאים ודודי שמש הוא:

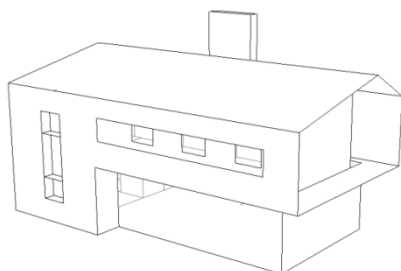


תרשי	% בניין מאופס
א. דוד שמש + תאים פוטוולטאים	100%
ב. תאים פוטוולטאים בלבד	100%

3. בתרחיש הדופלקס הריאלי שולבו מספר שיפורים בלבד:

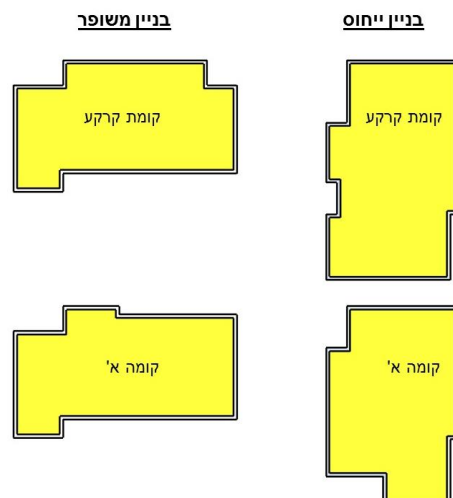
אמצעי תכנון		הפרש מחיר (ש"ח)
תוספת עלויות בנייה		
התקנת חלונות בעלי זיגוג כפול ($U\text{-Value} = 2.2 \text{ (W/m}^2\text{K)}$)	25,183	
תוספת בידוד לקיר ברנוביץ' ($U\text{-Value} 0.45 \text{ (= W/m}^2\text{K)}$)	19,659	
אורור טבעי	ללא עלות	
תאורת LED	לא תומחרה	
שיפור הסננה של המעטפת (איטום אויר = 0.6 החלפות אויר לשעה)	1,117	
פאנלים סולארים	36,300	
דוד שמש	ללא תוספת	
	סה"כ	82,259
חיסכון בעלויות הבנייה		
מערכת מ"א אינוורטר מקדם יעילות $\text{CoP} = 4.0$ ו- $\text{SEER} = 3.32$	- 5,000	
תכנון קומפקטי (זיכוי מהקטנת מעטפת המבנה)	- 28,295	
	סה"כ	- 33,295
	סה"כ	48,964

צריכת האנרגיה השנתית הכוללת בדופלקס הריאלי עמדה על כ-5,384 קוט"ש/שנה. לאחר שילוב האמצעים לייצור אנרגיה, אחוז האנרגיה המאופסת בבניין הריאלי בתמהילים שונים של תאים פוטוולטאים ודודי שמש הוא:



תרשי	% בניין מאופס
א. דוד שמש + תאים פוטוולטאים	100%
ב. תאים פוטוולטאים בלבד	100%

התרשים הבא מתייחס באופן סכמתי להבדל התכנוני בין בניין הייחוס בבנייה צמודת הקרקע (דופלקס) לבין הבניין המשופר (מבנה ריאלי ומבנה אידיאלי).



בבנייה הפרטית חישוב העלויות מציג תמונה שונה מן הבנייה הרוויה. שטח המעטפת גדול יותר (בגלל החזית הנוספת – הגג), ולכן תוספת העלות לשיפורים במעטפת המבנה גבוהה יותר. בנוסף, החיסכון בעלויות הבנייה נמוך יותר במקרה זה, כיוון שיחידת הייחוס במקרה זה הייתה קומפקטית למדי. כמו כן, עלות האיפוס האנרגטי והתקנת המערך הסולרי אינה מתחלקת בין יחידות. לכן, מאזן העלויות אינו מאפשר חסכון כדומה לבנייה הרוויה. מסיבות אלו, עלות הבנייה הכוללת של יחידת דופלקס מאופסת אנרגיה תהיה יקרה יותר בכ- 48 אלף ₪ בתרחיש הריאלי עד 63 אלף ₪ בתרחיש האידאלי.

הבדיקה ההשוואתית לבנייה רוויה – (Sensitivity Analysis)

תוצאות הבדיקה ההשוואתית מראות כי תפעול נכון של הבניין (פתיחת חלונות בזמן הנכון) יכול להביא לחסכון של כ-11% בצריכת האנרגיה, והוספת בידוד לקיר ברנוביץ' יכולה להביא לחיסכון של 17% - 20% מצריכת האנרגיה המקורית. הנתון המפתיע ביותר הוא שהשינוי הגיאומטרי לבדו (תכנון הארגון המרחבי, הפנייה מיטבית, צמצום שטח הפנים, ותכנון פתחים נכון) הביא לשיעור החיסכון הגדול ביותר: כ-28% מצריכת האנרגיה המקורית.

ניתוח השפעת האלמנטים השונים על השיפור בצריכה:

מודל	סה"כ צריכת אנרגיה לאקלום (קוט"ש"מ"ר\שנה)	% שיפור	מודל בנייה רוויה עלות (₪)*
1. מודל מקורי – מבנה ייחוס	53.6	-	-
2. נורות LED	52.7	1.7	12,000
3. אורזר טבעי	47.75	10.9	0
4. זיגוג כפול	48.7	9.1	11,254

2,585	16.6	44.7	5. ברנביץ' א' (הוספת בידוד)
6,260	19.6	43.1	6. ברנביץ' ב' (הוספת בידוד כפול)
לא תומחר	19.8	43	7. קיר מילואת בידוד
886	7	49.85	8. איטום אויר (מ-1 ל-0.6 החלפות אויר)
65,325 זיכוי	27.9	38.65	9. שינוי גיאומטרי – תכנון קומפקטי

איפוס אנרגטי בנייה רוויה - סיכום:

תרחיש	תמהיל	סה"כ מספר ואחוז דירות מאופסות	תוספת נדרשת של מ"ר פוטוולטאים לאיפוס מלא
מבנה ייחוס	א. דוד שמש לכל דירה (260 מ"ר)	0%	
מבנה אידיאלי	א. דוד שמש לכל דירה 240 מ"ר תאים פוטוולטאים	19 דירות (כ-48%)	330 מ"ר
	ב. 30 (מתוך 40) דירות עם דודי שמש. 300 מ"ר תאים פוטוולטאים	27 דירות (כ-68%)	200 מ"ר
	ג. ללא דודי שמש מקסימום תאים פוטוולטאים (500 מ"ר)	35 דירות (כ-88%)	70 מ"ר
מבנה ריאלי	א. דוד שמש לכל דירה 240 מ"ר תאים פוטוולטאים	14 דירות (כ-36%)	520 מ"ר
	ב. 30 (מתוך 40) דירות עם דודי שמש. 300 מ"ר תאים פוטוולטאים	20 דירות (כ-51%)	390 מ"ר
	ג. ללא דודי שמש מקסימום תאים פוטוולטאים (500 מ"ר)	26 דירות (כ-65%)	260 מ"ר

איפוס אנרגטי בנייה צמודת קרקע - סיכום:

תרחיש	תרחיש	% בניין מאופס
מבנה ייחוס	א. דוד שמש + תאים פוטוולטאים ב. תאים פוטוולטאים בלבד	57% 60%
מבנה ריאלי	א. דוד שמש + תאים פוטוולטאים ב. תאים פוטוולטאים בלבד	100% 100%
מבנה אידיאלי	א. דוד שמש + תאים פוטוולטאים ב. תאים פוטוולטאים בלבד	100% 100%

בדרך לאיפוס אנרגטי – רגולציה, תקנים ומדיניות ממשלתית לעידוד בנייה מאופסת אנרגיה

א.תקנים והגדרות חוקיות למבנים מאופסי אנרגיה בעולם

בעולם מתקיימת חפיפה מסוימת בין הפרקטיקה של מבנים מאופסי אנרגיה לבין תקינה לבנייה ירוקה (ברוב התקנים לבנייה ירוקה למרכיב האנרגיה יש משקל רב). תקנים מסוג זה, אם כן, עשויים להוות ערוץ לפיתוח מדיניות מתקדמת לבנייה מאופסת אנרגיה.

נכון לזמן כתיבת המחקר, חקיקה ממשלתית לעידוד מבנים מאופסי אנרגיה קיימת במדינות ספורות, בעיקר באירופה ובצפון אמריקה. נוסף על מבנים מאופסי אנרגיה, מדינות בעולם הגדירו מבנים שהם "כמעט" מאופסי אנרגיה. מדיניות לאומית למבנים מאופסי אנרגיה אינה נוצרת יש מאין. במקומות בהם מתקיימת תשתית פעילה ומוצלחת של מדיניות ממשלתית בתחום ההתייעלות האנרגטית במבנים, המעבר למבנים מאופסי אנרגיה הוא מהלך מתבקש. מבנים אלה מאופיינים בדרישה מחמירה להתייעלות אנרגטית, הנמדדת בצמצום צריכת האנרגיה באופן משמעותי לעומת תקנות הבנייה המקומיות המחייבות.

אירופה - הדירקטיבה האירופאית וההוראה למבנים "כמעט" מאופסי אנרגיה:

בשנת 2010 הכריזה ממשלת אירופה המאוחדת על הוראה מחייבת להתייעלות אנרגטית מקיפה במבנים, לפיה החל משנת 2021 כלל המבנים החדשים יהיו "כמעט" מאופסי אנרגיה, - Nearly Zero Energy Buildings, nZEB. החלטת הדירקטיבה אפשרה למדינות החברות חופש הגדרה לאיפוס אנרגטי, מתוך הכרה בקושי ובמורכבות הפוליטית, הכלכלית והארגונית הכרוכים באיפוס אנרגיה במבנים בכל רחבי האיחוד האירופי. כך קרה שלאור הקשיים הארגוניים והבירוקרטיים, במקום להתחייב לאיפוס אנרגטי של ממש בחרו רוב המדינות החברות בדירקטיבה בהגדרות מקלות למדי. זאת, על מנת להתקדם אל יעדי ההתייעלות האנרגטית של בנייה מאופסת אנרגיה באופן הדרגתי.

ארצות הברית – הגדרה לאומית למבנים מאופסי אנרגיה ומבנים "מוכנים" לאיפוס אנרגטי

בארה"ב עדיין לא קיימת מדיניות חקיקה המחייבת בנייה מאופסת אנרגיה. עם זאת, הגדרה לאומית למבנה מאופס אנרגיה לפי משרד האנרגיה הלאומי האמריקני היא:

" מבנה יעיל אנרגטית, אשר כמות האנרגיה הנצרכת בו (במאזן שנתי של אנרגיה ראשונית), שווה או קטנה לכמות האנרגיה המיוצאת המיוצרת באתר ממקורות מתחדשים."

בנוסף, הגדיר משרד האנרגיה האמריקאי את התכנית (ZERH) Zero Energy Ready Home: במסגרתה על מבנים להשיג צמצום משמעותי בדרישת האנרגיה על ידי שילוב אמצעים להתייעלות אנרגטית, כך שהאנרגיה החיונית לתפקוד הבניין יכולה להתקבל משימוש באנרגיות מתחדשות. מעל 14 אלף מבנים הוסמכו מאז 2008 לאתגר זה.

הסמכה בינלאומית לאיפוס אנרגטי Net Zero Energy Building Certification™ (NZEB)

NZEB היא התוכנית הבין-לאומית היחידה, נכון למועד כתיבת מסמך זה, אשר מציעה הסמכה וולונטרית למבנים מאופסי אנרגיה כחלק ממספר קטגוריות שונות להסמכה השייכות לתכנית ה-Living Building Challenge. ההסמכה למבנים מאופסי אנרגיה, Net Zero Energy Buildings, ניתנת רק לאחר בדיקה ווידוא בפועל של צריכת האנרגיה במשך שנה במבנים שבנייתם הושלמה.

המחקר מפרט ומציין דוגמאות נוספות.

ב.מנגנונים ומדיניות לעידוד בנייה מאופסת אנרגיה

ניתן לחלק את מנגנוני המדיניות להטמעת התייעלות אנרגטית ומבנים מאופסי אנרגיה (על אף שמנגנונים הנוגעים באופן ייחודי למבנים מאופסי אנרגיה הם נדירים למדי) לשמונה קטגוריות עיקריות:

1. הגברת המודעות הציבורית.
2. שיפורים בחוקים ותקנות הבנייה.
3. הסמכת בניינים לפי דירוג אנרגטי.
4. מתן מידע והקניית ידע על ידי הכשרות לקהילה המקצועית.
5. עידוד פרויקטי חלוץ לדוגמא.
6. פיקוח ומעקב אחר צריכת אנרגיה בבניינים.
7. מתן תמריצים כלכליים וכלי מימון.
8. השקעה במחקר ופיתוח.

המחקר מציג דוגמאות ליישום כל אחת מקטגוריות אלו ומדגיש כי כלי מדיניות צריכים לתת מענה לחסמים העיקריים אשר מעכבים השקעות לבנייה מאופסת אנרגיה ולהשפיע על קבוצות גדולות של נוגעים בדבר במשק. חשוב שכלי מדיני יהיה נהיר ופשוט. שיציג תמונה ארוכת טווח אך גם יעדי ביניים בין הסטטוס-קוו והיעד.

מוכנותו של שוק הבניה הישראלי לבנייה מאופסת אנרגיה

פרק זה מתייחס לאתגרים הניצבים בפני שוק הבנייה בישראל, ומתמקד בשחקניו השונים:

המתכננים: תכנון טוב הוא הבסיס החשוב בשרשרת הצעדים הנדרשים לייצור מבנים מאופסי אנרגיה. יתרונו העיקרי: עלותו נמוכה לעומת תמורתו הגבוהה. בשנים האחרונות מתקיימת בישראל מגמה ברורה של הכשרת אנשי מקצוע המתמחים בבנייה ירוקה, ועדיין, ישנם פערים הזקוקים להתייחסות:

א.היעדר תהליכי תכנון אינטגרטיביים

ב.היעדר כלי עבודה מתקדמים ומוסכמים לעבודה האינטגרטיבית לאיפוס אנרגטי

ג.היעדר כמות דוגמאות מקומיות טובות ובולטות (שנבדקו לאורך זמן)

ד.היעדר מעקב אחר ביצועים אנרגטיים של פרויקטים מקומיים, ושקיפות נתונים, יכולת השוק ללמוד מוגבלת.

ה.יכולת יישום מוגבלת במקרה של תכניות בניין עיר ישנות, בנייה באזורים עירוניים צפופים

היזמים וחברות הבנייה: המבצעים בפועל של החלטות הרגולטור והמתכננים. הם גם מיישמי החדשנות ומשווקיה ובעלי הידע המעשי (know how). בפני היזמים וחברות הבנייה ניצבים מגוון אתגרים:

א. איטיות באימוץ חדשנות בענף הבנייה, הנובעים בין השאר מגובה השקעות ומידת הסיכון, מהמבנה הריכוזי של שוק הבניה למגורים בישראל, מקבען מתודולוגיות בנייה מקובלות ועוד.

ב. תועלתם של היזמים מבנייה מאופסת אנרגיה מוטלת בספק.

ג. היעדר התארגנות קולקטיבית של חברות הבנייה והיזמים. ריבוי תהליכי ניהול לחדשנות עשויים לתרום להיווצרות שיתופי פעולה פוריים, כפי שנעשה ברחבי העולם.

רשת היצרנים והספקים של חומרי הבנייה והטכנולוגיות: ספקים וחברות יצרניות לחומרי בנייה יכולים להכשיר לוביסטים לעודד מדיניות שתיטיב עם התחום אותו הם מייצגים, הם משקיעים משאבים בפרסום ומייצרים שיתופי פעולה לקידום מחקרים יישומיים של מוצרים חדשניים בשוק הבנייה (למשל: איגוד הישראלי לאנרגיה חכמה, פורום הבידוד של המועצה לבנייה ירוקה ושיתופי פעולה בין חברות שונות).

המדינה: לרשות המדינה עומדים כלים שונים לעידוד הביקושים וההיצע, בעיקר כשלמדינה אינטרס ארוך טווח לשלב את הבנייה מאופסת האנרגיה באופן נרחב (בין היתר במסגרת המחוייבות להפחתת פליטות גזי חממה אך יש לציין כי בנייה יעילה אנרגטית הינה אינטרס כלכלי, סביבתי, אישי וציבורי אף ללא התחייבות זו, עקב הפחתת זיהום, התלות בדלקים וכן הלאה). נכון לכתובת המחקר, עדיין אין בישראל מדיניות ממשלתית רשמית הנוגעת לבנייה מאופסת אנרגיה. יחד עם זאת, מספר מבנים מאופסי אנרגיה נמצאים בתכנון במסגרת מוסדות מדינה (מבני חינוך קטנים וכן מספר מבנים בבסיסי צה"ל).

המדיניות הנוכחית לעידוד התייעלות אנרגטית בבנייה בישראל באה לידי ביטוי במגוון תחומים: השקעה במחקר ופיתוח, הנגשת מידע והכשרות לקהילה המקצועית פרויקטי חלוץ ותמיכה בפיתוח טכנולוגיות חדשות, הגברת המודעות הציבורית, פיתוח דירוג אנרגטי בבניינים ומתן תמריצים כלכליים וכלי מימון למעוניינים בכך. כמו כן בהמשך להחלטת הממשלה 542 גובשה תכנית ליישום היעדים להפחתת פליטות גזי חממה והתייעלות אנרגטית מאפריל 2016 הכוללת פעולות שונות להתייעלות אנרגטית במבנים.

בחוק התכנון והבנייה במתכונתו הנוכחית יש פוטנציאל לעידוד הקמת מבנים מאופסי אנרגיה, אולם ישנם גם כמה סעיפים והיבטים העלולים להקשות על הקמתו, למשל: בידוד הממ"ד, היעדר אכיפת ת"י 1045, התיקון לחוק בעניין התקנת מערכות סולאריות במבני מגורים גבוהים, תיאום ואינטגרציה בין התקנים השונים ועוד. כמו כן, קיימת תכנית מתאר ארצית להשמת מתקנים לאנרגיה סולרית בבניינים, אך ניתן לאתגר לבנייה עירונית מאופסת אנרגיה. בנוסף, קיימים בישראל תקנים קיימים וכלי תכנון מקומיים היכולים להוות בסיס טוב וזמין לפיתוח סטנדרטים גבוהים יותר של תכנון וביצוע מבנים מאופסי אנרגיה.

רשויות מקומיות: בהיעדר תכנון ארצי מגובש לבנייה מאופסת אנרגיה, יש לרשויות המקומיות הזדמנות לעודד בנייה שכזו במסגרת הסמכות העירוניות בנוגע לתכנון ובנייה.

עם אלו נמנים:

- תכניות בנין עיר המאפשרות:

- כיווני אוויר והפנית חזיתות הבניינים - חזית דרומית גדולה עדיפה כחזית עיקרית לבניה מאופסת אנרגיה.
- התייחסות לקשר שבין גודל החלקה, מספר המבנים המותרים עליה ואופן העמדתם, לבין צפיפות יחידות הדיור (נטו). מספר גבוהה יותר של יחידות דיור משמעותו אתגר גדול יותר לאיפוס המבנה הבודד.
- הגדרת קווי הבניין והמרחק בין הבניינים, החלוקה למגרשים וקביעת גודלם: לא תמיד נלקחים בחשבון זכויות השמש, הצללה על שטחי גגות משותפים או על שטחים פתוחים.
- שימוש בשטחים ציבוריים לתשתיות סולאריות ואמצעים שונים לייצור אנרגיה במרחב.
- תכניות עירוניות הכוללות זכויות רכישה של גגות לטובת ייצור חשמל סולרי.
- לרוב ישנן תקנות מקומיות מגבילות לעיצוב חזיתות המבנים, כמו למשל ההחלטה המחייבת לחיפוי מבניין בלוחות אבן, אשר הובילו להטמעה רחבה למדי של שיטת ברנוביץ' המאתגרת את ההתייעלות האנרגטית של המבנה.
- יש ביכולתן של הרשויות המקומיות להעניק אוטונומיה לרשויות נפרדות בשטחן (למשל לקמפוס אוניברסיטת תל-אביב, אשר מתכוונת להקים מערך של מתקנים פוטוולטאים על גגות מבני הקמפוס).

מוכנות תשתיות החשמל: ריבוי מקורות האנרגיה המפוזרים משפיע על רשת החשמל. ככל שיעשה שימוש רחב היקף במקורות אנרגיה מתחדשות ללא הכנה מתאימה של רשת החשמל, יגדלו גם התועלות השליליות (כגון עלויות הולכה ואיבודי חשמל). רשת חכמה מסוגלת לייעל את השליטה והבקרה בכמות החשמל המועברת לרשת, לשפר את יכולת תגובת המערכת בזמן אמת ולייצר התאמה טובה יותר בין זמני הייצור לזמני ההיצע. ככל שהדרישה להקמת מתקנים סולאריים על בניינים תגדל, כך יידרשו מנגנונים עסקיים חדשניים ותכניות מטעם רשויות החשמל אשר יאפשרו השתתפות של סוגים שונים של לקוחות.

מודעות הציבור: מחקר שבוצע עבור המשרד להגנת הסביבה בנושא שימוש בכלי מתחום הכלכלה ההתנהגותית⁴ העלה מספר רעיונות אשר ניתן לקשר ישירות למבנים מאופסי אנרגיה והגדלת המודעות הצרכנית להתייעלות אנרגטית: שימוש במסר פשוט אחד, תועלת צרכנית מובהקת ויצירת סמל סטטוס. להיבטים אלו פוטנציאל לשמש כבסיס לשיח המעלה את המודעות לבנייה מאופסת אנרגיה, לגרום לצרכנים להעדיף דירות אלו בכלל השיקולים ברכש דירה ואף להגדיל את חשיבות החיסכון האנרגטי בתודעת הציבור.

⁴ בחינת כלים מתחום הכלכלה ההתנהגותית ויישומם לקידום בנייה ירוקה בישראל, רוני דניאל, אביאל ילינק, אריה רותם ואביטל עשת, 2016.

פרק זה מסכם את מסקנות המחקר ומפרט שורה של המלצות, בהתבסס על ניתוח התקדימים מרחבי העולם ובעקבות בחינה של מקרי המבחן.

המלצות טכניות לאור הבדיקה היישומית

הבדיקה היישומית הראתה היתכנות גבוהה לאיפוס מבנים צמודי קרקע, אולם היעד המתגר יותר הינו מבני מגורים רבי-קומות. במידה ותאים פוטוולטאים מותקנים על גג הבניין בלבד, אחוז הדירות מאופסות האנרגיה הוא פונקציה ישירה של מספר הקומות, שכן שטח הגג (או, השטח עליו ניתן לייצר חשמל) נשאר קבוע בעוד כמות הצרכנים הולכת ועולה. אחוז הדירות המאופסות יכול לעלות (עד לכדי 100%, באופן תיאורטי), במידה וניתן להציב תאים פוטוולטאים לייצור חשמל גם בשטחים ציבוריים בסמוך לבניין. לצורך איפוס אנרגטי מלא של מבני מגורים ברמה האסטרטגית-לאומית מחקר זה ממליץ על גישת איפוס יישומית משולבת, המורכבת מהאמצעים הבאים:

- א. התייעלות אנרגטית מקסימלית ברמת הבניין – כולל שילוב אמצעים פאסיביים ואקטיביים לצמצום הדרישות לאנרגיה, כפי שצויינו בראשית המחקר.
- ב. ייצור אנרגיה מתחדשת ברמה המקומית – התקנת אמצעים לרתימת אנרגיות מתחדשות (כדוגמת תאים פוטוולטאים ודודי שמש) על גגות המבנה ובסביבתו.
- ג. ייצור אנרגיה מתחדשת ברמה לאומית – על צריכת האנרגיה הנותרת (במידה ולאחר שלבים א' ו-ב' עדין לא יתקיים איפוס) להיות מיוצרת ממקורות מתחדשים (כדוגמת חוות הפאנלים הסולאריים בנגב או שבשבות הרוח בגולן). המלצה זו משתלבת עם המלצות המדינה בדבר פיתוח יכולות הפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים.

המלצות למדיניות תומכת בבנייה מאופסת אנרגיה

הכרזה על הבניה מאופסת אנרגיה כיעד לאומי

על מנת לקדם את הבנייה מאופסת האנרגיה או הבנייה השואפת לאיפוס אנרגטי בישראל, רצוי להקדים ולהכריז עליה כיעד לאומי, כחלק ממפת הדרכים של המדינה אל יעדי הפחתת פליטות גזי החממה ארוכי הטווח. לצורך כך, תצטרך המדינה לנסח הגדרה מקומית למהו מבנה מאופס אנרגיה בישראל. אנו ממליצים כי צוות מגוון המורכב מבעלי עניין שונים, ובהשתתפות הממשלה, יקבע את ההגדרה הרלוונטית לאיפוס אנרגיה בישראל.

עוד מומלץ כי תהליך ההגדרה יתבצע בשני שלבים: בשלב הראשון, מבנה מאופס אנרגיה יוגדר כמבנה אשר כמות האנרגיה המתחדשת המיוצרת והמיוצאת באתר בו בנוי הבניין שווה לכמות האנרגיה הנצרכת בבניין במשך שנה. בשלב השני, תורחב ההגדרה לאיפוס אנרגיה ראשונית. הגדרה זו תצא לפועל רק לאחר פיתוח של מקדמי איבוד אנרגיה בין תחנות ההפקה לבתי הצרכנים. הגדרה זו היא הגדרה מקיפה ומתאימה יותר לאיפוס אנרגטי ברמה הלאומית ולמבנים הצורכים אנרגיה מתשתיות החשמל המקומיות.

הכוונת מנגנוני מדיניות לבנייה מאופסת אנרגיה:

המחקר מציע את כלי המדיניות הבאים:

מדיניות תכנון ובנייה:

המחקר מציג פערים רבים, מחד, והזדמנויות רבות, מנגד, בהתייחסות לתכנון ובנייה למבנים מאופסי אנרגיה ונורמות בנייה מקובלות. מחקר זה אינו מציע לדרוש בנייה מאופסת אנרגיה במסגרת חוק התכנון והבנייה או כל מתווה חקיקתי גורף אחר. אלא מעלה שינויים אשר ייצרו תנאים טובים ומבטיחים יותר לבנייה מאופסת, כך שהשגתה תהיה קלה יותר וכתוצאה מכך קלה יותר לבדיקה וביקורת.

עדיפות לחלוקת מגרשים אורכית לחזיתות צפון/דרום: חלוקה זו תאפשר תנאים טובים יותר לתכנון פאסיבי.

המרחק בין הבניינים, החלוקה למגרשים וקביעת גודלם: במקביל וכהשלמה לחלוקת המגרשים יש להקפיד על התחשבות בזכויות שמש והשפעת המבנים זה על זה. הסדרת חקיקה לשימוש בשטחים עירוניים ציבוריים: על מנת להגיע לאיפוס בבנייה רוויה יש להתייחס לכלל המרחב השכונתי כיצרון אנרגיה. תפיסה זו מחייבת בדיקת עומק של שאלות בנושא תחזוקת וניהול המרחבים הללו.

גמישות בהתייחסות לחזיתות המבנים: מחקר זה מעודד אימוץ טכנולוגיות בנייה חדשות אשר יתגברו על חסמים הקיימים כיום בשוק הבנייה הישראלית, דוגמא לכך היא הדרישה לתקנת חיפוי האבן. על מנת לאפשר גמישות לטיפול בבינה שונים ורוויים יש לאפשר שימוש בחזיתות המבנה להתקנת פאנלים פוטו וולטאים.

הכללת צמודי קרקע: מחקר זה מראה כי השגת יעד איפוס אנרגטי הינו קל ופשוט יותר בבנייה צמודת קרקע. על אף שהינה בזבזנית במשאב הקרקע, זוהי הזדמנות לדרוש יעדי צמצום אנרגיה משמעותיים בטיפולוגית בינוי זו. היבטים אלו מחייבים כולם **מנהיגות עירונית וארצית** אשר תציב את הבנייה מאופסת האנרגיה כמטרה.

מודעות אנשי מקצוע:

המחקר הראה כי במקרים שנבחנו תכנון יעיל השיג את ההתייעלות האנרגטית הגבוהה ביותר מבין שאר האמצעים הפאסיביים. הדבר מחדד את הצורך בהתמודדות מול העדר מודעות מקצועית בתחום. מוצע לבצע זאת באמצעים הבאים:

פתיחת מסלולי התמחות באקדמיה המתמקדים בהתייעלות אנרגטית במבנים: מוצע לפתוח מסלולים ותארים בתחום, אשר יתמקדו בכלל ההיבטים הנדרשים להקמת מבנים מאופסי אנרגיה ואף יבצעו ניסויים ומחקרים בתחום באקדמיה.

הקמת מנגנון להכשרות מקצועיות ליעילות אנרגטית ותכנון מאופס אנרגיה: הכשרת אנשי מקצוע המתמחים בנושאים הייחודיים לבנייה חסכונית באנרגיה (מהנדסים, אנשי מיזוג אוויר, פועלי בניין, אנשי איטום וכו'). במסגרת זו יוכשרו בעלי תפקידים להתמחויות בהם קיים מחסור בתחום היעילות האנרגטית.

הקמת גוף בדיקה לאיכות הבנייה (בפרט בתחום האנרגיה): פרט ליצירת מנגנונים להכשרות יש לוודא את איכות יישום הבינוי ע"י בדיקה ובקרה בפועל, בין אם באמצעות חיזוק מנגנונים קיימים או חדשים.

תמרוץ כלכלי:

שילוב נושא מבנים מאופסי אנרגיה במסגרת תכניות הממשלה להפחתת פליטות גזי חממה: זיהוי תכניות ממשלתיות קיימות אליהם ניתן להתחבר על מנת לקדם בינוי מאופס אנרגיה.

תכניות למתן הלוואות וחבילות מימון מסובסדת למבנים מאופסי אנרגיה: מוצע לכנס צוות שיגבש אסטרטגיה להלוואות "ירוקות", תוך סקירת מנגנונים דומים מהעולם ולייעד אותם נקודתית עבור בנייה מאופסת.

יצירת מסגרת רגולטיבית תומכת לתכניות ייעודיות לרשויות ולתאגידים עירוניים: במסגרת זו הממשלה תייצר מסגרת רגולטיבית תומכת שתאפשר לרשויות ותאגידים עירוניים להעמיד אפשרות לאשראי לצורך סיוע בבינוי מבנים מאופסי אנרגיה.

מנגנוני מימון באמצעות חברת החשמל: בדיקת מודלים עסקיים המאפשרים ליזמים לממש את הפוטנציאל למבנים מאופסי אנרגיה.

הנחות על עלות הקרקע תמורת התחייבות לעמידה בדרישות בנייה מאופסת אנרגיה: מוצע לאפשר הפחתה במיסוי עבור יזמים אשר יתחייבו לבינוי מאופס אנרגיה. ניתן לייצר מנגנון אשר יקצה חלק ניכר מן ההנחה רק לאחר הוכחה **בפועל** לאיפוס אנרגטי לאחר שנת תפעול אחת לפחות.

סיוע ביעוץ מקצועי על מנת להתגבר על פערי הידע להשגת בנייה מאופסת אנרגיה: הניסיון המצטבר בעלויות בנייה ירוקה מעיד על כך שככל שניסיונם של העוסקים בבנייה גדול יותר, כך מצטמצמות העלויות הנוספות והלא מתוכננות. הצעה זו תאפשר מתן תכניות תמיכה מקצועיות מבעלי ניסיון אשר ינחו את הצוותים המקצועיים בתכנון נכון ויישום מדויק.

תכניות המימון שנסקרו יכולות להיות מקבילות זו לזו או כחלופות זו לזו, המשותף להן הוא היותן מנועי צמיחה שבכוחם לקדם את המשק ולהוסיף מקומות עבודה. יש לוודא כי קיים מנגנון ביקורת של יישום בפועל עבור כל תכניות אלו.

מחקר, פיתוח ועידוד חדשנות

הקמת חממות חדשנות לטכנולוגיות בנייה: לטכנולוגיה מתקדמת תפקיד מפתח בפיתוח שוק לבנייה מאופסת אנרגיה. מחקר זה הראה כי השילוב בין תכנון פאסיבי לצד שימוש בטכנולוגיות חדשניות מאפשר השגת בינוי מאופס אנרגיה. לשם צורך זה מוצע לקדם חממות לפיתוח חדשנות וטכנולוגיות, כדומה לפעילות המתבצעת עבור סטרטאפים בישראל.

הקמת גוף לתיאום ועידוד בנייה מאפסת אנרגיה: לאור ריבוי מחזיקי העניין (הממשלתיים, עירוניים ועסקיים הנוגעים לבינוי מאופס אנרגיה) דרוש גורם מתאם שיחבר את שלל מוסדות המחקר, החוקרים, קובעי המדיניות, הרשויות הממציאים והיזמים אל השוק; יעזור להם להבין את המגמות הצרכניות ואת אתגרי התעשייה, יוודא כי לא קיימת כפילות במיזמים השונים, יאגם משאבים, יציע תכניות מדיניות ויבחן היבטים משפטיים.

קידום מבנים לדוגמה ופרוייקטי חלוץ: במסגרת עידוד מקרי מבחן מוצע להעניק תמריצים כלכליים וקולות קוראים לפרוייקטי דגל לאיפוס אנרגטי. על מבנים אלו לחשוף את שיטות התכנון, הצריכה בפועל וכל מרכיב אשר יוכל לקדם את הידע בשוק. מוצע כי יוקם מאגר ידע פתוח ושקוף עבור כלל פרוייקטי החלוץ, מאגר זה יכיל את המידע המקצועי שנצבר כתוצאה מתכנון וביצוע המבנים.

אתגור תקינה קיימת: שיפור התקנים והשיטות הקיימות עד להגעת מקסימום היעילות האפשרית. מוצע שתוספות תקינה אלו יהיו וולנטרים במהותם.

המחקר מציב את התועלות הכלכליות והסביבתיות (כפי שמתבטאות בפליטות פחמן דו חמצני) עבור המשק בישראל. בהינתן מימוש מלא או חלקי של המלצות המחקר, כמו כן, בהינתן ההנחות הבאות:

- המדינה תאמץ חזון שבו 30% מהמבנים בבנייה רוויה ו- 40% מצמודי הקרקע יהיו מאופסי אנרגיה עד לשנת 2030.

- הגידול הממוצע בהתחלות הבנייה הוא 1.017
- תתקיים ירידה שנתית בשיעור הבנייה צמודת הקרקע של כ-5% בשנה (והמענה לגידול האוכלוסיה ינתן באמצעות בנייה רוויה).
- עלות וצריכת האנרגיה ישארו דומות למצב הנוכחי.
- סך הפליטות לקוט"ש בייצור חשמל (gco2e) הינו 670.

בהינתן הנחות אלו, עד 2030 ייחסכו לציבור המשתמשים במבנים, באופן מצטבר, כ- 1.2 מליארד ש"ח כתוצאה מאיפוס יח"ד צמודות קרקע, וכ- 3.2 מליארד כתוצאה מאיפוס יח"ד בבנייה רוויה (סה"כ כ- 4.2 מליארד ₪). כמו כן יחסך למשק כ- 4 מיליון טון פליטות פחמן דו חמצני כתוצאה מאיפוס יח"ד בבנייה רוויה וכן כ- 1.5 מיליון טון כתוצאה מאיפוס יח"ד צמודות קרקע (סה"כ 5.5 מיליון טון). נספח ו מציג את מתודולוגיות החישוב לתועלות וכן הנחות נוספות לשם השגת יעדים אלו.

סיכום המלצות המחקר וההיררכייה בינהן



הטמעת בנייה מאופסת אנרגיה בתרבות הבינוי הישראלי

Abstract

Energy consumption in Israel is in a constant increase: between 1970 and 2010 the overall Israeli energy consumption has increased from around 5 to 50 billion kWh per year. A report by the Israel Electric Corporation, shows that energy consumption in buildings is responsible for around 30% of the overall energy consumption in the country.

Meanwhile, the average floor area of residential units in Israel has risen too – from around 100 sqm in 1970 to around 180 sqm in 2010 (gross area). This growth has led to increasing demands for energy, both as it is harder to control the climate inside large residential units, and because larger residential units tend to have more electric home appliances than smaller ones.

As residential buildings are the most common construction type in Israel, this report discusses the possible measures for decreasing energy consumption in them, and examines the feasibility of the design and construction of Zero Energy Homes, considering the unique climatic, economic and regulatory limitations in Israel.

In particular, this report aims to:

- Conduct a thorough survey of current literature, discussing Zero Energy Buildings, and set a theoretical and practical background.
- Examine the feasibility of Zero Energy Homes for different building types in Israel.
- Describe possible strategies and models for the realisation of Zero Energy Homes, taking into account various limitations.
- Help decision makers in the implementation of Zero Energy Building programs in Israel.

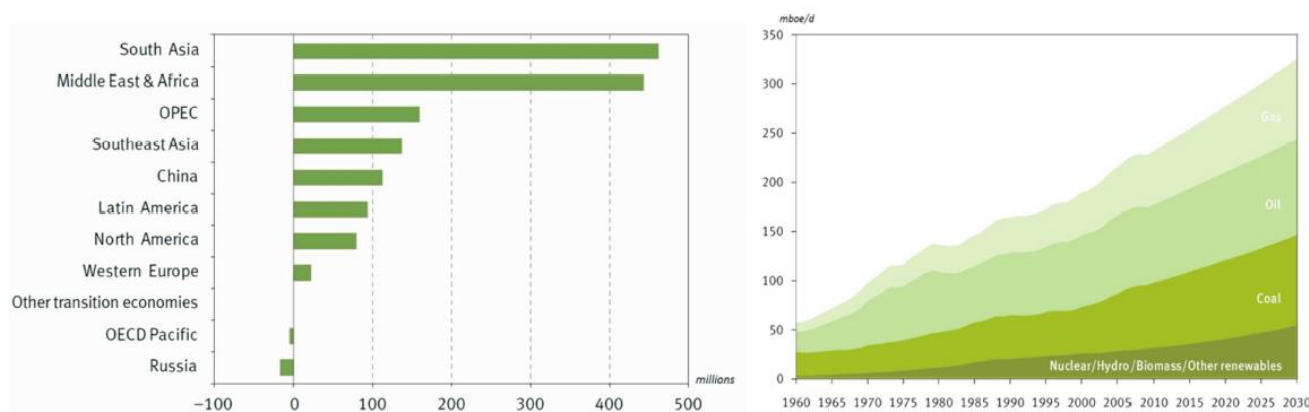
1.הקדמה

1.1.1.רקע - צריכת אנרגיה בסביבה הבנויה

דיון מעמיק מתחולל בקרב ממשלות, ארגונים סביבתיים וארגונים מחקריים בעשורים האחרונים, בנוגע לגידול בצריכת האנרגיה העולמית, ובנוגע להשלכות הפוליטיות, הסביבתיות, הכלכליות והחברתיות העוללות לנבוע מגידול זה.⁵ אוכלוסיית העולם הולכת וגדלה וכלכלות ענק (בעיקר במדינות מתפתחות כדוגמת הודו, סין וברזיל), הולכות וגדלות, ואיתן גדלה גם הדרישה לאנרגיה זמניה, זולה ולא מזהמת.⁶

הגידול העולמי בצריכת האנרגיה טומן בחובו מספר סכנות אפשריות, הן בטווח הארוך והן בטווח הקצר, ביניהן: הפוטנציאל לחיסול מאגרי האנרגיה, פגיעה ב"ביטחון אנרגטי" (היכולת לספק אנרגיה במחיר ובמאמץ סבירים) וכן התרומה הפוטנציאלית להתחממות כדור הארץ כתוצאה משריפת דלקים.³

הסביבה הבנויה אחראית על כ-40% מצריכת האנרגיה בעולם.⁷ עם עליית המודעות לנזקים הסביבתיים העוללים להיגרם כתוצאה מגידול בבנייה, גופים רבים – ממשלתיים ופרטיים – החלו בעשורים האחרונים לפתח ולאמץ מתודולוגיות ושיטות לבנייה חסכונית באנרגיה, וזאת בכדי להביא לצמצום הצריכה והתלות בדלקים מאובנים.



תרשים 1 (ימין) אספקת אנרגיה עולמית (OPEC 2010)
תרשים 2 (שמאל): גידול באוכלוסיית העולם בין 2009 ל-2030 (OPEC, 2010)

⁵ Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers. Ipcc (2014).

⁶ Lichtblau, J. World oil outlook. The Leading Edge 4, (1985).

⁷ Department of Energy and Climate Change. The Carbon Plan: Delivering our low carbon future. Energy 218 (2011).

1.2. הזזת הישראלית

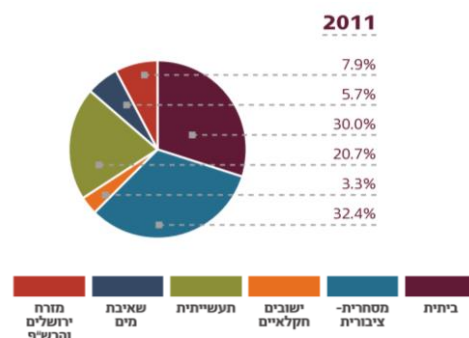
בהתאם להחלטות הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי אקלים (ה- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change), התחייבה ממשלת ישראל להיערך לשינויי האקלים ולהפחית בפליטות גזי החממה בהחלטות 474 (2009) ו 1504 (2010). להחלטות אלו הצטרפה המחויבות הבינלאומית שביצעה ישראל לטובת וועידת האקלים ב-2015 בפאריז. לקראת כינוס ועידת פאריז (2015), קבעה ממשלת ישראל⁸ כי היעד הלאומי להפחתת פליטות גזי חממה וייעול צריכת האנרגיה במשק יעמוד על 7.7 טון פליטות לנפש ב-2030 (בהשוואה לתרחיש "עסקים כרגיל" שבו נפליטים כ-10 טון לנפש). משמעות הדבר היא כי יש להביא להפחתה של כ-25% מפליטות גזי החממה עד 2030, וכנגזרת מכך לצמצם את צריכת החשמל הלאומית ולייצר חשמל ממקורות מתחדשים.

מאידך, צריכת האנרגיה במדינת ישראל נמצאת במגמת עלייה מתמדת. בין השנים 1970 ל-2010 חל גידול בצריכת החשמל האבסולוטית בישראל בשיעור של פי עשרה: מ-5 לכ-50 מיליארד קוט"ש בשנה⁹. הגידול הנ"ל נבע מסיבות רבות ומגוונות, ביניהן – גידול באוכלוסיה, צמיחה כלכלית ועלייה באיכות החיים. כמו כן, כתוצאה מהגידול בביקוש לאנרגיה, גבר קצב תפוקת החשמל בישראל. מחקרים עדכניים צופים כי עד 2040 עשוי הביקוש לחשמל להגיע לכ-160 מיליארד קוט"ש בשנה.

לנתונים אלה משמעות רבות, הן עבור הצרכן הפרטי והן עבור המדינה. עבור הצרכן הפרטי, העלייה ברמת החיים מלווה בעליית הוצאות האנרגיה. עבור המדינה וחברת החשמל האמונים על תשתיות אספקת החשמל למשק הישראלי, הגידול המשמעותי בצריכת החשמל מחייב היערכות לייצור חשמל ברמה שתספק את הדרישה מצד אחד ולחיסכון בחשמל מצד שני.

מקומם של מבנים הינו קריטי במימוש יעדי התייעלות אנרגטית והפחתת פליטות גזי חממה. על פי דין וחשבון סטטיסטי שפרסמה חברת החשמל ב-2011¹⁰, צריכת החשמל במבנים בישראל מהווה למעלה מ-60% מצריכת החשמל הכוללת בישראל. העלייה במודעות הנוגעת לצריכת החשמל במבנים, בשילוב מגמות סביבתיות עולמיות, הובילו גופים שונים גם בישראל לבחון כיצד ניתן להפחית את צריכת החשמל במבנים.

תרשים 3: התפלגות צריכת החשמל לפי צרכנים, נכון לשנת 2011.



⁸ אתר המשרד להגנת הסביבה. כניסה ב-30 לינואר 2016.

⁹ <http://www.sviva.gov.il/subjectsEnv/ClimateChange/ParisConfCC2015/Pages/default.aspx>

¹⁰ לולב, ש., סגל, נ., כהן-פארן, י., רוזנטל, ג. & גבאי, ד. אפס פחמן בישראל. 2013.

¹⁰ החשמל, ח. דין וחשבון סטטיסטי - חברת החשמל. 2011

כ-30% מצריכת החשמל הכללית בישראל - מקורה במבני מגורים¹¹. שטחן של יחידות מגורים בישראל נמצא במגמת עלייה מתמדת: שטח המגורים הממוצע לנפש גדל מכ-14.6 מ"ר ב-1960 לכ-28.5 מ"ר לנפש ב-1997¹². שטחה של יחידת מגורים ממוצעת עלה מכ-100 מ"ר ב-1970 לכ-180 מ"ר ב-2010. הגידול בשטח יחידות המגורים הביא גם הוא לעלייה בביקוש לאנרגיה לטובת אקלום (חימום וקירור מכאניים), תאורה מלאכותית ושימוש במכשירי חשמל מרובים יותר.

על מנת להתמודד עם יעדי הממשלה להפחתת פליטות גזי החממה, נכתבו ואומצו לאורך השנים תכניות מדיניות ותקנים לבנייה העוסקים בין היתר בצמצום צריכת האנרגיה במבנים. ביניהם אפשר למצוא את סדרת התקנים הישראליים העוסקים בהתייעלות אנרגטית (ת"י 5280, ת"י 5282, ת"י 1045) ואת החלטת פורום 15 הערים הגדולות בישראל לאמץ את התקן הישראלי לבנייה ירוקה (ת"י 5281) כמדיניות עירונית מחייבת, את הטמעת עקרונות פיתוח בר קיימא בתכניות בינוי, התנעת מהלכים לקידום שיפוץ אנרגטי (Retrofit) של מבנים ועוד. בעוד התקינה הקיימת מעודדת הפחתה בצריכת האנרגיה במבנים, היא אינה שאפתנית דיה על מנת לעודד ולקדם בנייה השואפת לאיפוס אנרגטי.

מטרת מסמך זה הינה לבחון את היתכנות התכנון והבנייה של מבני מגורים מאופסי אנרגיה בישראל באמצעות בחינת שתי טיפולוגיות אופייניות בבנייה חדשה למגורים בישראל – מבנה מגורים בבנייה רוויה ובית "דופלקס" צמוד-קרקע. כמו כן, מסמך זה בוחן מהם האתגרים והפתרונות המדיניים האפשריים לעידוד בניית מבני מגורים מאופסי אנרגיה בישראל.

1.3.1.3. מטרת המחקר

1. לערוך דיון מקיף ומעמיק בספרות הקיימת הנוגעת למבנים מאופסי אנרגיה ולרכז ידע תיאורטי ומעשי בנושא.
2. לבחון את היתכנותם של מבני מגורים מאופסי אנרגיה לפי סוגי מגורים נפוצים בישראל.
3. להציג אסטרטגיות ומודלים אפשריים למימוש מבנים מאופסי אנרגיה בישראל.
4. לדון באתגרים (חסמים) ובהזדמנויות לתכנון ובניית מבנים מאופסי אנרגיה בשוק הבנייה הישראלי
5. לשמש פלטפורמה לדיון מחזיקי עניין ליישום בפועל של מבנים מאופסי אנרגיה בישראל.

1.4. מבנה המחקר

פרק 2 מציג סקור ספרות מקיף הן במאפייני צריכת אנרגיה במבנים ובאמצעים לצמצמה, בהגדרות המקובלות בעולם למונח "מבנה מאופס אנרגיה" ובדוגמאות שונות למבנים מאופסים מרחבי העולם.

פרק 3 מציג את המתודולוגיה של הבחינה היישומית שבמחקר זה: מוצגת בו הגדרת המחקר לאיפוס האנרגטי וכן מוצגים בו כלי המחקר. מחקר זה עשה שימוש בשתי שיטות בדיקה: השיטה

¹¹ החשמל, ח. דין וחשבון סטטיסטי - חברת החשמל. 2011.

¹² כהן, ש. הביקוש לשטחי מגורים, תכנון כולל משולב למדינת ישראל תמ"א 38. 2005.

האבסולוטית, אשר מציגה חישוב מוחלט של כמות האנרגיה הנצרכת בבניין, ולאחריה מוצגת השיטה היחסית, אשר משווה בין הביצועים האנרגטיים של אלטרנטיבות תכנוניות שונות ומחשבת את אחוז החיסכון בצריכת האנרגיה ביניהן לבין תרחיש הייחוס. לבסוף, פרק זה מציג את שני מקרי הבוחן שנבחרו לאיפוס אנרגטי – בניין דירות בבנייה רוויה ומבנה מגורים מסוג "דופלקס".¹³

פרק 4 מציג את הבדיקות היישומיות של מחקר זה ואת תוצאותיהן.

פרק 5 מציג יוזמות מרחבי העולם הנוגעות לאיפוס אנרגיה במבנים, תקנים ומנגנונים וולונטריים לבנייה מאופסת אנרגיה והאופן בו מדינות מעודדות בניית מבנים מסוג זה.

פרק 6 דן במוכנותו של השוק הישראלי לבנייה מאופסת אנרגיה. הדיון סוקר את מעורבותם של מגוון גורמים: הציבור, המתכננים, היזמים והקבלנים, הטכנולוגיות הזמינות בישראל, המדינה והרשויות המקומיות, ותשתיות האנרגיה, והאופן בו ביחד ובנפרד גורמים אלו עשויים להיות מעורבים ביצירת התנאים המתאימים לבנייה מאופסת אנרגיה בישראל.

פרק 7 מציג את מסקנות המחקר, ואת ההמלצות לצעדים הבאים ולמדיניות ארוכת טווח.

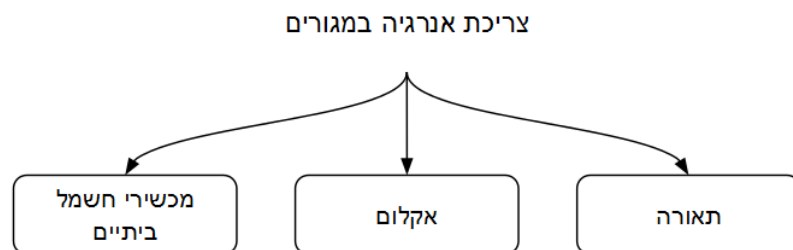
¹³ במחקר זה, הביצועים האנרגטיים של המבנים והתרחישים השונים נבחנו באמצעות תוכנה למידול תרמי. באמצעות תוכנות אלו ניתן לחשב את הנוחות תרמית (טמפרטורה, לחות יחסית וכו'), וכן את העומסים הדרושים לאקלום, כתלות בפרמטרים שונים כגון תכונות הבניין ואופן השימוש בו. על ידי שימוש בתוכנה זו ניתן להפיק אנליזה של ביצועי הבניין באופן שעתי (כל שעה במהלך שנה קלנדארית). יש לציין כי לתוכנות מסוג זה כגון IES-VE, EnergyPlus, ENERGYui, ועוד, ישנן מגבלות שונות (כפי שמצויין בפרק 3 המציג את מתודולוגיית המחקר).

2. סקר ספרות

2.1. צריכת אנרגיה במבנים – רקע

2.1.1. מאפייני צריכת אנרגיה במגורים

מבני מגורים, כאמור, הם מצרכני האנרגיה הגדולים במשק הישראלי. על מנת להביא לאיפוס צריכת האנרגיה בהם, יש להבין באיזה אופן נצרכת האנרגיה במבני מגורים וכיצד ניתן לצמצמה. ככלל, ניתן לחלק את צריכת האנרגיה במגורים לשלושה מרכיבים עיקריים:



תרשים 4: צריכת אנרגיה במגורים

א. תאורה

טכנולוגיות הארה התפתחו והתקדמו רבות בשנים האחרונות. פיתוחים אלה הביאו לכך שכיום, ישנו מגוון רחב של טכנולוגיות לתאורה במבנים. בעוד שבעבר היה שימוש נרחב בנורות להט ובנורות פלואורסצנטיות, בשנים האחרונות נורות מסוג LED (Light-Emitting Diode) הפכו פופולאריות¹⁴, והשימוש בהן תרם לפוטנציאל חיסכון משמעותי באנרגיה לתאורה משום שהן חסכוניות יותר.

ב. מערכות אקלום, אוורור, סינון אויר וחימום מים

מערכות מכאניות המשמשות ליצירת תנאי אקלים נוחים בפנים המבנה, הכוללות מגוון רחב מאוד של מכשירים, למשל: תנורי חימום (רדיאטורים, מפזרי חום ותנורים), מזגנים (מיזוג מרכזי, יחידות עצמאיות וכו'), מאווררים (מאווררי תקרה או רצפה) ועוד. צריכת האנרגיה לאקלום היא בעלת השיעור הגבוה ביותר בצריכת האנרגיה במגורים בישראל (ראה טבלה 1).

ג. מכשירי חשמל ביתיים

קטגוריה זו כוללת בתוכה את כל מגוון המכשירים הצורכים אנרגיה ושאינם שייכים לאחת ההגדרות הקודמות. בקבוצה זו נכללים מכשירים לבנים גדולים כמו מקררים, מכונות כביסה, מדיחי כלים ותנורי בישול שהם זוללי אנרגיה. כמו כן קיימים מכשירי הטלוויזיה, מחשבים, ושאר מכשירי החשמל. לבסוף, קיימת צריכת אנרגיה "פריפריאלית" של מנורות ואמצעי חיווי קטנים כדוגמת לוחות מכוונים על גבי מכונות כביסה, מכשירי מיקרוגל וכד', בזמן שאלה אינם נמצאים בשימוש. הקבוצה האחרונה מהווה כ-5% מסך צריכת האנרגיה המשפחתית בישראל, כמופיע בטבלה 1.

צריכת אנרגיה לאקלום, לחימום מים ולתאורה הם מושא עיקרי בתקינה ובחקר צריכת אנרגיה במבנים, הן כיוון שהם אחראיים על חלק גדול מסך כל צריכת האנרגיה במגורים והן כיוון שעל

¹⁴ טרילינק, א. The Marker. הממשלה החליטה עבורכם: תחליפו נורות - ותחסכו בחשמל. <http://www.themarker.com/dynamo/energy/1.1609559>

מרכיבים אלה יכולים הרגולטורים והמתכננים להשפיע באמצעות חוקי בנייה ותקנים, או על ידי תכנון מודע אקלים ואנרגיה. למתכננים, יש יכולת השפעה מכרעת על התכונות הפיזיות של הבניין (הפנייתו, גודל החלונות בו, בידוד הקירות וכו'). לתכונות הפיזיות הנ"ל יש יכולת לשפר את רמת הנוחות התרמית ואת רמות התאורה בבניין כך שלא יצריכו שימוש באמצעים מכניים. לעומת זאת, יכולת ההשפעה של הרגולטור והמתכננים על מספר מכשירי החשמל הביתיים או על אופן השימוש בהם מצומצמת, אם כי הרגולטור יכול לקבוע הגבלות על איכות המכשירים (כגון דירוג אנרגטי מינימלי, החלפת מכשירים ישנים וכדומה).

בבואנו לבחון את צריכת האנרגיה במבנים ולתכנן מודלים ל "מבנים מאופסי אנרגיה", יש לזכור כי המבנים עצמם אינם צורכים אנרגיה. המשתמשים במבנים – הם אלו הצורכים אנרגיה. המשתמשים הקבועים (דיירים במבני מגורים ועובדים במבני משרדים) והבאים להתארח – הם אלו האחראים על הפעלת מערכות האקלום, התאורה ויתר מכשירי החשמל לשם יצירת תנאים נוחים.

מוצר חשמלי ביתי	צריכת קוט"ש בשנה של המוצר	אחוז הצריכה של המוצר מסך חשבון החשמל השנתי
מזגנים	2,569	35%
מקררים	1,299	17%
חימום מים	848	12%
מכונות כביסה	647	9%
טלוויזיות	629	8%
תאורה	566	8%
מצב המתנה של מכשירים	409	5%
אחר	252	3%
מייבשים	197	2%
תנורים	116	1%
מדיחי כלים	83	1%
סה"כ	7,363 קוט"ש בשנה	100%

טבלה 15¹: הערכת מרכיבי השימוש בחשמל במשקי הבית בישראל

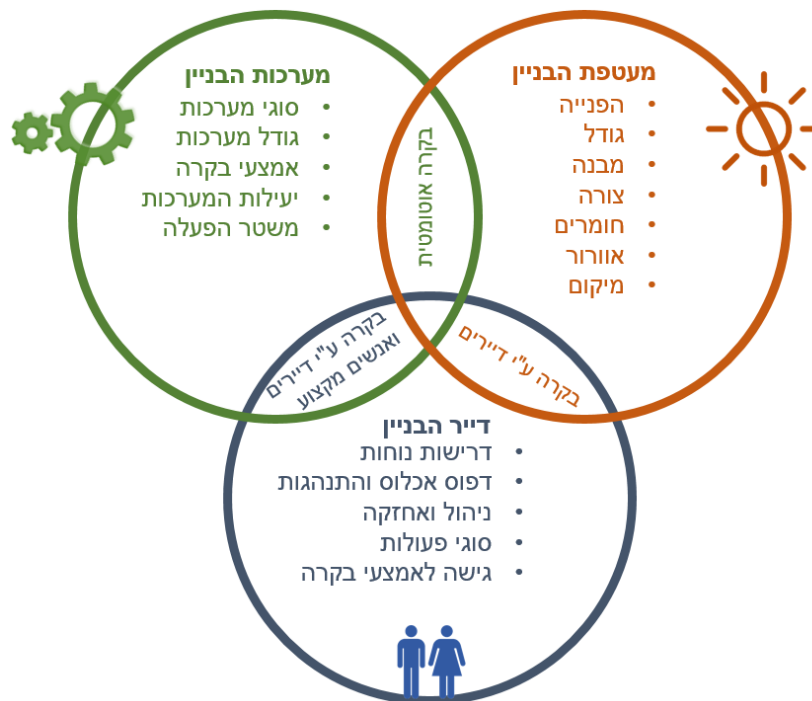
¹⁵ מקורות למידע: התוכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית (יולי, 2010) של משרד התשתיות הלאומיות המציינת כי צריכת האנרגיה השנתית לאקלום של משק בית הינה כ-40%, וכן נציגי התאחדות הקבלנים אשר מציינים כי צריכה זו מהווה כ-30% מסה"כ צריכת האנרגיה במשק הבית. (ריאיון עם זיו לזר, הכלכלן הראשי של התאחדות הקבלנים בדצמבר 2015)

2.1.2. צמצום צריכת אנרגיה במבנים

צריכת האנרגיה לאקלום ולתאורה במבנים תלויה בשלושה גורמים עיקריים: מעטפת הבניין - התפקוד הפאסיבי של הבניין (Performance) – תכנון נכון המשתמש באמצעים פאסיביים עשוי להביא לחיסכון משמעותי באנרגיה.

מערכות הבניין – סוגי המערכות לאקלום, לחימום מים ולתאורה, יעילותן וגודלן, וכן יכולת השליטה והבקרה בהן, הינם אלמנטים משמעותיים ביותר בצמצום צריכת האנרגיה במבנים, והם נגזרת של איכויות התפקוד הפאסיבי של הבניין.

הרגלי המשתמשים בבניין (דיירי הבניין) – למשתמשים שונים הרגלים שונים. אופן השימוש באמצעי האקלום משתנה בהתאם לגיל, מין, הרגלי לבוש, רמת הפעילות הגופנית ורמות השומן בגוף. כמו כן, הרגלים ישנים ומוכרים של המשתמשים (כגון פתיחת חלונות גם כשאמצעי מיזוג פועלים) הם אתגר לשינוי במבנים יעילים אנרגטית.



תרשים 5: הגורמים המשפיעים על צריכת האנרגיה הבניין¹⁶

¹⁶ אראל, א. שימור אנרגיה בבנייני מגורים בישראל. 2015. [http://energy.gov.il/subjects/energyconservation/ecexpert/documents/energy conservation in buildings ev06s.pdf](http://energy.gov.il/subjects/energyconservation/ecexpert/documents/energy%20conservation%20in%20buildings%20ev06s.pdf)

2.2. מבנים מאופסי אנרגיה – הגדרות

למונח "מבנה מאופסי אנרגיה" יש מספר הגדרות מקובלות בפרקטיקה העולמית. יתרה מכך, לאופן בו מוגדר המונח חשיבות רבה, שכן בהתאם להגדרה נגזרות החלטות אופרטיביות שונות. כפי שמתואר להלן, ההגדרות השונות מתבססות על מאפיינים שונים, והן מכילות מונחים מגוונים הנוגעים לצריכת אנרגיה במבנים. על כן, לפני פירוט ההגדרות לאיפוס אנרגטי במבנים (טבלה 2) – להלן ביאור מספר מינוחים:

אנרגיה נצרכת (Delivered Energy) היא כל סוג של אנרגיה אשר ניתנת לשימוש בבניין, כולל חשמל, גז, פחם, פחם, ביומסה וכו'.

אנרגיה ראשונית (Primary Energy) היא כלל האנרגיה הנמצאת בדלק הגולמי המשמש את רשת אספקת האנרגיה. לכל מקור דלקים, ולכל רשת לאספקת אנרגיה ישנם מקדמי המרה המגלמים בתוכם את כמות האנרגיה האובדת בתהליך הייצור וההפצה של האנרגיה, ונועדו לחישוב צריכת האנרגיה הכוללת בפועל.

אנרגיה ממקורות מתחדשים (Renewable Energy) היא אנרגיה המופקת ממקורות שאינם דלקים מאובניים, ובפרט – מקורות זמינים כמו אנרגיה סולארית, אנרגית רוח, אנרגיה הידרואולית המתחדשים כל הזמן.

אנרגיה מיוצאת (Exported Energy) היא אנרגיה ממקורות מתחדשים המיוצרת באתר (בתוך גבולות אתר המבנה), אשר מוזרמת חזרה לרשת אספקת האנרגיה (רשת החשמל בד"כ) וניתנת לשימוש באתרים אחרים.

הטבלה הבאה מציגה מגוון הגדרות הנפוצות למבנים מאופסי אנרגיה ותיאורם:

הגדרה	תיאור
מבנים מאופסי אנרגיית אתר נטו	במבנים אלו כמות האנרגיה הנצרכת מן הרשת, במאזן שנתי, מתאזנת עם כמות האנרגיה המתחדשת המיוצרת בהם או בסמיכות אליהם, וזאת מבלי לפגוע בתנאי הנוחות השוררים בהם¹⁷. <u>מאפיינים:</u> הגדרה זו תהיה בשימוש בעיקר על ידי מתכננים המעוניינים למקסם את הביצועים האנרגטיים של המבנה אותו הם מתכננים. מטרה זו תושג לרוב על ידי שימוש באמצעי תכנון פאסיביים ובטכנולוגיות המתאימות לייצור אנרגיה מתחדשת באתר, כגון: תאים פוטוולטאים על גג המבנה או על גגות חניונים, דודי שמש לחימום

¹⁷ Torcellini, P., Pless, S., Deru, M. & Crawley, D. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. ACEEE Summer Study Pacific Grove 15 (2006). doi:10.1016/S1471-0846(02)80045-2

מים או שבשבות רוח קטנות המתאימות להתקנה על גבי מבנים. <u>יתרונות:</u> הגדרה קלה להבנה. הנחות היסוד שמרניות יחסית, ויישום המסקנות מתמקד בשיפור הבניין ופחות בשיפור התשתיות החיצוניות. <u>חסרונות:</u> ההגדרה מתייחסת לאנרגיה בלבד. עלויות עקיפות לצריכת האנרגיה וכמות הזיהום הנפלט כתוצאה מצריכת האנרגיה אינן נלקחות בחשבון.	
מבנים מאופסי אנרגיה ראשונית נטו במבנים אלו כמות האנרגיה המתחדשת המיוצאת, שווה לכמות האנרגיה הראשונית הנצרכת בבניין במשך שנה (כולל איבודים הנובעים מייצור האנרגיה והעברתה מתחנת הכוח אל הבניין). חישוב זה כרוך בהכפלת ערכי צריכת האנרגיה במקדמי המרת אנרגיית מקור-אתר. <u>מאפיינים:</u> הגדרה זו תהיה בשימוש לרוב על ידי רשויות וגופים רגולטוריים – גופים בעלי זווית מבט מערכתית וכוללת. בנוסף לשימוש באסטרטגיות לאיפוס אנרגיית אתר, מבנים מאופסי אנרגיית מקור יחייבו בחינה של יעילות מערכות ייצור ואספקת האנרגיה – תחנות הכוח והרשת – על מנת להביא לאיבודים מינימאליים של אנרגיה במהלך ייצורה והעברתה מתחנת הכוח אל הבניין. <u>יתרונות:</u> הגדרה מדוייקת יותר (לוקחת בחשבון איבודי אנרגיה) המתאימה לחישובי צריכת ואספקת אנרגיה ברמה הלאומית. <u>חסרונות:</u> ההגדרה מתייחסת לאנרגיה בלבד. עלויות צריכת האנרגיה וכמות הזיהום הנפלט כתוצאה מצריכת האנרגיה אינן נלקחות בחשבון. שימוש בהגדרה זו מחייב פיתוח של מקדמי המרה בין האנרגיה הנצרכת לבין האנרגיה הראשונית.	
מבנים מאופסי עלות אנרגיה נטו במבנים אלו סכום הכסף עליו מזוכה בעל הנכס כתוצאה מייצור אנרגיה באתר והזרמתה חזרה לרשת שווה לפחות לעלות השנתית אותה משלם בעל הנכס על האנרגיה הנצרכת. הגדרה זו מחייבת פיתוח של מנגנון כלכלי וזיכוי כספי של ייצור אנרגיה עבור לקוחות פרטיים. <u>מאפיינים:</u> הגדרה זו תהיה בשימוש בעיקר על ידי לקוחות קטנים ובעלי נכסים אשר ידאגו בעיקר לעלות מינימאלית הנובעת מתפעול הבניין. כמו כן, הגדרה זו יכולה להיות בשימוש על ידי רשויות גופים רגולטיביים המבקשים לתמרץ לקוחות פרטיים לאמץ טכניקות להפחתה בצריכת האנרגיה ומעודדות שימוש בטכנולוגיות לייצור אנרגיה מתחדשת. <u>יתרונות:</u> הגדרה זו קלה למדידה וליישום. ניתנת לפיקוח על ידי מעקב אחר חשבונות האנרגיה. הגדרה זו מונעת מכוחות השוק ופועלת לרווחת הכלל. <u>חסרונות:</u> הגדרה זו מחייבת הסכם זיכוי בין ספקית האנרגיה לבין לקוחות פרטיים	

אשר מספקים כמויות קטנות, יחסית, של אנרגיה. כמו כן, ההגדרה רגישה מאוד לשינויים בתעריפי האנרגיה.	
מבנים מאופסי פליטות אנרגיה נטו (Net Zero Carbon Buildings) הם מבנים אשר בהם כמות הפחמן הדו חמצני הנחסכת (כתוצאה מייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים) שווה לפחות לכמות הפחמן הדו חמצני הנפלט כתוצאה מצריכת אנרגיה שמקורה בדלקים מאובנים. <u>מאפיינים:</u> הגדרה זו תהיה בשימוש בעיקר על ידי גופים סביבתיים, רגולטוריים או על ידי אנשים פרטיים אשר יבקשו להתמקד בהפחתת פליטות הפחמן הדו-חמצני. מבנים מאופסי פליטות אנרגיה יתמקדו בחיבור לרשתות אספקת אנרגיה בעלות פליטות מינימאליות (למשל, תחנות כוח הידרואליות, תחנות כח סולאריות, שבשבות רוח מחוץ לאתר וכו'). <u>יתרונות:</u> הגדרה זו מדויקת יותר מבחינת הערכת נזקים סביבתית. במידה ושינוי בתשתיות היא אופציה אפשרית (למשל, הקמת תחנות כוח המתבססות על אנרגיות מתחדשות) – קל יחסית להגיע לאיפוס פליטות. <u>חסרונות:</u> שימוש בהגדרה זו מחייב פיתוח של מקדמי המרה מדויקים בין ייצור יחידת אנרגיה וכמות הפליטות הנובעות כתוצאה מייצור זה.	

טבלה 2: הגדרת מבנים מאופסי אנרגיה

תרשים 5 מסכם את ההגדרות השונות למונח "מבנה מאופס אנרגיה":



תרשים 6: סיכום הגדרות המונח "מבנה מאופס אנרגיה"

ההגדרות המתוארות להלן הן מההגדרות הנפוצות ביותר במחקר ובפרקטיקה העולמית, העוסקת באיפוס אנרגיה במבנים, כיום. שתי ההגדרות הראשונות (מבנים מאופסי אנרגיית אתר נטו ומבנים מאופסי אנרגיה ראשונית נטו) הן ההגדרות הנפוצות ביותר בתכנון מבנים מאופסי אנרגיה ובמדיניות הקשורה במבנים מאופסי אנרגיה, אולם יש לציין כי בין כל ההגדרות הנ"ל אין בהכרח הגדרה "טובה יותר" מרעותה. לכל הגדרה יש יתרונות וחסרונות שכן הן תלויות פרויקט. על ההגדרה הנבחרת להתאים למטרות הפרויקט ולציפיותיהם של המתכננים והלקוחות.

2.3.2. אמצעי תכנון למבנים בעלי צריכת אנרגיה נמוכה

בעבר, בהיעדר אמצעים טכנולוגיים מתקדמים לאקלום (כדוגמת המזגן), התאמת התכנון לתנאי האקלים המקומי (תכנון פאסיבי) וניצול משאבי הטבע בקרבת האתר היו מחוייבי המציאות. דוגמאות לכך קיימות בבנייה ורנקולרית בה המבנים מבודדים בחומרים פשוטים כגון קש או בוך, או למשל בבנייה ים-תיכונית מקומית אשר עשתה שימוש בחומרים בעלי מסה תרמית גבוהה, בהצללות ובאזור טבעי.

פיתוחים טכנולוגיים שונים, כדוגמת הנורה החשמלית או המזגן החשמלי, "שיחררו" את המתכננים מהתלות המחייבת בתנאי הסביבה. בהתאם לכך, נוצרה קרקע חדשה למבנים הנבנים ללא התייחסות לאקלים ולסביבה בה הם נמצאים. מצב זה הוביל למציאות בה ניתן למצוא מבנים דומים הניצבים בסביבות אקלימיות הפוכות לחלוטין.

כיום, בבואנו לתכנן מבנים יעילים אנרגטית, ויתרה מכך, מבנים מאופסי אנרגיה, אנו מסתמכים על שלוש קטגוריות תכנוניות עקרוניות: אמצעים פאסיביים, אמצעים אקטיביים יעילים ואמצעים לייצור אנרגיה מתחדשת.

2.3.1. אמצעים פאסיביים

אמצעי תכנון אשר אינם דורשים כל פעולה המצריכה השקעת אנרגיה בכדי לייצר נוחות אקלימית בתוך הבניין. אמצעים אלה הם לרוב אמצעים מבניים המתייחסים לאקלים ולסביבה בה בנוי הבניין. ביניהם:

- הפניית הבניין וארגון החללים הפנימיים לאוריינטציה אופטימלית
- יחס הקומפקטיות (צמצום שטח המעטפת ביחס לנפח החלל)
- התקנת אמצעי הצללה
- שימוש במסה תרמית
- אוורור וקירור פאסיביים (אוורור מפולש, אפקט הארובה)
- תכנון נכון של מעטפת הבניין (יחס חלון – קיר)
- התקנת בידוד
- איטום (מניעת זליגת אויר מתוך הבניין)
- הימנעות מגשרים תרמיים

2.3.2. אמצעים אקטיביים יעילים

אמצעי מיזוג ואוורור אשר מייצרים, באופן מלאכותי, סביבה בעלת נוחות תרמית. השימוש באמצעים אלה כרוך בצריכה של אנרגיה, לרוב על ידי שריפה של דלקים מאובניים. בחירה נכונה של מכשירים בעלי יעילות גבוהה יכולה להביא לצמצום צריכת האנרגיה ולהפחתה בפוטנציאל הפגיעה בסביבה. כיום ישנם מגוון של אמצעים אקטיביים יעילים ליצירת נוחות תרמית וביניהם ניתן למצוא:

א. מערכת בקרת אנרגיה במבנים (BEMS - Building Energy Management System)

מערכות בקרת אנרגיה במבנים הן מערכות ממוחשבות השולטות באלמנטים השונים בבניין הקשורים לניהול ולצריכת האנרגיה בו, למשל: מערכת מיזוג אויר, מערכות תאורה, פתיחת וסגירת חלונות, שליטה במערכות הצללה וכו'. מערכות אלו מורכבות ממחשב מרכזי בעל יכולות בקרה, ניטור ומעקב המאפשרות שליטה (ידנית או אוטומטית) במרכיבי הבניין השונים לצורך שיפור ביצועיו האנרגטיים.

חיישנים מכאניים ודיגיטליים מנטרים את תנאי האקלים בבניין (טמפרטורה, לחות, תאורה וכו') ושולחים את הנתונים למערכת המחשוב הראשית המעבדת אותם, ושולחת הוראות מתאימות לחיישני הפעלה שונים¹⁸.

עד לאחרונה, היו מערכות BEMS נפוצות יותר לשימוש בקרב מבנים וקומפלקסים גדולים בעלי מערכות אקלים מורכבות. אולם בשנים האחרונות, שיפורים טכנולוגיים הקשורים לאמצעי חישה (סנסורים) ולתקשורת בין המרכיבים השונים במערכת ולמהירות החישוב (למשל היכולת לשלוט במערכת דרך מכשירים סלולריים), הנגישו את מערכת ה-BEMS גם ללקוחות פרטיים בעלי מבנים קטנים.

מספר מחקרים שנערכו במבני משרדים בהם הותקנו מערכות BEMS העלו כי במקרים רבים שליטתן של מערכות בקרה יקרות אשר הותקנו בבניינים שונים בוטלו ע"י המשתמשים לאחר תקופה קצרה של שימוש, בין השאר בגלל הסרבול והקושי בתפעול המערכת. בנוסף, מחקרים אלו העלו כי עובדים רבים מביעים חוסר שביעות רצון מכך שמערכת ממוחשבת היא זו ששולטת במרכיבים השונים בבניין (כמו למשל בפתיחת החלונות או בהדלקת וכיבוי המזגן), וצינו כי אובדן השליטה על המרחב הביא לתסכול רב¹⁹.

ב. מערכת לשחזור חום (MVHR – Mechanical Ventilation Heat Recovery)

ה-MVHR (קרויה גם HRV, Heat Recovery Ventilation) היא מערכת אוורור אשר משתמשת בטמפרטורה של האוויר הקיים בתוך הבניין בכדי למתן את הטמפרטורה של האוויר המוזרם אליו פנימה, ובכך חוסכת המערכת כמות גדולה של אנרגיה.

בבסיס המערכת עומד השימוש במחליף חום: חלל ובו מערכת לוחות מתכת מחוררים (או כל תצורת חומר המסוגל לקלוט ולהעביר חום מאוויר הנע דרכו במהירות). ברגע ששני זרמי אוויר בטמפרטורות שונות (באקלים הישראלי החם רוב השנה, אוויר חם מגיע מבחוץ ואוויר קריר יותר מגיע מבפנים)²⁰ פוגעים בלוח החומר המוליך את החום מצידי השונים, מגיע הלוח לטמפרטורת ביניים - בין הטמפרטורה של האוויר החם לזו של האוויר הקר. כך קורה שהאוויר החם שנכנס מחוץ למבנה פוגע בפלטה הקרירה ומתקרר. בצורה כזו ניתן להמשיך ולקרר את האוויר הנכנס עד לטמפרטורה הרצויה

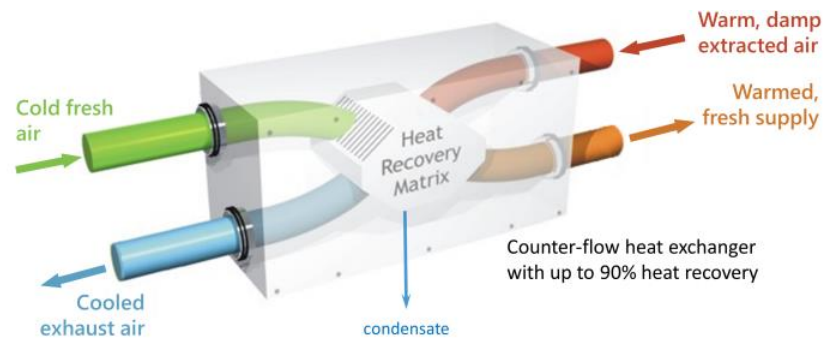
Ener-G. Building Energy Management Systems FAQs. 29–32 (2013). at <http://www.ener-g-group.com/ener-g-controls/information-centre/news/2013/08/building-energy-management-systems-faqs/>

Bordass, B., Bromley, K. & Leaman, a. User and Occupant Controls in Office Buildings. Int. Conf. Build. Des. Technol. Occupant Well-being Temp. Clim. 12–15 (1993).

20 ההסבר המובא מציג דוגמא בסיסית. בשימוש במערכות שיחזור חום באזורים שונים בישראל יש להתחשב בלחות השכיחה באזורים הללו.

ע"י שימוש בטכנולוגיות מיזוג רגילות, אולם בינתיים נרשם "רווח" של קור, בהשקעה מכאנית מצומצמת ביותר.

השימוש ב-MVHR מעלה מאוד את היעילות של מערכת המיזוג, והטכנולוגיה נמצאת בשימוש נרחב בתקנים להתייעלות אנרגטית, ובאופן ייחודי בתקן להתייעלות אנרגטית המחמיר ²¹PassivHaus.



תרשים 7: עקרון הפעולה של מערכת לשחזור חום (מקור: <http://www.thermsaver.co.uk/mvhr/what-is-> /mvhr)

ג. משאבת חום קרקע (Ground Source Heat Pump)

משאבות חום קרקע הן מערכות הנעזרות בטמפרטורה היציבה יחסית של הקרקע על מנת למזג חללים שונים במבנים.

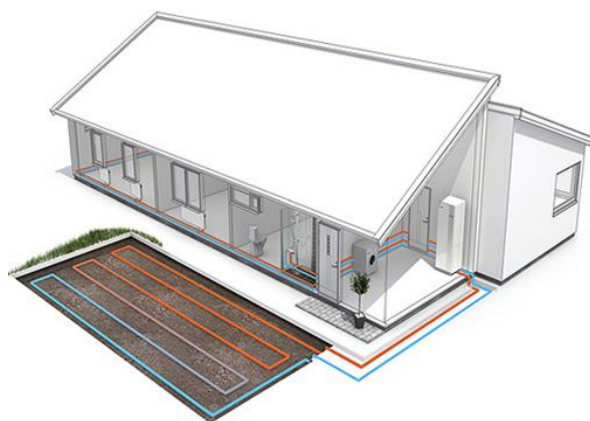
בגלל המסה התרמית של הקרקע, תנודתיות הטמפרטורה שלה פחותה מזו של טמפרטורת האוויר, ובעומק של כ-1 מ', טמפרטורת הקרקע נעה סביב 15°C - 18°C . ככל שהולכים ומעמיקים אל פנים הקרקע – הטמפרטורה בה יציבה יותר. משאבות חום גיאותרמיות עושות שימוש בצינורות סליליים העשויים מחומרים מוליכי חום אשר מוטמנים בתוך הקרקע במעגל סגור (מתוך ואל תוך הבניין). בגלל מוליכותם הגבוהה, טמפרטורת הצינורות משתווה לטמפרטורת הקרקע העוטפת אותן²². דרך הצינורות הסליליים מזרימה המערכת תערובת של נוזלים בטמפרטורת האוויר (באקלים הישראלי החם – יהיה זה נוזל בטמפרטורה גבוהה). כאשר תערובת הנוזלים באה במגע עם הצינורות במעמקי האדמה – היא מתקררת והטמפרטורה שלה משתווה לטמפרטורת הקרקע. לאחר מכן, זורם הנוזל הקריר בחזרה אל תוך המשאבה, ונעשה בו שימוש לקירור האוויר באותו אופן בו מקרר מזגן רגיל את האוויר.

ישנן שתי שיטות להטמנת הצינורות בקרקע – הטמנה אופקית או קידוח אנכי. השיטות השונות נבדלות באיכות, ביעילות ובעלות. ככלל – מערכות אופקיות מתאימות יותר למבנים קטנים בעלי שטח

²¹ לפרטים נוספים, אתר ה-Passive house institute: http://www.passivehouse.com/02_informations/01_what_is_a_passive_house/01_what_is_a_passive_house.htm

²² LTD, P. Ground Source Heat Pumps. at <<http://www.pecs-ltd.co.uk/ground-source-heat-pumps/>>

קרקע פנוי בסמיכות, ואילו המערכות האנכיות היקרות יותר מתאימות למבנים גדולים באזורים בהם אין שטחים פתוחים רבים (מרכזי ערים צפופים בעיקר).



תרשים 8: עקרון הפעולה של Ground Source Heat Pump (מקור:

[/http://www.andersonfloorwarming.co.uk/heating/heat-pumps/ground-source-heat-pumps](http://www.andersonfloorwarming.co.uk/heating/heat-pumps/ground-source-heat-pumps))

2.3.3. אמצעים לייצור אנרגיה מתחדשת

על מנת לספק את האנרגיה הדרושה להפעלת האמצעים האקטיביים, יש אפשרות להשתמש בטכנולוגיות המסוגלות לרתום תהליכים בלתי מתכלים מן הטבע לטובת ייצור אנרגיה. בין אמצעים אלה ניתן למצוא למשל:

• תאים פוטוולטאים (PV)

• אנרגיה סולרית-תרמית (לחימום מים)

• שבשבות רוח

• אנרגיית מים (גאות ושפל)

• אנרגיה גיאותרמית

• טכנולוגיות לאגירת אנרגיה

לטכנולוגיות אלו אופן פעולה שונה:

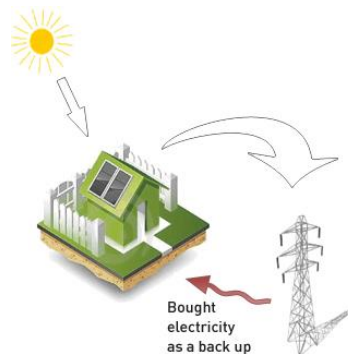
א. פאנלים פוטוולטאים

פאנלים פוטוולטאים מורכבים מתאים סולאריים קטנים. תאים אלה מכילים חומרים מוליכים למחצה (סוג של סיליקון) הממירים את אנרגיית השמש לאנרגיה חשמלית בעת חשיפה לקרינה ישירה²³. פאנלים אלו יכולים להיות מותקנים הן על גבי גגות מבנים והן בשטחים פתוחים המהווים "שדות סולאריים", או "תחנות כח סולאריות".

²³ רונן, י. ייצור חשמל מאנרגיה חלופית בישראל. 2007.

יעילותן של המערכות הפוטוולטאיות תלויה במספר גורמים סביבתיים כגון עוצמת הקרינה או הטמפרטורה של הקולטנים. בעוד רמות הקרינה הממוצעת של השמש היא כ-1,000 וואט/מ"ר, המערכות הסולאריות הבסיסיות מגיעות לנצילות ברמה של כ-10% בלבד מקרינה זו (כלומר, רק 10% מאנרגיית השמש מומרות לחשמל). עם התפתחות הטכנולוגיה, מערכות סולאריות מתקדמות יותר הן בעלות יעילות של כ-20%, ופיתוחים עתידיים אף מצביעים על נצילות תיאורטית של כ-50% מאנרגיית השמש²⁴.

ישנן שתי שיטות להפעלת מערכת פוטוולטאית: מערכת פוטוולטאית עצמאית שאינה מחוברת לרשת החשמל, וכזו המחוברת אליה. המערכת העצמאית מותקנת בד"כ במקומות מבודדים ומרוחקים בהם אין תשתית לאספקת חשמל קונבנציונאלית. מערכת זו בד"כ נעזרת במצברים לאגירת החשמל במהלך היום ומאפשרת שימוש בו בשעות הלילה. המערכת המחוברת לרשת החשמל, לעומת זאת, מזינה את הרשת בעודפי חשמל, כאשר הייצור בה גובר על הצריכה. במידה והמצב מתהפך – רשת החשמל הקונבנציונלית משלימה את פערי הצריכה. שימוש במערכת שכזו מחייב היערכות של תשתיות החשמל לקבלת חשמל מצרכנים קטנים וזיקויים בעת הצורך באמצעות מונה מיוחד



תרשים 9: עקרון הפעולה של הזרמת חשמל חזרה לגריד ושימוש בחשמל מהגריד בעת הצורך²⁵

בשנים האחרונות החלה מגמה של ירידה משמעותית במחירי המערכות הפוטוולטאיות. מאז 2008 ירדו מחירים של פאנלים סולאריים בכ-80%, בין השאר בגלל הייצור רחב ההיקף בסין. הציפייה היא שכתוצאה מירידת המחירים ושיפור הטכנולוגיה, יגדל הביקוש לפאנלים פוטוולטאים הן על גגות מבנים והן בחוות ייצור יעודיות. כתוצאה מכך רשת החשמל עתידה להישען על כמות גדולה יותר של אנרגיה המיוצרת במתקנים סולאריים והדרישה לנצילותם ואמינותם תגדל.

ב. שבשבות רוח

שבשבות הרוח פועלות על עקרון ההמרה של תנועת האוויר (הרוח) לכדי אנרגיה מכאנית (תנועת הסיבוב של שבשבת הרוח), והפיכתה של זו לאנרגיה חשמלית ע"י גנרטור המותקן לציר השבשבת. שיטת הפקת אנרגיה זו אינה מזהמת, אולם היא דורשת אחזקה תכופה יחסית.

²⁴ 'הידען', ע. ד. א. קוונטים במימד הננומטרי <http://www.hayadan.org.il/nanometric-quantum-dot> at <150712>

²⁵ מבוטס על: <http://www.solarshffield.co.uk/what-is-the-feed-in-tariff.html>

שבשבות הרוח אינן מתאימות לשימוש בתנאים אורבניים, ובאופן אידיאלי יש לבנות שדות של טורבינות באזורים פתוחים וחשופים לרוח חזקה המיועדים לכך. בישראל, מסיבות גיאוגרפיות וטופוגרפיות, הפוטנציאל של ניצול אנרגיית רוח להפקת חשמל אינו גדול (600-700 מגה-ואט בשנה בלבד²⁶), ועל כן מספר קטן בלבד של טורבינות רוח פועלות ברמת הגולן.

ג. טכנולוגיות לאגירת אנרגיה

במקרים בהם מדובר על ייצור אנרגיה במקומות מבודדים או עצמאיים שאינם מחוברים לרשת החשמל, יש אפשרות לאגור את האנרגיה העודפת ולהשתמש בה בזמנים בהם אין אפשרות להפיק אנרגיה, כמו למשל בשעות החשכה במקרה של תאים פוטוולטאים, או בהעדר רוח במקרה של שבשבות. אגירת אנרגיה יכולה לאפשר ליצרניה להשתמש בה בשעה שהם מבקשים לעשות זאת, ללא קשר לזמן הייצור, בין אם האגירה היא מן היום ללילה, מיום חול לשבת, או מיום שמש ליום גשם.

רוב הטכנולוגיות המצויות כיום לאגירת אנרגיה מבוססות על הטענה של סוללות מסוגים שונים הפועלות על העיקרון של המרת אנרגיה חשמלית לאנרגיה כימית, ובחזרה לאנרגיה חשמלית בעת הצורך (על עיקרון זה עובדת גם סוללת "טסלה" אשר השקתה האחרונה עוררה תהודה רבה²⁷). מובן כי על מנת לאגור כמות אנרגיה רבה, כזו שתוכל לספק חשמל ליחידות מגורים רבות, יש צורך בסוללות גדולות מאוד ומשוכללות ביותר. ואכן, לצד השיפור הטכנולוגי בייצור סוללות, ישנם פיתוחים והצעות לסוללות בגודל של חדר או אפילו בית, אשר יאפשרו אחסון ואספקה של אנרגיה למספר רב של משתמשים. החיסרון העיקרי בסוללות מסוג כזה הוא מחירן היקר והאופי המזהם שלהן (הכימיקלים הרעילים בהן מצריכים טיפול ואחזקה שוטפים).

פיתוח מעניין בתחום זה הוא ה"סוללה הקינטית", אשר מציעה המרה של אנרגיה חשמלית לאנרגיה קינטית (סיבוב של גלגל תנופה המסוגל לשמור על מהירות סיבוב גבוהה), והמרת האנרגיה הקינטית בחזרה לחשמל בעת הצורך²⁸. פיתוחים לסוללות חדשניות מסוג זה נמצאים בשלבים ראשוניים ביותר ויעילותן עדיין לא הוכחה.

לסיכום, בתכנון מבנים מאופסי אנרגיה יש לרתום את שלושת העקרונות המצויינים לעיל: התכנון הפאסיבי והתייעלות המערכות האקטיביות על מנת להגיע לתכנון מיטבי ולרמות חסכון מקסימאליות ולבסוף, ייצור אנרגייה מתחדשת המשלימה את דרישת האנרגיה במבנה לכדי איפוס.

²⁶ רובס, נ. חסמים רגולטוריים במשק האנרגיה החלופית. 2008 .

<http://www.mifellows.org/research/HEB_F/29-HB-F.pdf>

²⁷ אביטל, י. הסוללה שחשפה טסלה עשויה בהחלט לשנות את העולם-tesla-launches-tesla-energy/>

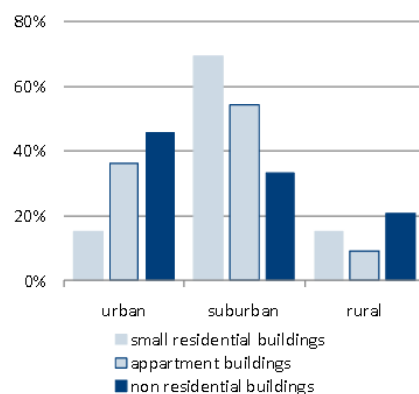
²⁸ Gu, W. et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 54, 26–37 (2014).

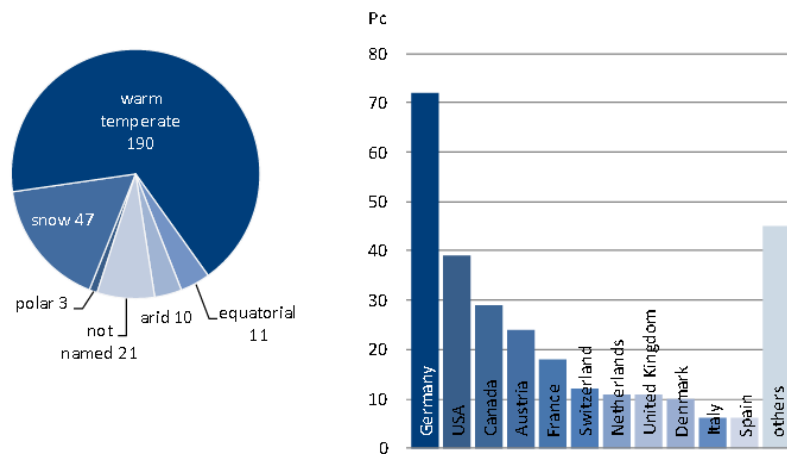
2.4. מגורים מאופסי אנרגיה - מקרי מבחן מהעולם

פרק זה סוקר מספר דוגמאות מרכזיות של מבני מגורים מאופסי אנרגיה מרחבי העולם, מהם ניתן ללמוד על ההזדמנויות והכשלים בתכנון מבנים מסוגם. הסקירה מתמקדת הן במבני מגורים צמודי קרקע והן במבני מגורים רבי קומות. באופן כללי, תכנון ובנייה של מבנים מאופסי אנרגיה בעולם נמצא לאחר שלבי בדיקת ההיתכנות והוכחת הקונספט. למעשה, מבנים מאופסי אנרגיה בעולם, היא פרקטיקה הנמצאת במגמת עלייה מתמדת בשנים האחרונות. המבנה מאופס האנרגיה המודרני הראשון נבנה, ככל הנראה, ב-1992 בפרייבורג, גרמניה. המבנה תוכנן על ידי ה-Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems כמבנה עצמאי (self sufficient), ללא חיבור לרשת האנרגיה הקונבנציונלית. כלומר, מבנה זה היה מסוגל לספק לעצמו את כל צרכי האנרגיה הנחוצים לו לאורך כל השנה. בין 1992 ל-1995 אוכלס המבנה ע"י משפחה בת שלוש נפשות (זוג הורים וילד), והדגים כי גם בתנאי האקלים הקר במרכז אירופה, עם קרינת השמש חלשה יחסית, ניתן ליישם תכנון לאיפוס אנרגטי.

כאמור, בשנים האחרונות חלה עלייה חדה במספר המבנים מאופסי האנרגיה שנבנו ברחבי העולם. מחקר עולמי מקיף שנערך ב-2010 סקר למעלה מ-200 מבנים אשר תוכננו ונבנו כמבנים מאופסי אנרגיה²⁶. מחקר זה סיווג את המבנים לפי תכונתם המרכזית: מבנים צמודי קרקע, מבני דירות, או מבני ציבור והראה כי רובם נבנו במרכז ודרום אירופה, או בצפון אמריקה באזורים עם אקלים נוח יחסית, ובאזורים בעלי חוסן כלכלי וטכנולוגי. המחקר הראה גם כי רוב מבני המגורים מאופסי האנרגיה נבנו באזורים פרבריים המיושבים בצפיפות בינונית, ולא במרכזי הערים או בישובים כפריים מרוחקים (תרשימים 9-10).

תרשים 10: מספר המבנים מאופסי האנרגיה בפילוח המדינות (משמאל) והאקלים (מימין) בהם תכננו²⁹.





בנוסף, הארגון האמריקאי New Building Institute עוקב בשנים האחרונות אחר התפתחותם של מבנים מאופסי אנרגיה בארה"ב. לפי רשימה שפרסם הארגון בשנת 2015 קיימים בארה"ב 39 מבנים אשר נמדדו ואומתו כמאופסי אנרגיה (בהתאם להגדרה האמריקאית אשר מתוארת בפרק 5.2.1), ועוד 153 מבנים אשר תוכננו בהתאם בשאיפה להיות מאופסי אנרגיה, אך טרם אומתו ככאלה. הסיבה המרכזית הינה שמבנים אלו עדיין אינם מאוכלסים במשך שנה של מדידה, חלקם טרם אוכלסו, חלקם דורשים שיפורים בביצועים האנרגטיים. רוב מבני המגורים ברשימת הפרויקטים נמצאים בקטגורית המבנים החדשים יותר, שחובת ההוכחה עדיין חלה עליהם (New Building Institute, 2015)

2.4.1. מגורים צמודי קרקע ומאופסי אנרגיה

מסקירת הדוגמאות העולמית של מבני מגורים מאופסי אנרגיה, ניתן להתרשם כי מספרם של מבני מגורים צמודי קרקע ומאופסי אנרגיה גבוהה משמעותית ממספרם של מבני דירות. בין היתר, הסיבות לכך הן שבתחילת הדרך, ניתן היה להגיע לאיפוס במבנים פרטיים צמודי-קרקע באופן יחסי בקלות רבה יותר, הן מבחינה טכנולוגית והן מבחינה כלכלית. לפיכך, הדוגמאות המוקדמות מתייחסות לצמודי קרקע, ולאחריהן החל שוק הבנייה למגורים להציג דוגמאות מורכבות יותר של מבני דירות. יש לציין שקיימות דוגמאות רבות למבנים שתוכננו ונבנו באסטרטגיות ראויות המאפשרות להם לשאוף ויתכן שלהגיע לאיפוס אנרגטי. בסקירת מקרי המבחן שלהלן התייחסנו למבנים אשר מימוש פוטנציאל האיפוס האנרגטי אומת ע"י ניטור צריכת האנרגיה בפועל.

- The Zero Energy House

מבנה מאופס אנרגיה באוקלנד, ניו-זילנד, צמוד קרקע בן כ-400 מ"ר שתי קומות, אשר בו השימוש באסטרטגיות פאסיביות הוביל לצריכת אנרגיה שנתית העומדת על כ-6 קוט"ש/שנה בלבד (או כ-2,400 קוט"ש/שנה, כרבע מצריכת האנרגיה האופיינית לבתים באוקלנד. המבנה אינו מחובר למערכת החשמל הארצית, אשר מספק לעצמו את כל האנרגיה הנחוצה לו. מערכת ייצור האנרגיה

בבניין הינה תאים פוטוולטאיים המייצרים כ- 5,400 קוט"ש\שנה, ולמעשה מייצרים יותר אנרגיה מכפי שהבניין צורך. האסטרטגיות הפסיביות בתכנון הבניין (מערכת בידוד אפקטיבית ללא גשרים תרמיים, גודל פתחים מבוזר, חלונות מבודדים, הפניית החללים אל השמש בהתאם לשימוש בהם) הובילו לחיסכון אנרגטי של כ 30%. בנוסף להן, בעת הבנייה הותקנה מערכת בקרה חכמה (BEMS). מערכת זו מנטרת ומנתחת את ביצועי הבניין, מציגה לבעלי הבית את נתוני צריכת האנרגיה בכל רגע נתון ומעניקה להם שליטה מהירה ונוחה על מערכות הבניין (חלונות, מערכות תאורה וכו'), כל זאת על ידי שימוש בטלפון הסלולרי. הנגישות והנוחות מאפשרות שליטה מלאה בבניין ובקרה מלאה על צריכת האנרגיה בו.



תרשים 12: מבנה מאופס אנרגיה באוקלנד, ניו-זילנד

Zero Energy Home



תרשים 13: מבנה מאופס אנרגיה בדנוור, קולורדו. משמאל, מערכת קיר כפולה (חיצונית ופנימית) עם מרווח המיועד לבידוד. הבידוד בין שני חלקי הקיר מונע את הגשרים התרמיים.

מבנה צמוד קרקע מאופס אנרגיה בדנוור, קולורדו, בן כ 120 מ"ר ושלושה חדרי שינה, אשר הוצג ותוכן ב-2005 במסגרת מחקרית על ידי (NREL, National Renewable Energy Laboratory), גוף האמון על מחקר של טכנולוגיות לאנרגיה מתחדשת. מטרת המחקר הייתה להראות כי ניתן להשיג איפוס אנרגטי גם באמצעים ובתקציב סטנדרטיים למדי. לצורך כך נעשה שימוש ברכיבי מדף ובשיטת בנייה סטנדרטית, אך בתכנון וביצוע מוקפדים. כמו כן, יש לציין שהמבנה נבנה על ידי ארגון דיור בר השגה (Habitat for humanity) אשר מתבסס בין היתר על מענקים ממשלתיים, כוח עבודה

של מתנדבים וחסויות תעשייתיים וספקים התורמים חומרי בנייה. בחינת עלות התועלת בהשקעה הנוספת בבניית הבית נעשתה באמצעות מערכת BEOpt לפי עלויות בנייה אמיתיות ללא קשר לעלות בפועל של הפרויקט. זוהי מערכת חינמית שפותחה ע"י משרד האנרגיה האמריקאי כמחשבון עלויות בנייה לפי מדד ההתייעלות האנרגטית הצפויה. (Norton, 2008).

בעת בנייתו של הבית, הותקנו בו מכשירי מדידה לניטור ולמעקב אחר צריכת האנרגיה. מעקב זה העיד על היותו מעל ומעבר למאופס אנרגיה. למעשה, בשנה הראשונה והשנייה לאכלוסו ייצר הבניין כ- 124% וכ-112% אנרגיה (בהתאמה) לעומת צריכת האנרגיה בו בפועל.

המחקר אף הראה כי השגת יעדי איפוס האנרגיה תלוי באופן ישיר בהתנהגות הדיירים ובאופן בו הם משתמשים בבניין. לכן, הוסק כי יכולת חיזוי צריכת האנרגיה הריאלית במבנה טומנת בחובה אי-ודאות, בשל ההתנהגות הבלתי צפויה של הדיירים. לבסוף, הבהיר המחקר כי איפוס אנרגטי אינו בהכרח מבטיח את איפוסם של חשבונות אנרגיה, ומדגיש את התלות בתכנית התעריפים והזיכויים המקומית, וכן בחיובים החודשיים הקבועים אותם משלמים הדיירים דרך קבע.

עלות הבנייה הסתכמה בתוספת של כ 8% לעומת תקציב סטנדרטי למבנה דומה. שיפורי המבנה ובחירת המערכות אפשרו התייעלות אנרגטית של כ 60% לעומת בית סטנדרטי. שיפורי המעטפת כללו: קירות משופרי בידוד בעלי ערך כולל של $R=40$ ללא גשרים תרמיים, באמצעות מערכת קיר כפולה (חיצונית ופנימית) עם מרווח המיועד לבידוד. הגג, מבודד אף יותר, $R=60$ ורצפת מסד בעלת התנגדות תרמית כוללת $R=30$. לבית מערכת אוורור עם יכולת החלפת חום וניטרול לחות (ERV, Energy Recovery Ventilator). (מידות R מתייחסות ל $h\ ft^2\ F/Btu$)

Josephine Commons Project



תרשים 14: פרויקט ג'וזפין בלה-פאייט, קולורדו. שני סוגי מבנים. חימום מים תת קרקעי במעגל בנוסף לאסטרטגיות פסיביות אחרות.

פרוייקט ג'וזפין בלה-פאייט, קולורדו²⁹, הוא מתחם בעל 153 בתים צמודי קרקע. תכנון הפרוייקט התנהל ב-2009 בשיתוף פעולה בין גורמים פרטיים, ציבוריים ומחקריים, ובמהלכו הועלתה ההצעה לבחון את הקמתם של שני מבנים מאופסי אנרגיה, בית פרטי ובניין דופלקס, כמקרי בוחן. מטרת הבחינה הייתה להגיע לאיפוס אנרגטי תוך שמירה על תקציב מינימאלי, ובחינת יעילותן של מערכות החימום ומערכות ייצור האנרגיה השונות.

בנוסף לשילוב אסטרטגיות תכנוניות פאסיביות והתקנת מערכות מתקדמות (שטח מעטפת נמוך, חלונות דרומיים גדולים, התקנת תאים פוטולטאים, דודי שמש וכו'), שולבו במבנים גם מערכות אוטומטיות לאורור טבעי (BEMS): חיישני טמפרטורה הוצבו בחללים שונים בבניין, ובעת הצורך (ובמידה והטמפרטורה בחוץ אפשרה זאת) – חלונות הבתים נפתחו על מנת לספק אורור וקירור אופטימאליים לדיירים. שני המבנים נבנו בשיטה טרומית, זאת בכדי להוזיל את עלויות הבנייה במידה ויוחלט לשכפל אותם.

המחקר הראה כי יש חשיבות רבה לבניית מבני פיילוט שכן לאחר הקמת מבני הפיילוט התגלו מספר בעיות לא צפויות והתכנון עודכן בהתאם. למשל: מערכת האורור הטבעי האוטומטית לא עבדה כראוי בגלל תפעול לקוי של דיירי הבית. בעיות טכניות בדודי השמש צפו ועלו, כמו גם הצללות עצמיות של תאים פוטולטאים, אשר הובילו לייצור אנרגיה נמוך מהצפוי. בנוסף, הצללות חיצוניות לא הוטמעו במלואן בשלב הבנייה, וטמפ' הפנים במבנה נמדדו גבוהות ויצרו עומס חום גבוה מן הרצוי.

לאחר ביצוע בפועל ומעקב אחר צריכת האנרגיה של שני מבנים לדוגמא, ההמלצות למעטפת המבנים במתחם כולו סוכמו לפי ערכי ההתנגדות הבאים: קירות, $R = 30 \text{ h-ft}^2 / ^\circ\text{F}$, והגג, $R = 60 \text{ h-ft}^2 / ^\circ\text{F}$. חלונות: $U\text{-value} = 0.28 \text{ Btu/hr-ft}^2$, $SHGC = 0.50$.

מגורים בבנייה רוויה (מבנים רבי-קומות)

מבני מגורים רבי-קומות מאופסי אנרגיה אינם נפוצים עדיין כמו המבנים צמודי הקרקע, ובכל זאת, מוצגות להלן מספר דוגמאות חשובות:

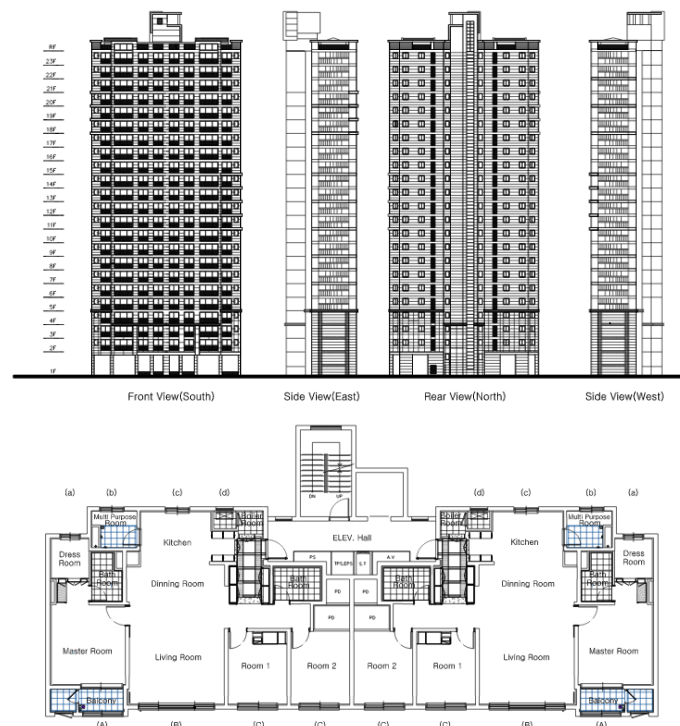
South Korea Zero Energy High-Rise Residential Buildings - הוא מחקר שנערך בדרום קוריאה³⁰, ובדק את היתכנות הקמתם של מבני מגורים רבי-קומות במדינה, בהתבסס על צריכת האנרגיה האמיתית של מבני מגורים חדשים. עורכי המחקר בחרו חמישה מתחמי דירות חדשות אשר נבנו ואוכלסו ב-2008, ובחנו את צריכת האנרגיה בהם (באמצעות מעקב אחר חשבונות החשמל והגז) במשך שנה שלמה. לאחר איסוף הנתונים במבני המגורים הנ"ל, הציג המחקר בניין "ממוצע" – בן 22 קומות ובו שתי דירות בכל קומה – אשר נתוני הצריכה בו הם הממוצעים של חמשת המבנים שנבחנו.

Dean, J. & VanGeet, O. Design and Evaluation of a Net Zero Energy Low-Income Residential Housing Development in Lafayette, Colorado. Natl. Renew. Energy Lab. 68 (2012). at <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51450.pdf>

Cho, S. & Kim, J. Zero Energy Potential of High-Rise Residential Buildings. 641–648 (2015).

בשלב הבא, חישוב עורכי המחקר את יכולת הפקת החשמל בבניין ע"י התקנת תאים פוטוולטאים (בעלי יעילות של בין 14%-17%) על פני משטחים שונים בבניין הממוצע (גג בלבד, גג + חזיתות שונות), וכן את אחוז הדירות והקומות מאופסי האנרגיה. תוצאות המחקר הראו כי בין 18-40% מהבניין הנבדק יכול להיות מאופס (בתלות בכמות התאים הפוטוולטאים ובשטח ההתקנה שהוקצה להם ע"ג המישורים השונים). כמו כן, המחקר הראה כי ליעילותם של התאים הפוטוולטאים השפעה מכרעת על היכולת להביא לאיפוס אנרגטי. יש לציין כי המבנים שנבחרו הם מבנים סטנדרטיים, כלומר, בתכנונם ובבנייתם לא שולבו טכניקות לצמצום צריכת האנרגיה, כך שפוטנציאל החיסכון האמיתי במבנים אלו הוא למעשה גדול יותר.

תרשים 15: תכנית וחזיתות המבנה הממוצע בדרום קוריאה.



³¹High-Rise Zero Energy Residential Buildings בחן את הקמתו של מבנה מגורים רב-קומות ומאופס אנרגיה בארבע ערים בעלות אקלים שונה ברחבי אירופה (ליסבון, שטוקהולם, כריתים וונציה). הבניין הנבדק הוא בניין מגורים בן שש קומות ובעל 24 יחידות דיור. תוצאות המחקר הראו כי המבנים שתוכננו בליסבון ובכריתים (אשר לשניהם אקלים דומה יחסית לישראל), הצליחו להגיע לאיפוס אנרגיה מלא, זאת לאחר התקנת תאים פוטוולטאים בעלי יעילות של 18% על גבי כ-75% משטח הגג של הבניין.

בנוסף, נבחנה במחקר גם הכדאיות הכלכלית של הקמת מבנים מאופסי אנרגיה, ונמצא כי ככל שגובה הזיכוי על ייצור חשמל עולה, הכדאיות הכלכלית להקמת מבנים יעילים מבחינה אנרגטית פוחתת. הסיבה לכך טמונה בכך שבתרחיש שכזה, עדיף ליזמים להשקיע בהתקנת תאים פוטוולטאים ולקבל

³¹ Kapsalaki, M. Economic - efficient design of residential net zero energy buildings with respect to local context. (University of Porto, 2012).

זיכוי כספי גבוה, במקום להשקיע בהתייעלות אנרגטית. המחקר מציין כי נקודה זו צריכה לקבל התייחסות על ידי חקיקה נכונה – חיוב של אמצעים מינימאליים ליעילות אנרגטית.

Z-Home



תרשים 16: Z-home, מתחם מגורים בווינגטון המוסמך לאיפוס אנרגטי ע"י Living Building Challenge

ממוקם בארה"ב, בעיר Issaquah, במדינת וושינגטון. Z-home הינו מתחם הכולל 10 דירות בנות שלושה מפלסים, אשר הוסמכו לתקן Living Building Challenge (להרחבה על הסמכה זו ראו סעיף 5.1.3 הסמכה בינלאומית לאיפוס אנרגטי) אוכלס בשנת 2010 ובנה בתקציב סטנדרטי אשר מומן בחלקו ע"י תקציבים ממשלתיים. בנוסף לשאיפה לאפס את המבנה מבחינה אנרגטית, עמדו אל מול מתכנני הפרויקט המדדים הבאים: יכולת ביצוע "נגישה" ויכולת שיכפול המבנה, עלות, עמידות, תחזוקה יכולת לרטרופיט עתידי ובריאות המשתמשים.

המבנה מציג אסטרטגיות בולטות בתכנון פאסיבי, מתוך מחשבה שהרכיבים היקרים בבנייה יהיו האלמנטים לייצור האנרגיה. יחד עם זאת, יעדי האמצעים הפסיביים במבנה תוכננו בהתאם לחישובי עלות תועלת, באמצעות מידול רב שלבי אשר כלל שילוב מבוקר ותיאום בין ביצועי הרכיבים המאפיינים מעטפת בנין משופרת, לבין העלות והחיסכון הצפויים באמצעות ייצור אנרגיה ע"י פנלים פוטוולטאים. האסטרטגיות המובילות הסתכמו בערך בידודי כולל של מעטפת בעלת קירות - $h\text{-ft}^2$ $R=38$ °F/Bt בידוד מילואה ובידוד חיצוני רציף, גגות $h\text{-ft}^2$ $R=60$ °F/Bt, וחלונות פיברגלס בעלי זיגוג כפול, low-e, בעלי ערך בידודי כולל של $U=0.30$ Btu/hr-ft², בדיקת אטימות המבנה בתום הביצוע הראתה 0.2 החלפות אוויר בשעה בלבד, וחימום מים באמצעות מערכת משותפת של מחליף חום תת קרקעי ומשאבת חום בקצה עבור כל אחת מן היחידות, חימום החלל באמצעות מערכת הולכת מים חמים בין רצפת הבטון וריצוף במבוק.

לכל דירה חיבור ישיר למערכת פוטוולטאית. בהתאם לגודל הדירות (בין חדר שינה אחד לשלושה), גודל המערכות נע בין 4.8 ל 6.96 Kwh המחברים למונה נטו. המערכת הפוטוולטאית תוכננה לענות גם על הצרכים המשותפים לתאורת החוץ של חצר המתחם ומשאבת הסחרור של מערכת הולכת המים התת קרקעית המשותפת לדירות.

עלות בניית המתחם (בפועל) הסתכמה ב-\$2,412,000 .

³² לפרטים נוספים אודות הסמכת המבנה ניתן לעיין בעמוד ה LIVING BUILDING CHALLENGE <https://living-future.org/reveal/zhome>

להלן טבלה מסכמת עבור מקרי המבחן העולמיים למגורים מאופסי אנרגיה שנסקרו בפרק זה:

שם הפרויקט	שנת תכנון / אכלוס	מקום	צריכת אנרגיה שנתית	ייצור אנרגיה סולארית	האם מחובר לרשת החשמל?	אסטרטגיות מובילות במבנה
צמוד קרקע / פרטי	The Zero Energy House	2013	אוקלנד, ניו-זילנד	2,400 (קוט"ש לשנה)	5,400 (קוט"ש לשנה)	אינו מחובר
	Zero Energy Home	2005/2008	דנור, קולורדו ארה"ב	חיסכון של כ-60% לעומת מבנה ייחוס	מערכת פוטוולטאית של 4 KWp	באמצעות מונה נטו
	Josephine Commons Project	2010	לה-פאייט, קולורדו ארה"ב	מערכת פוטוולטאית של 6 KWp	באמצעות מונה נטו	שטח מעטפת נמוך, חלונות דרומיים גדולים, פנלים פוטוולטאים, חימום מים סולרי, חיישני טמפר' מחוברים לחלונות חשמליים
בניין דירות רב קומות	South Korea Zero Energy High-Rise Residential Buildings	פרויקט מחקרי	דרום קוריאה	8,146 (קוט"ש לשנה) בממוצע לדירה		באמצעות מונה נטו
	Z-Home	2010	איזאק, וושינגטון ארה"ב		באמצעות מונה נטו	חימום המים לצרכים ביתיים ולצורך חימום החלל באמצעות מערכת סחרור תת קרקעית עם משאבת חום בכל יחידת דיור. מעטפת עבה עם בידוד וחלונות משופרים, ללא גשרים תרמיים והקפדה על אטימות האוויר

3. מתודולוגייה - בדיקת היתכנות

נספח ד מפרט רקע אודות האקלים בישראל וכן התקינה הרלוונטית בשוק הבנייה הישראלי. לקורא שאינו בקי בתכנים אלו מומלץ לעיין בנספח טרם קריאת פרקים 3 ו-4.

פרק זה בודק את היתכנות היישום של מבני מגורים מאופסי אנרגיה בישראל באמצעות מקרי מבחן תיאורטיים, עבורם בוצעו בדיקות שונות. שני מקרי המבחן מייצגים בנייה חדשה למגורים הנפוצה בישראל – מבנה טיפוס ב' בנייה רוויה ומבנה צמוד קרקע "דופלקס". הפרק מפרט את המתודולוגיה שנבחרה לבדיקת איפוס האנרגיה – הצגת מקרי המבחן, שיטת הבדיקה, כלי המחקר בהם נעשה שימוש, אופן חישוב צריכת האנרגיה.

3.1. בחירת הגדרה לאיפוס אנרגיה

ההגדרה לאיפוס אנרגיה שנבחרה לצורך מקרי המבחן, היא איפוס אנרגיית אתר נטו (כמות האנרגיה הנצרכת מן הרשת, במאזן שנתי, מתאזנת עם כמות האנרגיה המתחדשת המיוצרת בהם או בסמיכות אליהם). הגדרה זו נבחרה כיוון שהיא אחת משתי ההגדרות הנפוצות ביותר לאיפוס אנרגיה בספרות המקצועית, וכן כיוון שהיא מתאימה למצב הנוכחי בישראל על פני שאר ההגדרות, כיוון שאינה מצריכה שימוש במקדמי המרת אנרגיה שונים אשר לא חושבו עדיין לרשת החשמל בישראל (המרת אנרגיית מקור-אתר או המרת אנרגיה-פחמן).

3.2. הצגת מקרי מבחן

במחקר נבחנו שני טיפוסים מבני מגורים ישראליים אופייניים כמקרי מבחן:

א. בניין מגורים בבנייה רוויה – בניין בעל 11 קומות (לובי + 10 קומות מגורים) המכיל 40 יחידות דיור.

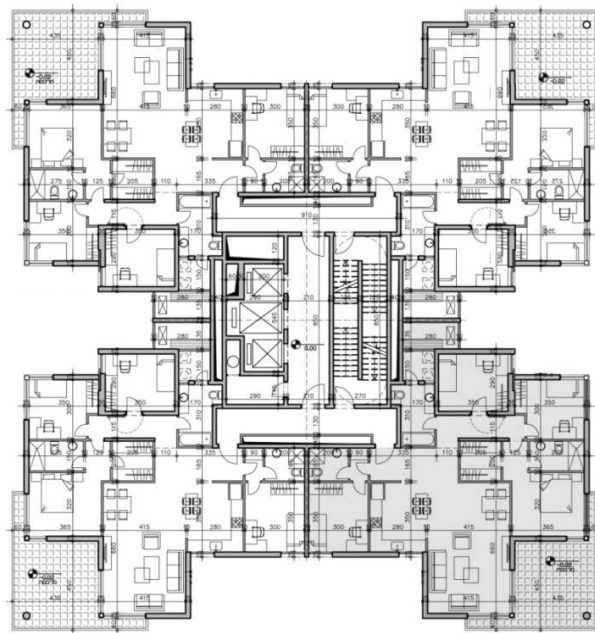
ב. צמוד קרקע "דופלקס" – מבנה דו-משפחתי, בעל שתי יחידות דיור צמודות.

יחידות הדיור הללו נבחרו לבדיקה כיוון שהן משקפות את טיפוס המגורים המהווים את מספר התחלות הבנייה הגבוה ביותר בישראל³³. אזור האקלים בו נבחנו יחידות המגורים הנ"ל הוא אזור אקלים "ב", כיוון שבו חל הגידול המשמעותי ביותר בהתחלות בנייה בשנים האחרונות, וכן הונח כי המבנים ממוקמים באזורים פרבריים (שכונות חדשות בפאתי הערים הגדולות), שכן בינוי זה מייצג את עיקר הבנייה החדשה בישראל.

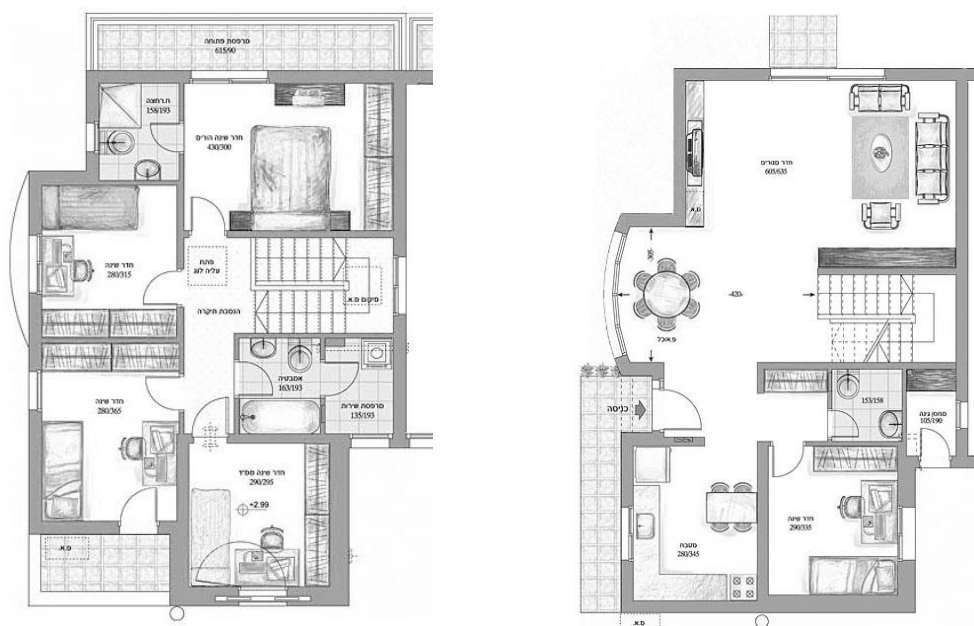
יצוין כי המודל של בנייה רוויה, כפי שנבחן במחקר זה, מורכב מקומות זהות. על אף שבמציאות בניין זה יבנה באופן שאינו הומוגני, תוצאות חישובי צריכת האנרגיה במודל המתואר במחקר מייצגות ברמת קירוב גבוהה את צריכת האנרגיה בבניין בעל יחידות דיור בגדלים משתנים.

³³ ע"פ המרכז למיפוי ישראל, 2012, מבנים צמודי קרקע מהווים 48% מסך הבינוי בישראל. ע"פ נתוני הלמ"ס מבנים בני דירה אחת או 2 דירות מהוות עיקר התחלות הבינוי בישראל בין השנים 1995 ל-2014. זאת ביחס למס' התחלות הבנייה אך לא יחידות המגורים.

תכניות ואפיון מקרי המבחן



תרשים 17: הבסיס ליחידת דיור בבניה רוויה. מקור: אדר' קרן אשד.



תרשים 18: הבסיס ליחידת דיור בבניה צמודת קרקע

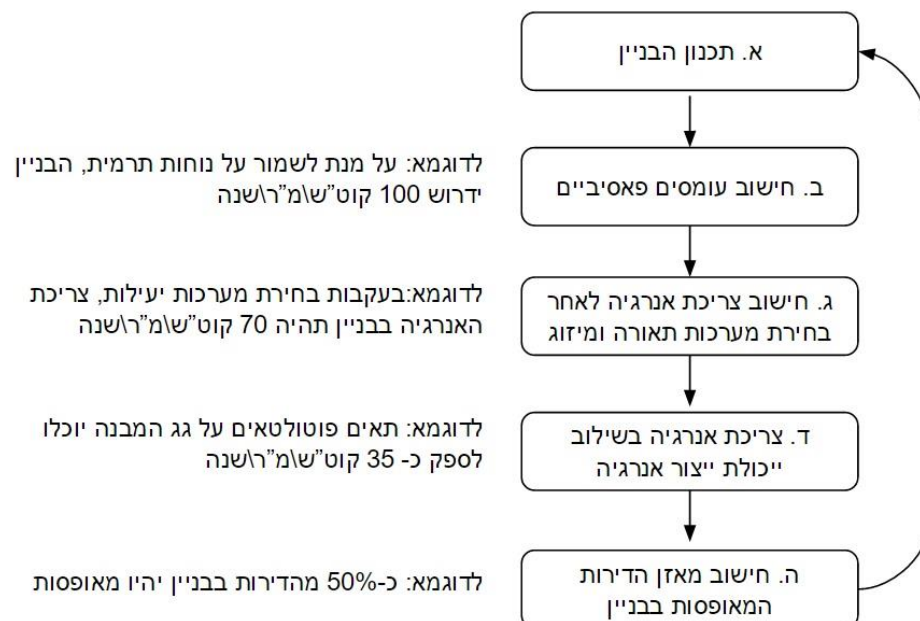
טבלה 2: פירוט תכונות מקרי הבוחן.

דופלקס	בנייה רוויה	
1.3	1.3 ברנביץ'	קיר חוץ
5.4 זיגוג אחד	5.4 זיגוג אחד	חלונות
1.0	אדיאבטי – דירה בין קומות	רצפה
2.0	אין - דירה על קומה אחת	תקרת פנים
1.0	אדיאבטי – דירה בין קומות	גג
1.7 – קיר גבס	1.7 – קיר גבס	קיר פנים
מערכת מיזוג מיני-מרכזית	מערכת מיזוג מיני-מרכזית	HVAC
1 תחלופת אויר לשעה	1 תחלופת אויר לשעה	הסננה
קיץ: 24°C חורף: 20°C	קיץ: 24°C חורף: 20°C	תרמוסטט
80 מ"ר	350 מ"ר (לבניין)	שטח פנוי על הגג
180 מ"ר	180 מ"ר	שטח יחידת דיור (ברוטו)

3.3 שיטת התכנון וכלי המחקר

תכנון מבנה בעל יעילות אנרגטית גבוהה מצריך בדיקות ושינויים תכופים במהלך התכנון. מסמך זה מציע חמישה שלבים לתכנון מבנים מאופסי אנרגיה. השיטה המוצעת היא שיטה חזרתית: על המתכנן לגבש סקיצה לתכנון ראשוני (שלב א'), לבחון את הביצועים האנרגטיים של הבניין המוצע (שלב ב-ד), להעריך את רמת איפוס האנרגיה שלו (שלב ה') ולערוך שינויים תכנוניים בהתאם (חזרה לשלב א').

תרשים 19: השיטה המוצעת לתכנון מבנה מאופס אנרגיה.



3.4. חישוב צריכת האנרגיה

חיזוי צריכת אנרגיה במבנים הוא מטלה מורכבת למדי. כיוון שהחיזוי מתיימר לצפות מה תהיה צריכת האנרגיה במבנים עתידיים – כאלו שלא נבנו עדיין – התהליך מאופיין באי וודאות ועל תוצאות החישוב להילקח בעירבון מוגבל. מחקרים מראים כי במקרים רבים ישנם פערים לא מבוטלים בין ההנחות הנלקחות בעת חיזוי הצריכה לבין הצריכה בפועל (כשהבניין בנוי ומאוכלס). תופעה המכונה ה-Energy Gap. מבנה מאופס אנרגיה אמיתי יכול להתקבל רק לאחר שהבניין נבנה, אוכלס וצריכת האנרגיה בו נבחנה לאורך שנה שלמה.

לצורך חיזוי צריכת האנרגיה במבנים המתוכננים לטובת בדיקת ההיתכנות, מחקר זה נעזר במספר כלים:

א. חישוב צריכת אנרגיה לאקלום (חימום וקירור) ולתאורה - מידול תרמי

כלים ממוחשבים למידול תרמי הם תוכנות מחשב אשר באמצעותן ניתן להעריך ביצועים תרמיים במבנים. באמצעות השימוש בתוכנות אלה ניתן לחשב, בכל שעה ושעה במהלך שנה קלנדרית, מגוון נתונים המלמדים על ביצועי הבניין, למשל: הנוחות התרמית בו, הטמפרטורה, הלחות היחסית, צריכת האנרגיה בו ועוד. מודל תרמי מצריך את אפיון של תכונות הבניין (תכונותיו הגיאומטריות, תכונותיו התרמיות, אופן השימוש בבניין, אפיון מערכות המיזוג וכו'), אולם יש לזכור כי ההנחות הנ"ל עלולות להיות שונות במציאות. כך למשל, אופן השימוש בבניין אינו צפוי תמיד. משתמשים שונים ישתמשו בבניין באופן שונה. פער זה מהווה את אחת הסיבות ל-Energy Gap.

ב. חישוב צריכת אנרגיה לחימום מים

חישוב צריכת האנרגיה הנדרשת לחימום מים נעשה באמצעות שימוש במידע סטטיסטי על צריכת מים לנפש בישראל ובאמצעות חישוב ידני על ידי שימוש בנוסחאות מקובלות ומקורות מהספרות³⁴.

ג. חישוב ייצור האנרגיה

חישוב כושר הייצור של אנרגיה התבצע גם הוא באמצעות חישוב ידני ועל ידי שימוש בהספקי ייצור האנרגיה של אמצעי הייצור השונים³⁵.

3.5. שלבי הבדיקה

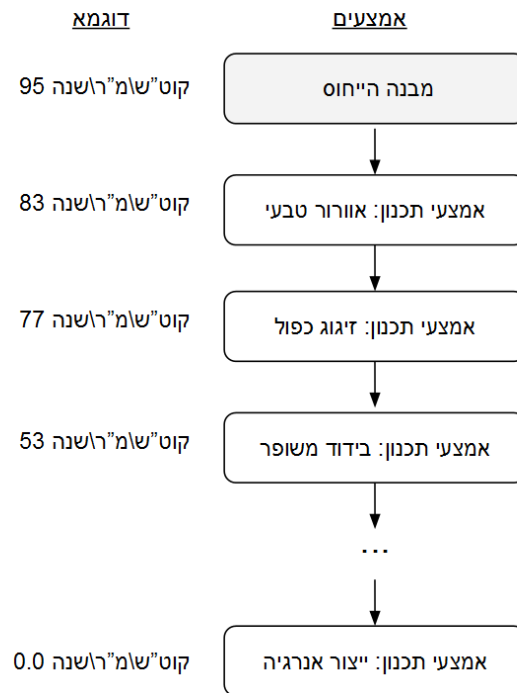
3.5.1. בדיקה אבסולוטית

תכנון מבנה מאופס אנרגיה מצריך חישוב אבסולוטי ומדויק של צריכת האנרגיה בבניין לאחר שייבנה. חישוב שכזה מציג מספר חד-משמעי (באופן אידיאלי – 0 קוט"ש/ר"שנה). בבדיקה האבסולוטית, ההשפעה של כל האמצעים לצמצום צריכת האנרגיה בבניין מתווספים האחד לשני, ועם כל תוספת מושגת ירידה בצריכת הקוט"ש למ"ר בשנה. סה"כ צריכת האנרגיה בבניין לאחר שילוב כל האמצעים מחושבת עד להשגת איפוס.

³⁴ לולב, ש., סגל, נ., כהן-פארן, י., רוזנטל, ג. & גבאי, ד. אפס פחמן בישראל. 2013.

³⁵ גליקמן, י. שאלות ותשובות בנושא ייצור חשמל מתאים פוטוולטאים.
<<http://www.energianews.com/freepage.php?id=54>>

בדיקה אבסולוטית



ביצועיהם של מקרי המבחן נבחנו בשלושה תרחישי תכנון שונים (תרשים 21). תרחיש א' (מבנה הייחוס) מייצג את הבנייה הנפוצה בישראל ואילו תרחישים ב' ו-ג' (מבנה אידיאלי ומבנה ריאלי) עברו את תהליך התכנון המתואר בתרשים 20, על מנת להביא להתייעלות בצריכת האנרגיה בהם ברמות שונות.

- א. מבנה ייחוס - בחינת ביצועי הבניין כפי שתוכנן במקור
- ב. מבנה אידיאלי - בניין משופר כך שצריכת האנרגיה בו צומצמה למינימום, ע"י נקיטת אמצעים אידיאליים
- ג. מבנה ריאלי - בניין משופר כך שצריכת האנרגיה בו צומצמה למינימום, בהתחשב במגבלות השוק המקומי

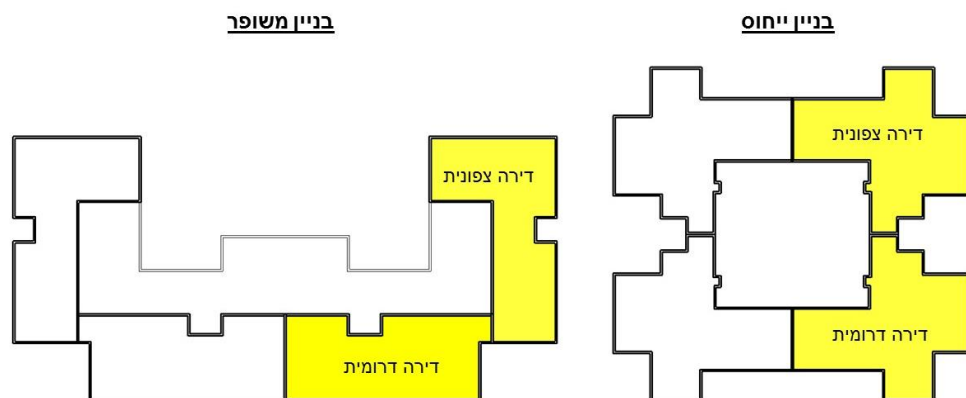
א. מבנה ייחוס – מבני הייחוס אופיינו בתכנון ובארגון המרחבי (כולל באפיון בסיסי כגון בידוד, זיגוג וכו'), התואם את תקן המינימום הישראלי (ת"י 1045) ואת דרישות החוק. על מנת לבחון מבנים ישראליים אופייניים, כל חדר וחדר במודל אופיין בנתוני צריכה, עומסים ובלו"ז שימוש מדויקים בהתבסס על מדריכים רלוונטיים³⁶.

ב. מבנה אידיאלי – המבנה האידיאלי הוא מבנה אשר עבר סידרה ארוכה של שיפורים ושינויים בכדי לצמצם את צריכת האנרגיה בו ככל שניתן. סידרת השינויים כללה פעולות כגון שינוי גיאומטרי ותכנוני (אשר שינה את מבנה יחידות הדיור ואת פריסת תכנית המבנה), שימוש באוורור טבעי, התקנת חלונות בעלי זיגוג כפול, תוספת בידוד לקירור המעטפת, איטום המעטפת לזליגת אויר.

ג. מבנה ריאלי – המבנה הריאלי הוא מבנה אשר בו שולבו רק חלק מהשיפורים שנבחנו במבנה האידיאלי. השיפורים נבחרו על בסיס התאמה לשוק הישראלי ולמידת ההשקעה הנדרשת בכדי לאמצם ביחס למבנה הייחוס.

תרשים 22 מתייחס באופן סכמתי להבדל התכנוני בין בניין הייחוס בבנייה רוויה לבין הבניין המשופר (מבנה ריאלי ומבנה אידיאלי).

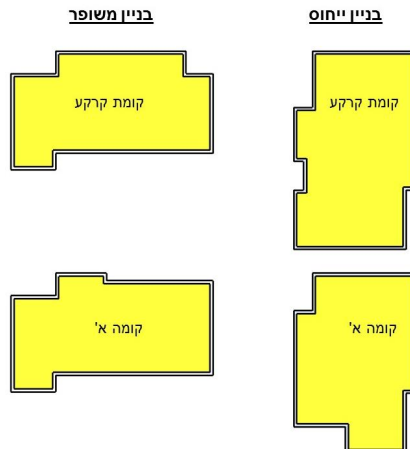
תרשים 22: השוואת תכנון סכמתי בין בניין הייחוס לגרסה המשופרת בבנייה רוויה



תרשים 23 מתייחס באופן סכמתי להבדל התכנוני בין בניין הייחוס בבנייה צמודת הקרקע (דופלקס) לבין הבניין המשופר (מבנה ריאלי ומבנה אידיאלי).

³⁶ Code, I. C. S. ת"י 5282-1. מכון התקנים הישראלי. 2011.

תרשים 23: השוואת תכנון סכמטי בין בניין הייחוס לגרסה המשופרת בבנייה צמודת הקרקע



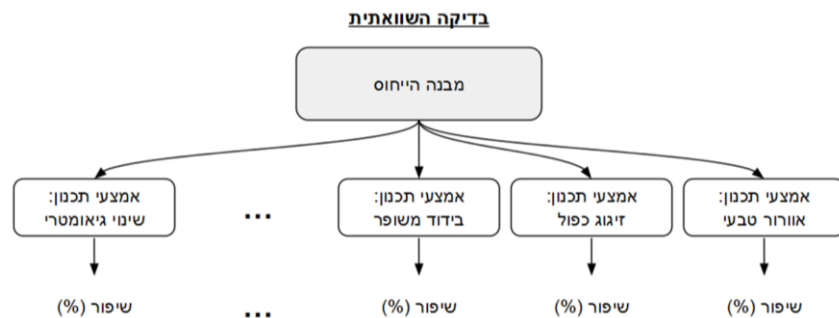
3.5.2. בדיקה השוואתית

לאור המגבלות הנובעות מחישוב אבסולוטי של צריכת אנרגיה, נערכה גם בדיקה השוואתית. מטרת הבדיקה ההשוואתית היא לבחון את מידת ההשפעה של כל אמצעי תכנון בנפרד, ולאמוד אילו מאמצעי התכנון שנבחנו הם בעלי ההשפעה הגדולה ביותר על צריכת האנרגיה בבניין.

הבחינה ההשוואתית מחשבת את אחוז החיסכון בצריכת האנרגיה בין אלטרנטיבות תכנון שונות לבין תרחיש הייחוס. שיטת בדיקה זו נעשית בשימוש בתקנים שונים להערכת ביצועי מבנים (LEED, BREEAM ועוד) כיוון שהיא מיתרת את התלות בערכים מספריים אבסולוטיים (כדוגמת "0 קוט"ש למ"ר") ובאי הוודאות הכרוך בחישובם.

הבחינה נעשתה על ידי השוואה בין מודלים אשר נבדלים זה מזה בפרמטר תכנוני אחד בלבד (למשל: על ידי חישוב צריכת האנרגיה במבנה הייחוס והשוואתו לצריכת האנרגיה במבנה זהה בו מותקנים חלונות בעלי זיגוג כפול ניתן להעריך את התרומה היחסית של חלונות בעלי זיגוג כפול לצמצום צריכת האנרגיה).

הבחינה ההשוואתית במסמך זה נערכה לטיפוס בינוי אחד בלבד (דירה בבנייה רוויה), אולם אחוזי השיפור היחסיים בצריכת האנרגיה צפויים להיות דומים גם לשאר מקרי המבחן.



תרשים 24: הבדיקה ההשוואתית - השוואה בין מודלים אשר נבדלים זה מזה באמצעי תכנון פאסיבי אחד

4. מהלך הבדיקה והתוצאות

4.1. בדיקה אבסולוטית - איפוס אנרגטי בבניה רוויה

בכל אחד מהתרחישים שנבחנו (מבנה הייחוס, מבנה אידיאלי ומבנה ריאלי) מוצגים שלבי התכנון השונים. בשלב הראשון מתוארים חישובי העומסים הפאסיביים בבניין, בשלב השני מוצגת צריכת האנרגיה לאחר בחירת מערכות הבניין (מיזוג \ תאורה), בשלב השלישי מוצגת יכולת ייצור האנרגיה בבניין ובשלב הרביעי והאחרון מוצג מאזן הדירות המאופסות בבניין.

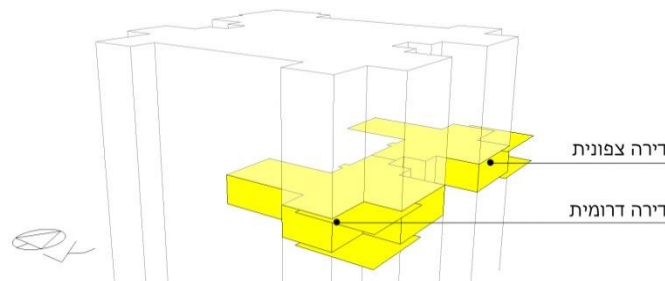
4.1.1. תרחיש מבנה הייחוס

א. ביצועים "פאסיביים" – עומס נדרש

יחידות הדירור של מבנה הייחוס אופיינו, כאמור, בנתונים בסיסיים בהתאם לת"י 1045, ונתוני עומסי צריכה טיפוסיים לפי המתואר בת"י 5282, ובנתוני צריכה, עומסים ולו"ז שימוש. בהתבסס על הנתונים מטבלה 3 (סה"כ העומסים ביחידות דירור צפוניות ודרומיות במבנה הייחוס), העומסים המתקבלים בדירות הייחוס הם:

- עומסים בדירה צפונית: 14,076 קוט"ש/שנה
- עומסים בדירה דרומית: 13,194 קוט"ש/שנה

תרשים 25: בניין הייחוס – בנייה רוויה



טבלה 3: סה"כ עומסים בדירות הייחוס (קוט"ש/מ"ר/שנה)

סה"כ דרומית	סה"כ צפונית	אנרגיה לאקלום						חימום מים**	תאורה*	תרחיש
		דירה דרומית			דירה צפונית					
		סה"כ	קירור	חימום	סה"כ	קירור	חימום			
73.3	78.2	53.6	29.6	24.0	58.5	28.1	30.4	5.1	14.6	דירות ייחוס

* לפי 5 ואט למ"ר, 7 שעות ממוצע ביום (תקן 5281)

** לפי דוד חשמל בעל הספק של 2,500 ואט הפועל בממוצע שעה ביום

ב. צריכת אנרגיה לאחר בחירת מערכות המיזוג והתאורה

לאחר בחירת מערכות תאורה בסיסיות (נורות ליבון) ומיזוג (מערכת מיזוג מיני מרכזי סטנדרטי) מתקבל כי:

- צריכת האנרגיה השנתית ליחידת דיור צפונית: 8,810 קוט"ש/שנה
- צריכת האנרגיה השנתית ליחידת דיור דרומית: 8,370 קוט"ש/שנה
- צריכת האנרגיה השנתית לבניין בן 10 קומות מגורים: 343,600 קוט"ש/שנה

נתונים אלה מתיישרים היטב עם נתוני הצריכה הממוצעת למשק בית בישראל המבוססים על דוחות סטטיסטיים של חברת החשמל העומדים על כ- 7,468 קוט"ש/שנה בממוצע ליחידת דיור. אמנם ערכי צריכת האנרגיה המחוברים להלן מתייחסים לאקלום ותאורה בלבד והם גבוהים מהמוצג בנתוני חברת החשמל, אולם יש לזכור כי נתוני חברת החשמל מתייחסים ליחידות דיור ממוצעות בישראל. דירות הייחוס, לעומת זאת, גדולות יותר. על כן צריכת האנרגיה בהן – גדולה יותר גם היא.

ג. צריכה לאחר שילוב אמצעים לייצור אנרגיה

בהתאם להגדרת האיפוס האנרגטי שנבחרה במחקר זה, על מנת לאפס את צריכת האנרגיה בבניין, יש לייצר את אותה כמות האנרגיה השנתית בה משתמשים דיירי הבניין באמצעות מקורות מתחדשים.

לצורך חישוב יכולת ייצור האנרגיה בשלב זה, טכנולוגיות הייצור שנבחרו הן שימוש בתאים פוטוולטאים להפקת חשמל וכן שימוש בדודי וקולטני שמש (Solar-Thermal) להפקת מים חמים. המחקר יוצא מנקודת הנחה כי דודי השמש והקולטנים מסוגלים לספק כ-75% מתצרוכת המים החמים השנתיים (בהתחשב ביעילות מופחתת בעונת החורף).

לאחר ניכוי שטחי השירות למעליות, חדרי הפיקוד ואזורים מוצללים על הגג, נמצא כי שטח הגג האפקטיבי להתקנת דודי שמש וקולטני תאים פוטוולטאים הוא כ- 350 מ"ר.

ד. מאזן הדירות המאופסות

מספר הדירות המאופסות בבניין הייחוס:

טבלה 4: איפוס בניין הייחוס.

תמהיל	סה"כ דירות מאופסות
א. דוד שמש לכל דירה (260 מ"ר)	דירה אחת (כ-2.5%)

* חושב לפי דוד שמש בנפח של 150 ליטר + שני קולטנים
ההתייחסות לדירה אחת מאופסת כאמור נובעת מאופן החישוב של ייצור מצטבר והשימוש הפוטנציאלי בו.
בפועל כאמור לא יתקיים איפוס של דירה במצב זה.

4.1.2. תרחיש מבנה אידיאלי

א. ביצועים "פאסיביים" – עומס נדרש

בשלב הראשון עבר, כאמור, מבנה הייחוס סידרה ארוכה של שיפורים ושינויים בכדי לצמצם באופן פאסיבי ככל שניתן את צריכת האנרגיה בו. סידרת השינויים כללה את הפעולות הבאות (פירוט מלא של שלבי הבדיקות ותוצאותיהן מוצגים בנספח ב'):

1. שימוש באוורור טבעי
2. התקנת חלונות בעלי זיגוג כפול ($U\text{-Value} = 2.2 \text{ W/m}^2\text{K}$)
3. תוספת בידוד לקיר ברנוביץ' ($U\text{-Value} = 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$)
4. מעטפת – שיפור הסננה (איטום אויר = 0.6 החלפות אויר לשעה)
5. שינוי גיאומטרי – שינוי הארגון המרחבי של הדירה וצמצום שטח הפנים

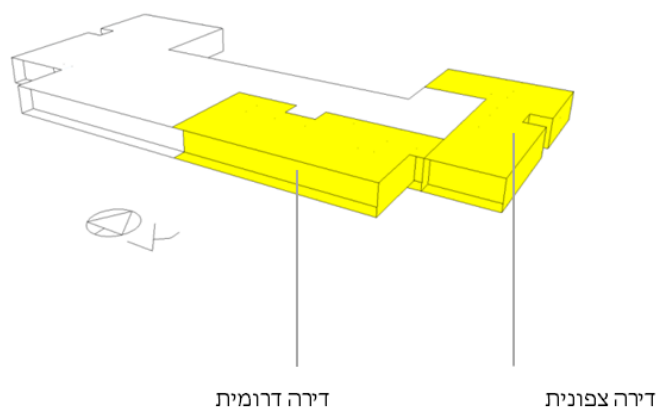
בסופו של שלב זה, תכנית הדירות שופרה כך שהחללים השונים בדירות יוכלו לנצל במידה המיטבית את נתוני הסביבה: רוב החדרים פונים כעת דרומה, במידת האפשר. היחידות הצפוניות והדרומיות אינן זהות כעת, ואירגון המרחבי תוכנן בהתאם להפנייתן. דירות אלו אופיינו בתכניות אורכיות בעלות הפנייה צפון-דרום ובעלות חזיתות מינימאליות הפונות למזרח ולמערב. כמו כן, נעשה שימוש אופטימלי בהצללות והאורך האופטימלי שלהן חושב כך שיספק צל בקיץ ויאפשר חימום באמצעות קרינת השמש בחורף. החלונות המזרחיים והמערביים הוקטנו למינימום האפשרי ובמקומם שולבו חלונות צפונים ודרומיים. שטחה של מעטפת הבניין צומצם (מכ- 150 מ"ר לכ- 85 מ"ר לדירה דרומית ולכ- 125 מ"ר לצפונית) תוך שמירה על שטח הדירה המקורי, בכדי לצמצם את איבודי האנרגיה דרך המעטפת.

בהתבסס על הנתונים מטבלה 5, העומסים המתקבלים בדירות האידיאליות הם:

עומסים בדירה צפונית: 7,325 קוט"ש/שנה

עומסים בדירה דרומית: 7,000 קוט"ש/שנה

תרשים 26: תכנון משופר – בנייה רוויה



טבלה 5: סה"כ עומסים בדירות האידיאליות (קוט"ש"מ"ר/שנה)

סה"כ דרומית	סה"כ צפונית	אנרגיה לאקלום					חיסום מים**	תאורה*	תרחיש	
		דירה דרומית			דירה צפונית					
		סה"כ	קירור	חימום	סה"כ	קירור	חימום			
38.9	40.7	19.2	8.7	10.5	21.0	8.5	12.5	5.1	14.6	דירות ינידאילות

* לפי 5 ואט למ"ר, 7 שעות ממוצע ביום (תקן 5281)
 ** לפי דוד חשמל בעל הספק של 2,500 ואט הפועל בממוצע שעה ביום

ב. בחירת מערכות המיזוג והתאורה

מיזוג אויר - ככל שיעילות מערכת המיזוג גבוהה יותר – היא תוכל לספק נוחות תרמית תוך שימוש מופחת באנרגיה. מחקר זה בחן שימוש במספר אלטרנטיבות יעילות אנרגטית למיזוג יחידת הדיור האידיאלית:

משאבת חום קרקע (Gas Source Heat-pump): בעוד המערכת מציגה ביצועים גבוהים, התקנתה מצריכה הטמנה של צינורות בעומק האדמה – פעולה הדורשת עבודות חפירה והטמנה הכרוכות בעלות ראשונית גבוהה יחסית. מערכת זו נפסלה בתרחיש זה בשל עלותה הגבוהה ורמת התחזוקה הגבוהה יחסית הנדרשת. כיוון שעד כה מערכות בודדות בלבד מסוג זה הותקנו בישראל, וכיוון שנכון להיום מספר מצומצם מאוד של אנשי מקצוע הוכשרו להתקין אותה כראוי, נמצא כי שילוב מערכת זו לא ריאלי בהיקף נרחב במציאות הבניה הנוכחית בישראל.

מערכת שיחזור חום (MVHR – Mechanical Ventilation and Heat Recovery): למערכת זו טווח מקדם היעילות CoP של בין 9.0 ל- 16.0. שימוש אופטימלי במערכת מסוג זה מצריך הבנה בסיסית באופן תפעולה וכן רמות תחזוקה גבוהות יחסית (ניקוי והחלפת מסננים תכופה). בעוד הפופולאריות של מערכת המיזוג והאוורור הנ"ל נמצאת בעלייה בעולם (בעיקר במבני PassivHaus), מציאות השוק הישראלי הנוכחית אשר אינה מאפשרת שימוש בה באופן נרחב (כפי שמורחב בפרק 6).

מערכת מיזוג אינוורטר (Inverter): מזגן בעל מנגנון אינוורטר כולל מנגנון אוטומטי אשר מכבה ומדליק את המזגן בעת הצורך על מנת לשמור על טמפרטורה קבועה. מערכות מסוג אינוורטר נמצאות בשימוש הולך וגובר בישראל. המערכת הנבחרת היא בעלת מקדם יעילות $CoP = 4.0$ לחימום ו- $SEER = 3.32$ לקירור (לעומת 2.3 ו- 2.0 למערכת מיזוג סטנדרטית, בהתאמה). מערכת זו נבחרה בין השאר כיוון שהיא אינה יקרה באופן משמעותי מהתקנת מערכת מיזוג סטנדרטית (בהשוואה לשאר המערכות שנבחנו), וכן כי התקנתה אינה כרוכה בהכשרה יוצאת דופן. בנוסף – השוק הישראלי נחשף אליה ונראה כי המערכת אומצה בקלות יחסית.

תאורה – בבניין האידיאלי הוחלט על שילוב נורות LED. לנורות LED יתרונות רבים בהשוואה לנורות ליבון, ואפילו בהשוואה לנורות פלואורסצנטיות: הן יעילות יותר, צורכות פחות אנרגיה עבור אותה רמת תאורה ואורך חייהן ארוך יותר. בנוסף, נורות ליבון פולטות חום רב במהלך פעולתן ולמעשה מחממות את החדר. נורות LED פולטות עד פי עשרה פחות חום מנורות ליבון. משמעות הדבר היא

שעל מנת לקרר חדר בעל תאורת המורכבת מנורות ליבון יש להשקיע כמות רבה של אנרגיה מאשר בחדר בעל תאורת LED.

לאחר בחירת מערכות המיזוג (מזגן אינוורטר) והתאורה (LED) מתקבל כי בבניין האידיאלי:

- צריכת האנרגיה השנתית ליחידת דיור צפונית: 2,300 קוט"ש/שנה
- צריכת האנרגיה השנתית ליחידת דיור דרומית: 2,220 קוט"ש/שנה
- צריכת האנרגיה השנתית לבניין בן 10 קומות מגורים: 90,470 קוט"ש/שנה

ג. צריכה לאחר שילוב אמצעים לייצור אנרגיה

בחישוב יכולת ייצור האנרגיה בבניין האידיאלי נבחרו תאים פוטוולטאים (בעלי יעילות של 15%) להפקת חשמל, וכן דודי וקולטני שמש (Solar-Thermal) להפקת מים חמים.

שטח הגג הכולל בבניין האידיאלי הוא כ- 1000 מ"ר. לאחר ניכוי שטחי השירות למעליות, חדרי הפיקוד ואזורים מוצללים על הגג, מונח כי שטח הגג האפקטיבי להתקנת תאים פוטוולטאים ו\או דודי שמש וקולטנים הוא כ- 500 מ"ר, שכן בבניין האידיאלי תוכננו שטחי הגג כך שתיווצר הצללה מינימאלית (או, חשיפה מקסימלית לשמש), וזאת בכדי שאפשר יהיה לנצל את הגג באופן יעיל יותר ולהתקין עליו מספר רב יותר של תאים פוטוולטאים ודודי שמש. טבלה 6 מציגה את שלושת התמהילים של התקנת התאים הפוטוולטאים ודודי השמש, ואת מספר הדירות המאופסות בבניין בכל תמהיל.

ד. מאזן הדירות המאופסות

מספר הדירות המאופסות בבניין האידיאלי בכל תמהיל (חישובים מפורטים בנספח ב'):

טבלה 6: מספר הדירות המאופסות בבניין האידיאלי

מ"ר נדרש של תאים פוטוולטאים לאיפוס מלא***	סה"כ מספר ואחוז דירות מאופסות	תמהיל
330 מ"ר	19 דירות (כ-48%)	א. דוד שמש לכל דירה 240 מ"ר תאים פוטוולטאים
200 מ"ר	27 דירות (כ-68%)	ב. 20 (מתוך 40) דירות עם דודי שמש. 370 מ"ר תאים פוטוולטאים
70 מ"ר	35 דירות (כ-88%)	ג. ללא דודי שמש מקסימום תאים פוטוולטאים (500 מ"ר)

* חושב לפי דוד שמש בנפח של 150 ליטר + שני קולטנים

** הונח כי התאים הפוטוולטאים מייצרים 1,600 קוט"ש/מ"ר ל-10 שנה

*** התכנון אינו מציג התקנה של תאים פוטוולטאים או קולטנים ע"ג החזיתות בכדי להימנע מהצללה עצמית

4.1.3. תרחיש מבנה ריאלי

א. ביצועים "פאסיביים" – עומס נדרש

מבין השיפורים שנבחנו במבנה האידיאלי, בתרחיש הנוכחי נבחרו מספר אמצעי תכנון אשר נחשבים כשיפורים ריאליים, בהתחשב בשוק הבנייה הישראלי.

השיפורים שנבחרו כשיפורים ריאליים הינם:

1. שימוש באוורור טבעי
2. התקנת חלונות בעלי זיגוג כפול ($U\text{-Value} = 2.2 \text{ W/m}^2\text{K}$)
3. שינוי גיאומטרי – שינוי הארגון המרחבי של הדירה וצמצום שטח הפנים

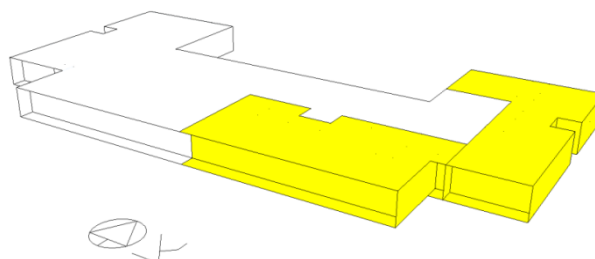
שיפור בידודו של קיר ברנוביץ' הוא נושא אשר נידון רבות בשוק הבנייה הישראלי, אך נכון להיום ישנה מגבלה טכנולוגית להוספת שכבת בידוד חיצוני לקיר זה תוך מניעת גשרים תרמיים. שיפור אטימות הבניין לכדי 0.6 החלפות אויר לשעה גם הוא נושא בעל מורכבות טכנולוגית אשר דורש ידע ומיומנות אשר אינם נמצאים בשוק הבניה הישראלי כיום. על כן, שני האמצעים הללו לא נלקחו בחשבון בעת חישוב הביצועים הפאסיביים של הבניין הריאלי.

בהתבסס על הנתונים מטבלה 7, העומסים המתקבלים בדירות הריאליות הם:

עומסים בדירה צפונית: 10,836 קוט"ש/שנה

עומסים בדירה דרומית: 9,180 קוט"ש/שנה

תרשים 26: תכנון משופר – בנייה רוויה



טבלה 7: סה"כ עומסים בדירות הריאליות (קוט"ש/מ"ר/שנה)

סה"כ דרומית	סה"כ צפונית	אנרגיה לאקלום					חימום מים**	תאורה*	תרחיש	
		דירה דרומית			דירה צפונית					
		סה"כ	קירור	חימום	סה"כ	קירור				חימום
51.0	60.2	31.3	12.2	19.1	40.5	14.1	26.4	5.1	14.6	דירות ריאליות

* לפי 5 ואט למ"ר, 7 שעות ממוצע ביום (תקן 5281)

** לפי דוד חשמל בעל הספק של 2,500 ואט הפועל בממוצע שעה ביום

ב. בחירת מערכות המיזוג והתאורה

המערכות שנבחרו לשימוש בבניין הריאלי הן תאורת LED ומערכת מיזוג אינוורטר (Inverter) בעלת מקדם יעילות $CoP = 4.0$ לחימום ו- $SEER = 3.32$ לקירור. בהתבסס על הנתונים הנ"ל מתקבל כי:

- צריכת האנרגיה השנתית ליחידת דיור צפונית: 3,230 קוט"ש/שנה
- צריכת האנרגיה השנתית ליחידת דיור דרומית: 2,800 קוט"ש/שנה
- צריכת האנרגיה השנתית לבניין בן 10 קומות מגורים: 120,600 קוט"ש/שנה

ג. צריכה לאחר שילוב אמצעים לייצור אנרגיה

האמצעים שנבחרו ליצירת אנרגיה בבניין הריאלי זהים לאלו מהבניינים הקודמים - תאים פוטוולטאים בעלי יעילות של 15% להפקת חשמל ודודי וקולטני שמש (Solar-Thermal) להפקת מים חמים. שטח הגג הכולל בבניין הריאלי הוא כ- 1000 מ"ר, ולאחר ניכוי שטחי השירות למעליות, חדרי הפיקוד ואזורים מוצללים על הגג, השטח האפקטיבי להתקנת תאים פוטוולטאים ו/או דודי שמש וקולטנים הוא 500 מ"ר. טבלה 8 מציגה את שלושת התמהילים של התקנת התאים הפוטוולטאים ודודי השמש, ואת מספר הדירות המאופסות בבניין בכל תמהיל.

ד. מאזן הדירות המאופסות

מספר הדירות המאופסות בבניין הריאלי בכל תמהיל (חישובים מפורטים בנספח ב'):

מ"ר נדרש של תאים פוטוולטאים לאיפוס מלא***	סה"כ מספר ואחוז דירות מאופסות	תמהיל
520 מ"ר	14 דירות (כ-36%)	א. דוד שמש לכל דירה* 240 מ"ר תאים פוטוולטאים**
390 מ"ר	20 דירות (כ-51%)	ב. 20 (מתוך 40) דירות עם דודי שמש. 370 מ"ר תאים פוטוולטאים
260 מ"ר	26 דירות (כ-65%)	ג. ללא דודי שמש מקסימום תאים פוטוולטאים (500 מ"ר)

* חושב לפי דוד שמש בנפח של 150 ליטר + שני קולטנים

** הונח כי התאים הפוטוולטאים מייצרים 1,600 קוט"ש/מ"ר-ל-10 מ"ר לשנה

*** התכנון אינו כולל התקנה של תאים פוטוולטאים או קולטנים ע"ג החזיתות בכדי להימנע מהצללה עצמית

טבלה 8: מספר הדירות המאופסות בבניין הריאלי

4.2. בדיקה אבסולוטית - איפוס אנרגטי בבנייה צמודת קרקע 'דופלקס'

בדומה לבדיקת האיפוס של מבנה בבנייה רוויה, גם במקרה זה נבחנו שלושה תרחישים (מבנה הייחוס, מבנה אידיאלי ומבנה ריאלי).

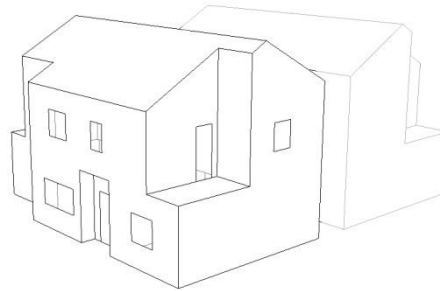
4.2.1. תרחיש מבנה הייחוס

א. ביצועים "פאסיביים" – עומס נדרש

מבנה הייחוס, כאמור, הוא מודל של מבנה אשר היה בסיס להשוואת הביצועים במחקר זה. המודל אופיין בנתונים בסיסיים בהתאם לת"י 1045 ונתוני עומסים לפי ת"י 5282. כל חדר אופיין בנתוני צריכה, עומסים ושימוש בהתאם למדריכים הרלוונטיים.

בהתבסס על הנתונים מטבלה 9, העומס המתקבל במבנה הייחוס הוא: 17,820 קוט"ש/שנה

תרשים 27: דופלקס - מבנה הייחוס



טבלה 9: סה"כ צריכת האנרגיה במבנה הייחוס (קוט"ש/מ"ר/שנה) - דופלקס ייחוס

סה"כ	אנרגיה לאקלום		חימום מים**	תאורה*	תרחיש
	קירור	חימום			
99.0	42.3	36.6	5.1	15.0	מבנה ייחוס

* לפי 5 ואט למ"ר, 7 שעות ממוצע ביום (תקן 5281)
** לפי דוד חשמל בעל הספק של 2,500 ואט הפועל בממוצע שעה ביום

ב. צריכת אנרגיה לאחר בחירת מערכות המיזוג והתאורה

לאחר בחירת מערכות התאורה הבסיסיות (נורות ליבון) והמיזוג (מערכת מיזוג מיני מרכזי סטנדרטי), מתקבל כי צריכת האנרגיה השנתית ליחידת דופלקס היא: 10,720 קוט"ש/שנה.

כאמור, לפי דוחות חברת החשמל, הצריכה הממוצעת למשק בית בישראל עומדת על - 7,468 קוט"ש/שנה בממוצע ליחידת דיור. אמנם ערכי צריכת האנרגיה המחושבים להלן מתייחסים לאקלום ותאורה בלבד והם גבוהים מהמוצג בנתוני חברת החשמל, אולם יש כי לזכור כי מבנה הייחוס גדול יותר ממבנה מגורים ממוצע בישראל, וכן יש להניח שרוב יחידות המגורים בישראל הן דירות המאופיינות בשטח פנים קטן יותר מזה של מבנה צמוד קרקע (שטח פנים גדול יותר מוביל לאיבודי

אנרגיה גדולים יותר). על כן יש להניח כי צריכת האנרגיה במבנה צמוד קרקע ממוצע היא מלכתחילה גבוהה יותר מזו של יחידת דיור ממוצעת.

ג. צריכה לאחר שילוב אמצעים לייצור אנרגיה

כאמור, לצורך חישוב יכולת ייצור האנרגיה במבנה הייחוס הבסיסי, טכנולוגיות הייצור שנבחרו הן שימוש בתאים פוטוולטאים להפקת חשמל וכן שימוש בדודי וקולטני שמש (Solar-Thermal) להפקת מים חמים.

שטחו הכולל של הגג במבנה הייחוס הוא כ- 90 מ"ר (כ-80 מ"ר שטח אפקטיבי), אולם הפנייתו של הגג המשופע אינה אידיאלית לרתימת קרינת השמש לצורך הפקת אנרגיה או חום: שיפועי הגג פונים לכיוון מזרח ולמערב ומצלים זה על זה במהלך היום. כך נוצר מצב בו ברוב שעות היום רק כמחצית מהשטח האפקטיבי של הגג חשוף לקרינת השמש, ואילו על המחצית השנייה מוטל צל. עניין ההצללה העצמית מפחית באופן משמעותי את פוטנציאל ייצור האנרגיה על הגג.

ד. מאזן הפאסיביות של הבניין

טבלה 10 מראה את שטח הגג הנחוץ בכדי לספק את צריכת האנרגיה השנתית באמצעות שני תמהילים: שילוב של דוד שמש ותאים פוטוולטאים או התקנת תאים פוטוולטאים בלבד. טבלה 10: יכולת האיפוס בבניין – דופלקס ייחוס

תרחיש	% בניין מאופס
א. דוד שמש* + תאים פוטוולטאים**	57%
ב. תאים פוטוולטאים בלבד	60%

* חושב לפי דוד שמש בנפח של 150 ליטר + שני קולטנים
 ** הונח כי התאים הפוטוולטאים מייצרים 1,600 קוט"ש מ"ר ל-10 מ"ר לשנה

4.2.2. תרחיש דופלקס אידיאלי

א. ביצועים "פאסיביים" – עומס נדרש

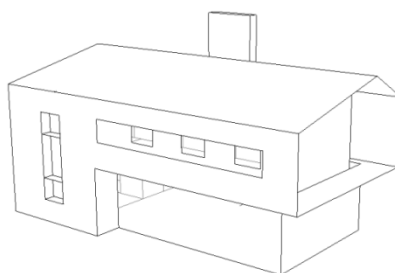
המבנה האידיאלי הוא תוצאה של סדרת שיפורים ושינויים שנועדו להביא לצמצום מקסימלי של צריכת האנרגיה בבניין. סידרת השינויים כללה את הפעולות הבאות:

1. שימוש באוורור טבעי
2. התקנת חלונות בעלי זיגוג כפול ($U\text{-Value} = 2.2 \text{ W/m}^2\text{K}$)
3. תוספת בידוד לקיר מעטפת ($U\text{-Value} = 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$)
4. מעטפת – שיפור הסננה (איטום אויר = 0.6 החלפות אויר לשעה)
5. שינוי גיאומטרי – שינוי הארגון המרחבי של הדירה וצמצום שטח הפנים.

תכנית הדופלקס שונתה כך שאפשר יהיה לנצל את נתוני האתר באופן מיטבי. חדרי השינה פונים דרומה, כמו גם החדר האורחים, אשר לו חזית זכוכית דרומית גדולה. רצפת חדר האורחים שונתה לרצפת בטון חשופה – על מנת לנצל את המסה התרמית של הבטון ואת יכולת קיבול החום של החומר. הצללות תוכננו בקפידה כך שיספקו צל בקיץ ויאפשרו חימום באמצעות קרינת השמש בחורף. פתחים למזרח ולמערב צומצמו למינימום (שכן על חזיתות אלו קשה יותר להצל) וארובות אוורור שולבה בתכנון, על מנת לאפשר אוורור טבעי וקירור פאסיביים. בכדי לצמצם את איבודי האנרגיה דרך מעטפת הבניין, צומצם שטח המעטפת בבנין האידיאלי, אולם כיוון שהבנין המקורי היה כבר קומפקטי מאוד (שטח הפנים שלו היה כ-370 מ"ר) לא היה מקום רב לשיפור. שטח הפנים של מעטפת הבניין האידיאלי היא כ-340 מ"ר.

בהתבסס על הנתונים מטבלה 11, העומס המתקבל בדופלקס האידיאלי הוא 8,820 קוט"ש/שנה.

תרשים 28: התכנון המשופר - דופלקס



טבלה 11 : סה"כ צריכת האנרגיה במבנה דופלקס האידיאלי (קוט"ש/מ"ר/שנה)

תרחיש	תאורה*	חימום מים**	אנרגיה לאקלום חימום קירור	סה"כ
מבנה אידיאלי	15.0	5.1	11.7 17.2	49.0

* לפי 5 ואט למ"ר, 7 שעות ממוצע ביום (תקן 5281)
** לפי דוד חשמל בעל הספק של 2,500 ואט הפועל בממוצע שעה ביום

ב. צריכת אנרגיה לאחר בחירת מערכות המיזוג והתאורה

מיזוג אוויר - לאחר סקירת מערכות המיזוג הרלוונטיות, המערכת שנבחרה לשימוש בצמוד הקרקע היא מערכת שיחזור חום (MVHR – Mechanical Ventilation and Heat Recovery). מערכת זו בעלת טווח מקדם יעילות מעולה (CoP של בין 9.0 ל-16.0), ועל אף מורכבותה – והידע הדרוש בהתקנתה והפעלתה – היא נמצאה מתאימה מאוד לשימוש במבנים צמודי קרקע. מערכת זו מסוגלת לספק חימום בלבד, על כן, לצורך קירור המבנה נבחרה מערכת מיזוג אינוורטר בעלת $3.32 = SEER$ לקירור. השימוש ב-MVHR לחימום הבניין מביא לחיסכון של כ-4 קוט"ש\מ"ר\שנה – שהם כ-10% מסה"כ צריכת האנרגיה בבניין – כמות שאינה מבוטלת בניסיון להשיג איפוס אנרגטי.

תאורה - נורות LED האיכותיות והחסכוניות נבחרו לשימוש גם בתכנון הדופלקס האידיאלי.

לאחר בחירת מערכות המיזוג (MVHR) והתאורה (LED) מתקבל כי צריכת האנרגיה השנתית הכוללת בדופלקס האידיאלי היא כ-4,620 קוט"ש\שנה.

ג. צריכה לאחר שילוב אמצעים לייצור אנרגיה

גם במקרה זה, בחישוב יכולת ייצור האנרגיה בבניין האידיאלי נבחרו תאים פוטוולטאים (בעלי יעילות של 20%) להפקת חשמל, וכן דודי וקולטני שמש (Solar-Thermal) להפקת מים חמים.

שטחו הכולל של הגג במבנה האידיאלי הוא כ-70 מ"ר (הגג בולט אל מעבר לקו הבניין במקומות מסוימים לשם הצללה). בדומה למבנה הייחוס, גם במקרה זה הגג משופע, אולם במקרה זה הגג תוכנן באופן משופר: השיפוע פונה כעת לכיוון דרום, ושטח הגג הפונה לכיוון זה גדול יותר משטח הגג הפונה צפונה. כך יוצא כי שטח הגג האפקטיבי בעל הפנייה דרומית הוא כ-70 מ"ר.

ד. מאזן האיפוס של הבניין

טבלה 12 מראה את שטח הגג הנחוץ בכדי לספק את צריכת האנרגיה השנתית באמצעות שני התמהילים הנבחרים:

טבלה 12 – יכולת האיפוס בבניין – דופלקס אידיאלי

תרשים	% בניין מאופס
א. דוד שמש + תאים פוטוולטאים	100%
ב. תאים פוטוולטאים בלבד	100%

* חושב לפי דוד שמש בנפח של 150 ליטר + שני קולטנים
 ** הונח כי התאים הפוטוולטאים מייצרים 1,600 קוט"ש\מ"ר\ל-10 לשנה

4.2.3. תרחיש דופלקס ריאלי

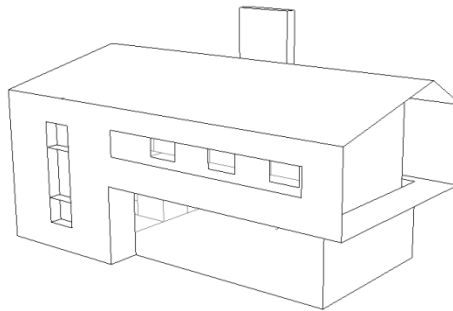
א. ביצועים "פאסיביים" – עומס נדרש

מבין השיפורים שנבחנו בדופלקס האידיאלי נבחרו מספר שיפורים אשר מוערכים כשיפורים ריאליים, כלומר לאפשרות שיאומצו, בהתחשב בשוק הבנייה הישראלי יש סיכוי סביר. השיפורים הם:

1. שימוש באוורור טבעי
2. התקנת חלונות בעלי זיגוג כפול ($U\text{-Value} = 2.2 \text{ W/m}^2\text{K}$)
3. בידוד קירות המעטפת ($U\text{-Value} = 0.45 \text{ W/m}^2\text{K}$)
4. שינוי גיאומטרי – שינוי הארגון המרחבי של הדירה וצמצום שטח הפנים.

בהתבסס על הנתונים מטבלה 13 העומס המתקבלים במבנה הייחוס הוא 10,200 קוט"ש/שנה.

תרשים 28: התכנון המשופר - דופלקס



טבלה 13 – סה"כ צריכת האנרגיה במבנה הריאלי (קוט"ש/מ"ר/שנה) – דופלקס ריאלי

סה"כ	אנרגיה לאקלום		חימום מים**	תאורה*	תרחיש
	קירור	חימום			
56.7	12.9	23.7	5.1	15.0	מבנה ריאלי

* לפי 5 ואט למ"ר, 7 שעות ממוצע ביום (תקן 5281)
** לפי דוד חשמל בעל הספק של 2,500 ואט הפועל בממוצע שעה ביום

ב. צריכת אנרגיה לאחר בחירת מערכות המיזוג והתאורה

בגלל המורכבות היחסית בהתקנת מערכת MVHR, וכיוון שהמערכת עדין אינה מוכרת בשוק הישראלי, בתכנון הדופלקס הריאלי שולבה מערכת מיזוג אינורטר, עם מקדמים $\text{CoP}=4.0$ לחימום ו- $\text{SEER} = 3.32$ לקירור. ותכנון התאורה התבסס על נורות LED שולבו.

לאחר בחירת מערכות המיזוג והתאורה הנ"ל, מתקבל כי צריכת האנרגיה השנתית הכוללת בדופלקס הריאלי היא כ-5,384 קוט"ש/שנה.

ג. צריכה לאחר שילוב אמצעים לייצור אנרגיה

גם במקרה זה, נלקחו בחשבון תאים פוטוולטאים (בעלי יעילות של 20%) להפקת חשמל, וכן דודי וקולטני שמש (Solar-Thermal) להפקת מים חמים. שטחו הכולל של הגג במבנה הוא כאמור כ- 100 מ"ר, אולם שטח הגג האפקטיבי בעל הפנייה דרומית הוא כ-70 מ"ר.

ד. מאזן הפאסיביות בבניין

טבלה 14 מראה את שטח הגג הנחוץ בכדי לספק את צריכת האנרגיה השנתית באמצעות שני התמהילים הנבחרים.

טבלה 14 – יכולת האיפוס בבניין – דופלקס ריאלי

תרחיש	% בניין מאופס
א. דוד שמש + תאים פוטוולטאים	100%
ב. תאים פוטוולטאים בלבד	100%

* חושב לפי דוד שמש בנפח של 150 ליטר + שני קולטנים
** הונח כי התאים הפוטוולטאים מייצרים 1,600 קוט"ש"מ"ר ל-10 מ"ר לשנה

4.3. סיכום בדיקות איפוס אנרגיה של מקרי המבחן

א. הטבלאות הבאות מרכזות את תוצאות הבדיקה ומראות את אחוז איפוס המבנים וכן את הפרשי העלות הצפויים כתוצאה מהשיפורים בבניין.

בבחינת התרחישים והתמהילים השונים לאיפוס אנרגטי במבנים בבנייה רוויה, ניתן לראות את ההשפעה של התמהילים השונים (שילוב דודי שמש ותאים פוטוולטאים) על רמות האיפוס.

טבלה 15: איפוס אנרגטי בבנייה רוויה – סיכום

תרחיש	תמהיל	סה"כ מספר ואחוז דירות מאופסות	תוספת מ"ר פוטוולטאיים לאיפוס מלא
מבנה ייחוס	א. דוד שמש לכל דירה (260 מ"ר)	0% (בתיאוריה ניתן לאפס דירה אחת לאור צבירת אנרגיה כוללת אך הדבר אינו ריאלי בפועל)	
מבנה אידיאלי	א. דוד שמש לכל דירה 240 מ"ר תאים פוטוולטאים	19 דירות (כ-48%)	330 מ"ר
	ב. 30 (מתוך 40) דירות עם דודי שמש. 300 מ"ר תאים פוטוולטאים	27 דירות (כ-68%)	200 מ"ר
	ג. ללא דודי שמש מקסימום תאים פוטוולטאים (500 מ"ר)	35 דירות (כ-88%)	70 מ"ר
מבנה ריאלי	א. דוד שמש לכל דירה 240 מ"ר תאים פוטוולטאים	14 דירות (כ-36%)	520 מ"ר
	ב. 30 (מתוך 40) דירות עם דודי שמש. 300 מ"ר תאים פוטוולטאים	20 דירות (כ-51%)	390 מ"ר
	ג. ללא דודי שמש מקסימום תאים פוטוולטאים (500 מ"ר)	26 דירות (כ-65%)	260 מ"ר

ב. איפוס אנרגיה בבנייה צמודת קרקע "דופלקס":

בניתוח ביצועי הדופלקסים הריאלי והאידיאלי, נראה כי שניהם יכולים להגיע לאיפוס אנרגטי, על ידי שימוש באמצעים וטכנולוגיות שונים (אשר להם עלות שונה). המשמעות היא, אם כן, כי ניתן להגיע לאיפוס אנרגטי ע"י השקעה פחותה יחסית (כפי שמוצג במבנה הריאלי). ניתוח העלויות של התרחישים השונים מוצג בסעיף הבא.

טבלה 16: איפוס אנרגטי בבנייה צמודת קרקע - סיכום

תרחיש	תרחיש	% בניין מאופס
מבנה יחוס	א. דוד שמש + תאים פוטוולטאים	57%
	ב. תאים פוטוולטאים בלבד	60%
מבנה ריאלי	א. דוד שמש + תאים פוטוולטאים	100%

100%	ב. תאים פוטוולטאים בלבד	
100%	א. דוד שמש + תאים פוטוולטאים	מבנה אידיאלי
100%	ב. תאים פוטוולטאים בלבד	

4.4. בחינת עלויות לבנייה רוויה מאופסת אנרגיה

בחינת העלויות המובאת כאן הינה תוצר של השוואת תוספת העלות המיוחסת לבנייה מאופסת אנרגיה לפי כל הפעולות שנעשו בהשוואה למקרי הייחוס, על מנת להגיע לאיפוס אנרגטי. בחינת העלויות מאורגנת לפי קטגוריות שונות: חלונות, בידוד, תכנון, איטום אוויר, מערכות אוורור ומ"א, תאורה, חימום מים וייצור אנרגיה סולאריים. כל אחת מן הפעולות תומחרה לפי אומדנים או ממוצעי הצעות מחיר (פירוט החישובים מופיע בנספח ב'). בנוסף, נלקחו בחשבון אלמנטים התורמים לחיסכון בעלויות הבנייה כמו תכנון קומפקטי המקטין את עלות מעטפת הבניין, והקטנת מערכות המיזוג בחלק מן התרחישים.

בבנייה הרוויה ניתן לראות שהשיפורים הנדרשים לאיפוס האנרגטי, הכוללים את שדרוג מעטפת הבניין וההכרח שבהתקנת מערכות האקלום על ידי הקבלן (לעומת ביצוע הכנות בלבד כמקובל לעיתים רבות בשוק, להרחבה ראו נספח ב'), מייקרים את עלות הבנייה ליחידה ב כ- 56 עד 58 אלף ₪. אך הגילוי המעניין והחשוב במחקר זה הוא שבאמצעות תכנון קומפקטי איכותי המתייחס לפוטנציאל האלמנטים הביו-אקלימיים ומצמצם את שטח המעטפת של הבניין (כפי שתואר בבדיקה המעשית), גובר החיסכון בעלויות הבנייה על התוספות. כך למעשה יחידה מאופסת אנרגיה בנוסף לטיבה המעולה, עשויה להיות זולה יותר לקבלן בכ 15,000 ₪ לעומת יחידת הייחוס בתרחיש הריאלי ובכ 4,000 ₪ לעומת יחידת הייחוס בתרחיש האידיאלי (טבלה 17) זאת לאור צמצום עלות ההוצאה על מעטפת המבנה, המהווה אחוז ניכר מעלות הבנייה.

טבלה 17: תוצאות השוואת העלויות בבנייה רוויה

האלמנט הירוק:	דירת ייחוס		דירה מאופסת אנרגיה		הפרש (דירה מאופסת אנרגיה פחות דירת הייחוס)	
	אופן חישוב עלות	סה"כ עלות	אופן חישוב עלות	סה"כ עלות	סה"כ הפרש עלות בתרחיש הריאלי (₪)	סה"כ הפרש עלות בתרחיש האידיאלי (₪)
תוספת עלויות לבנייה מאופסת אנרגיה:						
חלונות	ממוצע הצעת מחיר לפי מפרט חלונות	17,946	ממוצע הצעת מחיר לפי מפרט חלונות	29,200	11,254	11,254
תוספת בידוד	בידוד פנימי כתוספת לקיר ברנביץ'	0	בידוד חיצוני רציף בין האבן והבטון	לא מתקיים	8,885	0

8860		886		לא מתקיים	שיפור בפרטי הביצוע של איטום הפתחים	0	לא מתקיים	מעטפת אטומה (שיפור הסננה)
13,00016,000		13,00016,000			לפי אמדן מחירים למערכת משופרת ומותאמת	0	לא מתקיים	מערכות מיזוג אוויר
00				לא מתקיים	לא מתקיים	0	לא מתקיים	MVHR
12,00012,000		12,00012,000			חישוב עלות תאורה חסכונית לפי תכנון משופר	0	ללא גופי תאורה	תאורה
11,74016,065		11,74016,065			חישוב לפי הערכת גודל המערכת (KWp)	0	לא מתקיים	מערכת פנלים סולריים
00		2,0002,000			חישוב עלות ממוצעת	2,000	קולטן לפי מיקום הדירה בבניין	קולטני שמש
58,48755,319		סה"כ תוספת עלות הבנייה:						
חיסכון בעלויות בבנייה מאופסת אנרגיה:								
- 62,700- 71,258		174,825166,267			שטח מעטפת הדירה הקומפקטית כפול עלות	237,525	שטח מעטפת הדירה כפול עלות	תכנון קומפקטי (זיכוי מהקטנת מעטפת המבנה)
-4,214-15,939		סה"כ הפרש עלות הבנייה לדירה מאופסת אנרגיה בבנייה רוויה:						

בבנייה הפרטית המספרים מציגים תמונה שונה מן הבנייה הרוויה. שטח המעטפת גדול יותר (בגלל החזית הנוספת – הגג), ולכן תוספת העלות לשיפורים במעטפת המבנה גבוהה יותר. בנוסף, החיסכון בעלויות הבנייה נמוך יותר במקרה זה, כיוון שיחידת הייחוס הייתה קומפקטית למדי. כמו כן, עלות האיפוס האנרגטי והתקנת המערך הסולרי אינה מתחלקת בין יחידות. לכן, מאזן העלויות אינו מאפשר חסכון כמו בבנייה הרוויה. אלא, עלות הבנייה הכוללת של יחידת דופלקס מאופסת אנרגיה תהיה יקרה יותר בכ 48 אלף ₪ בתרחיש הריאלי עד 63 אלף ₪ בתרחיש האידיאלי.

טבלה 18: תוצאות השוואת העלויות הבנייה צמודת קרקע

הרכיב/ האלמנט הירוק	יחידת ייחוס		יחידה מאופסת אנרגיה		הפרש (יחידה מאופסת אנרגיה פחות דירת הייחוס)	
	אופן חישוב עלות	סה"כ עלות	אופן חישוב עלות	סה"כ עלות תרחיש ריאלי (₪)	סה"כ עלות תרחיש אידיאלי (₪)	הפרש עלות בתרחיש הריאלי (₪)
חלונות	ממוצע הצעת מחיר לפי מפרט חלונות	18,817	ממוצע הצעת מחיר לפי מפרט חלונות	44,000	44,000	25,183
תוספת בידוד	בידוד	0	בידוד חיצוני	19,659	28,159	19,659
						28,159

				רציפי בין האבן והבטון	פנימי כתוספת לקיר ברנוביץ'		
1,117	1,117	1,117	1,117	שיפור בפרטי הביצוע של איטום הפתחים	לא מתקיים	0	מעטפת אטומה (שיפור הסננה)
4,100	0	4,100	לא מתקיים	לפי אומדן	לא מתקיים	0	MVHR
הונח כי עלות הבנייה הן ביחידת הייחוס והן ביחידות המאופסות כוללת את גופי התאורה בנוסף להכנות ולהתקנות. כמו כן, הונח שבשל סוג הבנייה, סביר להניח שבחירת הגופים במקרה הייחוס (או בנייה שגריתית) ובתרחישים השונים תהיה בעלות דומה, בהתאם לסגנון האישי והתקציב האישי הרלוונטי. לכן התבטל סעיף התאורה בהשוואת העלויות בבניה זו.							תאורה
29,700	36,300	84,000	96,000	חישוב לפי הערכת גודל המערכת (KWp)	לא מתקיים	0	מערכת פנלים סולריים**
0	0	2,000	2,000	חישוב עלות ממוצעת	קולטן לפי מיקום הדירה בבניין	2,000	קולטני שמש
88,259	82,259	סה"כ תוספת עלות הבנייה:					
חיסכון בעלויות בבנייה מאופסת אנרגיה:							
-5,000	- 5,000	18,000	18,000	לפי אומדן מחירים למערכת משופרת ומותאמת	לפי אומדן	23,000	מערכות מיזוג אוויר
- 19,795	- 28,295	566,100	557,600	שטח מעטפת היחידה הקומפקטית כפול עלות	שטח מעטפת הדירה כפול עלות	585,895	תכנון קומפקטי (זיכוי מהקטנת מעטפת המבנה)
-24,795	-33,295	סה"כ חיסכון בעלות הבנייה:					
63,464	48,964	סה"כ הפרש עלות הבנייה ליחידת דופלקס מאופסת אנרגיה**:					

4.5. בדיקה השוואתית (ניתוח רגישות Sensitivity Analysis)

הבדיקה כללה סדרה של השוואות בין מודלים אשר נבדלים זה מזה אך ורק באסטרטגיה פאסיבית אחת (שיטה זו מוכרת גם בשם ניתוח רגישות – Sensitivity Analysis). בדרך זו ניתן להעריך את ההשפעה היחסית של כל אחד מאמצעי התכנון באופן עצמאי. לצורך בדיקה זו נבחנה רק הדירה

הדרומית בבניין המגורים, אולם התוצאות משקפות את בקירוב גם את ניתוח הרגישות של שאר מקרי המבחן.

טבלה 19: תוצאות הבדיקה ההשוואתית

מודל	סה"כ צריכת אנרגיה לאקלום (קוט"ש"מ"ר\שנה)	% שיפור	מודל בנייה רוויה עלות (ש)
1. מודל מקורי – מבנה ייחוס	53.6	-	-
2. תאורת LED	52.7	1.7	12,000
3. אוורור טבעי	47.75	10.9	0
4. זיגוג כפול	48.7	9.1	11,254
5. ברנוביץ' א' (הוספת בידוד)	44.7	16.6	לא קיים
6. ברנוביץ' ב' (הוספת בידוד כפול)	43.1	19.6	8,884.5
7. קיר מילואת בידוד	43	19.8	לא תומחר
8. איטום אויר (מ-1 ל-0.6 החלפות אויר)	49.85	7	886
9. שינוי גיאומטרי (תכנון קומפקטי) *	38.65	27.9	זיכוי 62,700

*בתרחיש האידיאלי

טבלה 19 מראה כי שילוב של פתיחת חלונות לאוורור טבעי (אוורור מפולש למשל, במקרה הנבחן) יכול להביא לחסכון של כ-11% בצריכת האנרגיה – בעיקר באנרגיה לצורך קירור. לבידוד, כידוע, חשיבות רבה בצמצום הצריכה, ומחקר זה מראה כי הוספת בידוד לקיר ברנוביץ' ($U\text{-Value} = 0.45$ W/m²K) יכולה להביא לחיסכון של כמעט 17% מצריכת האנרגיה המקורית. הכפלת הבידוד ($U\text{-Value} = 0.22$ W/m²K) מביאה לחיסכון של כ-20%, ולא וודאי כי המעבר בין 5 ל-10 ס"מ משתלם. הנתון המפתיע ביותר אולי, הוא ששינוי גיאומטרי לבדו (תכנון הארגון מרחבי, הפנייה מיטבית, צמצום שטח הפנים, ותכנון פתחים נכון) יכול להביא לחיסכון הגדול ביותר: כ-28% מצריכת האנרגיה. יש לציין כי תכנון מיטבי הוא מרכיב אשר אמור להיות ללא כל תוספת עלות – באופן אידיאלי, כל מתכנן אמור להכיר את עקרונות התכנון המובילים לחיסכון אנרגטי וליישם בהתאם. מקרים אלו כאמור נקודתיים וספציפיים – ניתן להסיק מהם עבור איפוס במצבים שונים אך יש להדגיש כי אלו שני מקרים מסויימים, עם תנאים מסויימים. שינוי מיקום, טכנולוגיה וכו' עשוי להוביל לתוצאות שונות אך מקרים אלו הוכיחו כי קיימת היתכנות לאיפוס מבנים בישראל ויש להמשיך ולבחון את תרחישים שונים ותנאים שונים (צפיפות עירונית גבוהה, פירוט תכנון פנים, חלופות למערכות ועוד).

5. בדרך לאיפוס אנרגטי – רגולציה, תקנים ומדיניות ממשלתית לעידוד

מבנים מאופסי אנרגיה

בשנים האחרונות ההכרה הבינלאומית בהכרח שבהתייעלות אנרגטית במבנים לטובת צמצום פליטות גזי החממה מניעה מדינות ליזום מדיניות ממשלתית שמטרתה לעודד בנייה מאופסת אנרגיה. אף שמדינות רבות כבר הכריזו על בנייה מאופסת אנרגיה כיעד ארוך טווח, יש הנמצאות בשלבים ראשוניים למדי של הגדרות למבנה מאופס אנרגיה בתחומן, יש הנמצאות בשלבים מתקדמים יותר של בדיקות הישומות הכלכלית והטכנולוגית למבנים מאופסים בשוק הבנייה, ולמעשה רק מספר בודד של מדינות מקיימות מדיניות ייחודית לבנייה מאופסת אנרגיה. מדיניות לאומית למבנים מאופסי אנרגיה אינה נוצרת יש מאין. במקומות בהם מתקיימת תשתית פעילה ומוצלחת של מדיניות ממשלתית בתחום ההתייעלות האנרגטית במבנים, המעבר למבנים מאופסי אנרגיה הוא מהלך אולטימטיבי מתבקש. כמו כן, השלב הראשון בתהליך יישום יעדים לאומיים לבנייה מאופסת אנרגיה באמצעות מדיניות ממשלתית הוא ניסוח הגדרה אחידה ומוסכמת למהו מבנה מאופס אנרגיה.

5.1. תקנים והגדרות חוקיות למבנים מאופסי אנרגיה בעולם

למונח "מבנה מאופס אנרגיה", כפי שסוקר בפרק 2, יש משמעויות שונות. על כן, על הגדרה או תקינה למבנה מאופס אנרגיה להיות בהירה, מתומצתת ומוסכמת על מנת שתוכל להיות אפקטיבית. מן ההכרח שההגדרה תכלול מינוחים מדידים ואת הגדרותיהם, בכדי שאפשר יהיה לאמת ולוודא את תפקודו של הבניין. למשל, על ההגדרה לכלול הבחנה למהם שימושי האנרגיה במבנה הדורשים איפוס, באילו כלי מדידה נמדדת צריכת האנרגיה, כיצד ייעוד המבנה משפיע על מדידתו ועוד. כמו כן, על מבנה מאופס אנרגיה לענות על תנאים הכרחיים נוספים כמו, איכות האוויר במבנה והנוחות התרמית בו, ולהתחשב בהיבטים סביבתיים נוספים³⁷. היכולת להגדיר מבנה מאופס אנרגיה, למדוד אותו ולמתוח גבולות אחידים ומקובלים למהותו ואופיו על ידי כלל העוסקים בסקטור הבנייה, היא הכרחית לקידום מנגנונים מדיניים מתאימים. להגדרה ולתקנים של מבנים מאופסי אנרגיה ישנם השלכות מכרעות לפיתוח אסטרטגיות תכנוניות להקמתם של מבנים מאופסי אנרגיה.

כאשר מתבוננים בדוגמאות של מבנים שהוסמכו כמאופסי אנרגיה בעולם, מסתמן שאלו לעיתים קרובות גם בניינים בעלי הסמכות לבנייה ירוקה. אך יש להבדיל בין תקנים לבנייה ירוקה לבין תקנים להתייעלות אנרגטית או תקנים לבנייה מאופסת אנרגיה³⁸. בניין מאופס אנרגיה עונה על דרישות שאפתניות ומובהקות יותר בתחום ההתייעלות האנרגטית מבניין בעל הסמכה לתקן בנייה ירוקה. בשונה מתקנים לבנייה ירוקה העוסקים במכלול התחומים המשפיעים על הסביבה הן בתהליך הבנייה והן במהלך חיי הבניין, תקנים להתייעלות אנרגטית (ומבנים מאופסי אנרגיה) מתמקדים בצמצום

³⁷ נ"פ The National Institute of Building Sciences (NIBS), Prepared for the U.S. Department of Energy
A Common Definition for Zero Energy Buildings, September 2015

³⁸ כפי שנסקרו, במקרים רבים, תקינה לבנייה מאופסת אנרגיה מתבססת על תקינה להתייעלות אנרגטית.

צריכת האנרגיה (עד לכדי איפוסם) בעת אכלוס המבנה³⁹. עם זאת, ברוב התקנים לבנייה ירוקה, למרכיב האנרגיה יש משקל רב, (ובד"כ הכבד ביותר), ועל כן יש ביניהם מן המשותף. כיוון שתקנים לבנייה ירוקה התפתחו והפכו יותר ויותר פופולריים בשוקי הבנייה העולמיים, הם עשויים להוות בסיס להתפתחות של מדיניות מתקדמת לבנייה מאופסת אנרגיה אם וכאשר סעיפי ההתייעלות האנרגטית בהם הם מרכיב משמעותי ומתקדם.

בנוסף, בשונה מתקנים לבנייה ירוקה, שהם במקרים רבים תקנים מרשמיים לצבירת ניקוד, תקנים להתייעלות אנרגטית נמדדים על סמך הצגת הצפי לתפקודו של המבנה או בחינת תפקודו בפועל. התקנים הללו יכולים להציב יעדים ספציפיים להתייעלות אנרגטית על-ידי צמצום צריכת האנרגיה באחוזים, מסך הצריכה של מבנה ייחוס, או על-ידי אמת מידה אבסולוטית וקבועה לצריכת אנרגיה Energy Use Intensity (EUI) הנמדדת בכמות האנרגיה הנצרכת (ביחידות קוט"ש למ"ר לשנה). אמת המידה האבסולוטית הנדרשת בתקנים משתנה מתקן לתקן בהתאם לאקלים המקומי, סוג המבנה ושימושו (מגורים לעומת משרדים, בתי ספר וכד'), והאם המבנה הוא חדש או לשיפוץ. במקרים רבים, סעיפי האנרגיה בתקנים לבנייה ירוקה מבוססים על תקנים להתייעלות אנרגטית כמו למשל תקן ה-LEED המסתמך על ה-ASHRAE האמריקאי, ות"י 5281 המסתמך על ת"י 5282. במקרים אחרים, תקנים ייחודיים ומחמירים להתייעלות אנרגטית עשויים להוות הכנה למבנה מאופסת אנרגיה, למשל תקן Passive House, כך שתוספת ייצור האנרגיה המתחדשת באתר תוכל להביא לאיפוס צריכת האנרגיה במבנה.

תקנים קיימים לבנייה ירוקה ולהתייעלות אנרגטית הם כלי למדידת הפעילות הוולונטרית בענף הבנייה, ובמקרים רבים הם אף מהווים תשתית לחקיקה מחייבת, או להפעלת מנגנונים מדיניים לעידוד המשק. תקנים להתייעלות אנרגטית מהווים מסגרת עבודה הנשענת על ידע ושיטות בנייה, אך בו זמנית מהווה בסיס לחדשנות ולפיתוח.

נכון לזמן כתיבת המחקר, תקינה ממשלתית למבנים מאופסי אנרגיה קיימת באופן וולנטרי במספר מצומצם של מדינות, בעיקר באירופה ובצפון אמריקה: בריטניה, גרמניה, צרפת, דנמרק, הולנד, ארה"ב. בנוסף למבנים שהם לחלוטין מאופסי אנרגיה, קיימת בעולם התייחסות ממשלתית למבנים שהם "כמעט" מאופסי אנרגיה או "מוכנים" לאיפוס אנרגיה⁴⁰. מבנים אלה מאופיינים בדרישה מחמירה להתייעלות אנרגטית הנמדדת בצמצום צריכת האנרגיה באופן משמעותי לעומת תקנות הבנייה המקומיות המחייבות. ביניהם בולטים למשל KfW Building Standard בגרמניה, Minergie בשווייץ, ו U.S. DOE Zero Energy Ready Home, בארצות הברית (Ecofys 2013).

³⁹ כאמור קיימות הגדרות שונות למבנים מאופסי אנרגיה, אך בעבודה זו אנו מתייחסים למדידת צריכת האנרגיה של המבנה במהלך איכלוסו.

⁴⁰ הכוונה היא לשורת התקנים במדינות אירופה החברות בדירקטיב האירופאית המאוחדת להתייעלות אנרגטית העונים על הוראות הדירקטיבה להוביל את שווקי הבנייה לבנייה מאופסת אנרגיה לקראת 2020, ולהתייחסות משרד האנרגיה האמריקאי לרף העליון במדרג של תקנים להתייעלות אנרגטית – שיפורטו בהמשך הפרק.

כמו כן, ישנו, כאמור, מגוון של תקנים וולונטריים עצמאיים, אשר אינם קשורים באופן ייחודי למנגנון ממשלתי (בין שהם למבנים מאופסי אנרגיה, או למבנים "מוכנים" לאיפוס אנרגיה) אך זוכים לעידוד ולתמיצים ממשלתיים.⁴¹

בסעיפים הבאים נסקור מנגנונים מן העולם עליהם מסתמכים קובעי מדיניות בבואם לשרטט מפת דרכים לאיפוס אנרגטי בבניינים, ומקרים בולטים בתקינה העולמית למבנים מאופסי אנרגיה, או מבנים הקרובים לאיפוס אנרגטי.

5.1.1. אירופה – הדירקטיבה האירופאית וההוראה למבנים "כמעט" מאופסי אנרגיה: nZEB - Nearly Zero-Energy Buildings,

EPBD recast - Energy Performance of Buildings Directive, 2010/31/EU

בשנת 2010 הכריזה האיחוד האירופאי על הוראה מחייבת להתייעלות אנרגטית מקיפה במבנים, לפיה החל משנת 2019 מבני ציבור חדשים בבעלות הממשלות, והחל משנת 2021 כלל המבנים החדשים יהיו "כמעט" מאופסי אנרגיה, nZEB, Nearly Zero-Energy Buildings. ההוראה כללה מסגרת כללית לעבודה לניסוח הגדרות חוקיות מקומיות במדינות החברות עבור ההגדרה של מבנה "כמעט" מאופס אנרגיה.

החלטת הדירקטיבה אפשרה למדינות החברות בו חופש הגדרה למהו מבנה שהוא "כמעט" מאופס אנרגיה, מתוך הכרה בקושי ובמורכבות הפוליטית, הכלכלית והארגונית העלולים לנבוע מהגדרה אחידה לכל המדינות החברות. ההנחיה הכללית, לפי הוראת הדירקטיבה, למבנה שהוא "כמעט" מאופס אנרגיה הוא מבנה שהיעילות האנרגטית בו גבוהה, ומעט האנרגיה הדרושה לו מגיעה ממקורות מתחדשים הכוללים ייצור אנרגיה מתחדשת באתר או בקרבתו. הניסוחים החוקיים המדויקים בכל מדינה עתידיים להיקבע בהתאם לאקלים ולשוק הבנייה המקומי ולפי מספר מאפיינים כמו: ישימות טכנולוגית וכלכלית, מסורת שיטות הבנייה המקומיות, אדריכלות וייעוד הבניין (מגורים, ציבור וכד'), והאם הבניין הוא חדש או לשיפוץ. כמו כן, הונחו המדינות החברות בדירקטיבה לגבש מסגרת לעבודת מדיניות לאומית ומפת דרכים שתאפשר ישימות מערכתית למימוש היעדים.⁴²

למעשה, בשל קשיים ארגוניים וביורוקרטיים, במקום להתחייב לאיפוס אנרגטי של ממש בחרו רוב המדינות החברות בדירקטיבה בהגדרות מקלות למדי, והתחייבו לצמצום של צריכת האנרגיה בהן במקום להתחייב לאיפוס. העובדה שהחברות השונות בחרו בהגדרות מקלות הביאה לכך שהמונח "איפוס אנרגיה" איבד ממשמעותו המובהקת, ומבנים "כמעט" מאופסי אנרגיה הם למעשה מבנים בעלי התייעלות אנרגטית ברמות שונות ולא דווקא ברמות המאפשרות איפוס אנרגטי ממשי. יחד עם זאת, יעדי צמצום צריכת האנרגיה אליה התחייבו המדינות החברות משמעותיים למדי. הטווח

⁴¹ ביניהם בולטים:

ZeroHaus, Passive-House, Minergie©-A, PHIUS+ 2015, zero source, 2030 Challenge, Living Building Challenge, Nearly net Zero Energy Building

⁴² למידע נוסף ניתן לעיין בנוסח ההחלטה:

<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings/nearly-zero-energy-buildings>

שהוגדר במדינות השונות לצריכת האנרגיה הוא בין 33 ל-95 קוט"ש למ"ר לשנה, בעוד שמרבית המדינות הגדירו רף עליון של כ-45 קוט"ש למ"ר לשנה.

על מנת לאפשר השוואה אחידה בין המדינות, יחידת המידה שנבחרה להגדרת צריכת האנרגיה במבנה שהוא "כמעט" מאופס אנרגיה היא כמות האנרגיה הראשונית (primary energy consumption) המקסימלית (קוט"ש למ"ר לשנה) בו. זאת בהתחשב במקדם ההמרה המקומי המתאר את היחס בין כמות האנרגיה הנצרכת בנקודת הקצה (הבניין), לבין כמות האנרגיה בעת ייצור האנרגיה, כולל איבודי האנרגיה הנובעים ממקורות הייצור וההובלה השונים⁴³. לעומת זאת, בחישובי צריכת האנרגיה, שימושי האנרגיה הנלקחים בחשבון על ידי החברות השונות משתנים בפועל ולא תמיד הם כוללים את חמשת השימושים הרווחים בהגדרות השונות לבנייה מאופסת אנרגיה: חימום, קירור, אוורור, מים חמים ותאורה. לבסוף, למרות דרישת הדירקטיבה להטמיע ייצור אנרגיה מתחדשת בבנייה שהיא "כמעט" מאופסת, עד כה, מעט מאד מדינות הגדירו דרישה מינימאלית לייצור אנרגיה באתר. עם זאת, כאמור המדינות בריטניה, גרמניה, דנמרק, הולנד וצרפת, ניסחו הגדרות למבנים שהם לחלוטין "מאופסי אנרגיה" (Ecofys 2014).

הטבלה הבאה מציגה מספר הגדרות ותכניות ממשלתיות של מדינות החברות בדירקטיבה אשר משמשות כמנגנונים מדיניים למבני מגורים "כמעט" מאופסי אנרגיה או מאופסי אנרגיה באירופה:

טבלה 20: הגדרות ותכניות ממשלתיות למבני מגורים מאופסים או כמעט מאופסים

מדינה	התכנית המדינית למבנים "כמעט" מאופסי אנרגיה	צריכת האנרגיה הראשונית המקסימאלית (kWh/m ² /year)	אנרגיה מתחדשת (RES) מינימאלית כאחוז מסך האנרגיה הראשונית המותרת	האנרגיה הנמדדת	סטטוס ומדיניות לאומית מייצגת
בריטניה UK	Zero Carbon Homes (2009) (הרחבה בסעיף א)	אפס	אין קביעה	חימום, קירור, מים חמים ותאורה קבועה	לאחר הצהרה על יעד שאפתני הקפאה ממשלת אנגליה את כניסתה לתוקף של מדיניות 2016 המחייבת את כל הבנייה למגורים להיות מאופסת פחמן (הרחבה בסעיף א)
גרמניה DE	KfW Efficiency House 40,55, 70 Renewable Energy Heat Act	התייעלות של 40,55 או 70 אחוז לעומת הדרישה להתייעלות אנרגטית בחוק הבניה EnEV	החוק מחייב שימוש באנרגיות מתחדשות לחימום בבנייני מגורים חדשים (הרחבה בנספח ג')	חימום, קירור, מים חמים ותאורה קבועה	(הרחבה בנספח ג')
	"EffizienzhausPlus"				תכנית ממשלתית לפרויקטי הדגמה לבנייה מאופסת אנרגיה
דנמרק DK	nNZE: Danish Building Regulation 2010	20	51-56% למרות שזו אינה דרישה בחוק. אך	אקלום ומים חמים ללא תאורה	Class 2020 מבנים שהם 75% יותר יעילים לעומת 2006

⁴³ primary energy consumption, אנרגיה ראשונית היא כמות האנרגיה הנמצאת בדלק הגולמי המשמש את רשת אספקת האנרגיה. לכל מקור דלקים, ורשת לאספקת אנרגיה יש גורמי המרה שונים לחישוב אספקת הקצה, שהיא צריכת האנרגיה בפועל במבנה עצמו.

Class 15 לבנייני מגורים עם צריכת אנרגיה מותרת גבוהה יותר ⁴⁴		בשל צריכת האנרגיה המזערית סביר שבניינים יסתייעו בייצור אנרגיה		(BR10) Class 2020	
תכנית ממשלתית לפרויקטי הדגמה לבנייה מאופסת אנרגיה				BOLIG+ Zero Energy Building	
60,000 יחידות דיור מאופסות עד 2015 מבני ציבור תחילה ולאחר מכן מגורים. הכוונה היא לחייב איפוס מבני ציבור החל משנת 2018, ובניינים פרטיים החל משנת 2020		ניתן חופש לבחור, אך ככל שה EPC נמוך יותר הבחירה באלמנטים לייצור אנרגיה מתחדשת באתר נעשית הכרחית וכדאית יותר	הגדרה המתבססת על Energy Performance Coefficient (EPC) כאשר EPC=0.4 המבנה הוא "כמעט" מאופס כאשר EPC=0 המבנה מאופס	EPG/EMG :new EPC standards NEEAP- National Energy Efficiency Action Plan 2011 NEN 7120 Standard: Energy Performance of Buildings – Determination Method (EPB)	הולנד NL
תכנית ממשלתית לפרויקטי הדגמה למבנים מאופסי אנרגיה			EPC=0	Energy Zero Building 2009	
ההגדרות למגורים משתנות בהתאם לייעוד המבנה, ומיקומו הגיאוגרפי והאם הבנייה חדשה. למשל, מבנה שעובר שיפוץ נדרש ל 80 kWh/m2/year	חימום, קירור, אוורור, מים חמים, תאורה ומכשירי חשמל לבנים	10% חובת ייצור מים חמים באמצעות קולטי שמש או, התחברות לתשתית רשת הניזונה לפחות מ 50% מקורות מתחדשים, או, תרומת האנרגיה המתחדשת היא לפחות 5kWhwep/m2/year	50 kWh/m2/year	Buildings of low consumption (BBC) BBC-effinergie®	צרפת FR
				בנוסף קיים מנגנון עצמאי בשוק ל Positive Energy Buildings	
	חימום, קירור תאורה קבועה ומים חמים	25%	180	NZEB Action Plan	קפריסין CY
החל מ 2015 מבנים חדשים מחויבים לתקן פאסיב האוס	חימום, מים חמים ומכשירי חשמל	ללא מינימום	אימוץ תקנים כמו Passive House	Brussels Air, Climate and Energy Code COBRACE	בלגיה (בריסל) BE

לאור הנלמד עד כה באירופה, ובגלל שיקולים ארגוניים ופוליטיים, עולה ספק לגבי יעילות ההגדרה הכוללת של הדירקטיבה כבסיס מספק להשוואה בין המדינות החברות בו. כפי שמוצג בטבלה,

⁴⁴ יעד ביניים מקל יותר נקבע מראש לשנת 2015, לבנייני מגורים, והוא מוגדר באופן תפקודי עבור צריכת האנרגיה לאיקלוס מים חמים ואוורור למ"ר מאוקלס.

קיימים פערים בהתייחסות לצרכני האנרגיה הנמדדים. כמו כן, כשבוחנים לעומק את ההגדרות השונות עולות סוגיות נוספות כמו שיטות שונות לחישוב השטח המאוקלם במבנה בהתאם לחוקי בנייה מקומיים, יחסים משתנים בין מאזן דרישת/צריכת האנרגיה במבנה לעומת אספקה/ייצור האנרגיה.

הדוגמא המובהקת והמתקדמת ביותר מבין חברות הדירקטיבה לקידום מדיניות למבנים מאופסי אנרגיה (ופחמן) היא מאנגליה.

אנגליה - Zero Carbon Homes:

באנגליה, שבה כמחצית מפליטות הפחמן הן ממבנים, כחלק מן המאמץ הלאומי להתמודדות עם שינוי האקלים העולמי, התחייבה הממשלה להפחית את פליטות הפחמן מבניינים ב 80% עד לשנת 2050, ביחס לשיעור הפליטות משנת 1990. בשנת 2007 פרסמה הממשלה מסמך הצהרה Building A Greener Future: Policy Statement, וב-2008 את תכנית הפעולה Climate Change Act, לפיה החל משנת 2016 ידרשו כלל בנייני המגורים החדשים לאיפוס אנרגטי, (zero carbon homes), ולאחר מכן, החל משנת 2019, יתווספו לאתגר זה יתר המבנים החדשים, שאינם למגורים (HM Government, 2008).

על מנת לגבש אחידות למושג בנייה מאופסת פליטות, הוקם בשנת 2008 הארגון ללא מטרות רווח Zero Carbon Hub. עבודתו היא לארגן ולנהל את התהליך המשותף למגזר הציבורי והמגזר העסקי שבסופו הוגדרו יעדים ברורים וישימים למבנים מאופסי אנרגיה באנגליה, המקובלים הן על הממשלה והן על ידי המשק. התהליך התרחש באמצעות שיתוף של כ-500 אנשי מקצוע ונוגעים בדבר הכוללים: יזמים ובעלי בתים, רשויות שלטון מקומיות, ספקי חשמל, ספקים של חומרי הבנייה, מנהלי תחזוקת מבנים, יועצי בנייה ירוקה ואנרגיה ואחרים.

מימוש היעד עתיד היה להתבצע באמצעות עדכון פרוגרסיבי של חוקי הבנייה, בכפוף ליכולת השוק לממשם באופן נרחב, ובאמצעות מנגנונים ממשלתיים לעידוד המשק. על אף שממשלת אנגליה הקפיאה ברגע האחרון את כניסתה של מדיניות 2016 לתוקף, קיימת באנגליה הגדרה לאומית מוסכמת למינוח בניין מגורים מאופס אנרגיה וכיצד יש למדוד אותו. Zero Carbon Homes מבוסס על סדרת תקנות קיימות בחוק הבנייה להתייעלות אנרגטית. בבסיסו נמצאת צריכת האנרגיה לפי תקנות חוק הבנייה, שהן בעצמן הוחמרו בכ- 44% לעומת שנת 2002 (Zero Carbon Hub, 2014).⁴⁵

איפוס פליטות הפחמן מתייחס לפחמן הנפט לצורך חימום, קירור, אוורור, מים חמים והארה במבנה (Regulated Emissions). צריכת החשמל לבישול, צריכה של מכשירי חשמל כדוגמת מחשבים, מכשירי טלוויזיה (Unregulated Emissions) - אינה מחושבת במבנה זה (HM Government, 2008).

⁴⁵ דף ההתייעלות האנרגטית בתקנות הבנייה החמיר בין השנים 2002 ו 2013, בין סעיף PartL2002 ו PartL1A של 2013 Carbon Compliance בחוק הבנייה, באופן פרוגרסיבי ומידי כשלוש שנים.

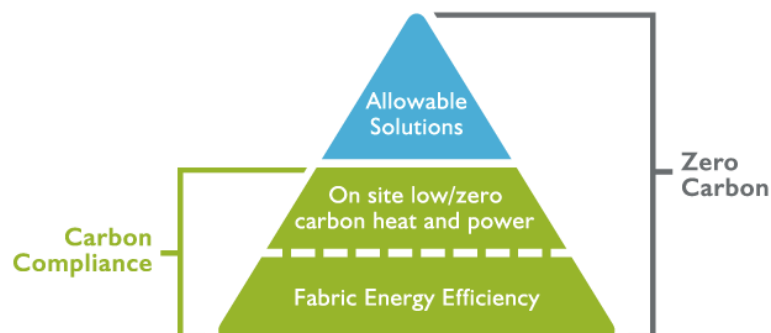
מבנה מאופס פליטות לפי Zero Carbon Homes⁴⁶ עונה על שלוש קטגוריות עיקריות ומחייבות:

א. Fabric Energy Efficiency Standard (FEES): בבסיסו נמצאת תקינה לאומית מחייבת למעטפת בניין איכותית ולשמירה על נוחות אקלימית בתוך הבית, המתייחסת לערכי ההתנגדות התרמית של חלקי המעטפת השונים של הבניין, ללא קשר ליעילות מערכות האקלום או מקורות הדלקים באספקת האנרגיה מן הרשת. על כן, ההתייעלות האנרגטית של המעטפת מחושבת כמותית ביחידות של kWh/m²/year (למגורים מומלצת צריכת אנרגיה שנתית של בין 39 ל-46 קוט"ש/מ"ר).

ב. On site low/zero carbon heat and power: פליטות הפחמן כתוצאה מצריכת אנרגיה לחימום, קירור, אוורור, מים חמים ותאורה קבועה, צריכות להיות שוות או נמוכות מן הרף המכונה Carbon Compliance, הנמדד ביחידות kg/m²/year של CO₂. אלו יחידות פליטות הפחמן הנותרות לאחר צמצום צריכת האנרגיה לאקלום באמצעות שיפורי המעטפת בשלב הבסיס. חלק זה כולל גם את מערכות הבניין, וכן אלמנטים לייצור אנרגיה באתר כמו פאנלים סולאריים המותקנים על גגות המבנים, Ground source heat pump, חימום מים תרמו-סולארי וכו'. רמות הפליטה השנתיות המותרות לאחר שלב זה הם בין 10 ל-14 ק"ג למ"ר.

ג. Allowable Solutions: השלב השלישי והאחרון הוא איפוס פליטות הפחמן הנובעות לאחר צריכת האנרגיה לאקלום, אוורור ותאורה קבועה בבניין באמצעות אנרגיה מתחדשת באתר או בקרבתו. באם שלבים 1 ו-2 לא הובילו לאיפוס, חלק זה מכיל מרשימה של פתרונות אפשריים מורשים (לאיפוס אנרגטי) הנקראת Allowable Solutions. המטרה היא לעודד כמה שיותר יזמים ותעשיינים להיכנס לרשימה זו של אלמנטים המשלימים את איפוס פליטות הפחמן מבניינים. רשימת הפתרונות האפשריים כוללת אמצעים שנבדקו כבעלי תועלת כלכלית גבוהה וממשית. יצוין כי רשימת הפתרונות האפשריים (Allowable Solutions) עדיין נמצאת בשלבי גיבוש.

תרשים 29: המבנה והרציונל העומדים מאחורי ההגדרה הבריטית למבנה Zero Carbon



⁴⁶ יש לציין כי מסיבות פוליטיות בבריטניה תכנית זו נמצאת כעת בהקפאה וממתנה לתקצוב מחודש. נתון זה מעיד על כך שאף תכניות מבטיחות אינם יכולות לשאת תוצאות בהיעדר תמיכה פוליטית. פרק ההמלצות במסמך זה מציין את מחייבות ההנהגה המקומית ו/או הארצית כתנאי למימוש בינוי מאופס אנרגיה.

5.1.2 ארצות הברית – הגדרות ותכניות לאומיות למבנים מאופסי אנרגיה ומבנים "מוכנים" לאיפוס אנרגטי

בארה"ב עדיין לא קיימת מדיניות חקיקה המחייבת בנייה מאופסת אנרגיה. זו נדחתה מספר פעמים במדינות שונות בארצות הברית. יחד עם זאת, משרד האנרגיה הלאומי, באמצעות ה-NIBS (National Institute of Building Science) שהינו גוף המשתף קהילה רחבה של נוגעים בדבר, פיתח את ההגדרה הממשלתית הלאומית המקובלת למבנה מאופס אנרגיה. בנוסף לניסוח הגדרה לבניין מאופס אנרגיה, הוגדרו גם מצבים בהם מספר בניינים חולקים מקורות אנרגיה מתחדשים, כמו למשל: קמפוסים מאופסי אנרגיה, קהילות מאופסות אנרגיה וכדומה.⁴⁷

הגדרת מבנה מאופס אנרגיה לפי משרד האנרגיה האמריקאי:⁴⁸

" מבנה יעיל אנרגטית, אשר כמות האנרגיה הנצרכת בו (במאזן שנתי של אנרגיה ראשונית), שווה או קטנה לכמות האנרגיה המיוצאת המיוצרת באתר ממקורות מתחדשים."

אופן החישוב, במקרה זה, הוא:

אנרגיה נצרכת = סה"כ (צריכת אנרגיה באתר X מקדם אנרגיה ראשונית) – סה"כ (ייצור אנרגיה X איבודי אנרגיה בייצוא).

לצורך חישוב כמות האנרגיה המתחדשת במבנה מאופס אנרגיה, תינתן בארה"ב האפשרות להשתמש בתעודות רכישה של אנרגיה מתחדשת מאתר אחר, Renewable Energy Certificates (REC), מנגנון המאפשר הבטחת רכישה של אנרגיה מתחדשת המזינה את הרשת. מנגנון זה מעודד את רשויות החשמל להגביר את ייצור החשמל מאנרגיות מתחדשות במקום הייצור המזהם הקונבנציונאלי, ועשוי למסייע לאיפוס אנרגטי של מבנים גדולים כמו בנייני מגורים גבוהים, ומבנים הממוקמים בצפיפות עירונית גבוהה ובתנאים בהם לא ניתן לממש באתר ייצור אנרגיה בכמות מספקת לכלל צריכת האנרגיה (מקור: (NIBS,2015).

בנוסף להגדרת המונח מבנה מאופס אנרגיה, קיים בארצות הברית תקן למבנים "מוכנים" לאיפוס אנרגטי. התכנית DOE's Better Buildings כוללת מסלול למבנים "מוכנים" לאיפוס אנרגטי: Zero Energy Ready Home (ZERH) (2011).⁴⁹ ⁵⁰ לפי הגדרת משרד האנרגיה האמריקאי, מבנה

⁴⁷ NIBS הוא ארגון ללא מטרת רווח שאינו ממשלתי אך הוקם על ידי הקונגרס לערוך מחקרים מסוג זה.
⁴⁸ An energy-efficient building where, on a source energy basis, the actual annual delivered energy is less than or equal to the on-site renewable exported energy

Since $E_{\text{source}} \leq 0$, the building would be a Zero Energy Building.

⁴⁹ משרד האנרגיה האמריקאי, באמצעות ה-Building Technologies Office (BTO) מנהל את התכנית America Program המקדמת ויוצרת מנגנוני תקינה ותכניות לעידוד לבנייה איכותית למגורים. מטרתה להוות מקור מימוני וניהולי למחקר ופיתוח ידע ופרקטיקה בדגש על חדשנות, איכות, שיוויוניות, ונוחות בבנייה למגורים. התכנית Better Buildings נקראה בגרסתה הקודמת Builders Challenge (2008) ולמעלה מ-14,000 מבנים הוסמכו מאז 2008.

⁵⁰ תקן להתייעלות אנרגטית של המשרד להגנת הסביבה (EPA), Energy Star, הוא מבנה שעבר פיקוח והסמכה בתהליך מרשמי או תפקודי והוא בעל התייעלות של 15-30% בצריכת האנרגיה ביחס לבנייה חדשה לפי חוק הבנייה המחייב, IECC 2009.

"מוכן" לאיפוס אנרגיה הוא מבנה מגורים או מבנה מסחרי המשיג צמצום משמעותי בדרישת האנרגיה על ידי שילוב אמצעים להתייעלות אנרגטית, כך שהאנרגיה החיונית לתפקוד הבניין עשויה להתקבל במלואה אם תתווסף למבנה מערכת ייצור של אנרגיה מתחדשת.⁵¹

כמו כן, מבנה Zero Energy Ready Home (ZERH), נמדד בקטגוריות נוספות לאנרגיה הכוללות את איכות הבנייה, איכות מערכות מיזוג האוויר, איכות האוויר ועוד (ראו נספח ג'). תחת הקטגוריה להתייעלות אנרגטית, התכנית מחייבת התייעלות של בין 45.5% - 52% לעומת חוק הבנייה המחייב (IECC 2012). בהתאם לאזור האקלים (בארצות הברית שמונה אזורי אקלים), נדרשים רמות התייעלות שונות וייצור האנרגיה באתר הופך מרשות לחובה.

על מנת לעודד את הציבור ואת היזמים והקבלנים להצטרף למאמץ הכולל לקידום בנייה חסכונית באנרגיה, כוללת התכנית מערך מידע ושיתופי פעולה לשירותי מימון, Zero Energy Ready Home Lender Partner. המשרד אף מממן פיתוח של כלי עבודה טכניים לטובת העוסקים בענף הבנייה המאפשרים להעריך את התכנון בו זמנית הן בפרמטרים להתייעלות אנרגטית והן בפרמטרים כלכליים, לטובת תכנון אפקטיבי וישים כלכלית, וכן, סדנאות למידה (כולל וובינרים - סדנאות אינטרנטיות), מאגרי מידע אינטרנטיים על מבנים לדוגמא והנחיות להדרכת בעלי המקצוע.

5.1.3 הסמכה בינלאומית לאיפוס אנרגטי

א. Net Zero Energy Building Certification TM (NZE)

NZEB היא התוכנית הבין-לאומית היחידה, נכון למועד כתיבת מסמך זה, אשר מציעה הסמכה וולונטרית למבנים מאופסי אנרגיה, כחלק ממכלול של שבע קטגוריות להסמכה השייכות לתכנית ה Living Building Challenge המנוהלת על ידי ה ILFI (International Living Future Institute), ארגון בינלאומי שהוקם בשנת 2006 במטרה לעודד בנייה לפי מדדים מתקדמים ביותר לשמירה ולשיקום הסביבה תוך כדי חיזוק ערכים חברתיים וכלכליים.⁵²

ההסמכה למבנים מאופסי אנרגיה, Net Zero Energy Buildings, ניתנת רק לאחר בדיקה ווידוא בפועל של צריכת האנרגיה במשך שנה, לאחר בנייה ואכלוס, ובתנאי שהם מתפקדים כמאופסי אנרגיה. כמו כן, הגדרת התקן למבנה מאופס אנרגיה מחמירה ביותר: על מאה אחוז צריכת האנרגיה בפרויקט להיות מסופקת על ידי מערכת ייצור אנרגיה מתחדשת באתר, על בסיס מאזן שנתי של הזנת רשת החשמל, ללא שימוש בשריפת דלקים מוצקים באתר (ללא תנורי אח או גנרטורים למיניהם) וללא רכישת אנרגיה ירוקה ממקורות אחרים ברשת.

בנוסף להגדרה זו, בנייני NZEB צריכים לעמוד בקריטריונים נוספים של בנייה חסכונית במשאבים כגון, איפוס צריכת המים, שיפור אקולוגי, וגם קריטריונים מדידים פחות, ושאינם בהכרח קשורים

⁵¹ A net zero-energy building (ZEB) is a residential or commercial building with greatly reduced energy needs through efficiency gains such that the balance of energy needs can be supplied with renewable technologies.

⁵² חמש "עלי הכותרת" של ההסמכות הן: Place, Water, Energy, Health & Happiness, Materials, Equity and Beauty הכוללות 20 סעיפים מחייבים בסך הכל.

לאנרגיה, אותם מגדיר התקן מלבד איפוס האנרגיה, כגון: קטגורית Beauty and Spirit וכן Inspiration and Education.

נכון לכתיבת מסמך זה, הוסמכו או נמצאים בתהליכי הסמכה, עשרות בניינים ברחבי עולם. כולם בניינים קטנים עד בינוניים. ביניהם בנייני חינוך; כיתות לימוד ומעבדות, מרכזי מחקר או מבקרים ומשרדים. חמישה מהם למגורים, מתוכם גם פרויקט רטרופיט אחד.

5.2. תקני פאסיבהאוס להתייעלות אנרגטית

למבנים מאופסי אנרגיה ולמבנים יעילים אנרגטית (אשר אינם מאופסים) יש תכונות משותפות רבות. כיוון שמנגנונים רבים לאיפוס אנרגיה מתבססים במידת מה על תקנים להתייעלות אנרגטית, מובאת להלן סקירה קצרה של תקנים קיימים להתייעלות אנרגטית.

א. PassivHaus

פאסיב האוס הוא תקן בינלאומי (נוסח במקור בגרמניה) מחמיר להתייעלות אנרגטית מקסימאלית ולצריכת אנרגיה מצומצמת ביותר במבנים. על כן הוא מהווה מסלול למוכנות לאיפוס אנרגיה. דרישות התקן הן תפקודיות ומחולקות לשלושה עמודי תווך:

1. הגבלת צריכת האנרגיה לחימום וקירור	דרישה שנתית לאנרגיה לחימום ≥ 15 קוט"ש למ"ר לשנה עומס שיא לחימום ≥ 10 וואט למ"ר דרישה שנתית לאנרגיה לקירור ≥ 15 קוט"ש למ"ר לשנה עומס שיא לחימום ≥ 8 וואט למ"ר
2. הגבלת צריכת האנרגיה הראשונית	צריכת אנרגיה שנתית כללית מן המקור 120 קוט"ש למ"ר לשנה
3. דרישה לאטימות מעטפת הבניין	≥ 0.6 החלפות אוויר בשעה בלחץ של 50 פסקל

תקן זה כולל גם עקרונות תכנוניים מדידים עבור תנאי נוחות מדידים ומוגדרים בבניינים. היתרון של התקן הוא החופש שניתן למתכנן לבחור בכל שיטה או יישום ובפרט שאלו מאפשרים את האיכות הנדרשת. עם זאת, עומדת מאחורי התקן גישה תכנונית המבוססת על היסודות הבאים:

1. מעטפת המבנה מתוכננת ומבוצעת היטב על מנת למזער את פליטות החום מן המבנה. היא מבודדת מאוד, נטולת גשרים תרמיים וכמעט לחלוטין אטומה.
2. תכנון פאסיבי סולארי על ידי הפניית המבנה לשמש אך גם תכנון המקפיד על הצללה.
3. מערכת אוורור מכאנית יעילה, בריאה ומאוזנת עם יכולת החלפת חום בין האוויר היוצא והאוויר הנכנס.
4. תכנון קומפקטי של המבנה עם יחס קטן בין שטח המעטפת ונפח החלל.
5. מערכות ומכשירי החשמל בעלי יעילות אנרגטית גבוהה.

באמצעות שילוב העקרונות הללו, בנייני פאסיב האוס צורכים כמות קטנה של אנרגיה, כך שמערכת סולארית קטנה וכלכלית יכולה לספק את כלל צריכת האנרגיה שלהם.

ב. PHIUS+ 2015 תקן הפאסיב האוס החדש מארצות הברית

תקן אמריקאי המבוסס על ההיגיון המבני והכלכלי המקורי של תקן ה PassivHaus, אך מאחוריו עומדת התפישה כי "מידה אחת מתאימה לכל" עלולה להוביל לפתרונות שגויים, בלתי כלכליים ולכן בלתי ישימים⁵³. התקן כולל את שלושת עמודי התווך של הפאסיב האוס המקורי, אך לכל אתר ניתנת הגבלה נפרדת לצריכת האנרגיה לחימום וקירור בהתאם לנקודת האופטימיזציה הכלכלית והאנרגטית האפשרית למיקום הגיאוגרפי והאקלימי הקונקרטי (באמצעות אלגוריתם לחישוב).. צריכת האנרגיה הראשונית הכוללת של המבנה נשארה זהה להגדרה המקורית בגלל התחייבויות בינלאומיות להפחתת פליטות.

מבנים מוסמכים לתקן PHIUS+ עומדים בראש סולם התקנים של משרד האנרגיה האמריקאי, מעל לסטטוס של DOE Zero Energy Ready.

5.3. מנגנונים ומדיניות לעידוד בנייה מאופסת אנרגיה

קביעת יעדים לאומיים לבנייה מאופסת אנרגיה מניעה תהליכי מדיניות ממשלתית למימושם. מדיניות לבנייה מאופסת אנרגיה מורכבת הן ממדיניות להתייעלות אנרגטית בבניינים, והן ממדיניות לשילוב ייצור אנרגיה מתחדשת בבניינים.

ניתן לחלק את מנגנוני המדיניות להטמעת התייעלות אנרגטית ומבנים מאופסי אנרגיה לשמונה סוגים/קבוצות עיקריות: 1. הגברת המודעות הציבורית, 2. שיפורים בחוקים ותקנות הבנייה 3. הסמכת בניינים לפי דירוג אנרגטי, 4. מתן מידע והקניית ידע על ידי הכשרות לקהילה המקצועית, 5. עידוד פרויקטי חלוץ לדוגמא, 6. פיקוח ומעקב אחר צריכת אנרגיה בבניינים, 7. מתן תמריצים כלכליים וכלי מימון, 8. השקעה במחקר ופיתוח⁵⁴.

רשימה זו כוללת מנגנונים מדיניים להתייעלות אנרגטית בבניינים, גם כאשר הם אינם מכוונים באופן ייחודי לבנייה מאופסת אנרגיה. למעשה נכון להיום, מדינות המקדמות בנייה מאופסת אנרגיה נשענות באופן מוצהר ומכוון על מנגנונים קיימים להתייעלות אנרגטית. מנגנונים אלה מוכרים לציבור המתכננים והיזמים ולמוסדות השלטון. נכון לכתיבת מסמך זה, מנגנונים לעידוד ולחקיקה הנוגעים באופן ייחודי למבנים מאופסי אנרגיה הם נדירים. כאשר ישנם כאלה, מדובר בעיקר בעידוד מחקר ופיתוח, עידוד פרויקטי חלוץ, והקניית ידע לאנשי מקצוע.

על מנת שיהיו אפקטיביים, מנגנוני מדיניות מסוגים שונים משתלבים אחד בשני. למשל, תמריצים כלכליים מתגבשים סביב תקנות הבנייה ודירוג אנרגטי של בניינים, פרויקטי חלוץ או שקיפות המידע

⁵³התקן פותח על ידי קבוצת חוקרים אמריקאית בשיתוף פעולה עם משרד האנרגיה האמריקאי, ותכנית

Building America שהוזכרה בפרק 5.

⁵⁴ רשימה זו מסודרת לפי פופולריות המנגנון בקרב מדינות אירופה ב 2014, כאשר יותר מדינות חברות נעזרות בהגברת המודעות הציבורית מאשר משקיעות במחקר ופיתוח. בשנת 2012 התמריצים הכלכליים עמדו בראש הרשימה, עם אותו מספר המדינות שנעזרו בהם. כמו כן, לעיתים רבות מנגנונים אלו אינם משקפים מדיניות המכוונת באופן ייחודי למבנים הקרובים למאופסי אנרגיה לבנייה הירוקה באופן כללי (Ecofys, 2014, eceee).

לציבור (בתחום הגברת מודעות הציבור) נשענים על תמריצים כלכליים (הרחבה בטבלה 21). הדבר מעיד על מורכבות האינטגרציה האירגונית הנדרשת להם. חשוב שכלי מדיניות יהיה נהיר ופשוט. שיציג תמונה ארוכת טווח אך גם יעדי ביניים בין הסטטוס-קוו והיעד.

טבלה 21: דוגמאות מן העולם למנגנוני מדיניות להתייעלות אנרגטית

שיפורים בחוקים ותקנות הבנייה	
תקנים הם כלי למדידת הפעילות הוולונטרית בענף הבנייה, אך במקרים רבים בשלב מתקדם של אימוץ חדשנות, בו יש ודאות למוכנות השוק, הם עשויים להוות תשתית לחקיקה מחייבת, או להפעלת מנגנונים מדיניים לעידוד המשק לאימוצם. כמו כן, תקנים מהווים מסגרת עבודה הנשענת על ידע ושיטות בנייה, אך בו זמנית הם מהווים בסיס לחדשנות ופיתוח. סעיף זה כולל את הידוק הדרישות להתייעלות אנרגטית בחוקים הקיימים וגיבוש מפת דרכים לחקיקה אפקטיבית נוספת בהתאם לאסטרטגיה כוללת בין-משרדית ולאומית.	
בריטניה	קיימת הגדרה לאומית למבנה מאופס אנרגיה במאזן צריכת האנרגיה השנתית המבוססת על חוקי הבנייה הקיימים להתייעלות אנרגטית (Code for Sustainable Homes) ואלמנטים משלימים לצריכת אנרגיה מתחדשת. הגבלת צריכת האנרגיה המוכתבת בחוק הבנייה עד לכ 44% לעומת שנת 2002.
קליפורניה	אימוץ תקן התייעלות אנרגטית באופן מחייב כחלק מקוד הבנייה. CAL Green California Green Building Code שלא כמו בכל מדינות ארצות הברית, חוק הבנייה המחייב של קליפורניה כולל פרק אנרגיה המחמיר יותר מ IECC.⁵⁵
מסצ'וסטס	אימוץ תקן התייעלות אנרגטית באופן מחייב כחלק מקוד הבנייה.
גרמניה	התייעלות אנרגטית : Energy Saving Act and Energy Saving Ordinance (EnEV 2009, 2014, 2016) EnEV הוא החוק המחייב התייעלות אנרגטית של חלקי מעטפת הבניין. ב 2016 יכנס לתוקף עדכון החוק ובו שיפור של כ 12.5% בהתייעלות האנרגטית ביחס לגרסת 2014 ו25% ביחס לגרסת 2009. דרישה לייצור אנרגיה מתחדשת לחימום (שמש, גיאותרמי): Renewable Energies Heat Act EEWärmeG 2009.
הולנד	NEEAP- National Energy Efficiency Action Plan 2011 NEN 7120 Standard: Energy Performance of Buildings – Determination Method (EPB) מתייחס ל EPC של בניינים, הרף של שנת 2015 הוא 50% בהשוואה ל 2007.
צרפת	•The Thermal Regulation 2012 •low-consumption buildings: <i>bâtiments basse consommation</i> or BBC

⁵⁵ CALGreen has both mandatory requirements that are required across the state and voluntary provisions that could be adopted by local jurisdictions and which go beyond the mandatory requirements in their efficiency targets. The voluntary provisions are called as Tier 1 and Tier 2 where Tier 2 is intended to require greater levels of efficiency.

•French Environment and Energy Management Agency,ADEME בנייני מגורים חדשים המתוכננים לצריכת אנרגיה הנמוכה מ 50 קוט"ש של אנרגיה ראשונית למ"ר לשנה לחימום, קירור, מים חמים, אוורור תאורה, עם שינויים קלים לפי אקלים וגובה מפני הים. על מנת להפוך למבנה שצריכתו כמעט אפסית יש להוסיף ייצור אנרגיה באתר. נכון להיום ההגדרה מתבססת על הוראות קיימות בחוקי הבנייה הקיימים. עד 2011 כ 160 אלף מבנים ביקשו לקבל הסמכה.	
---	--

דירוג אנרגטי לבניינים	
דירוג מבנים הוא כלי חשוב להגברת המודעות והנראות של מבנים יעילים אנרגטית, ולמעקב אחר הפער שבין תכנון להתייעלות אנרגטית וחסכון אנרגטי בפועל, הנובע הן מכשלים בתכנון ובביצוע של פרויקטים, כיוון מערכות בבניין והתנהגות הדיירים.	
גרמניה	חובת הצגת דירוג אנרגטי בעת מכירת דירות כחלק מחקיקת Energy Saving Ordinance 2014
צרפת	Energy Performance Certificate (EPC) מסמך המאשר את הדירוג האנרגטי של יחידת מגורים או בניין מגורים, המחוייב בתהליכי עסקאות מכירה או השכרה של יחידות מגורים, או בבנייה חדשה. הדירוג האנרגטי מתחלק לשתי קטגוריות: רמת ההתייעלות האנרגטית של הבניין לפי צריכת האנרגיה הראשונית וההשפעה הסביבתית בהתאם לפליטות הפחמן של המבנה. על מנת לקבל תעודה, המבנה צריך לעמוד בהגדרות להתייעלות אנרגטית, אך גם בדרישות לבטיחות, קיימות ותפעוליות מערכות האיקלום בבניין והתאורה. ההערכה היא שלמעלה מחמישה מיליון תעודות דירוג אנרגטי נוצרו עד כה בצרפת.
בלגיה(בריסל)	הוראות ה Energy Performance of Buildings (PEB) התקינה המקומית להתייעלות אנרגטית משנת 2008, מבוססת על תקן תפקודי לדירוג אנרגטי. בכל עסקת מכירה או השכרה של נכסים בבריסל, חייב הנכס להציג תעודת דירוג אנרגטי.
אוסטריה	Energieausweis-Vorlage Gesetz תעודת דירוג אנרגטי לבניינים לפי צריכת האנרגיה לחימום, קירור ואוורור המבנה לפי אמת מידה של כמות הקוט"ש למ"ר לשנה. תעודה זו מופקת בעת שיפוץ, מכירה או השכרה של נכסים.
פינלנד	נכון לשנת 2011, כמעט מחצית מהבתים הפרטיים וכ-37% מהמבנים המשותפים שנבנו זכו לדירוג אנרגטי A, לפי מקומי תקן מחייב להתייעלות אנרגטית. מתקיים תהליך להחמרת דרישות התקן במטרה להגיע ל- nearly zero energy.
ארה"ב	Energy Star Portfolio Manager (ESPM)• Home Energy Rating System (HERS)• דירוגים של המשרד להגנת הסביבה ומשרד האנרגיה, המהווים בסיס להסמכה לתקינה ומתן תמריצים כלכליים ליזמים מסחריים ופרטיים.

הכשרות מקצועיות (תיאורטיות ומעשיות) והפצת הידע מסייעות להגברת הביקושים וההיצע	
הולנד	Spring Agreement - התארגנות קבוצות חברות בנייה לטובת היערכות לרגולציה הממשלתית
בלגיה	הדרכות על שימוש ותפעול מבנים יעילים אנרגטית: - פתיחת מרכזי הדרכה לציבור הרחב. מתן פגישות ייעוץ. - סקטור הבנייה חוזק באמצעות הכשרות לכלל המקצועות הרלוונטיים בשוק הבנייה, מחקר איסוף הידע הקיים, פרסום תוצאות מעקב אחר צריכת אנרגיה, פרסום מאמרים וספרים רבים בנושא.

פרויקטי חלוץ, פרויקטים לדוגמא	
מהווים יצירת הזדמנויות להתנסות, למידה ולהפצת הידע	
בריטניה	עידוד ישובים אקולוגיים להפוך למאופסי אנרגיה: ישובים אקולוגיים הם ישובים עד 15 אלף בתי אב, הנבנים באנגליה בתמיכת הממשלה ובין היתר מטרתם לשמש דוגמא למופת לפיתוח מקיים. מדיניות משנת 2007 שטרם מומשה במלואה לאור תחלופת השלטון והמיתון הכלכלי. דוגמא טובה להתערבות הממשלה בהקמה של שכונה לדוגמא היא North West Bicester, בשלב הראשון יבנו בה כ 400 יחידות דיור מאופסות אנרגיה וכ 120 יחידות דיור ציבורי להשכרה.
גרמניה	Towards the Efficient House Plus מאז 2011 קיימת תכנית עידוד קול קורא לפרויקטי חלוץ המנוהלת על ידי רשות האנרגיה הגרמנית. התכנית כוללת מעקב אחר 35 פרויקטים מצטיינים בהתייעלות אנרגטית (20 בניינים חדשים ו 15 שיפוצים). תהליך הבנייה נבחן מקרוב בשלב התכנון והביצוע על ידי צוות יועצים שהממשלה שוכרת את שירותם. כמו כן מתבצע דירוג אנרגטי של המבנים. שקיפות הדירוג האנרגטי של המבנים נדרשת גם בתכנית המשכנתאות של הkwf לרבות פרסום ודווח על האמצעים הטכנולוגיים להשגתו ⁵⁶ .
הולנד	19 פרויקטי Excellent Areas באזורים שונים מעודד יזמים וקבלנים להשתתף בפרויקטי התנסות שהם מחמירים יותר מהפרקטיקה המחיבת. The Energy and Built Environment - תיעוד פרויקטים לדוגמא לטובת הגברת הידע בקרב אנשי המקצוע.
צרפת	ADAME low-consumption demonstration buildings למעלה מאלף פרויקטים לדוגמא, כ-60% מהם למגורים, כ 80% מכלל המבנים בתכנית הם בנייה חדשה.
בלגיה(בריסל)	במטרה לייצר קפיצה גדולה בשוק הבנייה לטובת מסה קריטית של מבנים יעילים אנרגטית, החלה הממשלה לתמרץ את השחקנים החלוציים בשוק על ידי מתן מענקים כלכליים והקניית ידע בתחום. בתכנית הממשלתית הנקראת Exemplary Buildings Program או BATEX ובעלות כוללת של 45 מיליון יורו בין השנים 2007-2014, הצליחה הממשלה לעודד בנייה של 800,000 מ"ר ברוח פאסיב האוס ⁵⁷ . בכל אחת משנות התכנית, פורסם קול קורא לפרויקטים במטרה להקים

⁵⁶ www.zukunft-haus.info/effizienzhausplus

⁵⁷ בבריסל עדיין אין הגדרה מוסכמת ומחייבת למהו מבנה מאופס אנרגיה או "כמעט" מאופס אנרגיה, אך הממשלה הפכה את תקן הפאסיב האוס לאמת המידה המחייבת עבור כלל הבנייה החדשה החל משנת 2015. תקן הפאסיב האוס אומץ עם הקלות מסויימות, למשל: הדרישה למעטפת בנייה הרמטית נדחתה לבדיקה בהמשך, ונוסחה הקלה למבנים שהפניית כיווני האוויר שלהם אינה אופטימלית או שלא ניתן לתכננם בצורה קומפקטית.

מערך מבנים מצטיינים בתחום ההתייעלות האנרגטית באמצעות תמריצים כלכליים ומקצועיים. הפרויקטים שהתקבלו לתכנית נבחנו בארבעה היבטים עיקריים: התייעלות אנרגטית, מדדים סביבתיים נוספים, כדאיות כלכלית (רווחיות והיכולת לחזור ולבצע) ואסתטיקה אדריכלית. המדדים הסביבתיים הנוספים כללו היבטים שהממשלה הייתה מעוניינת לקדם כגון גגות ירוקים ושיטות בנייה. פרויקטים שזכו במענקים נדרשו לפרסם את מודל הצפי לצריכת האנרגיה ואת נתוני צריכת האנרגיה שנאספו במשך חמש השנים הראשונות לאחר האיכלוס. התוצאה היא בנייה של מעל 200 פרויקטים הכוללים: בתי מגורים, בנייני מגורים משותפים, בתי מלון, בתי ספר, בנייני מסחר, משרדים, שיפוצים ותכנון שכונות. חשוב לציין כי במהלך שנים אלו עלות הבנייה לפרויקטי פאסיב האוס בבריסל ירדה באופן ניכר. (ראו הרחבה נוספת בנספח ג)	
--	--

פיקוח על צריכת אנרגיה בבניינים	
בלגיה(בריסל) החוק להתייעלות אנרגטית בבניינים (Energy Performance of Buildings (PEB מחייב בניינים ששטחם הכולל גדול מ 100,000 מ"ר לערוך תכנית פעולה לניהול צריכת האנרגיה: PLAGE Program ,Local Action Plan for Energy Management	

תמריצים כלכליים להתייעלות אנרגטית	
תמריצים כלכליים מפחיתים סיכונים, ומשפיעים לטובה על האפקטיביות הכלכלית של מרכיבים שונים בבניה ולכן הם בעלי השפעה חשובה על ההחלטה באפיקי ההשקעה ועל היקף ההשקעה. כלים פיננסיים משפיעים הן על התקציב הראשוני של הוצאות הבנייה operating budget, והן על ההשקעות בשווקי ההון capital markets. הם כוללים תקציבים ממשלתיים למענקים, הלוואות בתנאים מיוחדים והטבות מס.	
1.הטבות מס	
בריטניה הקלה עד פטור מחבות מס רכישה מקרקעין standard Stamp Duty Land Tax (SDLT) למבנים מאופסי אנרגיה העונים על דרישות תקן zero-carbon בהתאם לשווי הרכישה במשך חמש שנים (2007-2012). על מנת לקבל את הפטור, רשות המיסים צריכה לקבל אישור על היות הנכס מאופס אנרגיה משמאי מוסמך⁵⁸.	
צרפת • הכרה בהוצאת עלות ראשונית למערכות יעילות בהחזר מס ההכנסה השנתי בהתאם להרכב משק הבית וגובה ההוצאה. • 50% הנחה עד פטור מלא ממס מקרקעין לבניית מבנה שיעילותו האנרגטית גבוהה בהתאם לרשות המקומית ולדירוג האנרגטי.	
ניו-מקסיקו New Mexico Sustainable Buildings Tax Credit (SBTC) החזר מס הניתן לחברות או ליחידים למבנים שהוסמכו לתקן LEED והדירוג האנרגטי שלהם הוא HERS 60 (צריכת האנרגיה שלהם היא 60% לעומת מבנה ייחוס) ומעלה.	
מסצ'וסטס מתן <u>פטור ממס</u> עבור התקנת מערכות להתייעלות אנרגטית בבנייה קיימת או חדשה.	

⁵⁸ <http://www.hmrc.gov.uk/manuals/sdlmanual/sdlm20700.htm>

איטליה	ברמת הרשויות המקומיות ניתנות הטבות מס למבנים יעילים אנרגטית בדמות הנחות על מיסי הארנונה. כמו כן רשויות מקומיות רשאיות להגדיל אחוזי בנייה תמורת בניית מבנים יעילים אנרגטית (במקרים של פינוי-בינוי).
2. מענקים ומימון ממשלתי	
בריטניה	קיים לוח זמנים לדיור ציבורי מאופס אנרגטית במימון ממשלתי ⁵⁹ .
הולנד	Innovation Agenda for the Built Environment (IAGO) The Energy Leap innovation program מענקים להתייעלות אנרגטית ליזמים, בנאים, מתקנים וצרכנים בין השנים 2011-2014
צרפת	מתן זכויות בנייה מוגדלות לטובת מתקנים למערכות בניין וייצור אנרגיה באתר לפי רמת ההתייעלות האנרגטית ובהתאם לתקנות מקומיות ולרמת הפיתוח המקומית.
איטליה	תקנה משנת 2010 מקציבה 60 מיליון אירו כמענקי סיוע לרכישת מבנים יעילים אנרגטית. מבנים מסוג A (יעילים ב-50% יותר ממה שמחייב החוק) זוכים למענק של 116 אירו למ"ר עד לתקרה של 7000 אירו. מבנים מסוג B (30% יותר) זוכים למענק של 83 אירו למ"ר עד לתקרה של 5000 אירו.
קליפורניה	California Multi-Family New Homes Program (CMFNH) and Energy Upgrade California כאשר מדובר על הטבות כלכליות לפרויקטים חדשים, מדובר ביחס לאחוז ההתייעלות האנרגטית ביחס לחוק הבנייה המחייב. כאשר אחוז ההתייעלות המינימלי לקבלת ההטבה הוא 15% והיא עולה בהתאם לעליה באחוזי ההתייעלות. ההטבות כוללות סיוע בתקציבי התכנון, או סיוע ספציפי בייעוץ לתכנון. במסגרת תכניות אלה ניתנת הדרכה ללא תשלום לבעלי מקצועות על מהות התכנית ודרישותיה עבור העוסקים בתכנון, בנייה ותחזוקה/ תפעול של המבנים. ההטבות הן לפי סוג המבנה (מגורים צמודי קרקע, מגורים רוויים, מסחר ומשרדים)
ניו-יורק	מענקים ליזמים הבונים מבנים יעילים אנרגטית. המענקים נעים בין אלפיים לשמונת אלפים דולר, הסכום הגבוה יותר ניתן לבתים שזוכים להגיע לרמה של מאופסי אנרגיה. הדירוג נקבע באמצעות עמידה בתקן Energy Star בדירוג HERS
מסצ'וסטס	מתן תמריץ של עד שבעת אלפים דולר ליזמים אשר בונים מבני מגורים יעילים יותר אנרגטית.
3. משכנתאות ירוקות, הלוואות בתנאים מטיבים והחזרים ממשלתיים לטובת תשלום המשכנתא	
גרמניה	KfW Efficiency Houses משכנתאות מוזלות ומענקי החזר (ראו הרחבה בנספח ג') KfW, Federal Development Bank מעניק משכנתאות בריבית נמוכה או מענקי החזר בהתאם לאחוז ההתייעלות האנרגטית (לבנייה חדשה ולשיפוצים). המענקים מיועדים לבעלי בתים ודירות למגורים או להשקעה וכן לארגוני דיור וקבוצות בנייה. בין השנים 2003-2013 ניתנו הטבות לכ 463,000 יחידות דיור. Market Incentive Programme (MAP) מענקים ייחודיים והלוואות בריבית נמוכה למערכות חימום יעילות הכוללות מערכות סולאריות וגיאותרמיות. Federal Office for Economic Affairs and Export Control (BAFA)
צרפת	משכנתא ללא ריבית לרוכשי דירה ראשונה במטרופולין פריז (+PTZ), בין היתר תעודת הדירוג האנרגטי של המבנה משפיעה על גובה ההלוואה.
ארה"ב	SAVE Act: חקיקה המאפשרת לבנקים לשלב את גורם ההתייעלות האנרגטית

⁵⁹ HM Government, Department for Communities and Local Government, Definition of Zero Carbon Homes and Non-Domestic Buildings, December 2008. Ref. No.: 08CCSD05675, ISBN: 978-1-4098-0934-0

והיחסון בחשבון החשמל כהכנסה לצורך קביעת תנאי ההלוואה כנגד הצגת דירוג אנרגטי HERS (ראו דירוג אנרגטי בארה"ב, נספח ג)	
Colorado Bill HB13-1105 Energy Saving Mortgage Program (HB13) תכנית המוזילה את מחיר המשכנתא בכ \$8,000 לבית חדש או משופץ שהדירוג האנרגטי שלו הוא 0 HERS. לצורך עידוד התייעלות אנרגטית גם מבנים שהדירוג שלהם הוא בין אפס ל 50 (אחוז צריכת האנרגיה ביחס למבנה הייחוס) יקבלו תנאים מטיבים.	קולורדו

השקעה במחקר ופיתוח פיתוח חדשנות וטכנולוגיות בנייה	
פלטפורמה לאומית למחקר בנושאי אנרגיה ובניינים בהיבטי יישום ומדיניות reaserch and experimentation platform on energy in buildings	צרפת
החל מ 2006 מפעילה ממשלת גרמניה את תכנית "Future Building" initiative המעניקה סיוע כספי למחקרים בתחום תעשיית חומרי הבניין וטכנולוגיות (למשל vacuum insolation panels) ⁶⁰ .	גרמניה

לבסוף, להלן דוגמאות לחקיקה ומדיניות לעידוד שימוש באנרגיות מתחדשות:

חיוב או עידוד שימוש באנרגיות מתחדשות	
Residential Property-Assessed Clean Energy (PACE) חקיקה המעודדת מימון עבור הבנייה הפרטית והשקעות באנרגיות מתחדשות ⁶¹ .	ארה"ב
זיכוי מס עד 30% מהעלות עבור התקנת מערכות שמשפרות את היעילות האנרגטית במבני מגורים באמצעות ניצול אנרגיות מתחדשות.	
רגולציה מחייבת: בכל המבנים החדשים יש חובה להטמיע מערכות המנצלות אנרגיות מתחדשות אשר מצמצמות ב-50% את האנרגיה הנדרשת לצורך חימום מים ומצמצמות ב 20% את האנרגיה הנדרשת לחימום/ קירור הבית וחימום המים.	איטליה

⁶⁰ לפרטים נוספים: <http://www.bbsr.bund.de>

⁶¹ לפרטים נוספים: <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2015/08/24/fact-sheet-president-obama-announces-new-actions-bring-renewable-energy>

6. מוכנותו של שוק הבניה הישראלי לבנייה מאופסת אנרגיה

פרק זה מתייחס לאתגרים הניצבים בפני שוק הבנייה בישראל בדרכו למימוש בנייה חדשה מאופסת אנרגיה למגורים. ההתייחסות המובאת כאן היא המשך לתובנות הבדיקה היישומית שנעשתה בחלקו הראשון של המחקר, ובהשוואה לנעשה בתחום זה בעולם כפי שהוצג בפרק הקודם.

היערכותו ומוכנותו של שוק הבנייה למגורים מאופסי אנרגיה תלויה בריבוי שחקנים. על אף שהמניעים והאתגרים למימוש בנייה מאופסת אנרגיה בקרב קבוצות בעלי האינטרס הם רבים ושונים, שילוב הכוחות ביניהם הוא הכרחי. להלן תפקידו הנדרש של כל גורם במארג:

1. המדינה והשלטון המקומי: קובעים יעדים, רגולציה, חקיקה ותקינה. למדינה חשוב לקדם ולתמוך במאמצים להתייעלות אנרגטית ושימוש באנרגיות מתחדשות על מנת להגיע ליעדי צמצום פליטות גזי החממה שהיא קבעה בהחלטת ממשלה 542, לצורך חסכון אנרגטי לכלל המשק. מדיניות ממשלתית אפקטיבית יכולה להוביל ליצירת ביקושים והיצעים לבנייה מאופסת אנרגיה.

2. רשות החשמל וחברת החשמל: הגופים האחראים והמפקחים על תשתיות החשמל ואספקת החשמל הם שחקני מפתח בקידום פתרונות לייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים אשר נמצאו כהכרחיים לטובת איפוס צריכת האנרגיה של מבני מגורים. כמו כן, התמודדות עם האתגר של בנייה מאופסת אנרגיה עשויה לענות על הצורך בפתרונות לביקושי האנרגיה הגדלים עם התרחבות האוכלוסייה.

3. המתכננים: בעלי הידע התכנוני המקצועי, וכן היכרות עם טכנולוגיות חדשות ויכולת האינטגרציה ביניהם. עבורם השאיפה למבנים מאופסי אנרגיה עונה על הצורך להתחבר לאג'נדה כלל עולמית ולמצוינות בתכנון, ועשויה להוות יתרון מקצועי יחסי. כמו כן כפי שעולה מהבדיקה היישומית לחלקו של התכנון השפעה משמעותית על ההתייעלות האנרגטית במבנים.

4. היזמים וחברות הבנייה: המבצעים בפועל של החלטות הרגולטור והמתכננים. הם גם מיישמי החדשנות ומשווקיה ובעלי הידע המעשי know how. עבורם יצירת מבנים מאופסי אנרגיה עשויה להוות יתרון יחסי בשוק הבנייה, מתוך הבנה שיוכלו לשווק את יחידות הדיור כאיכותיות וחסכוניות לצרכן.

5. רשת היצרנים והספקים של חומרי הבנייה והטכנולוגיות: מייצרי החדשנות בתחום טכנולוגיות ומוצרי הבנייה ואנרגיות מתחדשות. עבורם יצירת מבנים מאופסי אנרגיה היא אפשרות עסקית המונעת ממגמות כלל עולמיות של ענף הבנייה.

6. הציבור: רוכשי הדירות ובוני הבתים הפרטיים הם מייצרי הביקושים. הצרכנים מצידם יכולים להזדהות עם המטרות הסביבתיות של מבנים מאופסי אנרגיה, אך סביר שהמניע העיקרי עבורם יהיה החיסכון בהוצאות החשמל. הם האחראים לתחזוקת המבנים וגם לניצול טיבם ואיכותם בפועל, ולכן איכות המבנה ונוחות השימוש בו חיוניים להם.

בסעיפים הבאים מתוארת מטריצה של חסמים ואתגרים העומדים בפני שחקני השוק שתוארו לעיל, בהתאם לתפקידם בהתוויית הדרך למבנים מאופסי אנרגיה ולמוטיבציה העשויה להניע אותם לאמץ חדשנות מסוג זה.

6.1. המדינה והשלטון המקומי

6.1.1. מצב קיים בישראל

כפי שנבחן בפרק 5 במחקר זה, בעולם קיימת ההכרה שבנייה מאופסת אנרגיה מאתגרת את שוק הבנייה בהיבטים תכנוניים, טכניים, תקציביים ושיווקיים. לרשות המדינה עומדים כלים שונים לעידוד הביקושים וההיצע, בעיקר כשלמדינה שאיפה ארוכת טווח לשלב בנייה מאופסת אנרגיה באופן נרחב בשוק הבנייה.

ניתן לחלק את תהליכי היווצרות מדיניות לבנייה מאופסת אנרגיה בעולם לשלושה שלבים:

1. התגבשות החלטה ממשלתית וקביעת יעדים לבנייה מאופסת אנרגיה או בנייה שהיעילות האנרגטית שלה שואפת לאיפוס.
2. ניסוח הגדרה מוסכמת למבנים מאופסי אנרגיה: הגדרות אלה נובעות מתרבות בנייה מקומית, הן מדידות ולרוב נשענות על תקנים ממשלתיים מתקדמים להתייעלות אנרגטית במבנים.
3. הכוונת מנגנוני מדיניות לבנייה מאופסת אנרגיה: בד"כ, בהתבסס על שיפור מנגנונים קיימים להתייעלות אנרגטית ואנרגיות מתחדשות.

נכון לעת כתיבת מחקר זה (יוני 2016), עדיין אין בישראל הצהרה או מדיניות ממשלתית הנוגעת ליעדים ארוכי טווח לבנייה מאופסת אנרגיה או קרובה למאופסת אנרגיה⁶². יחד עם זאת, מספר מבנים מאופסי אנרגיה נמצאים בשלבים שונים של תכנון ובנייה:

- גני ילדים מאופסי אנרגיה בחדרה אמורים להתאכלס לקראת סוף 2016. הגנים כוללים שורה של אמצעים פאסיביים וטכנולוגיים, והם בעלי מערכות בקרה מתקדמות. כמו כן, הם נבנים בתקציב הגבוה בכ-10% בלבד ממבנים קונבנציונליים (ראיון עם חן שליטא, בדצמבר 2015).
 - מרכז מבקרים שוהם במושב רמות מתוכנן כמבנה מאופס אנרגיה. מרכז המבקרים, בעל שטח של כ-3,800 מ"ר, נמצא בשלבי תכנון ראשוניים.
 - במסגרת צוות "בסיסים חכמים" בוצעה בדיקת התכנות לבניית תשתית מאופסת אנרגיה עבור צה"ל בשטח של כ-10,000 מ"ר. בדיקת ההתכנות הראתה כלכליות והחזר השקעה לאחר כ-10 שנים. הבדיקה אושרה והוצאה למכרז.
 - מבנה המשרדים של חיל האוויר בבסיס נבטים נמצא בשלב הצעות קבלנים לבנייה כמבנה מאופס אנרגיה.
- להלן תיאור המצב הרלוונטי לבנייה מאופסת אנרגיה הקשור במדיניות הממשלתית עד כה בישראל:

⁶² התחייבות המדינה לצמצום פליטות גזי חממה ו/או לקדם את תחום הבנייה הירוקה אינו מחייב בנייה מאופסת אנרגיה. תחום זה טרם נכנס באופן רשמי במסגרת החלטות אלו.

6.1.2. יעדים לאומיים שמרניים להתייעלות אנרגטית וייצור אנרגיות מתחדשות

התכנית הלאומית להפחתת פליטות גזי חממה משנת 2011, אשר נוהלה ע"י משרד האוצר, התייחסה לנושאים מגוונים לצמצום צריכת האנרגיה בבנייה חדשה למגורים: תמיכה בטכנולוגיות ישראליות ירוקות, תמיכה בבנייה ירוקה ובהכשרות, חינוך והסברה, סקרי אנרגיה, קידום תקינה להתייעלות אנרגטית ועוד. אולם לאחר כשתי שנות פעילות הוקפא תקציב התכנית לפחות עד לשנת 2016, כחלק מהקיצוצים בהוצאות הממשלה שמוביל משרד האוצר (המשרד הגנת הסביבה, 2014).

בספטמבר 2015, לאחר עבודה מקיפה של ועדה בין-משרדית לגיבוש יעד לאומי להפחתת גזי חממה, הצהירה ממשלת ישראל על יעד הפחתה של כ-25% מסך הפליטות של גזי חממה הצפויות בשנת 2030 על פי תרחיש עסקים כרגיל (החלטה מס' 542)⁶³. בכדי לממש יעד זה, המדינה עדכנה גם את יעדיה הלאומיים להפחתה ולייעול של צריכת האנרגיה במשק ולייצור חשמל ממקורות מתחדשים.

המדיניות הקיימת כיום בישראל לעידוד התייעלות אנרגטית אינה מועצמת מספיק על מנת להוות מנוף לתכנון ולבנייה של מבנים מאופסי אנרגיה, בין היתר מעצם היותה מכוונת לבנייה ירוקה ולא מכוונת למטרת ההתייעלות האנרגטית. כמנוף להתייעלות אנרגטית בבנייה חדשה, התייחסה הוועדה הבין-משרדית לגיבוש יעד לאומי להפחתת גזי חממה, בהמלצותיה להטמעה חלקית בלבד של ת"י לבנייה ירוקה 5281 בין כלל הבנייה החדשה העתידה להיבנות ובדירוג בסיסי בלבד. כאמור דירוג זה אינו יכול לענות על הביצועים של מבנה מאופס אנרגיה.

להלן סקירה של **אתגרים** העולים ממנגנוני מדיניות ממשלתית לבנייה מודעת אנרגיה וייצור אנרגיות מתחדשות הקיימים בישראל כיום, לפי הקטגוריות והדוגמאות שנבחנו בפרק 5:

א. השקעה נוספת וממוקדת במחקר ופיתוח

מחקר ופיתוח הוא כלי בסיסי המאפיין פיתוח של בנייה מאופסת אנרגיה בכל מקום בו מתקיים דיון ממשלתי על קידום יעד זה. מדינת ישראל מעודדת בשנים האחרונות מחקרים במימון משרדי ממשלה שונים לשם העמקת ההבנה והידע בכל הנוגע להתייעלות אנרגטית ולקיימות בבנייה, ביניהם גם מחקרים בנושאי מדיניות. המשרד להגנת הסביבה עורך גם מחקר כלכלי-פיננסי בשיתוף עם מרכז מילקן לחדשנות במכון ירושלים לחקר ישראל, לצורך איתור של כלי מימון מתאימים לקידום מבני מגורים ירוקים (ויעילים אנרגטית) בישראל. המחקר מלווה בוועדות היגוי בין-מגזריות וכולל נציגים ממשרדי ממשלה ורשויות מקומיות (המשרד להגנת הסביבה, משרד האוצר, משרד הפנים, משרד האנרגיה, משרד הבינוי ומשרד הכלכלה). כמו כן בוועדות אלו משתתפים גם נציגים מהסקטור הפרטי - המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, בנק ישראל, התאחדות בוני הארץ ועוד.

יחד עם זאת, פעילות מכוונת לבנייה מאופסת אנרגיה נמצאת בראשית הדרך. ניתן למנות בה את הפרויקט האקדמי הרב שנתי המחקרי והיישומי לתכנון בית סולארי מאופס אנרגיה אשר ייצג את

⁶³ היעד העדכני נכון לכתיבת שורות אלו הינו 8.8 טון פליטת גזי חממה לנפש בשנת 2025 ו 7.7 טון פליטת גזי חממה לנפש בשנת 2030 לעומת 10.2 טון לנפש לפי תרחיש עסקים כרגיל ובו גידול משמעותי של 32% בפליטות.

ישראל בתחרות הבינלאומית "סולר דקאטלון" ב-2013 זכה למימון חלקי מטעם המדינה, בשיתוף עם יצרני טכנולוגיות מקומיים. פרויקט זה הקנה ידע וניסיון ביישום בנייה מאופסת אנרגיה לשותפים הרבים שהיו חלק ממנו.

כמו כן, המדענית הראשית במשרד להגנת הסביבה תומכת בעריכת מחקרים בנושא בנייה ירוקה באמצעות קול קורא למחקרים בנושאים נדרשים כדוגמת המחקר הזה, וכן בנושאי תכנון, טכנולוגיה ומדיניות הקשורים לבנייה מאופסת אנרגיה.

ב. הנגשת מידע וידע ומתן הכשרות לקהילה המקצועית

בשנים האחרונות מתקיימת בישראל מגמה ברורה של הכשרת אדריכלים ומהנדסים לבנייה ירוקה. המשרד להגנת הסביבה פועל בשני ערוצים עיקריים לעידוד הקניית ידע בבנייה ירוקה (לרבות התייעלות אנרגטית) לאנשי מקצוע: המסגרות האקדמיות והכשרות לאנשי מקצוע. נושאי התכנון הקשורים בהתייעלות אנרגטית חדרו לתכניות הלימודים במוסדות האקדמיים למקצועות התכנון וההנדסה, ומועברים בקורסי הכשרה מגוונים לבעלי המקצועות בענף התכנון והבנייה. המשרד להגנת הסביבה בשיתוף המועצה הישראלית לבנייה ירוקה מעודד הכשרות רלוונטיות, ימי עיון, כנסים, סדנאות העברת ידע והעלאת המודעות בקרב מתכננים, שמאים, סוכני נדל"ן וקבלנים על מנת להגדיל את מלאי העוסקים בבנייה מודעת אנרגיה. בשנת 2015, פורסם ע"י משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים המדריך המקיף "שימור אנרגיה בבנייני מגורים בישראל" (המבוסס על גרסה מוקדמת יותר מ-1989), מתוך הבנת הנחיצות שבהתייעלות האנרגטית בסקטור הבנייה למגורים.⁶⁴ שיתופי פעולה ויוזמות אלו הם מבורכים ומוצלחים, ולכן הם עשויים להוות בסיס להמשך על ידי הכוונתם גם להעברת ידע בתכנון ויישום מבנים מאופסי אנרגיה.

כמו כן, נוצר מאגר מידע על בנייה ירוקה בישראל המנוהל על ידי המשרד להגנת הסביבה בשיתוף מכון התקנים. בישראל קיימים 228 מבנים העומדים בת"י 5281 (נכון לתחילת 2016). בנוסף אליהם, ישנם כ-50 מבנים שנבנו על פי תקנים זרים (LEED, BREEAM). למרות חשיבותו של המאגר, רצוי שיכיל גם מידע מקצועי כגון אלמנטים תכנוניים ופירוט האסטרטגיות שהובילו להתייעלות אנרגטית בפרויקטים שונים בכדי לאפשר חשיפה של מתכננים ויזמים לאסטרטגיות אלה.⁶⁵

ג. תמיכה בפרויקטי חלוץ ובפיתוח טכנולוגיות חדשות

בסקירה הבינלאומית בפרק 5 הוצג כי במדינות המקדמות בנייה מאופסת אנרגיה, המדינה תומכת ביצירת דוגמאות בולטות בתחום (פרויקטי חלוץ), או בסימון פרויקטי דגל, אשר הקהל מוזמן לבקר בהם על מנת להיחשף באופן ישיר לביצועים ולשיטות בנייה.

⁶⁴ עורך וכותב ראשי: פרופסור אביתר הראל והבהשתתפות יצחק ברבי, אורי דומן, אינה ניסנבאום, ערן קפטן ועדה ריטגור.

⁶⁵ לפרטים נוספים, ראו אתר המשרד להגנת הסביבה:
<http://www.sviva.gov.il/subjectsenv/greenbuilding/pages/greenconstructionisrael.aspx>

ידע שנאסף מפרוייקטי חלוץ יכול לשמש מתכננים נוספים, שכן פרוייקטי חלוץ עשויים לאפשר פיתוח של שיטות עבודה חדשניות, תוך מתן דגש על מידת יעילותם של אמצעים ותהליכים שונים.

הקבוצה הראשונה המאמצת בנייה מאופסת אנרגיה כחלוצים (early adaptors) רואה בה פרקטיקה בלתי נמנעת של העתיד להתרחש ומסוגלת להבדיל את עצמה מאחרים העתידים להצטרף למשימה. ובכל זאת, בשל עלויות, אתגרים טכנולוגיים, ואתגרי חקיקה, על המדינה לתת מענה ראשוני (תמיכה מימונית, סיוע בהתרת חסמים בירוקרטיים ועוד) גם לקבוצה זו אם היא רואה בכך מטרה ארוכת טווח. לצורך כך יש לפתח מנגנון אשר יאפשר למדינה לעודד ולהבליט פרוייקטים חלוציים המכוונים להתייעלות אנרגטית גבוהה משמעותית מן היישומים הנוכחיים.

במסגרת התכנית הלאומית להפחתת פליטות גזי חממה ניתנה התייחסות לחשיבות מתן מענקים ממשלתיים לבניית פרויקטי חלוץ לעידוד בנייה חדשה מודעת אנרגיה. המשרד להגנת הסביבה פרסם ב-2012 קול קורא לבחירת מבנים חדשים, ביניהם גם למגורים, אשר ישתתפו במסגרת פרויקט חלוץ לבנייה ירוקה. במסגרת הפרויקט ניתנו מענקים לעשרה יזמים למבני מגורים (מתוך שבעה עשר פרויקטים בסה"כ) שישתתפו בו ואשר יעבירו נתונים ודו"חות בהתאם לשלבי הבנייה השונים ותפעול המבנה לאחר השלמתו. עם זאת, התכנית כיוונה להתייעלות אנרגטית של כ-20% מצריכת החשמל במערכות המיזוג בלבד, למבנים שרף ההתייעלות האנרגטית שלהם תאם את ת"י לבנייה ירוקה 5281 ברמתו הבסיסית בלבד. כמו כן, במסגרת התכנית הלאומית להפחתת פליטות גזי חממה, העניק משרד התמ"ת (כיום משרד הכלכלה) תמיכה בטכנולוגיות חדשות להפחתת פליטות גזי חממה, במסגרתה הוקצו מענקים ליזמים. אולם, התכנית לא נפתחה ליוזמות בסקטור הבנייה למגורים. כמו כן, בשל קיצוצים תקציביים הוקפאה התכנית לאחר כשנתיים של פעילות.

יש לציין כי ישנם מעט פרוייקטים שניתן ללמוד מהם ויכולים להפוך כבר היום לפרויקטים לדוגמה, כגון מבנה מאופס אנרגיה המתוכנן ע"י משרד האדריכלים קנפו-כלימור וחברת אלפא פרוייקטים עבור צה"ל. על מנת שניתן יהיה ללמוד מדוגמאות אלו יש לתעדן בצורה מעמיקה ולהנגיש את התייעוד לקהל המקצועי, כולל בחינת הצריכה בפועל ולאורך זמן.

ד. דירוג אנרגטי בבניינים

המשרד להגנת הסביבה ערך בשנים 2011-2012 מסע פרסום ארצי תחת הכותרת "מתחילים לחשוב ירוק", בסיומו נמצא כי חסכון בחשמל ובאנרגיה היה הנושא שהשיג את שינוי העמדה הגבוה ביותר⁶⁶. התכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית⁶⁷, מציינת כי אין מודעות מספקת בקרב משקי הבית למשמעות סימון הדירוג האנרגטי. במסגרת התכנית מוקצים תקציבים להעלאת קמפיינים פרסומיים והסברתיים, שתכליתם הסברה לצרכן הביתי בדבר משמעויות הדירוג האנרגטי במכשירי חשמל ראשוניים והחיסכון הכספי הנגזר ממנו. הרחבת הקמפיין והמודעות לדירוג אנרגטי בבניינים עשויה להגביר את המודעות הציבורית לאפשרויות ההתייעלות האנרגטית של בניינים. דירוג אנרגטי של

⁶⁶ ד"ר גיל פרואקטור, אגף איכות אוויר ושינויי אקלים, המשרד להגנת הסביבה, עו"ד ליאור שמואלי, דו"ח ניטור ומעקב אחר יישום החלטות הממשלה, לצמצום צריכת החשמל ולהפחתת פליטות גזי חממה, המשרד להגנת הסביבה, יולי 2014.

⁶⁷ משרד התשתיות הלאומיות, התוכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית, צמצום בצריכת החשמל 2010-2020, 2010.

מבנים הוא כלי ממוקד לחיסכון באנרגיה. מחקר שפורסם על ידי המשרד להגנת הסביבה המליץ על חיוב דרוג אנרגטי לבניינים בישראל במעמד מכירה או השכרה של נכסים (פרלמוטר, 2015) חשיפת הדירוג האנרגטי של מבנים לצרכן הקצה מעודדת מצוינות, כשם שעמידה בתקינה לבנייה ירוקה עושה זאת. דירוג אנרגטי של בניינים עשוי להגביר את מודעות הציבור לחסכון האנרגטי הנובע מבנייה איכותית, ולתרום להצלחתו השיווקית של פרויקט. לבסוף, בשל כלל הסיבות הללו, חשיפת הדירוג האנרגטי של מבנים עשויה לעודד חברות בנייה ליזום יותר ויותר פרויקטים ולהעלות את רף ההתייעלות האנרגטית. השקעות מרובות במבנים שהתייעלותם האנרגטית גבוהה עשויים להוביל בסופו של דבר למוכנות השוק לבנייה מאופסת אנרגיה.

בישראל, המידע אודות הדירוג האנרגטי של בניינים שעברו הסמכה לת"י 5281 קיים במערכות הממוחשבות של מכון התקנים אך אינו נחשף עם נתוני הבניין. כמו כן לא נדרשות במסגרת ת"י 5281 פירוט לגבי הדירוג האנרגטי של כל הדירות בבניין אלא ציון ממוצע לכלל הבניין. משרד האנרגיה, בשיתוף המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, מוביל כיום דו"ח מקיף הבוחן את אופן ההטמעה של דירוג אנרגטי בבניינים בעולם ואת האפשרות להטמעתו בישראל.

ה. פיקוח ומעקב אחר צריכת אנרגיה בבנייני תעשייה

סקר אנרגיה הוא תהליך שיטתי ומובנה הסוקר את צריכת האנרגיה האמיתית הכוללת במבנים. לפי תקנות מקורות אנרגיה התשנ"ג - 1993 ביצע סקר לאיתור הפוטנציאל לשימור אנרגיה, צרכי אנרגיה גדולים, בעלי צריכה שנתית של מעל 2,000 טון שווה ערך מזוט (שעט"מ), מחויבים לבצע מדי חמש שנים סקר לאיתור פוטנציאל לשימור אנרגיה. הסקר נועד לקבוע המלצות לצורך הקטנת צריכת האנרגיה והפחתת פליטות גזי חממה, ובמסגרתו נבדקים מדדי יעילות שונים, כגון: צריכת אנרגיה של הצרכן ושל המתקנים והמערכות שלו, התפלגות הצריכה ועוד. נתונים אלו עשויים להפוך את הבנייה מודעת האנרגיה אמינה יותר, ובמקרים אחרים לאפשר גישור על מחסום פערי האנרגיה שבין תחזית צריכת האנרגיה וצריכתה בפועל (energy gap).

ו. תמריצים כלכליים וכלי מימון

בשנת 2014 המליץ המשרד להגנת הסביבה על הקמת קרן הלוואות ייעודית עם ערבויות מדינה להתייעלות אנרגטית ולבנייה חסכונית באנרגיה (פרואקטור ושמואלי, 2014). החיסכון החודשי כתוצאה מהתייעלות אנרגטית עשוי להיות מתורגם למקור הכנסה נוסף הנכנס לשכלול הזכאות וגובה המשכנתא, או להעלאת ערכי הנכסים המקנה יכולת להעלות את גובה המשכנתא מצד אחד, אך מאפשרת גם מתן הטבות בהוזלת הריבית.

משכנתאות בתנאים מועדפים לדירות מאופסות אנרגיה עשויות לעודד הן את היזמים והן את ציבור רוכשי הדירות. אחד החסמים בתחום המשכנתאות המועדפות לבנייה מודעת אנרגיה נובע מפערי הידע וההבנה הקיימים בין אנשי המקצוע של שוק הבנייה אשר נדרשים לתווך את המידע לאנשי המקצוע של שוק ההון, סוכני הנדל"ן והשמאים. כמו כן, ההוכחה הנדרשת לביצועים העתידיים של הבניין, אינה ניתנת לוודא בשלבי הרכישה. חסם זה מתגבר בתהליכי מיגון המשכנתאות, אשר נמכרות וממוחזרות בשווקי ההון. כמו כן, המליץ המשרד להגנת הסביבה על מתן תמיכות להשקעות ופיתוח

כלים מקצועיים לתכנון וליישום השקעות בהתייעלות אנרגטית, על שילוב יצרני החשמל כספקים של פתרונות להתייעלות אנרגטית ועל קבלת הטבות שונות מרשות החשמל (פרואקטור ושמואלי, 2014).

6.1.3. חוקים, תקנות בנייה ותנאים רגולטוריים להתייעלות אנרגטית בישראל

ללא דרישה עקבית ואכיפה מטעם החוק, תכנון מבנים יעילים אנרגטית עלול להיות וולונטרי בלבד. ככזה, הוא עלול להישאר נחלתם של מספר קטן יחסית של מתכננים, יזמים ולקוחות פרטיים, והשוק יהיה פרוץ לפרשנויות ולאינטרסים שונים. לתקינה הכוללת הסמכה, או בשלב מתקדם יותר תקינה מחייבת בשילוב אכיפה, יכול להיות תפקיד חשוב ביצירת מסגרות מידע והנחייה אחידים והם עשויים להרחיב הן את הביקושים והן את ההיצע לבנייה מאופסת אנרגיה.

אמנם בשנים האחרונות אושרו בישראל מספר לא מועט של תקנות ותקנים בנושאים שונים ומגוונים הנוגעים בהתייעלות אנרגטית ובאנרגיות מתחדשות, וכן שורה של תקנים בנושאי התייעלות אנרגטית הקשורים לשיפור מעטפת הבניין, מערכות האקלים, איכות הבנייה וכד'. אולם, תוכנם, אופן ביצועם ואכיפתם של חוקים ותקנות אלו אינם מהווים, במתכונתם הנוכחית, בסיס מספק כמנגנון לבנייה מאופסת אנרגיה. מתכננים הרוצים להסמיך כיום מבנים לאיפוס אנרגטי בישראל יאלצו לפנות לתקנים בין לאומיים בין אם לצורכי הסמכה ובין אם לצורכי אימוץ מתודולוגיה יישומית. מן הראוי שהתקנים הקיימים והמנגנונים המתלווים אליהם יאותגרו, ובסופו של דבר יוכלו להוות תשתית לתקינה לבנייה מאופסת אנרגיה.

להלן סקירת **האתגרים** שביישום ואכיפת התקנים וחוקי הבנייה הקיימים לטובת בנייה מודעת אנרגיה, כך שיוכלו להוות בסיס גם לבנייה מאופסת אנרגיה.

א. חוק התכנון והבנייה מהווה אתגר למימוש מבנים מאופסי אנרגיה

בחוק התכנון והבנייה, במתכונתו הנוכחית, מתקיים פער בין הפוטנציאל לעידוד בנייה מודעת אנרגיה לבין הקושי בשימוש בו כמנוף ליצירת מנגנונים לקידום בנייה מאופסת אנרגיה:

- בשל היעדר תאום מקצועי בין הוועדות הטכניות השונות ואינטגרציה מלאה בין התקנים, נוצרות סתירות וכפילויות בין תקנים ותקנות: למשל, תקנות האש מעמידות קושי בעמידה בדרישות ת"י 1045 בנושא גשרי קור⁶⁸.
- בהתאם לתקנות התכנון והבנייה (סעיף 5.39 מתאריך 1986) כל בניין מגורים חייב לעמוד בדרישות ת"י 1045 לבידוד מבנים. לאור הרוויזיה שנעשתה בתקן זה בשנת 2011, יזמים וקבלנים מתקשים ביישומם.⁶⁹ אי לכך קיים קושי לאתגר את ת"י 1045 ולהשתמש בו כבסיס לבנייה מאופסת אנרגיה.

⁶⁸ כיום ניתן למצוא חוקים והנחיות יישום בתחום האש במספר מקומות שונים: בתקנות התכנון והבנייה, בתקנות רשות הכיבוי, בתקנים ספציפיים לנושאי אש, בתקני בניה ייעודיים ועוד. כל אחד מהתקנים והתקנות מספק תמונה חלקית בלבד, ובשביל לקבל את מכלול הדרישות צריך לעיין בכולם.

⁶⁹ לאחר החמרתו של ת"י 1045 בשנת 2011, טענו יזמים וקבלנים שיתקשו ליישם את הדרישה לביטול גשרים תרמיים בחיבור שבין קירות החוץ לבין קירות הפנים ותקרות הבטון. התאחדות בוני הארץ פעלה רבות מול משרדי הממשלה השונים ומול מכון התקנים כדי לאפשר לקבלנים להמשיך לעבוד לפי שיטת ברנוביץ' שהיא

•הקושי לבדוד ממ"ד- על מנת לבדוד את קירות הממ"ד אשר בהגדרתו בנוי מבטון, מקובל להשתמש ב"טיח תרמי" – טיח מיוחד המכיל חלקיקי קלקר – בפנים המבנה. פתרון זה אינו פותר את בעיית הגשרים התרמיים אשר מביאים לאיבוד אנרגייה משמעותיים.

ב.אכיפה חלקית של החוק גורעת מאיכות הבנייה

היתרי בנייה הם תוצר של מערכת רישוי כוללת. שינויים בחוק מצריכים הטמעה כלל מערכתית: היתרים ופיקוח רשויות. במחקר בנושא בידוד מבנים בישראל, שנערך על ידי המועצה הישראלית לבנייה ירוקה,⁷⁰ נמצא כי ישנן בעיות ביישומם של תקנים ותקנות שונים, בין השאר כתוצאה מאכיפה חלקית. ליקויי בנייה פוגעים בביצועים האנרגטיים של הבניין במהלך חייו. תקינה מקבילה בעולם להתייעלות אנרגטית במבנים מחייבת תהליכי בקרה ופיקוח חיצוניים לפני מסירה ללקוח (למשל תקן הפאסיב האוס, LEED). כיוון שביצועי מבנה מאופס אנרגיה תלוי באיכות בנייתו, בבואנו לקדם בנייה מאופסת אנרגיה בישראל יש הכרח לפתח את מנגנוני בדיקת איכות הבנייה בישראל.

ג.היעדר התייחסות לבנייה צמודת הקרקע בתקני הבנייה הירוקה

למרות המתח המתמיד הקיים בישראל בין מחסור בקרקע, מחסור באנרגיה והביקושים לבניית יחידות דיור, ולאור העובדה שתקנים בינלאומיים לבנייה מאופסת אנרגיה כוללים התייחסות לבנייה צמודת קרקע, היעדר תקינה ירוקה עבור בנייה צמודת הקרקע, מעכב את הפוטנציאל להתייעלות האנרגטית בסקטור זה העשוי לייצר בשנים הבאות הזדמנויות מרובות (ולו בשל תחלופת הבתים בפרצלציות קיימות). בנייה צמודת קרקע מאפיינת במקומות רבים את ראשית הדרך לבנייה מאופסת אנרגיה בשל הקלות היחסית ליישום טכנולוגיות ותכנון ביו אקלימי בבניה זו. גם הבדיקה היישומית שנערכה במחקר זה העלתה כי האתגר ליישום בנייה מאופסת אנרגיה בבנייה צמודת קרקע בישראל אינו מורכב כמו בבנייה רוויה וקיימת היתכנות גבוהה לאיפוס מלא.

6.1.4. השלטון המקומי, תקנות בנייה מקומיות ורישוי מבנים

כוחם של השלטון המקומי ושל ערים גדולות בעולם ביישום תקנים לצמצום צריכת אנרגיה במבנים מתחזק בשנים האחרונות באמצעות הפעלת מדיניות מקומית להתייעלות אנרגטית. מדיניות עירונית כוללת טיפול הן במבנים בודדים והן במרקמים העירוניים. בישראל, החלטת פורום ה-15⁷¹ (פורום הערים העצמאיות בישראל- ערים המוגדרות כעצמאיות תקציבית, נתון המאפשר להם חופש פעולה בקבלת החלטות בקנה מידה מקומי) לאמץ את ת"י 5281 כמדיניות עירונית מחייבת בערי הפורום, באופן הדרגתי ולאורך מספר שנים, יצרה מהפכה של ממש בתחום הבנייה הירוקה בישראל, שכן בערים הנכללות בהחלטת פורום ה-15 מתגוררים קרוב ל-3 מיליון תושבים (שהם כ-40% מאוכלוסיית ישראל). ההחלטה הפכה את הפורום לגוף מוביל בהתמודדות הישראלית מול אתגרי האנרגיה והזיהום בפרט והקיימות בכלל. החלטה זו מעידה על הפוטנציאל להחיל החלטה דומה בנושא בנייה

כיום השיטה המהירה ביותר והזולה ביותר לביצוע מבנים גבוהים ורבי קומות. התארגנות זו הצליחה לחולל תיקון זמני בחוק שמהותו ביטול הדרישה לשיעור הבידוד התרמי הנדרש בגשר התרמי הנוצר בשיטת ברנוביץ' בין קיר החוץ והתקרה. התיקון עשוי לאפשר לקבלנים להתקדם לקראת יישום פתרונות וחידושים בשיטה לטובת חמרת הבידוד בגשרים התרמיים בעלות סבירה. ואכן, בתקופה זו נוצרו שיתופי פעולה בין יצרנים וחברות בנייה שיאפשרו זאת (פרק 6).

⁷⁰ בידוד בנייני מגורים בישראל: חסמים, הזדמנויות והמלצות ליישום, רוני דניאל ויאיר שוורץ, 2014.
⁷¹ <http://www.forum15.org.il/>

מאופסת אנרגיה, הן כהחלטה עתידית והן בנסיבות שבהן בנייה ירוקה אינה אפשרית או שקיימים חסמים ליישומה (כדוגמת תחום מבנים צמודי קרקע, שאינם מקבלים מענה בהחלטת פורום ה-15).

כמו כן, באפשרות הרשות לכוון לתכנון מאופס אנרגיה לא רק ברמת הבניין אלא ברמת השכונה, תוך הגדלת פוטנציאל הייצור של אנרגיות מתחדשות ולהטמעה של מערכות ייצור אנרגיה מתחדשת שתאפשר איפוס של מספר רב של מבנים בשטח נתון. בשנים האחרונות התגבשו במספר מקומות בעולם תכניות לשכונות ומתחמים מודעי אנרגיה כגון מתחם Seattle 2030 District.⁷²

להלן מספר **אתגרים** הקשורים בסמכות הרשות המקומית ויכולתה השפיע על תכנון בנייה מאופסת אנרגיה:

א. תכנון עירוני תומך

תכנון עירוני תומך הוא פעולה הקודמת לתכנון הבניין, והיא כוללת הגדרות לשימושים, מיקום, גודל, הכוונה של מגרשים לבנייה וחלוקה של תשתיות בסיסיות. האלמנטים החשובים למבנים מאופסי אנרגיה בתכניות לבנייני עירוני (תב"עות) הם:

- כיוון והפנית חזיתות הבניינים: כפי שראינו בבחינה היישומית בפרק 4, חזית דרומית גדולה עדיפה כחזית עיקרית לעומת חזיתות מערביות ומזרחיות. על הפרצלציה ושאר המערכות העירוניות (מערכת התנועה, הרחוב, הנוף העירוני הפתוח) להיות מתוכננים בהתאם.

- המרחק בין הבניינים, החלוקה למגרשים וקביעת גודלם: חלוקה זו נעשית באופן היסטורי בהתאם לטיפולוגיות הבנייה והצפיפות הנדרשת. אולם, לא תמיד נלקחים בחשבון אלמנטים אשר ביכולתם להבטיח את היכולת ליצור אנרגיה כמו זכויות השמש, הצללה על שטחי גגות משותפים או על שטחים פתוחים וכו'. פיתוח באיזורים מבונים מחייב התמודדות עם אתגרים קיימים כמו מבנים או אלמנטים אחרים המטילים צל ומצמצמים את האפשרות לנצל את קרינת השמש לייצור אנרגיה.

- מספר יחידות הדיור במבנה במרחב הישראלי המצטופף: צפיפות גבוהה יותר משמעותה אתגר גדול יותר לאיפוס המבנה הבודד (כאשר מדובר בצפיפות נטו, כלומר מספר יחידות הדיור פר מגרש/מבנה). אחוז השטח הבנוי (מספר הדירות) בעל היכולת להגיע לאיפוס אנרגטי יורד באופן משמעותי עם עליית מספר הקומות בבניין, זאת משום שבעוד שטח התכסית עליה ניתן להפיק אנרגיה (כדוגמת תאים פוטולטאים על גג המבנה) נשאר קבוע, כמות האנרגיה המופקת מתחלקת בין מספר גדול יותר של דירות. לכן, יש להתייחס לשטחים פתוחים (ציבוריים ופרטיים) כקרקע נדרשת לטובת ייצור אנרגיה.

- שימוש בשטחים ציבוריים לתשתיות סולאריות: עדיין לא קיים בישראל מנגנון המאפשר שימוש בשטחים עירוניים ציבוריים פתוחים לטובת ייצור אנרגיה מתחדשת. זהו אתגר מורכב מבחינות

⁷² מקור: Zero Carbon Compendium 2015

שונות ובינהן, תחזוקה, בעלות קרקע ומתקנים, קרבה למבנים, תכנון עירוני איכותי, מורכבות ריבוי מחזיקי עניין וכד'.

•תכניות עירוניות עשויות לכלול מנגנונים להקניית זכויות שמש או זכויות רכישה של גגות לטובת ייצור חשמל סולרי.

ב.תקנות בנייה עירוניות

באופן היסטורי, תקנות מגבילות לעיצוב חזיתות המבנים, כמו למשל החלטה עירונית המחייבת חיפוי המבנה בלוחות אבן הובילו להטמעה רחבה למדי של שיטת ברנוביץ בבנייה הישראלית. שיטת בנייה זו מאתגרת את היכולת לבצע בידוד איכותי וללא גשרים תרמיים במעטפת הבניין.

ג.רשויות עצמאיות במרחב העירוני

ביכולתן של הרשויות המקומיות להעניק אוטונומיה לרשויות נפרדות המנהלות חלקים שבשטחן. מעמד שכזה קיים למשל לקמפוס אוניברסיטת תל-אביב, אשר נכון לעת כתיבת המחקר עתידה להקים מערך עירוני ראשון מסוגו בישראל של מתקנים פוטוולטאים על גגות מבני הקמפוס לטובת ייצור עצמי לצריכת האנרגיה במבני הקמפוס.

ד.התארגנות ציבורית

רשויות מקומיות יכולות להוביל מדיניות של בנייה מודעת אנרגיה, בין היתר באמצעות שיתופי פעולה ציבוריים פרטיים. למשל, החברה לאנרגיה מתחדשת אילת-אילות היא חברה שלא למטרות רווח, בבעלות קיבוצי הערבה, הקרן הקיימת לישראל, וגופי תעשייה, פיתוח ואקדמיה בישראל. היא חלוצה בתחום ההתארגנות הציבורית שמטרתה לעודד בנייה מאופסת אנרגיה, ויש לה פוטנציאל להיות מודל להתארגנות דומה של רשויות שלטון מקומי בישראל.

6.1.5. שיפור תקנות והסדרים הנוגעים לייצור אנרגיה

א.תכנית מתאר ארצית למתקנים פוטוולטאיים (תמ"א 10/ד/10 משנת 2010):

בישראל, מכרז להקמת שתי תחנות כח סולאריות הספק כולל של 250 מגה-וואט נמצא בשלבים סופיים. לעומתו, השימוש במערכות פרטיות המחוברות לרשת החשמל מניב מאות מגה-וואט בלבד אך נמצא בעלייה מתמדת⁷³.

תכנית המתאר הארצית המתייחסת באופן מיוחד למתקנים פוטו וולטאיים קטנים ובינוניים (עד 750 דונם) נכתבה על מנת להאיץ ולקדם התקנת מתקנים כאלה על גגות ובשטחים מתאימים ולקבוע את הכלים וההנחיות לאישור הקמתם. על מנת להקל וליצור מסלול היתרים מהיר וזמין, התכנית מאפשרת מתן היתרי בניה למתקנים סולאריים גם אם התכנית המקומית החלה אינה כוללת שימוש למתקן פוטו וולטאי. בבניינים שיעודם למגורים התמ"א מאפשרת התקנת פנלים פוטו-וולטאיים על גגות המבנים ועל החזיתות, אולם, קיימות בתכנית מספר הסתייגויות, במיוחד כאשר מדובר בבנייה למגורים בסביבה עירונית. כך למשל:

⁷³ ע"פ משרד התשתיות, האנרגיה והמים

<<http://energy.gov.il/Subjects/RE/Pages/GxmsMniRenewableEnergyAbout.a.spx>>

•התכנית מעניקה תעודת להקמת מתקנים פוטוולטאים בפריפריה.

•התכנית מאפשרת לרשויות מקומית להחליט באופן עצמאי בעניין שימוש בגגות חניונים או מגרשי חנייה פתוחים בסמיכות לבנייני מגורים.

•מתקנים הממוקמים על עמודים, טרקרים (משטח מוגבה מהקרקע המאפשר עקיבה אחר תנועת השמש המגביר את יעילותו של המתקן) או על הקרקע דורשים בדרך כלל מבנים תפעוליים וכן דרך גישה, תשתיות וגידור, ולמעשה קשה ליישם בבנייה למגורים הן מבחינת היתרי הבנייה והתב"עות והן מבחינת נכונות היזמים.

•על פי העדכון לנוסח תקנות התכנון והבניה (עבודות ומבנים הפטורים מהיתר), מתקן פוטו וולטאי ביתי (עד 15 קילו וואט) או עסקי קטן (עד 50 קילו וואט) על גג מבנה, אינו דורש כיום היתר בנייה בתנאי שהוא אינו בא על חשבון מתקנים טכניים חיוניים לרבות מערכת סולרית לאספקת מים חמים. עם זאת, עדיין יש לקבל רשיון מרשות החשמל לקראת ביצוע ההתקנה, ולהציג אישורים ממהנדס חשמל ומהנדס בניין. העדכון הוא רלוונטי בעיקר לשיפוץ מבנים, כיוון שבבנייה החדשה הוצאת היתר בנייה נדרשת בכל מקרה. בבנייה רוויה ללא דירות גג, ניתן לנצל את שטח הגג להקמת מערך משותף. בבנייה רוויה עם דירות גג, הפוטנציאל הוא עבור יחידות הדיור העליונות בלבד, אשר יכולות להתקין פנלים פוטוולטאים על הגג העליון. העדכון אינו מתייחס להתקנת פנלים פוטו וולטאיים בחזיתות המבנה.

ב.הסדרת מונה נטו

הסדרת מונה נטו היא חיבור מתקנים פוטו וולטאיים מקומיים לרשת החשמל הן לצריכה עצמית (הסדרה תעריפית ביתית) והן לצורך מכירת האנרגיה לרשת החשמל (הסדרה עסקית)⁷⁴. בעוד הסדרת מונה נטו מהווה תמריץ אידיאלי עבור בתים פרטיים וצמודי קרקע, יש לה מספר מגבלות יישומיות בבנייני דירות בהם כל יחידת דיור היא לקוח נפרד של חברת החשמל עם מונה חשמל נפרד.

על פי מונה נטו, יצרן צורך את החשמל שהפיק ישירות מן המתקן שבבעלותו, ומזוכה עבור מכירת העודפים לרשת החשמל דרך חשבון חשמל, או בזיכוי כספי. ישנה אפשרות להעביר את מניית החשמל העודפת לצרכן נוסף שהוא תחת אותו ארגון, אך לא קיימת בישראל מכירה לצרכן אחר מארגון אחר. זאת משום שלפי חוקי המס בישראל אין אפשרות לשלב בין עסקאות מכירה וקנייה, ולכן חברת החשמל אינה יכולה לקנות חשמל מיצרן אחד ולמכור אותו לצרכן אחר. התקנת פנלים פוטוולטאים משותפים עלולה להיות בעייתית בשל מורכבות חלוקת המנייה הכוללת בין הדיירים. התקנת מערכות נפרדות לכל דייר מייקרת את ההשקעה הפרטית של כל משק בית בנפרד, ויש בהן ויתור על היתרון הכלכלי שבהשקעה אחת גדולה (economies of scale). בנוסף, כאשר לא כל הדירות במבנה הן מאופסות אנרגיה או מחוברות לפנלים פוטו וולטאיים, וכל אחת מן הדירות שיש לה

⁷⁴ תעריף הזנה הוא חוזה המחייב את משק החשמל, באמצעות חברת החשמל, לרכוש מבעלי מתקן לייצור אנרגיה מתחדשת את כלל האנרגיה שתיוצר במחיר קבוע (בחווה) וצמוד למדד, לתקופה מוגדרת מראש.

חיבור כזה פועלת באופן עצמאי, מאזן הצריכה השנתי שלה מחושב באופן נפרד, ולמעשה הסמכה אפשרית לאיפוס אנרגטית מוענקת לכל דירה ולא למבנה בכללותו.

יחד עם זאת, בניין דירות יכול להחשב כאירגון אחד בכל הקשור לניהול משותף של צריכת האנרגיה, באם ההתייחסות היא לשטחים הציבוריים של המבנה או למערכות משותפות שהתשלום עבור תחזוקתן הוא משותף. במקרים כאלו הן הייצור והן הצריכה נעשים במשותף. נוסף על כך, בעוד שהעברת מניית החשמל אינה מתאפשרת בין יצרן אחד לצרכנים אחרים באמצעות חברת החשמל, היא כן יכולה להתבצע באופן ישיר בין הבניין לדירותיו. במקרה כזה הבניין יכול לייצר אנרגיה ולהתחבר כיחידה אחת לחברת החשמל. מונים פנימיים יכולים לאפשר "מכירה" פנימית של המשאבים בין הדיירים. במקרה כזה נדרשת אחריות משותפת לדירות, והבניין כולו עשוי לקבל מעמד מאופס אנרגיה באופן קולקטיבי. הדבר מצריך הבנייה של מודל עיסקי ומערכת יחסים בה הבניין הוא יצרן והדירות הן צרכניות, מבלי לערב בכך את חברת החשמל.

ככל שהדרישה להקמת מתקנים סולאריים על בניינים תגדל, כך יידרשו מנגנונים עיסקיים חדשניים ותכניות מטעם רשויות החשמל אשר יאפשרו השתתפות של כל מיני סוגי לקוחות. בעולם קיימים מודלים עיסקיים חדשניים הפותרים סוגיות אלה. למשל, בקליפורניה קיימת הסדרת מונה נטו "וירטואלי". זוהי הסדרה תעריפית המאפשרת לבנייני מגורים משותפים לחלוק מערך פוטו-וולטאי אחד, ובכך להגדיל את תועלת ההשקעה שבהקמתו. מונה וירטואלי מאפשר התקנה של מערכת פוטו-וולטאית אחת (בבניין) לצרכנים מרובים (הדירות). החשמל אינו עובר באופן ישיר אל מונה הדירות, אלא ישירות בחזרה אל הרשת. חברת החשמל מחשבת את כמות האנרגייה המיוצרת על גג המבנה, ומחלקת אותה בין הדיירים על סמך חוזה קבוע מראש.

6.2. מוכנות תשתיות החשמל

הגידול במקורות הייצור של אנרגיות מתחדשות בעולם הוביל למגמות פיזור של ייצור חשמל. מגמות אלו מתאפיינות בריבוי יצרני אנרגיה קטנים ובריבוי מתקנים סולריים על גגות מבנים, או בסמיכות גבוהה לצרכנים.

בגרמניה, למשל, אשר בה ייצור החשמל ממקורות מתחדשים עלה מכ- 6% מייצור החשמל בשנת 2000 לכ- 28% מייצור החשמל בשנת 2015, חברות קטנות ומקומיות הן האחראיות למרבית הייצור⁷⁵: כ- 47% מכלל יצרני האנרגיה הסולארית בגרמניה הם יצרנים קטנים, לעומת כ- 12% יצרניות אנרגיה גדולות. בנוסף, עקב הייצור המרובה בגרמניה, נוצרים מצבים בהם צריכת האנרגיה בפועל פחותה מכמות האנרגיה הזמינה בו זמנית ברשת. בארה"ב, ייצור אנרגיה סולארית באמצעות פנלים פוטו-וולטאיים בשיטת מוני נטו לצריכה עצמית הוא מקור האנרגיה בעל הגידול המשמעותי

⁷⁵ מקור: הרצאתה של מירנדה שרורר מאוניברסיטת פריי בברלין, חוקרות מובילה בעולם בתחום אנרגיות מתחדשות, אשר דיברה בביתה"ס למדיניות, אוניברסיטת תל-אביב ב 15.11.2015.

ביותר במשק האנרגיה בכללותו, וכן קיימת מגמת גידול בחברות פרטיות קטנות לייצור אנרגיה: IOU Owned Utility programs⁷⁶. Investor

ריבוי מקורות האנרגיה המפוזרים משפיעים על רשת החשמל. ככל שיעשה שימוש רחב היקף במקורות אנרגיה מתחדשות ללא הכנה מתאימה של רשת החשמל, כך יגדלו גם התועלות השליליות (כגון עלויות הולכה ואיבודי חשמל). בעיות אלו באו לפיתרון במקומות מסויימים בעולם על ידי שינוי עיקרון גבולות פעילות רשת החשמל לאזורים "מצומצמים", עקרון המכונה "מיקרו-גרידים". פתרונות נוספים הם ניהול חכם של חיבור לרשת חשמל באמצעות מערכות (BoS) Balance of Systems, שתפקידן לאזן בין ייצור האנרגיה באמצעות פנלים פוטו וולטאיים ורשת החשמל. רשת חכמה מסוגלת לייעל את השליטה והבקרה בכמות החשמל המועברת לרשת, לשפר את יכולת תגובת המערכת בזמן אמת וליצור התאמה טובה יותר בין זמני הייצור לזמני ההיצע. בנוסף הגברת יכולות אגירת האנרגיה יכולות להפחית את התועלות השליליות מייצור עודף או חסר של אנרגיה ממקורות מתחדשים.

ייצור החשמל בישראל, והובלתו לצרכנים מרוכז בידי חברת החשמל המנהלת את רשת החשמל הארצית. כמו כן, ייצור מרכיב משמעותי של האנרגיה המתחדשת באזורים מרוחקים כמו הנגב יחייב השקעות משמעותיות ובתשתיות הולכה יקרות⁷⁷. קיימת חשיבות רבה לפיזור הגיאוגרפי של מתקני הייצור והסמכת חלקם למוקד הצריכה. יתכן שתהליך הפיזור של ייצור החשמל בישראל החל עם חלוקת הארץ לאזורי תחנות הכוח וחלוקת הרשת לרשתות משנה.

ככל שהדרישה להקמת מתקנים סולאריים על בניינים תגדל, כך יידרשו מנגנונים עסקיים חדשניים ותכניות מטעם רשויות החשמל אשר יאפשרו השתתפות של כל מיני סוגי לקוחות. למשל, community solar, היא מודל השמה חדשני התופס תאוצה בארה"ב המאפשר מיקום, רכישה ומימון של ייצור אנרגיה מתחדשת. המודל כולל שילוב של אלמנטים עסקיים כמו רכישה קבוצתית, השקעה קהילתית (community investment), מימון קהל (crowd financing).

על פי הפורום הישראלי לאנרגיה⁷⁸, לישראל פוטנציאל ייצור של כ 95% מהביקוש החזוי ל- 2040 ממקורות מתחדשים ובעלות דומה לייצור אנרגיה ממקורות קונבנציונליים, אם המדינה תגיב במדיניות תומכת. לפי הדו"ח, המגבלה העיקרית על פיתוח מתקנים להפקת אנרגיה סולארית בישראל בהיקפים גדולים ובהתאם לפוטנציאל הקרינה עלולה להיות המחסור בשטח פתוח זמין.

6.3. המתכננים

תכנון חכם ויעיל הוא הבסיס החשוב בשרשרת הצעדים הנדרשים לייצור מבנים מאופסי אנרגיה. יתרה מכך, עלותו נמוכה לעומת תמורתו הגבוהה. המתכננים הם בעלי ההכשרה, הידע העדכני

⁷⁶ IRENA, *The Age of Renewable Power Designing National Roadmaps for A Successful Transformation*. 2015

⁷⁷ המועצה הלאומית לכלכלה, משרד ראש הממשלה, *הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות*, המלצות הצוות הבין משרדי, 2013

⁷⁸ דולב, ש, סגל, נ, כהן-פארן, י, רוזנטל, ג, גבאי, ד. אפס פליטות פחמן בישראל, *חזון למשק האנרגיה בשנת 2040*, הסבת משק החשמל של ישראל לנטול פליטות גזי חממה, הפורום הישראלי לאנרגיה, 2013

הנדרש, ובעלי הפוטנציאל להוביל חדשנות בתהליכי התכנון. על מנת לנתב את תהליכי התכנון לטובת מענה אינטגרטיבי להשגת מטרות כמו איפוס אנרגטי נדרשים מהם פרואקטיביות ומוכנות לשיתופי פעולה. כמו כן, עם התפתחותם והטמעתם של תקנים לבנייה ירוקה בתהליכי הבנייה בישראל, נוצר ביקוש לענף חדש בתחום הייעוץ לבנייה ירוקה והייעוץ התרמי.

הכלים התכנוניים משתכללים כל הזמן. תוכנות ממחשבות, למיניהן, משמשות ככלי עבודה לתכנון ולמידול אנרגטי כבר בשלבי התכנון והעיצוב הראשוניים. ממשקים כמו Building Information Modeling (BIM), בין תוכנות לתכנון ומידול בתלת-מימד לבין תוכנות לחישובים פיסיקליים ונתוני עלויות בנייה מסייעים בבחינת התועלות הגלומות בהתייעלות אנרגטית ובקבלת החלטות אסטרטגיות במהלך התכנון.

כאמור תכנון מבנה מאופס אנרגיה דורש ידע מעמיק מסוג חדש, הכולל:

- הבנה מעמיקה והתמקצעות בתכנון פאסיבי להתייעלות אנרגטית: העמדה מיטבית של המבנה, איפיון נכון של מעטפת המבנה, הכרה של שיטות וחומרי בנייה מתקדמים, שימוש אופטימלי במערכות זיגוג ובהצללות.
- הבנת עקרונות פעולתן של מערכות אוורור ומיזוג אוויר יעילות ואופן הפעלתן.
- יכולת חיזוי של צריכת האנרגיה במבנה תוך כדי התכנון, על ידי שימוש בתוכנות ובמודלים ממוחשבים.
- היכרות עם טכנולוגיות חדישות לייצור וניהול החשמל ממקורות מתחדשים ושילובם בתכנון ועיצוב המבנה.

לכאורה ניתן לטעון, שמבחינת זמינותם של הידע המקצועי וכלי העבודה לתכנון מבנים מאופסי אנרגיה קיים פוטנציאל גדול למוכנות השוק. בפועל, עדיין קיים בישראל פער בין הידע התיאורטי הקיים לבין הניסיון המעשי המוכח. פריצת הדרך בתחום תכנון מבני מגורים מאופסי אנרגיה על ידי המתכננים עדיין עומדת בפני אתגרי עקומת הלמידה של המתכננים, צמצום הפערים בין ידע תיאורטי לניסיון מעשי ואתגרי עקומת החדירה למשק אשר יורחבו בסעיפים הבאים:

א.היעדר תהליכי תכנון אינטגרטיביים

תהליכי תכנון סטנדרטיים נוטים להסתמך על מומחים שונים העובדים באופן מבודד למדי אחד מן השני. סגנון זה של עבודה, מקורה בהבנה מוגבלת של מדע הבניין בקרב אדריכלים, ומעורבות מוגבלת של מהנדסים בתהליכי התכנון (Lovins, 2011). שילובם של אלמנטים תכנוניים להתייעלות אנרגטית, כמו מערכות איקלום, מעטפות בניין חכמות או תאורה מתקדמת, מחייבים חשיבה תכנונית מערכתית אינטגרטיבית, אולם תהליכי תכנון אינטגרטיביים הם תהליכים מאתגרים ומורכבים. צוות המתכננים והיזמים כאחד, נדרשים להצהיר על מטרות תכנון משותפות ולפתח את הפרויקט כמכלול ובאופן הוליסטי. איפוס אנרגטי של מבנה עשוי להוות גורם חיובי להתכנסות הצוות למטרת תכנון משותפת. תכנון אינטגרטיבי עשוי גם לצמצם פערים בין איכות התכנון ואיכות הביצוע, ולעודד קבלנים

לאמץ פיתוחים חדשים של חומרי בנייה⁷⁹. כפי שלמדנו משיחות שערכנו עם אנשי מקצוע, בפועל, פעמים רבות היועץ לבנייה ירוקה הוא שמנסה לחולל את האינטגרציה הרצויה בין תחומי הייעוץ השונים. כיום בישראל, (כמו בעולם) יישום תהליכי תכנון אינטגרטיביים בענף המגורים הוא מוגבל. יועצים טכניים לרוב אינם מעורבים בתהליך התכנון מראשיתו, ופעמים רבות איפיונם של אלמנטים תכנוניים בעלי חשיבות (מערכות איקלום, למשל) מתבצע בשלבי תכנון מאוחרים או בסמוך לביצוע. על מנת לקדם את התכנון האינטגרטיבי, יזמים צריכים לדרוש אותו ולממנו.

ב. היעדר כלי עבודה מתקדמים ומוסכמים לעבודה האינטגרטיבית לאיפוס אנרגטי

כלים תכנוניים, כגון תוכנות לחיזוי צריכת האנרגיה במבנה, הם אמצעי להתווית "דיון" כולל של היועצים לטובת התכנון האינטגרטיבי. התוכנות המקומיות והזמינות בשפה העברית עדיין אינן משוכללות מספיק לתכנון מורכב כתכנון מבנה מאופס אנרגיה. תוכנות זרות עשויות להיות יקרות יחסית, ושילובם בקרב המתכננים הישראלים עלול להיות מאתגר.

ג. היעדר מעקב אחר ביצועים אנרגטיים של פרויקטים מקומיים, ושקיפות נתונים, יכולת השוק ללמוד

מוגבלת:

כיום בישראל עדיין חסרה פרקטיקה של מעקב אחר צריכת אנרגיה בבניינים. עם איסוף נתונים מניטור צריכת האנרגיה בבניינים שהושקעו בהם מאמצים להתייעלות אנרגטית, תעלנה תובנות מקומיות ומעשיות לגבי הפער שבין חיזוי צריכת האנרגיה במבנה לבין רמות הצריכה בפועל. צמצום הפער האנרגטי הוא אתגר שחובה להתגבר עליו לשם השגת יעדי בנייה מאופסת אנרגיה. ניטור נדרש במיוחד עבור מבנים מאופסי אנרגיה הנבנים כיום בישראל. לצורך פיתוח התחום בישראל.

6.4. היזמים וחברות הבנייה

שוק הבנייה למגורים בישראל הוא שוק בנייה פרטי ברובו (בניגוד לדיור ציבורי הנבנה מכספי המדינה). בשלב הראשוני בתהליך אימוץ בנייה מאופסת אנרגיה, חברות חלוציות (early adopters) העוסקות ביזמות ובבנייה למגורים בישראל עשויות להירתם לפרויקטים מאופסי אנרגיה ממניעים ערכיים או/וגם על מנת למתג עצמן כייחודיות, מובילות וחדשניות. בשלב מאוחר יותר, עם התגברות המודעות הציבורית והתעוררות ביקושים גורם התחרותיות והשיווקיות יכול להניע היצעים רחבים יותר ובתנאים נוחים יותר.

להלן סקירת **האתגרים** הניצבים בפני היזמים וחברות הבנייה:

א. איטיות באימוץ חדשנות בענף הבנייה:

ענף הבנייה הוא איטי ביכולתו לאמץ שינויים וגישות חדשות. בין היתר מהסיבות הבאות:

- גובה השקעות ומידת הסיכון: חדשנות מצריכה השקעה גדולה במשאבים, אך בשל אופיו של שוק הבנייה האיטי במימוש תהליכים, משאבים אלו אינם מתורגמים לרווח בטווח הקצר. כמו כן, מרבית הבנייה למגורים בישראל היא בנייה רוויה, מה שמעיד הן על גודל ההשקעות והן על

⁷⁹ למשל, להוביל את שיטת הבנייה לכיוונים חדשים. למשל בניית קירות מילואה בשיטה מודולרית, מצמצמת את משך הבנייה, מאפשרת את העלאת עובי הבידוד התרמי, מאפשרת בדיקת איכות הבנייה הנעשית בתנאי מפעל, ובו זמנית מחילה את עלותו של הפרויקט מבוסס על מקרה מבחן למבנה פאסיב האוס מאופס אנרגיה בפילדלפיה, ארה"ב.

המורכבות הטכנולוגית המגבירים את המורכבות הפיננסית ומידת הסיכון הכרוכה בה. לא בכדי, התפתחויות הנוגעות לבנייה מאופסת אנרגיה מרחבי העולם מראות כי אלה מתחילה בקנה המידה הקטן של בתים צמודי קרקע או בניינים משותפים קטנים.

• מבנה שוק הבניה למגורים בישראל: שוק הבניה למגורים בישראל מורכב ממספר מצומצם של חברות גדולות וממספר רב של חברות בינויות וקטנות. אמנם בשנים האחרונות מתרחשת מגמת התחזקות של חברות הבניה הבינויות והקטנות בתחום הבניה למגורים⁸⁰, אך בפועל למעט חברות בישראל היכולות, הרצון והמשאבים להשקיע בחדשנות.

• קבעון מתודולוגיות בנייה מקובלות: בכל הנוגע לידע המעשי (Know how) שביישום טכנולוגיות ושיטות בנייה יש ערך רב לניסיון והתמחות אנשי מקצועות הבניה. מצד אחד, ניסיון עשיר מאפשר לחברות הבניה לייצר מבנים בעלי איכות בנייה גבוהה, אשר יכולה לתרום לאיכותו האנגרטי של המבנה. מאידך, מצב זה עלול להוביל לקבעון בשימוש מתודולוגיות בנייה מקובלות. הדבר נכון עוד יותר לגבי חברות בנייה ויזמות גדולות אשר להן רשת קבועה של ספקים ואנשי מקצוע שלעיתים קשה להכניס בה שינויים.

• פיתוחים חדשניים ויישום חדשנות בהתהליכי תכנון ובניה מצריכים מנהיגות ומדיניות אירגונית המכוונת לכך: עידוד האירגון להשקיע בהכשרות מקצועיות לקבלנים ומנהלי הפרויקטים, קורסים, השתלמויות מקצועיות בתחומים חדשים, כנסים בינלאומיים, ביקורים במפעלי ייצור בחו"ל להיכרות עם טכנולוגיות חדשות, הזמנת יועצים בינלאומיים, יכולים להוות מנוף לשינויים ואימוץ חדשנות.

• מיעוט הזדמנויות לפרויקטים ייחודיים בסקטור הבניה למגורים: לרוב, חברות הבניה לא יישמו שינויים באופן התנדבותי, אלא ימשיכו לעבוד בשיטות הבניה המוכרות, המהירות והזולות. חדשנות צומחת בפרויקטים קטנים ייחודיים בד"כ (שאינם חלק מייצור רחב היקף). חברות גדולות, לעומת זאת, יכולות להרשות לעצמן פיתוח חדשנות באמצעות מודלים שונים, תוך שילוב רעיונות חדשים ממקורות חוץ-אירגוניים או הנעת תהליכי מחקר ופיתוח פנימיים.

ב. תועלתם של היזמים מבניה מאופסת אנרגיה מוטלת בספק והם זקוקים לתמריצים ולמודלים מימוניים חדשניים

בניינים מאופסי אנרגיה צריכים להיות קלים לבניה ולתפעול, בעלי תועלת כלכלית ובעלי יתרון שיווקי, על מנת שייזמים יאמצו אותם. מבנים מסוג זה עלולים לעלות יותר בתחילת הדרך⁸¹, אך יכולים להפוך לכלכליים יותר ולהניב החזרי השקעה גבוהים כתוצאה מחסכון בעלויות התפעול לאורך חייהם. בעוד התועלת ארוכת הטווח מפתה, האתגר התקציבי המרכזי הוא במימון הראשוני של הבניין. כיוון שהיזמים אינם הנהנים מפוטנציאל החיסכון בתפעול הבניין לאחר מכירת דירות, הם אינם ממהרים להשקיע באלמנטים להתייעלות אנרגטית באם אלו אינם יכולים להעלות את מחירי הדירות, כלומר

⁸⁰ "חברות הנדל"ן הקטנות עולות קומה", כלכליסט, שי פאוזנר, ספטמבר 2010.
⁸¹ למרות שכפי שהסימולציות במחקר זה הראו, בנטיבות מסוימות העלות עשויה להיות נמוכה אף יותר מבניה סטנדרטית, בהינתן צמצום שטח מעטפת הבניין.

אם ההשקעה הראשונית אינה משווקת ומתומחרת לצרכן (למשל, תוספת בידוד תרמי או איטום אוויר קשים יותר לשיווק לעומת קיר מעטפת סטנדרטי, לעומת זאת מערכת מיזוג אוויר אינוורטר כתחליף להכנה בלבד למיזוג אוויר מפוצל היא בעלת פוטנציאל שיווקי גבוה יותר להעלאת מחיר הדירה).

גם לכלי מימון חדשניים יש פוטנציאל גדול להגדלת התעניינות היזמים בבנייה מאופסת אנרגיה. בעולם קיימים מודלים עסקיים המאפשרים ליזמים לממש את הפוטנציאל ולשווקו. כך למשל מודל ה energy service agreements, מודל המאפשר ליזמים להיעזר בגורם שלישי (ESCO) האחראי על ביצוע אלמנטים להתייעלות אנרגטית בבנייה המתומחרים מול הצרכן בנפרד מיתר הדירה ולתקופה בה החסכון האנרגטי הופך למקור מימון. לצורך כך, חשבון חשמל פיקטיבי משולם על יד רוכש הדירה לגורם השלישי למשך תקופה מחושבת ומוסכמת מראש, בעוד חשבון החשמל האמיתי והמצומצם משולם על ידי הגורם השלישי לחברת החשמל. ההפרש בין החשבונות הוא המימון.

כמו כן, יזמים עשויים למלא מקום חשוב בגישור ומציאת פתרונות חוזיים להסדרות מקוריות למונה חברת החשמל במעמד שיווק ומכירת דירות במבנים מאופסי אנרגיה אם ימצא בהם ערך כלכלי, כלומר אם יעלו את ערך הדירות, או לחלופין יזכו את היזם בהטבות כלכליות.

ג. היעדר גוף ללא מטרות רווח של חברות הבנייה והיזמים האגד אותם למטרה המשותפת של בנייה

מודעת אנרגיה/ מאופסת אנרגיה

חברות יזמיות וחברות מבצעות, גם אם הן בעלות התפיסה "הירוקה", יכולות לשתף פעולה עם מגמות השוק אך אינן יכולות לשנות אותו. יזם בודד המונע ממטרות רווח יכול להיות שותף בתהליך, אך לא יכול להכתיב מהלך גדול המשפיע על כלל השוק. ריבוי תהליכי ניהול לחדשנות עשויים לתרום להיווצרות שיתופי פעולה פוריים. בקליפורניה למשל, פועל ה- Zero Energy Commercial Buildings Consortium (CBC). זהו שיתוף פעולה פרטי ציבורי שמטרתו היא לחבר ארגונים לא ממשלתיים, חברות יזמות ובנייה, וחברות מסחריות למטרת קידום בנייה מאופסת אנרגיה.⁸²

6.5. היצרנים והספקים של חומרי הבנייה והטכנולוגיות

6.5.1. רשתות היצרנים

ספקים וחברות יצרניות לחומרי בנייה יכולים להכשיר לוביסטים לעודד מדיניות שתטיב עם התחום אותו הם מייצגים, הם משקיעים משאבים בפרסום ומייצרים שיתופי פעולה לקידום מחקרים יישומיים של מוצרים חדשניים בשוק הבנייה. לדוגמא:

• האיגוד הישראלי לאנרגיה חכמה: הוקמה פלטפורמה לאומית לקידום ושיתוף הידע הקיים והמתפתח בארץ ובעולם ליישום ופיתוח תחום רשת חשמל חכמה והתייעלות אנרגטית (אנרגיה

⁸² כ 500 ארגונים חברים בפורום זה, שהוקם בעידוד המשרד הלאומי לאנרגיה ע"י מענק לצ שנים שמטרתו היא לשתף ארגונים אלה בבחינת הערכות המשק לבנייה מאופסת אנרגיה. חברות בו למשל, AIA, ASHRAE, USGBC ועוד. נושאי העבודה של הפורום: ניתוח מידע ומעקב אחר בניינים, סטנדרטים לבנייה, מעטפות בניין, מימון וערכי נדל"ן, תכנון אינטגרטיבי, תאורה, מערכות מכאניות בבניין, ניהול מערכות אנרגיה בבניין, בעלים ודיירים, עידוד מקצועי לדישיונות למקצועות הבנייה הירוקה. למידע נוסף: <http://www.zeroenergycbc.org/>

חכמה). האיגוד נועד לשתף את מגוון החברות ובעלי העניין בתחום על מנת לוודא שישראל נהנית מהידע הנצבר בעולם ועל מנת לאפשר יישום ופיתוח של הטכנולוגיה המתקדמת ביותר והמתאימה ביותר.

• פורום חברות הבידוד: פורום מקצועי מסחרי של חברות הבידוד אשר הוקם במטרה לקדם את תחום הבידוד בישראל. יעדי הפורום הם: קידום שוק המחבר ידע מקצועי, אכיפה ויישום בפועל, הפיכת תחום הבידוד למנוע צמיחה ותועלת למשק (ע"י חיסכון כלכלי למשק, הוספת מקומות עבודה, הפחתת הזיהום). סנכרון של כלל התקינה והחקיקה בתחום, העלאת המודעות הצרכנית, חינוך השוק והגדלת הביקושים לבידוד איכותי.

• שיתופי פעולה בין חברות: למשל, על רקע אתגר הבידוד בשיטת ברנוביץ, וכחלק משיתוף פעולה עם התאחדות בוני הארץ, חברו חברת תרמוקיר, אלפא פרויקטים ירוקים, וש.ב.א, למצוא פתרון לבידוד חיצוני של המבנה. בתמיכת החברה "סולל בונה" נעשה שימוש בלוחות בידוד חיצוניים לספק מענה לצרכי הבידוד המלאים לפי ת"י 1045.

6.5.2. מגבלות הטכנולוגיות

גם המערכות הטכנולוגיות המתקדמות המותקנות במבנים מאופסי אנרגיה יכולות להוות חסם להגשמת יעדי האיפוס.

מערכות שיחזור חום (MVHR–Mechanical Ventilator and Heat Recovery) - הן מערכות מתקדמות הדורשות מומחיות בעת התקנתן ואחזקתן. היעדר אנשי מקצוע ייעודיים בעלי הכשרה מתאימה בישראל מהווה מחסום בשילוב של מערכות מתקדמות במבנים. שימוש במערכת זו מצריך גם הבנה בסיסית באופן תפעולה וכן תחזוקה שוטפת (החלפת מסננים תכופה). כמו כן, עלות מערכות שיחזור חום גבוהה ויש לבחון את החזר ההשקעה בסוגים שונים של מבנים ובעלויות על מבנים.

תאים פוטוולטאים - יעילותם של התאים תלוייה, בין השאר בעוצמת הקרינה ובטמפרטורה של הקולטנים. בישראל, טמפרטורה הקולטן עלולה להגיע גם לכ-70°C, מה שעלול לפגוע משמעותית ביעילותו⁸³.

6.6. מודעות הציבור

מחקר שבוצע עבור המשרד להגנת הסביבה בנושא שימוש בכלי מתחום הכלכלה ההתנהגותית⁸³ סקר הזדמנויות למיתוג מחודש של תחום הבנייה הירוקה. המחקר מעלה מס' רעיונות אשר ניתן לקשר ישירות למבנים מאופסי אנרגיה והגדלת המודעות הצרכנית להתייעלות אנרגטית:

⁸³ בחינת כלים מתחום הכלכלה ההתנהגותית ויישומם לקידום בנייה ירוקה בישראל, רוני דניאל, אביאל ילינק, אריה רותם ואביטל עשת, 2016.

•שימוש במסר פשוט אחד: המושג "מבנה מאופס אנרגיה" הוא מושג "קל" להסברה. להבדיל מבנייה ירוקה הכוללת מקבץ תחומים, בנייה מאופסת אנרגיה מתמקדת במסר פשוט אחד. פשוטת זו עשויה להוות יתרון בקידום בינוי זה.

•תועלת צרכנית מובהקת: כאשר אנשים אינם מבינים את המוצר הנמכר קשה להם להתחבר אליו. אנשים מוכנים לשלם עבור מה שהם מבינים ורואים את התועלת שבו. בנייה מאופסת אנרגיה מציגה תועלת צרכנית ברורה.

•יצירת סמל סטטוס: מוצרים רבים מצליחים בזכות השפעתם על הסטטוס הנתפס של הצרכן. מבנים מאופסי אנרגיה הינם בעלי פוטנציאל מיתוג אטרקטיבי למוצר חסכוני אך בעל סטטוס מושך, כמו שנעשה בהצלחה, למשל, במקרה של כלי הרכב ההיברידיים או הרכב החשמלי של חברת 'טסלה'. האסטרטגיה לבניית מבנים מאופסים כוללת תכנון השונה מן המקובל כיום בבנייה קונבנציונלית. תכנון שונה זה יכול להבליט חזותית את הבניין. ניתן לנצל הבדל זה לשם יצירת בידול מסחרי וסמל סטטוס. בידול זה יוכל אף לשמש יתרון תחרותי או שיווקי ליזמים.

להיבטים אלו פוטנציאל לשמש כבסיס לשיח המעלה את המודעות לבנייה מאופסת אנרגיה, לגרום לצרכנים להעדיף דירות אלו בכלל השיקולים ברכש דירה ואף להגדיל את חשיבות החיסכון האנרגטי בתודעת הציבור.

7. מסקנות המחקר והמלצות

פרק זה מסכם את מסקנות המחקר ומפרט שורה של המלצות, בהתבסס על ניתוח התקדימים מרחבי העולם ובעקבות בחינה של מקרי המבחן.

כפי שציין המחקר ניתן לחלק את מנגנוני המדיניות להטמעת התייעלות אנרגטית ומבנים מאופסי אנרגיה לשמונה סוגים/קבוצות עיקריות: 1. הגברת המודעות הציבורית והמקצועית, 2. שיפורים בחוקים ותקנות הבנייה 3. הסמכת בניינים לפי דירוג אנרגטי, 4. מתן מידע והקניית ידע על ידי הכשרות לקהילה המקצועית, 5. עידוד פרויקטי חלוץ לדוגמא, 6. פיקוח ומעקב אחר צריכת אנרגיה בבניינים, 7. מתן תמריצים כלכליים וכלי מימון, 8. השקעה במחקר ופיתוח. ההמלצות בפרק זה מעלות צעדים פרקטיים להטמעת בנייה מאופסת אנרגיה בתרבות הבינוי הישראלית.

7.1. תוצאות הבדיקה היישומית- הכוונת שוק האנרגיה

בעוד הבדיקה היישומית הראתה כי מבחינה טכנית ישנה התכנות גבוהה לאיפוס מבנים צמודי קרקע, היעד המאתגר יותר הינו מבני מגורים רבי-קומות: במצב הריאלי שנבדק, ניתן לאפס בין כ-35% ל-65% מיחידות המגורים במגדל בן 10 קומות מגורים תוך שימוש בתמהילים שונים של דודי שמש ותאים פוטוולטאים על גג הבניין. אחוז זה יכול לעלות (עד לכדי 100%, באופן תיאורטי), במידה וניתן להציב תאים פוטוולטאים לייצור חשמל גם בשטחים ציבוריים בסמוך לבניין (סככות מגרשי חנייה וכו'). במידה ופאנלים פוטוולטאים מותקנים על גג הבניין בלבד, אחוז הדירות מאופסות האנרגיה הוא פונקציה ישירה של מספר הקומות, שכן שטח הגג (או, השטח עליו ניתן לייצר חשמל) נשאר קבוע בעוד כמות הצרכנים הולכת ועולה.

יש לזכור כי הבדיקה היישומית בחנה מקרה מבחן ספציפי, אשר לו תכונות מסוימות (גובה, פרוגרמה תכנונית, תנאי סביבה וכו'). מבנה גבוה יותר, למשל, ידרוש כמות דירות גדולה יותר לאיפוס אך יאפשר גם גמישות מרחבית גדולה יותר בשימוש בחזיתות.

לצורך איפוס אנרגטי מלא של מבני מגורים ברמה האסטרטגית-לאומית מחקר זה ממליץ על גישת איפוס יישומית משולבת, המורכבת מהאמצעים הבאים:

א. התייעלות אנרגטית מקסימלית ברמת הבניין – כולל שילוב אמצעים פאסיביים ואקטיביים לצמצום

הדרישות לאנרגיה, כפי שצוינו בראשית המחקר.

ב. ייצור אנרגיה מתחדשת ברמה המקומית – התקנת אמצעים לרתימת אנרגיות מתחדשות (כדוגמת

תאים פוטוולטאים ודודי שמש) על גגות המבנה ובסביבתו.

ג. ייצור אנרגיה מתחדשת ברמה לאומית – על צריכת האנרגיה הנותרת (במידה ולאחר שלבים א' ו-ב

עדין לא יתקיים איפוס) להיות מיוצרת ממקורות מתחדשים (כדוגמת חוות הפאנלים הסולאריים בנגב

או שבשבות הרוח בגולן). המלצה זו משתלבת עם המלצות המדינה בדבר פיתוח יכולות הפקת אנרגיה ממקורות מתחדשים⁸⁴.

כמו כן, הסימולציות הראו כי עלות בנייה מאופסת אנרגיה אינה בהכרח יקרה יותר במידה ונעשית התחשבות תכנונית בצמצום שטח מעטפת המבנה (ללא שינוי בשטח הדירה). על מנת להפוך בנייה מאופסת לנגישה יותר יש לתת את הדגש על כך בתכנון נכון ויעיל, כפי שמציין סעיף א.

7.2. מדיניות תומכת בבנייה מאופסת אנרגיה בישראל

7.2.1. הכרזה על בנייה מאופסת כיעד אנרגטי – מתווה לתהליך

על מנת לקדם בנייה השואפת לאיפוס אנרגטי בישראל, רצוי להקדים ולהכריז עליה כיעד כחלק ממפת הדרכים של המדינה אל יעדי הפחתת פליטות גזי החממה. במקביל, וכפי שנעשה בעולם, על המדינה לנסח הגדרה מקומית למונח "מבנה מאופס אנרגיה בישראל". אימוץ ההגדרה הוא תנאי מקדים לרגולציה, לאור המסקנות מתהליכים דומים במקרי המבחן שנבדקו במסמך זה. לצורך כך, מומלץ כי צוות מגוון המורכב מבעלי עניין שונים, ובהשתתפות הממשלה, יקבע את ההגדרה הרלוונטית לאיפוס אנרגיה בישראל. תהליך דומה נערך בארה"ב ע"י ה- ⁸⁵ U.S. Department of Energy (2015) אשר גיבש הגדרה בשיתוף מחזיקי העניין מן האקדמיה, הפרקטיקה, רשויות עירוניות וארציות ועוד. הגדרה כזו תאפשר התאגדות תחת חזון משותף לבינוי מאופס אנרגיה, היבט חיוני לאור ריבוי ההגדרות. על תהליך ההגדרה להיות מהיר, להתבסס על מחקרים שנסקרו במסמך זה, על מקרי מבחן ישראליים אשר מוכיחים התכנות ריאלית לצד שאפתנות וקידום שוק הבנייה הישראלי.

לאור בחינת תהליכים דומים בעולם ומצב הוק הישראלי מומלץ כי תהליך ההגדרה יהיה דו-שלבי, כאשר בשלב הראשון, מבנה מאופס אנרגיה יוגדר כמבנה אשר כמות האנרגיה המתחדשת המיוצרת והמיוצאת באתר בו בנוי הבניין שווה לכמות האנרגיה הנצרכת בבניין במשך שנה (מבנה מאופס אנרגיית אתר נטו). הגדרה זו תאפשר לשוק הבנייה להתפתח באופן הדרגתי לאיפוס אנרגטי, ברמות התכנון, הטכנולוגיה והבנייה בפועל. בשלב השני, ההגדרה תורחב לחישובי אנרגיה ראשונית (בדומה להגדרה האמריקנית למבנה מאופס אנרגיה המובאת בפרק 5). הגדרה זו, תהיה בשימוש רק לאחר פיתוח של מקדמי איבוד אנרגיה בין תחנות ההפקה לבתי הצרכנים. הגדרה זו היא הגדרה מקיפה ומתאימה לאיפוס אנרגטי ברמה הלאומית ולמבנים הצורכים אנרגיה מתשתיות החשמל המקומיות. כמו כן הגדרה זו תאפשר תרומה גדולה יותר להתחייבויות המדינה להפחתת פליטות גזי חממה ולהתייעלות אנרגטית ברמה ארצית.

⁸⁴ המועצה הלאומית לכלכלה, משרד ראש הממשלה, הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות, המלצות הצוות הבין משרדי, 2013.

⁸⁵ A Common Definition for Zero Energy Buildings, September 2015, Prepared for the U.S. Department of Energy by The National Institute of Building Sciences.

על מנת להיות מוסמך כבניין מאופס אנרגיה, יהיה על הבניין המדובר להוכיח כי כמות האנרגיה המופקת בו משתווה לזו הנצרכת, לפחות במהלך שנת חייו הראשונה (ע"י הצגת חשבונות חשמל, או על ידי ניטור צריכת האנרגיה באמצעות מונים-חכמים), ובאופן חוזר בכל מספר שנים.

יעד זה אמנם קשה להשגה, בפרט בבנייה רוויה וגבוהה, אולם לקושי הנ"ל יש חשיבות ערכית, מיתוגית וכלכלית – איפוס אנרגטי הוא אכן האתגר הגדול והקשה ביותר להשגה בתכנון מבנים יעילים אנרגטית, בהשוואה לכל תקן או מדד אחר.

7.2.2. מדיניות תכנון ובנייה

מחקר זה הציג פערים רבים, מחד, והזדמנויות רבות, מנגד, בהתייחסות לתכנון ובנייה למבנים מאופסי אנרגיה ונורמות בנייה מקובלות. כותבי מחקר זה ממליצים לייצר תנאים אשר מתעדפים ומעודדים לבנייה מאופסת אנרגיה, תחילה באופן וולנטרי ולא מחייב, כך שהשגתה תהיה קלה יותר לבדיקה וביקורת. לשם מוצעים עדכוני המדיניות הבאים:

על התב"עות בהן ישנה כוונה ורצון ליישם בנייה מאופסת אנרגיה להתייחס להיבטים הבאים לכל הפחות:

1. עדיפות לחלוקת מגרשים אורכית לחזיתות צפון\דרום. חלוקה זו תאפשר תנאים טובים יותר לתכנון פאסיבי, אשר כפי שהוצג בסימולציה, מהווה אחוז משפיע מצד אחד וזול מצד שני להשגת בינוי מאופס. כפי שראינו בבחינה המעשית שבמחקר זה, חזית דרומית גדולה עדיפה כחזית עיקרית לעומת חזיתות מערביות ומזרחיות. על הפרצלציה ושאר המערכות העירוניות (מערכת התנועה, הרחוב, הנוף העירוני הפתוח) להיות מתוכננים בהתאם.

2. המרחק בין הבניינים, החלוקה למגרשים וקביעת גודלם: במקביל וכהשלמה לחלוקת המגרשים יש להקפיד על התחשבות בזכויות שמש והשפעת המבנים זה על זה. מבנים המצלים זה על זה באופן מאסיבי יפחיתו את הסיכוי להשגת בנייה מאופסת לאור התלות בפאנלים פוטו וולטאים להשגת האיפוס. חלוקה זו נעשית באופן היסטורי בהתאם לטיפולוגיות הבנייה והצפיפות הנדרשת. אולם, לא תמיד נלקחים בחשבון אלמנטים אשר ביכולתם להבטיח את היכולת לייצר אנרגיה כמו זכויות השמש, הצללה על שטחי גגות משותפים או על שטחים פתוחים וכו'. פיתוח באיזורים מבונים מחייב התמודדות עם אתגרים קיימים כמו מבנים או אלמנטים אחרים המטילים צל ומצמצמים את האפשרות לנצל את קרינת השמש לייצור אנרגיה. מוצע כי תינתן ליזמים אפשרות לניוד זכויות בנייה בין בניינים ליצירת כיווני אוויר מועדפים ותמריצים לעידוד רכישת זכויות שמש במרקמים בנויים או בתב"עות חדשות. אפשרות זו תסייע למבנים השואפים לאיפוס אנרגטי להשיג את התנאים האקלימיים הנדרשים לאיפוס אנרגטי.

3. צפיפות המרחב הבנוי: צפיפות גבוהה משמעותה אתגר גדול יותר לאיפוס המבנה הבודד (כאשר מדובר בצפיפות נטו, כלומר מספר יחידות הדירור פר מגרש/מבנה). אחוז השטח הבנוי

(מספר הדירות) בעל היכולת להגיע לאיפוס אנרגטי יורד באופן משמעותי עם עליית מס הקומות בבניין, זאת משום שבעוד שטח התכסית עליה ניתן להפיק אנרגיה (כדוגמת תאים פוטולטאים על גג המבנה) נשאר קבוע, כמות האנרגיה המופקת מתחלקת בין מספר גדול יותר של דירות. לכן, יש להתייחס לשטחים פתוחים (פרטיים וציבוריים) כקרקע נדרשת לטובת ייצור אנרגיה.

4. הסדרת חקיקה להפקת אנרגיה בשטחים עירוניים ציבוריים: עדיין לא קיים בישראל מנגנון יציב ובר קיימא המאפשר שימוש בשטחים עירוניים ציבוריים פתוחים לטובת ייצור אנרגיה מתחדשת. זהו אתגר מורכב מבחינות שונות וביניהן, תחזוקה, בעלות קרקע ומתקנים, קרבה למבנים, תכנון עירוני איכותי, מורכבות ריבוי מחזיקי עניין וכד'. מוצע כי תכניות ברמת השכונה והעיר יקצו שטחים במרחב הציבורי להתקנת תאים פוטוולטאים במרחב. במגרשים פנויים, בגגות מבני חנייה וכן הלאה. על מנת להגיע לאיפוס בבנייה רוויה יש להתייחס לכלל המרחב השכונתי כיצרן אנרגיה. תפיסה זו מחייבת בדיקת עומק של שאלות בנושא תחזוקת וניהול המרחבים הללו, ההשלכות של מכירת שטחים אלו, היבטי בעלות ושימוש, ואופן ההתקשרות של חברת החשמל למיקרו גרידים כגון אלו (למשל, האם הם בבעלות ציבורית, פרטית או של חברת החשמל עצמה).

5. גמישות בהתייחסות לחזיתות המבנים: מחקר זו מעודד אימוץ טכנולוגיות בנייה חדשות אשר יתגברו על חסמים הקיימים כיום בשוק הבנייה הישראלית, דוגמא לכך היא הדרישה לתקנת חיפוי האבן – דרישה זו הינה בעייתית בגלל היתרון שיש לשיטת ברנוביץ' ליישומה. שיטה זו אינה מאפשרת בידוד אופטימלי ומוגבלת בהתמודדות עם גשרים תרמיים. מקרה המבחן לבנייה רוויה שנסקר במחקר זו התייחס לטיפוס בנייה מסוים בן 10 קומות. על מנת לאפשר גמישות לטיפוסי בנייה אינטנסיביים יותר, וגבוהים יותר, יש לבחון אפשרות שימוש בחזיתות המבנה להתקנת פאנלים פוטו וולטאים. זוהי נקודה קריטית לאור הגודל הקבוע של הגג (למבנה בין 10 קומות ומבנה דומה לו בן 20 קומות, שטח הגג יהיה זהה) אך הגודל המשתנה של החזיתות מאפשר הזדמנויות נוספות ליצירת אנרגיה. על החקיקה המקומית לאפשר חיפויים סולארים לצורך כך.

6. הכללת צמודי קרקע: התקן הישראלי לבנייה ירוקה (ת"י 5281) אינו כולל מבנים צמודי קרקע מסיבת היותם צרכני קרקע ומשאבים. מס' רשויות (כדוגמת רעננה) מציגות דרישות אוגדן בנייה ירוקה למבנים אלו אך הם אינם נכללים תחת הגדרת בנייה בת קיימא. בהתייחסות לבנייה מאופסת אנרגיה ישנה הזדמנות לשפרם. מאחר ובינוי מאופס אנרגיה מתייחס להיבטי אנרגיה בלבד, שהם פן אחד אחד בתחום הקיימות, ניתן יהיה לכלול בדרישות עירוניות בינוי צמוד קרקע מאופס אנרגיה ללא חשש מהתיירקקות⁸⁶. מחקר זה אף מראה כי השגת יעד איפוס אנרגטי הינו קל ופשוט יותר בבנייה צמודת קרקע. זוהי הזדמנות לכלול

⁸⁶ מדרך להצהרות סביבתיות מהימנות, מניעת התיירקקות – Greenwash, המשרד להגנת הסביבה, 2014.

טיפולוגית בינוי שנזנחה במסגרת הטמעת הבנייה הירוקה בישראל ושינוי גישה זה יפתח את השוק.

ההיבטים שנסקרו בסעיף זה מחייבים כולם **מנהיגות עירונית וארצית** אשר תציב את הבנייה מאופסת האנרגיה כמטרה. ניתן לראות בתהליך אשר בוצע בפורום ה-15, במסגרת הטמעת ת"י 5281⁸⁷ דוגמא והשראה לכוחה של התווית דרך בדרג מקבלי החלטות והתאמה של השוק לדרך זו. כמו כן בהיבט המנהיגות אנו ממליצים לתמוך בגופים בעלי אוטונומיה תכנונית כגון צה"ל או אוניברסיטאות להציב את נושא הבנייה המאופסת כיעד בתכניות הבינוי.

7.3 מודעות אנשי מקצוע

המחקר הראה כי במקרים שנבחנו תכנון יעיל השיג את ההתייעלות האנרגטית הגבוהה ביותר מבין שאר האמצעים הפאסיביים. הדבר מחדד את הצורך בהתמודדות מול חוסר מודעות לנושא תכנון ובינוי יעיל אנרגטית בכלל שרשרת התכנון, הביצוע והפיקוח של המבנים בישראל. אנו ממליצים להתמודד מול חסמי ידע אלו באמצעים הבאים:

א. פתיחת מסלולי התמחות באקדמיה המתמקדים בהתייעלות אנרגטית במבנים:

נכון לכתיבת שורות אלו מרבית מוסדות הלימוד המכשירים את דור העתיד של מקצועות הבנייה מתייחסות לתחום האנרגטי בקורסים מסוימים ומעטים בלבד. לא קיימת דרישה מובנית במוסדות הלימוד לשלב את תחום היעילות האנרגטית בפרוייקטי גמר של סטודנטים לתכנון או הנדסה. פירוש הדבר הוא שדורות העתיד של מקצועות הבנייה אינם מנותבים ככלל לנושא ההתייעלות האנרגטית ונושא המבנים המאופסים בפרט הוא נחלתם של מעטים בלבד באקדמיה. מוצע לפתוח מסלולים ותארים בתחום, אשר יתמקדו בכלל ההיבטים הנדרשים להקמת מבנים מאופסי אנרגיה ואף יבצעו ניסויים ומחקרים באקדמיה.

ב. הקמת גוף בדיקה לאיכות הבנייה (בפרט בתחום האנרגיה):

פרט ליצירת מנגנונים להכשרות יש לוודא את איכות יישום הבינוי ע"י בדיקה ובקרה בפועל⁸⁸. ליקויי בנייה יוצרים נקודות תורפה קונסטרוקטיביות ומערכתיות אשר מונעות מן המבנה לממש את הפוטנציאל האנרגטי המיועד לו. מוצע להקים גוף אשר יעסוק בבדיקות איכות הבנייה. גוף זה יכשיר מהנדסי איכות בנייה שיאתרו טעויות, ישמשו כמדריכים מקצועיים באתרי הבנייה ויוודאו עמידה בחוקים ובתקנות כבסיס ועם דגש על עמידה בדרישות להתייעלות אנרגטית במבנים.

ג. הקמת מנגנון להכשרות מקצועות ליעילות אנרגטית ותכנון מאופס אנרגיה:

⁸⁷ כאמור בחודש יוני 2013 קיבלה מליאת ראשי הערים של פורום ה-15 החלטה לאמץ את התקן הישראלי לבנייה בת-קיימא (בנייה ירוקה) (ת"י 5281) כמדיניות עירונית מחייבת בערי הפורום, החלטה אליה הצטרפו ערים נוספות.

⁸⁸ מחקר של פרופ' יחיאל רוזנפלד, ראש התוכנית לניהול הבנייה בטכניון וד"ר חנן בן עוז מעיד על עומק הצורך, לאור קיומם של ליקויי בנייה ב-100% מהמבנים בישראל. למידע נוסף: זיהוי וניתוח של גורמי שורשיים לליקויי בנייה בביצוע של פרויקטי מגורים, יחיאל רוזנפלד, חנן בן-עוז, הטכניון, 2010.

הכשרת אנשי מקצוע המתמחים בנושאים הייחודיים לבנייה חסכונית באנרגיה (מהנדסים, אנשי מיזוג, פועלי בניין, אנשי איטום וכו'). במסגרת זו יוכשרו בעלי תפקידים להתמחויות בהם קיים מחסור בתחום היעילות האנרגטית. תחום היועצים התרמיים הוא דוגמא מובהקת לחוסר שכזה, הן בהיבט של רמת הידע והן בכמות האוחזים בו. כך במקרה זה יוכשרו יועצים תרמיים או יסופקו הכשרות משלימות ליועצים הקיימים. כמו כן יש לתת דגש על הכשרות עבור מתכנני מבנים ומערכות אלקטרומכניות. בנוסף להכשרות ידע, מנגנון זה יוכל להכשיר שיטות לניהול פרויקטים באופן הוליסטי, הכשרות לתכנון אינטגרטיבי, ייעול התיאום בין אנשי מקצוע ועוד.

7.4 תמרוץ כלכלי

א. שילוב נושא מבנים מאופסי אנרגיה במסגרת תכניות הממשלה להפחתת פליטות גזי חממה:
לקראת ועידת האקלים בפריז, התקבלה בחודש ספטמבר 2015 החלטת ממשלה 542 להפחתת פליטות גזי חממה וייעול צריכת האנרגיה במשק. ההחלטה כאמור הציבה את היעדים הלאומיים הבאים להפחתת פליטות והתייעלות אנרגטית:

– צמצום צריכת החשמל בשיעור של לפחות 17% עד שנת 2030, לפי תרחיש עסקים כרגיל.
– ייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת יעמוד על שיעור של 13% לפחות מסך כל צריכת החשמל בשנת 2025, ובשיעור של 17% לפחות מסך כל צריכת החשמל בשנת 2030
– צמצום הנסועה הפרטית בשיעור של 20% עד לשנת 2030. כמו כן התחייבה מדינת ישראל להפחתה של 26% בפחתה בפליטות גזי חממה לנפש ב-2030 ביחס לרמתן ב-2005 (כלומר 7.7 טונה לפליטות גזי חממה לנפש בשנת 2030 להבדיל מ 10.5 טונה כיום).

בתאריך 10 לאפריל 2016 אישרה הממשלה את תכניות הפעולה הלאומית להפחתת פליטות גזי חממה וייעול צריכת האנרגיה במשק, שהובילו המשרד להגנת הסביבה, משרד האנרגיה, משרד האוצר ומשרד הכלכלה.

להלן הצעות לשימוש בתכניות אלו על מנת לעודד מבנים מאופסי אנרגיה:

• תכנית הפעולה הממשלתית מקצה 500 מיליון שקל כערבויות מדינה להלוואות להתייעלות אנרגטית ו-300 מיליון שקל כמענקים לפרויקטים להתייעלות אנרגטית שיובילו להתייעלות התעשייה, המגזר העסקי והמסחרי והרשויות המקומיות עם דגש לסיוע לעסקים קטנים ובינוניים ורשויות חלשות. מוצע להקצות במסגרת סכומים אלו קטגוריה ייחודית לעידוד בנייה מאופסת אנרגיה בישראל בין היתר ע"י מנגנון תחרותי המציב את מחיר ההפחתה של קוט"ש או טון גזי חממה ומאפשר ליזמים הבונים מבנים מאופסי אנרגיה להציע מבנים יעילים אשר יזכו לתמיכה במסגרת זו.

• הקצאת תמריצי מס לעידוד אנרגיה מתחדשת ושימוש בצידוד יעיל אנרגטי, בדגש על שילובם במבנים מאופסי אנרגיה. במסגרת תמריצי מיסוי אלו יש לבחון תמרוץ לשילובם של אמצעי מיזוג אקטיביים יעילים בתכנון מבנים, ו/או ע"י מיסוי התומך בעידוד התעשייה המקומית המזרימה מוצרים תומכי איפוס אנרגטי לשוק ו/או ע"י תמריצי מיסוי לעידוד ייבוא של טכנולוגיות מתקדמות מרחבי העולם (MVHR, Gas Source Heat Pump וכו').

• התכנית קוראת לקביעת כלים כלכליים לתימרוץ ולסיוע לעמידה בתקן בנייה ירוקה. יש לאפשר את הכללת מבנים מאופסי אנרגיה במסגרת ההחלטות אלו. (לא בסתירה לתמיכה במבנים ירוקים).

• כמו כן, במסגרת פעילות האגף לשימור אנרגיה מתקיימים מאמצים למימוש החלטה 2025 לפיתוח הדרום. התכנית מקצה 50 מיליון ש"ח עד 2020 במתן מענקים להתייעלות אנרגטית לרשויות הדרום, למפעלים ומבני מסחר. מומלץ כי בפרסום המכרזים לתכנית זו יינתן דגש על בניית מבנים מאופסי אנרגיה.

ב. תכניות למתן הלוואות וחבילת מימון מסובסדת למבנים מאופסי אנרגיה:

נקודת המפתח להלוואות אלו הוא שגובה ההחזר השנתי (החזר + ריבית, במידה ויש) לא יעלה על גובה החיסכון הצפוי (כפי שיקבע ע"י סקר אנרגיה). הלוואות אלו יוכלו להינתן ע"י המדינה, רשויות מקומיות, תאגידים עירוניים וכו'. במסגרת תכניות אלו יינתנו מענקים להשגת איפוס אנרגטי הן לבנייה חדשה והן לשיפוץ. תכנית מענקים כזו יכולה להתבצע בשיתוף פעולה רב משרדי (משרד הבינוי והשיכון, משרד האוצר, המשרד להגנת הסביבה, משרד התשתיות, האנרגיה והמים) אשר יקבע קריטריונים לזכאות למענק, סוגי המבנים המתאימים לקבלת מענק וכו'.

את תכנית המענקים ניתן יהיה להשלים על ידי יצירת מאגר של קבלני שיפוצים שיוסמכו בתיאום עם משרד הבינוי והשיכון ו/או משרד התשתיות אנרגיה והמים לבנייה מאופסת אנרגיה. מוצע לכנס צוות שיגבש אסטרטגיה להלוואות "ירוקות", תוך סקירת מנגנונים דומים מהעולם וייעד אותם נקודתית עבור בנייה מאופסת.

ג. יצירת מסגרת רגולטיבית תומכת לתכניות ייעודיות לרשויות ותאגידים עירוניים:

במסגרת זו הממשלה תייצר מסגרת רגולטיבית תומכת שתאפשר לרשויות ותאגידים עירוניים להעמיד אפשרות לאשראי לצורך סיוע בבינוי מבנים מאופסי אנרגיה, למבנים קיימים או חדשים. יש לוודא כי תכניות אלו אינן גרעוניות וכי בכוחן להגביר את הפעילות הכלכלית במשק. מודל דומה פועל ע"י עיריית ת"א דרך "עזרה וביצרון בע"מ" (חברת בת לרשות). במסגרת זו החברה מציעה לדיירים הלוואות מימון ללא ריבית והצמדה. ניתן להתאים תכניות אלו לאיפוס אנרגטי בבינוי.

אפשרויות התמיכה הממשלתיות במנגנונים אלו יכול להתבצע ע"י עידוד רשויות להקים חברות עירוניות המנהלות פרויקטים של שיפוצי מבנים (בשיתוף משרד הפנים או משרד הבינוי והשיכון), העמדת אשראי בערבות המדינה עבור רשויות לתמיכה בשיפוצי מבנים למטרת איפוס, העמדת אשראי לתאגידים עירוניים המבצעים שיפוץ וחיזוק מבנים בתכניות קיימות והוספת היבטי התייעלות אנרגטית לשיפוצים אלו.

ד. מנגנוני המימון באמצעות חברת החשמל:

לכלי מימון חדשניים בשיתוף חברת החשמל יש פוטנציאל גדול להגדלת התעניינות היזמים בבנייה מאופסת אנרגיה. בעולם קיימים מודלים עסקיים המאפשרים ליזמים לממש את הפוטנציאל ולשווקו.

כך למשל מודל ה energy service agreements, מודל המאפשר ליזמים להיעזר בגורם שלישי (ESCO) האחראי על ביצוע אלמנטים להתייעלות אנרגטית בבנייה המתומחרים מול הצרכן בנפרד מיתר הדירה ולתקופה בה החסכון האנרגטי הופך למקור מימון. לצורך כך, חשבון חשמל פיקטיבי משולם על יד רוכש הדירה לגורם השלישי למשך תקופה מחושבת ומוסכמת מראש, בעוד חשבון החשמל האמיתי והמצומצם משולם על ידי הגורם השלישי לחברת החשמל. ההפרש בין החשבונות הוא המימון.

ה. הנחות על עלות הקרקע תמורת התחייבות לעמידה בדרישות בנייה מאופסת אנרגיה:

כפי שתכנית "מחיר למשתכן" מאפשרת סבסוד עד 80% מעלות הקרקע המוצעת לבנייה, מוצע לאפשר הפחתה במיסוי עבור יזמים אשר יתחייבו לבינוי מאופס אנרגיה. ניתן לייצר מנגנון אשר יקצה חלק ניכר מן ההנחה רק לאחר הוכחה **בפועל** לאיפוס אנרגטי לאחר שנת תפעול אחת לפחות כאשר סכום זה יופקד בחשבון נאמנות ויצבור ריבית אשר תעבור אף היא לידי היזמים.

ו. משכנתאות בתנאים מועדפים לדירות מאופסות אנרגיה:

משכנתאות בתנאים מועדפים עשויות לעודד הן את היזמים והן את ציבור רוכשי הדירות. אחד החסמים בתחום המשכנתאות המועדפות לבנייה מודעת אנרגיה נובע מפערי הידע וההבנה הקיימים בין אנשי המקצוע של שוק הבנייה אשר נדרשים לתווך את המידע לאנשי המקצוע של שוק ההון, סוכני הנדל"ן והשמאים. כמו כן, ההוכחה הנדרשת לביצועים העתידיים של הבניין, אינה ניתנת לידוא בשלבי הרכישה. חסם זה מתגבר בתהליכי מיגון המשכנתאות, אשר נמכרות וממוחזרות בשווקי ההון. יחד עם זאת מוצע לבחון את הנושא לאור פוטנציאל החזר ההשקעה הגבוה שבו. הן לאור החזר הוצאות אנרגיה גבוה יותר מזה הקיים בבנייה ירוקה קלאסית והן לאור זאת שמחקר זה הוכיח כי בנייה מאופסת אינה בהכרח נושאת עלות יקרה יותר לצרכן וליזם.

ז. סיוע ביעוץ מקצועי על מנת להתגבר על פערי הידע להשגת בנייה מאופסת אנרגיה:

מתן תמיכה בהקצאת אנשי מקצוע לתמיכה בתהליך התכנון והבנייה ליזמים הבוחרים. הניסיון המצטבר בעלויות בנייה ירוקה מעיד על כך שכלל שניסיונם של העוסקים בבנייה גדול יותר, כך מצטמצמות העלויות הנוספות והלא מתוכננות. הצעה זו תאפשר מתן תכניות תמיכה מקצועיות מבעלי ניסיון אשר ינחו את הצוותים המקצועיים בתכנון נכון ויישום מדויק, בניית תכניות עבודה וליווי בצמתי החלטות קריטיים.

תכניות המימון שנסקרו יכולות להיות מקבילות זו לזו או כחלופות זו לזו, המשותף להן הוא היותן מנועי צמיחה שבכוחם לקדם את המשק ולהוסיף מקומות עבודה. יש לוודא כי קיים מנגנון ביקורת של יישום בפועל עבור כל תכניות אלו.

7.5 מחקר, פיתוח ועידוד חדשנות

א.הקמת חממות חדשנות לטכנולוגיות בנייה:

לטכנולוגיה מתקדמת תפקיד מפתח בפיתוח שוק לבנייה מאופסת אנרגיה. מחקר זה הראה כי השילוב בין תכנון פאסיבי לצד שימוש בטכנולוגיות חדשניות מאפשר השגת בינוי מאופס אנרגיה. הבנה זו מהווה בסיס לצורך חדשנות טכנולוגית בענף הבנייה, לאורך כלל שרשרת הביצוע.

החממות ייסעו לקידום מיזמים הנמצאים בשלב התחלתי, ולסייע בהבאת המיזם מן השלב של הוכחת היתכנות בסיסית לשלב של פיתוח אבטיפוס, תוך מתן כלים מקצועיים וניהוליים. כמו כן הן יעודדו חיבור בין יצרני הטכנולוגיות לבין קרנות הון-סיכון, נציגי הממשלה ושותפים אסטרטגיים מן הארץ והעולם. בנוסף לכך החממות יעניקו ליזמים שירותי ייעוץ, אדמיניסטרציה, סיוע משפטי, עסקי, טכני ופיננסי ועוד, על מנת להקל על תהליך הפיתוח. במסגרת החממה (או באמצעות משרדי המדענים הראשיים במשרדי הממשלה) ניתן לייצר קולות קוראים לפיתוח שיטות בנייה חדשות, המתאימות לשוק הבנייה הישראלי ומכוונות לבינוי מאופס אנרגיה.

ב.הקמת גוף לתיאום ועידוד בנייה מאופסת אנרגיה:

מחקר זה הציג את ריבוי ההיבטים המשפיעים על בינוי מאופס, כמו כן ריבוי הגורמים הממשלתיים, עירוניים ועסקיים הנוגעים לבינוי מאופס אנרגיה. לאור ריבוי מחזיקי העניין דרוש גורם מתאם שיחבר את שלל מוסדות המחקר, החוקרים, קובעי המדיניות, הרשויות, אנשי המקצוע, חברות הטכנולוגיה והיזמים אל השוק. הגורם המתכלל יעזור להם להבין את המגמות הצרכניות ואת אתגרי התעשייה, יוודא כי לא קיימת כפילות במיזמים השונים, יאגם משאבים, יציע תכניות מדיניות ויבחן היבטים משפטיים. כפי שציין המחקר גוף שכזה הוקם ב 2008 באנגליה על מנת לגבש אחדות למושג בנייה מאופסת. הארגון, ⁸⁹ Zero Carbon Hub הוקם כארגון ללא מטרות רווח. עבודתו כללה ארגון, ניהול ותיאום בין המגזר הציבורי והמגזר העסקי שיתוף ותיאום בין אנשי מקצוע, יזמים ובעלי בתים, רשויות שלטון מקומיות, ספקי חשמל, ספקים של חומרי הבנייה, מנהלי תחזוקת מבנים, יועצי בנייה ירוקה ואנרגיה ואחרים. מוצע להקים גוף דומה בישראל, אשר יהווה את חוד החנית בתחום, יזהה חוסרי ידע, יחבר בין משאבים ליוזמות ויקדם את השוק.

ג.מבנים לדוגמה ופרוייקטי חלוץ:

במסגרת עידוד מקרי מבחן מוצע להעניק תמריצים כלכליים וקולות קוראים לפרוייקטי דגל לאיפוס אנרגטי, בתנאי שיחשפו את שיטות התכנון, הצריכה בפועל וכל מרכיב אשר יוכל לקדם את הידע בשוק. ניתן להשתמש ביוזמות קיימות על מנת לעודד פרוייקטי חלוץ כגון דרישה למבני ציבור יעילים

⁸⁹ למידע נוסף ניתן לבחון את אתר הארגון: <http://www.zerocarbonhub.org>. כאמור, פעילות הארגון מוקפאת נכון לשלב אלו, מסיבות פוליטיות, אין בהקפאה זו להעיד על הצלחתו או איכותו של המודל.

וחסכוניים במסגרת הסכמי הגג שחתם המשרד להגנת הסביבה עם רשויות מקומיות, הקצאת פרויקט מ"תוכנית למשתכן" לצורך בחינה והדגמה של בינוי לאיפוס אנרגיה ועוד.

מוצע כי יוקם מאגר ידע פתוח ושקוף עבור כלל פרויקטי החלוץ, מאגר זה יכיל את המידע המקצועי שנצבר כתוצאה מתכנון וביצוע המבנים, יתעד את התהליך מתחילתו כולל סקירת ביצועים בפועל ויצג מסקנות עבור בינוי מאופס עתידי.

כמו כן ניתן לנצל את פרויקטי החלוץ על מנת לפרסמם לציבור, לבצע בהם סיורים ולהפכם לסמל סטטוס אטרקטיבי. מסיבה זו יש לוודא כי פרויקטי החלוץ נוגעים לסוגי בינוי רלוונטים לכלל סוגי האוכלוסיה, מגורים, מבני ציבור וכו'.

ד. אתגור תקינה קיימת

בהכללה גסה ניתן לראות כי השגת איפוס אנרגטי אפשרי בשתי גישות:

1) הגדרת יעד לאיפוס ותכנון "לאחור" על בסיס יעד זה. גישה זו אינה נסמכת על תקינה אלא על ביצועי המבנה בפועל.

2) שיפור התקנים והשיטות הקיימות עד להגעת מקסימום היעילות האפשרית. בגישה זו יש לאתגר את התקנים הקיימים הרלוונטים (ת"י 1045, ת"י 5282, ת"י 5280) ולציין בהם מסלולים התומכים בבנייה מאופסת אנרגיה. מוצע שמסלולים אלו יהיו וולנטרים במהותם. לשם כך יש לכנס וועדות מומחים אשר יבצעו את השיפורים הדרושים. הסקירה הבינלאומית הראתה כי תהליכים דומים בעולם התייחסו לתקני בידוד כבסיס (ת"י 1045) אך ישנו הגיון בשימוש בת"י 5280 לשם כך, עקב היותו תקן הוליסטי הנוגע למס' היבטים במבנה.

תרשים 30 מייצג באופן סמלי את ההיררכיה בין הצעדים הנדרשים לקידום בנייה מאופסת אנרגיה בתרבות הבינוי הישראלי. צעד היסוד הינו הכרזה על בנייה מאופסת ביעד ממשלתי, מהלך אשר בין היתר יציב את ההגדרה על פי יעבוד המשק וכן ניתן יהיה לבצע שינויים במדיניות התכנון, במתן כלים לאנשי מקצוע ובמנגנוני תמרוץ ותמיכה. נושא החדשנות בענף הבנייה הינו חלק בלתי נפרד מקידום מבנים מאופסי אנרגיה אך הוא אינו אקסקלוסיבי לו והוא נוגע לצורך מהותי בענף הבנייה.

תרשים 30: היררכיית צעדים לקידום בנייה מאופסת אנרגיה בישראל



ה. המלצות למחקרי המשך:

מחקר זה זיהה מס' נושאים בהם נדרשת העמקה נוספת לתחום הבינוי המאופס:

1. שכונות מאופסות אנרגיה: בחינת הקמת שכונה מאופסת אנרגיה ע"י מחקר התכנות. המחקר יוביל לקריאה ליזמים להציג מודלים מגוונים ליישום בנייה מאופסת אנרגיה. המערך השכונתי מהווה פוטנציאל לשימוש במרחב מעבר לרמת המבנה הבודד, כדוגמת מודלים של רשת חשמל מקומית (מיקרו-גרید) המוזנת מייצור אנרגיה מקומי שלא נכללו במסגרת עבודה זו.

2. תשתיות רשת החשמל: ריבוי מקורות האנרגיה המפוזרים משפיעים על רשת החשמל. ככל שיעשה שימוש רחב היקף במקורות אנרגיה מתחדשות ללא הכנה מתאימה של רשת החשמל, יגדלו גם התועלות השליליות (כגון עלויות הולכה ואיבודי חשמל). על המחקר המוצע לבחון היבטים שונים בתשתיות החשמל כגון מודלים לסנכרון בין שעות ייצור השיא לשעות הצריכה, הכנת תשתיות ישראל להתבססות על אגירת אנרגיה והסתמכות על אנרגיה מתחדשת בקנה מידה רחב, אפשרויות חקיקה ותשתיות ליצירת מיקרו גרידים שכונתיים ועירוניים ועוד.

3. הסתמכות על התנהגות משתמשים במבנים מאופסי אנרגיה: כפי שהראה המחקר, ישנה הסתמכות רבה על ההיבטים הפאסיביים במבנה לצורך השגת איפוס אנרגטי. התכנון הפאסיבי מניח כי מתקיימת התנהגות מסוימת המאפשר שימוש נכון במבנה כגון פתיחת חלונות, שימוש נכון במיזוג ובתאורה וכן הלאה. מוצע לבחון להעמיק בנושא ע"י מחקר הבוחן אמצעים להשפעה התנהגותית על המשתמשים במבנה מאופס אנרגיה⁹⁰. להבדיל, מוצע לבחון את **ניתוק** החיבור בין תפקוד פאסיבי של מבנה להתנהגות המשתמשים בו ע"י גישת בית חכם השולט בהיבטים אלו ומבצע החלטות ברירות מחדל אופטימליות (כלומר פוטר את הדייר מלהתייחס להיבטים אלו). על מחקר זה לבחון את עלויות גישת הבית החכם, החיסכון הנובע ממנו והעלויות הנדרשות. על המחקר לבחון את גישת הבית החכם למבנים חדשים וקיימים.

4. תחזוקת מבנים מאופסי אנרגיה: תחזוקת המבנה הינה חיונית לכל מבנה ובפרט למבנה מאופס אנרגיה לאור הצורך לשמור על מעמדו כמאופס לאורך שנים. מוצע לבצע מחקר הבוחן שיטות תחזוקה ומימון המתייחסות לשימור תפקוד המבנה לאורך 25 שנים לכל הפחות. בהיבט זה ישנם יתרונות עבור מבנה מאופס אנרגיה המייצר אנרגיה היכולה להוות מקור הכנסה לתחזוקה שוטפת. ניתן לבחון הקמת קרן אחזקה מבנית הדואגת לשמור על איכות המערכות המשותפות במבנה, באזורים המשותפים וכן בחינת מודלים לתחזוקה דירתית.

⁹⁰ מחקר זה יכול להתבסס על מחקרים של רוני דניאל, אביאל ילינק, אריה רותם ואביטל עשת, בחינת כלים מתחום הכלכלה ההתנהגותית ויישומם לקידום בנייה ירוקה בישראל, 2016. הוכן בעבור המשרד להגנת הסביבה, משרד המדענית הראשית.

5.מודלים עבור triple net zero (אנרגיה, מים ופסולת): במבט אל עבר דרגת יישום גבוהה יותר של מבנים מאופסים, המתייחסים לאיפוס מים ופסולת לצד איפוס האנרגיה. איפוס משולש מעלה את החזר ההשקעה אך מחייב חשיבה שונה על צריכה, בנייה יצרנית הניזונה מפסולת, התייחסות לפסולת הבניין כמשאב, מערכות מים מעגליות, ראייה מרחבית ושכונתית לאיפוס משולש וכן הלאה. מחקר שכזה יתווה דרך לעתיד הבינוי בארץ ובעולם לאור מיעוט מקרי מבחן בנושא.

Ecofys by order of European Commission, Towards nearly zero-energy buildings, Definitions of Common principles under the EPBD, Final report, 2013

Ecofys, Groezinger. J, Boermans. T, Ashok, J. Seehusen, J. Wehringer. F, Scherberich, M. Overview of Member States information on NZEBs, Progress Report, October 2014, Project number: BUIDE14975

European Council for an Energy Efficient Economy (eceee), Understanding (the very European concept of) Nearly Zero-Energy Buildings, April 2014

Feldman, D., Brockway, A.M., Ulrich, A., Margolis. R., National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, Shared Solar: Current Landscape, Market Potential, and the Impact of Federal Securities Regulation, April 2015. Technical Report NREL/TP-6A20-63892

HM Government, Department for Communities and Local Government, Definition of Zero Carbon Homes and Non-Domestic Buildings, December 2008. Ref. No.: 08CCSD05675, ISBN: 978-1-4098-0934-0

Heschong Mahone Group, Inc., by order of the Pacific Gas & Electric Company, Road to ZNE: Mapping Pathways to ZNE Buildings in California, CALMAC Study ID: PGE0327.01, 2012

IRENA, The Age of Renewable Power Designing National Roadmaps for A Successful Transformation. 2015

Joke DOCKX, Sustainable and Nearly Zero Energy- Building Strategy in Brussels, Sub-Division, Promotion of sustainable buildings, Brussels Environment, March 2013

Lovins A. 2011, Reinventing Fire, Rocky Mountain Institute
Pacific Gas & Electric Company On behalf of: Southern California Edison, San Diego Gas and Electric Company, Southern California Gas Company, The Technical Feasibility of Zero Net Energy Buildings in California, Final Report. 2012

New Building Institute, List of Zero Energy Buildings report, 2015.
<http://newbuildings.org/wp-content/uploads/2015/11/2015ZNEbuildingsList1.pdf>

Norton, P, Christensen, C. A Cold Climate Case Study for Affordable Zero Energy Homes. 2008. National Renewable Energy Laboratory. U.S. Department of Energy.

The National Institute of Building Sciences (NIBS), Prepared for the U.S. Department of Energy A Common Definition for Zero Energy Buildings, September 2015

Torcellini, P., Pless, S., Deru, M. & Crawley, D. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. ACEEE Summer Study Pacific Grove 15, 2006. doi:10.1016/S1471-0846(02)80045-2

Zero Carbon Hub and NHBC Foundation 2015, Zero Carbon Compendium, The Future of Low Energy Cities and Communities, 2015.

Zero Carbon Hub, Zero Carbon Homes and Nearly Zero Energy Buildings, UK Building Regulations and EU Directives, www.zerocarbonhub.org
Action plan for increasing the number of nearly zero-energy buildings
Ref. Ares(2013),54186 - 16/01/2013

Belgian National Plan, Nearly Zero Energy Buildings Implementation, European Energy Performance of Building Directive. September 2012

Federal Republic of Germany, Communication from the Government of the Federal Republic of Germany to the European Commission of 18 January 2013

Increasing the Number of Nearly Zero Energy Buildings, UK National Plan, September 2012

ד"ר גיל פרואקטור, אגף איכות אוויר ושינויי אקלים, המשרד להגנת הסביבה, עו"ד ליאור שמואלי, EcoFinance - Consulting & Responsible Investments
החלטות הממשלה, לצמצום צריכת החשמל ולהפחתת פליטות גזי חממה, המשרד להגנת הסביבה, יולי 2014

ד"ר גארב י, פרופ' פרלמוטר ד, פרופ' אראל א, פרופ' בקר נ, גולדין ש, סקר תמריצים לבניה ירוקה בעולם והתאמתם לישראל, אוניברסיטת בן גוריון בנגב, המחלקה לאדם במדבר, המכונים לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין, אול' בן גוריון בנגב, יוני 2015

דולב ש, סגל נ, כהן-פארן י, רוזנטל ג, גבאי ד. אפס פליטות פחמן בישראל, חזון למשק האנרגיה בשנת 2040, הסבת משק החשמל של ישראל לנטול פליטות גזי חממה, הפורום הישראלי לאנרגיה, 2013

אלפא פרויקטים ירוקים בע"מ- ארכיטקטורה ופרויקטים ירוקים בישראל, בידוד תרמי בבניה מתועשת, יום עיון חדשנות בבניה- איגוד המהנדסים, מצגת שהוכנה ליום העיון

המועצה הלאומית לכלכלה, משרד ראש הממשלה, הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות, המלצות הצוות הבין משרדי, 2013

ועדת ההיגוי בראשות מנכ"ל משרד האוצר, תכנית פעולה לאומית להפחתת פליטות גזי חממה, דוח סופי, יוני 2011

משרד התשתיות הלאומיות, התוכנית הלאומית להתיעלות אנרגטית, צמצום בצריכת החשמל -2010-2020

משרד התשתיות הלאומיות, מדיניות משרד התשתיות הלאומיות לשילוב אנרגיות מתחדשות במערך ייצור החשמל בישראל, 2010

קוט חגי, וד"ר כ"ץ דוד, המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, עלויות בניה ירוקה בבנייני מגורים בישראל, ינואר 2013,

מתוך מקבץ מסמכים שהציגו ממשלות אירופה לדירקטיבה האירופאית בעניין התקדמות לקראת אימוץ האקט המחייב בנייה הקרובה לאיפוס אנרגטי, לקוחים מדף האינטרנט של הדירקטיבה האירופאית לאנרגיה- <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings/nearly-zero-energy-buildings>

רשימת מרואיינים ותפקידם:

1. ריאיון עם שיכון ובינוי בנושא בנייה מודעת אנרגיה ושאפה למצוינות ואיפוס אנרגטי בקרב יזמים:
אבישי קימלדורף, אדריכל ראשי ויוגב קציר, מנהל פיתוח וקיימות נערך ב 18.6.2015
2. ריאיון עם פרופ' איתי סנד, ראש החוג למדיניות ציבורית באונ' תל-אביב
בנושא מדיניות ייצור אנרגיה ובנייה מודעת אנרגיה בישראל, נערך ב 25.10.2015
3. ריאיון עם דב קוטלר, מנכ"ל חברת סולגל, בנושא אנרגיה סולרית, נערך ב 29.10.2015 ובנושא עלויות
ב 23.03.2016
4. ריאיון עם זיו לזר, הכלכלן הראשי של התאחדות בוני הארץ, בנושא היתכנות בנייה מאופסת אנרגיה על
ידי קבלנים בישראל, נערך ב דצמבר 2015
5. ריאיון עם חן שליטא, מנכ"ל אלפא פרויקטים בע"מ, בנושא מצב בנייה מודעת אנרגיה והיתכנות בנייה
מאופסת אנרגיה בישראל, נערך באפריל ובדצמבר 2015
6. שיחות ייעוץ עם מהנדס אבנר וישקין, בנושאי מערכות איקלום לבנייה מודעת אנרגיה ומאופסת אנרגיה,
תכנון, ועלויות בישראל נערך לאורך הפרויקט, ביוני ובדצמבר 2015, מרץ, מאי 2016
7. שיחת ייעוץ עם הילה מאיר, חברת RTLD יועצי תאורה, בנושא תכנון תאורה מודעת אנרגיה ועלויות
נערך במרץ 2015

נספחים

נספח א – חישוב מאזני אנרגיה

חישוב מאזן האנרגיה בבניין אידיאלי

צריכה כללית בבניין: 90,470 קוט"ש

שטח כולל (מ"ר)	ס"כ ייצור אנרגיה (קוט"ש)***	תאים פוטולטאים שטח התקנה (מ"ר)	דוד שמש		שטח גג אפקטיבי פנוי (מ"ר)	
			שטח נחוץ לדודי שמש (מ"ר)	שטח התקנה (דוד שמש + קולטן)** (מ"ר)		
19 דירות מאופסות לכל הדירות בבניין דוד שמש	44,054	240	260	6.5	500	א. דוד שמש לכל דירה*
27 דירות מאופסות ס"כ 20 דירות עם דוד שמש	62,027	370	130	6.5		ב. עירוב דודי שמש + תאים פוטולטאים
35 דירות מאופסות	80,000	500	0	6.5		ג. מקסימום תאים פוטולטאים

חישוב מאזן האנרגיה בבניין ריאלי

צריכה כללית בבניין: 120,600 קוט"ש

שטח כולל (מ"ר)	ס"כ ייצור אנרגיה (קוט"ש)***	תאים פוטולטאים שטח התקנה (מ"ר)	דוד שמש		שטח גג אפקטיבי פנוי (מ"ר)	
			שטח נחוץ לדודי שמש (מ"ר)	שטח התקנה (דוד שמש + קולטן)** (מ"ר)		
14 דירות מאופסות לכל הדירות בבניין דוד שמש	44,054	240	260	6.5	500	א. דוד שמש לכל דירה*
20 דירות מאופסות ס"כ 20 דירות עם דוד שמש	62,027	370	130	6.5		ב. עירוב דודי שמש + תאים פוטולטאים
26 דירות מאופסות	80,000	500	0	6.5		ג. מקסימום תאים פוטולטאים

* 40 דירות בכל הבניין

** דוד בנפח של 150 ליטר + שני קולטנים. נלקח בחשבון כי דודי שמש יכולים לספק 50% מצריכת המים החמים למשק

בית

*** לפי 1,600 קוט"ש/מ"ר ל-10 מ"ר לשנה

נספח ב – פירוט חישובי עלות הבנייה

1. חישובי עלויות החלונות (מערכות הזיגוג):

לצורך חישוב עלות ההשקעה הנוספת עבור חלונות איכותיים לבנייה מאופסת אנרגיה לעומת מבנה הייחוס, חושבה העלות הכוללת של החלונות כמערכת בכל אחד מן התרחישים ומקרי הייחוס. עלות זו כללה הן את מסגרת החלונות והן את הזיגוג, כיוון שביחד שני אלמנטים אלו משפיעים על טיב רמת המוליכות התרמית הכוללת של החלונות. כמו כן, נלקחו בחשבון סוגי הפתיחה של החלונות, הטה-סובב (דריי-קיפ) ביחידות המאופסות לעומת חלונות הזזה במקרי הייחוס, או הרם-הזז ביחידות המאופסות לעומת דלתות הזזה במקרי הייחוס, כיוון שמתקיימת בהן נעילה משופרת המסייעת למניעת הסננת אוויר דרך החלון. לעומת זאת לא חושבו עלויות התריסים, מנועי התריסים, רשתות היתושים או הידיות למיניהן, הנהלים בין מקרי הייחוס ובין היחידות המאופסות. עלות החלונות במבנה המאופס אנרגיה ובמבנה הייחוס חושבה כלהלן:

לצורך חישוב עלויות החלונות נוסח מפרט אלומיניום הן לדירת הייחוס והן לדירה מאופסת אנרגיה כפי שמודלה והוצגה בפרק 4. מפרטי החלונות כללו נתונים אודות מספר החלונות בדירה, גודל הפתחים, סוג הפתיחה בכל אחד מן החלונות וכן טיב המוליכות התרמית הכוללת הרצויה של החלון. לצורך חישוב העלויות חושב ממוצע של שתי הצעות מחיר, אשר התקבלו מחברות אספקה והתקנה של חלונות. הצעות המחיר הן לקבלן האלומיניום וכוללות הובלה והתקנה, ללא מע"מ. המחירים שנתקבלו נכונים למרץ 2016.

ביחידות הייחוס מפרט החלונות הינו, לפי הגדרות יחידת הייחוס בת"י 5282: במפתחים גדולים מ 2 מ"ר נעשה שימוש בזכוכית בטחון רבודה, (4-0.76-4). במפתחים קטנים יותר נעשה שימוש בזכוכית בודדת (מונוליטית) בעובי 5 מ"מ. לחלונות אלו מסגרות אלומיניום עם אטם בודד וללא כל תוספות כגון ציפוי לסינון הקרינה.

החלונות המשופרים לבנייה מאופסת אנרגיה אופיינו כחלונות בעלי מסגרת מבודדת עם אטמים כפולים או משולשים, זיגוג כפול עם מרווח אוויר.⁹¹ במפתחים גדולים מ 2 מ"ר נעשה שימוש בזכוכית בטחון רבודה. החלונות הפונים לדרום קבלו זיגוג Low e.

להלן רשימה ועלויות לפי מפרטי החלונות:

השוואת עלויות לבנייה רוויה

דירה מאופסת אנרגיה (גודל וטיב הפתחים זהה בתרחיש הריאלי ובתרחיש האידאלי)					דירת ייחוס					הרכיב הירוק: חלונות
U-Value (W/m2K) = 2.2					U-Value (W/m2K) = 5.4					
מנגנון	כמות	גובה	רוחב	סוג	מנגנון	כמות	גובה	רוחב	סוג	
הטה-סובב	5	110	110	1	הטה-סובב	5	110	120	1	
הרם- הזז	1	210	250	2	הזזה כ.ע.כ	2	110	210	2	
דלת (ציר)	1	210	90	3	הזזה כ.ע.כ	1	210	250	3	
הטה-סובב	2	120	30	4	דלת (ציר)	1	210	90	4	
סה"כ ממוצע הצעות מחיר 29,200 ₪					סה"כ ממוצע הצעות מחיר 17,946 ₪					92

⁹¹ בהתאם לחלונות שתומחרו. למשל, 6-12-6 או 4-16-4.

השוואת עלויות לבנייה צמודת קרקע

יחידה מאופסת אנרגיה (גודל וטיב הפתחים זהה בתרחיש הריאלי ובתרחיש האידיאלי)					יחידת ייחוס					הרכיב הירוק: חלונות
U-Value (W/m2K) = 2.2					U-Value (W/m2K) = 5.4					
מנגנון	כמות	גובה	רוחב	סוג	מנגנון	כמות	גובה	רוחב	סוג	
הטה-סובב	5	110	110	1	הטה-סובב	4	110	110	1	
הרם- הזז	1	210	600	2	הזזה כ.ע.כ.	1	210	170	2	
דלת (ציר)	1	210	100	3	הזזה כ.ע.כ.	1	210	300	3	
הטה-סובב	2	120	30	4	דלת (ציר)	1	210	80	4	
הטה-סובב	3	100	50	5	הטה-סובב	3	110	80	5	
סה"כ ממוצע הצעות מחיר 44,000 ₪					סה"כ ממוצע הצעות מחיר 18,817 ₪					
25,183 ₪					הפרש בין דירת ייחוס לדירה מאופסת:					

-מידות אורך ורוחב החלונות הן בס"מ.

2. חישוב עלויות תוספת בידוד:

לצורך חישוב עלות תוספת הבידוד במבנה מאופס אנרגיה התייחסה הבדיקה הן לתוספת הבידוד הנדרש בקירות המעטפת, והן לתוספת הבידוד הנדרש בהיקף פתחי החלונות. העלויות שנבחנו כללו את מחיר חומרי הבנייה ועלויות עבודת היישום.

לצורך חישוב עלויות תוספת הבידוד בקירות המעטפת התייחסנו לבנייה משופרת של שיטת ברנוביץ. קיר ברנוביץ משופר, הינו קיר בטון מחופה אבן, אשר לו שכבה חיצונית ורציפה של בידוד תרמי בין הבטון והאבן. שכבת בידוד זו מונעת את הגשרים התרמיים בבטון, מבטלת את הצורך בפרקטיקה המקובלת של בידוד הקיר בצדו הפנימי, ומאפשרת את מימוש פוטנציאל המסה התרמית של הבטון.

א. עלות קירות המעטפת במבנה המאופס אנרגיה ובמבנה הייחוס חושבה כלהלן:

החלקים הקבועים לשיטת ברנוביץ הקלאסית ולשיטת ברנוביץ המשופרת הם יציקת הבטון לפי השיטה, וצביעת הפנים של קירות המעטפת. אלמנטים אלו הוסרו מחישוב הפרשי העלויות כיוון שהם אינם מושפעים משינויים שנעשו בקיר לטובת שיפור הבידוד.

עבור קירות המעטפת בדירת הייחוס בעלי ערך מוליכות התרמי הכולל של $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ נלקחו בחשבון שכבות הקיר הבאות:

1. בידוד פנימי וקונסטרוקציה לבידוד הפנימי: השיטה הרווחת הינה בניית קיר פנימי מבלוקים

מבטון תאי (איטונג) בעובי 7 ס"מ ולכן היא זו שתומחרה.

2. טיח פנים לקיר איטונג

עבור קירות המעטפת בדירת הייחוס נלקחו בחשבון שכבות הקיר הבאות:

1. על מנת להגיע לקירות מעטפת שערכם התרמי הינו $0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ חושבה תוספת של כ 12 ס"מ

בידוד תרמי לעומת 0 ס"מ של שימוש בחומר זה בקיר "שגרת" בבניין הייחוס.

על מנת להגיע לקירות מעטפת שערכם התרמי הינו $0.45 \text{ W/m}^2\text{K}$ חושבה תוספת של כ 0.06 m^2 בידוד תרמי לעומת 0 m^2 של שימוש בחומר זה בקיר "שגרת" בבניין הייחוס. סוגי הבידוד התרמי היכולים לסייע בביצוע קיר ברנוביץ משופר הינם פוליסטירן מוקצף (EPS), פוליסטירן מושחל (XPS), צמר סלעים קשיח חשוף, צמר זכוכית קשיח חשוף, ולוחות זכוכית מוקצפת המיועדים לשימוש חיצוני. בבחינת עלויות זו התייחסנו ללוחות פוליסטירן מושחל (כדוגמת לוחות המיוצרים על ידי חברת DOW), כיוון שאלו נוסו בשיטת בנייה מתועשת זו (מקור: תרמוקיר ואלפא פרויקטים).

2. קיר גבס פנימי הכולל קונסטרוקציה ולוחות גבס לגמר הפנים של קירות המעטפת:

הפרשי העלויות בין דירת הייחוס והדירות המאופסות אנרגטית הוכפלו בשטח המעטפת הממוצע של דירה צפונית ודירה דרומית במבנה, אשר הינו 105 m^2 . יש לציין כי קיימים אלמנטים נוספים במחיר הכולל של היישום אשר לא נלקחו בחשבון כמו למשל, הצורך בחציבת קירות איטונג למעבר חשמל והצורך בניקוי קירות הבניין לאחר השלמת היציקה⁹³.

הרכיב הירוק: תוספת בידוד לקיר ברנוביץ משופר	דירת ייחוס U-Value ($\text{W/m}^2\text{K}$) = 1.3 עלות למ"ר	דירה מאופסת אנרגיה U-Value ($\text{W/m}^2\text{K}$) = 0.25/0.45 עלות למ"ר
קיר ברנוביץ בסיסי הכולל: טפסנות, עבודה, אבן, זיון, אבזרים, איטום, כיחול	עלות זהה (0 ₪)	עלות זהה (0 ₪)
צבע פנים	עלות זהה (0 ₪)	עלות זהה (0 ₪)
בידוד תרמי פנימי - קיר בלוקים מבטון תאי (איטונג) בעובי 7 cm	תוספות מקובלות מאופיינות לקיר ברנוביץ	תוספות נדרשות מאופיינות לקיר ברנוביץ בבניין מאופס
	98.5 ₪ ⁹⁴	לא נדרש
טיח פנימי (לרבות העבודה)	40 ₪ ⁹⁵	לא נדרש
בידוד תרמי חיצוני: פוליסטירן מושחל (XPS) בעובי 3 cm (עלות החומר בלבד, העבודה לא תומחרה כיוון שהיא נכללת בביצוע קיר המעטפת) (ערך מוליכות תרמית של החומר = 0.033)	לא מקובל	25 ₪ עלות הלוח למ"ר ⁹⁶ של לוחות הבידוד
		עובי של ארבעה לוחות על מנת להגיע לקיר U value = $0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$

⁹³ לאחר ניסוי יישום שיטת קיר ברנוביץ משופר מסוג "אלפא" באתר סולל בונה, נמצא כי יתרון משמעותי נוסף, המוזיל את עלות יישום השיטה המשופרת הוא ביטול הצורך לנקות את האבן לאחר התזת הבטון, שכן לוחות הבידוד חוסמים את המגע של הבטון עם האבן (מקור: אלפא פרויקטים).

⁹⁴ עלות זו נלקחה ממחקר עלויות בנייה ירוקה בבנייני מגורים בישראל, ינואר 2013, חגי קוט וד"ר דוד כ"ץ
⁹⁵ <http://xn--9dbakbby8bchnze.co.il/>
⁹⁶ <http://termokir.co.il/en/>

100 ₪		W(mK)
עובי של שלושה לוחות על מנת להגיע לקיר U value = 0.45 W/m2K בתרחיש הריאלי 75 ₪		
120 ₪ ⁹⁷	לא מקובל	חיפוי קיר בגבס – אומגות המחיר למ"ר לחיפוי גבס באמצעות אומגות בצד אחד של הקיר וללא חומרי בידוד. המחיר כולל את העבודה.
בתרחיש האידאלי: 220 ₪	138.5 ₪	סה"כ עלות מאפיינת
בתרחיש הריאלי: 195 ₪		
81.5 ₪	סה"כ ההפרש בתרחיש האידאלי:	
56.5 ₪	סה"כ ההפרש בתרחיש הריאלי:	

ב. עלות תוספת הבידוד מסביב לפתחי החלונות בבניין מאופס אנרגיה לעומת בניין

הייחוס חושבה כלהלן:

חומר הבידוד הנבחר זהה לחומר הבידוד הכללי לקירות מעטפת הבניין, מאותן הסיבות שהוצגו בסעיף הקודם, וכמו כן, על מנת להפיק תועלת מן העלות המופחתת ברכישה מרוכזת של חומרי בנייה בכמות גדולה בגלל עקרון יתרונות הגודל (economies of scale).
חושב היקף החלונות בחידת הדיור, והוכפל במחיר לוח בידוד פוליסטירן מושחל (XPS) בעובי 3 ס"מ וברוחב 28 ס"מ. זאת בהתאם לעיקרון הנחת החלון במישור הפנימי של הקיר. כמויות אלה, בצירוף עלות ההתקנה הוכפלו במידה הכוללת של הקיף הפתחים בתרחיש האידאלי בה יושם אלמנט זה.

דירה מאופסת אנרגיה		דירת ייחוס	הרכיב הירוק: תוספת בידוד מסביב לחלונות
תרחיש אידאלי	תרחיש ריאלי	לא מתקיים	בידוד תרמי חיצוני: פוליסטירן מושחל

⁹⁷ <http://www.d.co.il/priceList-43470/>

327 ₪	לא מתקיים (0 ₪)	(0 ₪)	(XPS) בעובי 3 ס"מ לרבות עבודת ההתקנה ⁹⁸ וברוחב של 28 ס"מ בהתאם לעיקרון הנחת החלון במישור הפנימי של הקיר, בהיקף פתחי החלונות של הדירה. סה"כ היקף החלונות בדירה הוא 43.2 מ"ר.
327 ₪			הפרש בין דירת ייחוס לדירה מאופסת (דירה מאופסת פחות דירת הייחוס)

השוואת עלויות תוספת הבידוד לבנייה רוויה

עלות בתרחיש האידאלי	עלות בתרחיש הריאלי	הפרש כולל בין יחידת ייחוס ליחידה מאופסת (יחידה מאופסת פחות יחידת הייחוס) כתוצאה משיפורי הבידוד	
8,557.5 ₪	לא קיים	תוספת הבידוד התרמי למעטפת המבנה סה"כ הפרש העלות לדירה לפי: שטח המעטפת הוא 105 מ"ר לדירה בממוצע (כאשר בדירה דרומית שטח המעטפת הוא 85 מ"ר ובדירה צפונית הוא 125 מ"ר) – בתרחיש האידאלי בלבד.	
327 ₪	לא קיים	היקף החלונות לתוספת הבידוד	
		הפרש כולל בין דירת ייחוס לדירה מאופסת (דירה מאופסת פחות דירת הייחוס) כתוצאה משני סוגי שיפורי הבידוד – (החישוב בוצע לתרחיש אידאלי בלבד)	
8,884.5 ₪	לא קיים	סה"כ	

השוואת עלויות תוספת הבידוד לבנייה צמודת קרקע

עלות בתרחיש האידאלי	עלות בתרחיש הריאלי	הפרש כולל בין יחידת ייחוס ליחידה מאופסת (יחידה מאופסת פחות יחידת הייחוס) כתוצאה משיפורי הבידוד	
		סה"כ הפרש העלות ליחידה לפי עלויות לפי מ"א ומ"ר זהות לבנייה רוויה.	
27,710 ₪	19,210 ₪	שטח המעטפת לתוספת הבידוד ביחידה המאופסת (בשני התרחישים הריאלי והאידאלי) הוא 340 מ"ר	
449 ₪	449 ₪	היקף החלונות לתוספת הבידוד ביחידת הייחוס הינו: 59.40 מ"ר	
28,159 ₪	19,659 ₪	סה"כ	

3. חישוב עלויות עבור שיפור הסננה דרך מעטפת הבניין. (איטום אוויר = 0.6 החלפות אוויר לשעה)

לצורך חישוב תוספת עלות הבנייה עבור שיפור מניעת הסננת אוויר דרך מעטפת הבניין עד לרמת איטום אוויר של 0.6 החלפות אוויר לשעה (בבדיקת לחץ אוויר של 50 פסקל) לעומת 1 החלפת אוויר לפי ת"י 5282, התייחסנו אל שיפור אטימות המעטפת לחדירת אוויר כאלמנט רציף והמשכי. כלומר,

⁹⁸ עלות ההתקנה נלקחה ממחקר עלויות בנייה ירוקה בבנייני מגורים בישראל, ינואר 2013, חגי קוט וד"ר דוד כ"ץ

הנחנו שהן במקרה הייחוס של בניין דירות והן במקרה הייחוס של מבנה צמוד קרקע, קירות המעטפת עצמם אטומים היטב, אולם מתקיימת חדירת אוויר בין קירות המעטפת והפתחים למיניהם.⁹⁹ לכן הפרש עלויות הבנייה אמור להתייחס לאיטום הפתחים בלבד. יחד עם זאת חשוב לציין שמאחורי החלטה זו קיימת ההנחה שבכל התרחיש, מבנה הייחוס והמבנה המאופס אנרגטית נבנים באיכות בנייה זהה, שהיא איכות גבוהה, משום שמניעת הסננת אוויר דרך קירות המבנה הינה תלויה איכות העבודה. לכן, העלויות בסעיף זה נגזרות מאיכות ביצוע פרטי האיטום בשלב הבנייה ולא רק מכמות החומרים או היקף העבודה.

עלות איטום הפתחים ברמה מעולה במבנה מאופס אנרגיה לעומת מבנה הייחוס מתייחסת ל:

1. חלונות משופרים: חלונות בעלי אטמים מעולים שעלותם נלקחה בחשבון בסעיף החלונות:

על מנת שחלון יהיה אטום, צריך לכלוא את האוויר בין שני קווי אטמים או יותר. כמות האטמים בחלון, בהתאם לאיכות מסגרת החלון היא אלמנט המשפיע על מחירו.

2. איטום החיבור בין החלונות והדלתות, או כל פתח אחר בבניה (צנרת מים, פתחי מערכת

אוורור/מ"א) לבין קירות המעטפת. האיטום מתבצע במישור הפנימי והחיצוני של החלון.¹⁰⁰.

השוואת עלויות לבנייה רוויה

דירת ייחוס	דירה מאופסת אנרגיה (מתקיים בתרחיש האידאלי)	הרכיב הירוק: שיפור הסננה
היקף הפתחים בדירה (חלונות ודלתות):	היקף הפתחים בדירה (חלונות ודלתות):	חלונות בעלי מספר רב של אטמים
-	הפרש עלויות תחת סעיף 1: חלונות	לכליאת האוויר (כשהחלון סגור)
לא מתקיים (0 ₪)	886 ₪	ביצוע איטום באיכות מעולה בין מסגרת החלונות וקירות המעטפת לפי מ"א של היקף החלונות בדירה ושימוש כפול בסרטי הדבקה המיועדים לאיטום חלונות. היקף סך הפתחים הינו כ 49 מ"ר.
0 ₪	886 ₪	סה"כ
הפרש בין דירת ייחוס לדירה מאופסת (דירה מאופסת פחות דירת הייחוס):		886 ₪

השוואת עלויות לבנייה צמודת קרקע

יחידת הייחוס	יחידה מאופסת אנרגיה (זהה לתרחיש ריאלי ותרחיש אידאלי)	הרכיב הירוק: שיפור הסננה
היקף הפתחים בדירה (חלונות ודלתות):	היקף הפתחים בדירה (חלונות ודלתות):	חלונות בעלי מספר רב של אטמים
-	הפרש עלויות תחת סעיף 1: חלונות	לכליאת האוויר (כשהחלון סגור)

⁹⁹ ביחידות צמודות קרקע כמו גם בדירות גג יש לקחת בחשבון גם את איטום האוויר גם בתקרות.

¹⁰⁰ לפי מחיר של 6 ₪ למ"א לסרטי הדבקה ייעודיים לחלונות כדוגמת מוצרי חברת סיגה, תוצרת שווייץ. מקור: תכנון, בנייה, סביבה, מעש (סיימון הר). ועלות משוערת של רווח קבלני של כ 50%.

ביצוע איטום באיכות מעולה בין מסגרת החלונות וקירות המעטפת לפי מ"א של היקף החלונות בדירה ושימוש כפול בסרטי הדבקה המיועדים לאיטום חלונות. היקף סך הפתחים הינו כ 66 מ"ר.	לא מתקיים (0 ₪)	1,177 ₪
סה"כ	0 ₪	1,177 ₪
הפרש בין יחידת ייחוס ליחידה מאופסת (יחידה מאופסת פחות יחידת הייחוס):		
		1177 ₪

4. חישוב עלויות עבור שיפור מערכות מיזוג האוויר

על מנת לחשב את הפרשי עלויות התקנת מערכות מיזוג האוויר בין בנייה סטנדרטית לבנייה מאופסת אנרגיה הונח שבבנייה סטנדרטית מתקיימת הכנה בלבד למערכות מיזוג אוויר מיני מרכזיות.¹⁰¹ לכן עלות מערכות מיזוג אוויר לדירות הייחוס תומחרה כ 0 ₪. לעומת זאת, מחקר זה מסיק כי בנייה מאופסת אנרגיה מחייבת תכנון מוקדם של מערכת מיזוג האוויר מתקדמת ומכירת יחידות הדיור עם מערכת זו, ולכן היא נלקחת בחשבון בתמחור עלויות הבנייה הנוספות. מערכת המיזוג שנבחרה לדירות מאופסות אנרגיה בבנייה רוויה היא כאמור מערכת אינוורטר inverter, מערכת מיני מרכזית מדגם משאבת חום עם מדחס בתפוקה משתנה עם מנגנון הפעלה אוטומטי. עלותם המשתנה של מערכות אלה עבור התרחישים השונים נעשתה לפי עומסי החום שחושבו בבדיקה היישומית.

השוואת עלויות לבנייה רוויה עבור דירות דרומיות

הרכיב הירוק: שיפור מערכות מ"א	דירת ייחוס	דירה מאופסת אנרגיה תרחיש ריאלי	דירה מאופסת אנרגיה תרחיש אידאלי
תומחר לפי אפיון היחידה וכמות היחידות	מערכת מיני מרכזית סטנדרטית	מערכת מיזוג אינוורטר	מערכת מיזוג אינוורטר
	לא מתקיים (0 ₪)	16,000 ₪	13,000 ₪
הפרש בין דירת ייחוס לדירה מאופסת (דירה מאופסת פחות דירת הייחוס):			
		16,000 ₪	13,000 ₪

השוואת עלויות לבנייה צמודת קרקע

הרכיב הירוק: שיפור מערכות מ"א	יחידת ייחוס	יחידה מאופסת אנרגיה תרחיש ריאלי	יחידה מאופסת אנרגיה תרחיש אידאלי
	מערכת מיני מרכזית	מערכת מיזוג אינוורטר	מערכת מיזוג

¹⁰¹ בדומה להנחה שהונחה במחקר עלויות בנייה ירוקה בבנייני מגורים בישראל, ינואר 2013, חגי קוט וד"ר דוד כ"ץ.

אינוורטר	סטנדרטית	
18,000	18,000 ₪	23,000
תומחר לפי אפיון היחידה וכמות היחידות		
הפרש בין דירת ייחוס לדירה מאופסת (דירה מאופסת זיכוי של 5,000 ₪ זיכוי של 5,000 ₪ פחות דירת הייחוס):		

5. חישוב עלויות למערכות MVHR אוורור מכאני (לתרחיש בנייה צמודת קרקע)

תומחרה יחידת אווריר צח עם מחליף חום: 3500 ₪.¹⁰² כמו כן, נלקחו בחשבון תעלות מערכת האוורור לכניסה ויציאה מן המבנה, בהנחה שתעלות האוורור בתוך הבית הן משותפות למערכת האוורור ולמערכת מיזוג האוויר. מחיר התעלה כ 150 למ"א, חושבו ארבעה מ"א.

יחידת ייחוס	יחידה מאופסת אנרגיה תרחיש ריאלי	יחידה מאופסת אנרגיה תרחיש אידאלי	הרכיב הירוק: מערכת אוורור מכאנית
לא מתקיים (0 ₪)	לא מתקיים	4,100 ש"ח	תומחר לפי אפיון היחידה לרבות תעלות האוורור המבודדות

6. חישוב עלויות עבור תאורה חסכנית

השוואות עלויות הבנייה המשוערות לתאורה בבנייה מאופסת אנרגיה לעומת בנייה סטנדרטית הינה מורכבת משום שתכנון תאורה נכון מתייחס לצרכים הייחודיים של המשתמשים אשר אינם תמיד ידועים מראש. בנוסף, עלות התאורה בדירה קשורה בבחירות אישיות, לפי סגנון ורמות מחירים משתנות לגופי תאורה הקיימים בשוק הקשורים במקור הייצור וטיב הגופים. בבנייה סטנדרטית למגורים לא נהוג לערב ייעוץ מקצועי לתכנון התאורה בדירות ועלויות הקשורות בתאורה מתייחסות להכנות לגופי תאורה בלבד, ללא קשר לסוגי הגופים וסוגי הנורות. לכן, לצורך השוואות עלויות הבנייה במחקר זה, הנחנו שבדירות הייחוס, כמו בבניה הסטנדרטית, עלויות הבנייה אינן כוללות התקנת גופי תאורה, אלא הכנות לגופי תאורה בלבד. לעומת זאת, בדירות מאופסות האנרגיה, עלויות הבנייה כוללות גם את גופי התאורה הייחודיים לתאורת ה LED. עלות ההכנות החשמליות לגופי תאורה אלה אינה שונה מעלות ההכנה לגופים רגילים, אך מצטרפת עבורם עלות התקנתם. מספר גופי תאורה שתומחר זהה למספר ההכנות לגופים על פי המקובל בשוק, כלומר, הכנה אחת לגוף תאורה עבור כל אזור בדירה וביחד 16 הכנות לדירה הנבחרת בתרחיש הריאלי כמו בתרחיש האידאלי.¹⁰³ בחירה זו כאמור אינה מתייחסת לתכנון אישי אופטימלי, אך יכולה לייצג את תוספת מחיר הבסיס לבנייה מאופסת אנרגיה.

¹⁰² היחידה חושבה לספיקה של 255 מק"ש כדוגמת תוצרת מיצובישי דגם LOSSNAY LGH-25

¹⁰³ הכנה אחת לכל חדר שינה, , חדרי הרחצה, מבואת הכניסה, מטבח, פינת אוכל, סלון, מסדרון ומרפסת הן בסה"כ 16 מקורות הארה.

הרכיב הירוק: תאורת לד (LED)	דירת ייחוס	דירה מאופסת אנרגיה (זהה לתרחיש ריאלי ותרחיש אידאלי) הכנות + גופי תאורה ייחודיים לתאורה חסכונית
16 גופי תאורת לד (LED) לדירה לפי 600 ש"ח בממוצע לגוף תאורה ועוד 150 ש"ח להתקנת כל גוף ¹⁰⁴	לא מתקיים (0 ש"ח)	12,000 ש"ח
הפרש בין דירת ייחוס לדירה מאופסת: (דירה מאופסת פחות דירת הייחוס) 12,000 ש"ח		

בחישוב עלות התאורה בבניה הפרטית צמודת הקרקע, הונח כי עלות הבנייה הן ביחידת הייחוס והן ביחידות המאופסות כוללת את גופי התאורה בנוסף להכנות ולהתקנות. כמו כן, הונח שבשל סוג הבנייה, סביר להניח שבחירת הגופים במקרה הייחוס (או בנייה שגרתית) ובתרחישים השונים תהיה בעלות דומה, בהתאם לסגנון האישי והתקציב האישי הרלוונטי. לכן התבטל סעיף התאורה בהשוואת העלויות בבניה זו.

7. חישוב עלויות עבור מערכת פנלים פוטו-וולטאים

עלויות התקנת המערכת הפוטו-וולטאית ביחידות מאופסות האנרגיה נאמדה לפי פרמטרים למחיר שנתנו מיועץ מומחה בתחום.¹⁰⁵

בבנייה הרוויה, בתרחיש האידאלי תומחרה מערכת בגודל של 370 מ"ר נטו, כלומר כ-185 פנלים פוטו-וולטאים המהווים מערכת בעלת תפוקה של 55.5 KWp (קילו-ואט מותקן) עבור 26 דירות מאופסות אנרגיה.

בבנייה הרוויה בתרחיש הריאלי, תומחרה שוב מערכת בגודל של 370 מ"ר נטו, כלומר כ-185 פנלים פוטו-וולטאים המהווים מערכת בעלת תפוקה של 55.5 KWp (קילו-ואט מותקן), אך בתרחיש זה 19 דירות מאופסות בלבד, כלומר העלות היחסית של המערכת לכל דירה גבוהה יותר.

בבנייה צמודת קרקע, בתרחיש האידאלי תומחרה מערכת פנלים פוטו-וולטאים המיועדת לתת מענה לצריכה שנתית של 4,140 קוט"ש לשנה, כלומר 2.7 KWp מותקן על מנת להגיע לאיפוס אנרגטי. יחד עם זאת, יש לציין ששטח הגג של המבנה בתרחיש זה הוא 70 מ"ר, כלומר יכול להכיל 35 פנלים פוטו-וולטאים שהם 10.5 KWp מותקן, אשר יאפשרו מבנה בעל מאזן אנרגיה חיובי (Positive Energy), שתומחר גם הוא.

בבנייה צמודת קרקע, בתרחיש הריאלי תומחרה מערכת פנלים פוטו-וולטאים המיועדת לתת מענה לצריכה שנתית של 5,384 קוט"ש לשנה, כלומר 3.3 KWp מותקן על מנת להגיע לאיפוס אנרגטי. יחד עם זאת, יש לציין ששטח הגג בתרחיש זה הוא 80 מ"ר, כלומר יכול להכיל 40 פנלים פוטו-

¹⁰⁴ נתוני עלויות גופי התאורה הם שילוב ממוצע הצעת מחיר מדירה לדוגמא דומה בייחודיותה האנרגטית, והתייעצות עם יועצת התאורה הילה מאיר מחברת RTLD יועצי תאורה.

¹⁰⁵ ייעוץ בכל הנוגע לתכנון תפוקת המערכת ואומדן העלויות ע"י דב קוטלר מחברת סולגל.

וולטאים שהם 12 KWp מותקן, אשר יאפשרו מבנה בעל מאזן אנרגיה חיובי (Positive Energy), שתומחר גם הוא.

עבור מבנה הייחוס בכל התרחישים לא תומחרה מערכת פוטו-וולטית כיוון שהונח כי היא אינה קיימת. הונח כי כל המערכות לייצור אנרגיה סולרית המותקנות פונות לדרום האבסולוטי ומותקנות בתנאים אידאליים.

השוואת עלויות לבנייה רוויה ולבנייה צמודת קרקע

רכיב הירוק: מערכת ייצור אנרגיה סולארית				בנייה רוויה (גג שטוח, התקנה אופטימלית)		בנייה צמודת קרקע (גג משפוע פונה לדרום האבסולוטי)	
				תרשיש ריאלי		תרשיש אידאלי	
				מאזן מאופס	מאזן חיובי	מאזן מאופס	מאזן חיובי
שטח המערכת (שטח הגג, מ"ר, נטו)				370		70	
גודל ייצור האנרגיה במערכת, הביקוש (קוט"ש לשנה)				לא רלוונטי לחישוב		לא רלוונטי לחישוב	
מספר הפנלים הפוטו-וולטאים				185		35	
גודל המערכת (קילו-ואט מותקן, KWp)				55.5		10.5	
עלות המערכת				305,250 ₪			
מספר יחידות הדיור מאופסות האנרגיה				תרשיש ריאלי		תרשיש אידאלי	
				19		26	
תוספת עלות הבנייה עבור מערכת פוטו-וולטאית לפי יחידת דיור *				16,065 ₪		11,740 ₪	
				36,300 ₪	96,000 ₪	29,700 ₪	84,000 ₪

- עלות הכוללת את מחיר ההתקנה, החשמל, הממיר והמונה לכל דירה
- מחיר למערכת בהספק 55.5 קילוואט מותקן הוא כ 5,500 ₪ לקילוואט
- מחיר למערכת בהספק 10.5 או 12 קילוואט מותקן הוא כ 8,000 ₪ לקילוואט
- מחיר למערכת בהספק של כ 3 קילוואט מותקן הוא כ 11,000 ₪ לקילוואט

8. חישוב עלויות עבור דוד שמש סולארי

רכיב הירוק: דוד שמש סולארי			בנייה רוויה (גג שטוח, התקנה אופטימלית)		בנייה צמודת קרקע (גג משפוע פונה לדרום האבסולוטי)	
			מקרה ייחוס	תרשיש ריאלי	תרשיש אידאלי	מקרה ייחוס
						תרשיש אידאלי

עלות כוללת	2000 ₪	2000 ₪	2000 ₪	2000 ₪	2000 ₪
------------	--------	--------	--------	--------	--------

העלות נאמדה לפי מחירי אומדן לקולטני דוד שמש, הכוללים את מחיר ההתקנה. המחיר אינו כולל את דוד המים החמים ומנגנון החימום החשמלי הקונבנציונלי הקיים בכל התרחישים ויחידות הייחוס. בנוסף הונח כי במקרה הייחוס של הבנייה הרוויה לפחות 28 יח"ד (ארבע יח"ד ל 7 הקומות העליונות של הבניין) מתומחרות עם קולטני שמש. כלומר, לכל דירה מאופסת אנרגיה בתרחישים הריאלי והאידיאלי יש מקבילה בעלת קולטני שמש במקרה הייחוס.

9. חישובי זיכוי עלויות עבור תכנון קומפקטי (שינוי גיאומטרי של הדירה):

תכנון קומפקטי מאפשר ניצול נכון של שטח החלל ביחס לשטח המעטפת. היתרון מתבטא הן מבחינה אנרגטית והן מבחינת עלות הבנייה הראשונית.

בבנייה הרוויה, שטח מעטפת הבניין צומצם מ כ- 150 מ"ר ל כ-85 מ"ר לדירה דרומית ולכ-125 מ"ר לצפונית. חישוב כלכלי של ערך הזיכוי נעשה עבור ממוצע של 45 מ"ר לדירה משום שמספר הדירות הדרומיות זהה למספר הדירות הצפוניות. כמו כן, שטח המעטפת של הדירות זהה בתרחיש הריאלי ובתרחיש האידיאלי.

בבנייה צמודת הקרקע שטח המעטפת של הבניין הצטמצם ב 30 מ"ר מ 370 מ"ר ל 340 מ"ר. על מנת לחשב את ערך הזיכוי עבור בניית מעטפת מבנה מאופס אנרגיה חושבה תחילה עלות הבנייה לקיר ברנוביץ סטנדרטי עבור מבנה הייחוס. לאחר מכן חושבה עלות הבנייה למעטפת משופרת עבור מבנה מאופס אנרגיה. לבסוף חושב ההפרש, כלומר, יחידה מאופסת פחות יחידת הייחוס. המחירים בהתאם למפורט בסעיף 2 של חישוב תוספת עלויות הבנייה בשל שיפור מעטפת הבניין.

רכיב הירוק: בנייה קומפקטית	דירת ייחוס U-Value (W/m ² K) = 1.3 עלות למ"ר	דירה מאופסת אנרגיה U-Value (W/m ² K) = 2.5 עלות למ"ר
קיר ברנוביץ בסיסי הכולל: טפסות, עבודה, אבן, זיון, אבזרים, איטום, כיחול. עלות למ"ר הינה	1,420 ₪ ¹⁰⁶	1,420 ₪ ¹⁰⁷
צבע פנים כולל שפכטל	25 ₪ למ"ר ¹⁰⁸	25 ₪ למ"ר ¹⁰⁹
	תוספות מקובלות מאופיינות לקיר ברנוביץ	תוספות נדרשות מאופיינות לקיר ברנוביץ בבניין מאופס

¹⁰⁶ <http://www.civileng.co.il/>

¹⁰⁷ <http://www.civileng.co.il/>

¹⁰⁸ עלות זו גם היא נלקחה ממחקר עלויות בנייה ירוקה בבנייני מגורים בישראל, ינואר 2013, חגי קוט וד"ר דוד כ"ץ

¹⁰⁹ עלות זו גם היא נלקחה ממחקר עלויות בנייה ירוקה בבנייני מגורים בישראל, ינואר 2013, חגי קוט וד"ר דוד כ"ץ

לא נדרש	98.5 ₪ ¹¹⁰	בידוד תרמי פנימי -קיר בלוקים מבטון תאי (איטונג) בעובי 7 ס"מ
לא נדרש	40 ₪ ¹¹¹	טיח פנימי (לרבות העבודה)
25 ₪ עלות הלוח למ"ר ¹¹² של לוחות הבידוד, בעובי ארבעה לוחות לקיר בתרחיש אידאלי= 100 ₪	לא מקובל	בידוד תרמי חיצוני: פוליסטירן מושחל (XPS) בעובי 3 ס"מ (עלות החומר בלבד, העבודה לא תומחרה כיוון שהיא נכללת בביצוע קיר המעטפת)
עובי של שלושה לוחות על מנת להגיע לאיכות הקיר בתרחיש הריאלי = 75 ₪		
120 ₪ ¹¹³	לא מקובל	חיפוי קיר בגבס: המחיר למ"ר לחיפוי גבס באמצעות אומגות בצד אחד של הקיר וללא חומרי בידוד. המחיר כולל את העבודה.
1,640 ₪ בתרחיש הריאלי	1,583.5 ₪	סה"כ עלות למ"ר:
1,665 ₪ בתרחיש האידאלי		
237,525 ₪		סה"כ עלות לדירת הייחוס (150 מ"ר):
166,267.5 ₪		סה"כ עלות לדירה מאופסת אנרגיה (105 מ"ר) בתרחיש הריאלי:
174,825 ₪		סה"כ עלות לדירה מאופסת אנרגיה (105 מ"ר) בתרחיש האידאלי:
71,257.5 ₪ זיכוי		הפרש בין דירת ייחוס לדירה מאופסת בתרחיש הריאלי: (דירה מאופסת פחות דירת הייחוס)(ההפרש מחושב ל 45 מ"ר)
62,700 ₪ זיכוי		הפרש בין דירת ייחוס לדירה מאופסת בתרחיש האידאלי: (דירה מאופסת פחות דירת הייחוס)(ההפרש מחושב ל 45 מ"ר)
585,895 ₪		סה"כ עלות ליחידת הייחוס דופלקס (370 מ"ר):
557,600 ₪		סה"כ עלות ליחידת דופלקס מאופסת אנרגיה בתרחיש הריאלי (340 מ"ר):
566,100 ₪		סה"כ עלות ליחידת דופלקס מאופסת אנרגיה בתרחיש האידאלי (340 מ"ר):
28,295 ₪ זיכוי		הפרש בין יחידת ייחוס ל יחידת מאופסת בתרחיש ריאלי: (ההפרש מחושב ל 30 מ"ר)

¹¹⁰ עלות זו נלקחה ממחקר עלויות בנייה ירוקה בבנייני מגורים בישראל, ינואר 2013, חגי קוט וד"ר דוד כ"ץ

<http://xn--9dbakbby8bchnze.co.il/>¹¹¹

<http://termokir.co.il/en/>¹¹²

<http://www.d.co.il/priceList-43470/>¹¹³

- לפי מחיר ברנוביץ המקורי, לפי מחירי מחירון הכוללים את הרכיבים הבאים: יציקת קיר ברנוביץ, בניית קיר בלוקי איטונג פנימי, טיח וצבע .

נספח ג – הרחבת דוגמאות בינלאומיות למדיניות מבנים מאופסי אנרגיה

א. התווית מדיניות לקראת מבנים "קרובים" למאופסי אנרגיה בגרמניה:

ממשלת גרמניה מחוייבת ליעדים שאפתניים. במטרה להוביל להפחתה של 40% בפליטות גזי החממה עד לשנת 2020, ולאחר מכן הפחתה של 80% עד לשנת 2050 (בהשוואה ל-1990), האחריות לניהול מדיניות לצמצום צריכת האנרגיה במבנים נעשית בשיתוף בין-משרדי ובראשות משרד הכלכלה והאנרגיה.

Challenge, Support, Inform - strengthen market forces הוא קו האסטרטגיה המדינית לעידוד שוק הבנייה למימוש יעד זה, והוא מתאפיין בהיערכות מערכתית רב-תחומית של גופים ממשלתיים ציבוריים ופרטיים.

Challenge
איתגור שוק הבנייה על ידי עדכון מערך ההחזקה הקיימת להתייעלות אנרגטית במבנים הנקרא: Energy Conservation Regulation, EPBD. חקיקה זו כוללת: Energy Saving Ordinance, EnEV חוק המחייב עמידה במספר פרמטרים לאיכות התרמית של חלקי מעטפת המבנה, בהתאם לסוג הבנייה ולהיותה בנייה חדשה או שיפוץ. מידי כמה שנים נעשית רויזיה לחוק המאפשרת החמרה בדרישות להתייעלות אנרגטית, לצד הבטחת כדאיותו הכלכלית וגמישות ישימותו הטכנולוגית. למשל, השנים 2014 ו 2016 מייצגות כל אחת שיפורים של כ 12.5% התייעלות אנרגטית בחוק. כמו כן, חקיקה בתחום תכנון יעיל עבור תשתיות אנרגיה ואיקלום בתכנון שכונות ובהתחדשות עירונית.¹¹⁴
Support
מתן תמריצים כלכליים כחלק מתכנית KfW Efficiency Houses KfW היא קבוצת בנקים למשכנתאות בבעלות המדינה, המקצה סכום כספי לטובת הלוואות מוזלות לבנייה יעילה אנרגטית. למשל, כ 4.5 מיליון יורו הוקצו לטובת התכנית בין השנים 2012 ו 2014. ההנחה בריבית מתייחסת לאחוז צמצום צריכת האנרגיה הראשונית השנתית (primary energy) ביחס למבנה בר ייחוס חדש. ההתייעלות האנרגטית נמדדת ביחס לסעיפי האנרגיה בתקנות הבניה התקפות, ה EnEV, והן יכולות להיות בין 40% , 55% או 70%. למשל, מבנה שהוא KfW 40 efficiency house, (לרבות פאסיב האוס) אינו צורך יותר מ 40% מהצריכה הכוללת השנתית של מבנה הייחוס. מבנים המוגדרים 40 או 55 מקבלים מענק החזר של 10% מגובה ההלוואה.¹¹⁵
Inform - strengthen market forces
מתן יעוץ מסובסד להתייעלות אנרגטית: במטרה להגביר את חשיפת הקהל לתוכן הנדרש, בין היתר למימוש הטבות המשכנתא המסובסדת. לצורך כך קיים מערך שיתוף פעולה בין הממשלה ויועצים פרטיים, המאפשר קבלת יעוץ אנרגטי מסובסד לבעלי בתים. גובה ההשתתפות עד כ 400 יורו או לחלופין כ- 50% מעלות הייעוץ. לצורך כך קיים מאגר נותני יעוץ המאושר על ידי המדינה.

¹¹⁴ כשני שלישי ממאגר בנייני המגורים הקיימים נבנה לפני 1978, השנה בה נכנס לתוקף תקן הבידוד המחייב הראשון. ב 2002 נכנס לראשונה תקן ההתייעלות האנרגטית המחייב הראשון.

¹¹⁵ מקור: <http://www.bmwi.de/EN/Topics/Energy/Buildings/kfw-programmes,did=686652.html>

**ב. מבנים "מוכנים" לאיפוס אנרגטי בארצות הברית, משרד האנרגיה האמריקאי:
Builders Challenge program, Zero Energy Ready Home (ZERH)**

משרד האנרגיה האמריקאי, באמצעות ה Building Technologies Office (BTO) מנהל את התכנית Building America Program המקדמת ויוצרת מגנוני תקינה ועידוד לבנייה איכותית למגורים. מטרתה להוות מקור מימוני וניהולי למחקר ופיתוח ידע ופרקטיקה בדגש על חדשנות, איכות, שיווינות, ונוחות בבנייה למגורים.

היא מנהלת את התכנית DOE's Better Buildings Zero Energy Ready Home (ZERH) (2011).^{116 117} מבנה Zero Energy Ready Home (ZERH), נמדד בקטגוריות הבאות (חלקן מרשמיות וחלקן תפקודיות):

קטגוריות מחייבות	דרישה
1. איכות הבנייה והתייעלות אנרגטית	Baseline
2. מעטפת בניין	המתייחס ל IECC 2012 חוק הבנייה המחייב כמבנה ייחוס חלונות ושאר חלקי המעטפת לפחות או טובים יותר מ Energy Star Homes
3. מערכות מ"א	דרישות ספציפיות למערכת תעלות מ"א בתוך המעטפת התרמית של הבניין
4. צמצום צריכת מים	דרישות ספציפיות להתייעלות מערכות חימום מים והפצת המים החמים בבנין
5. תאורה ומכשירים	ENERGY STAR Certified Products
6. איכות אוויר מעולה במבנה	EPA Indoor airPLUS
7. מוכנות לאנרגיה מתחדשת	EPA Renewable Ready checklist
קטגוריות רשות	דרישה
חסכון במים בפנים המבנה ומחוץ לו	EPA WaterSense specifications/Label
מוכנות לאסונות טבע ומזיקים	IBHS Fortified Homes plus Termite Protection
Quality Management	Building America QA Best Practices

בהתאם לאזור האקלים (בארצות הברית שמונה אזורי אקלים), נדרשים רמת התייעלות האנרגטית וייצור האנרגיה באתר הופך מרשות לחובה.

תקן Zero Energy Ready Home (ZERH)

¹¹⁶ התכנית בגרסתה הקודמת Builders Challenge (2008), למעלה מ 14,000 מבנים הוסמכו מאז 2008 לאתגר זה, מה שמעיד על הצלחתו של משרד האנרגיה האמריקאי בקידום תכניות מדיניות להתייעלות אנרגטית בבנייה למגורים.

¹¹⁷ תקן להתייעלות אנרגטית של המשרד להגנת הסביבה (EPA), Energy Star, הוא מבנה שעבר פיקוח והסמכה בתהליך מרשמי או תפקודי והוא בעל התייעלות של 15-30% בצריכת האנרגיה ביחס לבנייה חדשה לפי חוק הבנייה המחייב, IECC 2009.

האנרגיה הנמדדת	אנרגיה מתחדשת (RES) מינימאלית כאחוז מסך האנרגיה הראשונית המותרת	Energy Benchmark צריכת האנרגיה הראשונית המקסימאלית (kWh/m ² /year)
Source Energy סך האנרגיה הראשונית והנצרכת לכלל שימושי המבנה	בהתאם לאזור האקלים (חלוקה לפי שבעה אזורים אקלימיים בארצות הברית) ובהתאם לגודל המבנה למשל,	הממוצע הכללי הוא 45.5% התייעלות אנרגטית לעומת חוק הבנייה המחייב (IECC 2012). ההתייעלות משתנה בהתאם לאזור האקלים* אזור אקלים 1, 2 ו-3 הדומים לאזורי האקלים ד, ב ו-א, ג (לפי הסדר) מאופיינים בהתייעלות אנרגטית של כ-45 אחוז בהשוואה לאחוז התייעלות אנרגטית באזור אקלים 7 (הקר ביותר) (לא נמצאה התייחסות להבדלים שבין אזורים לחים לעומת יבשים)

*-כיוון שההסמכה היא מרשמית ותפקודית, הנתונים הם ממוצעים לתעודות הדירוג האנרגטי

(HERS)

-מקור נתונים: DOE Zero Energy Ready Home, 2014

ג. בריסל לקראת חיוב כל התחלות הבנייה לרמת ההתייעלות של פאסיב האוס: 118

סיכום כלים מדיניים בבריסל למבנים מצויינים Exemplary Buildings	
עידוד יצירת ביקושים	תמיכה כלכלית בפרויקטים:
	- מענקים ממשלתיים לשיפורים במעטפת הבניין ומערכות איקלום - מרבית הדרישה הגיעה מסקטור המגורים. מענקים בתקצוב ממשלתי: עבור כל מ"ר של מבנה מגורים שזכה להשתתף בתכנית ניתן החזר של 100 יורו. לכל מ"ר של מבנה שאינו למגורים ניתן החזר של 50 יורו למ"ר, כאשר רף המענק המקסימלי לפרויקט כלשהו היה 200,000 יורו. - מנגנון נוסף שקיים בבריסל ובא לסייע הוא Brussels Green Loan
	הדרכה לקהילה המקצועית על שימוש ותפעול מבנים יעילים אנרגטית:
	-פתיחת מרכזי הדרכה לציבור הרחב. מתן פגישות ייעוץ
	PLAGE Program- Local Action Plan for Energy Management הושקעו כ-8 מיליון יורו בשנות התכנית
שיפור הידע והניסיון המעשי	-סקטור הבנייה חוזק באמצעות הכשרות לכלל המקצועות הרלוונטיים בשוק הבנייה, מחקר איסוף הידע הקיים, פרסום תוצאות מעקב אחר צריכת אנרגיה, פרסום מאמרים וספרים רבים בנושא.
	קריאה לפרויקטים לדוגמא: Exemplary Buildings Program מבנים אלו זכו לנראות ציבורית ופרסום רב. נערכו בהם סיורים לקהל המקצועי לטובת חשיפת הידע. כמו כן, נפתח פורטל אינטרנטי למאגר ידע על הפרויקטים ועל תהליכי ביצועם, www.bepassive.be
שיפור ההיצע	הכשרות למצויינות
	עידוד הכשרות גם לבעלי מקצועות הבנייה כולל אנשי מקצוע מובטלים באמצעות ארגונים שותפים
אימוץ תהליכי חקירה	- עידוד חברות פרטיות הפועלות בתעשיית הבנייה ויצרני אלמנטים לבנייה באמצעות ארגונים לוביסטיים וארגונים מקומיים לבנייה ירוקה, אלפי שעות הדרכה במימון או הנחה ממשלתית - ניתן ייעוץ מקצועי טכני חינוכי ליישומי התקן, באמצעות שיתוף פעולה בין הממשלה ואנשי מקצוע מומחים בתחום.
	EPB Legislation, COBRACE

¹¹⁸ מקורות: <http://www.environnement.brussels>
<http://www.slideshare.net/ClusterEcobuild/ulb-pmpa2m>

נספח ד – אקלים ותקינה ישראלית

האקלים בישראל

ישראל שוכנת בתפר שבין חגורת האקלים הסובטרופי הים-תיכונית והסובטרופי הגשומה¹¹⁹. לחלקיה הצפוניים של ישראל ולאזורי החוף שלה – אקלים ים-תיכוני המאופיין בקיץ חם ללא משקעים ובחורף קריר וגשום בעוד שחלקיה הדרומיים והמזרחיים מאופיינים באקלים מדברי חם וצחיח לכל אורך השנה¹²⁰. יש המציינים חלוקות אקלים משניות, כגון – אזור האקלים הערבותי (הנמצא בתפר שבין אזורי האקלים הסובטרופיים ומאופיין באקלים צחיח למחצה), אזור החוף (המאופיין בלחות גבוהה בהשפעת הים התיכון) או אזור הגליל העליון, החרמון ורמת הגולן (המאופיין באקלים ממוזג).

תרשים אזורי אקלים בישראל



ניתן להבחין, אם כן, כי על אף שטחה הקטן נתונה ישראל להשפעה של מספר סוגי אקלים. הכרת מאפייני האקלים באזורים השונים ואופן רתימתם, יחד עם מאשבי הטבע המקומיים, לטובת איקלום הבניין, יכולה להוות הזדמנות לשיפור הנוחות התרמית בו ללא שימוש באמצעים מכאניים תוך צמצום צריכת האנרגיה.

תקן ישראלי (ת"י) 1045 – בידוד תרמי של בניינים¹²¹ מציג חלוקה מפושטת של ישראל לפי ארבע אזורי אקלים. החלוקה בתקן זה התבססה אך ורק על הפרשי טמפרטורות, כיוון שמטרתו העיקרית של התקן היא התאמת רמות בידוד למבנים באזורים השונים. למפה זו השפעה רבה על מבנים בישראל, שכן תקנים ומדריכים ישראליים רבים מתבססים עליה.¹²² החלוקה לאזורי האקלים לפי מפה זו היא:

אזור אקלים א' – רצועת החוף

אזור אקלים ב' – מישור החוף והשפלה, הנגב, העמקים הצפוניים

אזור אקלים ג' – אזור ההר

אזור אקלים ד' – אזור בקעת הירדן הערבה

תקנים ליעילות אנרגטית במבנים בישראל

¹¹⁹ Weather, O. Israel and Palestine Weather. at <http://www.weatheronline.co.uk/reports/climate/Israel-and-Palestine.htm>

¹²⁰ Israel Science and Technology. Climate and Seasons in Israel. at

<http://www.science.co.il/Weather/Israel-Climate.php>

¹²¹ מכון התקנים הישראלי. ת"י 1045 - 10. 2002.

¹²² יש לציין שחלוקה זו נעשתה במקורה על פי פרמטר אחד והוא טמפרטורת האוויר. לעומת זאת, גורמים משפיעים אחרים כמו הלחות באוויר או קרינת השמש המשפיעים על אסטרטגיות תכנוניות כמו חימום סולארי פאסיבי וצינון באידוי. חלוקה אחרת מתקיימת בתקן 5280, אנרגיה בבניינים אשר אימצה את שיטת קביעת האקלים לפי קריטריונים של ימי מעלה להסקה וימי מעלה לקירור לצד תנאי הלחות כפי שעושה תקן ה-ASHRAE האמריקאי (אדאל, 2015).

בישראל אין כיום מנגנונים המקדמים בנייה מאופסת אנרגיה באופן ספציפי. ובכל זאת, ישנם מספר מנגנונים (מחייבים או וולנטריים) הנוגעים לצמצום צריכת האנרגיה במבנים. גירסתו הראשונה של תקן ישראלי (ת"י) 1045 נכתבה בסוף שנות ה-70, ובהדרגה, לצד ההבנה של מקבלי ההחלטות בצורך להתמודד מול אתגרי האנרגיה העולמיים והמקומיים, נכתבו מספר תקנים הנוגעים לחיסכון אנרגטי. חלק

זה במחקר מציג בקצרה את התקנים הרלוונטיים ליעילות אנרגטית במבנים בישראל.

ת"י 1045 – בידוד תרמי של בניינים

מטרתו של ת"י 1045 היא קביעת סף מינימום לבידוד תרמי של המעטפת החיצונית במבנים בישראל, על מנת להשיג תנאי נוחות בסיסיים תוך מניעת עיבוי על גבי מעטפת הבניין (מכון התקנים, 2002). בהתאם לתקנות התכנון והבנייה, תקן זה הוא תקן מחייב – כל בניין מגורים חייב לעמוד בדרישות התקן הישראלי בתחום הבידוד התרמי. התקן מתייחס לפרמטרים מגוונים, ביניהם:

- ההתנגדות התרמית המינימאלית של אלמנטים אלמנטים במעטפת כגון קירות חוץ, גגות ורצפות.

- תיאור התכונות התרמיות של חומרי בנייה שונים

ת"י 5280 – אנרגיה בבניינים

ת"י 5280 מגדיר את הרמה המחייבת של הביצועים האנרגטיים הנדרשים מבניינים בישראל. התקן צפוי להיות תקן אב לנושא האנרגיה בבניינים. ת"י זה מתבסס במידה רבה על נתונים מת"י 1045, אך הוא מורכב ממספר פרקים ותתי-פרקים המתייחסים למעטפת ולאטימת הבניין, למערכות הזיגוג בבניין, להצללות, לאוורור טבעי, לתאורה ועוד. התקן נכתב כמחייב, ועל פי התכנון הנוכחי צפוי להיות חלק מדרישות החוק במסגרת קוד הבנייה.

ת"י 5281 – בנייה בת קיימה (בנייה ירוקה)

ת"י 5281: מציג את הרמה המינימאלית הנדרשת לבנייה ירוקה בישראל. התקן הוא תקן וולנטרי, אך לפי החלטת פורום ה-15 הערים הגדולות בישראל (מיוני 2013) מס' ערים בישראל מאמצות אותו כתקן מחייב עבור בנייה חדשה.

ת"י 5281 מתייחס להיבטים מגוונים הנוגעים לבנייה בת קיימה, כגון: אנרגיה, קרקע, מים, חומרים, בריאות ורווחה ועוד. יחד, מציגים הפרקים השונים בתקן התייחסות הוליסטית רחבה על איכות הבניין וביצועיו. יש לציין כי תחום האנרגיה הינו המרכיב ה"כבד" ביותר ביחס לניקוד הניתן בו, כך שעל אף היותו תקן המתייחס למגוון היבטים, מרכיב האנרגיה עדיין מרכזי בו.

דירוג הבניינים נקבע ע"י צבירת ניקוד בפרקים השונים. הדירוג מתורגם למספר כוכבים המעידים על רמת המבנה:

ת"י 5282 – דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה

מטרתו של ת"י 5282 היא עידוד שימור אנרגיה בסביבה הבנויה בישראל, ע"י הגדרת סולם לדירוג מבנים לאור צריכת האנרגיה בהם לאקלום. גם ת"י 5282 הוא תקן וולנטרי, אך מאחר ות"י 5281

מפנה לת"י 5282 לשם עמידה בתנאי סף בפרק האנרגיה, החלטת פורום ה-15 לאימוץ ת"י 5281 הופכת את גם את ת"י 5282 לתקן מחייב בערים אלו. לרמת הביצועים של הבניין מוענק ציון אשר מתרגם לדירוג על פי מפתח צבעים, על מנת להקל על קריאות הדירוג.

תקנים ישראלים נוספים הרלוונטיים לאיפוס אנרגיה הינם:

ת"י 5068 – מערכות זיגוג בבניינים

ת"י 62548 – העוסק בתכן מערכות פוטו-וולטאיות (PV)

ת"י 61400 – העוסק בטורבינות רוח

ת"י 4777 – סדרת תקנים העוסקת בדרישות חיבור מערכות אנרגיה לרשת החשמל

תקנים בינ"ל לבנייה ירוקה רלוונטיים לישראל:

• LEED – Leadership in Energy and Environmental Design: התקן אמריקאי לבנייה ירוקה, וכיום התקן הנפוץ ביותר בעולם לבנייה בת קיימה. בדומה לת"י 5281, LEED בוחן מספר תחומים הנוגעים לבנייה בת קיימה, וגם הוא מבוסס על צבירת נקודות. הבסיס לתקן זה הוא חיסכון כלכלי פוטנציאלי בתפעול ואחזקת בניינים, לאור שילובם של אמצעים "ירוקים" בבניין. פרק האנרגיה בתקן זה הוא אמנם בעל משקל הנקודות הרב ביותר, אולם ניתן לקבל הסמכה לתקן גם על ידי התייעלות אנרגטית מינימאלית ביותר.

בישראל, ישנם מספר מבנים בולטים בעלי הסמכת LEED, ביניהם: בניין פורטר באוניברסיטת ת"א, Ecotower, מבני תעשייה ומשרדים של חברות אינטל ו-HP ועוד.

• BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method: התקן הבריטי לבנייה ירוקה, והתקן לבנייה ירוקה הראשון שנכתב (עוד בשנת 1998). מטרתו של התקן היא צמצום הנזקים הסביבתיים הנגרמים משימוש במבנים (צמצום פליטות הפחמן הדו-חמצני עקב צריגת אנרגיה במבנים), ויש בו התייחסות גם לזיהום ולתחבורה. גם תקן זה מבוסס על צבירת ניקוד, וגם בו, על אף שפרק האנרגיה הוא המשמעותי ביותר – ניתן לקבל הסמכה על ידי התייעלות אנרגטית מינימאלית יחסית.

נספח ה – ת"י 5281 והתאמתו למבנה מאופס אנרגיה

במהלך כתיבת המחקר, עלה הצורך בבחינת התאמת מבנה מאופס אנרגיה לת"י 5281. הצורך עלה במטרה לענות על מדיניות הדיור הציבורי בישראל. חשוב לציין שמטרת ההשוואה היתה להוכיח שתכנון ובנייה של מבנה מאופס אנרגיה יענה על חובת ההוכחה למימוש של התקן הישראלי לבנייה ירוקה, אך לא להיפך. כלומר, צבירת הניקוד בת"י 5281 המובאת כאן, אינה מעידה על כלל האמצעים והצעדים הנדרשים למימוש מבנה מאופס אנרגיה. למרות שבדיקה זו התייחסה למבנה משרדים, הוחלט להראות אותה כתשתית להשוואה והתאמת התקן הישראלי לבנייה ירוקה (ת"י 5281 גרסת 2011) ליישומם של מבנים מאופסי אנרגיה (הבדיקה נעשתה במשרד תמי הירש אדריכלים, במקור לבקשת עיריית ת"א עבור בדיקת פיילוט מקומי).

להלן שתי טבלאות המתייחסות לנושא. בטבלה הראשונה, סקירה של נקודות התקן המתייחסות פעם אחת לפרוגרמה לתכנון מבנה מאופס אנרגיה, פעם שנייה לפרוגרמה בסיסית למבנה שהמשרד מציג למבני משרדים הנדרשים לעמודה בת"י 5281 ופעם שלישית האם הוא נכלל בפרויקט פיילוט למבנה מאופס אנרגיה – על מנת להוכיח לרישוי המקומי את תועלות הפרויקט.

בטבלה השנייה סיכום הניקוד לפי פרקי ת"י 5281 (חלק 3 בנייני משרדים, 2011) בהתייחס לעובדה שגם אם ייבחר פיילוט מבנה מאופס אנרגיה, תהיה עדיין חובת יישום של אלמנטים בסיסיים כמו ניהול אתר, הפרדת פסולת, חיטון במים וכד', אשר חלקם בבחינת חיוב הרשות המקומית, וחלקם תוצר חיוב הסמכת פרויקטים לת"י 5281 כחלק מתהליך הרישוי הבנייה.

פרוגרמה בסיסית להתעדת מבנה מאופס אנרגיה על-פי ת"י 5281 (לפי מהדורה 2011 חלק 3 לבנייני משרדים)

מאפיין ע"פ ת"י 5281 - 3 משרדים	האם נכלל בפרוגרמה למבנה מאופס אנרגיה?	האם נכלל בפרוגרמה בסיסית לת"י 5281 (55 נק')	האם יכלול בפרויקט הפיילוט?
01 פרק אנרגיה			
1.1 ביצועים אנרגטיים של הבניין			
1.1.1 תכנון ביו-אקלימי - חימום וקירור פסיביים (תנאי סף)	כן	כן	כן
1.1.2 תכנון ביו-אקלימי - שמש וצל (תנאי סף)	כן	כן	כן
1.1.3 דירוג אנרגטי לפי התקן הישראלי ת"י 5282 חלק 2 (תנאי סף)	כן	כן	כן
1.1.4 תאורה טבעית בשטחי ציבור פנימיים	כן	כן	כן
1.2 מערכות הבניין			
1.2.1 ביצועים אנרגטיים של התאורה (תנאי סף)	כן	כן	כן
1.2.2 חימום מים	כן	כן	כן
1.2.3 אנרגיה מתחדשת באתר	כן	לא	כן
1.2.4 מערכת חימום, אוורור ומיזוג אוויר	כן	כן	כן
1.2.5 אמצעים משניים למדידה ובקרה של האנרגיה	כן	כן	כן
1.2.6 מערכת ניהול אנרגיה בבניין (BEMS)	כן	לא	כן
1.2.7 מערכות שינוע פנימיות (מעליות)	כן	כן	כן
1.2.8 פתרונות למערכות מידע (IT) בעלות ניצולת אנרגיה גבוהה	כן	לא	?

02 פרק קרקע			
2.1 בחירת אתר	כן	כן	כן
2.2 קרקעות ואתרים מזוהמים (סקר הסטורי)	כן	כן	לא
2.3 צפיפות הבנייה והפיתוח	כן	כן	כן
2.4 תופעת אי החום העירוני	כן	כן	כן
2.5 מירוב השימוש בקרקע	כן	כן	כן
2.6 שימור אדמת חישוף וקרקע מקומית לשימוש חוזר	לא	לא	לא
2.7 זיהוי אקולוגיה של האתר (תנאי סף)	כן	כן	לא
2.8 התאמת הבנין לתבליט הטבעי ולתוואי השטח	לא	לא	לא
03 פרק מים			
3.1 חיסכון בשימוש במים שפירים בבניין	כן	כן	כן
3.2 אמצעי מדידה משניים ואמצעי בקרה - מים (תנאי סף)	כן	כן	לא
3.3 חיסכון במיים שפירים להשקייה בגינון (תנאי סף)	כן	כן	לא
3.4 ניהול מי נגר עילי וניקוז	כן	כן	לא
04 פרק חומרים			
4.1 בחירת חומרים ומוצרים בעלי תו ירוק (תנאי סף)	כן	כן	לא
4.2 חומרים ממוחזרים	כן	כן	לא
4.3 חומרים ומוצרים מקומיים	כן	כן	לא
4.4 חומרים ממקור אחראי	כן	כן	לא
05 פרק בריאות ורווחה			
5.1 תכנון ביו-אקלימי - רוח (תנאי סף)	כן	כן	כן
5.2 אוורור נוחות	כן	כן	כן
5.3 אספקת אויר צח ממקור נקי (תנאי סף)	כן	כן	כן
5.4 איכות האוויר בתוך בניין בעל מערכות אוורור מאולצות (תנאי סף)	כן	כן	כן
5.5 שליטה ברמת המשתמש - תאורה (תנאי סף)	כן	כן	כן
5.6 שליטה ברמת המשתמש - תאורה טבעית, בוחק וסנוור	כן	כן	כן
5.7 שליטה ברמת המשתמש - טמפרטורה (תנאי סף)	כן	כן	כן
5.8 קשר עם החוץ (מבט לנוף) (view out)	כן	כן	לא
5.9 אור טבעי ונוחות ויזואלית	כן	כן	כן
5.10 סנוור הנובע מתאורה פנימית וחיצונית	כן	כן	כן
5.11 רמות תאורה פנימיות וחיצוניות	כן	כן	כן
5.12 שימוש בנורות בעלות מקדם מסירת צבע (CRI 80) לפחות	כן	כן	כן
5.13 איכות אקוסטית - רמת רעש מרבית	כן	כן	לא
5.14 איכות אקוסטית - מעבר רעש	כן	כן	לא
5.15 הגבלה של תרכובות אורגניות נדיפות (VOC), תרכובות ברום (BFR) וקרינה רדיואקטיבית (תנאי סף)	כן	כן	לא
5.16 קרינה אלקטרומגנטית וקרינה מיקרו-מגנטית (תנאי סף)	כן	כן	לא
5.17 פוטנציאל התחממות גלובלית (GWP) בשל חומרי קירור (תנאי סף)	כן	כן	לא
06 פרק בפסולת			
6.1 ניהול הפסולת התפעולית (תנאי סף)	כן	כן	לא
07 פרק תחבורה			
7.1 נגישות לתחבורה ציבורית וחלופית (תנאי סף)	כן	כן	לא
7.2 מתקנים וחנייה לאופניים	כן	כן	לא

7.3 מסלולים בטוחים עבור הולכי רגל ורוכבי אופניים	לא	כן	כן
08 פרק ניהול אתר בנייה			
8.1 הפרדה ואחסון באתר הבנייה של פסולת בניין הניתנת למחזור או לשימוש חוזר (תנאי סף)	לא	כן	כן
8.2 מחזור, שימוש חוזר וסילוק פסולת בניין ועודפי עפר (תנאי סף)	לא	כן	כן
8.3 מזעור השפעות אתר הבנייה (תנאי סף)	לא	כן	כן
8.4 בדיקות לפני מסירה (commissioning) של המערכות בבניין	כן	כן	כן
8.5 מדריך למשתמש בבניין	כן	כן	כן
8.6 שיתוף מחזיקי עניין	לא	לא	לא
8.7 מלווה בנייה בת-קיימה (בנייה ירוקה)	כן	כן	כן
09 פרק חדשנות			
9.1 שימוש בשיטות בנייה חדשניות	לא	לא	לא
9.2 שימוש בבניין ככלי למידה	לא	לא	לא
9.3 חדשנות נוספת	כן	לא	כן

נקודות ת"י 5281 הרלוונטיות למבנה מאופס אנרגיה: סיכום

נקודות ת"י 5281 הרלוונטיות למבנה מאופס אנרגיה: השוואה בין ת"י למבנה מאופס אנרגיה			
פרק	אסטרטגיות	ניקוד לת"י 5281	ניקוד אפשרי במסגרת של מבנה מאופס אנרגיה
1. אנרגיה	אלמנטים פסיביים: חימום וקירור פסיביים, מערכות אוורור טבעי, הצללות, בידוד מעטפת המבנה (קירות, גגות, זיגוג וחלונות), תאורה טבעית, דירוג אנרגטי.	20	29
	מערכות אקטיביות: מע' תאורה בעלת יעילות אנרגטית גבוהה, מע' מיזוג אוויר בדרג אנרגטי גבוה, מע' בקרה ומדידת אנרגיה, מעליות בעלות יעילות אנרגטית גבוהה, ייצור אנרגיה באתר.	9.5	18.75 (47.75)
2. קרקע	בחירת האתר, שימוש בחומרים המצמצמים את אפקט אי החום העירוני, הן במעטפת והן בפיתוח; טיפול בעצים קיימים.	4.4	תנאי סף
3. מים	התקנת קבועות שרברבות ואברזים המצמצמים את השימוש במים שפירים בבניין מעבר לנדרש בחוק, התקנת אמצעי מדידה משניים ואמצעי בקרה, שימוש באמצעים שמפחיתים את השימוש במים שפירים להשקיה, טיפול במי הגשם הנופלים על המגרש.	8	2* דרישת מינימום בתקן = 7 נק' ועוד 6 נק' למינימום
4. חומרים	מוצרים וחומרים מקומיים, מוצרים בעלי תו ירוק, מוצרים ממקור אחראי, חומרים ממוחזרים, חומרים בשימוש חוזר.	5	תנאי סף
5. בריאות ורווחה	נוחות תרמית, נוחות ויזואלית, אוורור נוחות, הגנה מפני תנאים קיצוניים והגנה מפני קרינה אלקטרומגנטית, מיקור מגנטי. שליטה ברמת המשתמש.	7.9	0.5 תנאי סף
6. פסולת	הפרדת פסולת ל-2 זרמים ומחזור מרכיב אחד נוסף.	1	תנאי סף
7. תחבורה	תחבורה ציבורית אינה מרחקת מהמבנה; מתקני חניית אופניים, שבילי אופניים והולכי רגל ישולבו בתכנית הפיתוח.	2.5	תנאי סף
8. ניהול אתר בנייה	תכנית לניהול סביבתי ותכנית לניהול פסולת בניין, יתבצע מיון והפרדה של פסולת בניין הניתנת למחזור ל-5 סוגים, פסולת הבניין תפונה ותסולק למחזור באתר מורשה, ינקטו אמצעים לצמצום כמות פסולת הבניין ועודפי עפר יטופלו אף הם, יתבצעו בדיקות לפני מסירה, יימסר מדריך למשתמש בבניין.	4.75	תנאי סף
9. חדשנות	יבחנו אלמנטים ייחודיים בבניין	0	2
סה"כ פרוגרמה לתקן		63.05	טול נק' סף
			61.15

מקור המידע לנספח זה הינה חברת תמי הירש אדריכלים, הניתוח ההשוואתי בוצע עבור עיריית ת"א. יש לציין כי השוואה זו כוללת אלמנטים אשר ניתן להגדירן כמערכות תומכות לאיפוס אנרגטי אשר ת"י 5281 מעודד את שילובן במבנה, אך הן אינן חיוניות לעצם האיפוס. דוגמא למערכת כזו היא מערכת ניהול אנרגיה בבניין (BEMS). לסירוגין ישנן מערכות כגון מעליות יעילות אנרגטית אשר לא נבחנו מאחר והגדרת האיפוס בה נעשה שימוש במחקר זה מתייחסת לצריכת אנרגיה עבור אקלום ותאורה בלבד.

נספח ו – חישוב והערכת תועלת כספית וסביבתית למשק

במסגרת השיח שנוצר בעקבות המחקר בוצע חישוב תועלות כספיות וסביבתיות עבור איפוס אנרגטי של מבנים צמודי קרקע (כפי שמתבטאות לפי טונות פליטות פחמן דו חמצני) ע"י מר זיו לזר, מנהל המחלקה הכלכלית בהתאחדות בוני הארץ, כלכלן ואנליסט עם ניסיון רב בביצוע בדיקות כדאיות פרויקטים. צוות כותבי המחקר התבסס על הנחות היסוד של חישובים אלו על מנת לבצע הערכה דומה עבור התועלות הכספיות והסביבתיות של איפוס אנרגטי לבנייה רוויה בישראל. יש לציין כי תנאי יסוד להתגשמות תחזיות כלכליות אלו הינו אימוץ כל או חלק מן ההמלצות שפורטו בפרק 7 העוסקות במדיניות תומכת בבנייה מאופסת אנרגיה בישראל. פרט להתוויית מדיניות, מתן כלי ידע, תמריצים, הכשרות, מקרי מבחן וכל הלאה, החישוב מבצע את ההנחות הבאות:

- המדינה תאמץ חזון שבו 30% מהמבנים בבנייה רוויה ו- 40% מצמודי הקרקע יהיו מאופסי אנרגיה עד לשנת 2030 (ואף טרם שנה זו) וכן פרקטיקות לקידום בנייה מאופסת אנרגיה כפי שצויין.

- הגידול הממוצע בהתחלות הבנייה הוא 1.017

- מס' המבנים צמודי הקרקע ירד בהדרגה מכ-25% כיום ל 13% מסך התחלות הבנייה. כלומר תתקיים ירידה שנתית בשיעור הבנייה צמודת הקרקע של כ-5% בשנה (והמענה לגידול האוכלוסיה ינתן באמצעות בנייה רוויה).

- צריכת אנרגיה מחשמל ודלקים במשק בית ממוצע הינה שוות ערך ל 8,600 קוט"ש, בדומה לכיום.

- עלות קוט"ש בש"ח הינו 0.533, בדומה לכיום.

- סך הפליטות לקוט"ש בייצור חשמל (gco2e) הינו 0.670.

בהינתן מימוש הנחות אלו עד 2030 ייחסכו לציבור המשתמשים, באופן מצטבר, כ- 1.2 מליארד ש"ח כתוצאה מאיפוס יח"ד צמודות קרקע, וכ- 3.2 מליארד כתוצאה מאיפוס יח"ד בבנייה רוויה (סה"כ כ- 4.2 מליארד ₪). כמו כן יחסך למשק כ-4 מליון טון פליטות פחמן דו חמצני כתוצאה מאיפוס יח"ד בבנייה רוויה וכן כ-1.5 מליון טון כתוצאה מאיפוס יח"ד צמודות קרקע (סה"כ 5.5 מליון טון).

להלן טבלאות החישוב:

טבלת חישוב תועלות כלכליות וסביבתיות – עבור בנייה רוויה מאופסת אנרגיה

שנה	כלל התחלות בניה	שיעור בניה צמודת קרקע של 1-2 יחידות	משקי בית = אומדן מספר דירות כולל בישראל	שיעור בניה רוויה	דירות בהתחלות בניה בבנייה רוויה	חדשות מאופסות מסך הבניה הרוויה באותה שנה	מספר דירות מאופסות מאגבר	שיעור דירות מכלל הדירות במדינה	צריכת אנרגיה שנתית למשק בית צמוד קרקע - קו הייחוס	חסכון ממוצע לדירה מאופסת אנרגיה	חסכון פוטנציאלי מצטבר בקוט"ש בבנייה רוויה	חסכון פוטנציאלי מצטבר בש"ח בבנייה רוויה	חסכון פוטנציאלי ב- tCO2e
2016	51,000	25%	2,460,000	75%	38,250	0.0%	419	0.0%	8,600	100%	3,603,810	1,920,830	2,415
2017	55,000	24%	2,515,000	76%	41,905	1.0%	1,347	0.1%	8,600	100%	11,583,673	6,174,098	7,761
2018	60,000	23%	2,575,000	77%	46,395	2.0%	3,229	0.1%	8,600	100%	27,766,271	14,799,423	18,603
2019	60,000	22%	2,635,000	78%	47,042	4.0%	6,724	0.2%	8,600	100%	57,823,506	30,819,929	38,742
2020	55,000	21%	2,690,000	79%	43,688	8.0%	13,470	0.5%	8,600	100%	115,845,598	61,745,704	77,617
2021	55,935	20%	2,745,935	80%	44,978	15.0%	22,725	0.8%	8,600	100%	195,436,211	104,167,501	130,942
2022	56,886	19%	2,802,821	81%	46,274	20.0%	32,240	1.1%	8,600	100%	277,263,838	147,781,626	185,767
2023	57,853	18%	2,860,674	82%	47,574	20.0%	44,460	1.5%	8,600	100%	382,357,446	203,796,519	256,179
2024	58,836	17%	2,919,510	83%	48,881	25.0%	57,009	1.9%	8,600	100%	490,274,249	261,316,175	328,484
2025	59,837	16%	2,979,347	84%	50,194	25.0%	72,463	2.4%	8,600	100%	623,180,743	332,155,336	417,531
2026	60,854	15%	3,040,201	85%	51,514	30.0%	88,316	2.8%	8,600	100%	759,513,609	404,820,754	508,874
2027	61,888	15%	3,102,089	85%	52,842	30.0%	104,569	3.3%	8,600	100%	899,294,421	479,323,926	602,527
2028	62,941	14%	3,165,030	86%	54,179	30.0%	121,226	3.8%	8,600	100%	1,042,546,269	555,677,162	698,506
2029	64,011	13%	3,229,040	87%	55,524	30.0%	138,290	4.2%	8,600	100%	1,189,293,755	633,893,571	796,827
2030	65,099	13%	3,294,139	87%	56,879	30.0%							
סה"כ											6,075,783,401	3,238,392,553	4,070,775

טבלת חישוב תועלות כלכליות וסביבתיות – עבור בנייה צמודת קרקע מאופסת אנרגיה (בוצע ע"י זיו לזר)

שנה	כלל התחלות בניה	שיעור בניה צמודת קרקע של 1-2 יחידות	התחלות בניה צמודת קרקע	שיעור דירות חדשות מאופסות מסך הבניה צמודת הקרקע באותה שנה	התחלות בניה דירות מאופסות אנרגיה	מספר דירות מאופסות אנרגיה מצטבר	משקי בית = אומדן מספר דירות כולל בישראל	שיעור דירות חדשות חסכוניות מכלל הדירות במדינה	צריכת אנרגיה שנתית למשק בית צמוד קרקע - קו הייחוס	חסכון ממוצע לדירה מאופסת אנרגיה	חסכון פוטנציאלי בקוט"ש	חסכון פוטנציאלי מצטבר בש"ח בבנייה צמודת קרקע	חסכון פוטנציאלי ב- tCO2e
2016	51,000	25%	12,750	0.0%	-	-	2,460,000	0.0%	8,600	100%	-	-	-
2017	55,000	24%	13,095	2.0%	262	262	2,515,000	0.0%	8,600	100%	2,252,381	1,200,519	1,509
2018	60,000	23%	13,605	5.0%	680	942	2,575,000	0.0%	8,600	100%	8,102,721	4,318,750	5,429
2019	60,000	22%	12,958	10.0%	1,296	2,238	2,635,000	0.1%	8,600	100%	19,246,226	10,258,239	12,895
2020	55,000	21%	11,312	20.0%	2,262	4,500	2,690,000	0.2%	8,600	100%	38,703,140	20,628,773	25,931
2021	55,935	20%	10,957	30.0%	3,287	7,787	2,745,935	0.3%	8,600	100%	66,971,255	35,695,679	44,871
2022	56,886	19%	10,612	40.0%	4,245	12,032	2,802,821	0.4%	8,600	100%	103,477,508	55,153,512	69,330
2023	57,853	18%	10,279	40.0%	4,112	16,144	2,860,674	0.6%	8,600	100%	138,836,421	73,999,812	93,020
2024	58,836	17%	9,956	40.0%	3,982	20,126	2,919,510	0.7%	8,600	100%	173,084,054	92,253,801	115,966
2025	59,837	16%	9,643	40.0%	3,857	23,983	2,979,347	0.8%	8,600	100%	206,255,333	109,934,092	138,191
2026	60,854	15%	9,340	40.0%	3,736	27,719	3,040,201	0.9%	8,600	100%	238,384,085	127,058,718	159,717
2027	61,888	15%	9,046	40.0%	3,618	31,338	3,102,089	1.0%	8,600	100%	269,503,077	143,645,140	180,567
2028	62,941	14%	8,762	40.0%	3,505	34,842	3,165,030	1.1%	8,600	100%	299,644,044	159,710,275	200,762
2029	64,011	13%	8,487	40.0%	3,395	38,237	3,229,040	1.2%	8,600	100%	328,837,723	175,270,506	220,321
2030	65,099	13%	8,220	40.0%	3,288	41,525	3,294,139	1.3%	8,600	100%	357,113,886	190,341,701	239,266
											2,250,411,855	1,199,469,518	1,507,776